



**Facultad de Ingeniería  
Escuela de Construcción Civil**

**INFLUENCIA DEL VIDRIO RECICLADO  
COMO FILLER SOBRE LA RETRACCIÓN  
HIDRÁULICA EN HORMIGONES  
AUTOCOMPACTANTES**

**POR**

**SEBASTIÁN ALEJANDRO  
FUENTES RAMÍREZ**

Tesis para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Construcción  
y al Título de Ingeniero Constructor.

**PROFESOR GUÍA: SR. JUAN EGAÑA RAMOS**

**DICIEMBRE, 2017**

## INDICE

<b>RESUMEN.....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>6</b>
<b>CAPITULO I: ANTECEDENTES GENERALES .....</b>	<b>7</b>
1.1.- Introducción.....	7
1.2.- Objetivos.....	10
1.2.1.- Objetivo General.....	10
1.2.2.- Objetivos Específicos .....	10
1.3.- Hipótesis .....	10
1.4.- Alcances.....	11
1.5.- Metodología de la Investigación.....	12
<b>CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
2.1.- Aspectos Generales del Hormigón Autocompactante .....	14
2.1.1.- Propiedades del HAC en Estado Fresco .....	14
2.1.2.- Propiedades del HAC en Estado Endurecido.....	15
2.2.- Constituyentes del Hormigón Autocompactante .....	17
2.2.1.- Cemento.....	17
2.2.2.- Grava.....	17
2.2.3.- Arena.....	17
2.2.4.- Filler.....	18
2.2.5.- Aditivos.....	19
2.3.- Ensayos de Control de Calidad y Caracterización.....	19
2.3.1.- Ensayo de Flujo de Asentamiento de Cono Abrams .....	20
2.3.2.- Ensayo de Anillo “J”.....	20
2.3.3.- Ensayo Embudo “V” .....	20
2.3.4.- Ensayo Caja “L” .....	20
2.4.- Retracción Hidráulica .....	21
2.4.1.- Retracción Hidráulica en el H.A.C. ....	23
2.5.- Aspectos Generales del Vidrio .....	24
2.5.1.- Composición .....	24
2.5.2.- Propiedades Físicas.....	24
2.5.3.- Clasificación .....	25
2.5.4.- Fabricación.....	25
2.5.5.- Reciclaje .....	26
2.5.6.- Reacciones Expansivas .....	26
<b>CAPITULO III: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>27</b>
3.1.- Programa Experimental .....	27
3.1.1.- Resistencia a la Compresión y Flexo-Tracción .....	27

3.1.2.- Retracción Hidráulica .....	28
3.1.3.- Ensayos de Flujo de Asentamiento y Caja “L” .....	28
3.1.4.- Factorial Experimental.....	29
3.2.- Selección de Materiales .....	30
3.2.1.- Cemento.....	30
3.2.2.- Agua.....	30
3.2.3.- Aditivo Superplastificante .....	30
3.2.4.- Áridos .....	30
3.2.5.- Filler de Vidrio Reciclado.....	30
3.3.- Granulometría.....	31
3.3.1.- Arena.....	31
3.3.2.- Gravilla .....	32
3.3.3.- Características de los Áridos.....	33
3.4.- Dosificación.....	35
3.5.- Aparatos y Equipos.....	36
3.5.1.- Cono de Abrams .....	36
3.5.2.- Caja “L” .....	36
3.5.3.- Betonera.....	37
3.5.4.- Piscina de Curado .....	37
3.5.5.- Moldajes .....	37
3.5.6.- Prensa de Compresión .....	38
3.5.7.- Prensa de Flexo-Tracción .....	38
3.5.8.- Camara de Secado.....	39
3.5.9.- Aparato Medidor Retracción Libre.....	39
3.6.- Procedimientos .....	40
3.6.1.- Confección de Probetas .....	40
3.6.2.- Ensayos en Estado Fresco.....	40
3.6.3.- Retracción Libre .....	41
3.6.4.- Ensayo de Compresión .....	42
3.6.5.- Ensayo de Flexo-Tracción .....	42
<b>CAPITULO IV: PRESENTACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>43</b>
4.1.- Ensayos en Estado Fresco.....	43
4.2.- Ensayo de Retracción Libre.....	45
4.3.- Ensayos de Compresión y de Flexo-Tracción .....	46
4.4.- Conclusiones.....	48
<b>5.1.- FUTURAS INVESTIGACIONES.....</b>	<b>48</b>
<b>6.1.- BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>49</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama de flujo.....	12
Figura 3.1: Filler de vidrio reciclado.....	31
Figura 3.2: Granulometría de la arena.....	32
Figura 3.3: Granulometría de la gravilla.....	33
Figura 3.4: Cono de Abrams.....	36
Figura 3.5: Caja “L”.....	37
Figura 3.6: Probetas sumergidas en piscina de curado.....	37
Figura 3.7: Moldajes.....	38
Figura 3.8: Prensa de compresión.....	38
Figura 3.9: Prensa Flexo-Tracción.....	39
Figura 3.10: Aparato medidor retracción libre con barra patrón.....	39
Figura 3.11: Llenado de moldajes.....	40
Figura 3.12: Cono de Abrams invertido.....	41
Figura 4.1: Extensión de flujo T <sub>50</sub> .....	43
Figura 4.2: Extensión de flujo Máx.....	44
Figura 4.3: Índice de bloqueo caja “L”.....	44
Figura 4.4: Evolución de la retracción hidráulica.....	45
Figura 4.5: Promedio de los ensayos de resistencia a la compresión.....	47
Figura 4.6: Promedio de los ensayos de resistencia a la flexo-tracción.....	47

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Clasificación de los tipos de vidrio.....	25
Tabla 3.1: Criterios de ensayos en estado fresco.....	28
Tabla 3.2: Contenido de filler.....	29
Tabla 3.3: Factorial Experimental.....	29
Tabla 3.4: Granulometría de la arena.....	31
Tabla 3.5: Granulometría de la gravilla.....	32
Tabla 3.6: Densidad aparente suelta gravilla.....	33
Tabla 3.7: Densidad aparente compactada de la gravilla.....	33
Tabla 3.8: Densidades y absorción gravilla.....	34
Tabla 3.9: Densidad aparente suelta arena.....	34
Tabla 3.10: Densidad aparente compactada arena.....	34
Tabla 3.11: Densidades y absorción arena.....	34
Tabla 3.12: Dosificación muestra patrón.....	35
Tabla 3.13: Dosificación patrón y experimental.....	36
Tabla 4.1: Ensayos del HAC en estado fresco.....	43
Tabla 4.2: Lecturas ensayo retracción libre.....	45
Tabla 4.3: Ensayos promedio de compresión y flexo-tracción.....	46

## RESUMEN

El siguiente trabajo de investigación se realizó con la finalidad de darle nuevas posibilidades a los desechos de vidrio como material de construcción. Además de evaluar el efecto producido al agregar este material como filler en el hormigón autocompactante.

La investigación se enfocó principalmente en el efecto producido sobre la retracción hidráulica, ya que, este era un problema recurrente en este tipo de hormigones, debido a su alto calor de hidratación derivado de la reacción del cemento con el agua. Se esperaba que el reemplazo de vidrio como filler ayudaría a reforzar la pasta de cemento, brindando una mayor resistencia frente a esfuerzos producidos por la retracción.

El contenido total de finos en las mezclas vario de 450 a 550 kg/m<sup>3</sup>, esto incluía el cemento y el filler. El cemento se mantuvo constante a 400 kg/m<sup>3</sup> y el contenido de filler fue aumentando proporcionalmente. Primero se comparo con una muestra patrón y luego se incrementó el contenido de filler de vidrio hasta llegar a los 150 kg/m<sup>3</sup>.

Finalmente, si bien los hormigones fabricados con filler de vidrio tuvieron resultados similares que los hormigones con filler pétreo, estos resultados no cumplieron con las expectativas fijadas al inicio de esta investigación. Sin embargo, se logró concluir que; a pesar de que no se cumpliera la hipótesis planteada en el trabajo, este hormigón mostró cualidades parecidas a los hormigones patrones, por lo que su uso técnicamente es factible.

## ABSTRACT

The following research work was carried out in order to give new possibilities to glass waste as a construction material. In addition to evaluating the effect produced by adding this material as filler in self-compacting concrete.

The research focused mainly on the effect produced on the hydraulic retraction, since this was a recurring problem in this type of concrete, due to its high heat of hydration derived from the reaction of cement with water. It was expected that the replacement of glass as a filler would help to reinforce the cement paste, providing a greater resistance to efforts produced by the retraction.

The total content of fines in the mixtures varied from 450 to 550 kg/m<sup>3</sup>, this included cement and filler. The cement remained constant at 400 kg/m<sup>3</sup> and the filler content was increasing proportionally. First, it was compared with a standard sample and then the glass filler content was increased up to 150 kg/m<sup>3</sup>.

Finally, although the concretes made with glass filler had similar results than the concretes with stone filler, these results did not meet the expectations set at the beginning of this investigation. However, it was concluded that; In spite of the fact that the hypothesis proposed in the work was not fulfilled, this concrete showed qualities similar to the standard concrete, so its use is technically feasible.

## **CAPITULO I: ANTECEDENTES GENERALES**

### **1.1.- INTRODUCCIÓN**

El Hormigón Autocompactante (HAC) se desarrolló en los últimos años de la década de los ochenta, por un grupo de trabajo de investigación encabezado por el profesor Hajime Okamura en la Universidad de Tokio, Japón. El objetivo inicial que perseguía dicho grupo de trabajo era obtener una mezcla de hormigón homogénea con una elevada durabilidad.

Estas investigaciones surgieron debido a que en ese tiempo existió una importante disminución de la mano de obra calificada en Japón, por lo que se buscaba encontrar un hormigón cuya calidad no dependiera de la habilidad de la mano de obra para su colocación y posterior compactación.

Este hormigón Autocompactante tenía un alto nivel de trabajabilidad y cohesión que le permitía fluir en el interior del encofrado, rellenándolo de forma natural, pasando entre las barras de armadura y consolidándose únicamente bajo la acción de su propio peso (Okamura y Ouchi, 2003).

El HAC presenta ventajas en varios aspectos, como: mayor rapidez de hormigonado, menor contaminación acústica, fácil colocación de la mezcla (facilitando las operaciones de una faena pesada), mejor calidad y terminación de los elementos hormigonados y un ahorro en personal y equipos.

Además, muestra mejoras en sus propiedades físicas, tales como: altas resistencias, mayor impermeabilidad, alta durabilidad y excelente fluidez sin segregación. (Vargas y Sciaraffia, 2006).

Para lograr una elevada docilidad en los HAC es necesario emplear una alta cantidad de agregados finos, estos son aportados por el cemento y el filler. Este filler ayuda a regular la cantidad de cemento en la mezcla y reducir de esta manera el calor de hidratación, producto de la reacción del agua con el cemento, traducándose en una forma de aumentar la trabajabilidad del hormigón sin afectar drásticamente la razón agua/cemento de la mezcla. (EFNARC, 2002).

Otro componente que diferencia a estos hormigones de los convencionales es la utilización de aditivos, como, por ejemplo, el superplastificante, que ayuda a disminuir la cantidad de agua de amasado.

Si bien el HAC presenta varios beneficios, Algunos autores (Den Uijl, 2002; Xie y et al, 2005) concluyen que las deformaciones causadas por retracción en este tipo de hormigones pueden ser mayores.

Este fenómeno denominado retracción hidráulica es una variación de volumen derivada de las condiciones de humedad del ambiente y se origina cuando el agua de amasado contenida en el hormigón se evapora progresivamente si éste no se mantiene en un ambiente saturado de humedad. Dado que la estructura interna del hormigón se caracteriza por la existencia de numerosos poros y fisuras de tamaño capilar, al avanzar el proceso de secado, se producirá en ellos el contacto de una fase líquida, el agua, con una gaseosa, el aire, lo que generará una importante tensión superficial. Esta tensión se transmite por adherencia del agua a las paredes de las discontinuidades, alcanzando una magnitud tal que es capaz de producir la contracción del hormigón (Zabaleta, 1988).

La retracción hidráulica es menor para un hormigón con un volumen de áridos mayor dentro del hormigón. Esto se explica porque los áridos presentan un módulo de elasticidad de mucha mayor magnitud que la pasta de cemento, y además porque los áridos están en una proporción muy superior a la pasta de cemento en términos de volumen.

También se puede agregar que en el caso de los hormigones autocompactantes se disminuye el tamaño máximo nominal de los áridos, lo que implica un mayor volumen de pasta de cemento, por la necesidad de cubrir una mayor cantidad de superficie específica del árido, por lo que se incrementa la posibilidad de evaporación de agua (Solas y Giani, 2010).

Anteriormente ya se ha podido estudiar este fenómeno en los hormigones autocompactantes, en nuestra escuela por ejemplo se realizó una tesis sobre el efecto en la retracción hidráulica de los hormigones autocompactantes con adición de fillers de caucho, donde se llegó a la conclusión de que, al aumentar el contenido de caucho, aumenta la retracción hidráulica debido a que el módulo de elasticidad del caucho es menor al de la arena lo que genera menor confinamiento. Como los áridos livianos poseen un módulo de elasticidad pequeño, ofrecen menor resistencia a la contracción y expansión que los áridos normales utilizados en los hormigones convencionales (Morales, 2015).

Como este tipo de hormigones presentan una mayor tendencia a la fisuración, se desea incorporar un material que ayude a disminuir este efecto.

El vidrio presenta características, que hacen factible su uso como árido y para este caso presenta un alto módulo de elasticidad, de alrededor de  $7 \times 10^5$  [kg/cm<sup>2</sup>], mucho mayor a los  $2,8 \times 10^5$  [kg/cm<sup>2</sup>] del hormigón a compresión (Timoshenko, 1957).

Con respecto a los efectos del vidrio en las resistencias mecánicas del hormigón, se han revisado investigaciones donde se reemplaza parcialmente árido fino por vidrio en hormigones convencionales en donde no se apreciaron variaciones significativas en las resistencias del hormigón, además se detalló que dado que la absorción de agua es prácticamente nula en el vidrio, se puede disminuir la cantidad de agua necesaria, para un determinado descenso del cono (Catalán, 2013).

Y además de lo anterior el reciclaje del vidrio puede ayudar en otro tema de contingencia en la construcción, que es el factor medio ambiental.

En Chile, el sector de la construcción paso de producir 3,38 a 5,82 millones de toneladas de residuos industriales entre los años 2000 y 2009, lo que representa un incremento del 72% (CONAMA, 2010).

Debido a esto se manifiesta un interés, no solo a nivel local sino globalmente, de encontrar nuevas formas de controlar y reducir estas cifras.

Una manera de ayudar es buscar nuevos materiales que sean más amigables con el medio ambiente, reutilizar los desechos o innovar en el uso de los materiales.

De este modo, se propuso para esta investigación evaluar el efecto del vidrio sobre la retracción hidráulica en los HAC, esperando disminuir este efecto, y así poder darles un nuevo uso a los desechos de vidrio.

## **1.2.- OBJETIVOS**

### **1.2.1.- OBJETIVO GENERAL**

- i. Evaluar la influencia del vidrio reciclado empleado como filler sobre la retracción hidráulica de los hormigones autocompactantes.

### **1.2.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- i. Determinar la retracción de los hormigones autocompactantes fabricados con inclusiones variables de filler de vidrio reciclado.
- ii. Identificar los efectos del filler de vidrio reciclado sobre las propiedades físicas y mecánicas del HAC mediante los ensayos de resistencia a la compresión, flexo-tracción, flujo de asentamiento de cono Abrams y caja "L".

## **1.3.- HIPÓTESIS**

- i. El empleo de vidrio molido como filler genera una menor retracción hidráulica en los hormigones autocompactantes en comparación con la generada al emplear filler de origen pétreo.

#### 1.4.- ALCANCES

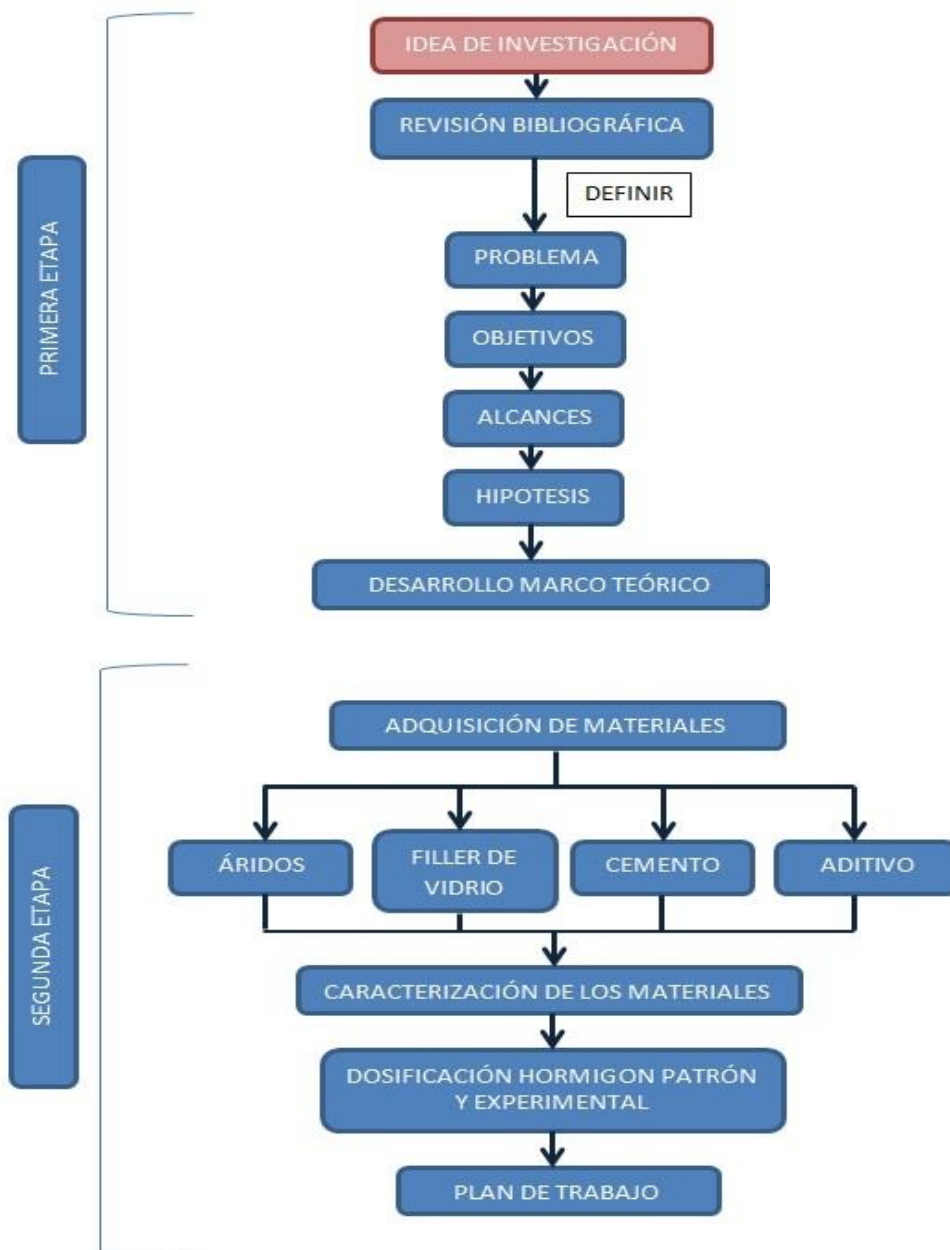
- i. Los ensayos se realizaron en los laboratorios de la Escuela de Construcción Civil de la Universidad de Valparaíso.
- ii. Se utilizó cemento portland puzolánico grado corriente.
- iii. El filler de vidrio a utilizar procedió de envases reciclados y debió pasar por el tamiz de apertura 0,160mm.
- iv. El aditivo utilizado fue del tipo superplastificante.
- v. Se realizaron los siguientes ensayos:
  - a. Retracción Hidráulica.
  - b. Flujo de asentamiento (cono de Abrams).
  - c. Caja L.
  - d. Resistencia a la compresión a 28 días.
  - e. Resistencia a la flexo tracción a 28 días.
- vi. Para proceder a la molienda del vidrio se utilizó la máquina de desgaste de los ángeles disponible en la Escuela de Construcción Civil.

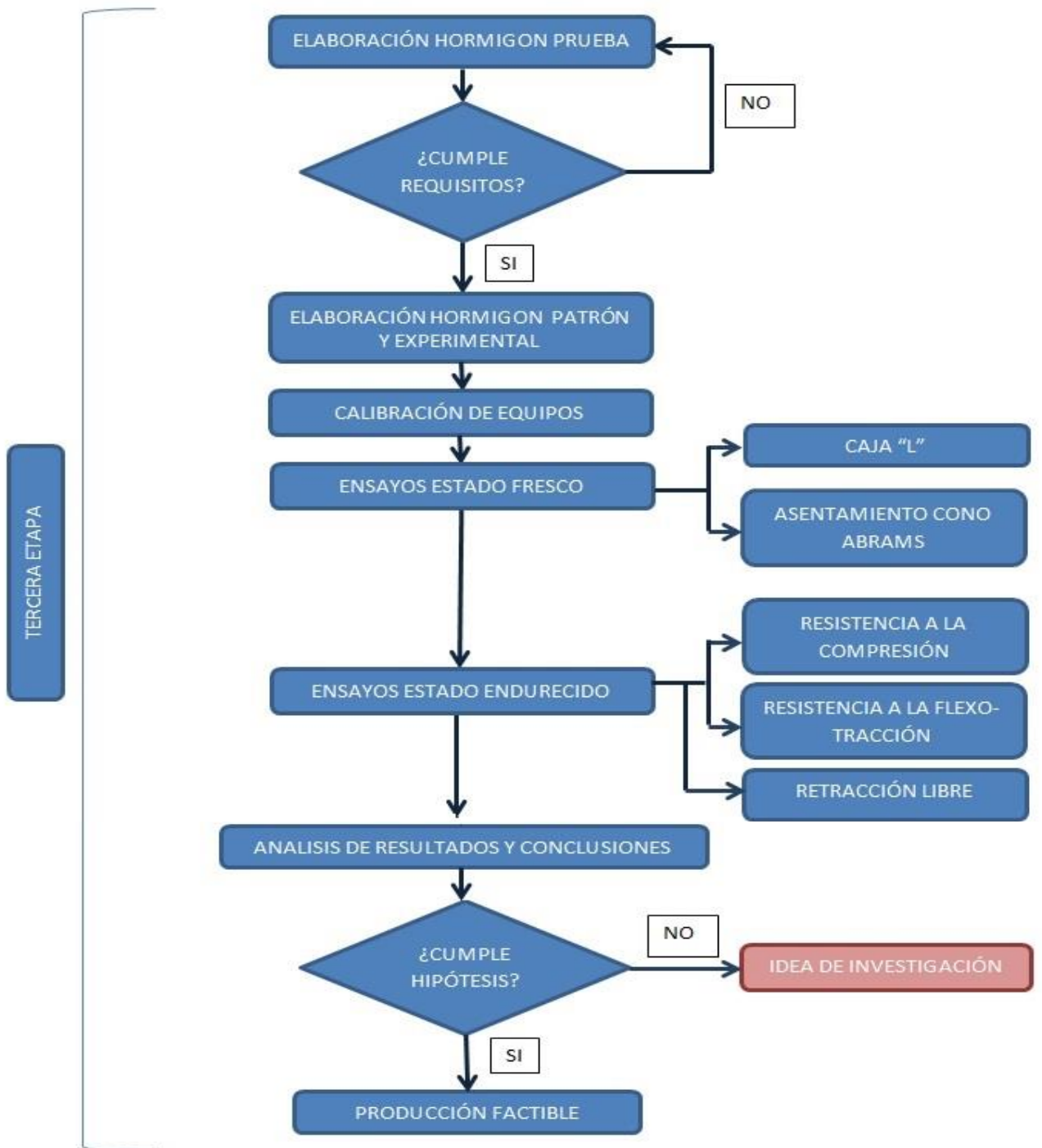
## 1.5.- METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En esta sección se mostrará cómo se organizaron y desarrollaron las distintas etapas del estudio.

Se empezó con los distintos aspectos teóricos que conllevaban la investigación, luego, se debieron preparar los elementos necesarios para la confección de probetas, además, de organizar el desarrollo de la experiencia.

Finalmente se describe la etapa donde se confeccionaron las probetas y los respectivos ensayos realizados sobre estas.





**Figura 1.1.- Diagrama de flujo.**  
Fuente: Elaboración propia (2017).

## **CAPITULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1.- ASPECTOS GENERALES DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE**

El HAC es un Hormigón que sin presentar segregación o exudación es capaz de fluir en el interior del encofrado rellenando de forma natural el volumen del mismo, y pasar entre las barras de la armadura sin otro medio de compactación durante su puesta en obra que la consolidación de su propio peso (Okamura y Ouchi, 2003).

Los mecanismos del comportamiento del hormigón autocompactante en estado fresco son encontrados principalmente en la reología (estudio de la deformación y flujo de la materia) de las partículas en suspensión.

Cuando el hormigón fluye a través de las barras de refuerzo, se cambia la ubicación relativa de las partículas de árido grueso en el espacio. Este desplazamiento relativo causa esfuerzos de corte en la pasta entre los áridos, además de esfuerzos de compresión. Por lo tanto, para que el hormigón fluya a través de los obstáculos sin segregación, el esfuerzo de corte generado debe ser suficientemente pequeño para permitir el desplazamiento relativo y no se produzca un grado de fricción e interferencia que evite el flujo y cause separación de los materiales, en especial los áridos gruesos del mortero (Ouchi y Edamatsu, 1999).

En el diseño de HAC, el árido fino y/o aditivo viscosante confieren a la mezcla la capacidad de disminuir la segregación desarrollando en la pasta fuerzas cohesionantes y de compresibilidad. En resumen, se tiene que compatibilizar un alto grado de deformabilidad y baja viscosidad (bajando la razón agua/finos junto a mayores dosis de aditivo superplastificante), junto con la generación de una baja transferencia de presión en la pasta (limitando el contenido de árido grueso).

Se pueden describir sus características a través de sus dos estados, fresco y endurecido:

#### **2.1.1.- PROPIEDADES DEL HAC EN ESTADO FRESCO**

##### **i. DEFORMABILIDAD**

Esta propiedad está ligada a la adaptación al cambio de forma que experimenta el hormigón autocompactante a la geometría del moldaje. Lo anterior conduce a obtener buenas terminaciones y además un perfecto recubrimiento de las armaduras.

##### **ii. ELEVADA FLUIDEZ**

Esta propiedad se traduce en el hormigón autocompactante en la capacidad de escurrimiento del hormigón fresco sobre una superficie plana y horizontal. En términos generales, cuanto mayor diámetro de escurrimiento alcance, tanto mayor fluidez.

### iii. **ADECUADA VISCOSIDAD**

Esta propiedad está relacionada con la capacidad del hormigón autocompactante de fluir por la acción de su propio peso. Este tipo de requerimiento precisa de un diseño de mezclas y por ende de una dosificación tan afinada, como para que el hormigón en su avance no sufra atascos en su paso a través de armaduras y lugares estrechos, permitiendo un perfecto relleno del molde. (Solas y Giani, 2010).

## **2.1.2.- PROPIEDADES DEL HAC EN ESTADO ENDURECIDO**

El hormigón autocompactante y el hormigón vibrado normal tienen características muy similares y las diferencias que pueden existir se compensan por los coeficientes de seguridad usados en las normas de diseño.

Específicamente se analizan algunas de las propiedades mecánicas más relevantes del hormigón autocompactante:

### i. **RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

Si se compara el HAC con un hormigón vibrado en forma convencional, ambos con la misma relación agua/cemento, se puede decir que las resistencias a la compresión de los dos hormigones son muy similares. Aunque la resistencia a compresión del hormigón autocompactante puede ser un poco mayor que la del hormigón convencional, por la adherencia química que se genera entre la interface de los áridos y la pasta de cemento endurecida, por efecto de la no vibración.

De los registros analizados en más de 60 casos estudiados durante al menos 10 años en diversas partes del mundo como Japón, Comunidad Europea y Norteamérica, los rangos de valores registrados de resistencia a compresión se situaron entre los 20MPa y los 90MPa, con un 80% de dichos valores superiores a 40Mpa (Domone, 2006).

Lo anterior confirma que es posible fabricar un HAC con amplia cobertura de resistencias a la compresión para los requerimientos de la generalidad de las obras de construcción.

### ii. **MÓDULO DE ELASTICIDAD**

El módulo de elasticidad es la relación entre la tensión y la deformación unitaria, y se usa en conjunto con la resistencia a la tracción del hormigón para determinar la deformación de fisuración del hormigón.

En términos generales, el módulo de elasticidad de un hormigón depende en gran medida de la composición de la mezcla y específicamente de la cantidad de sus áridos, ya que la mayor parte del volumen de hormigón está constituida por áridos (del orden del 80%), además de otros factores o variables. Si se mantienen constantes

estos últimos, se puede deducir que al aumentar la proporción de áridos en un determinado volumen de hormigón, éste presentará un módulo de elasticidad mayor.

Los hormigones autocompactantes presentan una mayor cantidad de material fino en su composición y por ende, una mayor cantidad de pasta de cemento y de mortero que los hormigones convencionales. Por tanto es de fácil predicción, que el aumento del contenido de pasta podría disminuir el valor del módulo elástico E del hormigón autocompactante.

Si el HAC posee un módulo elástico menor que el hormigón compactado en forma convencional, esto producirá su efecto entre la resistencia a la compresión y la deformación debida a la flecha producto del pretensado.

### iii. DURABILIDAD

La durabilidad se puede definir “como la capacidad que tiene el hormigón de resistir a la acción del medio ambiente, ataques químicos, físicos, biológicos, o cualquier proceso que tienda a deteriorarlo. Así, un hormigón durable será el que conserve su forma original y su capacidad resistente de servicio en el tiempo, cuando se encuentre expuesto a estas acciones.”(Fernández, 1991).

De acuerdo a la definición anterior, la durabilidad de un elemento de hormigón está absolutamente relacionada con la permeabilidad del recubrimiento de las armaduras de dicho elemento, que se supone es la barrera normal para impedir la penetración de sustancias que den inicio a posibles procesos de degradación. Estas sustancias pueden ser líquidos o gases, como son el oxígeno, el agua pura y de mar, el cloro, el anhídrido carbónico, ácidos, sulfatos, etc.

El HAC por lo general presenta una superficie uniforme, que tiene menos puntos débiles para la penetración de agentes externos y del ambiente agresivo. (Solas y Giani, 2010).

## **2.2.- CONSTITUYENTES DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE**

Prácticamente todos los componentes que se emplean para la fabricación del hormigón vibrado en forma convencional se emplean para la confección del hormigón autocompactante, salvo algunas excepciones como la limitación del tamaño máximo nominal y el uso imprescindible de aditivos y adiciones.

### **2.2.1.- CEMENTO**

La elección del grado o tipo de cemento está gobernada por los requisitos de las especificaciones técnicas, al ambiente donde estará inmersa la obra y por el uso o aplicación que se requiera.

El contenido habitual de cemento es de 350-450 [kg/m<sup>3</sup>], más de 500 [kg/m<sup>3</sup>] de cemento pueden resultar peligrosos y aumentar la retracción y menos de 350 [kg/m<sup>3</sup>] sólo resultan adecuados si se incluye otro tipo de fino, como cenizas volantes ó puzolanas.

En esta clase de hormigones no existe una tendencia en qué tipo de cemento a utilizar, se puede recomendar que este cemento sea bajo en contenido de aluminato tricálcico, para obtener hormigones con menor calor de hidratación y minimizar de esta forma el fenómeno de retracción térmica.

### **2.2.2.- GRAVA**

La cantidad de árido grueso es de menor magnitud en el hormigón autocompactante en comparación con los convencionales. Es probable que esté limitado a más exigencias, como por ejemplo su tamaño máximo nominal y el coeficiente volumétrico medio.

El tamaño máximo nominal suele ser de 16-20 mm; sin embargo, se han empleado tamaños de partícula de hasta 40 mm en HAC.

También es beneficioso el uso de áridos rodados, puesto que permiten una mejor fluidez a la mezcla, y por otro lado el uso de árido chancado permite alcanzar mayores resistencias mecánicas. La naturaleza del árido grueso no es un factor determinante para este tipo de hormigones. La separación de armaduras es una variable significativa en la determinación del tamaño máximo nominal del árido grueso.

### **2.2.3.- ARENA**

La arena es más influyente en ciertas propiedades del hormigón autocompactante en estado fresco que las gravas. No existen limitaciones en cuanto a la naturaleza de la arena. Se prefiere y recomienda el uso de granulometrías continuas, ya que aminoran el contenido de pasta de cemento y permiten optimizar de mejor forma el hormigón autocompactante.

#### **2.2.4.- FILLER**

Los fillers se emplean por la gran demanda que requieren los hormigones autocompactantes de partículas finas, con el objeto de lograr ciertas propiedades que le son imprescindibles, para su puesta en obra sin vibración y terminación adecuada.

Regulan la dosis de cemento de manera tal, que también permiten la reducción del calor de hidratación.

Estos finos usados como adiciones pueden ser inertes o activos hidráulicamente y su objetivo consiste en mejorar la resistencia a la segregación y aumentar la cohesión del hormigón autocompactante.

Las adiciones más frecuentes son las siguientes:

##### **i. FILLER DE MACHAQUEO**

Piedra caliza, dolomita o granito triturada fina que puede utilizarse para aumentar la cantidad de finos (polvo). La fracción menor de 0,125mm es la más provechosa.

##### **ii. CENIZAS VOLANTES**

Las cenizas volantes son un material inorgánico fino con propiedades puzolánicas, que pueden añadirse al HAC para mejorar sus propiedades. No obstante, la estabilidad dimensional puede verse afectada y por lo tanto es preciso comprobarla.

##### **iii. MICROSÍLICE**

La microsíllice (o humo de sílice) ofrece una mejora importante de las propiedades reológicas así como también de las propiedades químicas y mecánicas. También mejora la durabilidad del hormigón.

##### **iv. ESCORIA PULVERIZADA (GRANULADA) DE ALTO HORNO**

Esta escoria es un material aglomerante hidráulico básicamente latente y granulada fina, que también puede añadirse al HAC para mejorar las propiedades reológicas. (EFNARC, 2002).

El uso de un material finamente molido es prácticamente imprescindible para el hormigón autocompactante, ya que por su superficie específica tiene la capacidad de demandar agua y afectar de manera positiva en la trabajabilidad, la fluidez, la estabilidad volumétrica y la viscosidad.

### **2.2.5.- ADITIVOS**

El aditivo fundamental para el hormigón autocompactante es el aditivo Superplastificante o también llamado reductor de agua de alta efectividad, ya que puede disminuir la cantidad de agua de amasado en un 40% y la porosidad del hormigón autocompactante entre un 5% a 10%. Dicho aditivo es de última generación, está basado en el policarboxilato modificado y dentro de sus funciones permite reducir el agua en el hormigón autocompactante, extender en el tiempo la trabajabilidad y disminuir la permeabilidad del hormigón endurecido.

Hay otros aditivos que se pueden usar en el hormigón autocompactante, según las necesidades o demandas por parte de las especificaciones técnicas, el tipo de proyecto y el ambiente que estará emplazado. Según sea el caso, pueden incorporarse aditivos como:

#### **i. INCORPORADORES DE AIRE**

Mejoran la resistencia a los ciclos hielo/deshielo y secundariamente producen una mayor trabajabilidad.

#### **ii. RETARDADORES DE FRAGUADO**

Permiten prolongar el inicio de fraguado.

#### **iii. MODULADOR DE LA VISCOSIDAD**

Confiere cohesión interna a la masa sin perder prácticamente fluidez. Además, limitan la pérdida de agua por exudación y disminuyen la tendencia a la segregación. (Solas y Giani, 2010).

### **2.3.- ENSAYOS DE CONTROL DE CALIDAD Y CARACTERIZACIÓN**

La docilidad del hormigón autocompactante (HAC) no puede ser sólo evaluada mediante el asiento de cono de Abrams. Por otra parte, la medida directa de los parámetros reológicos es dificultosa y requiere de un equipamiento complejo y costoso (reómetros).

Para resolver este problema, se ha desarrollado una serie de métodos de caracterización de las propiedades del hormigón en estado fresco, con los que se evalúan las propiedades de la mezcla para verificar que son las adecuadas, y si en necesario, se efectúan los ajustes pertinentes.

El diseño de mezclas y la caracterización de estos hormigones traen como consecuencia lógica el desarrollo de procedimientos de ensayo, cuyos objetivos son validar las siguientes características:

- i. Capacidad de fluir y rellenar los moldajes (deformabilidad).
- ii. Capacidad de tener cohesión la mezcla, para poder atravesar entre las armaduras y no bloquearse.
- iii. Ausencia de segregación y exudación.

En relación a los métodos de ensayo, hay gran cantidad para caracterizar las propiedades del hormigón autocompactante. Por lo tanto, no se ha podido establecer o asentar un método en particular, o un conjunto de ellos, que permita definir un consenso a nivel mundial para determinar cuándo un hormigón es autocompactable.

A continuación, se presentan algunos de los ensayos más conocidos en la actualidad:

### **2.3.1.- ENSAYO DE FLUJO DE ASENTAMIENTO DE CONO ABRAMS**

Se utiliza para evaluar la capacidad del hormigón autocompactante de fluir libremente y la viscosidad plástica del hormigón en estado fresco. El ensayo se realiza en ausencia de cualquier tipo de obstrucciones.

Se rellena un molde metálico similar al cono de Abrams, de una sola vez y sin compactar, se levanta dicho molde y se deja fluir el hormigón libremente sobre una placa de asiento. A continuación, se mide el diámetro alcanzado al llegar al estado de reposo la mezcla extendida, y además se mide el tiempo que tarda en alcanzar dicho diámetro. Se realiza una inspección visual de la mezcla extendida, observándose la distribución del árido grueso y la tendencia a la segregación y exudación en el borde.

### **2.3.2.- ENSAYO DE ANILLO “J”**

Se utiliza para evaluar la capacidad de paso del hormigón fresco en presencia de armaduras y el riesgo de producirse atascos o bloqueo. Se complementa con el ensayo de flujo de asentamiento de Abrams, pues se le agrega sobre la placa de asiento una trampilla consistente en un anillo con barras metálicas.

El ensayo consiste en medir la diferencia de altura entre el hormigón confinado en el interior del anillo con barras y en el borde exterior del anillo. Con este ensayo se aprecia la capacidad de paso de la mezcla de hormigón a través de las barras.

### **2.3.3.- ENSAYO EMBUDO “V”**

Se utiliza para evaluar la capacidad de fluir del hormigón fresco y determinar la capacidad de relleno con un tamaño máximo de 20mm.

El ensayo consiste en rellenar un molde de forma de embudo con aproximadamente 12 litros de hormigón de una sola vez y sin compactar, luego se quita la trampilla inferior del embudo y se deja caer el hormigón libremente, midiéndose el tiempo desde que se abrió la trampilla hasta que sale toda la mezcla desde el embudo.

### **2.3.4.- ENSAYO CAJA “L”**

Se emplea para evaluar las capacidades del hormigón autocompactante de autonivelación, de paso a través de armaduras con el fin de observar el riesgo de bloqueo y la velocidad de escurrimiento.

El aparato está compuesto de una caja de sección rectangular en forma de “L”, con una zona vertical y otra horizontal, separadas por una compuerta móvil. Delante de ella se han colocado 3 barras de acero, simulando armaduras. La sección vertical se llena de hormigón, luego se levanta la compuerta para permitir que el hormigón fluya hacia la sección horizontal a través de las armaduras, y cuando se detenga el flujo de hormigón, se mide la altura en el comienzo y en el final de la caja horizontal.

## **2.4.- RETRACCIÓN HIDRÁULICA**

La retracción hidráulica del hormigón se origina por dos causas principales: endógenas al hormigón y de tensión superficial del agua acumulada en sus discontinuidades internas.

Las motivadas por causas endógenas se derivan de las variaciones de volumen producidas en la pasta de cemento durante el proceso de fraguado y endurecimiento.

Esta variación consiste en una contracción, pues el volumen absoluto de los compuestos hidratados es menor que el de los compuestos originales del cemento. Sin embargo, si el ambiente está saturado de humedad, la absorción de agua por parte del gel produce una dilatación que compensa la contracción, pudiendo llegar a generarse una pequeña dilatación si la humedad se mantiene en forma permanente.

Por otra parte, el agua de amasado contenida en el hormigón se evapora progresivamente si éste no se mantiene en un ambiente saturado de humedad. Dado que la estructura interna del hormigón se caracteriza por la existencia de numerosos poros y fisuras de tamaño capilar, al progresar el desecamiento se producirá en ellos el contacto de una fase líquida, el agua, con una gaseosa, el aire, lo que generará una importante tensión superficial. Esta tensión se transmite por adherencia del agua a las paredes de las discontinuidades, alcanzando una magnitud tal que es capaz de producir la contracción del hormigón.

Como consecuencia del mencionado proceso, si el hormigón se mantiene en un ambiente no saturado, experimentará una contracción causada por la tensión superficial interna de la fase líquida contenida en él.

De esta exposición pueden establecerse cuáles son los parámetros preponderantes en la retracción hidráulica:

### **i. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO**

La composición química del cemento influye principalmente en la variación de volumen por causas endógenas, dado que esta deriva del desarrollo del proceso de fraguado. En estas condiciones, si la composición del cemento favorece un fraguado rápido de la pasta, ella también será favorable para una más alta contracción inicial, si existen condiciones ambientales no saturadas de humedad.

Por las razones indicadas, un alto contenido de C3A favorecerá una rápida y alta contracción por causas endógenas.

**ii. FINURA DEL CEMENTO**

Una mayor finura del cemento favorece también una evolución rápida de sus propiedades, en particular de su fraguado y, en consecuencia actuara en forma similar a la indicada para su composición química.

**iii. DOSIS DE CEMENTO**

Dado que las variaciones por causas endógenas se originan en la pasta de cemento, es evidente que una mayor proporción de pasta incidirá en su aumento. En consecuencia, existirá una relación casi directa entre las dosis de cemento y la retracción hidráulica por estas causas.

**iv. DOSIS DE AGUA**

La dosis de agua incide directamente en el valor de la retracción hidráulica causada por tensión superficial, dado que un mayor contenido de agua en el interior del hormigón conducirá a una mayor cantidad de fisuras y poros saturados desde donde se origina la tensión superficial.

En consecuencia, la dosis de agua es un factor de importancia primordial en el valor de la retracción hidráulica.

**v. POROSIDAD DE LOS ÁRIDOS**

El mismo fenómeno de tensión superficial que se produce en el interior de las discontinuidades de la estructura del hormigón puede también generarse en las de los áridos y sumarse con la anterior. Sin embargo, su efecto es más restringido debido a la menor deformabilidad del árido con respecto a la de la pasta de cemento.

El valor de la retracción por esta causa queda condicionado por la finura del árido, siendo mayor cuando ésta aumenta, puesto que ello implica una mayor cantidad de discontinuidades en la masa del árido.

**vi. HUMEDAD**

Como se ha indicado al analizar el proceso de retracción endógena del hormigón, la humedad es un factor importante en la magnitud que ésta alcanza. En forma similar, la retracción originada por tensión superficial estará también influida por la humedad, puesto que ella condiciona la velocidad de evaporación del agua interior del hormigón.

Es conveniente tener presente que, por las características que se han señalado para la retracción hidráulica, éste es un proceso progresivo, puesto que sus dos componentes, la retracción endógena y la derivada de la tensión superficial, varían en función del tiempo. La primera, a medida que se produce el fraguado y endurecimiento de la pasta de cemento, y la segunda, según avanza el secado progresivo del hormigón.

Por otra parte, como ambas dependen de la humedad circundante, esta progresión se producirá desde el exterior hacia la masa interna del hormigón, puesto que mientras el

hormigón no pierda por evaporación su agua de amasado, existirá internamente un ambiente saturado que se irá secando progresivamente a medida que se produce el traspaso por evaporación hacia la atmósfera.

#### **2.4.1.- RETRACCIÓN HIDRÁULICA EN EL H.A.C.**

Al igual que en los hormigones convencionales se logran distinguir dos tipos de retracción hidráulica: una de origen químico, también llamada autógena, y otra de origen físico.

La retracción autógena se debe a la disminución de volumen que experimenta el agua al pasar a formar parte de las sales hidratadas. El agua que se combina químicamente es del orden del 23% de la masa del cemento y su disminución de volumen, según T.C. Powers y otros investigadores, es de una magnitud del 25% del volumen combinado.

Con respecto al mecanismo de la retracción física o retracción por desecamiento, se produce por pérdida de agua del hormigón hacia la atmósfera por evaporación. La difusión del agua es responsable de la mayor parte de la retracción por evaporación del agua libre no combinada, contenida en los poros y capilares de las pastas de cemento, morteros y hormigones.

La retracción hidráulica por secado es menor para un hormigón con un volumen de áridos mayor dentro del hormigón. Esto se explica porque los áridos presentan un módulo de elasticidad de mucha mayor magnitud que la pasta de cemento, y además porque los áridos están en una proporción muy superior a la pasta de cemento en términos de volumen.

En el caso de los hormigones autocompactantes se disminuye el tamaño máximo nominal de los áridos, lo que implica un mayor volumen de pasta de cemento, por la necesidad de cubrir una mayor cantidad de superficie específica del árido, por lo que se incrementa la posibilidad de evaporación de agua.

Según Den Uijl, J. A., los ensayos realizados en fluencia y retracción de diferentes tipos de HAC demuestran que la deformación causada por retracción puede ser mayor y la deformación causada por fluencia puede ser menor.

## 2.5.- ASPECTOS GENERALES DEL VIDRIO

La definición adoptada por la A.S.T.M. considera que un vidrio es un producto inorgánico fundido que se ha enfriado hasta un estado rígido sin experimentar cristalización.

Si únicamente se consideran sus principales propiedades técnicas, el vidrio común puede definirse como un producto inorgánico amorfo, constituido predominantemente por sílice, duro, frágil y transparente, de elevada resistencia química y deformable a alta temperatura.

### 2.5.1.- COMPOSICIÓN

El vidrio está compuesto por una mezcla de óxidos metálicos, siendo su componente principal el óxido de sílice, conocido como silicio ( $\text{SiO}_4$ ).

Desde el punto de vista estructural el vidrio está constituido por:

- i. Óxidos formadores de la red vítrea, vitrificantes, tales como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  o  $\text{P}_2\text{O}_5$  para los tipos de productos vítreos más generales o tradicionales.
- ii. Óxidos modificadores de la red vítrea, fundentes, que aportan enlaces por los denominados “oxígenos no-puente”, tales como óxidos alcalinos;  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , u óxidos alcalinotérreos como  $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$ .
- iii. Óxidos estabilizantes que tienen un carácter intermedio o anfótero, aportando los denominados “oxígenos puente”, tales como;  $\text{AlO}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Además de estos componentes básicos los productos vítreos incorporan otros óxidos que cumplen diversas funciones secundarias: afinantes, colorantes, decolorantes, opacificantes, fluidificantes, catalizadores, o nucleantes de la cristalización.

Si bien el silicio es el principal componente de vidrio, dependiendo de la finalidad de éste, se le añaden distintas proporciones de otros componentes.

### 2.5.2.- PROPIEDADES FÍSICAS

Dependiendo de la composición, algunos vidrios funden a temperaturas muy bajas, como  $500^\circ\text{C}$ , mientras que otros necesitan  $1650^\circ\text{C}$ , aunque por lo general, al presentar un elevado contenido de sílice, la temperatura final de fusión es más cercana a este último valor.

En cuanto a la resistencia mecánica, presenta normalmente una resistencia a la tracción entre  $3.000$  y  $5.500 \text{ N/cm}^2$ , aunque puede llegar a sobrepasar los  $70.000 \text{ N/cm}^2$  si el vidrio ha recibido un tratamiento especial.

El vidrio es un mal conductor de calor y electricidad, por lo que resulta práctico para el aislamiento térmico y eléctrico.

Su color natural es un tono verdoso, al que se le agregan decolorantes para hacerlo traslúcido, y colorantes para conferirle distintas tonalidades.

Los envases de vidrio de colores sirven para proteger el contenido de la luz, por lo que sus principales usos se dan en la industria de alimentos (aunque últimamente su uso es limitado a contenidos líquidos, como licores, aceites, etc.), y farmacológica.

### 2.5.3.- CLASIFICACIÓN

Atendiendo a su volumen de fabricación, los vidrios pueden ser clasificados en comerciales, producidos a gran escala, y vidrios especiales, de menor uso.

En la siguiente tabla se pueden ver sus características y clasificación:

**Tabla 2.1: Clasificación de los tipos de vidrio.**

Tipo de vidrio	Nombre	Características
Comerciales	Soda-Cal	Este tipo de vidrio es el más utilizado, pues sus propiedades lo hacen adecuado para su uso con luz visible. Los recipientes hechos de vidrios de soda - cal son virtualmente inertes, no contaminado la materia que contienen ni su sabor. Son poco resistentes al choque térmico.
	Plomo	Utiliza óxido de plomo en lugar de óxidos de calcio, y óxido de potasio en lugar del óxido de sodio, y se conoce comúnmente como cristal al plomo. Los vidrios al plomo tienen un alto índice de refracción y una superficie relativamente blanda, lo cual permite una fácil decoración por esmerilado, corte o tallado.
	Borosilicato	Están compuestos principalmente de sílice (70-80%) y óxido bórico (7-13%) con pequeñas cantidades de álcalis (óxidos de sodio y potasio) y óxido de aluminio. Su principal característica es una buena resistencia a los choques térmicos.
Especiales	Sílice vítreo.	Son vidrios hechos casi exclusivamente de sílice. Son necesarias temperaturas de fusión sobre 1.500°C.
	Vidrios de aluminosilicato.	Contienen cerca de un 20% de óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ), además de óxido de calcio, óxido de magnesio y óxido de boro en cantidades relativamente pequeñas.
	Vidrios de sílice álcali - bario.	Contiene una cantidad mínima de óxidos de plomo, bario o estroncio.
	Vidrios de borato.	Contienen pequeñas cantidades o nada de sílice. Son usados para soldar vidrios, metales o cerámicas, a relativamente, bajas temperaturas.
	Vidrios de fosfato.	Consisten principalmente en mezclas de pentóxido de vanadio ( $V_2O_5$ ) y pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ ).

Fuente: British Glass Manufacturers Confederation (BGMC), 1999.

### 2.5.4.- FABRICACIÓN

Para la producción moderna de una gran variedad de vidrios se emplea una mezcla de materias primas que se introducen en un depósito llamado tolva;

- i. Arena Silíceo (principal componente).
- ii. Carbonato o sulfato de sodio (así la arena se funde a menor temperatura).
- iii. Piedra caliza (para que el cristal no se descomponga en el agua).
- iv. Cristal reciclado (su uso es ecológico porque ahorra el gasto de las otras materias primas)

Estos ingredientes se funden en un horno para obtener cristal líquido (entre 1.500 y 2.000 C°) y darle forma de lámina para depositarlo en un contenedor de estaño a 1.000 C° donde se va enfriando y solidificando.

Luego el vidrio adquiere una consistencia pegajosa y viscosa y se hace pasar por unos rodillos hacia un horno-túnel donde se vuelve a calentar el vidrio sin fundirlo, de ahí se deja enfriar lentamente para su posterior corte y almacenamiento en forma de láminas.

#### **2.5.5.- RECICLAJE**

Los envases de vidrio se reciclan a través de un proceso que reúne varias etapas. Todo comienza cuando el consumidor deposita las botellas en los contenedores de vidrio, luego en la planta de tratamiento se trituran para luego fabricar nuevos envases que las empresas llenan con sus productos y venden a los consumidores.

El reciclado aprovecha toda la materia, mantiene sus cualidades y utiliza cualquier vidrio, ahorrando energía y materias primas, y reduciendo los residuos y la contaminación del aire.

#### **2.5.6.- REACCIONES EXPANSIVAS**

Uno de los principales procesos de degradación del hormigón son las reacciones con los áridos que pueden provocar expansiones. Las reacciones que se producen se clasifican en tres categorías según el tipo de árido:

- i. Reacciones álcali – sílice (ASR)
- ii. Reacciones álcali – carbonato (ACR)
- iii. Ataque sulfático

En esta sección se dará énfasis a las reacciones álcali – sílice (ASR) debido al abundante contenido sílice presente en el vidrio.

En la fabricación del hormigón, la hidratación del Pórtland da como resultado una solución intersticial que contiene hidróxidos de calcio, sodio y potasio. El hidróxido de calcio está en forma cristalizada mientras que los hidróxidos de sodio y potasio se encuentran presentes en la solución. La reacción álcali-sílice se produce cuando la disolución alcalina de los poros del hormigón y los minerales silíceos de algunos áridos reaccionan para formar un gel, que, al embeber agua, aumenta de volumen.

La expansión viene causada por la presión osmótica. Los geles de silicato alcalino pueden ejercer grandes presiones de imbibición durante el proceso expansivo, mayores que la resistencia a tracción del hormigón.

Para que se dé la reacción álcali-sílice, es necesaria la presencia de sílice reactiva, álcalis sodio y potasio, y agua. Pero para que la reacción además produzca fisuración y expansión se requiere que las cantidades tanto de sílice reactiva como de álcalis disponibles sean significativas y que el agua provenga de una fuente externa.

## **CAPITULO III: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **3.1.- PROGRAMA EXPERIMENTAL**

En esta sección de la investigación se detallarán los procedimientos, especificaciones y variables necesarias para la evaluación experimental de la retracción hidráulica y las propiedades físicas y mecánicas del hormigón autocompactante fabricado con filler de vidrio reciclado.

Es conveniente para el estudio comenzar definiendo las variables involucradas en la etapa experimental, se ira detallando según el ensayo a realizar. Finalmente se hará un resumen para la cantidad final de probetas.

#### **3.1.1.- RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y FLEXO-TRACCIÓN**

En estos ensayos las variables dependientes son la resistencia a la compresión y a la flexo-tracción. Con respecto a las variables independientes podemos encontrar el volumen y área de las probetas, las dosificaciones empleadas de materias primas para la confección del hormigón, el tiempo de medición y los porcentajes de vidrio molido.

Sin embargo, la única variable independiente que se manipulará será la cantidad de vidrio incluida en las muestras, por lo que el tamaño, dosificación y tiempo para realizar el ensayo se mantendrán constantes.

Se define, entonces:

##### **i. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

Ensayo que determinara la resistencia de las probetas ante un esfuerzo de compresión realizándose según norma Chilena NCh 1037 of 77 y medida a los 28 días.

La dimensión de las probetas será de 150 x 150 x 150 mm.

##### **ii. RESISTENCIA A LA FLEXO-TRACCIÓN**

Ensayo donde se romperán las probetas a flexión mediante la aplicación de dos cargas iguales y simétricas. Se realizará según norma Chilena NCh 1038 of 77 y se efectuara a los 28 días.

La dimensión de las probetas será de 150 x 150 x 500 mm.

### 3.1.2.- RETRACCIÓN HIDRÁULICA

En este ensayo la variable dependiente es la retracción hidráulica y al igual que los ensayos anteriores posee diversas variables, pero en este caso solo manejaremos los porcentajes de filler de vidrio molido y los tiempos en que mediremos la retracción.

Por lo tanto, definimos:

#### i. RETRACCIÓN LIBRE

Ensayo que se realizará según norma Chilena NCh 2221 of 94 que determina la variación de longitud de una probeta prismática de hormigón en un tiempo determinado producto de la retracción hidráulica, también se pesan las probetas para determinar la pérdida de agua que se produce en ellas al exponerse a la cámara de secado.

El tiempo de medición es de 4, 7, 14, 28, 56 y 91 días de secado con 7 días de curado previos y el tamaño de las probetas es de 75 x 75 x 285 mm.

### 3.1.3.- ENSAYOS DE FLUJO DE ASENTAMIENTO Y CAJA “L”

Antes de proceder a confeccionar las probetas de los ensayos anteriores, se realizarán mediciones en estado fresco de los hormigones para evaluar su capacidad de relleno y paso, además de una inspección visual en busca de segregaciones en la pasta de cemento.

Con respecto a la variable independiente en este ensayo, solo será el porcentaje de vidrio molido, ya que, las mediciones deberán ser efectuadas en estado fresco.

Ya que no existe una norma chilena para estos ensayos, su aceptación o rechazo se hará según los criterios definidos por EFNARC, la cual es una federación europea enfocada en la tecnología del hormigón.

Los rangos de tolerancia para los distintos métodos de ensayo, suponiendo un tamaño máximo nominal del árido grueso no mayor a 20mm., se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 3.1: Criterios de ensayos en estado fresco.**

	Método	Unidad	Margen habitual de valores	
			Mínimo	Máximo
1	Flujo asentamiento por cono Abrams	mm	650	800
2	Flujo de asentamiento $T_{50\text{ mm}}$	segundos	2	5
3	Anillo J	mm	0	10
4	Embudo V	segundos	6	12
5	Embudo V a $T_{5\text{ min}}$	segundos	0	+3
6	Caja en L	$(h_2/h_1)$	0,8	1,0
7	Caja en U	$(h_2-h_1)$ mm	0	30
8	Caja de relleno	%	90	100
9	Ensayo de estabilidad GTM	%	0	15
10	Orimet	segundos	0	5

Fuente: EFNARC (2002).” Especificaciones y Directrices para el hormigón autocompactable – HAC.”

### 3.1.4.- FACTORIAL EXPERIMENTAL

Establecidas las variables involucradas en los ensayos, podemos realizar el factorial experimental para saber la cantidad de probetas a fabricar.

Primero se debe definir el contenido de filler a usar en las muestras:

**Tabla 3.2: Contenido de filler.**

Contenido total de finos [Kg/m <sup>3</sup> ]	Cemento [Kg/m <sup>3</sup> ]	%	Filler [Kg/m <sup>3</sup> ]	%
450	400	88,89	50	11,11
500	400	80,00	100	20,00
550	400	72,73	150	27,27

Fuente: Elaboración propia (2017).

Por lo tanto los porcentajes de vidrio a utilizar en las mezclas serán los siguientes:

- i. C1 = 11,11%
- ii. C2 = 20,00%
- iii. C3 = 27,27%

Teniendo estos datos podemos proceder a definir la factorial experimental a través de la siguiente tabla:

**Tabla 3.3: Factorial Experimental.**

Días	Muestra Patrón	Muestra Experimental		
		C1	C2	C3
4	RL	RL	RL	RL
7	RL	RL	RL	RL
14	RL	RL	RL	RL
28	RL, RC, RF	RL, RC, RF	RL, RC, RF	RL, RC, RF
56	RL	RL	RL	RL
91	RL	RL	RL	RL

Fuente: Elaboración propia (2017).

Dónde:

RL: Ensayo Retracción Libre.  
 RC: Ensayo Resistencia a la Compresión.  
 RF: Ensayo Resistencia a la Flexo-Tracción

Así, con una producción de 3 muestras por ensayo, la cantidad final de probetas para la retracción libre es de 12, al igual que para la resistencia a la compresión y a la flexo-tracción, generando un total de 36 probetas.

## **3.2.- SELECCIÓN DE MATERIALES**

### **3.2.1.- CEMENTO**

Se utilizará cemento Melón Portland Puzolánico, grado corriente, según norma chilena NCh148 Of 68.

### **3.2.2.- AGUA**

Se utilizará agua potable de la red de abastecimiento. Según la norma chilena NCH 1498 Of 82 el agua potable puede emplearse como agua de amasado, siempre que no se contamine antes de utilizarla.

### **3.2.3.- ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE**

El aditivo que se utilizara será de la marca Normet y se empleara para reducir la cantidad de agua necesaria en el amasado.

### **3.2.4.- ÁRIDOS**

Según la norma chilena NCH 163 Of. 2013 los áridos son partículas duras, de forma y tamaño estable y deben estar libres de impurezas.

Los áridos se clasifican según su tamaño en grava cuyas partículas tienen tamaños comprendidos entre 20 y 40 mm, en gravilla cuyas partículas tienen tamaños comprendidos entre 5 y 20 mm y arenas, cuyas partículas tienen tamaños comprendidos entre 0,16 y 5 mm.

Los áridos utilizados en esta investigación proceden de la empresa “Transportes Alegre.”

### **3.2.5.- FILLER DE VIDRIO RECICLADO**

El filler que se utilizará provendrá del reciclaje de botellas desechables, moliéndolas a través de la máquina de los ángeles y pasándolas por el tamiz de abertura 0,160mm para el seleccionado su tamaño.

Su aspecto será el siguiente:



**Figura 3.1.- Filler de vidrio reciclado.**

Fuente: Elaboración propia (2017).

### 3.3.- GRANULOMETRÍA

Para realizar el ensayo en el laboratorio, se procede a mezclar las proporciones extraídas hasta homogeneizar, luego se debe reducir el tamaño de las muestras, extendiendo el material hasta formar una “torta” de espesor uniforme, esta se divide en cuatro partes, se separan dos partes opuestas de la mezcla y se repite el proceso hasta obtener la cantidad requerida.

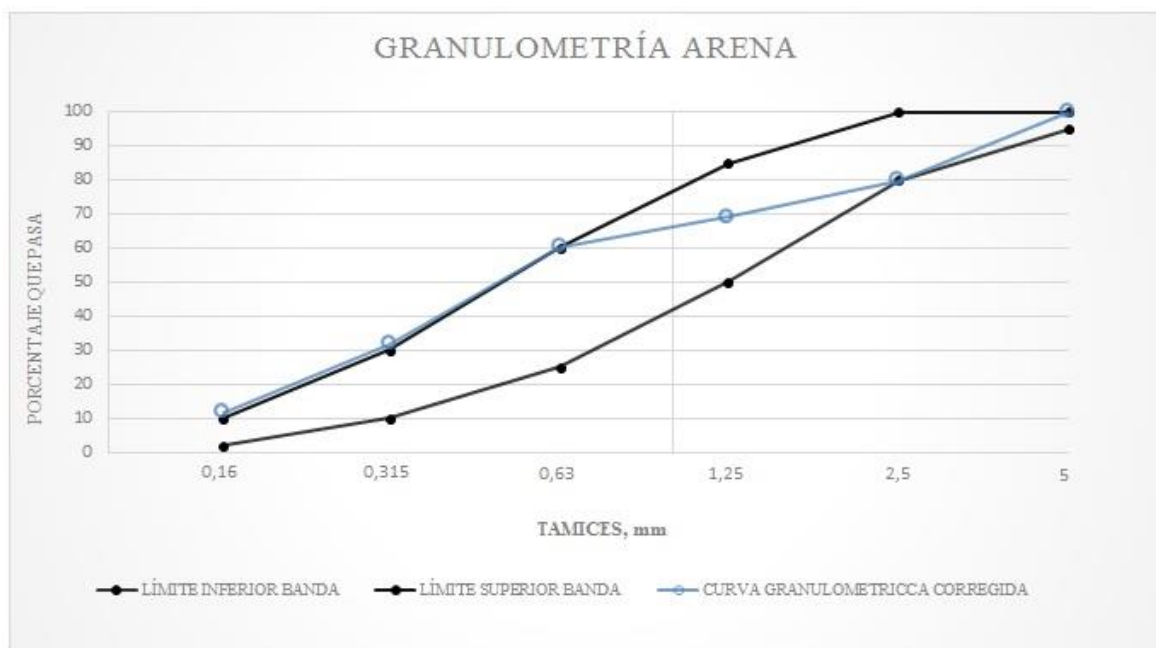
#### 3.3.1.- ARENA

La granulometría de la arena se realizó siguiendo las recomendaciones de la norma NCH 165 Of 79. Para el cálculo del módulo de finura se consideró la recomendación de la NCH 165 Of 79. Se efectuaron tres ensayos granulométricos, de los cuales se obtuvo un promedio, resultados que se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 3.4: Granulometría de la arena**

Tamiz		Peso Retenido (gr)	% Retenido		% Que Pasa	% Que Pasa Corregido	Banda Granulometrica NCH163OF79	
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 79		Parcial	Acumulado			Limite Inferior	Limite Superior
3/8	10	10	1	1	99		100	100
4	5	42	3	4	96	100	95	100
8	2,5	202	17	21	79	80	80	100
16	1,25	133	11	32	68	69	50	85
30	0,63	104	8	40	60	60	25	60
50	0,315	348	28	68	32	32	10	30
100	0,16	243	20	88	12	12	2	10
Bajo 100		143	12	100	0			
Masa Real (gr)		1225	Módulo de Finura		2,51	2,47		
Masa Inicial (gr)		1229						
Error		0,39%						

Fuente: Elaboración Propia (2017).



**Figura 3.2.- Granulometría de la arena.**

Fuente: Elaboración propia (2017).

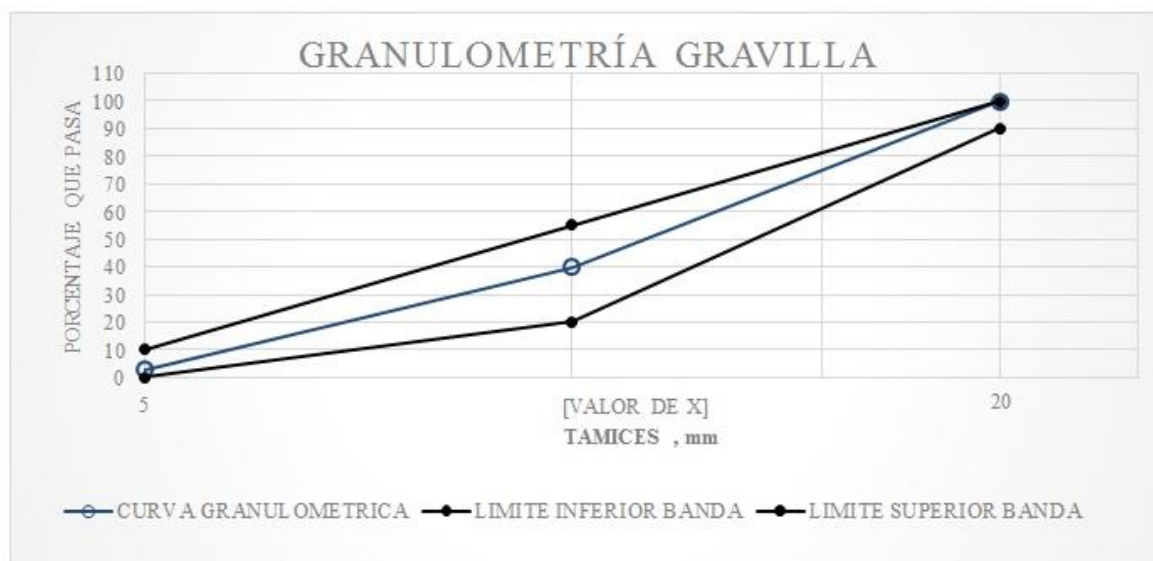
### 3.3.2.- GRAVILLA

Debido al tamaño del árido grueso adquirido, este se analizó en una sola parte, siendo tamaño máximo nominal 20 mm, correspondiente a gravilla. Según la recomendación de la NCH 163 Of 79, la banda utilizada fue 19 – 4,75. Para el cálculo del módulo de finura se consideró la recomendación de la NCH 165 Of 79. Se efectuaron tres ensayos, de los cuales se obtuvo un promedio que se presenta en la siguiente tabla.

**Tabla 3.5: Granulometría de la gravilla.**

Tamiz		Peso Retenido (gr)	% Retenido		% Que Pasa	Banda Granulométrica - NCH163 Of 79	
ASTM	Tamiz (mm) - NCH163 Of 79		Parcial	Acumulado		Limite Inferior	Limite Superior
2"	50	0	0	0	100	100	100
1 1/2 "	40	0	0	0	100	100	100
1"	25	0	0	0	100	100	100
3/4"	20	0	0	0	100	90	100
3/8"	10	5040	60	60	40	20	55
4"	5	3127	37	97	3	0	10
BAJO 4		228	3	100	0	0	5
Masa Real (gr)		8395	Módulo de Finura		6,6		
Masa Inicial (gr)		8399					
Error		0,05%					

Fuente: Elaboración propia (2017).



**Figura 3.3.- Granulometría de la gravilla.**

Fuente: Elaboración Propia (2017).

### 3.3.3.- CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁRIDOS

Para el cálculo de las densidades y absorción de los áridos se realizaron las recomendaciones indicadas en la norma.

Las densidades de la gravilla se obtuvieron según las normas "NCH 1117-Of 2010" y "NCH 1116-Of 2008". Ensayando tres muestras, de las cuales, se obtuvo un promedio que se muestra en las siguientes tablas.

**Tabla 3.6: Densidad aparente suelta gravilla.**

Gravilla	Promedio Muestras	Peso Medida (gr)	Volumen Medida (cm <sup>3</sup> )
Peso Muestra + Medida (gr)	11181,1	3690	5173
D. Aparente Suelta (gr/cm <sup>3</sup> )	1,448	---	---
D. Aparente Suelta (kg/m <sup>3</sup> )	1448	---	---

Fuente: Elaboración propia (2017).

**Tabla 3.7: Densidad aparente compactada de la gravilla.**

Gravilla	Promedio Muestras	Peso Medida (gr)	Volumen Medida (cm <sup>3</sup> )
Peso Muestra + Medida (gr)	12072,5	3690	5173
D. Aparente Compactada (gr/cm <sup>3</sup> )	1,620	---	---
D. Aparente Compactada (kg/m <sup>3</sup> )	1620	---	---

Fuente: Elaboración propia (2017).

**Tabla 3.8: Densidades y absorción gravilla.**

Gravilla	Promedio Muestras
$\rho$ Neta ( $\text{kg/m}^3$ )	2733
$\rho$ Real Seca ( $\text{kg/m}^3$ )	2656
$\rho$ Real SSS ( $\text{Kg/m}^3$ )	2684
% Absorción	1,1

Fuente: Elaboración propia (2017).

Para las densidades de la arena se utilizaron las normas “NCH 1239-Of 77” y “NCH 1116-Of 2008”. Al igual que con la gravilla se utilizaron tres muestras para luego hacer los cálculos con el promedio de estas. Los resultados se muestran en las siguientes tablas.

**Tabla 3.9: Densidad aparente suelta arena.**

Arena	Promedio Muestras	Peso Medida (gr)	Volumen Medida ( $\text{cm}^3$ )
Peso Muestra + Medida (gr)	3103,3	1511	1003
D. Aparente Suelta ( $\text{gr/cm}^3$ )	1,588	---	---
D. Aparente Suelta ( $\text{kg/m}^3$ )	1588	---	---

Fuente: Elaboración propia (2017).

**Tabla 3.10: Densidad aparente compactada arena.**

Arena	Promedio Muestras	Peso Medida (gr)	Volumen Medida ( $\text{cm}^3$ )
Peso Muestra + Medida (gr)	3277,4	1511	1003
D. Aparente Compactada ( $\text{gr/cm}^3$ )	1,761	---	---
D. Aparente Compactada ( $\text{kg/m}^3$ )	1761	---	---

Fuente: Elaboración propia (2017).

**Tabla 3.11: Densidades y absorción arena.**

Arena	Promedio Muestras
$\rho$ Neta ( $\text{kg/m}^3$ )	2686
$\rho$ Real Seca ( $\text{kg/m}^3$ )	2606
$\rho$ Real SSS ( $\text{Kg/m}^3$ )	2634
% Absorción	1,1

Fuente: Elaboración propia (2017).

### 3.4.- DOSIFICACIÓN

El diseño de una mezcla de hormigón autocompactante es diferente a la del hormigón convencional, debido a que el objetivo del primero no es solamente lograr una determinada resistencia a la compresión, sino más bien conseguir otras funciones específicas como la capacidad de paso, la capacidad de relleno y la resistencia a la segregación y exudación.

Se recomienda en todo caso, elegir los materiales componentes, diseñar la mezcla y hacer los hormigones de prueba correspondientes para detectar las posibles carencias del diseño; si es necesario, rediseñar y comprobar nuevamente.

Se han establecido algunas características comunes de mezclas de hormigón autocompactante, que han resultado del análisis de diferentes estudios publicados respecto del tema. Esta diversidad de características se utilizará como base inicial de la mezcla de hormigón.

- i. El contenido total de finos (cemento y filler) debe variar entre 450 a 600 kg/m<sup>3</sup>.
- ii. La cantidad de agua no debe exceder los 200 lt/m<sup>3</sup>.
- iii. La relación agua/finos son del orden del 0,25 a 0,4 en peso, que equivalen a un 0,9 a 1,1 en volumen.
- iv. El volumen de pasta de cemento varía desde el 30% al 42% del volumen total del hormigón.
- v. El peso de la grava por lo general es un 30% del peso total y el de la arena un 40%

Siguiendo los rangos anteriores, y tomándolos como recomendaciones se diseñó la mezcla inicial del hormigón patrón.

**Tabla 3.12: Dosificación muestra patrón.**

	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Agua (lt/m <sup>3</sup> )	Gravilla (kg/m <sup>3</sup> )	Arena (kg/m <sup>3</sup> )	Filler Pétreo (kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )
Hormigón Patrón	400	200	715	910	50	1%
						2%
						3%

Fuente: Elaboración propia (2017).

Debido a los requerimientos de autocompactabilidad que son necesarios en este tipo de hormigones, se confeccionaron tres mezclas con distintos porcentajes de aditivo para encontrar y obtener un diseño de mezcla óptimo.

Una vez encontrada la dosis adecuada de aditivo superplastificante, las dosificaciones según las inclusiones de vidrio quedarán de la siguiente manera:

**Tabla 3.13: Dosificación patrón y experimental.**

Probeta	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Agua (kg/m <sup>3</sup> )	Gravilla (kg/m <sup>3</sup> )	Arena (kg/m <sup>3</sup> )	Filler Pétreo (kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )	Filler Vidrio (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Teórica (kg/m <sup>3</sup> )
Patrón	400	200	715	909	50	3,2	0	2277,5
C1	400	200	715	909	0	3,2	50	2265,4
C2	400	200	715	909	0	3,2	100	2327,5
C3	400	200	715	909	0	3,2	150	2377,5

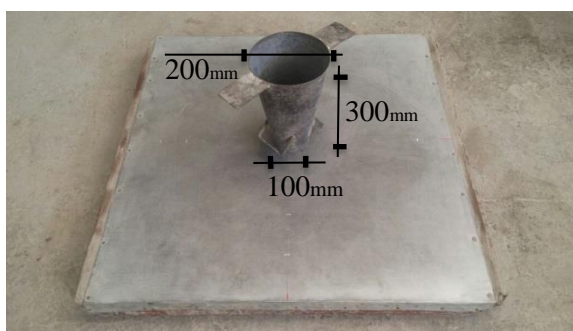
Fuente: Elaboración propia (2017).

### 3.5.- APARATOS Y EQUIPOS

#### 3.5.1.- CONO DE ABRAMS

Este aparato se utiliza para ensayar el hormigón en estado fresco y evaluar su consistencia, como en este caso el hormigón adquiere una alta docilidad, es necesario invertir el cono y medir el diámetro que adquiere el hormigón al asentarse, tomando el tiempo en que demora y valorando cualitativamente la presencia de segregación y exudación.

Para la realización del ensayo se necesita el cono de Abrams y una placa metálica de aproximadamente 1000mm x 1000mm, en la cual se marcan los diámetros.

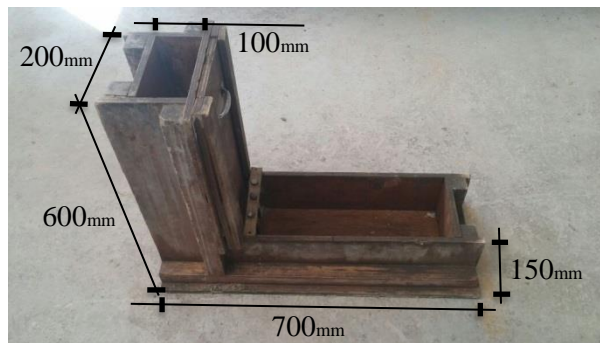


**Figura 3.4.- Cono de Abrams.**

Fuente: Elaboración propia (2017).

#### 3.5.2.- CAJA “L”

Consiste en una caja de madera con dos secciones rectangulares, una vertical y la otra horizontal, las cuales forman una “L”. Estas se encuentran separadas a través de una compuerta, la cual contiene tres barras de acero dispuestas de forma vertical que sirven para simular las enfierraduras y así evaluar la capacidad de paso que posee el hormigón.



**Figura 3.5.- Caja "L".**

Fuente: Elaboración propia (2017).

### 3.5.3.- BETONERA

Para la elaboración del hormigón se utilizará una betonera de volteo directo, con una capacidad de 150 lts. Y para la secuencia de llenado se seguirán las recomendaciones de la norma "NCH 1018-Of77".

### 3.5.4.- PISCINA DE CURADO

Se utilizará para el curado de las probetas a través de inmersión, una vez procedido el desmoldaje, estas probetas serán curadas por 28 días para los ensayos de compresión y flexo-tracción y 7 días para el ensayo de retracción libre.

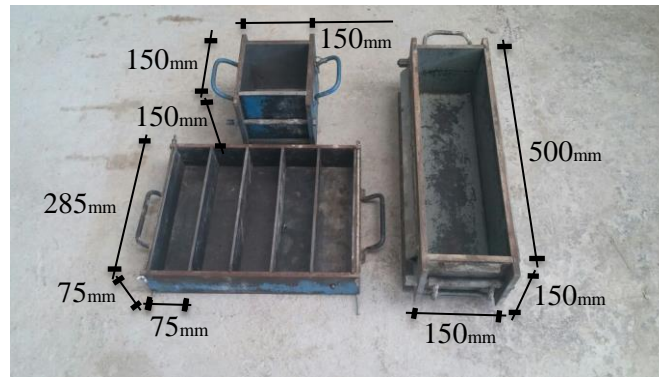


**Figura 3.6.- Probetas sumergidas en piscina de curado.**

Fuente: Elaboración propia (2017).

### 3.5.5.- MOLDAJES

Los moldes utilizados en el laboratorio tienen formas cúbicas y prismáticas. Estos son fabricados con acero y antes de su uso se le debe aplicar una delgada película de aceite para ayudar con el desmoldaje, según norma "NCH 1017-Of75".



**Figura 3.7.- Moldajes.**

Fuente: Elaboración propia (2017).

### 3.5.6.- PRENSA DE COMPRESIÓN

Será manipulado para efectuar el ensayo a la rotura por compresión de probetas cúbicas, el cual determinará las propiedades del hormigón frente a sollicitaciones axiales.

El ensayo se realizará a los 28 días y siguiendo los procedimientos indicados en la norma

“NCH 1037-Of77”.



**Figura 3.8.- Prensa de compresión.**

Fuente: Elaboración propia (2017).

### 3.5.7.- PRENSA DE FLEJO-TRACCIÓN

En este equipo se aplicara el ensayo de tracción por flexión a la rotura de probetas prismáticas de hormigón simplemente apoyadas.

Al igual que en el ensayo a compresión, se realizara a los 28 días y apegándose a los procedimientos indicados en la norma “NCH 1038-Of77”



**Figura 3.9.- Prensa Flexo-Tracción.**

Fuente: Elaboración propia (2017).

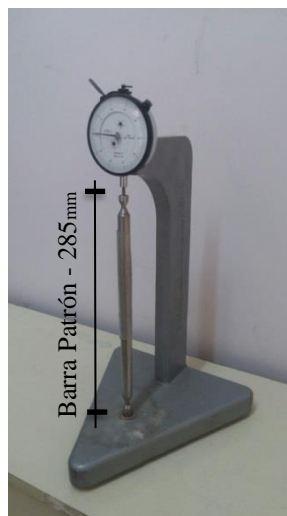
### 3.5.8.- CAMARA DE SECADO

Será utilizada para mantener las probetas de retracción libre a una temperatura y humedad constante, además de un flujo continuo de aire entre estas.

Los valores de temperatura y humedad serán fijados según la norma “NCH 2221-Of94”

### 3.5.9.- APARATO MEDIDOR RETRACCIÓN LIBRE

Consiste en un soporte metálico donde se pueden apoyar las probetas, este, incluye un dial micrométrico para efectuar las lecturas y una barra patrón de longitud equivalente a las de las probetas de ensayo.



**Figura 3.10.- Aparato medidor retracción libre con barra patrón.**

Fuente: Elaboración propia (2017).

### 3.6.- PROCEDIMIENTOS

#### 3.6.1.- CONFECCION DE PROBETAS

Para la elaboración de las probetas se realizarán los siguientes procedimientos:

- i. Antes de proceder a reunir los materiales, se realizará una corrección por humedad y absorción de los áridos utilizados en el procedimiento.
- ii. Luego se procederá a pesar las cantidades necesarias según dosificación.
- iii. A la vez se debe preparar los moldajes que se utilizaran, aplicándoles una delgada película de aceite.
- iv. Ya reunidos los materiales, se procederá a mezclarlos en la betonera, primero la gravilla con la arena y el cemento junto con un tercio del agua utilizada, para luego agregar el filler y el resto del agua mezclada con el aditivo superplastificante.
- v. Una vez confeccionado el hormigón, se continuará con los ensayos en estado fresco para evaluar sus propiedades de hormigón autocompactante.
- vi. Finalmente se llenarán los moldajes, retirando el exceso de este y dándole un acabado a través de una llana, luego su descimbre será en las siguientes 24hrs.



**Figura 3.11.- Llenado de moldajes.**

Fuente: Elaboración propia (2017).

#### 3.6.2.- ENSAYOS EN ESTADO FRESCO

##### i. CONO DE ABRAMS INVERTIDO

En este ensayo se registrará el tiempo que requiere el hormigón en alcanzar un diámetro de 50cm, junto con el diámetro máximo alcanzado. También se aprovecha para realizar una inspección visual en el hormigón en busca de segregación de los áridos y exudación de la masa de hormigón.



**Figura 3.12.- Cono de Abrams invertido.**

Fuente: Elaboración propia (2017).

**ii. CAJA “L”**

Una vez llenado el depósito, se levantará la compuerta para permitir el paso del hormigón y medir el tiempo que demora en alcanzar 40cm. Ya nivelado el hormigón de forma natural se procederá a registrar las alturas final e inicial. Con ella se calculará el índice de bloqueo, que deberá ser igual o superior a 0,8 y menor o igual 1,0.

**3.6.3.- RETRACCION LIBRE**

Ya confeccionado y ensayado en estado fresco el hormigón autocompactante, se procederá de la siguiente manera para efectuar las mediciones del ensayo de retracción libre:

- i. Se desmoldarán las probetas a una edad de  $23,5 \pm 0,5$  horas contadas después de la adición de agua al cemento durante el amasado.
- ii. Inmediatamente después de desmoldadas las probetas, estas, se sumergirán en agua satura con cal, a una temperatura de  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  por un mínimo de 30 min.
- iii. Seguido de lo anterior, se deberá leer el dial del aparato medidor con la barra patrón y registrar como  $L_p$ .
- iv. La probeta se retirará del baño de inmersión
- v. Previamente se deberán secar con un paño las piezas de tope de la probeta y colocarla húmeda en el aparato medidor.
- vi. Luego se deberá girar la probeta lentamente en el aparato medidor mientras se lee el dial. Registrando la menor lectura del dial como  $L_o$ .
- vii. Se expresará la diferencia de longitud inicial  $L_i$ , como la diferencia entre las medidas  $L_p$  y  $L_o$ .
- viii. Tomada la lectura, se devolverá la probeta al baño y se repetirán las operaciones con las siguientes probetas.
- ix. Finalmente, se almacenarán las probetas por un periodo de 7 días para su curado.

Al término del periodo de curado, se almacenarán las probetas en la cámara de secado, de modo de que estas queden separadas a lo menos 25mm en todos sus lados.

Las mediciones de la barra patrón y las probetas se efectuarán a los 4, 7, 14, 28, 56 y 91 días de secado.

El cambio de longitud de la probeta a cualquier edad se expresará de la siguiente manera:

$$L = \frac{L_x - L_i}{G} \quad (\text{Formula N}^\circ 1)$$

Dónde:

- i. L: Cambio de longitud de la probeta a cualquier edad, mm/m.
- ii.  $L_x$ : Diferencia entre las lecturas de la probeta y la barra patrón a la edad x, mm.
- iii.  $L_i$ : Diferencia inicial entre las lecturas de la barra patrón  $L_p$  y de la probeta  $L_o$ , mm.
- iv. G: Longitud efectiva de medida (0,250m).

### 3.6.4.- ENSAYO DE COMPRESIÓN

Los procedimientos realizados en este ensayo se harán siguiendo las indicaciones de la norma "NCH 1037-Of77". Estas probetas tendrán un periodo de curado de 28 días, el cual, una vez finalizado, se procederá a efectuar los correspondientes ensayos de compresión.

Debido al tamaño de las probetas (15x15x15 cm), se deberá aplicar un factor de corrección de 0,95 para así obtener el equivalente de las probetas estandarizadas de 20x20x20 cm.

Para el cálculo de la resistencia a la compresión como la tensión de rotura, se utilizará la siguiente formula:

$$R = \frac{P}{S} \quad (\text{Formula N}^\circ 2)$$

Dónde:

- i. R: Tensión de rotura, N/mm<sup>2</sup> (kgf/cm<sup>2</sup>).
- ii. P: Carga máxima aplicada por la máquina de ensayo, N (kgf).
- iii. S: Sección de ensayo, mm<sup>2</sup> (cm<sup>2</sup>).

### 3.6.5.- ENSAYO DE FLEXO-TRACCIÓN

Para realizar este ensayo se seguirán los procedimientos indicados en la norma "NCH 1038-Of77", junto con la expresión de resultados indicada en dicha norma.

Las probetas serán curadas por un periodo de 28 días, los cuales, al terminar, darán paso a la ejecución del ensayo.

## CAPITULO IV: PRESENTACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS

### 4.1.- ENSAYOS EN ESTADO FRESCO

Los métodos utilizados en esta investigación para evaluar la autocompactabilidad de la mezcla, son los de descenso de cono de Abrams invertido y caja "L", los cuales, sirvieron para determinar sus capacidades de paso y relleno. Asimismo, identificar posibles segregaciones y exudaciones en el hormigón.

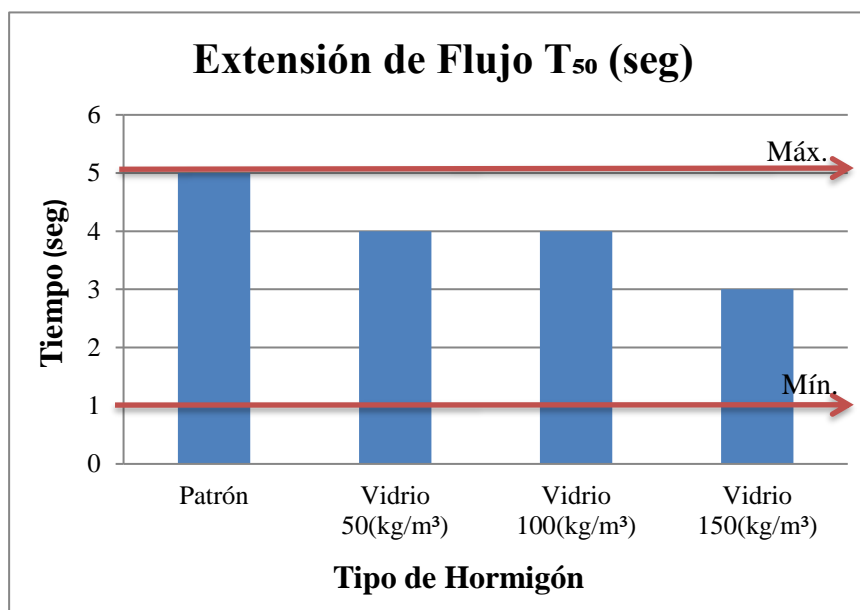
En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos para las distintas inclusiones de vidrio utilizadas en la mezcla.

**Tabla 4.1: Ensayos del HAC en estado fresco.**

Dosis de Filler de Vidrio (kg/m <sup>3</sup> )	Extensión de Flujo T <sub>50</sub> (seg)	Relación Porcentual (%)	Extensión de Flujo Máx. (mm)	Relación Porcentual (%)	Índice de Bloqueo Caja "L" (Hf/Hi)	Relación Porcentual (%)
0 (Patrón)	5	100	730	100	0,9	100
50 (Vidrio)	4	80	760	104	0,83	92
100 (Vidrio)	4	80	770	105	0,9	100
150 (Vidrio)	3	60	767	105	0,9	100

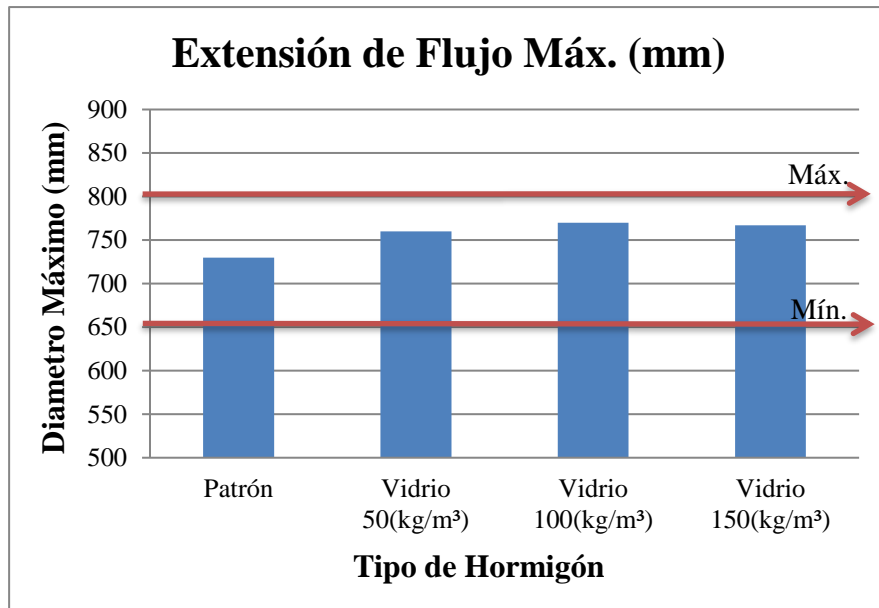
Fuente: Elaboración propia (2017).

Estos datos se compararon con las especificaciones indicadas en la tabla 3.1, para verificar que los hormigones fabricados cumplieran con los requisitos establecidos para la autocompactabilidad. A continuación, se muestran los datos representados mediante gráficas.



**Figura 4.1.- Extensión de flujo T<sub>50</sub>.**

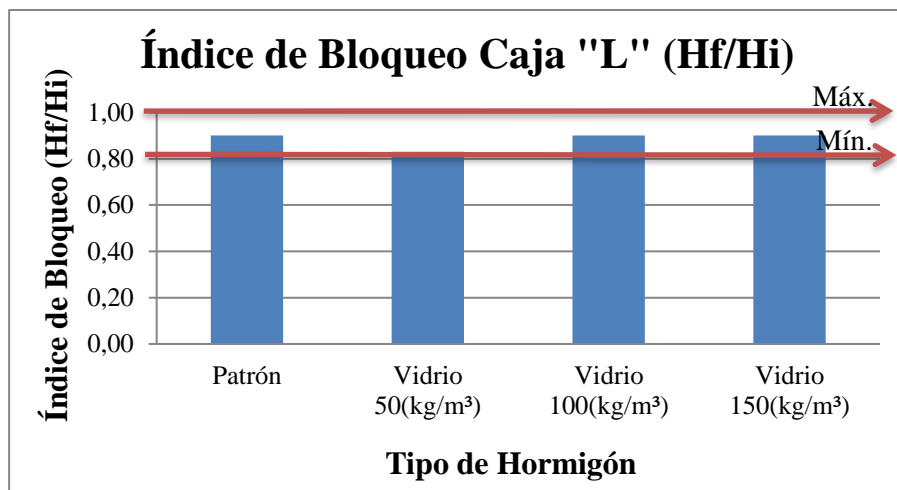
Fuente: Elaboración propia (2017).



**Figura 4.2.- Extensión de flujo Máx.**

Fuente: Elaboración propia (2017).

La extensión de flujo aumentó a medida que también lo hizo la cantidad de filler en la mezcla, implicando una mayor trabajabilidad por parte del hormigón, seguramente debido a una mayor cohesión entre la pasta de cemento y los áridos gruesos. En este ensayo se buscaba evaluar la habilidad o facilidad de fluir del hormigón, además de las valoraciones cualitativas en busca de segregaciones y exudaciones, las cuales no se vieron presentes.



**Figura 4.3.- Índice de bloqueo caja "L".**

Fuente: Elaboración propia (2017).

Como se logra apreciar en el gráfico las mezclas cumplieron con los índices de bloqueos establecidos. Este resultado se debió probablemente a que el tamaño de los áridos gruesos no varío entre las mezclas.

Por tanto, se puede comprobar, ya que, las mezclas cumplieron con los ensayos escogidos para determinar la autocompactabilidad, que los hormigones fabricados en esta investigación son del tipo autocompactante.

## 4.2.- ENSAYO DE RETRACCIÓN LIBRE

En esta sección se presentarán las lecturas obtenidas del ensayo de retracción libre, el cual se realizó siguiendo las metodologías indicadas en la norma “NCH2221 – Of94” y que consisten en medir los cambios de longitud que experimentan las probetas prismáticas en condiciones de secado constante.

A continuación, se encuentra una tabla que muestra un promedio de las lecturas realizadas a través de los días, durante un periodo de curado (expansión hidráulica) y un periodo de secado (retracción hidráulica).

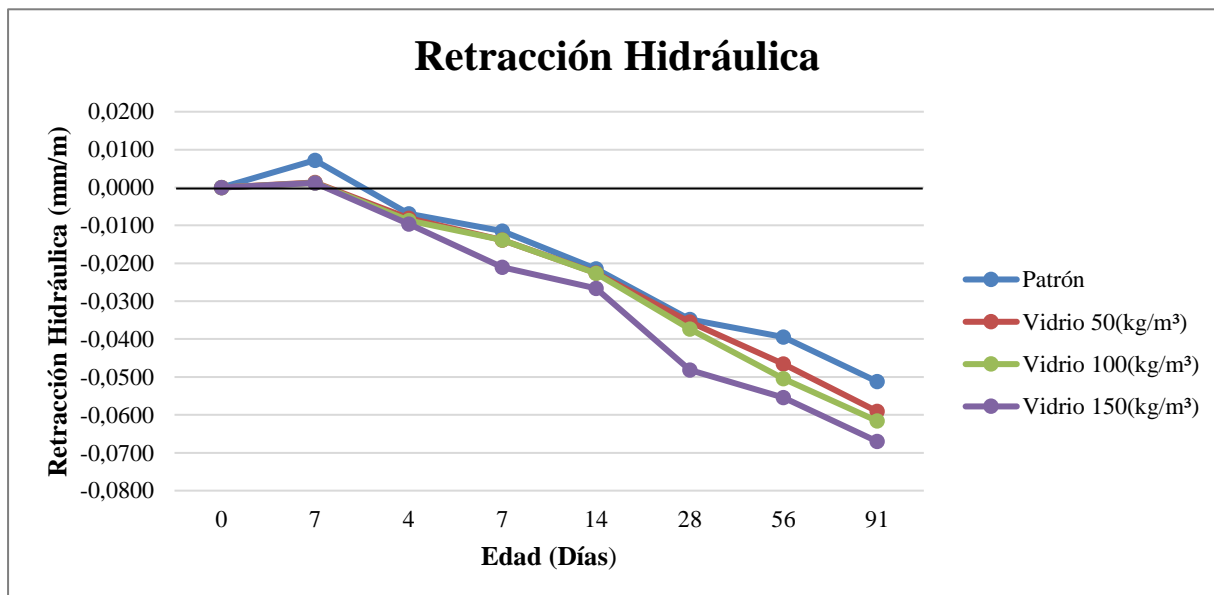
**Tabla 4.2: Lecturas ensayo retracción libre.**

Dosis de Filler de Vidrio (kg/m <sup>3</sup> )	Lecturas Expansión H. (mm/m)		Lecturas Retracción H. (mm/m)						Relación Porcentual (%)
	0	7(días)	4	7	14	28	56	91(días)	
0 (Patrón)	0	0,0072	-0,0069	-0,0115	-0,0215	-0,0348	-0,0395	-0,0512	100
50 (Vidrio)	0	0,0013	-0,0081	-0,0139	-0,0225	-0,0355	-0,0465	-0,0591	115
100 (Vidrio)	0	0,0012	-0,0087	-0,0139	-0,0227	-0,0373	-0,0504	-0,0616	120
150 (Vidrio)	0	0,0012	-0,0096	-0,0210	-0,0266	-0,0482	-0,0554	-0,0670	131

Fuente: Elaboración Propia (2017).

Se logra observar en la tabla que durante el periodo de curado las probetas experimentan un aumento en su longitud, debido a que la saturación en agua produce una expansión hidráulica, pero luego en los periodos de secado, estas comienzan a experimentar contracción, generando lentamente tensiones dentro de la masa de hormigón.

En seguida, se muestran los datos representados mediante una gráfica.



**Figura 4.4.- Evolución de la retracción hidráulica.**

Fuente: Elaboración propia (2017).

De las cuatro dosificaciones utilizadas, la muestra patrón es la que presenta una mayor expansión en la etapa inicial de curado, luego sus mediciones se van acercando a las demás inclusiones de vidrio, y ya a los 28 días de secado sus lecturas difieren muy poco en comparación con la de 50 (kg/m<sup>3</sup>) de vidrio.

La curva que más se aleja de la media es la que contiene una mayor inclusión de vidrio, traduciéndose en una mayor retracción hidráulica en la probeta, probablemente a causa del alto contenido de vidrio en la dosificación.

#### 4.3.- ENSAYOS DE COMPRESIÓN Y DE FLEXOTRACCIÓN

Los resultados obtenidos en los ensayos de compresión y de flexo-tracción se mostrarán en esta parte del capítulo.

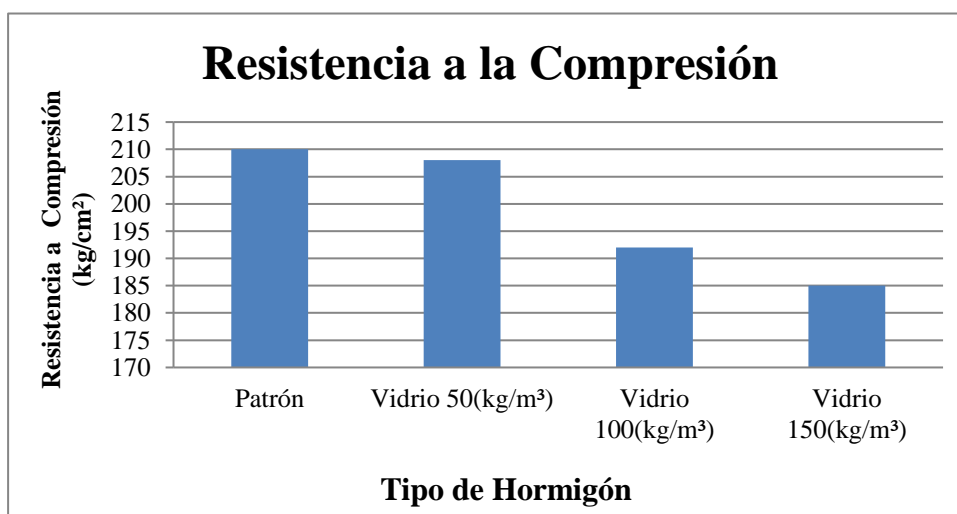
Los ensayos se realizaron siguiendo las recomendaciones de las normas citadas anteriormente y a una edad de 28 días. Se ensayaron tres probetas por cada inclusión de vidrio y muestra patrón.

**Tabla 4.3: Ensayos promedio de compresión y flexo-tracción.**

Dosis de Filler de Vidrio (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a la Compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Relación Porcentual (%)	Resistencia a la Flexo-Tracción (kg/cm <sup>2</sup> )	Relación Porcentual (%)
0 (Patrón)	210	100	37	100
50 (Vidrio)	208	99	38	103
100 (Vidrio)	192	91	34	92
150 (Vidrio)	185	88	33	89

Fuente: Elaboración propia (2017).

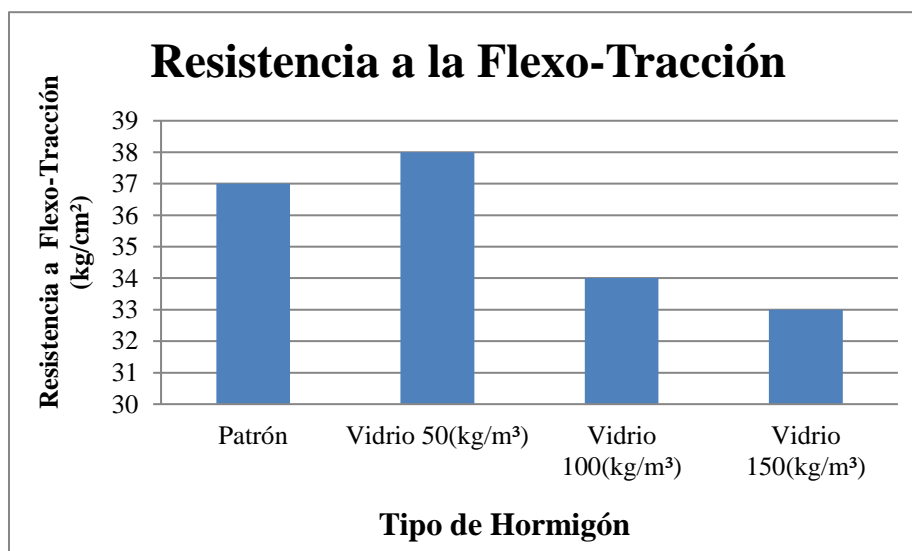
Para la primera inclusión de vidrio se obtuvieron resultados cercanos a los 20Mpa para la compresión y 3,5Mpa para la flexo-tracción, lo que indica, según norma “NCH170 – Of 1985” que este tipo de hormigones pueden ser utilizados para elementos medianamente solicitados y estructuras corrientes de construcción.



**Figura 4.5.- Promedio de los ensayos de resistencia a la compresión.**

Fuente: Elaboración propia (2017).

Como se logra apreciar en el gráfico anterior, los valores de la resistencia a la compresión entre la muestra patrón y la inclusión menor de vidrio son muy cercanos, pero al ir incrementando las dosis de vidrio, esta resistencia comienza a decaer. Por lo que se puede concluir que el aumento de filler de vidrio en las muestras, provoca un descenso en las resistencias a la compresión de los hormigones.



**Figura 4.6.- Promedio de los ensayos de resistencia a la flexo-tracción.**

Fuente: Elaboración propia (2017).

A diferencia de los valores obtenidos anteriormente, en la resistencia a la flexo-tracción la primera inclusión de vidrio ofrece una mayor resistencia que la muestra patrón, pero al ir aumentando las cantidades de vidrio esta resistencia comienza a disminuir al igual que en la resistencia a la compresión.

Este aumento en la resistencia se puede deber a la forma de las partículas de vidrio, que actúan como un árido chancado con varias aristas que ayudarían a mejorar la adherencia del vidrio con la pasta de cemento.

Por lo tanto, se puede concluir que la inclusión de 50 (kg/m<sup>3</sup>) presenta mayor resistencia a la flexo- tracción que la del hormigón patrón. Pero esta disminuye a medida que se incrementa el contenido de filler de vidrio.

#### **4.4.- CONCLUSIONES**

Sobre los objetivos de esta investigación, se logró evaluar distintos efectos del filler de vidrio sobre las probetas de hormigón. En estado fresco se verificaron las propiedades relacionadas con la trabajabilidad y el cumplimiento de los criterios para que el hormigón fabricado se considerara del tipo autocompactante.

De estos ensayos en fresco, se logró observar que la extensión de flujo aumentaba a medida que también lo hacía la cantidad de filler en la mezcla, implicando una mayor trabajabilidad por parte del hormigón.

Para el ensayo de caja "L", que otorgaba una relación para la capacidad de paso del hormigón entre armaduras, se obtuvieron datos similares entre los distintos tipos de mezcla.

En relación con las resistencias mecánicas se identificó la disminución gradual de estas a medida que aumentaba la dosis de vidrio, llegando hasta un 12% menos en comparación con la muestra patrón, concluyéndose de que a mayor dosis de filler, menor era la resistencia alcanzada.

Con respecto al objetivo general de esta investigación, las lecturas del ensayo de retracción libre a 28 días de edad muestran valores cercanos entre las probetas patrón y las primeras dos inclusiones de vidrio, siendo la muestra patrón levemente menor. Luego a los 91 días de edad, donde se presenta un mayor porcentaje de retracción, se aprecia que las muestras con inclusiones de vidrio aumentan en mayor grado en comparación con la muestra patrón, llegando hasta un 31% mayor en comparación con ésta.

Por tanto, el filler de vidrio utilizado en esta experiencia aumenta la retracción hidráulica en comparación con el filler de origen pétreo. Lo que hace, que la hipótesis planteada en esta investigación no se cumpla.

Sin embargo, los hormigones autocompactantes con filler de vidrio elaborados en laboratorio, arrojaron resultados no muy distantes en cuanto a las resistencias y retracción, por lo que, se recomendaría el uso de estos hormigones para elementos medianamente solicitados de acuerdo con lo desarrollado en esta experiencia.

#### **5.1.- FUTURAS INVESTIGACIONES**

Con respecto a futuras investigaciones relacionadas con el tema, se podría evaluar el efecto en la retracción de este tipo de filler con una menor finura y a una mayor edad.

## 6.1.- BIBLIOGRAFÍA

Catalán, C. (2013). “Estudio de la influencia del vidrio molido en hormigones grado H15, H20, Y H30.” *UACH*.

CONAMA (2010). “Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile.” *Gobierno de Chile*.

CORTÉS, A. (1987). “Ideas básicas sobre la fabricación de vidrio.” *Curso sobre Materias Primas para Cerámica y Vidrio, Ed. Soco Esp. Ceram. y Vidrio, Madrid, 227-233*.

Den Uijl, J. (2002). “Zelfverdichtend Beton.” *CUR Rapport – 4 Onderzoek in Optricht Van CUR Commissie B79 Zelfverdichtend Beton, Stichting CUR, ISBN 90 3760 242 8*.

Domone, P. (2006). “Self-Compacting Concrete: An Análisis of 11 Years of Case Studies.” *Cement & Concrete Composites. Elsevier. London. Uk*.

EFNARC (2002). “Especificaciones y directrices para el hormigón autocompactable,HAC.”*Farnham,UK*.

Fernández, M. (1991). “Hormigón” *Servicio de publicaciones. Revista de Obras Públicas. E.T.S. Ingenieros de Caminos – Madrid. España*.

Morales, G. (2015). “Evaluación de la retracción hidráulica en hormigones autocompactantes con adición de fillers de caucho.” *Universidad de Valparaíso. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería en Construcción*.

Okamura, H. and Ouchi, M. (2003). “Self-Compacting Concrete.” *Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 1, No. 1, 5-15*.

Ouchi, M. y Edamatsu, Y. (1999), “A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar particles in self-compacting concrete.” *Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-compacting concrete, Stockholm, Sweden*.

RINCÓN J. M., HERNÁNDEZ M. S., ROMERO M. Materias primas para la fabricación de materiales vítreos y cerámicos. Instituto Eduardo Torroja de Cs. de la Construcción, Madrid.

Timoshenko, S. (1957),”Resistencia de Materiales.” *ESPASA-CASLPE, S.A*.

Vargas, R. y Sciaraffia, R. (2006). “Diseño y evaluación de hormigones autocompactantes(HAC).” *Revista Ingeniería de Construcción Vol. 21, N° 1*.

Xie, y et al. (2005). “Influence of aggregate on properties of self consolidating concrete.” *RILEM Proceedings PRO 42, p. 161-171. ISBN: 2-912143-61-6*.

Zabaleta, H. (1998). "Compendio de Tecnología del Hormigón." *Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón*.