



Facultad de Ingeniería  
Escuela de Construcción Civil

# **Influencia de la incorporación de poliacrilato de sodio, sobre las propiedades de resistencia a compresión y permeabilidad del hormigón**

Por

**Michael Ignacio Reyes Rojas.**

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

**Profesor Guía: Alberto Moya Arredondo**

Junio, 2019

*Encontrar o descubrir nuestra  
verdadera vocación individual,  
equivale de hecho a descubrir un tesoro  
muy precioso*

*Samael Aun Weor*

*Dedicado a mi familia*

## AGRADECIMIENTOS

*Y ya es momento de escribir estas importantes palabras, al término de este difícil y largo proceso en el que nos aventuramos, no solo yo, si no que todos mis seres queridos que estuvieron junto a mí.*

*Quiero agradecer a mis padres, a mis 3 hermanas y a mi tía, que los amo con todo mi corazón, a **Susana Rojas, José Reyes, María José Reyes, Valeria Reyes, Leyla Reyes y Nancy Palma**, que fueron los que de alguna u otra forma me apoyaron de manera incondicional para poder concretar con éxito este gran desafío.*

*A mi madre **Susana Rojas** que siempre estuvo dándome ánimo y entregando ese amor de madre incondicional.*

*A mi padre, **José Reyes** que en vida me apoyó en todo momento, entregándome las herramientas para superar las adversidades de la vida.*

*A mis hermanas que me acompañaron y me apoyaron en todo el proceso.*

*A **Nancy Palma** quien me guio y me ayudó incluso en los momentos más duros que nos tocó como familia.*

*A mis queridas sobrinas.*

*A mis amigos y compañeros que me apoyaron para salir adelante.*

*A mis profesores, quienes se esforzaron por darnos una buena educación.*

*A mi profesor guía, **Alberto Moya**, que siempre me estuvo orientando y dando consejos.*

*Al profesor **Andrés Jamet** quien me ayudó a resolver mis dudas.*

*A los ayudantes de los laboratorios, a don **Víctor Escudero**, a don **Aldo Ramírez** y a don **Juan Carlos Abarca**, que siempre me ayudaron cuando necesitaba asistencia.*

*A mi novia **María de la Luz**, que estuvo apoyándome y acompañándome con mucho amor.*

*A las personas que estuvieron en este camino.*

*A todos en general, los que de forma directa o indirecta ayudaron en la realización y finalización de esta etapa tan importante.*

*Gracias a todos aquellos que formaron parte en este capítulo de mi vida.*

## ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS .....	8
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS .....	10
RESUMEN.....	11
1. Antecedentes generales.....	14
1.1. Introducción .....	14
1.2. Objetivos de la investigación.....	17
1.2.1. Objetivo general .....	17
1.2.2. Objetivos específicos .....	17
1.3. Alcances.....	18
1.4. Estructura de la tesis .....	19
2. Marco teórico .....	21
2.1. Generalidades .....	21
2.2. Antecedentes generales del hormigón.....	21
2.2.1. Estados del hormigón.....	21
2.2.1.1. Hormigón fresco.....	21
2.2.1.2. Hormigón endurecido .....	23
2.2.2. Clasificaciones del hormigón .....	24
2.2.2.1. Clasificación del hormigón según resistencia mecánica .....	24
2.2.2.2. Clasificación del hormigón según dosificación.....	24
2.2.3. Requisitos que debe cumplir el hormigón. ....	25
2.2.4. Retracción en el hormigón.....	26
2.2.5. Tipos de retracción en el hormigón.....	26
2.2.6. Componentes del hormigón.....	26
2.2.7. Endurecimiento del hormigón.....	28
2.2.8. Curado del hormigón.....	29
2.2.9. Curado Interno .....	29
2.2.10. Curado inapropiado del hormigón .....	30
2.2.11. Ensayos en hormigones.....	31
2.2.11.1. Ensayos en hormigones en estado endurecido .....	31
2.2.11.2. Ensayos en hormigones en estado fresco .....	31
2.3. Densidades de los áridos.....	32
2.4. Antecedentes generales de los polímeros superabsorbentes .....	32
2.4.1. Poliacrilato de sodio .....	32
3. Metodología de la investigación .....	36
3.1. Generalidades .....	36
3.2. Programa experimental.....	36
3.2.1. Esquema metodológico .....	37
3.3. Diseño de la experiencia.....	38
3.3.1. Hormigón .....	38
3.3.2. Dosificación del hormigón .....	39
3.3.3. Probetas.....	39

3.3.4.	Tratamiento de curado .....	39
3.4.	Planteamiento y definición de variables .....	40
3.4.1.	Variables independientes (Factores) .....	40
3.4.2.	Variables dependientes (Respuesta) .....	41
3.4.3.	Factorial de ensayo .....	41
3.4.4.	Cantidad de muestras a ensayar .....	42
3.5.	Ensayos a realizar .....	43
3.5.1.	Ensayo de docilidad del hormigón por asentamiento .....	44
3.5.2.	Procedimiento de ensayo de compresión .....	45
3.5.3.	Ensayo de permeabilidad al agua del hormigón .....	45
3.5.4.	Ensayo de densidad de los áridos .....	45
3.5.5.	Determinación de la temperatura del hormigón fresco .....	46
3.6.	Materiales a usar .....	46
3.6.1.	Cemento .....	46
3.6.2.	Áridos .....	46
3.6.3.	Agua .....	47
3.6.4.	Poliacrilato de Sodio .....	47
4.	Desarrollo experimental .....	49
4.1.	Introducción .....	49
4.2.	Caracterización de áridos .....	49
4.2.1.	Granulometría de la arena .....	49
4.2.2.	Granulometría de la gravilla .....	51
4.2.3.	Árido combinado (Mezcla de arena y grava) .....	53
4.2.4.	Densidad real, neta, aparente y absorción de agua de los áridos .....	55
4.3.	Caracterización del poliacrilato de sodio .....	57
4.4.	Dosificación .....	58
4.5.	Confección de las coladas de hormigón .....	58
4.5.1.	Coladas de hormigón .....	58
4.5.2.	Dosificación de hormigón para 45 litros .....	59
4.5.3.	Dosificación del hormigón con agua añadida por ensayo de docilidad .....	60
4.5.4.	Preparación de los moldes .....	61
4.5.5.	Determinación de docilidad de la mezcla .....	61
4.5.6.	Llenado, desmolde y curado de probetas .....	61
5.	Presentación y análisis de resultados .....	63
5.1.	Generalidades .....	63
5.2.	Ensayos sobre el hormigón fresco .....	63
5.2.1.	Ensayo de asentamiento de cono .....	63
5.2.1.1.	Ensayo de asentamiento de cono para las distintas dosis de poliacrilato de sodio .....	64
5.2.1.2.	Análisis de resultados de los asentamientos de cono .....	65
5.2.2.	Ensayo de densidad aparente del hormigón fresco .....	65
5.2.3.	Ensayo de temperatura .....	65
5.3.	Resultados ensayo de resistencia a compresión .....	65
5.3.1.	Resistencia a compresión del hormigón con 0% de poliacrilato de sodio .....	66
5.3.2.	Resistencia a compresión del hormigón con 0,5% de poliacrilato de sodio .....	67
5.3.3.	Resistencia a compresión del hormigón con 1% de poliacrilato de sodio .....	68
5.3.4.	Resistencia a compresión del hormigón con 1,5% de poliacrilato de sodio .....	69

5.3.5.	Comparaciones y análisis de resultados de resistencia a compresión .....	70
5.3.5.1.	Análisis comparativo de resistencias a compresión de hormigones sin curado húmedo .....	70
5.3.5.2.	Análisis comparativo de resistencias a compresión de hormigones con 3 días de curado húmedo.....	71
5.3.5.3.	Análisis comparativo de resistencias a compresión de hormigones con 7 días de curado húmedo.....	71
5.3.5.4.	Análisis comparativo de resistencias a compresión de hormigones con 28 días de curado húmedo .....	72
5.3.5.5.	Análisis comparativo de resistencias a compresión de hormigones con 56 días de curado húmedo .....	72
5.4.	Ensayo de permeabilidad .....	74
5.4.1.	Permeabilidad al agua del hormigón con 0% de poliacrilato de sodio .....	75
5.4.2.	Permeabilidad al agua del hormigón con 0,5% de poliacrilato de sodio .....	76
5.4.3.	Permeabilidad al agua del hormigón con 1% de poliacrilato de sodio .....	77
5.4.4.	Permeabilidad al agua del hormigón con 1,5% de poliacrilato de sodio .....	78
5.4.5.	Comparaciones y análisis de resultados de permeabilidad del hormigón .....	79
5.4.5.1.	Análisis comparativo de permeabilidad de hormigones sin curado húmedo .....	79
5.4.5.2.	Análisis comparativo de permeabilidad del hormigón con 3 días de curado húmedo ....	79
5.4.5.3.	Análisis comparativo de permeabilidad del hormigón con 7 días de curado húmedo ....	80
5.4.5.4.	Análisis comparativo de permeabilidad del hormigón con 28 días de curado húmedo ..	80
5.4.5.5.	Análisis comparativo de permeabilidad del hormigón con 56 días de curado húmedo ..	81
6.	Conclusiones y propuesta de futuras investigaciones .....	84
6.1.	Conclusiones .....	84
6.2.	Propuestas para futuras investigaciones.....	86
	BIBLIOGRAFÍA.....	87
	ANEXOS.....	91

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Clasificación en grados del hormigón.....	25
Tabla 2.2: Compuestos del cemento.....	27
Tabla 3.1: Adición de poliacrilato de sodio por hormigón.....	40
Tabla 3.2: Factorial de ensayo.....	41
Tabla 3.3: Cantidad de muestras para ensayo a compresión del hormigón.....	42
Tabla 3.4: Cantidad de muestras para ensayo de permeabilidad del hormigón.....	42
Tabla 3.5: Cantidad de muestras total para ensayos.....	42
Tabla 4.1: Granulometría de la arena.....	50
Tabla 4.2 - Granulometría de la gravilla Dn 20 [mm].....	51
Tabla 4.3: Granulometría árido combinado.....	54
Tabla 4.4: Densidad real, neta y absorción de agua de la arena.....	55
Tabla 4.5: Densidad real, neta y absorción de agua de la grava.....	55
Tabla 4.6: Densidad aparente suelta de la arena.....	56
Tabla 4.7: Densidad aparente compactada de la arena.....	56
Tabla 4.8: Densidad aparente suelta de la grava.....	56
Tabla 4.9: Densidad aparente compactada de la grava.....	56
Tabla 4.10: Granulometría de polvo de poliacrilato de sodio.....	57
Tabla 4.11: Dosificación para 45 litros de hormigón.....	59
Tabla 4.12: Dosificación para 45 litros de hormigón con 22% más de agua.....	60
Tabla 5.1: Asentamiento de cono.....	64
Tabla 5.2: Densidad aparente hormigón fresco.....	65
Tabla 5.3: Resultados de resistencia a compresión con 0% de poliacrilato de sodio.....	66
Tabla 5.4: Resultados de resistencia a compresión con 0,5% de poliacrilato de sodio.....	67
Tabla 5.5: Resultados de resistencia a compresión con 1,0% de poliacrilato de sodio.....	68
Tabla 5.6: Resultados de resistencia a compresión con 1,5% de poliacrilato de sodio.....	69
Tabla 5.7: Resultados comparativos de resistencia a compresión sin curado húmedo.....	70
Tabla 5.8: Resultados comparativos de resistencia a compresión con 3 días de curado húmedo.....	71
Tabla 5.9: Resultados comparativos de resistencia a compresión 7 días de curado húmedo.....	71
Tabla 5.10: Resultados comparativos de resistencia a compresión 28 días de curado húmedo.....	72
Tabla 5.11: Resultados comparativos de resistencia a compresión con 56 días de curado húmedo.....	72
Tabla 5.12: Resultados de ensayo de permeabilidad con 0% de poliacrilato de sodio.....	75
Tabla 5.13: Resultados de ensayo de permeabilidad con 0,5% de poliacrilato de sodio.....	76
Tabla 5.14: Resultados de ensayo de permeabilidad con 1,0% de poliacrilato de sodio.....	77
Tabla 5.15: Resultados de ensayo de permeabilidad con 1,5% de poliacrilato de sodio.....	78
Tabla 5.16: Comparación de resultados de permeabilidad al agua sin curado húmedo.....	79
Tabla 5.17: Comparación de resultados de permeabilidad al agua con 3 días de curado húmedo.....	79
Tabla 5.18: Comparación de resultados de permeabilidad al agua con 7 días de curado húmedo.....	80
Tabla 5.19: Comparación de resultados de permeabilidad al agua con 28 días de curado húmedo.....	80
Tabla 5.20: Comparación de resultados de permeabilidad al agua con 56 días de curado húmedo.....	81
Tabla 7.1: Datos de ensayos de las muestras.....	91

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Resistencia a la compresión en cilindros de hormigón de 150 x 300 mm en función de la edad para una variedad de condiciones de curado. ....	29
Figura 2.2: Curado externo .....	30
Figura 2.3: Curado Interno. ....	30
Figura 2.4: Estructura de molécula de poliacrilato de sodio. ....	33
Figura 2.5: Polvo de poliacrilato de sodio. ....	33
Figura 2.6: Polvo de poliacrilato de sodio húmedo. ....	34
Figura 3.1: Esquema de la metodología de la investigación. ....	37
Figura 3.2: Asentamiento del cono de Abrams. ....	44
Figura 4.1: Curva granulométrica de la arena. ....	50
Figura 4.2: Tamizado de la arena. ....	51
Figura 4.3: Curva granulométrica de la grava. ....	52
Figura 4.4: Tamizado de la grava. ....	52
Figura 4.5: Curva granulométrica árido combinado. ....	54
Figura 4.6: Tamizado de 100 gr de poliacrilato de sodio. ....	57
Figura 5.1: Medición de cono de Abrams. ....	63
Figura 5.2: Asentamiento de cono. ....	64
Figura 5.3: Grafico 0% de poliacrilato de sodio. ....	66
Figura 5.4: Grafico 0,5% de poliacrilato de sodio. ....	67
Figura 5.5: Grafico 1,0% de poliacrilato de sodio. ....	68
Figura 5.6: Grafico 1,5% de poliacrilato de sodio. ....	69
Figura 5.7: Probetas de hormigón para ensayos. ....	73
Figura 5.8: Máquina para ensayo de compresión del hormigón. ....	73
Figura 5.9: Probeta de hormigón ensayada. ....	74
Figura 5.10: Grafico de ensayo de permeabilidad del hormigón con 0% de poliacrilato de sodio. ....	75
Figura 5.11: Grafico de ensayo de permeabilidad del hormigón con 0,5% de poliacrilato de sodio. ....	76
Figura 5.12: Grafico de ensayo de permeabilidad del hormigón con 1% de poliacrilato de sodio. ....	77
Figura 5.13: Grafico de ensayo de permeabilidad del hormigón con 1,5% de poliacrilato de sodio. ....	78
Figura 5.14: Equipo de ensayo para permeabilidad del hormigón. ....	81
Figura 5.15: Probeta de hormigón ensayada a permeabilidad al agua. ....	82

**LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS**

ACI = American Concrete Institute.

kJ = kilo Joule.

kg = kilogramos.

kgf = kilogramo fuerza.

°C = Grados Celsius.

Rt = Resistencia a la Tracción.

Rc = Resistencia a Compresión.

mm = milímetros.

mm<sup>2</sup> = milímetros cuadrados.

m<sup>3</sup> = metros cúbicos.

MPa = mega Pascal.

Idiem = Instituto de Investigación y Ensayos de Materiales.

NCh = Norma Chilena.

Of = Oficial.

seg = segundo.

Pds = Poliacrilato de Sodio.

Perm = Permeabilidad.

## RESUMEN

Este proyecto de investigación plantea el uso de poliacrilato de sodio, un polímero superabsorbente, incorporado al hormigón, para usar sus propiedades de almacenar agua, retenerla y liberarla progresivamente en el tiempo para así contribuir al curado interno del hormigón. Se pretende aportar al conocimiento acerca del efecto que produce en la resistencia a la compresión y en la permeabilidad del hormigón.

Para cumplir con este propósito, se desarrolló la siguiente investigación, donde se comenzó revisando y analizando la documentación disponible, sobre el curado interno del hormigón, y el poliacrilato de sodio como agente de curado interno.

En base a la documentación existente se determinaron los porcentajes de las dosis de poliacrilato de sodio a usar, los cuales son 0,5%, 1,0% y 1,5%. Estos porcentajes de poliacrilato de sodio fueron añadidos al hormigón, sin remplazar ni uno de sus componentes. Se fabricaron probetas cúbicas de hormigón de 15 cm de arista para realizar dichos ensayos.

Los ensayos definidos son de resistencia a la compresión y permeabilidad al agua del hormigón.

Las experiencias que se exponen en esta investigación fueron desarrolladas en los laboratorios de la Escuela de Construcción Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso.

Se hizo una gran cantidad de ensayos, con distintas variables para evaluar más certeramente la influencia del poliacrilato de sodio sobre la resistencia a la compresión y permeabilidad del hormigón.

Esta investigación arrojó que la incorporación de poliacrilato de sodio, como agente de curado interno en el hormigón, sí tiene influencia en los valores obtenidos en la resistencia a compresión y en la permeabilidad al agua en éste.

Los resultados obtenidos son satisfactorios logrando cumplir con el objetivo planteado de usar poliacrilato de sodio y evaluar su influencia. Se determina de igual forma que la cantidad más apropiada para ser utilizada en el hormigón y beneficiarlo es de 0,5%, logrando con esa dosis obtener una mayor resistencia a la compresión y una menor permeabilidad del hormigón gracias al curado interno que produce el poliacrilato de sodio en los primeros días de edad en el hormigón. Los resultados más importantes de la investigación fueron que la resistencia mecánica a compresión fue un 4,49% mayor que la del patrón y que la permeabilidad en el hormigón disminuyó un 12,53% respecto al patrón, ambos sin curado externo y a los 28 días de edad.

## SUMMARY

This research project proposes the use of sodium polyacrylate, a superabsorbent polymer, incorporated into concrete, to use its properties to store water, retain it and release it progressively over time in order to contribute to the internal curing of concrete. It is intended to contribute to the knowledge about the effect it produces on the compressive strength and permeability of concrete.

To fulfill this purpose, the following research was developed, where it was begun reviewing and analyzing the available documentation on the internal curing of concrete, and sodium polyacrylate as an internal curing agent.

Based on the existing documentation, the percentages of the sodium polyacrylate doses to be used were determined, which are 0,5%, 1,0% and 1,5%. These percentages of sodium polyacrylate were added to the concrete, without replacing one of its components. Concrete cube samples of 15 cm of edge were made to carry out these tests.

The defined tests are of resistance to compression and water permeability of concrete.

The experiences that are exposed in this investigation were developed in the laboratories of the School of Civil Construction of the Faculty of Engineering of the University of Valparaíso.

A large number of tests were carried out, with different variables to more accurately evaluate the influence of sodium polyacrylate on the compressive strength and permeability of concrete.

This investigation showed that the incorporation of sodium polyacrylate, as an internal curing agent in concrete, does have an influence on the values obtained in the compression resistance and in the water permeability in it.

The results obtained are satisfactory, achieving the objective of using sodium polyacrylate and evaluating its influence. It is determined in the same way that the most appropriate amount to be used in the concrete and benefit it is 0,5%, achieving with that dose obtain a greater resistance to compression and a lower permeability of the concrete thanks to the internal curing that produces polyacrylate of sodium in the first days of age in concrete. The most important results of the investigation were that the mechanical resistance to compression was 4,49% greater than the standard and that the permeability in the concrete decreased by 12,53% with respect to the standard, both without external curing and after 28 days old.

*Capítulo I*  
*Antecedentes Generales*

## 1. Antecedentes generales

### 1.1. Introducción

El hormigón es el material más utilizado por la industria de la construcción (Saravanan, 2017).

La importancia del hormigón en los proyectos de infraestructura radica en su versatilidad, desempeño, usos y aplicaciones. Actualmente, es el material de construcción más ampliamente utilizado en el mundo. (Ceballos, 2016).

Según Helene (2007), el hormigón de cemento Portland ha demostrado ser el material de construcción más adecuado para estructuras con ventajas en relación con otros sistemas de construcción como madera, acero y mampostería. Sin embargo, desde la primera evidencia de uso, el hormigón está sometido a diversas cargas mecánicas y agresiones ambientales, lo que lleva a una alta incidencia de manifestaciones patológicas, que se acompañan de altos costos de recuperación.

Lo que se ve en el entorno práctico es cada vez más común la aparición de daños en las estructuras de hormigón y su degradación temprana, a menudo haciendo necesario restringir el uso o demoler la estructura. (Mehta, 2008).

Según Alario (2016) el curado es un factor clave para la resistencia mecánica y durabilidad del hormigón, enfatizando además que los operarios y contratistas que realmente tienen que ejecutar el curado del hormigón no perciben su importancia.

Las razones que dice Alario (2016) por la que podría terminar haciendo que faltara el agua en la mezcla de hormigón son:

- i) No se ha añadido suficiente agua durante el amasado. Muy improbable si el hormigón está fabricado en una planta, pues son procesos informatizados y muy controlados.
- ii) Que se pierda agua durante el proceso de ejecución y endurecimiento del hormigón en obra. Esto se produce debido a la evaporación que puede sufrir el agua del hormigón por el calor que pueda hacer o por el viento, que irá evaporando las capas superiores de agua y disminuyendo la cantidad que queda para reaccionar con el cemento y endurecerlo.

Verbeck y Helmuth (1968) dijeron que los defectos en la microestructura provocados por altas temperaturas de curado pueden influir negativamente en la resistencia y la durabilidad del hormigón, demostrando que esta problemática ha estado presente desde hace muchos años.

Desde hace prácticamente 100 años el tema del curado del hormigón ha estado en estudio. En el año 1907, la Asociación Nacional de Usuarios de Cemento (NACU) en Estados Unidos, confeccionó una guía, la cual recomendaba proteger al hormigón del secado prematuro. Cuatro años después esa asociación pasó a ser lo que hoy se conoce como el Instituto Americano del Concreto (ACI). A principios de los años 40 aparece la norma ACI 318, la cual incluía el tema del curado, pero recién en los años 90 el ACI publicó una norma que trataba específicamente este tema, la ACI 308-92: "Práctica estándar para el curado del hormigón", la cual fue reemplazada por las normas que se ocupan hoy, la ACI 308R-01: "Guía para el curado del hormigón" y la ACI 308.1-98: "Especificaciones estándar para el curado del hormigón".

Existen varias formas de curar el hormigón, entre ellas se encuentran:

- i) El curado húmedo, que puede decolorar las superficies.
- ii) El curado con membranas, que puede causar decoloración y manchas, e impedir la adherencia de reparaciones o recubrimientos permanentes.
- iii) El curado húmedo con riego, que puede erosionar las caras del hormigón fresco.

El proceso de curado interno es muy útil cuando el apropiado curado externo del hormigón es difícil de manejar debido a distintos factores como: la temperatura ambiente, humedad relativa del aire, indisponibilidad de trabajadores calificados o ausencia de un control de calidad adecuado. Tal proceso es relativamente simple, que solo requiere un agente de curado interno y no requiere de ningún equipo sofisticado o técnica. Una serie de beneficios como el aumento de la hidratación, la reducción de la contracción y la mayor durabilidad se pueden lograr a partir del curado interno. Aunque el curado interno se ha incluido inadvertidamente en muchos hormigones livianos producidos en los últimos 100 años, solo en la primera década del siglo XXI esta tecnología se ha incorporado intencionalmente en mezclas de Hormigón en la etapa de dosificación, usando una variedad de materiales que incluyen agregados livianos prehumedecidos, finos de hormigón triturados prehumedecidos, polímeros superabsorbentes y fibras de madera prehumedecidas (Bentz 2011).

Un estudio significativo reciente de Zou et al (2014) mostraron la efectividad de un nuevo tipo de agregado poroso como agente de curado interno en mortero. Los investigadores observaron la resistencia a la compresión mejorada, la resistencia a la tracción y la retracción en el mortero internamente curado en comparación con el mortero normal. En otra investigación de Manzur (2015), se describen brevemente algunas propiedades del hormigón curado internamente elaborado con agregados livianos porosos y polímeros superabsorbentes producidos artificialmente. Por lo tanto, es evidente que existe un desarrollo continuo para producir hormigón o mortero curado internamente utilizando diferentes tipos de materiales adecuados, ya que el curado interno tiene numerosos beneficios.

En consecuencia, se han llevado a cabo investigaciones para encontrar materiales alternativos que tengan potencial para ser utilizados como agentes de curado interno en hormigón. Además, a menudo es difícil garantizar un mecanismo de curado externo apropiado debido a la falta de disponibilidad de suficiente cantidad de agua y trabajadores capacitados, alta temperatura, alta velocidad del viento, etc. Como resultado, la realización del trabajo de hormigonado general a menudo no está a la altura, especialmente en términos de durabilidad (Bosunia, 2010). El curado interno, por lo tanto, se puede considerar como una solución potencial para los problemas relacionados con la curación de las operaciones generales de hormigonado. Por lo tanto, la identificación del agente de curado interno adecuado de bajo costo relativo es de inmensa importancia.

Un polímero superabsorbente es un material que tiene la capacidad de absorber una gran cantidad de fluido del entorno y retener el fluido dentro de su estructura (Kevern, 2012)

Una vez que el polímero superabsorbente se hidrata, se hincha y se libera el agua almacenada. Esta agua adicional puede ser una fuente de agua interna dentro del hormigón fresco y, por lo tanto, puede usarse para producir concreto curado internamente.

Una revisión exhaustiva de la literatura reveló pocos estudios significativos sobre la utilización de este polímero superabsorbente en hormigón.

En un estudio de Jensen (2013) se descubrió que la adición del polímero superabsorbente dio como resultado una reducción de la acumulación de tensión y el agrietamiento durante el endurecimiento

moderado del hormigón de alto rendimiento. Hasholt et al en el 2012 estudiaron el efecto del polímero en la resistencia mecánica del hormigón al optimizar la tasa de dosificación y el agua interna añadida. Los investigadores llegaron a la conclusión de que la adición del polímero superabsorbente podría aumentar la resistencia del hormigón al evitar las autodesecaciones. En otra investigación, Assmann y Reinhardt (2010) también encontraron que el polímero superabsorbente puede usarse para mitigar la autodesecación de hormigón a largo plazo al proporcionar agua adicional a la mezcla. Giffa et al (2013) estudiaron el efecto del polímero superabsorbente en el hormigón y lo compararon con concreto curado internamente que tenía el polímero superabsorbente o agregados livianos. Observaron un mejor rendimiento de durabilidad del hormigón con el polímero superabsorbente en comparación con el de agregados livianos y hormigón convencional. La capacidad de hincharse del polímero superabsorbente en la pasta de cemento y el efecto de él sobre la microestructura de la pasta de cemento fueron investigados por Lee et al (2014).

Por el contrario, Nasra (2013) descubrió que una cantidad excesiva del polímero superabsorbente producía grandes vacíos en el hormigón y obtenía un hormigón más débil en términos de resistencia y durabilidad. Una pequeña cantidad de polímero, por otro lado, tuvo un efecto insignificante en el rendimiento concreto.

Nasra (2013) encontró un aumento del 10% en la resistencia a la compresión a 28 días del hormigón mediante la adición del polímero superabsorbente. Daoud y Nasra (2014) encontraron que la inclusión del polímero superabsorbente dentro del hormigón crea vacíos adicionales que, en general, disminuyen su resistencia, pero mejoran la trabajabilidad y consistencia, reducen la susceptibilidad del concreto al ciclo de descongelación y, por lo tanto, mejoran la estabilidad del concreto bajo tal condición. Mechtcherine et al (2015) observó que el efecto de la adición del polímero superabsorbente en el comportamiento reológico del hormigón depende de la disponibilidad de agua libre en la mezcla.

La investigación de Kevern y Farney (2012) reveló que se puede eliminar la necesidad de curado en distintos ambientes usando el polímero superabsorbente dentro del hormigón. Es, por lo tanto, evidente que el polímero superabsorbente tiene la capacidad de modificar varias propiedades de la pasta de cemento y del hormigón dependiendo de la cantidad presente y las proporciones de la mezcla. Según estos estudios la capacidad de absorción y desorción del polímero superabsorbente puede usarse para modificar el comportamiento mecánico del hormigón, sin embargo, el efecto de la inclusión de éste en el hormigón puede tener un impacto negativo, por lo tanto, el control y su utilización es extremadamente importante. Además, se ha realizado un estudio limitado sobre la durabilidad del hormigón con polímero superabsorbente.

Manzur et al. (2015) dijeron a partir de su estudio, que el poliacrilato de sodio, el polímero superabsorbente, absorbe una cantidad significativa de agua y luego desorbe casi toda el agua absorbida en condiciones adecuadas de temperatura y humedad relativa. La condición propicia para la desorción efectiva del polímero superabsorbente se combina con la temperatura interna y la humedad relativa del hormigón, particularmente a edades más tempranas de hidratación. Por lo tanto, la cantidad de agua desorbida por el polímero superabsorbente podría utilizarse como agua de curado interna que puede contribuir a la hidratación del cemento en ausencia de suficiente cantidad de agua en la mezcla debido a la falta de disponibilidad de las condiciones de curado adecuadas.

## **1.2. Objetivos de la investigación**

### **1.2.1. Objetivo general**

Evaluar la influencia de la incorporación de poliacrilato de sodio, sobre la resistencia a compresión y permeabilidad del hormigón.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Evaluar la influencia de dosis variables de poliacrilato de sodio, sobre la resistencia a compresión del hormigón.
- Evaluar la influencia de dosis variables de poliacrilato de sodio, sobre la permeabilidad del hormigón.
- Evaluar la influencia de dosis variables de poliacrilato de sodio con curado húmedo, sobre la resistencia a compresión del hormigón.
- Evaluar la influencia de dosis variables de poliacrilato de sodio con curado húmedo, sobre la permeabilidad del hormigón.

### 1.3. Alcances

- El desarrollo de esta investigación incluye una serie de ensayos, los cuales se realizan en los laboratorios docentes de la Escuela de Construcción Civil de la Universidad de Valparaíso.
- La confección y evaluación de hormigones se realizó en laboratorios docentes de la Escuela de Construcción Civil de la Universidad de Valparaíso.
- La mezcla de hormigón se hizo bajo la NCh 163 Of 2013.
- El grado del hormigón ensayado fue G-30 con un 90% de nivel de confianza con cono de abrams de  $6 \pm 2$  cm.
- Se utilizó cemento Portland puzolánico grado corriente.
- Se emplearon áridos fluviales de la zona de Valparaíso con grava de tamaño máximo nominal de 20 [mm].
- Las probetas para ensayar fueron cúbicas de 15 X 15 x 15 cm de sección según la NCh 1017 Of 2009.
- La resistencia a compresión se ensayó según la NCh 1037 Of 2009.
- El asentamiento de cono se hizo según la NCh 1019 Of 2009.
- La permeabilidad se ensayó según la NCh 2262 Of 2009.
- Los plazos de curado fueron de 3, 7, 28 y 56 días de edad del hormigón.
- El curado húmedo del hormigón se hizo por inmersión total de la probeta en agua con cal.
- El poliacrilato de sodio, se agregó a la dosificación del hormigón en relación al peso del polvo de cemento y no reemplazó agregados pétreos.
- La adición de poliacrilato fue en proporciones de 0,5%, 1,0% y 1,5% con respecto al peso del cemento.

#### 1.4. Estructura de la tesis

Con el fin de cumplir con los objetivos planteados en esta investigación, se recurrió a la estructuración que se detalla a continuación:

- Capítulo I consta de los antecedentes generales del estudio, se identifica la problemática que justifica la investigación realizada. Se plantean objetivos y alcances.
- Capítulo II se genera el marco teórico sobre el cual se cimientan las bases de esta investigación, se presenta una recopilación de antecedentes bibliográficos de manera extensa y detallada, antecedentes relacionados con los conceptos que involucra esta investigación.
- Capítulo III corresponde a la metodología de investigación a seguir, describiendo las propiedades a estudiar y los pasos para obtener un desarrollo experimental satisfactorio.
- Capítulo IV se expone el desarrollo experimental de la experiencia en laboratorio.
- Capítulo V se presenta una tabulación y análisis de resultados.
- Capítulo VI se desarrollan las conclusiones y se proponen nuevas investigaciones.

*Capítulo II*  
*Marco Teórico*

---

## **2. Marco teórico**

### **2.1. Generalidades**

Este capítulo presenta las bases teóricas que sustentan esta investigación. Consiste en una recopilación de conceptos, los cuales abarcan: antecedentes generales, características de los materiales a utilizar, descripciones de los ensayos a realizar y definiciones.

### **2.2. Antecedentes generales del hormigón**

El hormigón es un material compuesto por un medio conglomerante que será el cemento, partículas de áridos y agua. Eventualmente aditivos y adiciones (Sanhueza, 2018).

Es el material preferentemente usado para cualquier edificación debido a que otorga una gran seguridad, manejabilidad y durabilidad. El hormigón es un material que resulta de la mezcla de agua, arena, grava, cemento, eventualmente de aditivos y adiciones, en proporciones adecuadas que, al fraguar y endurecer, adquiere resistencia según la Nch 170 Of 2016.

El hormigón es un material que se subdivide en 2 conjuntos: la pasta de cemento y los agregados, que normalmente son arenas y gravas. Por razones económicas y de estabilidad físico químicas, es conveniente que la pasta de cemento sea sustentada por un esqueleto inerte. El denominado esqueleto inerte son los áridos, los cuales pueden constituir un 75 % aproximadamente del volumen de la mezcla total del hormigón. Los áridos son un material granular compuesto de partículas de origen pétreo de diferente tamaño, duro y estable. Cabe recalcar que los áridos deben estar limpios de impurezas como materia orgánica, sales, arcillas entre otros, para así evitar que el hormigón pierda las resistencias para el cual fue diseñado, pudiendo lograr así una mayor durabilidad (Zabaleta, 1992).

La pasta de cemento se compone por materiales cementantes, agua y aire atrapado en la mezcla, también se puede incluir aire por diseño para favorecer a la mezcla, la pasta de cemento puede llegar a tener un 25% aproximadamente del volumen total de la mezcla de hormigón.

La calidad que pueda adquirir el hormigón está directamente relacionada a la forma en cómo se fabrique y a los materiales usados en ella, algo fundamental es la dosificación de los materiales porque según los materiales, el hormigón va a adquirir las resistencias para el cual está siendo solicitado, si el hormigón es fabricado de una buena manera todas las partículas de los agregados estarán completamente recubiertas por la pasta de cemento. La calidad es influenciada de manera importante por la cantidad de agua utilizada respecto a la cantidad de cemento (Kosmatka et al, 2004).

#### **2.2.1. Estados del hormigón**

##### **2.2.1.1. Hormigón fresco**

Cuando el cemento entra en contacto con el agua se produce la hidratación, comenzando una serie de fenómenos físico-químicos, llamado fraguado, en donde se produce calor, esto se denomina reacción exotérmica y es conocida o denominada como "calor de hidratación", la que varía según la norma ASTM C 186 entre 208 a 444 kJ/kg de cemento.

Para la mayoría de los elementos de hormigón, tales como losas, el calor generado no trae preocupación porque el calor se disipa rápidamente en el ambiente. Sin embargo, en estructuras de grandes volúmenes, con espesor mayor que un metro, la tasa y la cantidad de calor generado son importantes. Si este calor no se disipa rápidamente, puede ocurrir un aumento considerable de la temperatura del hormigón. Este aumento de temperatura puede ser indeseable, pues después del endurecimiento a altas temperaturas, el enfriamiento no uniforme de la masa de hormigón hasta la temperatura ambiente puede crear tensiones de tracción (esfuerzos de tensión) indeseables.

En cuanto a la temperatura del hormigón fresco, es sabido que a mayor temperatura se produce una mayor velocidad de pérdida de fluidez y más rápida hidratación del cemento, lo cual se traduce en un aceleramiento en el fraguado y en una menor resistencia del hormigón en el largo plazo (Neville, 1996).

Por otro lado, el aumento de la temperatura en el hormigón causado por el calor de hidratación es frecuentemente beneficioso en clima frío, pues ayuda a mantener las temperaturas favorables para el curado.

Las principales características del hormigón fresco son:

- a) **Docilidad:** Se dice que un hormigón es dócil cuando presenta facilidades de colocación y resistencia a la segregación. El estado del hormigón fresco debe ser manejable y de fácil colocación en donde sea requerido, esto quiere decir que sea trabajable. Neville (1995), señala que la trabajabilidad del hormigón es satisfactoria dependiendo de los métodos de compactación existentes, con los diversos métodos de compactación el hormigón puede adaptarse a cualquier tipo de forma que sea requerido, por ende, una docilidad satisfactoria para un hormigón que se colocara en secciones amplias no es necesariamente suficientemente dócil para secciones delgadas, inaccesibles o muy reforzadas.
- b) **Segregación:** Puede definirse como la separación de los materiales constituyentes de una mezcla heterogénea de manera que su distribución deje de ser uniforme. Los factores más incidentes en la segregación son el tamaño de las partículas y la densidad de los componentes (Pino, 2012). Principalmente se pueden identificar dos tipos de segregación, uno es cuando las partículas gruesas tienden a asentarse más que las finas y la otra es cuando se separa la lechada de la mezcla. Para controlar este fenómeno se recomienda elegir una granulometría adecuada y un manejo cuidadoso de la mezcla (Neville, 1995).
- c) **Exudación:** Es un tipo de segregación que se manifiesta cuando parte del agua de la mezcla de hormigón recién colocado aflora en su superficie. El fenómeno es causado por el asentamiento de las partículas sólidas en la masa (Cementos Melón, 2016). Al encontrarse una película de agua en la superficie de contacto entre hormigón-hormigón, esta puede quedar atrapada en la junta formando un elemento poroso, débil y poco durable. Por otra parte, si el agua de exudación se encuentra sometida a la terminación del hormigón como puede ser el platachado, esta se vuelve a mezclar dejando una superficie débil al desgaste. La superficie del hormigón al estar en presencia de agua y siendo mayor la velocidad de evaporación que la velocidad de exudación se producen grietas plásticas por contracción (Neville, 1995).

### 2.2.1.2. Hormigón endurecido

Después de su vertido, el hormigón pasa de su estado de fresco ha endurecido, perdiendo paulatinamente humedad y adquiriendo dureza. A medida que el hormigón experimenta este proceso de endurecimiento progresivo, se transforma de material plástico a sólido, mediante un proceso físico - químico complejo de larga duración.

Según Neville (1995), se considera comúnmente que la propiedad más valiosa del concreto es su resistencia mecánica, aunque en muchos casos prácticos, otras características tales como la durabilidad o la permeabilidad pueden ser más importantes.

Las propiedades del hormigón endurecido son las siguientes:

- a) **Resistencia mecánica a la compresión:** La propiedad más clara del hormigón y por la cual generalmente se diseña, es por su resistencia a la compresión que puede definirse como la capacidad del hormigón de resistir cargas por unidad de área especificada normalmente a los 28 días de edad. Dicha resistencia se logra mediante el diseño de la mezcla y está en función de la relación agua/cemento (Pino, 2012).  
Al disminuir la relación agua/cemento aumenta la resistencia a compresión. Además de contribuir de manera positiva en la compresión también se pueden ver afectadas de manera positiva otras propiedades como son, la resistencia a la flexión, la resistencia a la tracción y a la adherencia acero hormigón.  
Teóricamente la resistencia a tracción del hormigón es aproximadamente 1/8 a 1/12 de la resistencia a compresión, pero no existe una relación lineal; la relación de  $R_t/R_c$  (resistencia a compresión; resistencia a tracción) depende de la calidad del hormigón y es menor cuando mayor es la  $R_c$  (Videla, 2010).
- b) **Resistencia mecánica a la tracción:** Puede definirse como la capacidad del hormigón de resistir tensiones por unidad de área especificada.
- c) **Resistencia mecánica a la flexión:** La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tracción del hormigón.
- d) **Permeabilidad:** La permeabilidad se refiere al flujo (líquido o gaseoso) sujeto a un diferencial de presión. La versatilidad del hormigón como material de construcción lo ha llevado a lugares donde se requiere retenciones de agua y en condiciones severas de exposición donde debe ser casi impermeable o estanco. La estanqueidad es normalmente conocida como la habilidad del hormigón de retener agua sin escurrimiento ni escape visible. La permeabilidad es la cantidad de agua que migra a través del hormigón. La disminución de la permeabilidad del hormigón aumenta la resistencia al congelamiento, la saturación, la penetración de sulfatos, iones cloruros y otros ataques químicos. Una baja relación agua cemento también reduce la segregación y exudación además de contribuir para la estanqueidad. Se debe tener en cuenta que un hormigón estanco no debe tener fisuras, huecos, ni vacíos visibles (Neville, 1995).

- e) **Resistencia a la abrasión:** Los pisos, pavimentos y estructuras hidráulicas son expuestos a abrasión o al desgaste, por lo que en estas aplicaciones el hormigón necesita tener alta resistencia a la abrasión. Los resultados de los ensayos indican que la resistencia a la abrasión está fuertemente relacionada con la resistencia a compresión del hormigón. Un hormigón con mayor resistencia a compresión tiene más resistencia a la abrasión que un hormigón con menor resistencia a compresión (Neville, 1995).
- f) **Durabilidad:** La durabilidad del hormigón de cemento hidráulico se define como su capacidad para resistir la acción de la meteorización, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un hormigón durable conservará su forma, calidad y serviciabilidad originales al estar expuesto al ambiente. Referencias sobre este tema las presentan Klieger (1982) y Woods (1968). La durabilidad del hormigón depende de sus propiedades y de la presencia de agentes internos o externos que generen ataque al elemento estructural.

## 2.2.2. Clasificaciones del hormigón

### 2.2.2.1. Clasificación del hormigón según resistencia mecánica

Se clasifica a los hormigones por resistencia mecánica, esto es a resistencia a compresión o resistencia a tracción por flexión según la NCh 170 Of 2016.

- a) **Clasificación por resistencia a compresión:** El hormigón se clasifica según su resistencia especificada a compresión a los 28 días,  $f_c$ , determinada en probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, según la NCh 1017 Of 2009 y NCh 1037 Of 2009.
- b) **Clasificación por resistencia a tracción por flexión:** El hormigón se clasifica con respecto a su resistencia especificada a tracción por flexión a los 28 días,  $f_t$ , medida en probetas prismáticas con  $d= 150$  mm de acuerdo con la NCh 1017 Of 2009, y ensayadas aplicando cargas  $P/2$  en los límites del tercio central de la luz de ensayo, de acuerdo con la NCh 1038 Of 2009.

### 2.2.2.2. Clasificación del hormigón según dosificación

Las dosificaciones de los hormigones se pueden especificar de dos formas:

- a) **Por dosis de cemento:** En este caso se especifica la dosis de cemento que debe tener el hormigón, más el tamaño máximo del árido y el asentamiento de cono requerido. Este tipo de hormigones no tienen requisitos de resistencia mecánica.
- b) **Por resistencia a compresión:** En general, el hormigón se clasifica en grados que están en función de la resistencia a compresión. La resistencia se expresa en megapascales (MPa), a 28 días de edad, considerando probetas cilíndricas de 300 [mm] de altura y 150 [mm] de diámetro. La letra G indica la utilización de probeta cilíndrica para diferenciarla de la obsoleta probeta

cúbica de 200 mm de arista que se identificaba por la letra H. La nueva NCh 170 Of 2016 incluye la siguiente tabla 2.1 de grados de resistencias:

**Tabla 2.1: Clasificación en grados del hormigón.**

Grado del hormigón	Resistencia a la compresión especificada en Mpa
G05	5
G10	10
G15	15
G17	17
G20	20
G25	25
G30	30
G35	35
G40	40

Fuente: NCh 170 Of 2016.

Luego de la letra G se agrega una letra que diferencia el método que se va a utilizar para su colocación en obra. Se emplea N para hormigones normales diseñados para ser colocados mediante capachos, descarga directa, otros similares. Se utiliza la letra B cuando se define un hormigón que debe ser diseñado para ser transportado a su lugar de colocación mediante bombas hormigoneras.

### **2.2.3. Requisitos que debe cumplir el hormigón.**

Por normativa el hormigón debe cumplir requisitos de resistencia especificada, de durabilidad y otros requisitos según la Nch 170 Of 2016. La permeabilidad baja contribuye los requisitos que favorecen la durabilidad. En estructuras que se requiere en que el hormigón tenga una baja permeabilidad se debe verificar en probetas moldeadas para tal efecto. La durabilidad es la capacidad de una estructura o elemento de hormigón de resistir, las condiciones físicas y químicas a las que va a estar expuesta, durante la vida útil para la que fue proyectada según la Nch 170 Of 2016.

En cuanto a los áridos se deben separar en, al menos, dos fracciones, grava y arena, previo a su uso en el hormigón. El tamaño máximo nominal debe ser menor o igual que el menor de los valores siguientes:

- a) 1/5 de la menor distancia entre las paredes interiores del moldaje;
- b) 3/4 de la menor distancia libre entre armaduras;
- c) 1/3 del espesor de losas armadas.

En caso que se utilicen aditivos no considerados en Nch 170 Of 2016, se deben adoptar las recomendaciones del fabricante y verificar su electo en el hormigón por medio de mezclas de prueba.

#### 2.2.4. Retracción en el hormigón

La retracción es la deformación del hormigón en estado fresco o endurecido, la cual no depende de una carga externa aplicada y se manifiesta mediante variaciones de volumen del hormigón durante el proceso de fraguado en sus primeras horas, o cuando se encuentra ya endurecido días o meses después y se produce con la simple pérdida del agua (Cadeño et al, 2009)

Al producirse pérdida de agua en la mezcla del hormigón análogamente se produce una pérdida de volumen que puede producir tensiones internas de tracción las cuales causan la fisuración por retracción, aunque en este fenómeno también, influyen otros factores (relacionados con el diseño, condiciones ambientales y de ejecución), la retracción puede ser más o menos significativa y por ende la consecuencia de fisuración en el hormigón variará en cantidad y magnitud.

#### 2.2.5. Tipos de retracción en el hormigón

De los diferentes tipos de mecanismos de retracción los investigadores coinciden en identificar tres tipos, que son los más relevantes relacionados con este fenómeno:

- a) **Retracción plástica:** También llamada retracción capilar, es producida por la pérdida de humedad del hormigón en estado fresco durante las primeras horas después de colocado.
- b) **Retracción química:** Se refiere a diversos tipos de retracción en que su origen se radica en las reacciones químicas a nivel intrínseco del hormigón. Para esta investigación solo se considera la retracción autógena ya que es poco considerada normalmente y la misma se desarrolla en las primeras edades del hormigón.
- c) **Retracción hidráulica o retracción por secado:** Se presenta en el hormigón ya endurecido y tiene que ver con la pérdida de humedad de este ante la existencia de un gradiente de humedad entre el hormigón y el ambiente.

#### 2.2.6. Componentes del hormigón

- a) **Áridos:** Los áridos son un material pétreo compuesto de partículas duras, de forma y tamaño estables según la NCh 163 Of 2013. Las Partículas de origen pétreo, forman parte del esqueleto rígido del hormigón y este se opone a las variaciones de volumen. Este agregado constituye aproximadamente entre un 65% a un 75% del volumen total de la mezcla de hormigón. Fundamentalmente están constituidos de gravas y arenas.

La arena se define como el porcentaje de árido que pasa el tamiz de abertura nominal de 4,75 mm y es retenido en el de 0,074 mm. Las gravas se definen como el porcentaje de árido que es retenido en el tamiz nominal de 4,75 [mm] según la NCh 163 Of 2013.

El origen de los áridos nace a través de la fragmentación de distintas rocas de la corteza terrestre de forma natural o artificial. La selección de los áridos tiene una gran relevancia ya que no debe contener materiales que puedan causar deterioros como materia orgánica, arcillas y sales, entre otros (Zabaleta, 1992).

Los agregados pétreos tanto los finos como los gruesos que se utilizan para la fabricación de hormigones, deben cumplir con las exigencias de la NCh 163 Of 2013.

- b) **Cemento:** Es un material pulverizado que se compone principalmente por un compuesto llamado clínker y en una menor medida por yeso, el cemento es un conglomerante hidráulico. El cemento es un material pulverizado que por adición de una cantidad conveniente de agua forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como en el aire según la Nch 148 Of 68. El clínker es una caliza cocida que está constituido por materiales pétreos, que son mezclados en proporción adecuada. Los compuestos del clínker son los siguiente según tabla 2.2:

Tabla 2.2: Compuestos del cemento.

COMPUESTO*	FÓRMULA QUÍMICA	ABREVIATURA USADA
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}^*$
Silicato bicálcico	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}^*$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}^*$
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}^*$

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Estos compuestos se presentan en forma de 4 fases mineralizadas, en conjunto con una fase vítrea, integrada por los dos últimos, estas fases constituyen un 95% del peso total del clínker, siendo el 5% restantes componentes menores, principalmente óxidos de sodio, potasio, titanio, residuos insolubles y otros. El clínker es sometido a molienda mediante molinos de bolas hasta convertirlo en el polvo finísimo ya mencionado, adicionándose en esta etapa una proporción de yeso alrededor de un 5% de su peso, destinado a regular el proceso de fraguado de la pasta de cemento, la que de otra manera endurecería en forma casi instantánea. El cemento así obtenido se denomina cemento Portland. Durante la molienda se puede adicionar otros productos naturales o artificiales, constituyendo así los cementos Portland con adiciones o especiales, los que junto con mantener las propiedades típicas del Portland puro (fraguado y resistencia), poseen, además, otras cualidades especialmente relacionadas con la durabilidad, resistencia química y otras (Gomá, 1979).

Los cementos se clasifican según su composición y resistencia, según la NCh 148 of 68.

- c) **Agua:** El agua de amasado interviene en las reacciones de hidratación del cemento. El agua en el hormigón es fundamental porque al relacionarla con la cantidad de cemento contenido en la mezcla (relación agua/cemento), es la que determina la resistencia del mismo y en condiciones normales su durabilidad. Concretos con altos contenidos de agua (relaciones agua/cemento por encima de 0,5) pueden proporcionar resistencias bajas y ser susceptibles de ser atacados fácilmente por los agentes externos. Por el contrario, relaciones agua/cemento bajas (menores de 0,45) contribuyen de forma significativa a la resistencia de los elementos, tanto a la compresión y mejor desempeño de la estructura, como al ataque de agentes que se encuentran en el medio ambiente, y en consecuencia a la durabilidad.

Por ello, es fundamental el control de adición de agua a la mezcla durante su preparación o colocación ya que al alterar la condición inicial de esta (aumentar la relación

agua/cemento para conseguir mayor facilidad en la acomodación y el acabado, puede afectar de forma apreciable el desempeño del mismo consiguiéndose menores resistencias a la compresión o desgastes prematuros de los elementos construidos (Osorio, 2011).

Según la NCh 1498 Of 2012, las aguas que se pueden utilizar en la confección de hormigón se definen y clasifican de acuerdo a su origen como se indica a continuación:

- i. **Agua potable:** Agua proveniente de la red húmeda que cumple con NCh409/1, y que no se ha contaminado antes de su uso.
- ii. **Agua recuperada de procesos de la industria del hormigón:** Agua que cumple con los requisitos establecidos en la cláusula 5 de la NCh 1498 Of 2012.
- iii. **Agua Combinada:** Agua recuperada de procesos de la industria del hormigón combinada con agua potable u otras aguas que deben cumplir con los requisitos establecidos en el punto 4.2 de la NCh 1498 Of 2012.
- iv. **Otras Aguas:** Cualquier otra no definida, que cumpla con los requisitos establecidos en la cláusula 4 de la NCh 1498 Of 2012.

### 2.2.7. Endurecimiento del hormigón

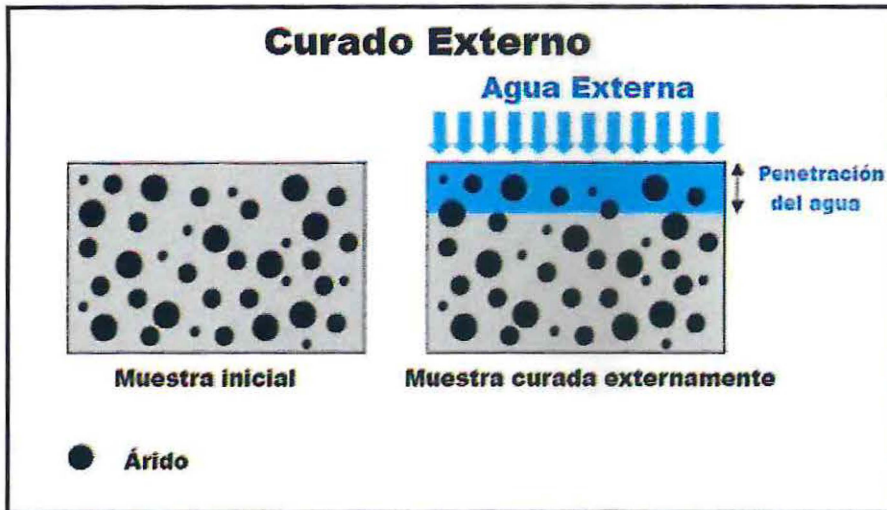
Cuando se elabora una cantidad de hormigón, se da inicio a una continua y paulatina reacción química al entrar en contacto el cemento y el agua, componentes principales de la pasta de cemento (Viano, 2008).

El agua es el componente del concreto que entra en contacto con el cemento generando el proceso de hidratación, que desencadena una serie de reacciones que terminan entregando al material sus propiedades físicas y mecánicas a fin de formar un sólido compacto con los agregados (Osorio, 2011).

El agua se clasifica en:

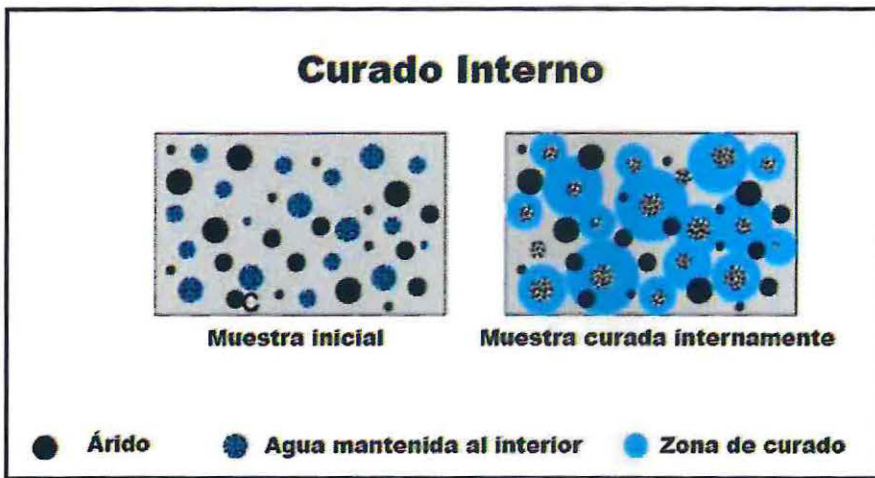
- a) **Agua de mezclado:** Cantidad de agua que requiere el hormigón por unidad de volumen para que se hidraten las partículas del cemento y para proporcionar las condiciones de manejabilidad adecuada que permitan la aplicación y el acabado del mismo en el lugar de la colocación en el estado fresco.
  - b) **Agua de curado:** Es la cantidad de agua adicional que requiere el concreto una vez endurecido a fin de que alcance los niveles de resistencia para los cuales fue diseñado. Este proceso adicional es muy importante en vista de que, una vez colocado, el hormigón pierde agua por diversas situaciones como: altas temperaturas por estar expuesto al sol o por el calor reinante en los alrededores, alta absorción donde se encuentra colocado el concreto, fuertes vientos que incrementan la velocidad de evaporación. Aunque en la actualidad existen productos que minimizan la pérdida superficial del agua, en el caso de que no sean utilizados se requiere adicionársela periódicamente a los elementos construidos para que alcancen el desempeño deseado.
-

Figura 2.2: Curado externo



Fuente: Robert Philleo, 1991.

Figura 2.3: Curado Interno.



Fuente: Robert Philleo, 1991.

### 2.2.10. Curado inapropiado del hormigón

Los efectos que pueda tener un mal curado y sus métodos en el hormigón son variados, dentro de esos efectos está el agrietamiento superficial del hormigón, el cual se da por la excesiva evaporación de agua lo que se traduce en resultados negativos para el futuro del hormigón ya que afecta su durabilidad. Un ejemplo claro de este fenómeno son las grietas visibles en la superficie de un hormigón adulto. A pesar de que la pérdida de agua por evaporación excesiva no es la principal razón de esta falla en el hormigón, tampoco debería descartarse. Debido a las tensiones que provoca la evaporación, originadas por las capas con mayor contenido de agua y aquellas con menor contenido, existe la

posibilidad que la superficie de hormigón se agriete. Se debe tener especial cuidado cuando se hormigona a temperaturas cálidas (ACI Standards and Reports, 1991).

En ACI 305: Hot weatherconcreting, se indica que las grietas son un problema importante a considerar cuando se hormigona en climas denominados cálidos, debido a la rápida evaporación del agua que contiene la mezcla de hormigón.

La permeabilidad superficial y absorción son otros efectos de un curado poco eficiente, la porosidad de un hormigón se debe a los capilares que se forman durante el proceso de hidratación del hormigón. En el inicio, la porosidad alcanza su valor más alto y va disminuyendo a medida que el hormigón se endurece. Los dos factores que más influyen en la porosidad son la relación A/C y la cantidad de cemento hidratado. Mientras mejor sea el curado del hormigón, la hidratación del cemento será mayor (Senbetta & Scholer, 1983). La porosidad está relacionada con la permeabilidad del hormigón y su capacidad de absorción. Los conceptos de porosidad, y absorción están tan ligados al curado del hormigón que incluso existen para indicar la eficiencia de un compuesto de curado.

La durabilidad del hormigón también se ve afectada dentro de un mal proceso de curado, se entiende que la durabilidad del hormigón es la capacidad que tiene el hormigón de protegerse contra el tiempo y agresiones del tipo fisicoquímica, tanto de sí mismo, como de las estructuras que cubra tal como la enfierradura. Entonces con un mal proceso de curado se afecta rigurosamente a la estructura que se está edificando. Se ha demostrado que mientras más largo sea el período de curado, el ingreso de sustancias dañinas para el acero como cloruros o dióxido de carbono, comienza más tarde y, por lo tanto, la corrosión de las barras que se encuentran en el interior de un hormigón armado demora más tiempo. (Rasheeduzzafar et al, 1998).

## 2.2.11. Ensayos en hormigones

### 2.2.11.1. Ensayos en hormigones en estado endurecido

- a) **Ensayo de Resistencia mecánica:** Es la capacidad que tiene el hormigón para soportar las cargas que se apliquen sin agrietarse o romperse.
- b) **Ensayo de Resistencia a la compresión:** La resistencia a compresión normalmente, se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado o mega pascales, a una edad de 28 días.
- c) **Ensayo de permeabilidad:** Se mide en milímetros de penetración de agua en el hormigón.

### 2.2.11.2. Ensayos en hormigones en estado fresco

- a) **Asentamiento:** Es una indicación de la docilidad que tiene el hormigón, la cual se mide mediante el ensayo del asentamiento de cono según la NCh 1019 Of 2009.
- b) **Resumen del método:** una muestra de hormigón fresco se coloca y compacta en un molde con forma de tronco cónico (cono de Abrams). El molde se levanta dejando que el hormigón se asiente. Se mide y registra el asentamiento del hormigón como la distancia vertical entre la altura original y la posición final del centro de la superficie superior del hormigón.

## 2.3. Densidades de los áridos

- a) **Densidad:** Razón entre la masa de una sustancia y su volumen.
- b) **Densidad real:** Densidad en que se considera el volumen del macizo de las partículas del árido, más el volumen de los poros, accesibles e inaccesible, de esas partículas.
- c) **Densidad real del árido seco:** Densidad real en que se considera solamente la masa del árido seco al horno.
- d) **Densidad real del árido saturado superficialmente seco:** Densidad real en que se considera la masa del árido seco más la masa del agua que llena los poros accesibles.

## 2.4. Antecedentes generales de los polímeros superabsorbentes

Los polímeros súper absorbentes (en inglés Super Absorbent Polymers o SAP), son polímeros que pueden absorber y retener cantidades extremadamente grandes de un líquido en relación a su propia masa.

### 2.4.1. Poliacrilato de sodio

El poliacrilato de sodio, es una sal de sodio del ácido poliacrílico con la fórmula química de  $(C_3H_3NaO_2)_n$  y tiene una amplia aplicación en bienes de consumo. Tiene la capacidad de absorber agua en una proporción de 200 o 300 veces su masa. Mientras que los ácidos poliacrílicos neutralizados con sodio son la forma más común utilizada en la fabricación, también hay otras sales disponibles que incluyen potasio, litio y amonio. Múltiples cadenas de compuestos de acrilato poseen una carga aniónica positiva que atrae a las moléculas de agua para que se combinen con ella y produzcan poliacrilato de sodio. Se usa ampliamente en la industria agrícola al infundir en el suelo de muchas plantas en macetas para ayudarlas a retener la humedad. La densidad del poliacrilato de sodio es de alrededor de 1.22 [g/cm<sup>3</sup>] (Manzur et al, 2015).

El poliacrilato de sodio es un polímero con múltiples aplicaciones gracias a su característica principal que es la capacidad de absorber agua, de ahí a que pertenezca a la categoría de polímero superabsorbente.

El poliacrilato de sodio es una sal del ácido poliacrílico. El poliacrilato de sodio fue disociado por primera vez en la empresa Dow Chemical Company, por 3 químicos: Niles Bashaw, Bobby Atkins y Billy Harper.

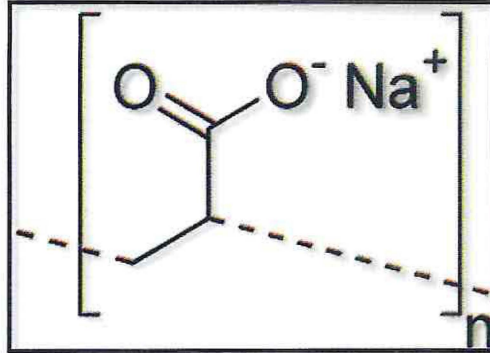
La capacidad de absorber agua del Poliacrilato de Sodio se debe a que en su estructura existen grupos de carboxilatos de sodio, que al entrar en contacto con el agua desprenden el agua y dejan libres los iones negativos de carboxilo. Estos iones se repelen, y vuelven a ser sólo estables al absorber moléculas de agua.

Al añadir polvo a las moléculas de agua, puede verse cómo el agua va siendo absorbida por cada granito de poliacrilato.

Las moléculas de agua se unen a los iones carboxilato del poliacrilato de sodio a través de enlaces puente de hidrógeno. Muchos metales solubles también tienen tendencia al intercambio iónico

con el sodio a lo largo de la cadena principal del polímero y son retenidos, motivo por el cual los poliacrilatos pueden ser utilizados como agentes secuestrantes en agua dura. En la figura 2.4 se muestra la estructura de la molécula de poliacrilato de sodio, en la figura 2.5 una imagen del polvo de poliacrilato de sodio seco y en la figura 2.6, una imagen del poliacrilato de sodio con agua, que se convierte en gel.

Figura 2.4: Estructura de molécula de poliacrilato de sodio.



Fuente: internet, [www.clorurodesodio.org](http://www.clorurodesodio.org), 2019.

Figura 2.5: Polvo de poliacrilato de sodio.



Fuente: Internet, [www.poliacrilatodesodio.com](http://www.poliacrilatodesodio.com), 2019

Figura 2.6: Polvo de poliacrilato de sodio húmedo.



Fuente: Internet, Imágenes Google, 2019.

*Capítulo III*  
*Metodología de la Investigación*

### **3. Metodología de la investigación**

#### **3.1. Generalidades**

Este capítulo presenta los antecedentes que involucra el diseño del experimento a realizar, dando a conocer los procesos por los cuales la investigación debe pasar para ser demostrada experimentalmente. Esto se llevará a cabo planteando variables de control que son las que permanecen constantes durante la experimentación, variables independientes (factores) que en este caso corresponde a la cantidad (porcentajes) de poliacrilato de sodio que se agregará a la dosificación del hormigón y a los días de curado de este.

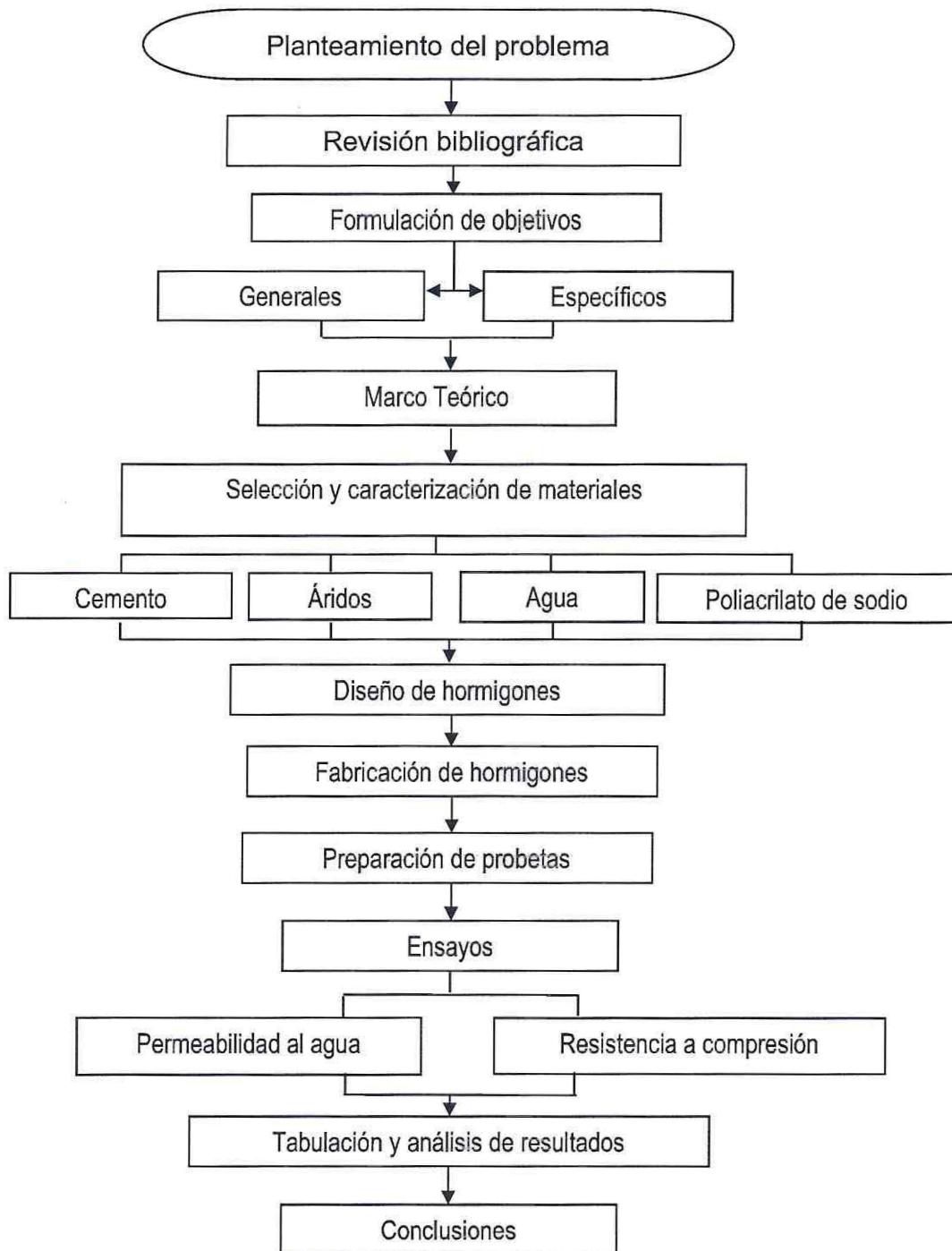
Según la metodología propuesta para la investigación se darán a conocer las etapas experimentales y sus actividades respectivas, se clasificarán las variables de estudio de la investigación y se definirán los instrumentos y equipos a utilizar para realizar la investigación.

#### **3.2. Programa experimental**

En la metodología para esta investigación, que se expone en el esquema metodológico de la figura 3.1, se detallan las etapas y procedimientos a realizar durante esta investigación, es decir, el paso a paso que se requiere para llevar a cabo la investigación propuesta.

### 3.2.1. Esquema metodológico

Figura 3.1: Esquema de la metodología de la investigación.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

El esquema metodológico (Fig. 3.1) comprende 4 etapas principales.

- i) **Primera etapa:** Planteamiento del problemas y revisión bibliográfica, donde surgen los argumentos para plantear los objetivos y alcances de la investigación.
- ii) **Segunda etapa:** Se encuentra la fase de diseño y caracterización de materiales, así como también la fabricación de hormigones.
- iii) **Tercera etapa:** Corresponde a la realización de los ensayos a los cuales se someterán las probetas abarcando el motivo de la investigación, en este caso, pruebas de resistencia a compresión y de permeabilidad.
- iv) **Cuarta etapa:** Corresponde a la recolección, tabulación y análisis de los resultados obtenidos en la etapa de ensayos y así poder entregar las conclusiones según los resultados obtenidos.

### 3.3. Diseño de la experiencia

Para evaluar la influencia del poliacrilato de sodio con distintos porcentajes en el hormigón se realizará el siguiente diseño experimental, el cual permitirá obtener hormigones con poliacrilato de sodio para poder estudiar su influencia en relación a la resistencia a compresión y permeabilidad:

#### 3.3.1. Hormigón

##### a) Hormigón Patrón:

- Se confeccionará un tipo de hormigón patrón sin poliacrilato de sodio.
- Se dosificará para así mantener constantes los parámetros de diseño, ya sea, dosis de agua y áridos, para luego variar la cantidad de poliacrilato de sodio a añadir.

##### b) Hormigón modificado:

- En este hormigón se añadirá a la dosificación el poliacrilato de sodio en proporciones de 0,5%, 0,1% y 1,5% con respecto al peso del cemento del hormigón patrón.
- Todos los parámetros de la dosificación del hormigón patrón se mantendrán constante, solo variando el porcentaje de poliacrilato de sodio.

### 3.3.2. Dosificación del hormigón

- La dosificación del hormigón se hará mediante el método IDIEM.
- Se considerará el parámetro para la resistencia especificada a la compresión de 30 MPa o 300 Kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días según la NCh 170 Of 2016.
- Todos los hormigones se diseñarán con una dosis de cemento estimada de 407,4 (kg/m<sup>3</sup>).
- Solo para el diseño del hormigón patrón se establece un asentamiento de  $6 \pm 2$  cm.

### 3.3.3. Probetas

- Se usarán probetas de cúbicas de 15 x 15 x 15 cm para ensayos de resistencia a compresión y ensayos de permeabilidad, probetas detalladas en la NCh 1017 Of 2009.
- Se utilizarán 3 probetas de hormigón para cada dosificación y contenido de poliacrilato de sodio.
- La fabricación del hormigón y llenado de probetas se hará en los laboratorios docentes de la Escuela de construcción civil de la Universidad de Valparaíso.
- El vaciado en moldes y curado de cada probeta será de acuerdo a lo indicado en la NCh 1017 Of 2009, aplicable a probetas cúbicas.
- El hormigón en las probetas será compactado con vibrador interno.

### 3.3.4. Tratamiento de curado

- Se iniciará el curado una vez sean desmoldadas las probetas con hormigón a las 24 hrs desde su fabricación.
- El curado se hará con los cubos de hormigón sumergidos en agua con cal, por 3, 7, 28 y 56 días según el ensayo, el resto del tiempo estarán sin humedad añadida o curado extra, en una habitación especial con temperatura y humedad controladas.

### 3.4. Planteamiento y definición de variables

#### 3.4.1. Variables independientes (Factores)

- a) **Contenido de poliacrilato de sodio en el hormigón:** La cantidad a utilizar está basada en 2 datos, el primero, según Daud Mohamad et al (2017) que dice que con el 1% de polímero agregado (con respecto al cemento) le da buenas características al hormigón y el segundo dato, según M. Sivaranjani et al (2017) dijo que recomienda la adición de poliacrilato de sodio al 1,5% para obtener más resistencia mecánica y trabajabilidad en el hormigón. Por lo que se usará en esta investigación el rango de 0%, a 1,5% de poliacrilato de sodio con intervalos de 0,5%, detallado en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Adición de poliacrilato de sodio por hormigón.

Hormigón	Variable Independiente			
	Patrón	G-30-1	G-30-2	G-30-3
Adición por kg de cemento de poliacrilato de sodio	0%	0,5%	1,0%	1,5%

Fuente: Elaboración propia, 2019.

- b) **Días de curado húmedo:** Se escogen los días según la guía de curado húmedo ACI 308R-16 para hacer los ensayos. Estos son 3, 7, 28 días y además 56 días de curado, donde las muestras estarán sumergidas durante esa cantidad de días y luego extraídas y dejadas al aire en una habitación donde se puede medir la temperatura y humedad relativa del ambiente. También se incluyen ensayos a muestras sin curado húmedo. La explicación de por qué curar en esa cantidad de días es la siguiente:
- i. **Justificación para 3 días de curado húmedo:** En base al trabajo de Kosmatka y Wilson (2011), para ver el comportamiento del hormigón con poliacrilato de sodio a temprana edad.
  - ii. **Justificación para 7 días de curado húmedo:** En base a la NCh 170 Of 2016 donde dice que el mínimo de curado son 7 días.
  - iii. **Justificación para 28 días de curado húmedo:** En base al envejecimiento del hormigón necesario para obtener la resistencia especificada a la rotura por compresión según su diseño.
  - iv. **Justificación para 56 días de curado húmedo:** Es para evaluar el comportamiento del poliacrilato de sodio a largo plazo.

### 3.4.2. Variables dependientes (Respuesta)

- a) Se considera la variable **Compresión** correspondiente a un ensayo mecánico desarrollado mediante la NCh 1037 Of 2009 y representa la resistencia a la compresión de las probetas de hormigón.
- Cantidad de repeticiones: 3 ensayos por variable.
- b) Se considera la variable **permeabilidad** correspondiente a un ensayo desarrollado mediante la NCh 2262 Of 2009 y representa la resistencia del hormigón a la penetración de agua bajo presión.
- Cantidad de repeticiones: 3 ensayos por variable.

### 3.4.3. Factorial de ensayo

En la siguiente tabla 3.2 se resume las combinaciones de las variables a ensayar donde Rc es resistencia a la compresión y Perm es permeabilidad:

Tabla 3.2: Factorial de ensayo.

Tipo y duración de curado ->		Sin curado húmedo					Días de curado húmedo										Total número de muestras según cantidad de poliacrilato de sodio						
							3 días				7 días			28 días				56 días					
Cantidad de ensayo ->		Día 3	Día 7	Día 11	Día 28	Día 56	Día 3	Día 7	Día 28	Día 56	Día 7	Día 28	Día 56	Día 28	Día 56	Día 56							
Cantidad de poliacrilato de sodio	0%	Rc	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	24
	0,5%	Rc	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	24
	1,0%	Rc	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	24
	1,5%	Rc	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	Rc	Perm	24
Número de muestras		96 Muestras																					
Número total de muestras repetidas 3 veces		288 muestras																					

Fuente: Elaboración propia, 2019.

### 3.4.4. Cantidad de muestras a ensayar

En la tabla 3.3 se expresa la cantidad de muestras según la combinación de cantidad de poliacrilato de sodio y los tipos de curado (húmedo y no húmedo) a ensayar a compresión.

**Tabla 3.3: Cantidad de muestras para ensayo a compresión del hormigón.**

Cantidad de muestras para ensayo a compresión		Sin curado húmedo	Días de curado húmedo				Total número de muestras según poliacrilato de sodio
			3 días	7 días	28 días	56 días	
Cantidad de Poliacrilato de sodio	0%	4 muestras	4 muestras	3 muestras	2 muestras	1 muestras	14 Muestras con 0%
	0,5%	4 muestras	4 muestras	3 muestras	2 muestras	1 muestras	14 Muestras con 0,5%
	1,0%	4 muestras	4 muestras	3 muestras	2 muestras	1 muestras	14 Muestras con 1,0%
	1,5%	4 muestras	4 muestras	3 muestras	2 muestras	1 muestras	14 Muestras con 1,5%
Número de muestras		56 Muestras					
Numero total de muestras repetidas 3 veces		168 muestras					

Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la tabla 3.4 se expone la cantidad de muestras según la combinación de cantidad de poliacrilato de sodio y los tipos de curado (húmedo y no húmedo) a ensayar en cuanto a la permeabilidad.

**Tabla 3.4: Cantidad de muestras para ensayo de permeabilidad del hormigón.**

Cantidad de muestras para ensayo de permeabilidad		Sin curado húmedo	Días de curado húmedo				Total número de muestras según poliacrilato de sodio
			3 días	7 días	28 días	56 días	
Cantidad de Poliacrilato de sodio	0%	3 muestras	2 muestras	2 muestras	2 muestras	1 muestras	10 Muestras con 0%
	0,5%	3 muestras	2 muestras	2 muestras	2 muestras	1 muestras	10 Muestras con 0,5%
	1,0%	3 muestras	2 muestras	2 muestras	2 muestras	1 muestras	10 Muestras con 1,0%
	1,5%	3 muestras	2 muestras	2 muestras	2 muestras	1 muestras	10 Muestras con 1,5%
Número de muestras		40 Muestras					
Número total de muestras repetidas 3 veces		120 muestras					

Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la tabla 3.5 se muestra la cantidad total de muestras a realizar para esta investigación, equivalentes a 288 muestras.

**Tabla 3.5: Cantidad de muestras total para ensayos.**

	Total número de muestras según poliacrilato de sodio para ensayos de resistencia a compresión y permeabilidad del hormigón
Cantidad de muestras	24 Muestras con 0%
	24 Muestras con 0.5%
	24 Muestras con 1,0%
	24 Muestras con 1,5%
Total de probetas a realizar	96 Muestras
Total de probetas repetidas 3 veces a realizar	288 Muestras

Fuente: Elaboración propia, 2019.

### 3.5. Ensayos a realizar

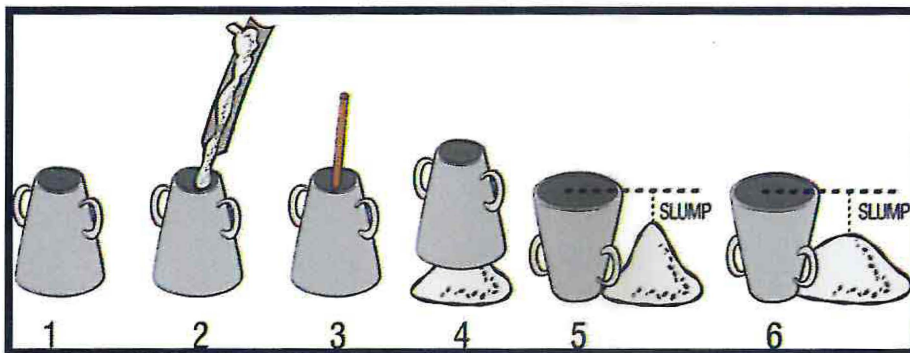
- Asentamiento. (NCh1019:2009).
- Resistencia a la compresión a los 3, 7, 28 y 56 días de edad. (NCh1037:2009).
- Permeabilidad al agua a los 11, 28 y 56 días de edad. (NCh2262:2009).
- Densidad de los áridos. (NCh1171: 2010).
- Temperatura en estado fresco en el día de confección. (ASTM C1064/C1064M-08).

### 3.5.1. Ensayo de docilidad del hormigón por asentamiento

Cuando se hormigona, el hormigón se mantiene en estado fresco y con ello se debe otorgar una docilidad adecuada, para el uso que uno desee darle. El asentamiento del hormigón se mide mediante la NCh 1019 Of 2009. Este ensayo permite medir la docilidad del hormigón fresco por la disminución de altura que experimenta, no siendo válido para asentamientos inferiores a 2 cm o mayores a 18 cm. El procedimiento consiste en:

- i. Colocar el molde sobre la plancha de apoyo horizontal, ambos limpios y humedecidos con agua.
- ii. Pararse sobre las pisaderas del cono evitando el movimiento del molde durante el llenado.
- iii. Llenar el molde en tres capas de aproximadamente igual volumen, apisonada cada una de ellas con 25 golpes de la varilla-pisón de la siguiente manera:
- iv. Apisonar la capa inferior en toda su profundidad.
- v. La mitad de los golpes se darán alrededor del perímetro con la varilla-pisón ligeramente inclinada.
- vi. Seguir con el resto de los golpes con la varilla-pisón en posición horizontal, las capas intermedia y superior deben apisonarse penetrando hasta la capa subyacente.
- vii. Durante el apisonado de la última capa mantener permanentemente en exceso de hormigón sobre el borde superior del molde.
- viii. Finalizada la compactación de la capa superior enrasar la superficie haciendo girar la varilla-pisón.
- ix. Limpiar el hormigón derramado en la zona adyacente al molde.
- x. Cargar las asas con las manos y dejar libre las pisaderas.
- xi. Levantar el molde suavemente en dirección vertical sin perturbar el hormigón.
- xii. Colocar el molde al lado del hormigón moldeado y tomar lectura en el eje central, con una aproximación de 0,5 cm, como se aprecia en la figura 3.2.

Figura 3.2: Asentamiento del cono de Abrams.



Fuente: Ciencia y cemento, 2013.

### 3.5.2. Procedimiento de ensayo de compresión

La resistencia a compresión se determinará por medio de ensayo de compresión de probetas cúbicas, basado en la NCh 1037 Of 2009, "Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas". El procedimiento de ensayo, se describe a continuación en forma resumida:

- i. **Medición de las probetas cúbicas:** se coloca el cubo con la cara de llenado verticalmente. Se miden los anchos de las 4 caras laterales del cubo aproximadamente media altura, y las alturas de las caras laterales, aproximando a 1 mm. Se determina la masa del cubo, aproximado a 50 gr.
- ii. **Ensayo:** Se deben limpiar las superficies de contacto de las placas de carga y de la probeta, colocando está en la máquina de ensayo alineada y centrada. Las probetas cúbicas se colocan con la cara de llenado verticalmente. Al acercar la placa superior de la máquina de ensayo se la debe asentar sobre la probeta de manera de obtener un apoyo lo más uniforme posible. La carga debe aplicarse en forma continua y sin choques a velocidad uniforme, de forma tal que la rotura se alcance en un tiempo igual o superior a 100 segundos y que la velocidad de aplicación de carga no sea superior a 3,5 (Kgf/cm<sup>2</sup>/seg). Finalmente se registra la carga máxima expresada en Kgf.

### 3.5.3. Ensayo de permeabilidad al agua del hormigón

Para el ensayo de permeabilidad, se hará en base a lo establecido en la NCh 2262 Of 2009, "Hormigón y mortero - Determinación de la permeabilidad al agua - Método de la penetración de agua bajo presión" aplicado en probetas de hormigón, obtenidas por moldeado según la Nch 1017 Of 2009. Se seguirá el método explicado en la norma resumido a continuación:

- i. En probetas de hormigón o mortero, obtenidas por moldeado o testigo, se prepara adecuadamente una cara de cada probeta sobre la que se aplica agua a presión.
- ii. A continuación, se divide la probeta por rotura en dos mitades y se mide la profundidad de penetración del frente de agua.

### 3.5.4. Ensayo de densidad de los áridos

El ensayo de densidad de los áridos se efectúa sobre muestras gemelas. Para cada una se adopta el procedimiento siguiente:

- i. Acondicionar la muestra del árido.
- ii. Medir su masa en condiciones seca y saturada superficialmente seca.

- iii. Calcular el volumen como la masa de agua desplazada por el árido en pesada sumergida y pesada al aire ambiente.
- iv. Calcular las densidades reales y neta y la absorción de agua en función de los valores obtenidos en las diferentes condiciones de determinación de masas.

### 3.5.5. Determinación de la temperatura del hormigón fresco

- i. Coloque el termómetro en la mezcla de hormigón fresco de modo que el sensor de temperatura esté sumergido al menos 75 mm. Presione suavemente la superficie la superficie de hormigón alrededor del aparato de modo que la temperatura ambiental no afecte la medición.
- ii. Deje el termómetro en la mezcla de hormigón recién mezclado por un periodo de 2 minutos, o hasta que la lectura de la temperatura se estabilice, entonces registre la temperatura.
- iii. La medición de la temperatura de la mezcla de hormigón fresco debe realizarse dentro de los 5 minutos siguientes a la obtención de la muestra.

## 3.6. Materiales a usar

Los materiales que se utilizan en esta investigación serán adquiridos de distintas fuentes, ya sea nacional como internacional y se manipularán en el laboratorio de hormigón de la Universidad de Valparaíso, tomando en cuenta la información y recomendación de los proveedores en el caso del cemento y poliacrilato de sodio a utilizar.

### 3.6.1. Cemento

Se utilizará cemento portland puzolánico, grado corriente de venta libre en el comercio y que esté bajo la NCh 148 Of 68 "Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales" con hasta 30% de puzolana, por lo que presenta un moderado calor de hidratación y velocidad de endurecimiento.

### 3.6.2. Áridos

Grava Dn 20 [mm] y arena, cada uno de estos materiales se ensayará por triplicado, para determinar: densidad aparente, densidad real, absorción y granulometría. Se utilizarán áridos fluviales de la zona de Valparaíso, Se caracterizarán dichos áridos de acuerdo a las NCh 163 Of 2013 "Áridos para morteros y hormigones – Requisitos", NCh 165 Of 2009 "Tamizado y determinación de la granulometría", NCh 1116 Of 2008 "Determinación de la densidad aparente", NCh 1117 Of 2010 "Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las gravas", NCh 1239 Of 2009 "Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las arenas".

### 3.6.3. Agua

Se utilizará agua potable de la ciudad de Valparaíso que cumple con la NCh 1498 Of 2012 "Hormigón - Agua de amasado – Requisitos".

### 3.6.4. Poliacrilato de Sodio

El polvo de poliacrilato de sodio es adquirido por proveedores que lo comercializan por internet, importado desde China. Cuenta con ficha Internacional de Seguridad Química ICSC: 1429 (2008). Sus Características según [www.encyclopedia.com](http://www.encyclopedia.com) son:

- **Otros nombres:** Polímero de ácido acrílico sal sódica; sal sódica del ácido poliacrílico; PAAS.
- **Fórmula:**  $-[-CH_2-CH(COONa)-]_n-$
- **Elementos:** Carbono, hidrógeno, oxígeno, sodio.
- **Tipo de compuesto:** Polímero de una sal orgánica.
- **Estado de la materia:** Sólido.
- **Peso molecular:** Varía.
- **Punto de fusión:** No aplica.
- **Punto de ebullición:** No aplica.
- **Solubilidad:** Insoluble en agua; se hincha en el agua.

*Capítulo IV*  
*Desarrollo experimental*

## **4. Desarrollo experimental**

### **4.1. Introducción**

Este capítulo presenta la etapa operativa que implica todo el trabajo y recopilación de datos que se desarrolla en el laboratorio. Este consiste en describir todo el proceso para caracterizar los áridos, el cual permite la determinación de la dosificación del hormigón patrón, luego se describen los procesos relacionados con la fabricación, colocación, desmolde, curado y almacenamiento de las probetas para los ensayos.

Se desarrollará cada uno de los procesos que tienen vínculo con los ensayos que se dispondrán a ejecutar, dándole especial énfasis al ensayo de compresión y permeabilidad

Los ensayos y estudios son los siguientes:

- Granulometría de los áridos componentes.
- Densidades aparentes, netas y absorción de agua de los áridos componentes
- Dosificación base para ajuste de proporciones en dosificación
- Ensayos de asentamiento para dosificación base.
- Ensayos de compresión y permeabilidad del hormigón

### **4.2. Caracterización de áridos**

Los áridos que se usarán son grava de tamaño máximo nominal 20 [mm] y arena de tamaño máximo nominal 5 [mm].

#### **4.2.1. Granulometría de la arena**

La arena comprada presentó un alto contenido de árido grueso que tuvo que ser separada por el tamaño de 4,75 mm, quitando lo retenido en el tamiz. Se tomaron 3 muestras representativas del material para obtener un resultado representativo de la arena a utilizar. La tabla 4.1 muestra la granulometría de las 3 muestras de arena.

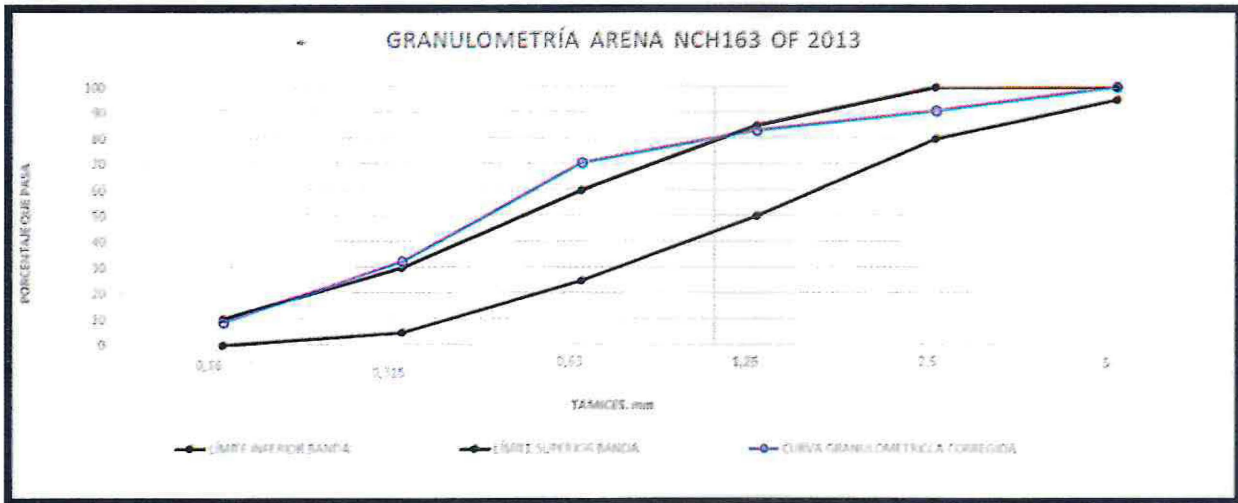
Tabla 4.1: Granulometría de la arena.

TAMIZ		PESO RETENIDO	PESO RETENIDO	PESO RETENIDO	PESO RETENIDO	% RETENIDO		%	%	BANDA GRANULOMETRICA NCH163 OF 2013 (Dmax 4,75 mm)	
ASTM	TAMIZ (mm) NCH163 OF 2013	MUESTRA 1 (gr)	MUESTRA 2 (gr)	MUESTRA 3 (gr)	(gramos)	PARCIAL	ACUMULADO	QUE PASA	QUE PASA CORREGIDO	LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
3/8	9,50	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	100		100	100
4	4,75	24,4	27,1	26,7	26,1	3	3	97	100	95	100
8	2,36	95,3	89,1	91,9	92,1	9	12	88	91	80	100
16	1,18	72,0	73,5	74,9	73,5	7	19	81	83	50	85
30	0,60	120,9	119,9	123,8	121,5	12	31	69	70	25	60
50	0,30	385,8	373,2	354,8	371,3	37	69	31	32	5	30
100	0,15	218,3	232,1	241,3	230,6	23	92	8	9	0	10
BAJO 100		81,9	83,9	85,3	83,7	8	100	0			
						Modulo de finura		2,3			

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Esta arena tiene un módulo de finura de 2.3, este valor junto a su granulometría la describen como una arena de tamaño media o normal. Corresponden fundamentalmente con las recomendaciones de la NCh 163 Of 2013. La necesidad de cemento, la energía de compactación y la sensibilidad a la segregación están dentro de lo normal. Su uso es común en la elaboración de hormigones corrientes.

Figura 4.1: Curva granulométrica de la arena.



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Figura 4.2: Tamizado de la arena.



Fuente: Elaboración propia, 2018.

#### 4.2.2. Granulometría de la gravilla

Se usó gravilla de tamaño máximo nominal 20 [mm]. Al igual que la arena se tomó 3 muestras representativas del material en el acopio.

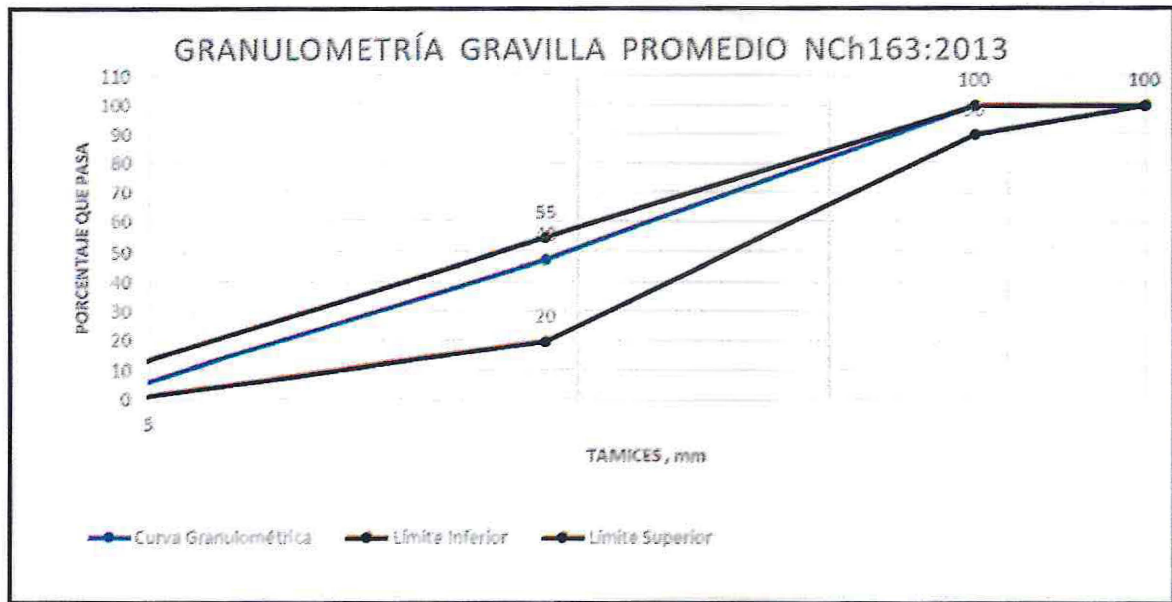
Tabla 4.2 - Granulometría de la gravilla Dn 20 [mm].

TAMIZ		PESO RETENIDO		PESO RETENIDO		% RETENIDO		BANDA GRANULOMÉTRICA NCH163 Of 2013 (D <sub>max</sub> 19 mm - 4,75 mm)		
ASTM	TAMIZ (mm) NCH163 Of 2013	MUESTRA 1 (gr)	MUESTRA 2 (gr)	MUESTRA 3 (gr)	(gramos)	PARCIAL	ACUMULADO	QUE PASA	LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
1	25	0	0	0	0	0	0	100	100	100
3/4	19	0	0	0	0	0	0	100	90	100
3/8	9,5	4036	4121	4425	4194	52	52	48	20	55
4	4,75	3659	3664	3411	3578	45	97	3	0	10
BAJO 4		305	215	163	228	3	100	0	0	5
						Módulo de finura		2,5		

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Esta grava tiene un módulo de finura de 2.5, este valor junto a su granulometría la describen como una grava de tamaño media gruesa.

Figura 4.3: Curva granulométrica de la grava.



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Figura 4.4: Tamizado de la grava.



Fuente: Elaboración propia, 2018.

### 4.2.3. Árido combinado (Mezcla de arena y grava)

La NCh 163 Of 2013 proporciona, a modo de recomendación, unas zonas granulométricas para árido combinado (grava más arena), que pueden considerarse para efectos de dosificar.

Para el cálculo de los porcentajes de arena y grava para ser combinados se usará el método por condición impuesta, donde se impone la condición de que por un mismo tamiz pase un cierto porcentaje de la mezcla. Para el método se utiliza el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned}XA+YB &= P (A+B) \\A+B &= 1\end{aligned}$$

Donde:

X es la cantidad de arena que pasa por el tamiz.

Y es la cantidad de grava que pasa por el tamiz.

P es el porcentaje de condición impuesta.

A es el porcentaje de arena en la mezcla de áridos.

G es el porcentaje de grava en la mezcla de áridos.

$A + G = 100$ , puesto que ambos porcentajes sumarán el porcentaje completo de áridos que pasa por el tamiz.

Considerando los valores promedios de las granulometrías realizadas. Se mezclarán los áridos, de modo que el porcentaje de árido combinado que pasa por la malla 4 de 4,75 mm sea del 39%, valor que se encuentra dentro de la banda (35% y 42%) del porcentaje que pasa acumulado de  $D_{max}$  19 mm (NCH163 Of 2013) entre la curva 2 y 3 forzando a la granulometría del árido a que se mantenga dentro de la banda granulométrica. Por lo tanto, mirando el tamiz N° 4 los porcentajes de arena y grava que pasan son 97 y 3 por ciento respectivamente. Con los valores de los porcentajes que pasan de la grava y la arena, se determina las proporciones de áridos mezclados, conforme a las siguientes operaciones:

$$\begin{aligned}XA+YB &= P (A+B) \\A+B &= 1 \\Con: \\X &= 97 \\Y &= 3 \\P &= 39\end{aligned}$$

- 1)  $97A + 3G = 39(A + G)$
- 2)  $58A - 36G = 0$  y  $A + G = 1$
- 3)  $94G = 58$
- 4)  $G = 0,62$
- 5)  $A = 0,62 - 1$
- 6)  $A = 0,38$

Resolviendo el sistema de ecuaciones se determinó que para el árido combinado se necesita agregar un 38% de arena y un 62% de grava.

La siguiente tabla 4.3 brinda el árido combinado, con el cual se determina las proporciones de arena y grava a utilizar en la dosificación de los hormigones en estudio.

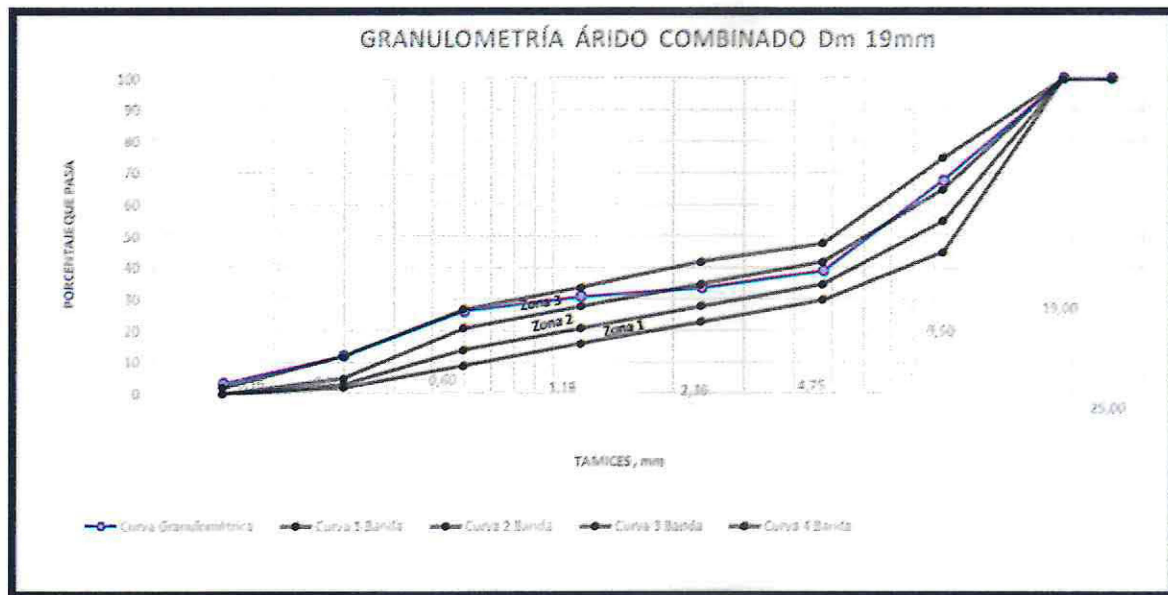
Tabla 4.3: Granulometría árido combinado.

TAMIZ		% QUE PASA		62%	38%	% QUE PASA	% QUE PASA ACUMULADO Dmax 19mm (NCH163 Of 2013)			
ASTM	TAMIZ (mm) NCH163 OF 2013	GRAVILLA	ARENA	ÁRIDO GRUESO (AG)	ÁRIDO FINO (AF)	Árido Combinado (AG + AF)	CURVA 1	CURVA 2	CURVA 3	CURVA 4
1 1/2	37,50	100	100	62	38	100	100	100	100	100
1	25,00	100	100	62	38	100	100	100	100	100
1/2	19,00	100	100	62	38	100	100	100	100	100
3/8	9,50	48	100	29	38	68	45	55	65	75
4	4,75	3	97	2	37	39	30	35	42	48
8	2,36	0	88	0	34	34	23	28	35	42
16	1,18		81		31	31	16	21	28	34
30	0,60		69		26	26	9	14	21	27
50	0,30		31		12	12	2	3	5	12
100	0,15		8		3	3	0	0	0	2
MÓDULO DE FINURA						4,9				

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Se grafica la curva granulométrica a continuación:

Figura 4.5: Curva granulométrica árido combinado.



Fuente: Elaboración propia, 2018.

La curva granulométrica queda dentro de la zona 2 y 3, que según la NCh 163 Of 2013 es para un hormigón para construcción con alta densidad de enfierradura, entre curvas límites: B (2) y C (3), con altas dosis de cemento.

#### 4.2.4. Densidad real, neta, aparente y absorción de agua de los áridos

En arenas luego de preparar la muestra se debe medir su masa en condición seca y saturada superficialmente seca, para calcular el volumen como la masa de agua desplazada por la arena sumergida en un matraz aforado, finalmente se calculan las densidades reales, neta y la absorción de agua en función de los valores obtenidos en las diferentes condiciones de determinación de las masas.

Tabla 4.4: Densidad real, neta y absorción de agua de la arena.

ARENA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	PROMEDIO
MATRAZ CON AGUA (gr) - Ma	653,4	654,8	654
MATRAZ CON MUESTRA (gr) - Mm	714,7	716,1	715
Msss (gr)	100	100	100
Ms (gr)	98,2	98,6	98,4
$\rho$ NETA (Kg/m <sup>3</sup> )	2661	2643	2652
$\rho$ REAL SECA (Kg/m <sup>3</sup> )	2537	2548	2543
$\rho$ REAL SSS (Kg/m <sup>3</sup> )	2584	2584	2584
% ABSORCIÓN	1,8	1,4	1,6

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En gravas el procedimiento consiste en preparar la muestra, determinando su masa por pesada al aire ambiente en condiciones seca y saturada superficialmente seca, luego se establece su volumen por diferencia entre pesadas al aire y sumergida en agua, con los datos anteriores es posible calcular la densidad real, neta y absorción de agua.

Tabla 4.5: Densidad real, neta y absorción de agua de la grava.

GRAVILLA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	PROMEDIO
MASA SUMERGIDA (gr) - A	1712	1716	1714
MASA Mss (gr) - B	2864	2870	2867
Ms (gr) - C	2827	2833	2830
$\rho$ NETA (Kg/m <sup>3</sup> )	2535	1765	2150
$\rho$ REAL SECA (Kg/m <sup>3</sup> )	2454	2455	2454
$\rho$ REAL SSS (Kg/m <sup>3</sup> )	2486	2487	2487
% ABSORCIÓN	1,3	1,3	1,31

Fuente: Elaboración propia, 2018.

La densidad aparente en los áridos se define como la densidad en que se considera el volumen de macizo de las partículas de un árido, más el volumen de los poros y de los huecos. Este volumen corresponde a la capacidad de la medida que contiene.

Los ensayos a efectuar a los áridos para poder obtener las densidades aparentes tanto en la arena como en la grava, se realizan según la NCh 1116 Of. 2008. Con este ensayo se puede determinar la densidad aparente suelta y la densidad aparente compactada.

Las densidades aparente suelta y compactada de la arena son las siguientes:

Tabla 4.6: Densidad aparente suelta de la arena.

ARENA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	PROMEDIO	P. TACHO (gr)	V. TACHO (cm3)
PESO MUESTRA + TACHO (gr)	2907,5	2921	2913,9	2914,133	1314,4	1040
D. AP SUELTA (gr/cm3)	1,532	1,545	1,538	1,538		
D. AP SUELTA (Kg/m3)	1532	1545	1538	1538		

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Tabla 4.7: Densidad aparente compactada de la arena.

ARENA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	PROMEDIO	P. TACHO (gr)	V. TACHO (cm3)
PESO MUESTRA + TACHO (gr)	3035,3	3038	3038,2	3037,167	1314,4	1040
D. AP COMPACTADA (gr/cm3)	1,655	1,657	1,658	1,657		
D. AP COMPACTADA (Kg/m3)	1655	1657	1658	1657		

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Las densidades aparente suelta y compactada de la grava son las siguientes:

Tabla 4.8: Densidad aparente suelta de la grava.

GRAVILLA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	PROMEDIO	P. TACHO (gr)	V. TACHO (cm3)
PESO MUESTRA + TACHO (gr)	11700	11544	11749	11664,33333	3677	5033
D. AP. SUELTA (gr/cm3)	1,594	1,563	1,604	1,587		
D. AP SUELTA (Kg/m3)	1594	1563	1604	1587		

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Tabla 4.9: Densidad aparente compactada de la grava.

GRAVILLA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	PROMEDIO	P. TACHO (gr)	V. TACHO (cm3)
PESO MUESTRA + TACHO (gr)	11785	11879	11752	11805,33333	3677	5033
D. AP COMPACTADA (gr/cm3)	1,611	1,630	1,604	1,615		
D. AP COMPACTADA (Kg/m3)	1611	1630	1604	1615		

Fuente: Elaboración propia, 2018.

### 4.3. Caracterización del poliacrilato de sodio

El poliacrilato de sodio adquirido viene en polvo, donde en la siguiente tabla se calculó el tamaño de sus partículas.

Tabla 4.10: Granulometría de polvo de poliacrilato de sodio.

MUESTRA Poliacrilato de Sodio					
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		%
ASTM	TAMIZ (mm) NCH163 OF 2013	gramos	PARCIAL	ACUMULADO	QUE PASA
3/8	9,5	0,0	0	0	100
4	4,75	0,0	0	0	100
8	2,36	0,0	0	0	100
16	1,18	0,0	0	0	100
30	0,6	0,6	1	1	99
50	0,3	80,3	81	81	19
100	0,15	18,1	18	99	1
BAJO 100		0,6	1	100	0
MASA REAL		99,6			
MASA INICIAL		100,0			
ERROR		0,40%			

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Figura 4.6: Tamizado de 100 gr de poliacrilato de sodio.



Fuente: Elaboración propia, 2018.

#### 4.4. Dosificación

Para el cálculo de las dosificaciones se empleará el método IDIEM. Considerando las granulometrías de los áridos y de acuerdo a recomendaciones empíricas del método señalado, se usa la proporción de arena de 39% cercana al 42 % que pasa por el tamiz 4,75 mm que garantiza una docilidad adecuada para las mezclas.

Con Una dosis fija de cemento por metro cubico de 405 kg, solo resta encontrar la cantidad de agua, para esto se recurre al método para dosificar Hormigones IDIEM Donde se estima una dosis de agua para 405 kg/m<sup>3</sup> de cemento de 184 litros. Este mismo método estima un peso por metro cúbico de hormigón de 2480 kg/m<sup>3</sup> para un árido de tamaño máximo 20 mm.

La dosificación final para un metro cúbico de hormigón, queda de la siguiente forma:

Cemento = 407 kg  
 Agua = 189 kg  
 Arena = 720,3 kg  
 Grava (gravilla) = 1163,3 kg

Sumatoria:  $407 + 189 + 720,3 + 1163,3 = 2480$  kg

Con corrección de humedad:  
 Cemento = 407 kg  
 Agua = 190 kg  
 Arena = 720,3 kg  
 Grava (gravilla) = 1180 kg

#### 4.5. Confección de las coladas de hormigón

##### 4.5.1. Coladas de hormigón

Para la fabricación de los hormigones el volumen a utilizar según el volumen máximo manejado por la betonera es de 60 litros aproximadamente.

Volumen a ocupar por probetas:

Volumen de 1 probeta de 15 x 15 x 15 cm = 3,375 litros.

- a) Compresión = 3.375 litros x 14 probetas = 47.25 litros.
- b) permeabilidad = 3.375 litros x 10 probetas = 33.750 litros.
- c) Exceso conveniente +10%.

24 probetas por amasada en total x 3.375 litros = 81 litros. + 10% litros = 89,1 litros.

El total de litros a usar por colada es de 90 litros aproximadamente, debido a que el volumen máximo manejado por la betonera de manera confiable es 60 litros, se realizarán 2 coladas por dosificación, cada una de 45 litros y se repetirán 3 veces para cumplir con la norma.

#### 4.5.2. Dosificación de hormigón para 45 litros

Las cantidades exactas en kilogramos a usar para 45 litros con corrección de humedad:

Cemento = 18,335 kg  
 Agua = 8,505 kg  
 Arena = 32,940 kg  
 Gravilla = 53,089 kg

Dosis de poliacrilato de sodio para 45 litros:

0,5 % de 18.335 kg = 0,0917 kg = 91.7 gr  
 1,0 % de 18.335 kg = 0,1833 kg = 183.3 gr  
 1,5 % de 18.335 kg = 0,2750 kg = 275.0 gr

4 dosificaciones distintas (tabla 4.11), que incluye las dosificaciones para las distintas dosis de poliacrilato de sodio:

Tabla 4.11: Dosificación para 45 litros de hormigón.

45		Litros con humedad corregida según método IDIEM	
Hormigón Patrón	Cemento	18,335	Kg
	agua	8,561	Kg
	arena	32,940	Kg
	gravilla	53,089	Kg
0,5 % de Poliacrilato de sodio respecto al peso del cemento	Cemento	18,335	Kg
	agua	8,561	Kg
	arena	32,940	Kg
	gravilla	53,089	Kg
	PdS	0,0917	Kg
1,0 % de Poliacrilato de sodio respecto al peso del cemento	Cemento	18,335	Kg
	agua	8,561	Kg
	arena	32,940	Kg
	grava	53,089	Kg
	PdS	0,1833	Kg
1,5 % de Poliacrilato de sodio respecto al peso del cemento	Cemento	18,335	Kg
	agua	8,561	Kg
	arena	32,940	Kg
	grava	53,089	Kg
	PdS	0,2750	Kg

Fuente: Elaboración propia, 2018.

### 4.5.3. Dosificación del hormigón con agua añadida por ensayo de docilidad

La dosificación del hormigón se modificó con una adición de un 22% de agua para cumplir con el asentamiento de cono  $6 \pm 2$ .

Para una colada de 45 litros queda de la siguiente manera, según tabla 4.12.

Tabla 4.12: Dosificación para 45 litros de hormigón con 22% más de agua.

45		Litros con humedad corregida según método IDIEM + % de agua	
Hormigón Patrón	Cemento	18,335	Kg
	agua	10,444	Kg
	arena	32,940	Kg
	gravilla	53,089	Kg
0,5 % de Poliacrilato de sodio respecto al peso del cemento	Cemento	18,335	Kg
	agua	10,444	Kg
	arena	32,940	Kg
	gravilla	53,089	Kg
	PdS	0,0917	Kg
1,0 % de Poliacrilato de sodio respecto al peso del cemento	Cemento	18,335	Kg
	agua	10,444	Kg
	arena	32,940	Kg
	grava	53,089	Kg
	PdS	0,1833	Kg
1,5 % de Poliacrilato de sodio respecto al peso del cemento	Cemento	18,335	Kg
	agua	10,444	Kg
	arena	32,940	Kg
	grava	53,089	Kg
	PdS	0,2750	Kg

Fuente: Elaboración propia, 2018.

#### **4.5.4. Preparación de los moldes**

Los moldes que se ocupan para la confección de probetas destinadas a ensayos de resistencia a compresión y permeabilidad están acordes en las tolerancias establecidas en la NCh 1017 Of 2009. Estos son metálicos, y se le aplicara desmoldante antes de llenarlos con hormigón.

#### **4.5.5. Determinación de docilidad de la mezcla**

La docilidad de la mezcla se determinará para cada una de las coladas con el método de asentamiento del cono de Abrams y cuyo procedimiento y alcances de aplicación se establecen en la NCh 1019 Of 2009.

#### **4.5.6. Llenado, desmolde y curado de probetas**

El llenado de las probetas se realizará según NCh 1017 Of 2009, efectuándose por el método del vibrado.

El desmolde de las probetas, para todas las coladas, se realizará una vez cumplido el plazo mínimo de 24 horas después de realizado el llenado de estas.

Con respecto al curado de las probetas, estas serán sumergidas en agua con cal en piscinas plásticas, luego serán retiradas y dejadas bajo techo en la sala donde se controla la humedad y la temperatura, permanecerán el tiempo restante hasta los días que serán ensayadas y se registrarán y analizarán los resultados.

*Capítulo V*  
*Presentación y análisis de resultados*

## 5. Presentación y análisis de resultados

### 5.1. Generalidades

Cumpliendo con lo señalado en el capítulo anterior se presentan los primeros resultados obtenidos y a su vez se realiza su respectivo análisis.

La metodología de análisis tiene una secuencia lógica desde la fabricación de hormigón hasta la ejecución de los ensayos.

### 5.2. Ensayos sobre el hormigón fresco

#### 5.2.1. Ensayo de asentamiento de cono

Con la dosificación calculada según el método Idiem, el cono de Abrams tuvo un asentamiento de 2 cm, no cumpliendo el mínimo de 4 cm, por lo tanto, se le añadió y calculó el agua necesaria quedar dentro del rango. Con los ajustes, se estimó que con un 22% más de agua añadida a la dosificación, se conseguiría un cono de Abrams de 7 cm quedando dentro del rango de  $6 \pm 2$  cm.

En la figura 5.1 se muestra el asentamiento presentado por el hormigón patrón.

Figura 5.1: Medición de cono de Abrams.



Fuente: Elaboración propia, 2018.

### 5.2.1.1. Ensayo de asentamiento de cono para las distintas dosis de poliacrilato de sodio

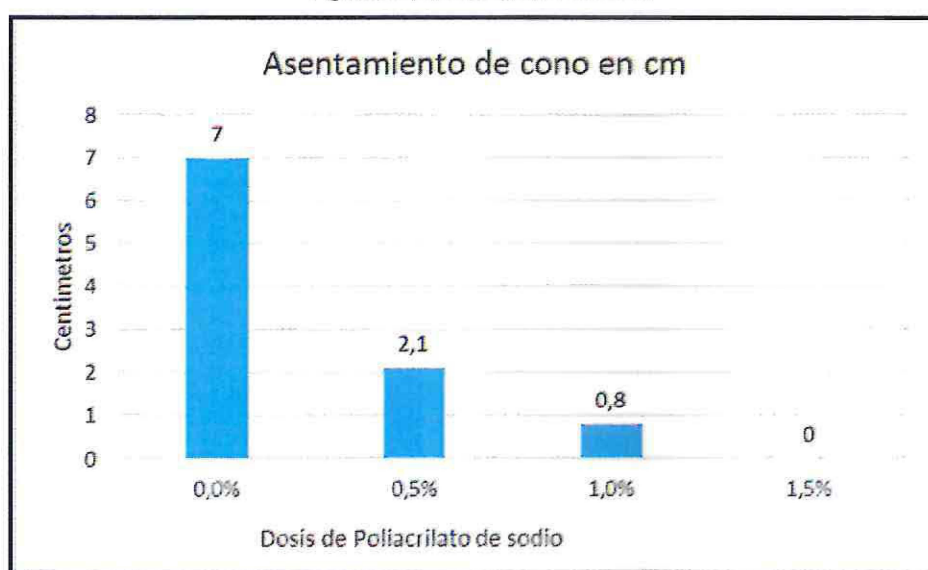
La docilidad de las mezclas, se determinó para cada colada en base al método de asentamiento del cono de Abrams. La tabla 5.1 muestra los resultados de los asentamientos obtenidos para las distintas dosificaciones de hormigón y en la figura 5.2 se muestra gráficamente. No se agrega agua adicional en los hormigones modificados para que esta no interfiera con los resultados de esta investigación.

Tabla 5.1: Asentamiento de cono.

Hormigón	Dosis de poliacrilato de sodio	Asentamiento de cono en cm
Patrón	0%	7
G-30-1	0,5%	2,1
G-30-2	1,0%	0,8
G-30-3	1,5%	0

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Figura 5.2: Asentamiento de cono.



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Como se puede observar en el gráfico anterior se detecta que a medida que aumenta la cantidad de incorporación de poliacrilato de sodio a la mezcla del hormigón, el asentamiento del cono disminuye, presentando el mayor asentamiento en el hormigón patrón y el menor asentamiento con la mayor dosis (1,5%) de poliacrilato de sodio.

Este fenómeno genera una proporción inversa entre la cantidad de poliacrilato de sodio v/s el asentamiento del cono.

La cantidad de agua fue constante según la dosificación de los hormigones. La baja en la docilidad de la mezcla fue producto del almacenamiento del agua de amasado en el poliacrilato de sodio.

### 5.2.1.2. Análisis de resultados de los asentamientos de cono

En cuanto a los datos obtenidos se puede apreciar que:

- i. Como efecto de la incorporación de un 0,5% de poliacrilato de sodio al hormigón, el asentamiento disminuye un 70% con respecto al hormigón patrón.
- ii. Como efecto de la incorporación de un 1% de poliacrilato de sodio al hormigón, el asentamiento disminuye un 89% con respecto al hormigón patrón.
- iii. Como efecto de la incorporación de un 1,5% de poliacrilato de sodio al hormigón, el asentamiento disminuye un 100% con respecto al hormigón patrón.

Estos asentamientos no cumplieron con la condición impuesta al hormigón de  $6 \pm 2$  cm (límite superior un cono de 8 cm y un límite inferior de 4 cm), sin embargo, no es requisito para esta investigación, aun así, es importante destacar que el hormigón con la mayor dosis de poliacrilato de sodio (1,5%), que fue el hormigón con más bajo asentamiento, fue el único que presentó problemas en su trabajabilidad, siendo muy difícil de compactar.

### 5.2.2. Ensayo de densidad aparente del hormigón fresco

Se presentan los datos promedio de las probetas de hormigón fresco, donde no varía mucho su densidad con el poliacrilato de sodio.

Tabla 5.2: Densidad aparente hormigón fresco.

Muestra de poliacrilato de sodio en %	Peso + Molde (kg)	Peso molde (kg)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad aparente hormigón Fresco (kg/m <sup>3</sup> )
0,0	22,413	14,381	0,0033375	2407
0,5	22,356	14,349	0,0033375	2399
1,0	22,325	14,352	0,0033375	2389
1,5	22,173	14,211	0,0033375	2386

Fuente: Elaboración propia, 2018.

### 5.2.3. Ensayo de temperatura

El promedio de temperatura del hormigón fresco fue de 18°C.

## 5.3. Resultados ensayo de resistencia a compresión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos a compresión, realizados a las probetas de hormigón, donde se toma como resistencia representativa aquella lograda con el

hormigón patrón. En las tablas siguientes se muestran los resultados obtenidos de los promedios de resistencia a compresión en mega Pascales.

### 5.3.1. Resistencia a compresión del hormigón con 0% de poliacrilato de sodio

En la tabla 5.3 se expresan los promedios de los resultados obtenidos de los ensayos a compresión de las 42 probetas patrones, según su edad y tipo de curado.

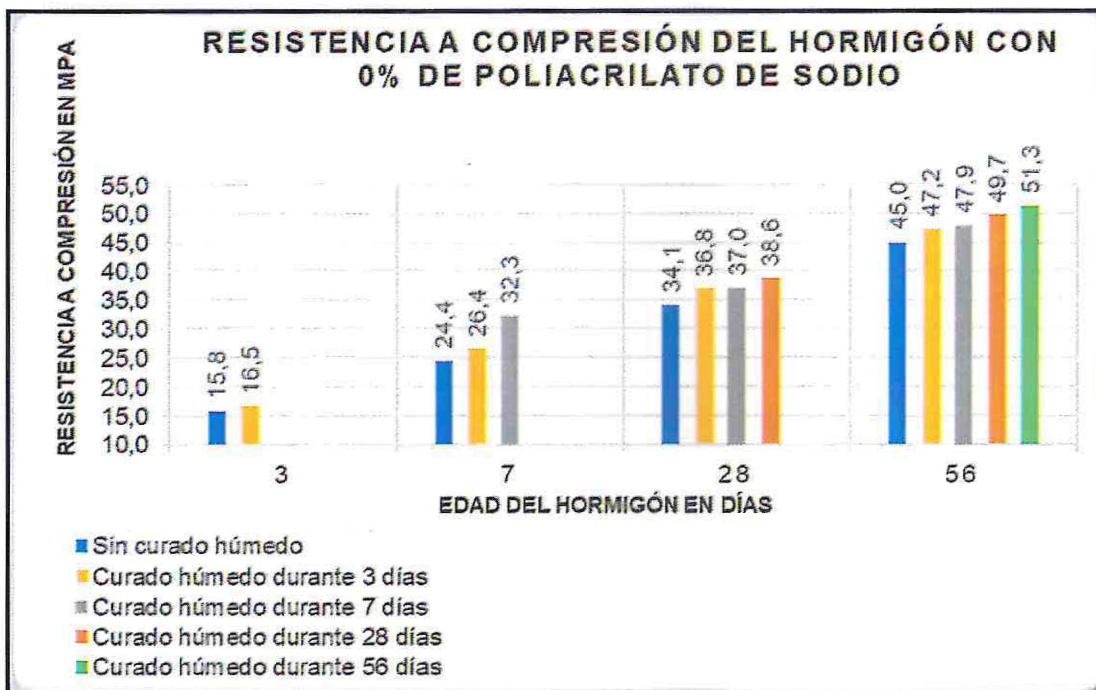
Tabla 5.3: Resultados de resistencia a compresión con 0% de poliacrilato de sodio.

0% poliacrilato de sodio (patrón)					
Edad del hormigón en días	Resistencia a compresión en Mpa				
	Sin curado húmedo	Curado húmedo durante 3 días	Curado húmedo durante 7 días	Curado húmedo durante 28 días	Curado húmedo durante 56 días
3	15,8	16,5			
7	24,4	26,4	32,3		
28	34,1	36,8	37,0	38,6	
56	45,0	47,2	47,9	49,7	51,3

Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la figura 5.3 se grafican los resultados de la resistencia a compresión del hormigón patrón.

Figura 5.3: Grafico 0% de poliacrilato de sodio.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

### 5.3.2. Resistencia a compresión del hormigón con 0,5% de poliacrilato de sodio

En la tabla 5.4 se expresan los promedios de los resultados obtenidos de los ensayos a compresión de las 42 probetas con 0,5% de poliacrilato de sodio, según su edad y tipo de curado.

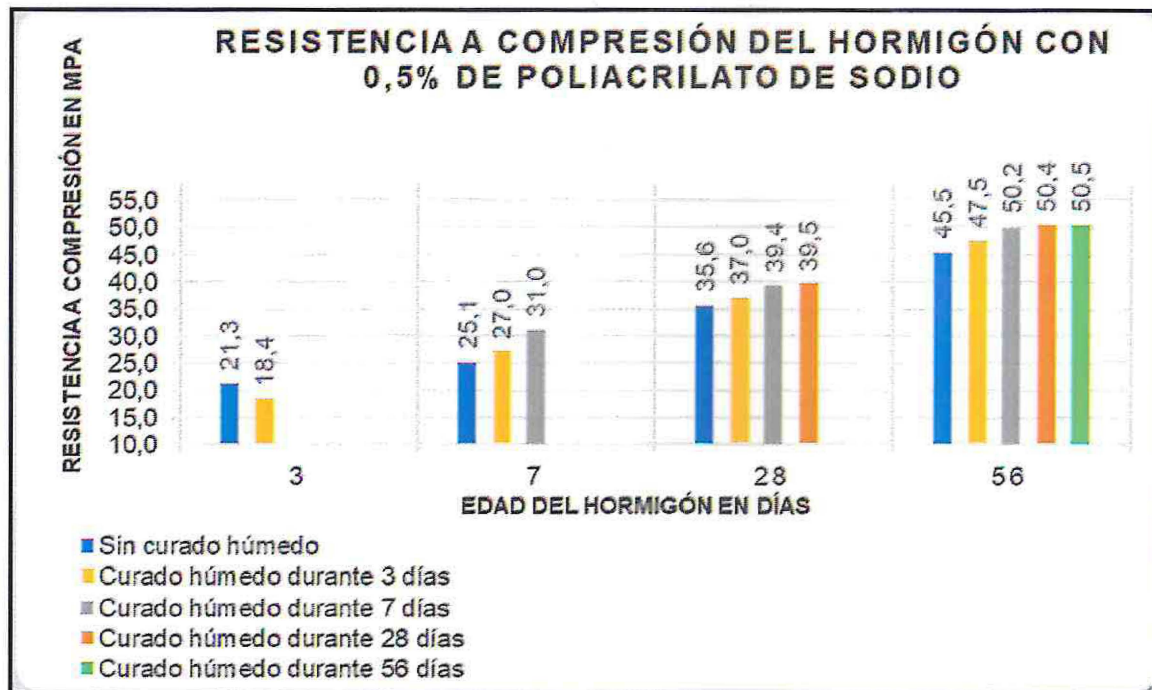
Tabla 5.4: Resultados de resistencia a compresión con 0,5% de poliacrilato de sodio.

0% poliacrilato de sodio (patrón)					
Edad del hormigón en días	Resistencia a compresión en Mpa				
	Sin curado húmedo	Curado húmedo durante 3 días	Curado húmedo durante 7 días	Curado húmedo durante 28 días	Curado húmedo durante 56 días
3	15,8	16,5			
7	24,4	26,4	32,3		
28	34,1	36,8	37,0	38,6	
56	45,0	47,2	47,9	49,7	51,3

Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la figura 5.4 se grafican los resultados con 0,5% de poliacrilato de sodio.

Figura 5.4: Grafico 0,5% de poliacrilato de sodio.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

### 5.3.3. Resistencia a compresión del hormigón con 1% de poliacrilato de sodio

En la tabla 5.5 se expresan los promedios de los resultados obtenidos de los ensayos a compresión de las 42 probetas con 1% de poliacrilato de sodio, según su edad y tipo de curado.

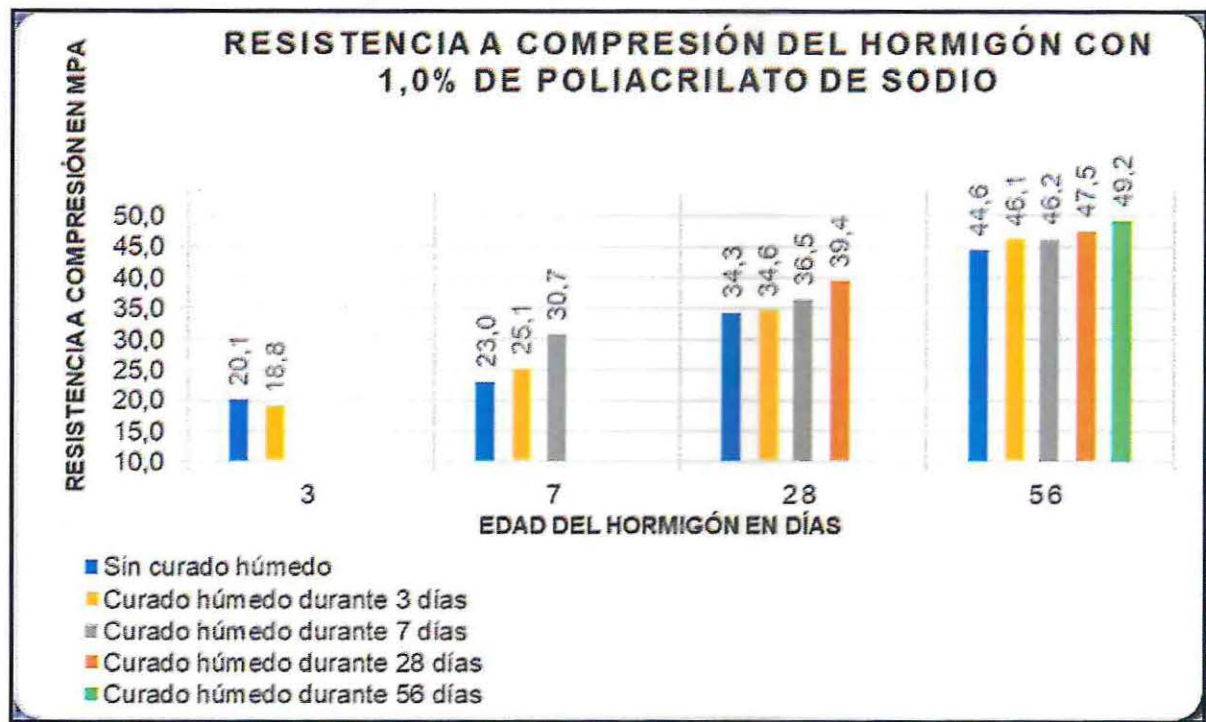
Tabla 5.5: Resultados de resistencia a compresión con 1,0% de poliacrilato de sodio.

1,0% poliacrilato de sodio					
Edad del hormigón en días	Resistencia a compresión en Mpa				
	Sin curado húmedo	Curado húmedo durante 3 días	Curado húmedo durante 7 días	Curado húmedo durante 28 días	Curado húmedo durante 56 días
3	20,1	18,8			
7	23,0	25,1	30,7		
28	34,3	34,6	36,5	39,4	
56	44,6	46,1	46,2	47,5	49,2

Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la figura 5.5 se grafican los resultados con 1% de poliacrilato de sodio.

Figura 5.5: Grafico 1,0% de poliacrilato de sodio.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

### 5.3.4. Resistencia a compresión del hormigón con 1,5% de poliacrilato de sodio

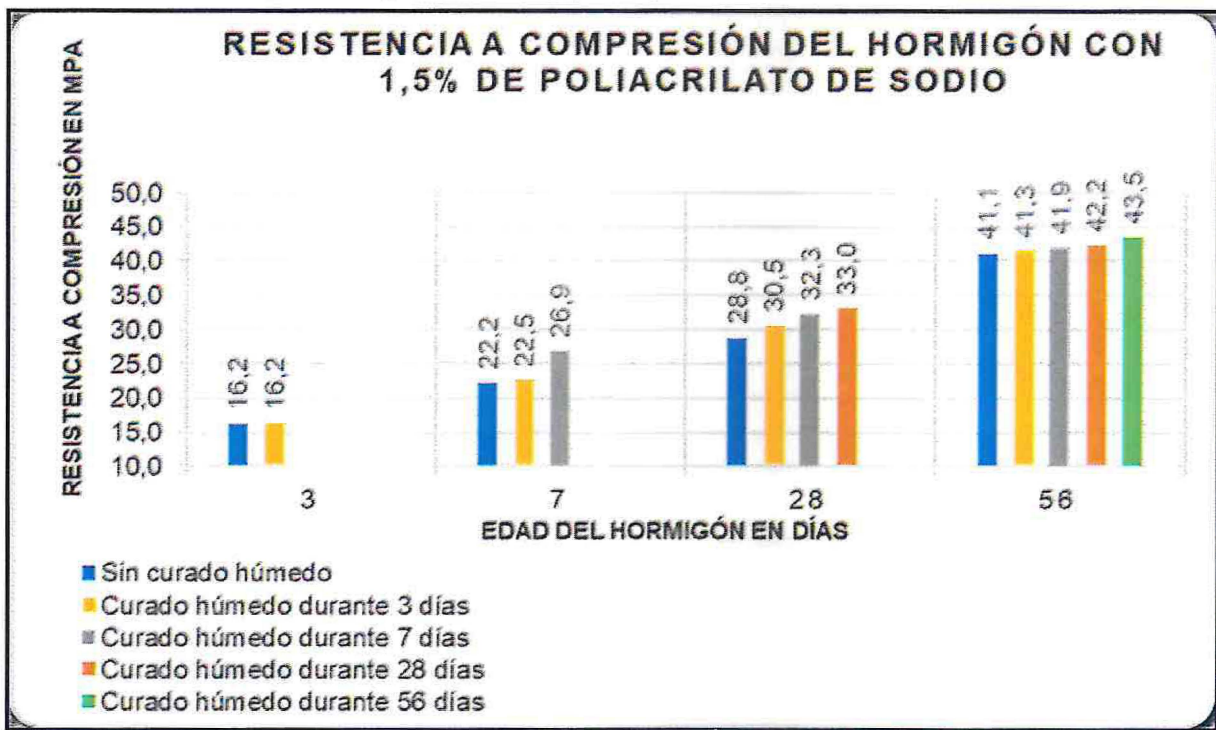
En la tabla 5.6 se expresan los promedios de los resultados obtenidos de los ensayos a compresión de las 42 probetas con 1,5% de poliacrilato de sodio, según su edad y tipo de curado.

Tabla 5.6: Resultados de resistencia a compresión con 1,5% de poliacrilato de sodio.

1,5% poliacrilato de sodio					
Edad del hormigón en días	Resistencia a compresión en Mpa				
	Sin curado húmedo	Curado húmedo durante 3 días	Curado húmedo durante 7 días	Curado húmedo durante 28 días	Curado húmedo durante 56 días
3	16,2	16,2			
7	22,2	22,5	26,9		
28	28,8	30,5	32,3	33,0	
56	41,1	41,3	41,9	42,2	43,5

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Figura 5.6: Grafico 1,5% de poliacrilato de sodio.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

Según los resultados de resistencia a compresión con las distintas dosis de poliacrilato de sodio, se detecta que a medida que aumentan los días de curado húmedo al hormigón, la resistencia a la compresión aumenta, independientemente de la dosis que esté contenga.

### 5.3.5. Comparaciones y análisis de resultados de resistencia a compresión

Se comparan los resultados de resistencias de compresión, donde se muestra en las siguientes tablas el porcentaje de cambio que tienen los hormigones con poliacrilato de sodio respecto al hormigón patrón.

#### 5.3.5.1. Analisis comparativo de resistencias a compresion de hormigones sin curado húmedo

Tabla 5.7: Resultados comparativos de resistencia a compresión sin curado húmedo.

Comparaciones de resistencias a compresión de hormigones sin curado húmedo							
Edad Hormigón en días	Contenido de Poliacrilato de sodio						
	0% (Patrón)	0,5%		1,0%		1,5%	
	Mpa	Mpa	Porcentaje de cambio	MPa	Porcentaje de cambio	MPa	Porcentaje de cambio
3	15,8	21,3	34,33%	20,1	27,05%	16,2	2,14%
7	24,4	25,1	3,06%	23,0	-5,43%	22,2	-9,00%
28	34,1	35,6	4,49%	34,3	0,67%	28,8	-15,61%
56	45,0	45,5	1,10%	44,6	-0,90%	41,1	-8,67%

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Los resultados comparativos de hormigones sin curado húmedo son los siguientes:

- Como efecto de la incorporación de 0,5% de poliacrilato de sodio al hormigón, se obtuvieron mayores valores de Rc que el hormigón patrón a los 3, 7, 28 y 56 días de edad.
- Con 1,0% de poliacrilato de sodio se obtuvieron mayores valores de Rc que el hormigón patrón solo a los 3 y 28 días de edad. A los 56 días fueron valores menores al patrón.
- Con 1,5% de poliacrilato de sodio se obtuvieron mayores valores de Rc que el hormigón patrón solo a los 3 días de edad, el resto de los días se obtuvieron valores menores al patrón.

### 5.3.5.2. Analisis comparativo de resistencias a compresion de hormigones con 3 días de curado húmedo

Tabla 5.8: Resultados comparativos de resistencia a compresión con 3 días de curado húmedo.

Comparaciones de resistencias a compresión de hormigones con 3 días de curado húmedo							
Edad Hormigón en días	Contenido de Poliacrilato de sodio						
	0% (Patrón)	0,5%		1,0%		1,5%	
	MPa	MPa	Porcentaje de cambio	MPa	Porcentaje de cambio	MPa	Porcentaje de cambio
3	16,5	18,4	11,45%	18,8	14,25%	16,2	-1,67%
7	26,4	27,0	2,31%	25,1	-4,95%	22,5	-14,78%
28	36,8	37,0	0,54%	34,6	-6,01%	30,5	-17,23%
56	47,2	47,5	0,61%	46,1	-2,23%	41,3	-12,42%

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Los resultados comparativos con 3 días de curado húmedo son los siguientes:

- Con 0,5% de poliacrilato de sodio se obtuvieron mayores valores de Rc que el hormigón patrón a los 3, 7, 28 y 56 días de edad.
- Con 1,0% de poliacrilato de sodio se obtuvieron mayores valores de Rc que el hormigón patrón solo a los 3 días de edad, el resto de los días obtuvieron valores menores al patrón.
- Con 1,5% de poliacrilato de sodio todos los hormigones obtuvieron menos resistencia a compresión que el patrón.

### 5.3.5.3. Analisis comparativo de resistencias a compresion de hormigones con 7 días de curado húmedo

Tabla 5.9: Resultados comparativos de resistencia a compresión 7 días de curado húmedo.

Comparaciones de resistencias a compresión de hormigones con 7 días de curado húmedo							
Edad Hormigón en días	Contenido de Poliacrilato de sodio						
	0% (Patrón)	0,5%		1,0%		1,5%	
	MPa	MPa	Porcentaje de cambio	MPa	Porcentaje de cambio	MPa	Porcentaje de cambio
7	32,3	31,0	-4,05%	30,7	-4,85%	26,9	-16,73%
28	37,0	39,4	6,44%	36,5	-1,39%	32,3	-12,78%
56	47,9	50,2	4,83%	46,2	-3,50%	41,9	-12,55%

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Los resultados comparativos con 7 días de curado húmedo son los siguientes:

- Con 0,5% de poliacrilato de sodio se obtuvieron mayores valores de Rc que el hormigón patrón a los 28 y 56 días de edad. A los 7 días el poliacrilato de sodio perjudicó al hormigón, ya que, al estar curado 7 días y ensayado a los 7 días, el curado externo fue más efectivo que el poliacrilato de sodio, ya que este cura internamente con el agua almacenada y si está la muestra de hormigón saturada con agua, el poliacrilato de sodio no logró cumplir esa función en 7 días.
- Con 1,0% y 1,5% de poliacrilato de sodio se obtuvieron menores valores de Rc que el hormigón patrón.

### 5.3.5.4. Analisis comparativo de resistencias a compresion de hormigones con 28 días de curado húmedo

Tabla 5.10: Resultados comparativos de resistencia a compresión 28 días de curado húmedo.

Comparaciones de resistencias a compresión de hormigones con 28 días de curado húmedo							
Edad Hormigón en días	Contenido de Poliácrlato de sodio						
	0% (Patrón)	0,5%		1,0%		1,5%	
	MPa	MPa	Porcentaje de cambio	MPa	Porcentaje de cambio	MPa	Porcentaje de cambio
28	38,6	39,5	2,27%	39,4	2,10%	33,0	-14,44%
56	49,7	50,4	1,44%	47,5	-4,47%	42,2	-15,11%

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Los resultados comparativos con 28 días de curado húmedo son los siguientes:

- Con 0,5% de poliácrlato de sodio se obtuvieron mayores valores de Rc que el hormigón patrón a los 28 y 56 días de edad. A los 28 días de ensayo, el poliácrlato de sodio si aportó una pequeña mejora, debido a un aporte de curado interno sumado al curado externo en los mismos 28 días.
- Con 1,0% de poliácrlato de sodio se obtuvieron mayores valores de Rc que el hormigón patrón solo a los 28 días, sin embargo, fue un menor valor que la dosis de 0,5%.
- Con 1,5% de poliácrlato de sodio se obtuvieron menores valores de Rc que el hormigón patrón.

### 5.3.5.5. Analisis comparativo de resistencias a compresion de hormigones con 56 días de curado húmedo

Tabla 5.11: Resultados comparativos de resistencia a compresión con 56 días de curado húmedo.

Comparaciones de resistencias a compresión de hormigones con 56 días de curado húmedo							
Edad Hormigón en días	Contenido de Poliácrlato de sodio						
	0% (Patrón)	0,5%		1,0%		1,5%	
	MPa	MPa	Porcentaje de cambio	MPa	Porcentaje de cambio	MPa	Porcentaje de cambio
56	51,3	50,5	-1,55%	49,2	-4,16%	43,5	-15,26%

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Los resultados comparativos con 56 días de curado húmedo son los siguientes:

- Con 0,5%, 1,0% y 1,5% de poliácrlato de sodio se obtuvieron menores valores que el hormigón patrón. Esto debido a que el curado externo resultó más beneficioso que el hormigón con poliácrlato de sodio.

En la figura 5.7 se muestran algunas probetas de hormigón, con su código identificador que se usó para diferenciarlas, que posteriormente fueron ensayadas.

**Figura 5.7: Probetas de hormigón para ensayos.**



Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la figura 5.8 se aprecia la máquina utilizada para el ensayo de resistencia a compresión del hormigón que pertenece a los laboratorios de la escuela de Construcción Civil de la Universidad de Valparaíso.

**Figura 5.8: Máquina para ensayo de compresión del hormigón.**



Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la figura 5.9 se muestra una probeta ensayada, que llegó a su máxima resistencia a la compresión.

**Figura 5.9: Probeta de hormigón ensayada.**



Fuente: Elaboración propia, 2018.

#### **5.4. Ensayo de permeabilidad**

Este ensayo tiene como objetivo determinar la profundidad de penetración de agua bajo presión en el hormigón endurecido. Los datos obtenidos se pueden usar para evaluar la permeabilidad del hormigón y que tanto pueden entrar los agentes que la dañen como los cloruros, por lo tanto, es un factor a considerar para evaluar su durabilidad.

Los resultados del ensayo de permeabilidad son resumidos en las siguientes tablas y son expresados como la profundidad máxima en que penetró el agua en el hormigón.

Se agrega un ensayo más al hormigón a los 11 días de edad, para obtener una referencia comparativa con respecto a las primeras edades, solo para los hormigones sin curado húmedo, por ser el más significativo para este estudio.

### 5.4.1. Permeabilidad al agua del hormigón con 0% de poliacrilato de sodio

En la tabla 5.12 se expresan los promedios de los resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad al agua de las 30 probetas patrones, según su edad y tipo de curado.

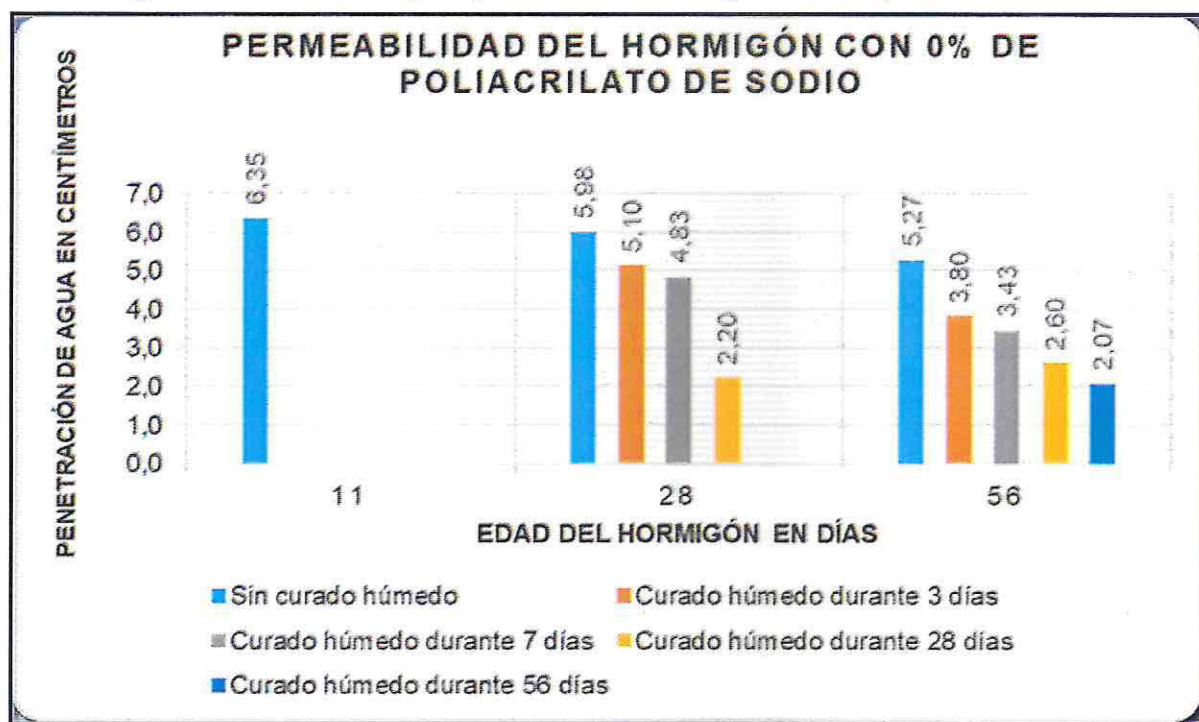
Tabla 5.12: Resultados de ensayo de permeabilidad con 0% de poliacrilato de sodio.

0% poliacrilato de sodio (patrón)					
Edad del hormigón en días	Permeabilidad en centímetros				
	Sin curado húmedo	Curado húmedo durante 3 días	Curado húmedo durante 7 días	Curado húmedo durante 28 días	Curado húmedo durante 56 días
11	6,35				
28	5,98	5,10	4,83	2,20	
56	5,27	3,80	3,43	2,60	2,07

Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la figura 5.10 se grafican los resultados del hormigón patrón.

Figura 5.10: Grafico de ensayo de permeabilidad del hormigón con 0% de poliacrilato de sodio.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

### 5.4.2. Permeabilidad al agua del hormigón con 0,5% de poliacrilato de sodio

En la tabla 5.13 se expresan los promedios de los resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad al agua de las 30 probetas con 0,5% de poliacrilato de sodio, según su edad y tipo de curado.

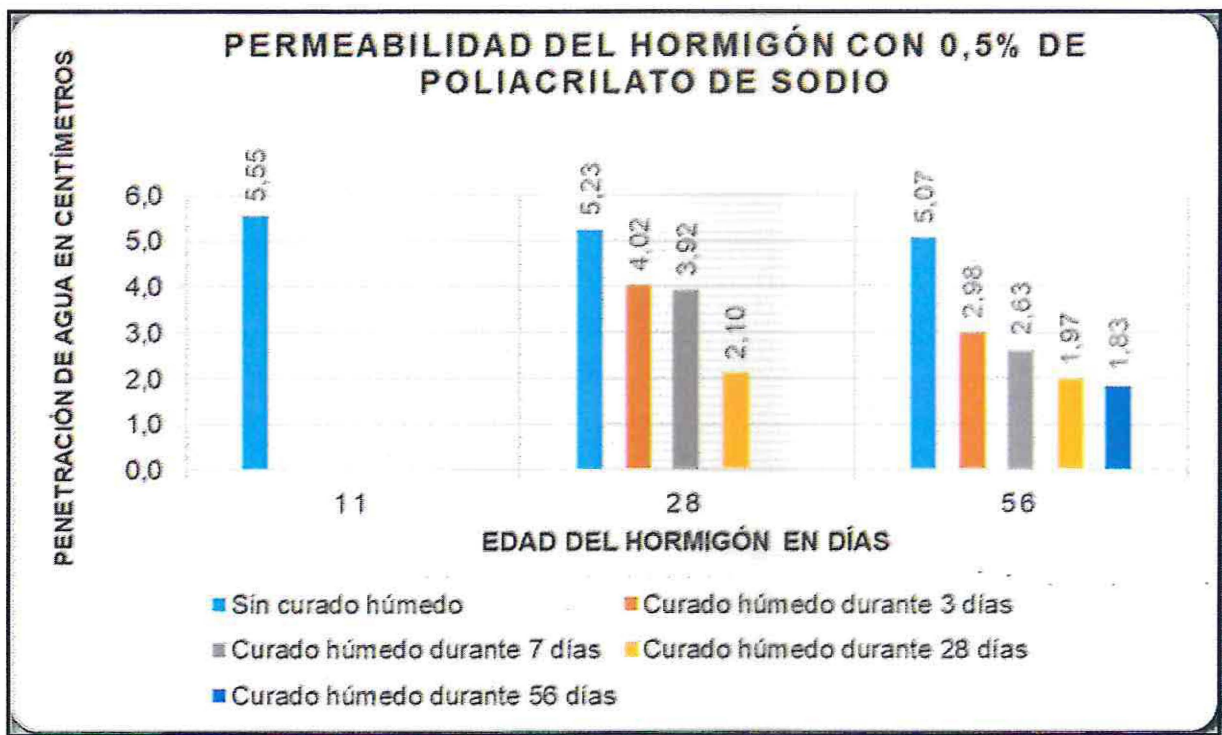
Tabla 5.13: Resultados de ensayo de permeabilidad con 0,5% de poliacrilato de sodio.

0,5% poliacrilato de sodio					
Edad del hormigón en días	Permeabilidad en centímetros				
	Sin curado húmedo	Curado húmedo durante 3 días	Curado húmedo durante 7 días	Curado húmedo durante 28 días	Curado húmedo durante 56 días
11	5,55				
28	5,23	4,02	3,92	2,10	
56	5,07	2,98	2,63	1,97	1,83

Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la figura 5.11 se grafican los resultados de la tabla 5.13.

Figura 5.11: Grafico de ensayo de permeabilidad del hormigón con 0,5% de poliacrilato de sodio.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

### 5.4.3. Permeabilidad al agua del hormigón con 1% de poliacrilato de sodio

En la tabla 5.14 se expresan los promedios de los resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad al agua de las 30 probetas con 1% de poliacrilato de sodio, según su edad y tipo de curado.

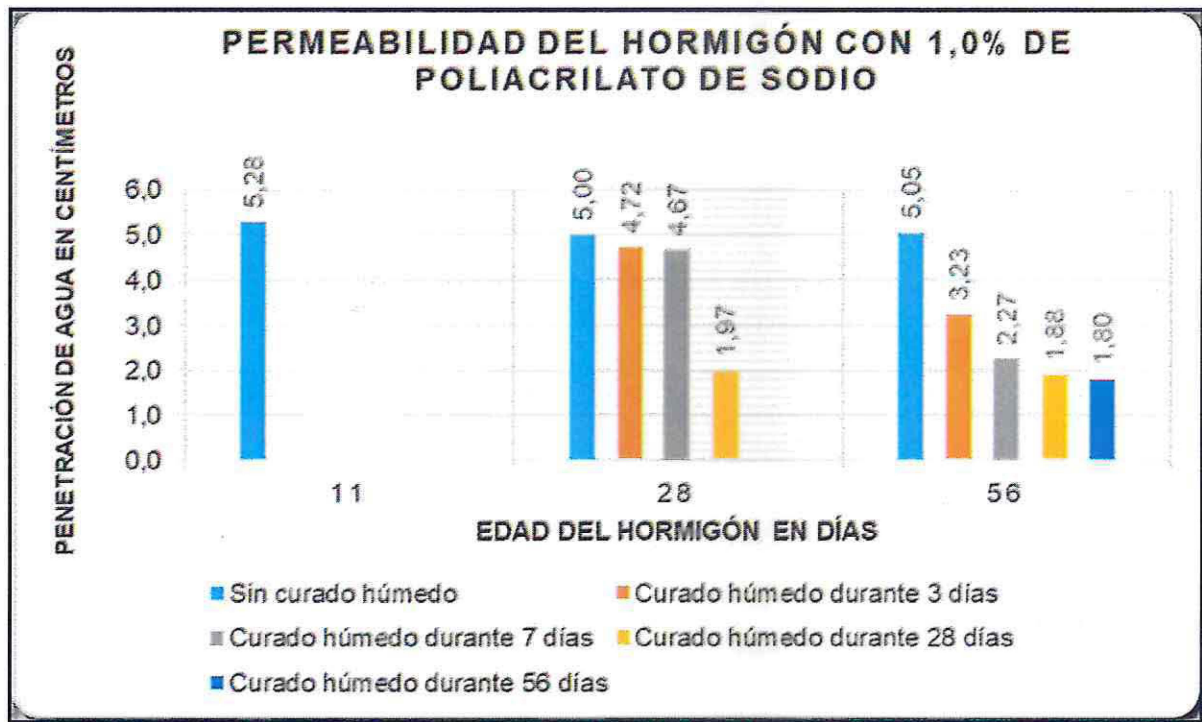
Tabla 5.14: Resultados de ensayo de permeabilidad con 1,0% de poliacrilato de sodio.

1,0% poliacrilato de sodio					
Edad del hormigón en días	Permeabilidad en centímetros				
	Sin curado húmedo	Curado húmedo durante 3 días	Curado húmedo durante 7 días	Curado húmedo durante 28 días	Curado húmedo durante 56 días
11	5,28				
28	5,00	4,72	4,67	1,97	
56	5,05	3,23	2,27	1,88	1,80

Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la figura 5.12 se grafican los resultados de la tabla 5.14.

Figura 5.12: Grafico de ensayo de permeabilidad del hormigón con 1% de poliacrilato de sodio.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

#### 5.4.4. Permeabilidad al agua del hormigón con 1,5% de poliacrilato de sodio

En la tabla 5.15 se expresan los promedios de los resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad al agua de las 30 probetas con 1,5% de poliacrilato de sodio, según su edad y tipo de curado.

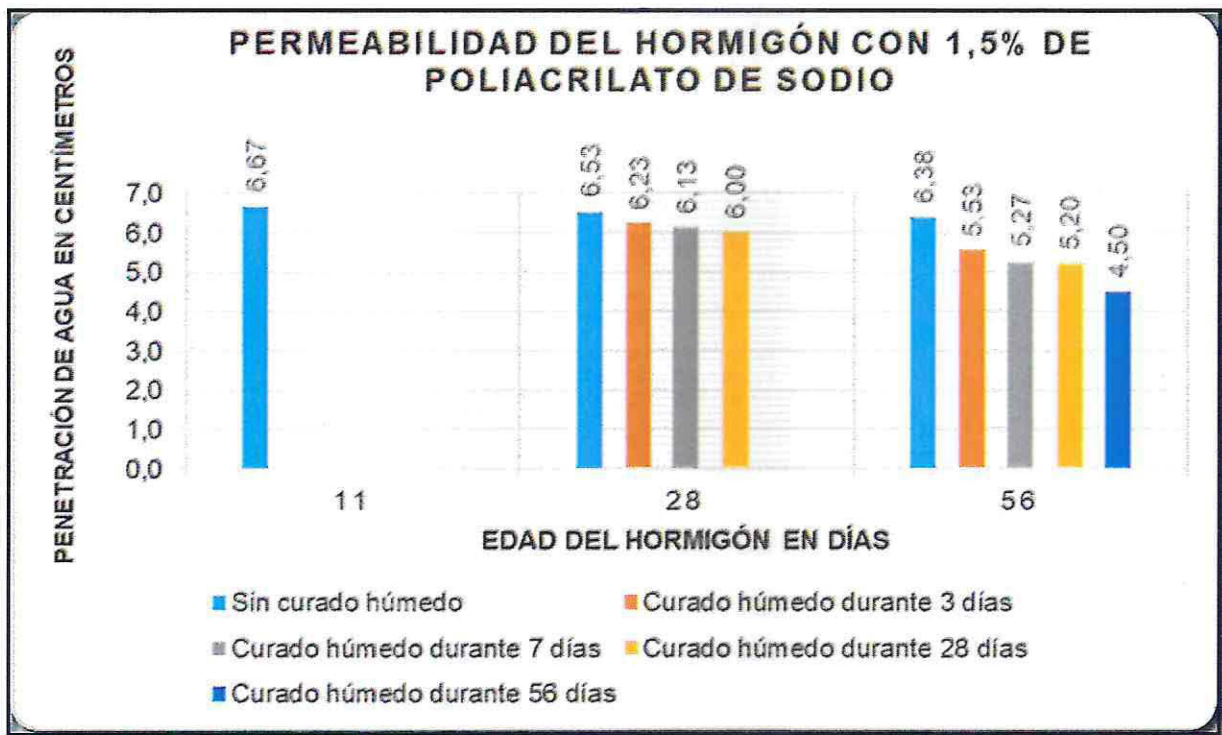
Tabla 5.15: Resultados de ensayo de permeabilidad con 1,5% de poliacrilato de sodio.

1,5% poliacrilato de sodio					
Edad del hormigón en días	Permeabilidad en centímetros				
	Sin curado húmedo	Curado húmedo durante 3 días	Curado húmedo durante 7 días	Curado húmedo durante 28 días	Curado húmedo durante 56 días
11	6,67				
28	6,53	6,23	6,13	6,00	
56	6,38	5,53	5,27	5,20	4,50

Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la figura 5.13 se grafican los resultados de la tabla 5.15.

Figura 5.13: Grafico de ensayo de permeabilidad del hormigón con 1,5% de poliacrilato de sodio.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

### 5.4.5. Comparaciones y análisis de resultados de permeabilidad del hormigón

Se comparan los resultados de permeabilidad al agua, donde se muestra en las siguientes tablas el porcentaje de cambio que tienen los hormigones con poliacrilato de sodio respecto al hormigón patrón.

#### 5.4.5.1. Análisis comparativo de permeabilidad de hormigones sin curado húmedo

Tabla 5.16: Comparación de resultados de permeabilidad al agua sin curado húmedo.

Comparaciones de permeabilidad de agua en hormigones sin curado húmedo							
Edad Hormigón en días	Contenido de Poliacrilato de sodio						
	0% (Patrón)	0,5%		1,0%		1,5%	
	cm	cm	Porcentaje de cambio	cm	Porcentaje de cambio	cm	Porcentaje de cambio
11	6,35	5,55	-12,60%	5,28	-16,80%	6,67	4,99%
28	5,98	5,23	-12,53%	5,00	-16,43%	6,53	9,19%
56	5,27	5,07	-3,80%	5,05	-4,11%	6,38	21,20%

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Los resultados comparativos sin curado húmedo son los siguientes:

- Con 0,5% de poliacrilato de sodio se obtuvo menor permeabilidad que el hormigón patrón a los 11, 28 y 56 días de edad.
- Con 1,0% de poliacrilato de sodio se obtuvo menor permeabilidad que el hormigón patrón a los 11, 28 y 56 días de edad, incluso se obtuvo mejores resultados que con la dosis de 0,5%.
- Con 1,5% de poliacrilato de sodio se obtuvo menor permeabilidad que el hormigón patrón.

#### 5.4.5.2. Análisis comparativo de permeabilidad del hormigón con 3 días de curado húmedo

Tabla 5.17: Comparación de resultados de permeabilidad al agua con 3 días de curado húmedo.

Comparaciones de permeabilidad de agua en hormigones con 3 días de curado húmedo							
Edad Hormigón en días	Contenido de Poliacrilato de sodio						
	0% (Patrón)	0,5%		1,0%		1,5%	
	cm	cm	Porcentaje de cambio	cm	Porcentaje de cambio	cm	Porcentaje de cambio
28	5,10	4,02	-21,24%	4,72	-7,52%	6,23	22,22%
56	3,80	2,98	-21,49%	3,23	-14,91%	5,53	45,61%

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Los resultados comparativos con 3 días de curado húmedo son los siguientes:

- Con 0,5% de poliacrilato de sodio se obtuvo menor permeabilidad que el hormigón patrón a los 28 y 56 días de edad, siendo la dosis con mejores resultados.

- Con 1,0% de poliacrilato de sodio se obtuvo menor permeabilidad que el hormigón patrón a los 28 y 56 días de edad.
- Con 1,5% de poliacrilato de sodio se obtuvo menor permeabilidad que el hormigón patrón.

#### 5.4.5.3. Analisis comparativo de permeabilidad del hormigón con 7 días de curado húmedo

Tabla 5.18: Comparación de resultados de permeabilidad al agua con 7 días de curado húmedo.

Comparaciones de permeabilidad de agua en hormigones con 7 días de curado húmedo							
Edad Hormigón en días	Contenido de Poliacrilato de sodio						
	0% (Patrón)	0,5%		1,0%		1,5%	
	cm	cm	Porcentaje de cambio	cm	Porcentaje de cambio	cm	Porcentaje de cambio
28	4,83	3,92	-18,97%	4,67	-3,45%	6,13	26,90%
56	3,43	2,63	-23,54%	2,27	-33,98%	5,27	53,40%

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Los resultados comparativos con 7 días de curado húmedo son los siguientes:

- Con 0,5% de poliacrilato de sodio se obtuvo menor permeabilidad que el hormigón patrón a los 28 y 56 días de edad, pero a los 28 días se obtuvieron los mejores resultados.
- Con 1,0% de poliacrilato de sodio se obtuvo menor permeabilidad que el hormigón patrón a los 28 y 56 días de edad, pero a los 56 días se obtuvieron los mejores resultados, siendo mejor esta dosis a largo plazo.
- Con 1,5% de poliacrilato de sodio se obtuvo menor permeabilidad que el hormigón patrón.

#### 5.4.5.4. Analisis comparativo de permeabilidad del hormigón con 28 días de curado húmedo

Tabla 5.19: Comparación de resultados de permeabilidad al agua con 28 días de curado húmedo.

Comparaciones de permeabilidad de agua en hormigones con 28 días de curado húmedo							
Edad Hormigón en días	Contenido de Poliacrilato de sodio						
	0% (Patrón)	0,5%		1,0%		1,5%	
	cm	cm	Porcentaje de cambio	cm	Porcentaje de cambio	cm	Porcentaje de cambio
28	2,20	2,10	-4,55%	1,97	-10,61%	6,00	172,73%
56	2,60	1,97	-24,36%	1,88	-27,56%	5,20	100,00%

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Los resultados comparativos con 28 días de curado húmedo son los siguientes:

- Con 0,5% de poliacrilato de sodio se obtuvo menor permeabilidad que el hormigón patrón a los 28 y 56 días de edad.
- Con 1,0% de poliacrilato de sodio se obtuvo menor permeabilidad que el hormigón patrón a los 28 y 56 días de edad, siendo la dosis con los mejores resultados.

- Con 1,5% de poliacrilato de sodio se obtuvo menor permeabilidad que el hormigón patrón.

#### 5.4.5.5. Análisis comparativo de permeabilidad del hormigón con 56 días de curado húmedo

Tabla 5.20: Comparación de resultados de permeabilidad al agua con 56 días de curado húmedo.

Comparaciones de permeabilidad de agua en hormigones con 56 días de curado húmedo							
Edad Hormigón en días	Contenido de Poliacrilato de sodio						
	0% (Patrón)	0,5%		1,0%		1,5%	
	cm	cm	Porcentaje de cambio	cm	Porcentaje de cambio	cm	Porcentaje de cambio
56	2,07	1,83	-11,29%	1,80	-12,90%	4,50	117,74%

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Los resultados comparativos con 56 días de curado húmedo son los siguientes:

- Con 0,5% de poliacrilato de sodio se obtuvo menor permeabilidad que el hormigón patrón a los 56 días de edad.
- Con 1,0% de poliacrilato de sodio se obtuvo menor permeabilidad que el hormigón patrón a los 56 días de edad, siendo la dosis con los mejores resultados a largo plazo.
- Con 1,5% de poliacrilato de sodio se obtuvo menor permeabilidad que el hormigón patrón.

Los equipos usados para hacer el ensayo de permeabilidad al agua pertenecen a los laboratorios de la Escuela de Construcción Civil de la Universidad de Valparaíso (fig. 5.14).

Figura 5.14: Equipo de ensayo para permeabilidad del hormigón.



Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la figura 5.15 se muestra una probeta ensayada, donde se delineaba con tiza hasta donde penetraba el agua en la probeta partida, para poder ser medida después.

Figura 5.15: Probeta de hormigón ensayada a permeabilidad al agua.



Fuente: Elaboración propia, 2018.

*Capítulo VI*  
*Conclusiones y propuesta de futuras*  
*investigaciones*

## 6. Conclusiones y propuesta de futuras investigaciones

### 6.1. Conclusiones

Se logran establecer las siguientes conclusiones a partir de los resultados obtenidos en la presente investigación.

1. Con respecto a la docilidad del hormigón, la incorporación de las distintas dosis de poliacrilato de sodio son un factor influyente en el asentamiento del hormigón, ya que estos registraron menores cifras de los límites establecidos en un principio de la investigación ( $6 \pm 2$  cm), al mismo tiempo cabe destacar que el poliacrilato de sodio no cumplió la labor de aumentar la docilidad del hormigón como decía en la bibliografía que si haría, al contrario, la empeoró, dejando un hormigón menos trabajable.
2. Con respecto a la resistencia a compresión, los valores obtenidos se encuentran por encima del hormigón patrón para la dosis de 0,5% de poliacrilato de sodio, por lo que se concluye que esta dosis si es un factor influyente ya que aumenta sus valores en el hormigón.
3. En cuanto a la influencia de las distintas dosis de poliacrilato de sodio sobre la resistencia a compresión del hormigón, se puede concluir que dosis mayores a 0,5% disminuyen su resistencia a compresión considerablemente, esto debido a que el poliacrilato de sodio en exceso aumenta mucho su volumen con el agua, bajando la densidad del hormigón afectándolo negativamente.
4. En cuanto al agua de curado, se concluye que mientras el hormigón esté siendo curado externamente, el poliacrilato de sodio influye muy poco y éste empieza a actuar con más notoriedad cuando se deja de curar externamente, ya que mantiene por más tiempo el agua en su interior aportando curado interno.
5. Todos los hormigones obtuvieron más resistencia a compresión proporcionalmente a la cantidad de días que fueron curados externamente, pero los hormigones con una dosis de 0,5% mejoraron más que el hormigón patrón.
6. El curado de 28 y 56 días aumentó en promedio la resistencia a compresión en 1 MPa, por lo tanto, como el aumento fue muy bajo, hasta 7 días de curado externo era suficiente para poder evaluar la influencia del poliacrilato de sodio en el hormigón.
7. Con respecto a la permeabilidad al agua, los hormigones con una dosis de 0,5% y 1% tuvieron menor permeabilidad que el hormigón patrón, pero fue el hormigón con 1% de poliacrilato de sodio el que tuvo la permeabilidad más baja. Se concluye que estas dosis si son un factor influyente ya que consiguen menor permeabilidad en el hormigón.

8. En cuanto a la influencia sobre la permeabilidad del hormigón de la dosis de 1,5% de poliacrilato de sodio, los valores obtenidos se encuentran por debajo del hormigón patrón, por lo que se concluye que esta dosis no es un factor influyente ya que disminuye considerablemente la permeabilidad al agua.
9. Las dosis iguales o mayores a 2% de poliacrilato de sodio no dejaron agua disponible para aglomerar el hormigón fresco, quedando partículas disgregadas y separadas, impidiendo trabajar con él por falta de fluidez, por lo tanto, no es factible confeccionar hormigón con esas dosis para ser evaluado.
10. En relación a la densidad, se aprecia que a medida que aumenta el porcentaje de poliacrilato de sodio, el hormigón se vuelve un poco más liviano, pero sus valores son despreciables, ya que varían muy poco, en promedio un 1%.
11. Considerando los resultados obtenidos, en definitiva, se puede concluir que el material propuesto en una proporción de 0,5% con respecto al peso del cemento, tiene potencial para influir positivamente en la resistencia a compresión y permeabilidad del hormigón, por lo que, este material puede ser utilizado en edificaciones de hormigón de todo tipo.

## 6.2. Propuestas para futuras investigaciones

De acuerdo a las conclusiones expuestas y a los resultados obtenidos, se considera útil proponer las diferentes futuras investigaciones:

- Investigar qué es lo que ocurre con las otras propiedades mecánicas del hormigón con poliacrilato de sodio, como son la resistencia a la tracción indirecta, flexo tracción y resistencia al impacto de estos hormigones.
- Investigar qué efectos tiene sobre el comportamiento acústico o térmico del hormigón, al agregar poliacrilato de sodio a éste, debido a la disminución en la densidad que provoca.
- Evaluar la influencia del poliacrilato de sodio en el hormigón, mantenido a distintas temperaturas para evaluar si es que éste influye en sus propiedades mecánicas al conservar por más tiempo la humedad interna.

## BIBLIOGRAFÍA

- Actualización NCh170 (2016). Hormigón requisitos generales (durabilidad). Recuperado el 4 de marzo de 2019, de <http://www.aice.cl/es/archivos/wp-aice-old/uploads/2012/04/NCh-170-2016-requisitos-de-Durabilidad-Gerardo-Staforelli.pdf>.
- Alario, E.** (s.f.). La verdadera importancia del curado de hormigón: por qué y cómo realizarlo. Recuperado el 4 de marzo de 2019, de <http://www.diariodelaconstruccion.cl/la-verdadera-importancia-del-curado-de-hormigon-por-que-y-como-realizarlo/>.
- Assmann, A., & Reinhardt, H.,** (2010). Some aspects of superabsorbent polymers (SAPs) in concrete technology, in Proceedings of the eighth fib International PhD Symposium in Civil Engineering, Kongens Lyngby, Dinamarca.
- Bentz, D & Weiss, W.,** (2011). Internal Curing: A 2010 State-of-the-Art Review.
- Bosunia, Z., & Chowdhury, J.,** (2001). Durability of concrete in coastal areas of Bangladesh. *Journal of civil engineering, IEB.* (Vol. 29, no. 1, pp. 41–53).
- Cadeño, J. et al.** (2009). Fisuras por retracción en el hormigón. Escuela superior politécnica del litoral. Guayaquil, Ecuador.
- Cementos Melon (2016). Guía para el curado del hormigón. Recuperado el 4 de marzo de 2019, de <http://www.melon.cl/wp-content/uploads/2016/12/9.guiaparaelcuradodelhormigon.pdf>.
- Cevallos, M.,** (2016). El concreto, material fundamental para la infraestructura. Recuperado el 4 de marzo de 2019, de <http://www.revistacyt.com.mx/pdf/agosto2016/experto.pdf>.
- Daoud, M., Nasra, M.,** (2014). The use of super absorbent polymer as a sealing agent in plain concrete. *American Journal of Engineering Research.* (Vol. 3, no. 3, pp. 132–137).
- Egaña, J.** (2014). Metodo para dosificar hormigones.
- Gebler, S. et al.** (2008). Guide to Curing Concrete. Publicado por el comité 308 del American Concrete Institute (ACI). Guía ACI 308R-01.
- Gifta, C., Prabavathy, S., & Kumar, G.,** (2013). Study of internal curing of HPC using SAPs and LWA. *Asian journal of civil engineering (BHRC).* (Vol. 14, no. 5, pp. 773–781).
- Gomá, F.** (1979). El cemento portland y otros aglomerantes. Reverte.
- Hasholt, M., Jensen, O., Kovler, K., & Zhutovsky, S.,** (2012). Can superabsorbent polymers mitigate autogenous shrinkage of internally cured concrete without compromising the strength? (Vol. 31, pp 226-230).

- Helene, P., Pereira, F. (2007).** Rehabilitación y mantenimiento de estructuras de concreto, SIKA (pp. 17-32). Bogotá, Colombia.
- International Labour Organization (2008). Fichas Internacionales de Seguridad Química. Sal de sodio del ácido poliacrílico. (ICSC: 1429). Recuperado el 4 de marzo de 2019, de [http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_card\\_id=1429&p\\_edit=&p\\_version=2&p\\_lang=es](http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=1429&p_edit=&p_version=2&p_lang=es)
- Jensen, O., (2013).** Use of superabsorbent polymers in concrete an overview of the possibilities offered by using these smart materials as concrete admixtures. *Concrete International*. (pp. 2–6).
- Kevern, J., & Farney, C., (2012).** Reducing curing requirements for pervious concrete using a superabsorbent polymer for internal curing. *Transportation research record*. (Vol. 2290, pp. 115-121).
- Klieger, P., (1982).** George Verbeck Symposium on Sulfate Resistance of Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., (pp. 94).
- Kosmatka, S., & Wilson, M., (2011)** Design and control of concrete mixtures. The guide to applications, methods, and materials. (15a Ed.).
- Lee, S., Ha, K., Jung, Y., Jang, S., & Yeo, I., (2014).** Characteristics of mortar containing sodium polyacrylate absorbent synthesized by inverse emulsion polymerization. *KSCE Journal of Civil Engineering*. (Vol. 18, no. 5, pp. 1397–1402).
- Mansilla, S., (2003).** Hormigón arquitectónico. Tesis Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Manzur, T., Iffat, S., & Ahmed, M., (2015).** Efficiency of sodium polyacrylate to improve durability of concrete under adverse curing condition. *Buet, Bangladesh*.
- Mechtcherine, V., Secieru, E., & Schröfl, C., (2015).** Effect of superabsorbent polymers (SAPs) on rheological properties of fresh cement-based mortars-development of yield stress and plastic viscosity over time. *Cement and Concrete Research*. (Vol. 67, pp. 52–65).
- Mehta, P., Monteiro, P. (2006).** Microstructure and properties of hardened concrete.
- Nasra, M., (2013).** Optimizing the use of sodium polyacrylate in plain concrete. *International Journal of Engineering Research and Applications*. (Vol. 3, no. 3, pp. 1058–1062).
- NCh 163 Of 2013. Aridos para morteros y hormigones - Requisitos generales
- NCh 165 Of 1977. Aridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría
- NCh 851 Of 1983. Aislación térmica - Determinación de coeficientes de transmisión térmica por el método de la cámara térmica.

- NCh 1019 Of 1974. Construcción - Hormigón - Determinación de la docilidad - Método de asentamiento del cono de Abrams.
- NCh 1037 Of 1977. Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas.
- NCh 1116 Of 2008. Aridos para morteros y hormigones - Determinación de la densidad aparente.
- NCh 1117 Of 2010. Aridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las gravas.
- NCh 1498. Of 1982. Hormigón - Agua de amasado – Requisitos.
- Neville, A.** (1995). *Tecnología del Concreto* (4° Edición). Pitman Publishing. Londres, Inglaterra.
- Osorio, J.**, (2010). Hidratación del concreto: agua de curado y agua de mezclado. Recuperado el 4 de marzo de 2019, de <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/importancia-del-agua-en-el-concreto>.
- Pino, N.**, (2012). Factibilidad técnica de uso de hormigón caucho para minimizar la retracción en el hormigón. Valparaíso, Chile.
- Rasheeduzzafar, A.**, et al. (1989). Influence of construction practices on concrete durability. *Materials Journal*, ACI.
- Sanhueza, M.**, (2018). Hormigón, Ministerio de obras públicas. Recuperado el 4 de marzo de 2019, de <http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/hormigon1Intro.pdf>.
- Saravanan, M.**, Sivaraja, M. (2017). Mechanical behavior of concrete modified by replacement of cement by rice husk ash. Recuperado el 4 de marzo de 2019, de [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-89132016000300608](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-89132016000300608).
- Senbetta & Scholer**, (1983). A New Approach for Testing Concrete Curing Efficiency.
- Sivaranjani, M.**, (2017). Study on the Properties of Concrete by Using Super Absorbent Polymer. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*. Civil-Department, Anna University.
- Verbeck, George J.**, & Helmuth, R. A. (1968). Structures and Physical Properties of Cement Pastes. *Proceedings*. (Vol. III, pp 9-10). Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement, The Cement Association of Japan, Tokyo.
- Viano, M.**, (2008). Cuantificación experimental del efecto de plazos variables de curado sobre la resistencia a compresión del hormigón. Valparaíso, Chile.
- Videla, C.**, (2010). Curso de tecnología del hormigón. Universidad católica de Chile. Santiago, Chile.

- Woods, H.**, (1968). Monograph No. 4, American Concrete Institute/Iowa State University Press, Farmington Hills, Mich., (pp.187 pp).
- Zabaleta, H.**, (1992). Compendio de Tecnología del Hormigón. Instituto Chileno del Cemento y el Hormigón, Santiago, Chile.
- Zabaleta, H.**, (1992). Manual de Aditivos: Adiciones y Protecciones del Hormigón. Instituto Chileno del cemento y el hormigón. Santiago, Chile.
- Zou, D. et al.** (2015) Internal curing of mortar with low water to cementitious materials ratio using a normal weight porous aggregate. *Construction and Building Materials*. (Vol. 96, pp. 209–216).

## ANEXOS

Tablas de promedios de resultados y datos de las probetas de hormigón.

Tabla 7.1: Datos de ensayos de las muestras

Promedio A1		0%	Promedio B1		0.5%
Tiempo de curado húmedo	0 días		Tiempo de curado húmedo	0 días	
Edad	3 días		Edad	3 días	
Peso	7,878 kg		Peso	7,894 kg	
Ancho a	150,4 mm		Ancho a	150,1 mm	
Largo b	150,1 mm		Largo b	150,0 mm	
Alto h	150,1 mm		Alto h	150,1 mm	
Área	22.570,0 mm <sup>2</sup>		Área	22.510,0 mm <sup>2</sup>	
Volumen	3.387.198,3 mm <sup>3</sup>		Volumen	3.378.000,7 mm <sup>3</sup>	
Densidad	2.325,9 kg/m <sup>3</sup>		Densidad	2.336,8 kg/m <sup>3</sup>	
Carga máxima resistida	357,1 kN		Carga máxima resistida	478,4 kN	
Presión S. Internacional	15,8 MPa		Presión S. Internacional	21,3 MPa	
Presión Sistema Técnico	161,3 kgf/cm <sup>2</sup>		Presión Sistema Técnico	216,7 kgf/cm <sup>2</sup>	
Promedio C1		1%	Promedio D1		1.5%
Tiempo de curado húmedo	0 días		Tiempo de curado húmedo	0 días	
Edad	3 días		Edad	3 días	
Peso	7,871 kg		Peso	7,747 kg	
Ancho a	150,6 mm		Ancho a	150,3 mm	
Largo b	150,4 mm		Largo b	149,9 mm	
Alto h	105,3 mm		Alto h	150,3 mm	
Área	22.655,3 mm <sup>2</sup>		Área	22.530,0 mm <sup>2</sup>	
Volumen	2.384.654,9 mm <sup>3</sup>		Volumen	3.385.129,0 mm <sup>3</sup>	
Densidad	3.300,8 kg/m <sup>3</sup>		Densidad	2.288,5 kg/m <sup>3</sup>	
Carga máxima resistida	455,4 kN		Carga máxima resistida	364,1 kN	
Presión S. Internacional	20,1 MPa		Presión S. Internacional	16,2 MPa	
Presión Sistema Técnico	205,0 kgf/cm <sup>2</sup>		Presión Sistema Técnico	164,8 kgf/cm <sup>2</sup>	
Promedio A2		0%	Promedio B2		0.5%
Tiempo de curado húmedo	0 días		Tiempo de curado húmedo	0 días	
Edad	7 días		Edad	7 días	
Peso	7,794 kg		Peso	7,819 kg	
Ancho a	150,6 mm		Ancho a	151,6 mm	
Largo b	150,7 mm		Largo b	150,9 mm	
Alto h	150,2 mm		Alto h	150,1 mm	
Área	22.697,9 mm <sup>2</sup>		Área	22.873,9 mm <sup>2</sup>	
Volumen	3.409.417,9 mm <sup>3</sup>		Volumen	3.432.228,9 mm <sup>3</sup>	
Densidad	2.285,9 kg/m <sup>3</sup>		Densidad	2.278,2 kg/m <sup>3</sup>	
Carga máxima resistida	553,1 kN		Carga máxima resistida	574,4 kN	
Presión S. Internacional	24,4 MPa		Presión S. Internacional	25,1 MPa	
Presión Sistema Técnico	248,5 kgf/cm <sup>2</sup>		Presión Sistema Técnico	256,1 kgf/cm <sup>2</sup>	
Promedio C2		1%	Promedio D2		1.5%
Tiempo de curado húmedo	0 días		Tiempo de curado húmedo	0 días	
Edad	7 días		Edad	7 días	
Peso	7,669 kg		Peso	7,646 kg	
Ancho a	150,3 mm		Ancho a	150,2 mm	
Largo b	150,3 mm		Largo b	150,1 mm	
Alto h	150,0 mm		Alto h	150,2 mm	
Área	22.565,1 mm <sup>2</sup>		Área	22.544,8 mm <sup>2</sup>	
Volumen	3.388.496,0 mm <sup>3</sup>		Volumen	3.365.283,9 mm <sup>3</sup>	
Densidad	2.263,3 kg/m <sup>3</sup>		Densidad	2.258,6 kg/m <sup>3</sup>	
Carga máxima resistida	520,4 kN		Carga máxima resistida	499,9 kN	
Presión S. Internacional	23,0 MPa		Presión S. Internacional	22,2 MPa	
Presión Sistema Técnico	235,0 kgf/cm <sup>2</sup>		Presión Sistema Técnico	226,1 kgf/cm <sup>2</sup>	

Promedio A3		0%	Promedio B3		0,5%
Tiempo de curado húmedo	0	días	Tiempo de curado húmedo	0	días
Edad	11	días	Edad	11	días
Peso	7,842	kg	Peso	7,874	kg
Ancho a	150,0	mm	Ancho a	150,0	mm
Largo b	150,0	mm	Largo b	150,0	mm
Alto h	150,0	mm	Alto h	150,0	mm
Área	22.500,0	mm <sup>2</sup>	Área	22.500,0	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.375.000,0	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.375.000,0	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.323,5	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.333,0	kg/m <sup>3</sup>
Penetración de agua	6,4	cm	Penetración de agua	5,6	cm
Promedio C3		1%	Promedio D3		1,5%
Tiempo de curado húmedo	0	días	Tiempo de curado húmedo	0	días
Edad	11	días	Edad	11	días
Peso	7,772	kg	Peso	7,753	kg
Ancho a	150,0	mm	Ancho a	150,0	mm
Largo b	150,0	mm	Largo b	150,0	mm
Alto h	150,0	mm	Alto h	150,0	mm
Área	22.500,0	mm <sup>2</sup>	Área	22.500,0	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.375.000,0	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.375.000,0	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.302,9	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.297,3	kg/m <sup>3</sup>
Penetración de agua	5,3	cm	Penetración de agua	6,7	cm
Promedio A4		0%	Promedio B4		0,5%
Tiempo de curado húmedo	0	días	Tiempo de curado húmedo	0	días
Edad	28	días	Edad	28	días
Peso	7,825	kg	Peso	7,867	kg
Ancho a	150,2	mm	Ancho a	151,6	mm
Largo b	150,7	mm	Largo b	150,9	mm
Alto h	150,1	mm	Alto h	104,9	mm
Área	22.635,2	mm <sup>2</sup>	Área	22.879,0	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.398.291,4	mm <sup>3</sup>	Volumen	2.400.536,2	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.302,5	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	3.277,2	kg/m <sup>3</sup>
Carga máxima resistida	772,1	kN	Carga máxima resistida	815,5	kN
Presión S. Internacional	34,1	MPa	Presión S. Internacional	35,6	MPa
Presión Sistema Técnico	347,8	kgf/cm <sup>2</sup>	Presión Sistema Técnico	363,5	kgf/cm <sup>2</sup>
Promedio C4		1%	Promedio D4		1,5%
Tiempo de curado húmedo	0	días	Tiempo de curado húmedo	0	días
Edad	28	días	Edad	28	días
Peso	7,858	kg	Peso	7,692	kg
Ancho a	151,4	mm	Ancho a	149,7	mm
Largo b	150,3	mm	Largo b	150,8	mm
Alto h	150,3	mm	Alto h	150,2	mm
Área	22.755,4	mm <sup>2</sup>	Área	22.577,2	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.420.323,6	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.390.912,7	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.297,5	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.268,5	kg/m <sup>3</sup>
Carga máxima resistida	781,4	kN	Carga máxima resistida	649,9	kN
Presión S. Internacional	34,3	MPa	Presión S. Internacional	28,8	MPa
Presión Sistema Técnico	350,2	kgf/cm <sup>2</sup>	Presión Sistema Técnico	293,5	kgf/cm <sup>2</sup>

Promedio A5		0%	Promedio B5		0,5%
Tiempo de curado húmedo	0	días	Tiempo de curado húmedo	0	días
Edad	28	días	Edad	28	días
Peso	7,845	kg	Peso	7,893	kg
Ancho a	150,0	mm	Ancho a	150,0	mm
Largo b	150,0	mm	Largo b	150,0	mm
Alto h	150,4	mm	Alto h	150,1	mm
Área	22.500,0	mm <sup>2</sup>	Área	22.500,0	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.384.000,0	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.377.250,0	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.318,3	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.337,0	kg/m <sup>3</sup>
Penetración de agua	6,0	cm	Penetración de agua	5,2	cm
Promedio C5		1%	Promedio D5		1,5%
Tiempo de curado húmedo	0	días	Tiempo de curado húmedo	0	días
Edad	28	días	Edad	28	días
Peso	7,791	kg	Peso	7,781	kg
Ancho a	150,0	mm	Ancho a	150,0	mm
Largo b	150,0	mm	Largo b	150,0	mm
Alto h	151,0	mm	Alto h	149,0	mm
Área	22.500,0	mm <sup>2</sup>	Área	22.500,0	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.397.500,0	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.352.500,0	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.293,3	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.321,1	kg/m <sup>3</sup>
Penetración de agua	5,0	cm	Penetración de agua	6,5	cm
Promedio A6		0%	Promedio B6		0,5%
Tiempo de curado húmedo	0	días	Tiempo de curado húmedo	0	días
Edad	56	días	Edad	56	días
Peso	7,923	kg	Peso	7,915	kg
Ancho a	150,4	mm	Ancho a	150,2	mm
Largo b	151,3	mm	Largo b	150,7	mm
Alto h	150,3	mm	Alto h	150,3	mm
Área	22.760,6	mm <sup>2</sup>	Área	22.627,1	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.420.912,7	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.400.103,1	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.316,0	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.327,9	kg/m <sup>3</sup>
Carga máxima resistida	1.023,6	kN	Carga máxima resistida	1.028,8	kN
Presión S. Internacional	45,0	MPa	Presión S. Internacional	45,5	MPa
Presión Sistema Técnico	458,6	kgf/cm <sup>2</sup>	Presión Sistema Técnico	463,6	kgf/cm <sup>2</sup>
Promedio C6		1%	Promedio D6		1,5%
Tiempo de curado húmedo	0	días	Tiempo de curado húmedo	0	días
Edad	56	días	Edad	56	días
Peso	7,843	kg	Peso	7,795	kg
Ancho a	150,6	mm	Ancho a	150,3	mm
Largo b	150,7	mm	Largo b	150,5	mm
Alto h	150,3	mm	Alto h	150,4	mm
Área	22.695,4	mm <sup>2</sup>	Área	22.625,2	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.411.688,3	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.402.636,5	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.298,9	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.290,8	kg/m <sup>3</sup>
Carga máxima resistida	1.011,4	kN	Carga máxima resistida	929,2	kN
Presión S. Internacional	44,6	MPa	Presión S. Internacional	41,1	MPa
Presión Sistema Técnico	454,4	kgf/cm <sup>2</sup>	Presión Sistema Técnico	418,8	kgf/cm <sup>2</sup>

Promedio A7		0%	Promedio B7		0,5%
Tiempo de curado húmedo	0	días	Tiempo de curado húmedo	0	días
Edad	56	días	Edad	56	días
Peso	7,952	kg	Peso	7,936	kg
Ancho a	150,0	mm	Ancho a	150,0	mm
Largo b	150,0	mm	Largo b	150,0	mm
Alto h	150,1	mm	Alto h	150,1	mm
Área	22.505,0	mm <sup>2</sup>	Área	22.500,0	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.378.750,7	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.377.250,0	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.353,4	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.349,9	kg/m <sup>3</sup>
Penetración de agua	5,3	cm	Penetración de agua	5,1	cm
Promedio C7		1%	Promedio D7		1,5%
Tiempo de curado húmedo	0	días	Tiempo de curado húmedo	0	días
Edad	56	días	Edad	56	días
Peso	7,884	kg	Peso	7,786	kg
Ancho a	150,0	mm	Ancho a	150,0	mm
Largo b	150,0	mm	Largo b	150,0	mm
Alto h	150,7	mm	Alto h	149,8	mm
Área	22.500,0	mm <sup>2</sup>	Área	22.505,0	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.390.750,0	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.371.249,0	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.325,1	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.309,4	kg/m <sup>3</sup>
Penetración de agua	5,1	cm	Penetración de agua	6,4	cm
Promedio A8		0%	Promedio B8		0,5%
Tiempo de curado húmedo	3	días	Tiempo de curado húmedo	3	días
Edad	3	días	Edad	3	días
Peso	8,013	kg	Peso	8,045	kg
Ancho a	150,1	mm	Ancho a	150,3	mm
Largo b	150,3	mm	Largo b	150,4	mm
Alto h	150,2	mm	Alto h	150,7	mm
Área	22.565,0	mm <sup>2</sup>	Área	22.612,6	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.388.516,4	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.406.594,0	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.364,7	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.361,5	kg/m <sup>3</sup>
Carga máxima resistida	372,0	kN	Carga máxima resistida	415,5	kN
Presión S. Internacional	16,5	MPa	Presión S. Internacional	18,4	MPa
Presión Sistema Técnico	168,1	kgf/cm <sup>2</sup>	Presión Sistema Técnico	187,4	kgf/cm <sup>2</sup>
Promedio C8		1%	Promedio D8		1,5%
Tiempo de curado húmedo	3	días	Tiempo de curado húmedo	3	días
Edad	3	días	Edad	3	días
Peso	7,865	kg	Peso	7,848	kg
Ancho a	150,4	mm	Ancho a	150,6	mm
Largo b	150,4	mm	Largo b	150,0	mm
Alto h	150,3	mm	Alto h	150,3	mm
Área	22.615,1	mm <sup>2</sup>	Área	22.595,0	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.398.868,1	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.396.182,1	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.314,1	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.310,8	kg/m <sup>3</sup>
Carga máxima resistida	426,0	kN	Carga máxima resistida	366,3	kN
Presión S. Internacional	18,8	MPa	Presión S. Internacional	16,2	MPa
Presión Sistema Técnico	192,1	kgf/cm <sup>2</sup>	Presión Sistema Técnico	165,3	kgf/cm <sup>2</sup>

Promedio A9			0%	Promedio B9			0,5%
Tiempo de curado húmedo	3	días		Tiempo de curado húmedo	3	días	
Edad	7	días		Edad	7	días	
Peso	7,867	kg		Peso	7,879	kg	
Ancho a	150,2	mm		Ancho a	150,2	mm	
Largo b	150,5	mm		Largo b	150,9	mm	
Alto h	150,2	mm		Alto h	150,2	mm	
Área	22.605,1	mm <sup>2</sup>		Área	22.660,2	mm <sup>2</sup>	
Volumen	3.395.284,4	mm <sup>3</sup>		Volumen	3.403.176,9	mm <sup>3</sup>	
Densidad	2.317,0	kg/m <sup>3</sup>		Densidad	2.315,3	kg/m <sup>3</sup>	
Carga máxima resistida	597,3	kN		Carga máxima resistida	612,6	kN	
Presión S. Internacional	26,4	MPa		Presión S. Internacional	27,0	MPa	
Presión Sistema Técnico	269,5	kgf/cm <sup>2</sup>		Presión Sistema Técnico	275,7	kgf/cm <sup>2</sup>	
Promedio C9			1%	Promedio D9			1,5%
Tiempo de curado húmedo	3	días		Tiempo de curado húmedo	3	días	
Edad	7	días		Edad	7	días	
Peso	7,834	kg		Peso	7,728	kg	
Ancho a	150,3	mm		Ancho a	150,3	mm	
Largo b	150,4	mm		Largo b	150,5	mm	
Alto h	150,3	mm		Alto h	150,3	mm	
Área	22.597,6	mm <sup>2</sup>		Área	22.620,2	mm <sup>2</sup>	
Volumen	3.396.796,2	mm <sup>3</sup>		Volumen	3.399.431,5	mm <sup>3</sup>	
Densidad	2.306,4	kg/m <sup>3</sup>		Densidad	2.273,4	kg/m <sup>3</sup>	
Carga máxima resistida	567,6	kN		Carga máxima resistida	509,4	kN	
Presión S. Internacional	25,1	MPa		Presión S. Internacional	22,5	MPa	
Presión Sistema Técnico	256,1	kgf/cm <sup>2</sup>		Presión Sistema Técnico	229,6	kgf/cm <sup>2</sup>	
Promedio A10			0%	Promedio B10			0,5%
Tiempo de curado húmedo	3	días		Tiempo de curado húmedo	3	días	
Edad	28	días		Edad	28	días	
Peso	7,994	kg		Peso	8,015	kg	
Ancho a	150,2	mm		Ancho a	150,3	mm	
Largo b	150,1	mm		Largo b	150,3	mm	
Alto h	150,3	mm		Alto h	150,3	mm	
Área	22.536,0	mm <sup>2</sup>		Área	22.595,1	mm <sup>2</sup>	
Volumen	3.386.411,4	mm <sup>3</sup>		Volumen	3.396.043,5	mm <sup>3</sup>	
Densidad	2.360,6	kg/m <sup>3</sup>		Densidad	2.360,1	kg/m <sup>3</sup>	
Carga máxima resistida	829,7	kN		Carga máxima resistida	836,3	kN	
Presión S. Internacional	36,8	MPa		Presión S. Internacional	37,0	MPa	
Presión Sistema Técnico	375,4	kgf/cm <sup>2</sup>		Presión Sistema Técnico	377,4	kgf/cm <sup>2</sup>	
Promedio C10			1%	Promedio D10			1,5%
Tiempo de curado húmedo	3	días		Tiempo de curado húmedo	3	días	
Edad	28	días		Edad	28	días	
Peso	7,840	kg		Peso	7,777	kg	
Ancho a	150,2	mm		Ancho a	150,2	mm	
Largo b	150,4	mm		Largo b	150,9	mm	
Alto h	150,3	mm		Alto h	150,2	mm	
Área	22.590,1	mm <sup>2</sup>		Área	22.665,2	mm <sup>2</sup>	
Volumen	3.395.289,9	mm <sup>3</sup>		Volumen	3.404.310,0	mm <sup>3</sup>	
Densidad	2.309,1	kg/m <sup>3</sup>		Densidad	2.284,5	kg/m <sup>3</sup>	
Carga máxima resistida	781,7	kN		Carga máxima resistida	690,6	kN	
Presión S. Internacional	34,6	MPa		Presión S. Internacional	30,5	MPa	
Presión Sistema Técnico	352,8	kgf/cm <sup>2</sup>		Presión Sistema Técnico	310,7	kgf/cm <sup>2</sup>	

Promedio A11		0%	Promedio B11		0.5%
Tiempo de curado húmedo	3	días	Tiempo de curado húmedo	3	días
Edad	28	días	Edad	28	días
Peso	7,899	kg	Peso	7,915	kg
Ancho a	150,1	mm	Ancho a	150,0	mm
Largo b	150,0	mm	Largo b	150,0	mm
Alto h	150,2	mm	Alto h	150,1	mm
Área	22.515,0	mm <sup>2</sup>	Área	22.510,0	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.381.753,3	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.378.751,2	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.335,7	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.342,5	kg/m <sup>3</sup>
Penetración de agua	5,1	cm	Penetración de agua	4,0	cm

Promedio C11		1%	Promedio D11		1.5%
Tiempo de curado húmedo	3	días	Tiempo de curado húmedo	3	días
Edad	28	días	Edad	28	días
Peso	7,794	kg	Peso	7,794	kg
Ancho a	150,0	mm	Ancho a	150,4	mm
Largo b	150,2	mm	Largo b	150,1	mm
Alto h	150,7	mm	Alto h	150,0	mm
Área	22.530,0	mm <sup>2</sup>	Área	22.580,1	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.394.520,0	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.387.760,7	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.296,1	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.300,6	kg/m <sup>3</sup>
Penetración de agua	4,7	cm	Penetración de agua	6,2	cm

Promedio A12		0%	Promedio B12		0.5%
Tiempo de curado húmedo	3	días	Tiempo de curado húmedo	3	días
Edad	56	días	Edad	56	días
Peso	7,888	kg	Peso	7,907	kg
Ancho a	150,1	mm	Ancho a	150,9	mm
Largo b	150,5	mm	Largo b	150,7	mm
Alto h	150,1	mm	Alto h	150,1	mm
Área	22.592,5	mm <sup>2</sup>	Área	22.738,1	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.391.140,9	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.411.854,2	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.326,2	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.317,4	kg/m <sup>3</sup>
Carga máxima resistida	1.066,4	kN	Carga máxima resistida	1.079,8	kN
Presión S. Internacional	47,2	MPa	Presión S. Internacional	47,5	MPa
Presión Sistema Técnico	481,3	kgf/cm <sup>2</sup>	Presión Sistema Técnico	484,2	kgf/cm <sup>2</sup>

Promedio C12		1%	Promedio D12		1.5%
Tiempo de curado húmedo	3	días	Tiempo de curado húmedo	3	días
Edad	56	días	Edad	56	días
Peso	7,845	kg	Peso	7,775	kg
Ancho a	150,3	mm	Ancho a	150,4	mm
Largo b	150,6	mm	Largo b	151,4	mm
Alto h	150,1	mm	Alto h	150,2	mm
Área	22.632,7	mm <sup>2</sup>	Área	22.758,5	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.397.918,9	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.417.186,2	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.308,7	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.275,3	kg/m <sup>3</sup>
Carga máxima resistida	1.044,5	kN	Carga máxima resistida	940,8	kN
Presión S. Internacional	46,1	MPa	Presión S. Internacional	41,3	MPa
Presión Sistema Técnico	470,6	kgf/cm <sup>2</sup>	Presión Sistema Técnico	421,6	kgf/cm <sup>2</sup>

Promedio A13		0%	Promedio B13		0,5%
Tiempo de curado húmedo	3	días	Tiempo de curado húmedo	3	días
Edad	56	días	Edad	56	días
Peso	7,974	kg	Peso	7,952	kg
Ancho a	150,0	mm	Ancho a	150,1	mm
Largo b	150,0	mm	Largo b	150,1	mm
Alto h	150,3	mm	Alto h	150,1	mm
Área	22.505,0	mm <sup>2</sup>	Área	22.535,0	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.381.751,3	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.382.505,5	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.357,9	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.350,9	kg/m <sup>3</sup>
Penetración de agua	3,8	cm	Penetración de agua	3,0	cm
Promedio C13		1%	Promedio D13		1,5%
Tiempo de curado húmedo	3	días	Tiempo de curado húmedo	3	días
Edad	56	días	Edad	56	días
Peso	7,892	kg	Peso	7,860	kg
Ancho a	150,0	mm	Ancho a	150,1	mm
Largo b	150,1	mm	Largo b	150,2	mm
Alto h	150,5	mm	Alto h	149,3	mm
Área	22.515,0	mm <sup>2</sup>	Área	22.535,0	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.387.757,0	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.363.726,0	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.329,6	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.336,8	kg/m <sup>3</sup>
Penetración de agua	3,2	cm	Penetración de agua	5,5	cm
Promedio A14		0%	Promedio B14		0,5%
Tiempo de curado húmedo	7	días	Tiempo de curado húmedo	7	días
Edad	7	días	Edad	7	días
Peso	8,059	kg	Peso	8,060	kg
Ancho a	150,3	mm	Ancho a	150,5	mm
Largo b	150,1	mm	Largo b	150,6	mm
Alto h	150,6	mm	Alto h	150,6	mm
Área	22.567,5	mm <sup>2</sup>	Área	22.662,8	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.397.543,5	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.412.448,9	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.371,9	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.361,9	kg/m <sup>3</sup>
Carga máxima resistida	728,7	kN	Carga máxima resistida	702,1	kN
Presión S. Internacional	32,3	MPa	Presión S. Internacional	31,0	MPa
Presión Sistema Técnico	329,3	kgf/cm <sup>2</sup>	Presión Sistema Técnico	315,9	kgf/cm <sup>2</sup>
Promedio C14		1%	Promedio D14		1,5%
Tiempo de curado húmedo	7	días	Tiempo de curado húmedo	7	días
Edad	7	días	Edad	7	días
Peso	7,991	kg	Peso	7,914	kg
Ancho a	150,4	mm	Ancho a	150,3	mm
Largo b	149,8	mm	Largo b	150,1	mm
Alto h	150,5	mm	Alto h	150,3	mm
Área	22.532,4	mm <sup>2</sup>	Área	22.560,0	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.391.878,2	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.389.644,5	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.355,9	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.334,9	kg/m <sup>3</sup>
Carga máxima resistida	692,3	kN	Carga máxima resistida	606,6	kN
Presión S. Internacional	30,7	MPa	Presión S. Internacional	26,9	MPa
Presión Sistema Técnico	313,3	kgf/cm <sup>2</sup>	Presión Sistema Técnico	274,2	kgf/cm <sup>2</sup>

Promedio A15		0%	Promedio B15		0,5%
Tiempo de curado húmedo	7	días	Tiempo de curado húmedo	7	días
Edad	28	días	Edad	28	días
Peso	7,958	kg	Peso	7,979	kg
Ancho a	150,1	mm	Ancho a	150,4	mm
Largo b	150,7	mm	Largo b	151,1	mm
Alto h	150,1	mm	Alto h	150,2	mm
Área	22.620,1	mm <sup>2</sup>	Área	22.730,7	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.394.559,2	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.413.095,1	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.344,4	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.337,9	kg/m <sup>3</sup>
Carga máxima resistida	837,0	kN	Carga máxima resistida	895,3	kN
Presión S. Internacional	37,0	MPa	Presión S. Internacional	39,4	MPa
Presión Sistema Técnico	377,3	kgf/cm <sup>2</sup>	Presión Sistema Técnico	401,6	kgf/cm <sup>2</sup>
Promedio C15		1%	Promedio D15		1,5%
Tiempo de curado húmedo	7	días	Tiempo de curado húmedo	7	días
Edad	28	días	Edad	28	días
Peso	7,858	kg	Peso	7,812	kg
Ancho a	150,5	mm	Ancho a	150,2	mm
Largo b	150,2	mm	Largo b	150,3	mm
Alto h	150,3	mm	Alto h	150,2	mm
Área	22.597,3	mm <sup>2</sup>	Área	22.576,1	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.396.492,5	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.391.206,4	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.313,5	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.303,5	kg/m <sup>3</sup>
Carga máxima resistida	824,5	kN	Carga máxima resistida	728,6	kN
Presión S. Internacional	36,5	MPa	Presión S. Internacional	32,3	MPa
Presión Sistema Técnico	372,1	kgf/cm <sup>2</sup>	Presión Sistema Técnico	329,1	kgf/cm <sup>2</sup>
Promedio A16		0%	Promedio B16		0,5%
Tiempo de curado húmedo	7	días	Tiempo de curado húmedo	7	días
Edad	28	días	Edad	28	días
Peso	7,849	kg	Peso	7,863	kg
Ancho a	150,1	mm	Ancho a	150,1	mm
Largo b	150,0	mm	Largo b	150,0	mm
Alto h	150,2	mm	Alto h	150,1	mm
Área	22.525,0	mm <sup>2</sup>	Área	22.520,0	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.384.006,5	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.381.003,2	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.319,4	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.325,7	kg/m <sup>3</sup>
Penetración de agua	4,8	cm	Penetración de agua	3,9	cm
Promedio C16		1%	Promedio D16		1,5%
Tiempo de curado húmedo	7	días	Tiempo de curado húmedo	7	días
Edad	28	días	Edad	28	días
Peso	7,847	kg	Peso	7,781	kg
Ancho a	150,0	mm	Ancho a	150,1	mm
Largo b	150,0	mm	Largo b	150,1	mm
Alto h	150,3	mm	Alto h	149,9	mm
Área	22.505,0	mm <sup>2</sup>	Área	22.530,0	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.383.251,7	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.376.497,5	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.319,4	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.304,5	kg/m <sup>3</sup>
Penetración de agua	4,7	cm	Penetración de agua	6,1	cm

<b>Promedio A17</b>			<b>0%</b>	<b>Promedio B17</b>			<b>0,5%</b>
Tiempo de curado húmedo	7	días		Tiempo de curado húmedo	7	días	
Edad	56	días		Edad	56	días	
Peso	7,991	kg		Peso	7,969	kg	
Ancho a	150,0	mm		Ancho a	150,3	mm	
Largo b	150,6	mm		Largo b	150,7	mm	
Alto h	150,1	mm		Alto h	150,2	mm	
Área	22.582,5	mm <sup>2</sup>		Área	22.645,2	mm <sup>2</sup>	
Volumen	3.390.193,3	mm <sup>3</sup>		Volumen	3.400.742,9	mm <sup>3</sup>	
Densidad	2.357,2	kg/m <sup>3</sup>		Densidad	2.343,2	kg/m <sup>3</sup>	
Carga máxima resistida	1.081,5	kN		Carga máxima resistida	1.136,9	kN	
Presión S. Internacional	47,9	MPa		Presión S. Internacional	50,2	MPa	
Presión Sistema Técnico	488,3	kgf/cm <sup>2</sup>		Presión Sistema Técnico	511,9	kgf/cm <sup>2</sup>	
<b>Promedio C17</b>			<b>1%</b>	<b>Promedio D17</b>			<b>1,5%</b>
Tiempo de curado húmedo	7	días		Tiempo de curado húmedo	7	días	
Edad	56	días		Edad	56	días	
Peso	7,953	kg		Peso	7,847	kg	
Ancho a	150,6	mm		Ancho a	150,3	mm	
Largo b	150,7	mm		Largo b	150,5	mm	
Alto h	150,2	mm		Alto h	150,4	mm	
Área	22.685,4	mm <sup>2</sup>		Área	22.615,1	mm <sup>2</sup>	
Volumen	3.407.910,6	mm <sup>3</sup>		Volumen	3.402.070,9	mm <sup>3</sup>	
Densidad	2.333,6	kg/m <sup>3</sup>		Densidad	2.306,4	kg/m <sup>3</sup>	
Carga máxima resistida	1.048,4	kN		Carga máxima resistida	947,1	kN	
Presión S. Internacional	46,2	MPa		Presión S. Internacional	41,9	MPa	
Presión Sistema Técnico	471,3	kgf/cm <sup>2</sup>		Presión Sistema Técnico	427,1	kgf/cm <sup>2</sup>	
<b>Promedio A18</b>			<b>0%</b>	<b>Promedio B18</b>			<b>0,5%</b>
Tiempo de curado húmedo	7	días		Tiempo de curado húmedo	7	días	
Edad	56	días		Edad	56	días	
Peso	7,939	kg		Peso	2.676,941	kg	
Ancho a	150,0	mm		Ancho a	150,1	mm	
Largo b	150,0	mm		Largo b	150,0	mm	
Alto h	150,3	mm		Alto h	150,1	mm	
Área	22.505,0	mm <sup>2</sup>		Área	22.515,0	mm <sup>2</sup>	
Volumen	3.381.751,3	mm <sup>3</sup>		Volumen	3.379.501,8	mm <sup>3</sup>	
Densidad	2.347,6	kg/m <sup>3</sup>		Densidad	792.111,1	kg/m <sup>3</sup>	
Penetración de agua	3,4	cm		Penetración de agua	2,6	cm	
<b>Promedio C18</b>			<b>1%</b>	<b>Promedio D18</b>			<b>1,5%</b>
Tiempo de curado húmedo	7	días		Tiempo de curado húmedo	7	días	
Edad	56	días		Edad	56	días	
Peso	7,886	kg		Peso	7,829	kg	
Ancho a	150,0	mm		Ancho a	150,0	mm	
Largo b	150,0	mm		Largo b	150,1	mm	
Alto h	150,4	mm		Alto h	149,6	mm	
Área	22.510,0	mm <sup>2</sup>		Área	22.515,0	mm <sup>2</sup>	
Volumen	3.386.254,5	mm <sup>3</sup>		Volumen	3.368.994,8	mm <sup>3</sup>	
Densidad	2.328,8	kg/m <sup>3</sup>		Densidad	2.323,7	kg/m <sup>3</sup>	
Penetración de agua	2,3	cm		Penetración de agua	5,3	cm	

Promedio A19			0%	Promedio B19			0,5%
Tiempo de curado húmedo	28	días		Tiempo de curado húmedo	28	días	
Edad	28	días		Edad	28	días	
Peso	8,104	kg		Peso	8,134	kg	
Ancho a	150,3	mm		Ancho a	150,5	mm	
Largo b	151,2	mm		Largo b	151,2	mm	
Alto h	150,5	mm		Alto h	150,6	mm	
Área	22.720,4	mm <sup>2</sup>		Área	22.758,1	mm <sup>2</sup>	
Volumen	3.420.170,0	mm <sup>3</sup>		Volumen	3.427.369,3	mm <sup>3</sup>	
Densidad	2.369,5	kg/m <sup>3</sup>		Densidad	2.373,2	kg/m <sup>3</sup>	
Carga máxima resistida	877,3	kN		Carga máxima resistida	898,7	kN	
Presión S. Internacional	38,6	MPa		Presión S. Internacional	39,5	MPa	
Presión Sistema Técnico	393,7	kgf/cm <sup>2</sup>		Presión Sistema Técnico	402,7	kgf/cm <sup>2</sup>	
Promedio C19			1%	Promedio D19			1,5%
Tiempo de curado húmedo	28	días		Tiempo de curado húmedo	28	días	
Edad	28	días		Edad	28	días	
Peso	8,032	kg		Peso	7,752	kg	
Ancho a	150,7	mm		Ancho a	150,4	mm	
Largo b	151,1	mm		Largo b	151,1	mm	
Alto h	150,3	mm		Alto h	150,3	mm	
Área	22.773,3	mm <sup>2</sup>		Área	22.730,5	mm <sup>2</sup>	
Volumen	3.422.634,5	mm <sup>3</sup>		Volumen	3.415.250,6	mm <sup>3</sup>	
Densidad	2.346,7	kg/m <sup>3</sup>		Densidad	2.269,8	kg/m <sup>3</sup>	
Carga máxima resistida	897,8	kN		Carga máxima resistida	750,9	kN	
Presión S. Internacional	39,4	MPa		Presión S. Internacional	33,0	MPa	
Presión Sistema Técnico	402,0	kgf/cm <sup>2</sup>		Presión Sistema Técnico	336,9	kgf/cm <sup>2</sup>	
Promedio A20			0%	Promedio B20			0,5%
Tiempo de curado húmedo	28	días		Tiempo de curado húmedo	28	días	
Edad	28	días		Edad	28	días	
Peso	7,929	kg		Peso	7,931	kg	
Ancho a	150,1	mm		Ancho a	150,1	mm	
Largo b	150,1	mm		Largo b	150,0	mm	
Alto h	150,2	mm		Alto h	150,1	mm	
Área	22.530,0	mm <sup>2</sup>		Área	22.520,0	mm <sup>2</sup>	
Volumen	3.384.758,3	mm <sup>3</sup>		Volumen	3.380.252,5	mm <sup>3</sup>	
Densidad	2.342,7	kg/m <sup>3</sup>		Densidad	2.346,3	kg/m <sup>3</sup>	
Penetración de agua	2,2	cm		Penetración de agua	2,1	cm	
Promedio C20			1%	Promedio D20			1,5%
Tiempo de curado húmedo	28	días		Tiempo de curado húmedo	28	días	
Edad	28	días		Edad	28	días	
Peso	7,858	kg		Peso	7,771	kg	
Ancho a	150,1	mm		Ancho a	150,0	mm	
Largo b	150,1	mm		Largo b	150,0	mm	
Alto h	150,4	mm		Alto h	149,6	mm	
Área	22.522,5	mm <sup>2</sup>		Área	22.500,0	mm <sup>2</sup>	
Volumen	3.388.135,6	mm <sup>3</sup>		Volumen	3.365.250,0	mm <sup>3</sup>	
Densidad	2.319,4	kg/m <sup>3</sup>		Densidad	2.309,3	kg/m <sup>3</sup>	
Penetración de agua	2,0	cm		Penetración de agua	6,0	cm	

Promedio A21			0%	Promedio B21			0,5%
Tiempo de curado húmedo	28	días		Tiempo de curado húmedo	28	días	
Edad	56	días		Edad	56	días	
Peso	7,997	kg		Peso	7,974	kg	
Ancho a	150,2	mm		Ancho a	150,1	mm	
Largo b	150,7	mm		Largo b	151,2	mm	
Alto h	150,1	mm		Alto h	150,1	mm	
Área	22.622,6	mm <sup>2</sup>		Área	22.692,6	mm <sup>2</sup>	
Volumen	3.394.521,1	mm <sup>3</sup>		Volumen	3.407.110,2	mm <sup>3</sup>	
Densidad	2.355,9	kg/m <sup>3</sup>		Densidad	2.340,3	kg/m <sup>3</sup>	
Carga máxima resistida	1.124,6	kN		Carga máxima resistida	1.144,4	kN	
Presión S. Internacional	49,7	MPa		Presión S. Internacional	50,4	MPa	
Presión Sistema Técnico	506,9	kgf/cm <sup>2</sup>		Presión Sistema Técnico	514,2	kgf/cm <sup>2</sup>	
Promedio C21			1%	Promedio D21			1,5%
Tiempo de curado húmedo	28	días		Tiempo de curado húmedo	28	días	
Edad	56	días		Edad	56	días	
Peso	7,888	kg		Peso	7,739	kg	
Ancho a	150,5	mm		Ancho a	150,4	mm	
Largo b	150,8	mm		Largo b	150,3	mm	
Alto h	150,1	mm		Alto h	150,3	mm	
Área	22.682,8	mm <sup>2</sup>		Área	22.592,6	mm <sup>2</sup>	
Volumen	3.405.262,1	mm <sup>3</sup>		Volumen	3.395.290,2	mm <sup>3</sup>	
Densidad	2.316,4	kg/m <sup>3</sup>		Densidad	2.279,4	kg/m <sup>3</sup>	
Carga máxima resistida	1.077,2	kN		Carga máxima resistida	953,4	kN	
Presión S. Internacional	47,5	MPa		Presión S. Internacional	42,2	MPa	
Presión Sistema Técnico	484,3	kgf/cm <sup>2</sup>		Presión Sistema Técnico	430,3	kgf/cm <sup>2</sup>	
Promedio A22			0%	Promedio B22			0,5%
Tiempo de curado húmedo	28	días		Tiempo de curado húmedo	28	días	
Edad	56	días		Edad	56	días	
Peso	8,001	kg		Peso	7,984	kg	
Ancho a	150,1	mm		Ancho a	150,2	mm	
Largo b	150,1	mm		Largo b	150,0	mm	
Alto h	150,2	mm		Alto h	150,1	mm	
Área	22.530,0	mm <sup>2</sup>		Área	22.530,0	mm <sup>2</sup>	
Volumen	3.384.758,3	mm <sup>3</sup>		Volumen	3.382.254,5	mm <sup>3</sup>	
Densidad	2.363,9	kg/m <sup>3</sup>		Densidad	2.360,5	kg/m <sup>3</sup>	
Penetración de agua	2,6	cm		Penetración de agua	2,0	cm	
Promedio C22			1%	Promedio D22			1,5%
Tiempo de curado húmedo	28	días		Tiempo de curado húmedo	28	días	
Edad	56	días		Edad	56	días	
Peso	7,951	kg		Peso	7,851	kg	
Ancho a	150,1	mm		Ancho a	150,1	mm	
Largo b	150,2	mm		Largo b	150,2	mm	
Alto h	150,2	mm		Alto h	150,0	mm	
Área	22.553,4	mm <sup>2</sup>		Área	22.543,3	mm <sup>2</sup>	
Volumen	3.388.266,9	mm <sup>3</sup>		Volumen	3.381.502,2	mm <sup>3</sup>	
Densidad	2.346,6	kg/m <sup>3</sup>		Densidad	2.321,8	kg/m <sup>3</sup>	
Penetración de agua	1,9	cm		Penetración de agua	5,2	cm	

Promedio A23		0%	Promedio B23		0,5%
Tiempo de curado húmedo	56	días	Tiempo de curado húmedo	56	días
Edad	56	días	Edad	56	días
Peso	8,143	kg	Peso	8,189	kg
Ancho a	150,3	mm	Ancho a	150,1	mm
Largo b	150,6	mm	Largo b	150,9	mm
Alto h	150,1	mm	Alto h	150,3	mm
Área	22.637,7	mm <sup>2</sup>	Área	22.642,6	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.397.352,0	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.403.180,5	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.396,9	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.406,3	kg/m <sup>3</sup>
Carga máxima resistida	1.161,5	kN	Carga máxima resistida	1.143,7	kN
Presión S. Internacional	51,3	MPa	Presión S. Internacional	50,5	MPa
Presión Sistema Técnico	523,2	kgf/cm <sup>2</sup>	Presión Sistema Técnico	515,1	kgf/cm <sup>2</sup>
Promedio C23		1%	Promedio D23		1,5%
Tiempo de curado húmedo	56	días	Tiempo de curado húmedo	56	días
Edad	56	días	Edad	56	días
Peso	8,123	kg	Peso	8,104	kg
Ancho a	150,3	mm	Ancho a	150,6	mm
Largo b	151,0	mm	Largo b	151,4	mm
Alto h	150,4	mm	Alto h	150,3	mm
Área	22.700,3	mm <sup>2</sup>	Área	22.795,8	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.414.130,1	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.426.777,6	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.379,3	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.364,9	kg/m <sup>3</sup>
Carga máxima resistida	1.116,2	kN	Carga máxima resistida	991,1	kN
Presión S. Internacional	49,2	MPa	Presión S. Internacional	43,5	MPa
Presión Sistema Técnico	501,4	kgf/cm <sup>2</sup>	Presión Sistema Técnico	443,3	kgf/cm <sup>2</sup>
Promedio A24		0%	Promedio B24		0,5%
Tiempo de curado húmedo	56	días	Tiempo de curado húmedo	56	días
Edad	56	días	Edad	56	días
Peso	8,043	kg	Peso	8,002	kg
Ancho a	150,1	mm	Ancho a	150,1	mm
Largo b	150,3	mm	Largo b	150,1	mm
Alto h	150,3	mm	Alto h	150,2	mm
Área	22.555,0	mm <sup>2</sup>	Área	22.525,0	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.390.020,5	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.382.505,2	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.372,7	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.365,6	kg/m <sup>3</sup>
Penetración de agua	2,1	cm	Penetración de agua	1,8	cm
Promedio C24		1%	Promedio D24		1,5%
Tiempo de curado húmedo	56	días	Tiempo de curado húmedo	56	días
Edad	56	días	Edad	56	días
Peso	7,968	kg	Peso	7,922	kg
Ancho a	150,2	mm	Ancho a	150,1	mm
Largo b	150,4	mm	Largo b	150,4	mm
Alto h	151,1	mm	Alto h	149,3	mm
Área	22.585,1	mm <sup>2</sup>	Área	22.570,0	mm <sup>2</sup>
Volumen	3.412.604,6	mm <sup>3</sup>	Volumen	3.369.706,5	mm <sup>3</sup>
Densidad	2.334,9	kg/m <sup>3</sup>	Densidad	2.350,9	kg/m <sup>3</sup>
Penetración de agua	1,8	cm	Penetración de agua	4,5	cm

Fuente: Elaboración propia, 2019.