



**UNIVERSIDAD DE ESPECIALIDADES ESPIRITU SANTO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL**

# **EFECTO DE LA RELACIÓN AGUA-CEMENTO EN LA DIFUSIÓN DE CLORUROS EN HORMIGÓN ESTRUCTURAL.**

**Trabajo de titulación para obtener el título de  
Ingeniero Civil**

**AUTOR: JONATHAN ALVARADO**

**TUTOR: PhD. OLGA ROA**

**SAMBORONDÓN, Septiembre - 2019**

## DEDICATORIA:

*Dedico este trabajo a Dios.*

*A mis padres, Ing. Civil **Cesar Andrés Alvarado Freire** e Ing. Civil **Cecibell Dora Estrada Molina**, por siempre brindarme su apoyo incondicional en todo el proceso que tuve que pasar para llegar hasta donde estoy el día de hoy, para alcanzar una de mis metas.*

*A la Ph D. Olga Roa por haber creído en mí y por apoyarme cuando más lo necesité, porque para mí más que mi tutora es mi amiga.*

## **AGRADECIMIENTO:**

Agradezco al **Centro de Innovación Holcim** por el apoyo técnico, profesional y suministro de materiales e información, y a su personal quienes en forma desinteresada me permitieron realizar el trabajo práctico en sus instalaciones, brindándome información y apoyo incondicional.

Hago mención especial a los ingenieros **John Macas, Daniel Petroche y Christian Velasco**, quienes siempre mostraron interés por desarrollar un trabajo de calidad aportando su experiencia para mi formación profesional. Ellos impulsan el trabajo en equipo y son un ejemplo a seguir, gracias por su amistad.

## RESUMEN

Ante el riesgo de corrosión de estructuras en hormigón armado en ambiente marino se plantea la problemática de pérdida de resistencia mecánica del hormigón. Dicha pérdida es debida al transporte de cloruro que ocurre por los poros interconectados quienes son el vehículo para la difusión iónica, permeabilidad, absorción o migración. Como parte de este trabajo de titulación se realizaron estudios de laboratorio para evaluar la incidencia de un medio contentivo de cloruro sobre la permeabilidad, difusividad y resistencia en compresión de mezclas de hormigón estructural.

En el estudio se planteó como variable la relación agua cemento, para un tipo de cemento y material de refuerzo (Holcim Premium HE y Piedra caliza N°67, Arena unificada y Arena zarandeada). El trabajo de laboratorio se realiza en las instalaciones de Holcim Ecuador, siguiendo protocolos y normativas vigentes. Los aportes principales que resultan de este trabajo se centran en cuantificar la permeabilidad, difusividad y resistencia en compresión, para la tipología de mezcla de hormigón preparada con tres relaciones agua-cemento y a partir de estos resultados establecer como estas variables se relacionan. Los análisis de permeabilidad y penetración de cloruros permiten intuir que para reducir la penetración de grandes cantidades de cloruro se requiere utilizar hormigón con una buena calidad (A/C bajas), esto posibilita alcanzar una mayor vida útil del material. Para el trabajo de laboratorio se utiliza el método C 1202, por lo que puede resultar conveniente analizar comparativamente otros métodos de migración de los iones para las mismas mezclas.

### **Palabras clave:**

Didusión de Cloruros, Resistencia en compresión, Permeabilidad.

## **ABSTRACT**

Given the risk of corrosion of structures in reinforced concrete in a marine environment, the problem of loss of mechanical resistance of the concrete arises. This loss is due to the transport of chloride that occurs through the interconnected pores who are the vehicle for ionic diffusion, permeability, absorption or migration. As part of this titration work, laboratory studies were carried out to evaluate the incidence of a chloride-containing medium on the permeability, diffusivity and compressive strength of structural concrete mixtures.

In the study, the cement water ratio was considered as variable, for a type of cement and reinforcement material (Holcim Premium HE and Limestone No. 67, Unified Sand and Shaken Sand). The laboratory work is carried out in the facilities of Holcim Ecuador, following current protocols and regulations. The main contributions that result from this work are focused on quantifying the permeability, diffusivity and resistance in compression, for the type of concrete mix prepared with three water-cement relations and from these results establish how these variables are related. The analysis of permeability and penetration of chlorides allows us to intuit that in order to reduce the penetration of large quantities of chloride, it is necessary to use concrete with a good quality (low  $A / C$ ), this makes it possible to achieve a greater useful life of the material. The ASTM 1202 method is used for laboratory work, so it may be convenient to comparatively analyze other ion migration methods for the same mixtures.

### **Key words:**

Diffusion of Chlorides, Compressive strength, Permeability.

# ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTO:</b> .....	III
<b>RESUMEN</b> .....	IV
<b>ABSTRACT</b> .....	V
<b>CAPÍTULO I</b> .....	- 1 -
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA: ANTECEDENTES</b> .....	- 1 -
1 Área(s) de investigación del trabajo de titulación.....	- 1 -
2 Delimitación del tema.....	- 3 -
3 Formulación del problema.....	- 8 -
4 Justificación y pertinencia.....	- 8 -
5 Objetivos.....	- 9 -
<b>CAPÍTULO II</b> .....	- 11 -
<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS:</b> .....	- 11 -
<b>CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL</b> .....	- 11 -
1 Introducción.....	- 11 -
2 Materiales constitutivos de mezclas de hormigón.....	- 11 -
3 Relaciones agua- cemento de mezclas de hormigón.....	- 19 -
4 Propiedades de la mezcla de hormigón.....	- 22 -
4.1 Densidad.....	- 22 -
4.2 Porosidad.....	- 23 -
4.3 Permeabilidad.....	- 24 -
4.4 Difusión de cloruros.....	- 24 -
4.5 Resistencia a la compresión.....	- 25 -
4.6 Fluidéz y trabajabilidad.....	- 26 -
5 Característica de equipos requeridos en el laboratorio:.....	- 26 -
5.1 Equipo asociado a la preparación de mezclas.....	- 26 -
5.2 Equipo asociado a los ensayos de la mezcla fresca.....	- 27 -
5.3 Equipo asociado a los ensayos de la mezcla endurecida.....	- 32 -
<b>CAPÍTULO III</b> .....	36
<b>PROTOCOLOS PARA REALIZAR LOS ENSAYOS DE LABORATORIO EN MUESTRAS DE HORMIGÓN</b> .....	36

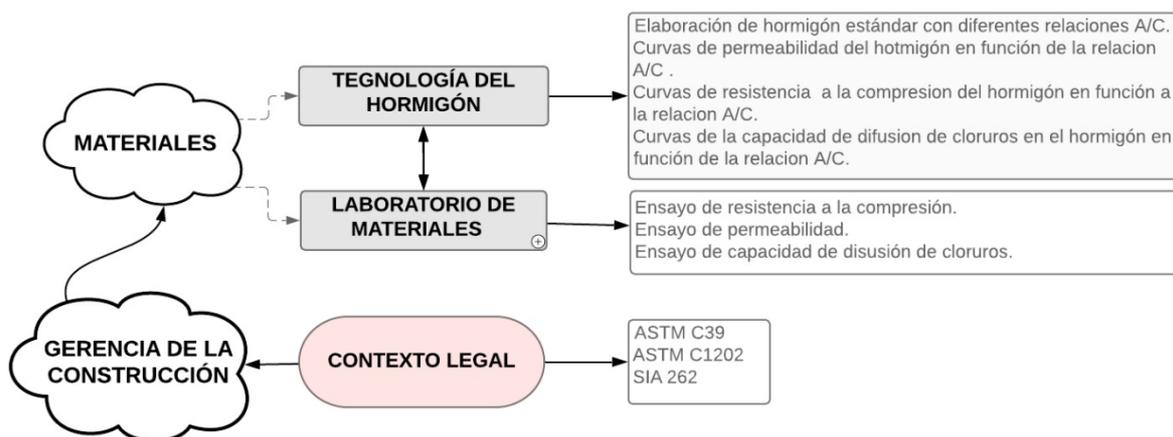
<b>1</b>	<b>Introducción</b> .....	<b>36</b>
<b>2</b>	<b>PROTOCOLO 1: Elaboración de la mezcla</b> .....	<b>39</b>
<b>3</b>	<b>PROTOCOLO 2: Características de estado fresco</b> .....	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>PROTOCOLO 3: Características en estado endurecido</b> .....	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>PROTOCOLO 4: Preparación de muestras</b> .....	<b>67</b>
	<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>76</b>
	<b>ANÁLISIS DE RESULTADO</b> .....	<b>76</b>
<b>1</b>	<b>Introducción</b> .....	<b>76</b>
<b>2</b>	<b>Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión</b> .....	<b>78</b>
<b>3</b>	<b>Resultados de los ensayos de permeabilidad</b> .....	<b>80</b>
<b>4</b>	<b>Resultados de los ensayos de difusión de cloruros</b> .....	<b>82</b>
<b>5</b>	<b>Relación entre la resistencia y la permeabilidad</b> .....	<b>83</b>
	<b>CAPITULO V</b> .....	<b>87</b>
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>87</b>
<b>6</b>	<b>Referencias</b> .....	<b>90</b>

# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA: ANTECEDENTES

### 1 Área(s) de investigación del trabajo de titulación

Las áreas de conocimiento más relevantes que dan soporte para esta investigación son Tecnología del Hormigón, Laboratorio de Materiales y Gerencia de la Construcción. En la Figura 1 se plantea en forma esquemática la interacción de dichas áreas para esta investigación, así como los parámetros relevantes que serán considerados en este estudio por su asociación con el comportamiento resistivo del material (hormigón estructural). En el área de Tecnología del Hormigón son consideradas las características asociadas a su micro estructura, así como la forma en que estas se interrelacionan. Por otra parte, en el área de laboratorio de materiales se contextualizan a los diversos ensayos que se propone realizar a fin de obtener los datos necesarios en la presente investigación. Finalmente, en forma transversal el área de Gerencia de la Construcción permite coordinar los trabajos a desarrollar, ajustados al respectivo contexto legal siguiendo las normativas que rigen los ensayos a realizar en la presente investigación.



**Figura 1-1:** Esquema de relación entre áreas de conocimiento

En el hormigón, objeto de esta investigación corresponde al uso para la construcción de hormigón armado, en el cual se evidencian problemas de oxidación y

corrosión en las varillas de refuerzo cuando estas se encuentran expuestas a medios contentivos de cloruro de sodio. Para el estudio experimental del hormigón cuando es sometido a un medio contentivo de cloruro de sodio, se tienen presentes las características asociadas con la micro estructura del hormigón, tales como: la densidad, porosidad, porosidad específica y permeabilidad. Dichas características se relacionan con la capacidad del hormigón de permitir el ingreso de fluidos en su interior (en este caso el fluido es contentivo de cloruros de sodio) afectando el desempeño mecánico, por ejemplo, la reducción de la resistencia a la compresión.

La difusión de los iones de cloruro al interior del hormigón armado provoca daños severos en este, reduciendo su vida útil debido a que el cloruro incrementa el desgaste del hormigón lo que expone a las estructuras de refuerzo a procesos corrosivos. Esto ocurre debido a que, al ingresar el cloruro provoca una disminución del pH lo cual inicia el proceso de corrosión (Girón, 1998).

Para obtener las mediciones de variables que caracterizan la resistencia a la compresión, la permeabilidad y la capacidad de difusión de cloruros, se utilizan los siguientes ensayos de laboratorio: el ensayo de resistencia a compresión de probetas de hormigón utilizando una prensa hidráulica (adaptado a la norma ASTM C39 para probetas con peso unitario mayor a  $800 \text{ kg/m}^3$ ), el ensayo de permeabilidad de Torrent (adaptado a la norma suiza SIA 262; 2003), y finalmente para determinar el contenido de cloruro que ingresa en probetas de hormigón, el ensayo Rapid Chloride Test, RCT (adaptado a la norma C1202 de (ASTM, 2013)).

El hormigón debido a su característica de material heterogéneo, poroso y permeable varía su resistencia mecánica en función de la relación de dichas características, así como con la variación de la magnitud y dirección de la carga. Por otra parte, propiedades como la porosidad y permeabilidad varían con la composición de la mezcla, es decir el tamaño de granos y tipología del cemento. En la presente investigación en primer lugar se propone estudiar como varían los niveles de permeabilidad que poseen las muestras de hormigón cuando en el diseño de las probetas de ensayo se establece que las relaciones agua / cemento (A/C) serán de 0.35, 0.40, y 0.45. Debido a que dichas relaciones corresponden con las mezclas de

hormigón estructural con refuerzos de varillas de hierro para elementos tipo columna (lo cual es descrito en el capítulo 3), para cada relación (A/C) se propone construir un número de probetas que sea estadísticamente representativo (aproximadamente 30 probetas por cada relación A/C).

Siguiendo la normativa vigente para medir las propiedades mecánicas mediante ensayos de laboratorio la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, (American Society for Testing and Materials, ASTM, vol. 04 - apdo. 02 – sec. C, titulada: *hormigón y sus agregados*) definen los procedimientos para realizar los ensayos y determinar los resultados en correspondencia con los marcos legales que sustentan esta investigación respectivamente.

Entendiendo la permeabilidad como la propiedad que permite la filtración de un fluido a través de los espacios interconectados o sistema de vacíos presentes en la estructura del hormigón, (Pérez, 2009), se considera análogamente que las estructuras de hormigón expuestas a un fluido contentivo de cloruro de sodio permiten el ingreso de estos cloruros dependiendo de los niveles de permeabilidad. Dicha condición demanda el estudio y desarrollo de métodos que permitan controlar la permeabilidad del hormigón.

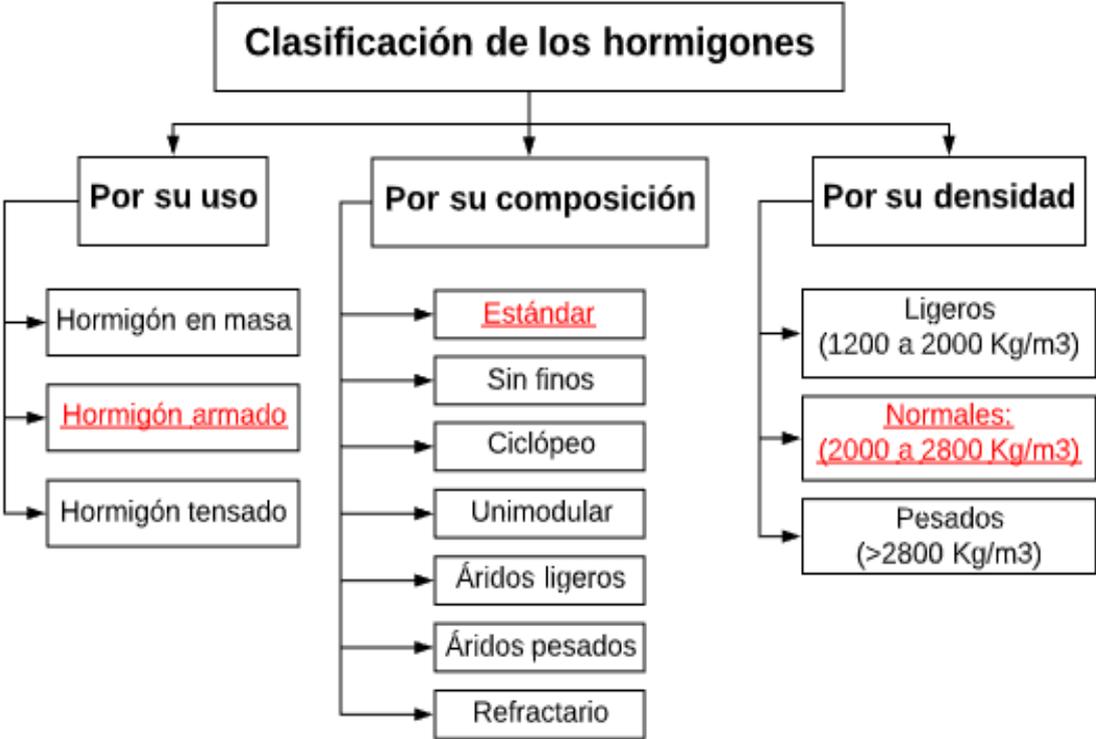
Adicionalmente los cloruros que ingresan al hormigón inducen la conexión de poros por desgaste debido a que el cloruro reacciona ante el aluminio tricalcio creando un ataque químico (Flores L., López V., Barrios S., & Rodríguez G., 1995), induciendo el incremento de la permeabilidad por desgaste y creando caminos para el paso de fluidos presentes en el medio en que se encuentre el hormigón. A la interconexión de poros se la conoce como porosidad específica.

## **2 Delimitación del tema**

El hormigón es un material formado a partir de áridos naturales (piedra y arena) de distintos tamaños los cuales son aglomerados por una pasta conglomerante (cemento, cal, polímeros, entre otros) y agua. En ciertos casos, dependiendo del uso

que el hormigón tenga, se suele añadir a la mezcla ciertos aditivos, puzolanas, o agentes que mejoran las propiedades respecto al hormigón convencional descrito previamente. El hormigón se caracteriza por ser un material multiusos que permite diseños en varias configuraciones, es resistente en diferentes direcciones de carga y su durabilidad media es de 50 años.

Los hormigones existentes son clasificados según: su uso en 3 grandes grupos en función del sistema de armado, su composición, y su densidad. En la Figura 2 se esquematizan dichos grupos y las correspondientes clases de hormigón que estos encierran. Se resalta de color rojo las clases de cada grupo que son seleccionadas para realizar los estudios de la presente investigación.



**Figura 1.2:** Esquema que representa los criterios de selección del tipo de hormigón objeto de estudio.

En general, diversos componentes se encuentran presentes en el medio en que las estructuras de hormigón están expuestas, por ejemplo, en medios sumergidos acuosos (aguas saladas, salobres y dulces) se tiene que: el agua salada contiene un

96,5% de agua, 3,5% de sal de mar (constituida por 55% de cloro, 30,6% de sodio, 7,7% de sulfato, 3,7% de magnesio, 1,2% de calcio, 1,1% de potasio y 0,7% de otros elementos). El agua salobre contiene entre 1,7 – 0,05 % de sal de mar y el resto agua. Por otra parte, el agua dulce contiene bajas concentraciones de sal (menor al 0.05%). Cuando el medio es aire (atmosférico) se tiene un contenido de 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y el 1% restante de gases como el dióxido de carbono, argón, neón, helio, hidrógeno, vapor de agua entre otros. A continuación, se puede apreciar la Figura 3 la ejemplificación de como los elementos de hormigón se exponen a los distintitos medios. Para esta investigación se seleccionó un medio sumergido.

Las obras civiles cuyos componentes estructurales de hormigón están expuestos en medios contentivos de cloruros, deben prever en sus planes de mantenimiento que la acción del medio (niveles de concentración de cloruros) afecta con mayor intensidad el deterioro estructural, así como también la relación entre el medio presente y el índice de permeabilidad.

Como se puede notar existen varios ambientes contentivos de cloruros a los que las estructuras de hormigón se encuentran expuestos afectando su durabilidad e implícitamente los costos, de allí la importancia de esta investigación. En la Figura 4 se pueden apreciar como el hormigón se ha deteriorado debido a la acción de los ambientes abrasivos.

Para realizar esta investigación se desarrollarán estudios de permeabilidad en el hormigón, debido a que el nivel de permeabilidad es el factor que determina la posibilidad de ataques por agentes químicos que destruyen no solo al hormigón sino también a las a estructuras de refuerzo. En la Figura 5 se representa gráficamente como los agentes destructores ingresan a los distintos elementos de hormigón a través de las micro fisuras y poros que estos poseen.



**Figura 1.3** Medios contentivos de cloruros en que puede estar expuesta una estructura de hormigón.



**Figura 1.4** Daños en estructuras de hormigón



**Figura 1.5** *Ingreso de agentes destructores por permeabilidad*

El objetivo de los ensayos a realizar se centra en desarrollar las curvas que relacionan relación agua/cemento - permeabilidad, relación agua/cemento - resistencia a la compresión, relación agua/cemento - capacidad de difusión de cloruros, permeabilidad – resistencia a la compresión, permeabilidad – capacidad de difusión de cloruros, resistencia a la compresión – capacidad de difusión de cloruros para mezclas de hormigón estructural elaborado con tres relaciones agua/cemento antes mencionadas, cuando se utilizan como agregados con características geométricas controladas que son producidos por la empresa Holcim - Ecuador.

El proceso de degradación de las estructuras internas del hormigón comienza en el momento en el que las partículas de cloruro ingresan al interior del hormigón a través de los poros, esto genera que el pH disminuya generando un ambiente propicio para la oxidación del acero de refuerzo del hormigón, sin embargo, el tiempo requerido varía dependiendo de la permeabilidad que posea el hormigón. Se estima que controlando el nivel de permeabilidad que posee el elemento de hormigón se puede reducir el ataque por oxidación.

Esta investigación se realiza en la ciudad de Guayaquil, y debe tenerse presente que es una ciudad conformada sobre un delta. Por ende, existe un ambiente contentivo de cloruro de sodio producto de su cercanía con los ramales que desembocan al océano pacífico.

Actualmente en la UEES se han realizado estudios sobre la impermeabilidad del hormigón incorporando compuestos y aditivos a la mezcla, y a nivel nacional ingenieros de universidades como la ESPOL, UTA, USFQ, UCE, entre otras se han interesado en este tema ya que representa un gran aporte a la ingeniería a la construcción y al bienestar de las estructuras construidas en Guayaquil.

La Norma Ecuatoriana de Construcción acerca de este tema establece controles sobre el grado de relación agua/cemento que posee la mezcla el cual se designa según el tipo de ambiente en el que se va a construir la edificación. Se aprecian estructuras con gran costo de mantenimiento en ciertos casos. En otros casos es necesario demolerlas debido a que ya no cumplen con los índices mínimos requeridos para ser utilizadas sin cumplir su vida útil de diseño. El problema del incremento en el costo de mantenimiento origina un problema para las hormigoneras ya que al no poder controlar este factor los consumidores deciden elaborar las estructuras con otros productos que brinden un menor costo de mantenimiento como la madera, el acero, entre otros.

### **3 Formulación del problema**

¿Cómo determinar las variaciones y relaciones entre la permeabilidad, la resistencia a la compresión y la capacidad de difusión de cloruros debidos a cambios de la relación agua/cemento de mezclas de hormigón estándar?

### **4 Justificación y pertinencia**

La presente investigación es pertinente debido que integra varias áreas de conocimiento como materiales y gerencia de la construcción, las cuales fueron aprendidas en la carrera de ingeniería civil. En la Universidad de Especialidades Espíritu Santo, UEES se imparten estos conocimientos a través de las materias resistencia de materiales, tecnología del hormigón y laboratorio de materiales esto en

cuanto al área de materiales mientras que en el área de gerencia en la construcción se enseña la materia de contexto legal.

Actualmente en el año 2019 existe un problema el cual afecta directamente a las estructuras de hormigón armado reduciendo su vida útil. Esto se debe al ambiente contentivo de cloruro de sodio en el que estas se encuentran, el cual provoca el deterioro de sus armaduras internas producto de la permeabilidad que posee el hormigón. Es por esto que, utilizando los conocimientos adquiridos gracias a la carrera de ingeniería civil impartida por la UEES, se pretende solucionar este problema a través del estudio de la permeabilidad del hormigón por medio de diversos ensayos de laboratorio como el ensayo de permeabilidad de Torrent y el R.C.T.

Debido a la gran diversidad de hormigones que existen hasta la fecha para esta investigación se tomó como objeto de estudio el hormigón estándar con tres tipos de relación agua/cemento. Los diseños, equipos, agregados, cemento y el espacio de trabajo fueron patrocinado por la empresa Holcim Ecuador. Esto con el fin de colaborar con esta investigación y a su vez obtener un aporte para su base de datos ya que los diseños utilizados en esta investigación son de los más solicitados por los clientes que ellos poseen. El producto que se estima tener al realizar esta investigación es un compendio de tablas y gráficos que relacionan entre si propiedades del hormigón como la resistencia a la compresión, permeabilidad y capacidad de difusión de cloruros con respecto a las diversas relaciones de agua/cemento.

## **5 Objetivos**

### ***Objetivo General***

Simular experimentalmente el comportamiento de mezclas de hormigón estándar construidas con diferentes relaciones agua/cemento modificando así su

permeabilidad, para determinar la incidencia de la permeabilidad en la resistencia a la compresión y en la capacidad de difusión de cloruros de las mezclas.

### ***Objetivos Específicos***

- Diseñar las tres tipologías de ensayos de laboratorio que permitan obtener la permeabilidad, la resistencia a la compresión, y la capacidad de difusión de cloruros.
- Determinar las curvas de relaciones entre:
  - relación agua/cemento - permeabilidad,
  - relación agua/cemento - resistencia a la compresión,
  - relación agua/cemento - capacidad de difusión de cloruros.
  - permeabilidad – resistencia a la compresión,
  - permeabilidad – capacidad de difusión de cloruros,
  - resistencia a la compresión – capacidad de difusión de cloruros,
- Determinar en base a los resultados obtenido como incide la relación agua/cemento en la durabilidad del hormigón

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS: CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL

#### 1 Introducción

El hormigón estructural es el utilizado en la ejecución de estructura de obra civil o de edificación. En Ecuador los materiales constituyentes, dosificación, fabricación y su control de calidad, vienen definidos por las normativas y regulaciones existentes.

#### 2 Materiales constitutivos de mezclas de hormigón

##### Cemento

La Norma Técnica Ecuatoriana, NTE INEN 2380 y su equivalente, la norma C 1157 (ASTM, 2013) rigen los procesos de fabricación del cemento hidráulico con aditivos específicos que mejoran el desempeño resistivo del cemento y reducen la capacidad como contaminante. Sobre la base de dichas normativas la empresa Holcim-Ecuador elabora el cemento *Holcim Premium*, tipo alta resistencia temprana (High Early-Strength, HE). El cemento HE está constituido por: clinker de cemento portland, adiciones de puzolanas naturales y yeso. Con este producto se obtienen resistencias similares al cemento portland tipo III (C 150 (ASTM, 2013)).

##### Agregados

En el campo de la construcción, dentro del ámbito de elaboración de hormigones se conoce como agregados a un material mineral granular, árido e inerte (agregados) usado en conjunto con un medio cementante para generar mezclas de hormigón. Los agregados pueden ser arena, grava, piedra, ripio, entre otros. Los agregados se clasifican en 2 tipos agregado fino, agregado grueso.

### **Agregado fino**

Es considerado agregado fino todo árido que tenga un porcentaje de pasante del tamiz 4,75 mm (norma INEN o el tamiz No 4 según la norma (ASTM, 2013)). Este puede ser natural, triturado o sintético. En la elaboración de hormigones el agregado fino es esencial debido a que este actúa como relleno para economizar la mezcla, sin embargo, una excesiva cantidad de los mismos encarece la muestra debido a que se requiere de más pasta para poder cubrir el exceso.

### **Arena de rio**

La arena de rio es el producto de la sedimentación del conjunto de fragmentos de rocas o minerales que fluyen a través de un cuerpo de agua dulce. El tamaño de estos agregados oscila entre 0,063 a 2 mm. Para esta investigación se seleccionó la arena proveniente del Rio Cañar. Este rio queda en la provincia del Guayas, el dragado se lo realiza en la zona de Puerto Inca y el servicio lo realiza la arenera ANROPEVI S.A.

### **Granulometría**

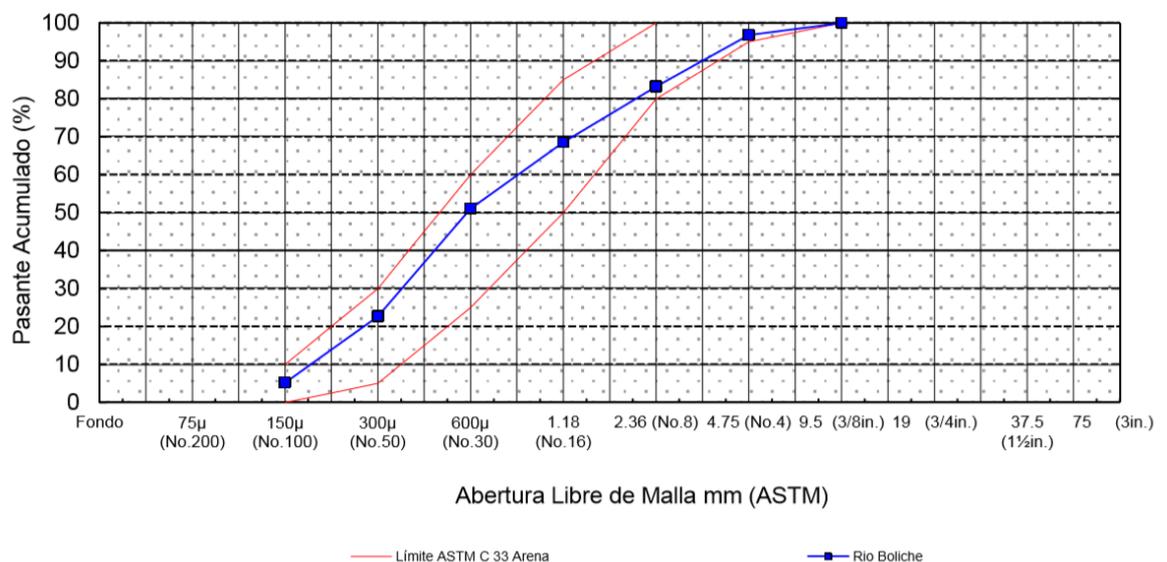
**Tabla 2.1** *Granulometría de arena del rio Cañar*

<b>Agregado:</b> Arena zarandeada		<b>Fuente:</b> Rio Cañar	<b>Masa inicial</b> 541 (gr)		
<b>Tamiz (mm, in)</b>		<b>Retenido parcial (gr)</b>	<b>Retenido parcial (%)</b>	<b>Retenido acumulado (%)</b>	<b>Pasante acumulado (%)</b>
<b>INEN</b>	<b>ASTM</b>				
9.5 mm	3/8 in	0.0	0	0	100
4.75 mm	No.4	17.3	3	3	97
2.36 mm	No. 8	73.4	14	17	83
1.18 mm	No.16	79,1	15	31	69
600 µm	No. 30	94.7	18	49	51

300 $\mu$ m	No. 50	153.3	28	77	23
150 $\mu$ m	No. 100	94.3	17	95	5
<b>Bandeja</b>		28.1	5	100	0
<b>Masa final (g):</b>		540.2	<b>Módulo de finura:</b>	2.7	
<b>%Perdida &lt;0.3:</b>	Ensayo valido:				

### Curva granulométrica

En la Figura 6 se muestra la curva granulométrica de la arena zarandeada del río Cañar la cual se genera a partir de los puntos interconectados. Estos puntos representan el porcentaje de pasante acumulado que poseen los tamices previamente establecidos en la Tabla 1. Además, se puede apreciar también que existen 2 líneas guías las cuales marcan el rango aceptado según la norma C 33 (ASTM, 2013) para que un material sea determinado como arena apta para la elaboración de hormigón.



**Figura 2.1** Curva que presenta la granulometría de la arena de río seleccionada para los diseños de hormigón.

### Arena unificada

La arena unificada a diferencia de la arena de río, proviene de la trituración de la piedra caliza. Luego de la trituración se selecciona la granulometría del material mediante un proceso de tamizado quedando sobre el tamiz la piedra denominada **cisco** o piedra de 3/8 cuya granulometría de roca varía en el intervalo [4.75, 9.5] mm. Toda roca con tamaño < 4,5 mm se define como arena triturada. Para esta investigación se adquiere material de Calizas Huayco quienes son proveedores certificados de Holcim Ecuador.

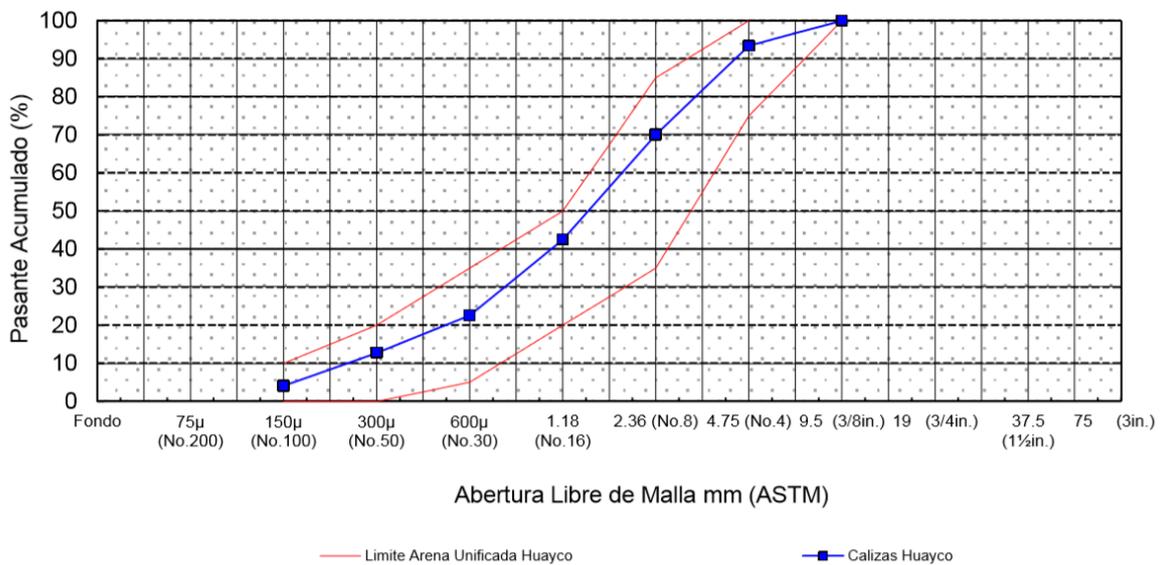
### Granulometría

**Tabla 2.2** *Granulometría de arena triturada por Calizas Huayco*

<b>Agregado:</b>		<b>Fuente:</b>	<b>Masa inicial</b>		<b>500</b>	
Arena unificada		Calizas Huayco	<b>(gr)</b>			
<b>Tamiz (mm, in)</b>		<b>Retenido parcial (gr)</b>	<b>Retenido parcial (%)</b>	<b>Retenido acumulado (%)</b>	<b>Pasante acumulado (%)</b>	
<b>INEN</b>	<b>ASTM</b>					
9.5 mm	3/8 in	0.0	0	0	100	
4.75 mm	No.4	32.9	7	7	93	
2.36 mm	No. 8	116.5	23	30	70	
1.18 mm	No.16	137.3	28	57	43	
600 µm	No. 30	99.6	20	77	23	
300 µm	No. 50	48.9	10	87	13	
150 µm	No. 100	43.0	9	96	4	
<b>Bandeja</b>		20.5	4	100	0	
<b>Masa final (g):</b>		498.7	<b>Módulo de finura:</b>		3.5	
<b>%Perdida &lt;0.3:</b>			Ensayo valido			

### Curva granulométrica

En la Figura 7 se muestra la curva granulométrica de la arena unificada la cual se genera a partir de los puntos interconectados. Estos puntos representan el porcentaje de pasante acumulado que poseen los tamices previamente establecidos en la Tabla 2. Además, se puede apreciar también que existen 2 líneas guías las cuales marcan el rango en el que suele variar esta arena al ser sometida al proceso para determinar su granulometría.



**Figura 2.2** Curva que presenta la granulometría de la arena elaborada por Calizas Huayco para los diseños de hormigón

### Agregado grueso

Es considerado agregado grueso todo árido que no posea ningún porcentaje de pasante del tamiz 4,75 mm según la norma INEN o el tamiz No 4 según la norma (ASTM, 2013). Este puede ser natural, triturado o sintético. En la elaboración de hormigones el agregado grueso es esencial debido a que este incrementa la densidad, la resistencia y el módulo de elasticidad. Otro beneficio de los agregados gruesos es que usualmente son más estables que la pasta de cemento lo cual resulta en que gracias a ellos el hormigón posee más durabilidad.

### Piedra 67

La piedra 67 se obtiene a través de la trituración de la piedra caliza. Se la denominado comúnmente como piedra  $\frac{3}{4}$  debido a que posee una configuración estándar que pasa el tamiz ( $\frac{3}{4}$  in) según la norma (ASTM, 2013) o 19 mm según la norma INEN.

### Granulometría

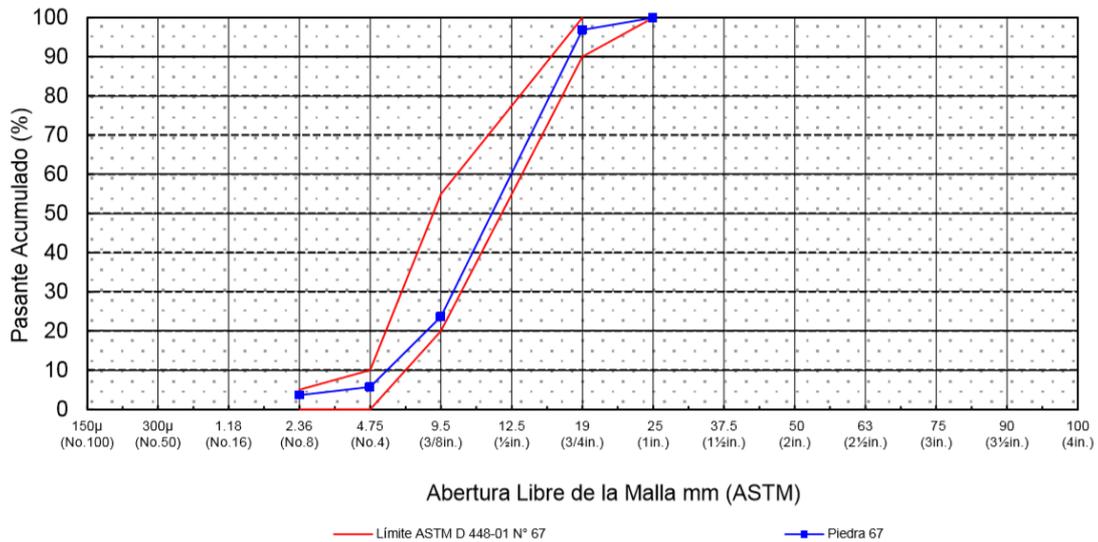
**Tabla 2.3** *Granulometría de piedra 67 (denominada 3/4) triturada por Calizas Huayco*

<b>Agregado:</b>		Piedra 67	<b>Fuente:</b>		Calizas Huayco	<b>Masa inicial</b>		6328
						<b>(gr)</b>		
<b>Tamiz (mm, in)</b>		<b>Retenido</b>		<b>Retenido</b>		<b>Retenido</b>		<b>Pasante</b>
<b>INEN (mm)</b>	<b>ASTM (in)</b>	<b>parcial (gr)</b>	<b>parcial (%)</b>	<b>acumulado</b>	<b>acumulado</b>	<b>acumulado</b>	<b>acumulado</b>	<b>acumulado</b>
						<b>(%)</b>		<b>(%)</b>
<b>100</b>	4	---	---	---	---	---	---	---
<b>90</b>	3½	---	---	---	---	---	---	---
<b>75</b>	3	---	---	---	---	---	---	---
<b>63</b>	2 ½	---	---	---	---	---	---	---
<b>50</b>	2	---	---	---	---	---	---	---
<b>37.</b>	1 ½	---	---	---	---	---	---	---
<b>25</b>	1	0.0	0	0	0	0	100	100
<b>19</b>	$\frac{3}{4}$	199.9	3	3	3	3	97	97
<b>12.5</b>	$\frac{1}{2}$	---	---	---	---	---	---	---
9.5	3/8n	4625.1	73	73	76	76	24	24
4.75	No.4	1132.0	18	18	94	94	6	6
2.36	No. 8	135.0	2	2	96	96	4	4
1.18	No.16	---	---	---	---	---	---	---
300 µm	No. 50	---	---	---	---	---	---	---

150 $\mu$ m	No. 100	---	---	---	---
<b>Bandeja</b>	227.0	4	100	0	
<b>Masa final (g):</b>	6319.0	<b>Módulo de finura:</b>	6.6		
<b>%Perdida &lt;0.5:</b>	Ensayo valido				

### Curva granulométrica

En la Figura 8 se muestra la curva granulométrica de la piedra 67 la cual se genera a partir de los puntos interconectados. Estos puntos representan el porcentaje de pasante acumulado que poseen los tamices previamente establecidos en la Tabla 3. Además, se puede apreciar también que existen 2 líneas guías las cuales marcan el rango aceptado según la norma D 448-01 (ASTM, 2013) para que un material sea determinado como piedra N° 67.



**Figura 2.3** Curva que presenta la granulometría de la piedra elaborada por Calizas Huayco para los diseños de hormigón

### Agua

Muchos constructores elaboran hormigón utilizando agua de ríos, lagos u otras fuentes que estén a su alcance y les permitan disminuir costo. Sin embargo, la

Norma Ecuatoriana de Construcción - NEC, en su sección Seguridad Estructural de las edificaciones, Mampostería estructural - SE-MP, numeral 3.2.3 y 3.3.5 establece que el agua que se utiliza para la construcción de ser libre de elementos perjudiciales como aceites, ácidos, alcoholes, sales, materia orgánica u otros elementos que perjudiquen la estructura. En base a esta norma la empresa Holcim – Ecuador tiene como política de su empresa elaborar sus hormigones utilizando agua potable, por ende, para esta investigación se utilizó agua potable.

### Aditivos

La norma C 494 (ASTM, 2013) clasifica los aditivos según la función que este realiza. En la Tabla 4 se describen las propiedades de los aditivos propuestos según dicha norma. Siendo la tabla mostrada a continuación un fragmento de la tabla original situada en la norma C 494 (ASTM, 2013).

**Tabla 2.4** Aditivos escogidos para la elaboración de los diseños de hormigón, (2001R y 5012, elaborados por Sika-Ecuador)

<b>NORMA C 494</b>		
<b>CARACTERÍSTICAS</b>	Tipo F	Tipo G
<b>Nombre Genérico</b>	Reductor de agua de alto rango	Reductor de agua de alto rango y Retardante
<b>Reducción mínima de agua en base a una mezcla sin aditivo</b>	12%	12%
<b>Tiempo de fraguado Inicial</b>	Entre 1:00h - +1:30h	Entre +1:00h - +3:30h.

		Entre	
<b>Final</b>		1:00h a +1:30h	+3:00h máx.
<b>Aumento</b>	<b>1 día</b>	140%	125%
<b>mínimo de resistencia</b>	<b>3 días</b>	125%	125%
	<b>7 días</b>	115%	115%
<b>a</b>			
<b>compresión</b>	<b>28</b>		
<b>en testigo</b>	<b>días</b>	110%	110%

### 3 Relaciones agua- cemento de mezclas de hormigón

Relación agua cemento (A/C= 0.35)

Tabla 2.5 Diseño de mezcla con relación A/C =035

Materiales							
	Tipo	Pesos S.S.S (kg* m <sup>3</sup> )	Absorción %	Humedad %	Pesos secos (kg* m <sup>3</sup> )	Pesos reales (kg* m <sup>3</sup> )	Kg * Batch (30 lt)
<b>Cemento</b>	Cemento HE	520.00	---	---	520.00	520.00	16.38
<b>Piedra caliza</b>	No. 67 Tritu	950.00	1.2	1.0	938.86	948.12	35.84
<b>Arena 1</b>	Arena triturada	278.00	2.6	7.1	270.96	290.19	16.13
<b>Arena 2</b>	Arena Rio	425.00	2.7	6.5	413.83	440.73	24.48

<b>Agua</b>	Agua	175.00	---	---	204.48	148.96	5.74
Total		2348					
Retardante	2001 R	3.64					0.115
Plastificante	5012	6.76					0.197
Relación A/C				0.35(±2)			

S.S.S.: Saturado Superficialmente Seco

**Relación agua cemento (A/C= 0.40)**

**Tabla 2.6** *Diseño de mezcla con relación A/C =040*

<b>Materiales</b>							
	<b>Tipo</b>	<b>Pesos S.S.S (kg* m<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorción %</b>	<b>Humedad %</b>	<b>Pesos secos (kg* m<sup>3</sup>)</b>	<b>Pesos reales (kg* m<sup>3</sup>)</b>	<b>Kg * Batch (30 lt)</b>
<b>Cemento</b>	Cemento HE	460.00	---	---	460.00	460.00	13.80
<b>Piedra caliza</b>	No. 67 Tritu	900.00	1.2	1.0	889.33	898.22	26.95
<b>Arena 1</b>	Arena triturada	319.00	2.6	7.1	310.92	332.99	9.99
<b>Arena 2</b>	Arena Rio	487.00	2.7	6.5	474.20	505.02	15.15
<b>Agua</b>	Agua	177.00	---	---	208.56	146.77	4.40
Total		2343					
Retardante	2001 R	3.22					0.097
Plastificante	5012	5.52					0.166

---

Relación A/C

0.40( $\pm$ 2)

---

S.S.S.: Saturado Superficialmente Seco

**Relación agua cemento (A/C= 0.45)**

**Tabla 2.7** *Diseño de mezcla con relación A/C =045*

---

**Materiales**

---

	Tipo	Pesos S.S.S (kg* m <sup>3</sup> )	Absorción %	Humedad %	Pesos secos (kg* m <sup>3</sup> )	Pesos reales (kg* m <sup>3</sup> )	Kg * Batch (42 lt)
<b>Cemento</b>	Cemento HE	390.00	---	---	390.00	390.00	16.38
<b>Piedra caliza</b>	No. 67 Tritu	855.00	1.2	1.0	844.86	853.31	35.84
<b>Arena 1</b>	Arena triturada	368.00	2.6	7.1	358.67	384.14	16.13
<b>Arena 2</b>	Arena Rio	562.00	2.7	6.5	547.22	582.79	24.48
<b>Agua</b>	Agua	172.00	---	---	206.24	136.75	5.74
	Total	2347					
Retardante	2001 R	2.73					0.115
Plastificante	5012	4.68					0.197

---

Relación A/C

0.45( $\pm$ 1)

---

S.S.S.: Saturado Superficialmente Seco

## 4 Propiedades de la mezcla de hormigón

### 4.1 Densidad

Densidad es la relación existente entre la masa y el volumen de un material. El hormigón es un material compuesto (cemento, agregados y agua) que presenta un estado viscoso al momento de ser creado y un estado sólido luego del proceso de fraguado. Esto provoca que este material posea una leve variación de densidad al pasar de un estado al otro, aproximadamente la variación es entre el 1-3%. La fórmula que convencionalmente se usa para determinar la densidad de un material es:

$$\rho = \frac{\text{Masa (unidades de masa: kg, gr, otros)}}{\text{Volumen (unidades de volumen: m}^3\text{, otros)}}$$

Sin embargo, la ASTM ha elaborado varios métodos experimentales para poder determinar esta relación. En esta investigación se utiliza la C 138 (ASTM, 2013): método de ensayo normalizado de densidad y rendimiento del hormigón.

La densidad del hormigón va a depender de la calidad de los compuestos que se usaron para elaborarlo y la función que este vaya a cumplir. En la Figura 2 situada en la página 4 del capítulo 1 “PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA: ANTECEDENTES” se estableció que para esta investigación se trabajara con un hormigón que posee un rango de densidad entre 2000 y 2800 kg/m<sup>3</sup>, lo cual indica según la clasificación que es una densidad normal.

Para determinar la densidad de la mezcla se utilizan los siguientes equipos:

- a. Recipiente de ensayo a medida
- b. Balanza (modelo: ARES marca: CAS)
- c. Cucharón para llenado de mezcla
- d. Varilla de acero con punta redondeada
- e. Martillo de goma de 600 gr.
- f. Placa de enrase

Ver figuras de la Sección “Característica de equipos requeridos en el laboratorio”

## 4.2 Porosidad

El hormigón al momento de fraguar pierde agua y aire estos elementos al salir dejan millones de orificios denominados poros y micro grietas. Se define como porosidad a la relación entre el volumen de poros sobre el volumen total del material. Por consiguiente, la cantidad de poros en el hormigón está relacionada con la densidad del mismo. Teóricamente se puede expresar la porosidad con la siguiente formula:

$$\phi = \frac{1}{\rho}$$

Existen muchos métodos para determinar la porosidad de un material. El más común es pesar el material en estado seco y luego saturarlo de un fluido para volverlo a pesar, la diferencia de peso determina la cantidad de fluido que entro y por ende se obtiene la cantidad de vacío que existe en el material.

La norma C 642-97 (ASTM, 2013) establece el método experimental para hallar la porosidad del concreto. En esta investigación se utiliza la C 231 (ASTM, 2013) método de ensayo normalizado de contenido de aire del hormigón recién mezclado obtenido mediante el método por presión.

La porosidad del hormigón es un factor que repercute en la permeabilidad, la resistencia y la durabilidad de este material. Las interconexiones de poros existentes en un material crean caminos que permiten que un fluido o un gas puedan circular a través del mismo. Si aplicamos ese concepto al hormigón se puede notar que es un factor determinante en cuanto la permeabilidad y durabilidad de este material debido a que mientras más porosidad eficaz tenga el hormigón, más agentes destructivos como el cloruro de sodio podrán penetrar en él a través de un flujo laminar.

Para determinar la porosidad de la mezcla se utilizan los siguientes equipos:

- a. Recipiente de ensayo a medida
- b. Balanza (modelo: ARES marca: CAS))
- c. Cucharón para llenado de mezcla
- d. Varilla de acero con punta redondeada

- e. Martillo de goma de 600 gr.
- f. Medidor de aire tipo B
- g. Jeringa de 50 ml
- h. Placa de enlace

Ver figuras de la Sección “Característica de equipos requeridos en el laboratorio”

### **4.3 Permeabilidad**

La permeabilidad se entiende como la propiedad que posee un material de permitir la filtración de un fluido a través de los poros interconectados presentes en el material. En 1856 Henry Darcy publica un tratado en el cual aparece la ecuación que lleva su nombre, esta relaciona la permeabilidad del suelo con el volumen de agua que atraviesa una sección del suelo. Sin embargo, para esta investigación el material que se estudia es el hormigón, por lo tanto, el método para determinar la permeabilidad en este caso es el ensayo de torrente el cual será descrito en el capítulo 3.

Debido a que el equipo disponible para el ensayo de permeabilidad es el permeabilímetro de Torrent se utiliza la norma suiza SIA 262 – 2003, para el método de ensayo normalizado no destructivo en sitio para determinar la permeabilidad en el aire.

Para determinar la permeabilidad de la mezcla se utilizan los siguientes equipos:

- a. Muestra cilíndrica de hormigón fraguado.
- b. Permeabilímetro de Torrent

Ver figuras de la Sección “Característica de equipos requeridos en el laboratorio”

### **4.4 Difusión de cloruros**

Es el proceso mediante el cual los átomos y moléculas ingresan desde un medio de alta concentración a un medio de baja concentración, esto ocurre hasta que la distribución sea pareja en ambos medios. El flujo del fluido contentivo de cloruros es

de tipo laminar, es decir, aquel que se mueve de forma ordenada, estratificada, y suave a través del medio en el que fluye, siguiendo una trayectoria suave llamada línea de corriente.

Los cloruros resultan de la combinación de ion negativo del gas cloro,  $\text{Cl}^-$ , con el ion positivo de un metal. Para determinar de manera científica los iones de cloruro se utilizan el método de Mohr y el método de Volhard. Para esta investigación se empleará el cloruro de sodio y como este por medio de la difusión ingresa en el hormigón.

Se realiza el ensayo según la norma C 1202 (ASTM, 2013), para el método de ensayo normalizado para determinar la capacidad resistiva del hormigón a la penetración del ion cloruro.

Para determinar la difusión de cloruros en la mezcla se utiliza el equipo Perma2 de Gigatec, y para la acondicionar al vacío la muestra se utiliza:

- a. Olla de vacío (Giatec)
- b. Bomba de succión (JB, PlatimiumDV200N)

Ver figuras de la Sección “Característica de equipos requeridos en el laboratorio”

#### **4.5 Resistencia a la compresión**

Es la capacidad que posee el hormigón para soportar una carga vertical por unidad de área la cual se expresa en términos de esfuerzos los cuales poseen como unidades ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ , MPa, psi, entre otras). Para determinar la resistencia a la compresión en el hormigón la norma C 39 (ASTM, 2013) establece el procedimiento experimental al cual se debe someter la probeta cilíndrica de hormigón. El hormigón es un material muy utilizado en la construcción debido a que posee una alta capacidad para resistir los esfuerzos de compresión, esfuerzos que son asignados a los elementos estructurales de una edificación.

Se realiza el ensayo según la norma C 39 (ASTM, 2013), para el método de ensayo normalizado para resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón.

Para determinar la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de hormigón se utilizan los siguientes equipos:

- a. Prensa hidráulica
- b. Anillos retenedores

Ver figuras de la Sección “Característica de equipos requeridos en el laboratorio”

#### **4.6 Fluidez y trabajabilidad**

Estas son propiedades que posee el hormigón en estado fresco y gracias a estas el hormigón obtiene la capacidad de adoptar cualquier configuración. Para medir estas propiedades en esta investigación se utiliza la C 143 (ASTM, 2013), para el método de ensayo estándar para revenimiento del hormigón con cemento hidráulico.

Para determinar la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de hormigón se utilizan los siguientes equipos:

- a. Cono de Abrams
- b. Varilla de acero con punta redondeada
- c. Mazo de goma
- d. Cucharón

Ver figuras de la Sección “Característica de equipos requeridos en el laboratorio”

### **5 Característica de equipos requeridos en el laboratorio:**

#### **5.1 Equipo asociado a la preparación de mezclas**

<b>Nombre:</b>	Concreteira o	
<b>Marca</b>	mezclador	
<b>Modelo</b>		
<b>Capacidad</b>	Prodecon	
<b>Otros</b>	PM5	
	45. 35, 30 lt	
	-	

**Figura 2.4** Concreteira industrial con tambor de 30 lt

Este equipo brinda la facilidad de generar volúmenes de mezcla más homogéneos y a la vez se disminuye el tiempo de mesclado y se aumenta la calidad del producto.

## 5.2 Equipo asociado a los ensayos de la mezcla fresca

<b>Nombre:</b>	Cono de Abrams	
<b>Marca</b>		
<b>Modelo</b>	Cotest	
<b>Capacidad</b>		
<b>Otros</b>	Acero inoxidable	
	16 lt	
	-	

**Figura 2.5** Cono de Abrams

---

Es un cono de metálico el cual mide 10cm la cara superior 20cm en la cara inferior y 30cm de altura, se utiliza para medir la fluidez o plasticidad del hormigón cuando se encuentra en estado fresco.

---

**Nombre:** Varilla de acero con punta redondeada  
**Marca** Cotest  
**Modelo** Cotest  
**Capacidad**  
**Otros** Acero inoxidable



**Figura 2.6** Varilla de acero punta redondeada

---

Esta varilla debe poseer una longitud de 600mm y un diámetro de 16mm ( $\pm 2$ mm). Se utiliza para ejecutar el proceso de varillado.

---

**Nombre:** Medidor de aire tipo B  
**Marca**  
**Modelo** Humboldt  
**Capacidad**  
**Otros** Manometro analogico



**Figura 2.7** Medidor tipo B

---

El medidor de aire también conocido como olla de Washington es un recipiente que posee una tapa la cual consta de válvulas de cebado, una válvula principal de

---

---

la cámara de aire, un inyector y purga de aire, y el manómetro en el cual se toman las medidas de presión.

---

**Nombre:** Mazo de goma

**Marca**

**Modelo** Impoexito

**Capacidad**

**Otros** 600gr



**Figura 2.8** *Mazo de goma de 600gr*

---

Este debe ser de acuerdo al volumen del recipiente, para volúmenes mayores a 14 litros tendremos pesos de 1000g ( $\pm 200$ g) y para volúmenes menores o iguales a 14 litros tendremos pesos de 600g ( $\pm 200$ g).

---

**Nombre:** Placa de enlace

**Marca**

**Modelo** ELE

**Capacidad**

**Otros** -



**Figura 2.9** *Placa de enlace metálica*

---

Esta consta de un espesor de 6mm debido a que es metálica y de esta forma lo estipula la norma C 138 (ASTM, 2013). Las dimensiones son 50mm mayor al diámetro del recipiente de ensayo.

---

---

**Nombre:** Jeringa

**Marca**

**Modelo** Artazana

**Capacidad**

Jeringuilla de apretón de  
bulbo

50 ml



**Figura 2.10** *Jeringa de goma de 50 ml*

---

Para esta investigación se utilizó la pipeta o jeringa de goma mostrada en la Figura 2.10 la cual posee una capacidad de almacenamiento de 50ml. Esta jeringa sirve para extraer líquidos o aire.

---

---

**Nombre:** Cucharón

**Marca**

**Modelo** Coteste

**Capacidad**

**Otros** -

0,5 lt



**Figura 2.11** *Cucharón metálico*

---

En esta investigación se utilizó un cucharón de material metálico el cual posee un volumen de 0.50 lt.

---

---

<b>Nombre:</b>	Recipiente de ensayo	
<b>Marca</b>	a medida	
<b>Modelo</b>	ELE	
<b>Capacidad</b>		
<b>Otros</b>	-	

9,4 lt

**Figura 2.12** Recipiente metálico con peso y volumen determinado

---

Para esta investigación se utilizó un recipiente metálico el cual presentaba un diámetro de 20cm y una altura de 30cm.

---

<b>Nombre:</b>	Balanza	
<b>Marca</b>		
<b>Modelo</b>	CAS y	
<b>Capacidad</b>	Sartorius	
<b>Otros</b>	ARES y Entris	

300kg y 9kg

**Figura 2.13** Balanzas utilizadas para pesar los materiales

---

Esta debe tener una precisión del 0,3%, debe estar correctamente calibrada y de preferencia que sea electrónica. Para esta investigación se utilizaron las 2 balanzas que se muestran a continuación en la Figura 2.13

---

## Equipo asociado a los ensayos de la mezcla endurecida

**Nombre:** Prensa hidráulica

**Marca** ELE

**Modelo** ADR2000

**Capacidad** 1 cilindro

**Otros**



**Figura 2.14** Prensa hidráulica

Esta debe estar perfectamente calibrada, en esta investigación se utilizó una prensa hidráulica electrónica la cual posee la función de determinar no solo la carga máxima que soporta el cilindro si no también puede regular la velocidad y la dirección en la cual se imparte la carga.

## 5.3 Equipo asociado a los ensayos de la mezcla endurecida

**Nombre:** Anillos retenedores de

**Marca** 4 pulgadas

**Modelo** ELE internacional

**Capacidad** LGA-0144-70

**Otros** Dureza 60, 70



**Figura 2.15** Anillos retenedores de hierro  
con neoprenos

Según la norma C 1231 (ASTM, 2013) se deben utilizar los anillos retenedores

---

siempre y cuando el cilindro no cumpla con una superficie lisa o no posea un capping. Estos anillos deben poseer en su interior almohadillas de neopreno que permitan la distribución uniforme de la carga en la superficie irregular del cilindro.

---

**Nombre:** Bomba de succión  
**Marca** JB  
**Modelo** Platinum DV200N  
**Capacidad** 7CFM(200 lt/m)  
**Motor** ½ HP, 1725RPM  
**Voltaje** 115v, 60Hz  
**Entrada** ½" x ¼" x 3/8"  
**C. de aceite** 21oz



**Figura 2.16** Bomba de succión

**Nombre:** Permeabilímetro de  
**Marca** Torrent  
**Modelo** Proceq  
**Capacidad** Torrent  
**Otros** 10kt  
-

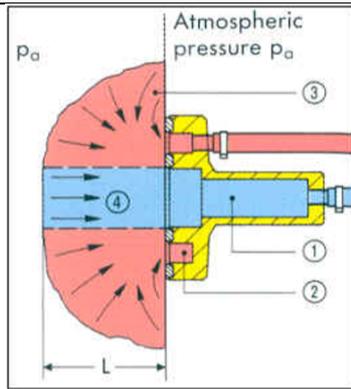


**Figura 2.17** Equipo de Torrent y bomba al vacío calibrados

---

El equipo trabaja en conjunto con una bomba al vacío. Esto se debe a que el sistema de medición Torrent es una celda al vacío de dos cámaras y un registrador de presión que aseguran el flujo de aire hacia la cámara interior situada verticalmente a la superficie. En la Figura 2.17 se muestra la cámara al vacío y como esta circulan los flujos de aire dentro de la misma.

---



### Flujo del aire entre las dos cámaras de la bomba de vacío

- ① Presión cámara interior  $p_i$
- ② Presión cámara exterior  $p_o$
- ③ Flujo hacia la cámara exterior
- ④ Flujo hacia la cámara interior
- L Profundidad de penetración del vacío

**Figura 2.18** Flujo del aire entre las cámaras al vacío (Torrent, Permeability tester Torrent, 2010).

Este dispositivo sobresale debido a que posee una manipulación sencilla y no requiere de ajustes complicados de áreas específicas. La medición toma alrededor de 12 min. y nos proporciona resultados inmediatos.

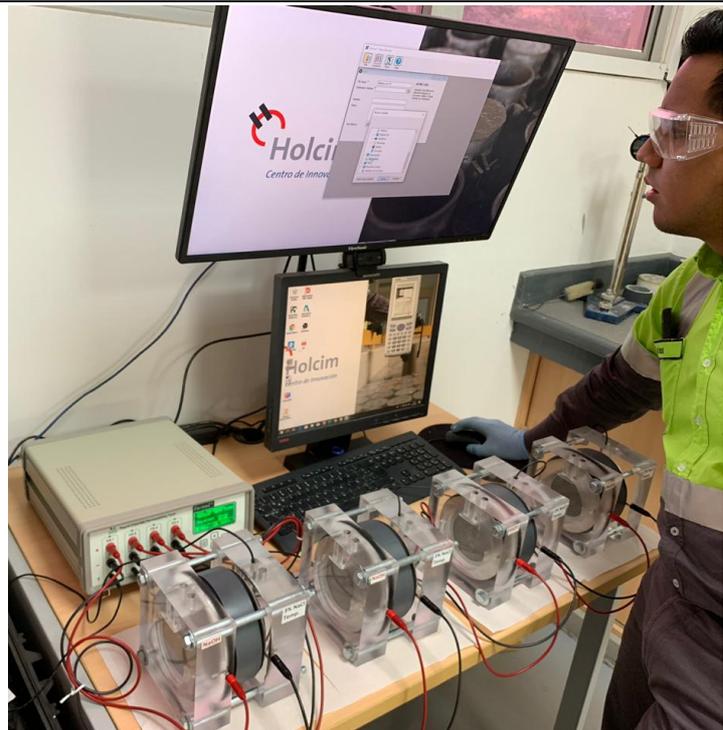
**Nombre:** Perma2™

**Marca** Gigatec Scientific

**Modelo** Perma2™

**Capacidad** 4 Probetas

**Otros** -



**Figura 2.19** Equipo Perma2™ en uso con 4 probetas

---

Gigatec Perma2™ es un dispositivo de prueba de laboratorio rediseñado para medir la resistencia del hormigón a la penetración del ion cloruro. El dispositivo es capaz de medir la carga eléctrica que pasa a través de una muestra de concreto estándar. El dispositivo Perma2™ puede ser operado como una unidad independiente o controlado usando el software para PC Data Monitor.

Las mediciones se pueden utilizar en el control de calidad basado en el rendimiento de materiales de hormigón. Las mediciones también se pueden usar para estimar el coeficiente de difusión de cloro del hormigón con el fin de predecir la vida útil. Perma2™ es un dispositivo de laboratorio para probar la durabilidad del concreto que está o ha estado expuesto a un ambiente contaminado con cloruro, que incluye:

- La capacidad del concreto para resistir la penetración de iones de cloruro (C1202 (ASTM, 2013), AASHTO T277)
- Conductividad eléctrica a granel del concreto (C1760 (ASTM, 2013))
- Control de calidad del concreto basado en el desempeño.
- Estimación del coeficiente de difusión de cloro del concreto.
- Estimación del coeficiente de migración de cloruro del concreto.
- Diseño de la vida útil de las estructuras de concreto.
- Estimación de la vida útil restante de las estructuras de concreto.

---

**Nombre:** Olla de vacío

**Marca** Gigatec Scientific

**Modelo** -

**Capacidad** 4 Probetas

**Otros** -



**Figura 2.20** Olla de vacío

## **CAPÍTULO III**

### **PROTOCOLOS PARA REALIZAR LOS ENSAYOS DE LABORATORIO EN MUESTRAS DE HORMIGÓN**

#### **1 Introducción**

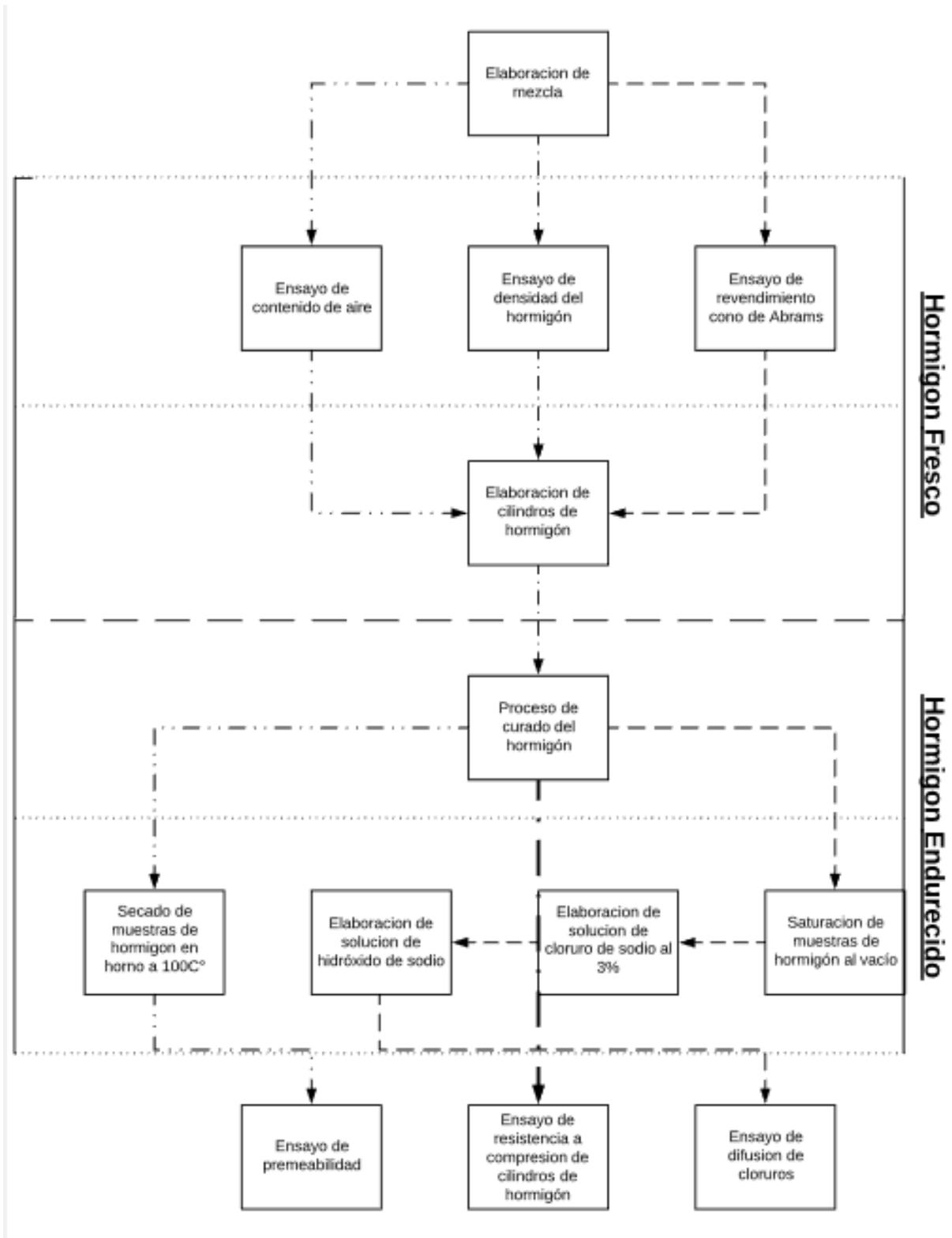
El contenido del presente capítulo corresponde con la descripción de una serie de instrucciones que fueron realizadas durante el desarrollo de los ensayos de laboratorio en esta investigación. Se entiende por tanto al proceso estándar de operaciones seguidas en la realización del ensayo como el protocolo de laboratorio. El protocolo indicara el momento en que deben ser registradas las mediciones garantizando que dicho registro sea preciso, y se hará uso de tablas, imágenes, videos o cualquier material de apoyo que garantice una adecuada documentación e interpretación del proceso, así como el registro de errores extrínsecos e inherentes del proceso.

En los protocolos presentados se describe en forma secuencial y ordenada la metodología que explica la generalidad del ensayo, los fundamentos del método y los tratamientos y reacciones a los que se someterán las muestras. Los protocolos deben indicar las precauciones y protecciones requeridas para la manipulación de materiales y equipos, como forma para prevenir accidentes. Iniciarán con una lista detallada de materiales y equipos que se emplearan. En caso de ser necesario se indicarán los cálculos que se realicen durante el ensayo, tiempo empleado, y factores que ocurran e incidan en los resultados.

Se espera que este capítulo sirva de guía quienes requieran realizar estudios similares (estudiantes o profesionales), ya que se identifican los equipos y herramientas requeridos, las instrucciones de uso, las normativas asociadas legales, de higiene y de seguridad, entre otros aspectos que certifican su validez.

En la Figura 3.1 se presenta un esquema secuencial de los diferentes protocolos desarrollados en esta investigación, como se puede observar existen dos etapas una para la preparación de muestras y otra para desarrollar los diferentes tipos de estudios en dichas muestras.

En la primera etapa se divide en dos tipologías de mezcla, es decir, mezclas en estado fresco y mezclas en estado solidificado o fraguado. Cada tipología de muestra requiere diferentes procesos de preservación y almacenamiento, adicionalmente presentan configuraciones geométricas distintas (mezcla fluida y configuración de cilindros sólidos ( $\Phi=10\text{cm}$ ,  $L=20\text{cm}$ ) respectivamente). La segunda etapa corresponde a 4 tipologías de ensayos en mezclas sólidas.



**Figura 3.1:** Diagrama de flujo representativo de 2 bloques de ensayo (mezclas de hormigón frescas y endurecidas) identificando los ensayos específicos (flechas de diferentes trazos).

## 2 PROTOCOLO 1: Elaboración de la mezcla

1. Cuantificar los volúmenes de materiales según lo establecido en las Tablas 2.5, 2.6, 2.7



2. Validar el funcionamiento del tambor de la concretara asignada según la disponibilidad de equipo en el laboratorio de Holcim (tambores de 30, 35, 42 lt)



3. Detener el tambor he ingresar en él el volumen total de piedra 67.

Encender el tambor y cronometrar su funcionamiento por 2 minutos y detenerlo nuevamente.



4. Ingresar al tambor el volumen total de arena zarandeada.

Encender el tambor y cronometrar su funcionamiento por 2 minutos y detenerlo nuevamente



5. Ingresar al tambor el volumen total de arena unificada.

Encender el tambor y cronometrar su funcionamiento por 2 minutos y detenerlo nuevamente.



6. Ingresar al tambor el volumen total de cemento.

Encender el tambor y cronometrar su funcionamiento por 2 minutos y detenerlo nuevamente.



7. Ingresar al tambor el volumen total de agua. Encender el tambor y cronometrar su funcionamiento por 2 minutos y detenerlo nuevamente

Una vez culminado el ingreso de los materiales constitutivos de la mezcla, la concretara mezclara durante 4 a 6 minutos deteniendo el tambor en ese instante.



**Tabla de registro de datos recolectados en el ensayo**

Relación A/C	Volumen de mezcla (lt.)
0.35	
0.40	
0.45	

**3 PROTOCOLO 2: Características de estado fresco**

**Ensayo 1: Revenimiento cono de Abram (Procedimiento)**

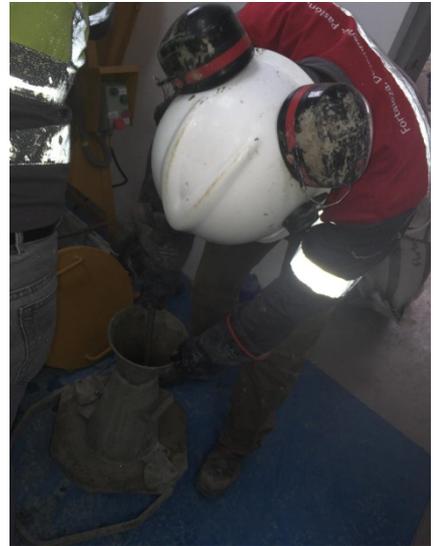
1. Humedecer con agua el equipo para evitar que el mismo reste humedad al hormigón. Para humedecer el cono se debe utilizar agua, no se debe utilizar ni aceites ni grasa.



2. Colocar el cono entre las piernas del operador y este a su vez debe pararse sobre las pisaderas evitando así el movimiento del cono mientras este se llena.



3. Llenar el cono en 3 capas de igual volumen, a cada capa se le deben impartir 25 golpes de varilla distribuidos de manera uniforme creando una espiral en forma de caracol.



4. Llenar la segunda capa repitiendo los mismos 25 golpes de varilla los cuales tienen que ingresar ligeramente hasta la primera capa.



5. Llenar el cono hasta desbordarlo y se le imparten los últimos 25 golpes de varilla de la misma manera que en las dos capas anteriores.



6. Enrasar el cono con la misma varilla que se impartió los golpes anterior mente y luego de esto se limpia el exceso de hormigón.



7. Una vez limpio se procede a levantar el cono en forma vertical, se deja que el hormigón se escurra.



8. Por último, se coloca el cono de forma invertida a lado del hormigón y se procede a medir el asentamiento, el cual es la diferencia de alturas entre el hormigón y el cono.



**Tabla de registro de datos recolectados en el ensayo**

Relación A/C	Fluidez (cm)
0.35	
0.40	
0.45	

**Ensayo 2: Densidad del hormigón (Procedimiento)**

1. Pesar el recipiente de ensayo debido a que se requiere el peso del recipiente para realizar el cálculo de la densidad del hormigón.



2. Previo a llenar el recipiente de ensayo con la mezcla de hormigón se deben humedecer todos los instrumentos que vayan a ser usados para realizar el ensayo, esto con el fin de no restarle humedad a la mezcla por el nivel de absorción que poseen los instrumentos.



3. La superficie en la que se vaya a realizar el ensayo debe de estar nivelado y no debe presentar ningún tipo de vibraciones para no alterar el ensayo.



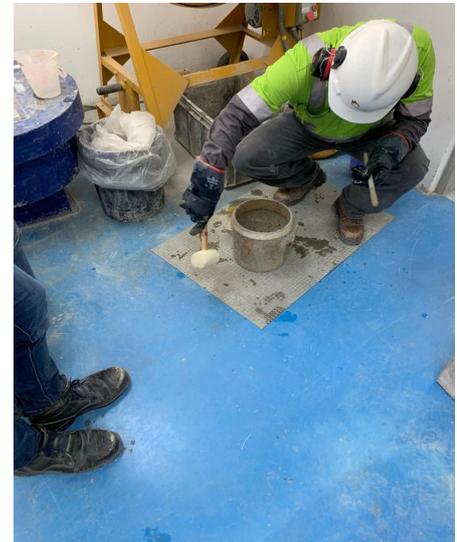
4. Luego de cumplir con los 3 pasos anteriores se procede con el llenado del primer tercio del recipiente.



5. Una vez que el primer tercio ha sido llenado, se utiliza la varilla y se imparten 25 varillazos creando una espiral en forma de caracol de fuera hacia dentro sin golpear bruscamente el fondo del recipiente.



6. Impartir 15 golpes en la parte exterior del recipiente de ensayo utilizando el mazo de goma, esto con el fin de cerrar los huecos dejados por el proceso de varillado descrito en el paso anterior.



7. Llenar el segundo tercio del recipiente y se repiten los procesos descritos en los pasos 5 y 6.

8. Llenar el último tercio del recipiente y luego se realiza nuevamente los procedimientos de los pasos 5 y 6.

9. Luego de proporcionar los 15 golpes con el mazo de goma se procede a utilizar la placa de enrase para darle un acabado liso a la superficie realizando movimientos de acerrado a donde se ubique el técnico



10. Limpiar completamente el exterior del recipiente de ensayo.



11. Pesar el recipiente de ensayo.



12. Restar el peso del recipiente de ensayo con hormigón del recipiente vacío para determinar el peso neto del hormigón.
13. Calcular la densidad dividiendo el peso del hormigón entre el volumen del mismo.

**Tabla de registro de datos recolectados en el ensayo**

Relación A/C	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
0.35	
0.40	
0.45	

**Ensayo 3: Contenido de aire (Procedimiento)**

1. Humedecer el interior del recipiente y las herramientas que se van a utilizar durante el ensayo.



2. La superficie en la que se vaya a realizar el ensayo debe de estar nivelado y no debe presentar ningún tipo de vibraciones para no alterar el ensayo.



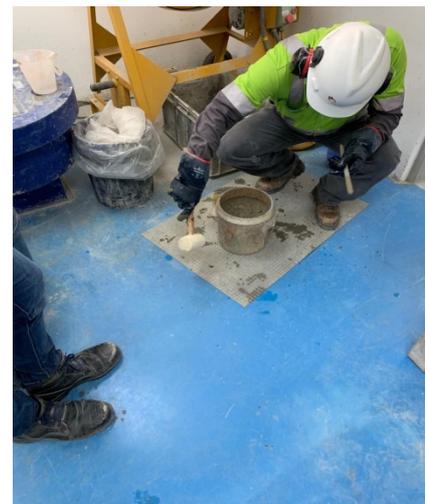
3. Luego de cumplir con los 2 pasos anteriores se procede con el llenado del primer tercio del recipiente.



4. Una vez que el primer tercio ha sido llenado, se utiliza la varilla y se imparten 25 varillazos creando una espiral en forma de caracol de fuera hacia dentro sin golpear bruscamente el fondo del recipiente.



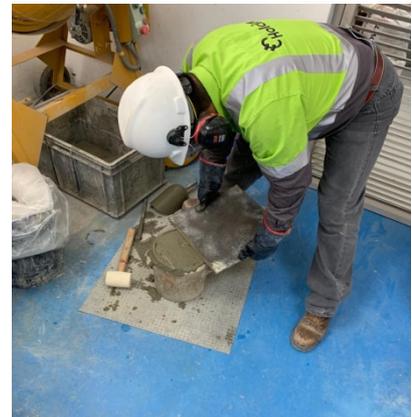
5. Impartir 15 golpes en la parte exterior del recipiente de ensayo utilizando el mazo de goma, esto con el fin de cerrar los huecos dejados por el proceso de varillado descrito en el paso anterior



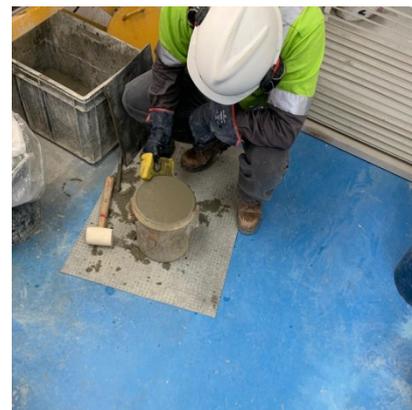
6. Llenar el segundo tercio del recipiente y se repiten los procesos descritos en los pasos 4 y 5.

7. Llenar el último tercio del recipiente y luego se realiza nuevamente los procedimientos de los pasos 4 y 5.

8. Luego de proporcionar los 15 golpes con el mazo de goma se procede a utilizar la placa de enrase para darle un acabado liso a la superficie realizando movimientos de acercado a donde se ubique el técnico.



9. Limpiar completamente el exterior del recipiente de ensayo



10. Antes de colocar la tapa es necesario humedecerlas al igual que el caucho que rodea a la misma con el fin de crear un sello hermético.



11. Colocar la tapa de manera centrada evitando que esta se manche con pasta de hormigón y cerrar en cruz las grapas sujetadoras.



12. Cerrar la válvula de purga de aire.



13. Ingresar agua por una de las válvulas de purga de agua con la finalidad de llenar la cavidad que queda sobre el hormigón y bajo la tapa.



14. Verificar que esta cavidad este llena mediante la salida de agua de la otra válvula de purga de agua.



15. Bombear aire dentro de la cámara por medio de la tapa con el fin de encerrar el manómetro que se encuentra en la misma.



16. Cerrar las llaves de purga de agua originando el sello hermético total.

17. Inyectar aire mediante la válvula principal seguido de un golpe seco impartido con el mazo de goma.



18. Observar la lectura del contenido de aire.



**Tabla de registro de datos recolectados en el ensayo**

Relación A/C	Contenido de aire (%)
0.35	
0.40	
0.45	

#### **4 PROTOCOLO 3: Características en estado endurecido**

### **Ensayo 1: Rotura a compresión**

1. Retirar los cilindros hermanos de la piscina de curado utilizando el equipo de seguridad que indica la normativa interna de la empresa Holcim-Ecuador



2. Trasladar los cilindros hermanos al laboratorio en el cual se encuentra la prensa hidráulica.



3. Encender la prensa y verificar su funcionamiento.

4. Revisar que las almohadillas de neopreno estén en buen estado y sea la medida de dureza adecuada para el ensayo (en este caso se utilizó dureza 60 para los cilindros de 3 días y dureza 70 para el resto de cilindros)



5. Colocar los anillos retenedores en el cilindro de hormigón que va a ser sometido al ensayo.



6. Colocar el cilindro dentro de la prensa.



7. Verificar que el cilindro se encuentre centrado y en correcta posición según lo indican las marcas situadas en la base de la prensa



8. Lentamente empezar a desplazar el brazo de la prensa hasta que este esté en contacto con el cilindro.



9. Aplicar la carga a velocidad continua y sin impacto

10. Una vez que el cilindro falle registrar la carga máxima que este soporto, en este caso la prensa nos arroja directamente la carga máxima que el cilindro soporto.



### Normativas de seguridad para realizar el ensayo

1. Utilizar pantalón y camisa manga larga
2. Utilizar chaleco reflectante o camisa con material reflectante

3. Utilizar de calzado con punta de acero y suela antideslizante
4. Utilizar guantes largos de goma
5. Utilizar gafas protectoras
6. Utilizar casco con orejas o en su defecto casco y tapones de oídos.
7. Utilizar mascarilla
8. Utilizar pinza sujeta cilindros



### **Ensayo 2: Torrent Permeability Test**

1. Antes de realizar el ensayo se debe verificar que la probeta cilíndrica de hormigón se encuentre totalmente seca, por este motivo se colocó la probeta en un horno a 100C° durante 24h.



2. Verificar la batería de la computadora del equipo Torrent de Proceq



3. Ensamblar la computadora al tablero de válvulas y el tablero de válvulas a la bomba de succión.



4. Enchufar y encender la bomba luego lentamente subir la potencia hasta los -30bares.



5. Encender la computadora del equipo Torrent de Proceq y entrar a la opción de calibrar el equipo.



6. Alinear la superficie metálica lisa debajo de la boquilla de succión del equipo.



7. Iniciar el proceso de calibrado, esto con el fin de adaptar el quipo al entorno en el cual se va a realizar el ensayo.

8. Luego de calibrar el quipo iniciar el ensayo para determinar la permeabilidad de la probeta.

9. Colocar la boquilla sobre la cara superior de la probeta cilíndrica de hormigón.

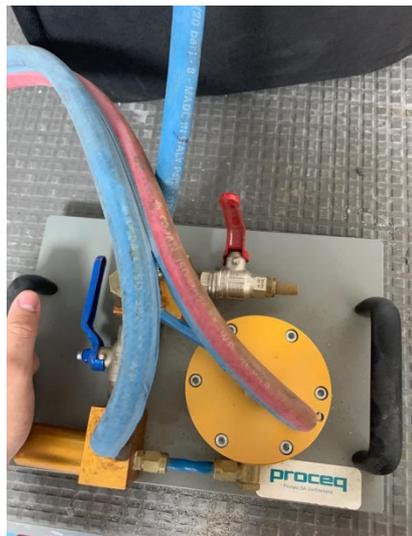


10. Pulsar el botón "start"



11. Abrir la válvula de color rojo situada en el tablero de válvulas.

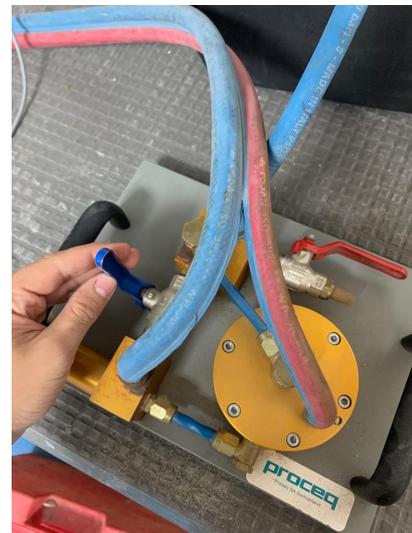
12. Esperar a la adquisición de datos



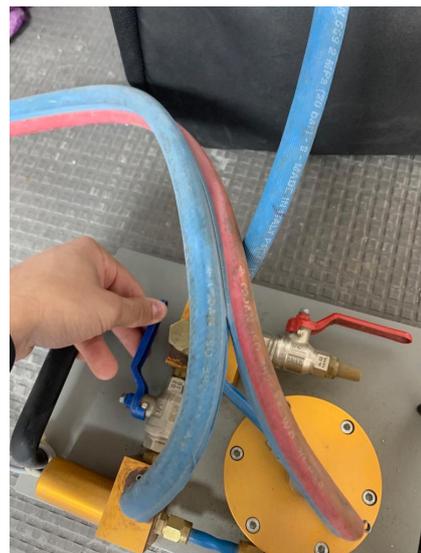
13. Cerrar la válvula de color rojo situada en el tablero de válvulas.
14. Esperar a la adquisición de datos



15. Abrir la válvula de color azul situada en el tablero de válvulas.
16. Esperar a la adquisición de datos

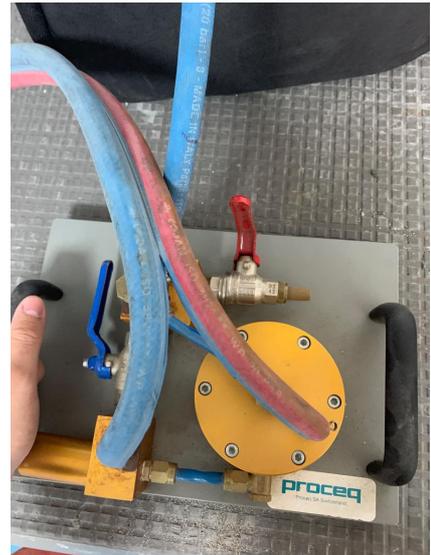


17. Cerrar la válvula de color azul situada en el tablero de válvulas
18. Esperar a la adquisición de datos.



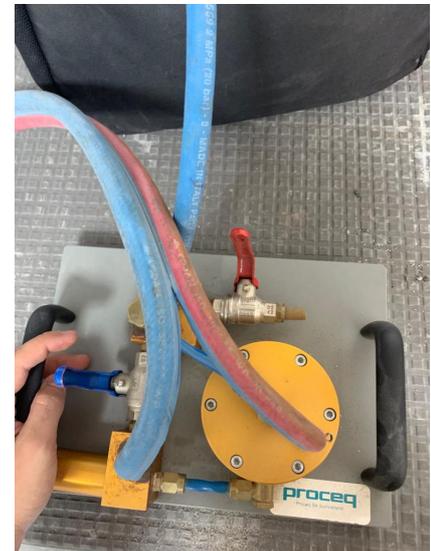
19. Abrir la válvula de color rojo situada en el tablero de válvulas.

20. Esperar a la adquisición de datos.



21. Abrir la válvula de color azul situada en el tablero de válvulas.

22. Esperar a la adquisición de datos



23. Cerrar la válvula de color azul situada en el tablero de válvulas.

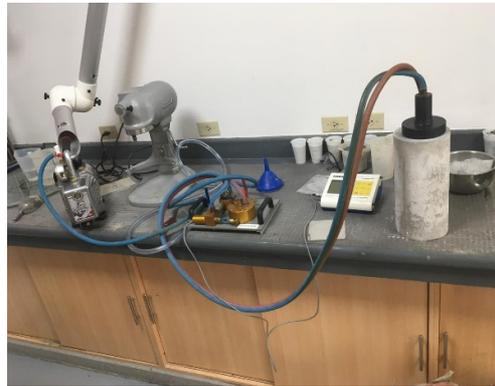
24. Esperar a la adquisición de datos.



25. Cerrar la válvula de color rojo situada en el tablero de válvulas.



26. Esperar a la adquisición de datos.



27. Luego que termina la última adquisición de datos el ensayo finaliza y nos arroja el resultado de la permeabilidad de la muestra tal como se muestra en la figura



**Ensayo 3: Rapid Chloride Test**

1. Previo a la realización del ensayo RCT las probetas de hormigón debieron pasar por el proceso de saturación en agua el cual fue explicado en la sección “procesos de adecuación de muestra”, además se debe elaborar las soluciones de hidróxido de sodio y cloruro de sodio el cual esta explicado en la sección antes mencionada.

2. Verificar que todos los equipos se encuentren limpios y en funcionamiento

3. Recubrir con vaselina las juntas en las que se encontraran los cauchos que aíslan la probeta de la celda acrílica.

4. Insertar la probeta preparada de hormigón dentro del anillo de plástico de cubierta



5. Recubrir usando las arandelas de goma los extremos sobresalientes de la probeta de hormigón.



6. Repetir los pasos 3, 4 y 5 para cada probeta y celda que se vaya a utilizar.

7. Insertar las pastillas recubiertas dentro de las celdas acrílicas.



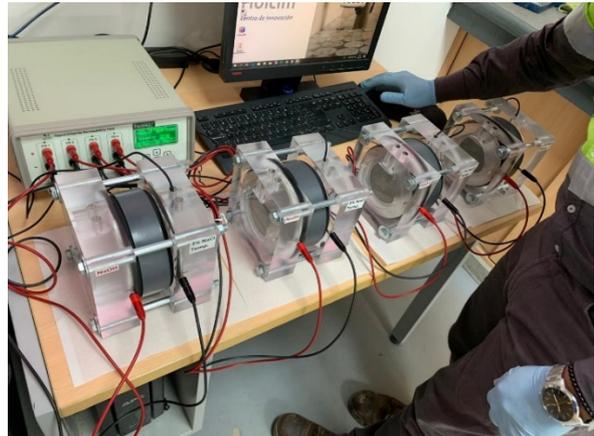
8. Ensamblar las celdas acrílicas con la probeta de hormigón en su interior.



9. Insertar las soluciones en las celdas, hidróxido de sodio del lado izquierdo (rojo) y cloruro de sodio del lado derecho (negro).



10. Colocar las celdas acrílicas en el lugar donde se correrá el ensayo y sobre un papel absorbente por motivos de seguridad.

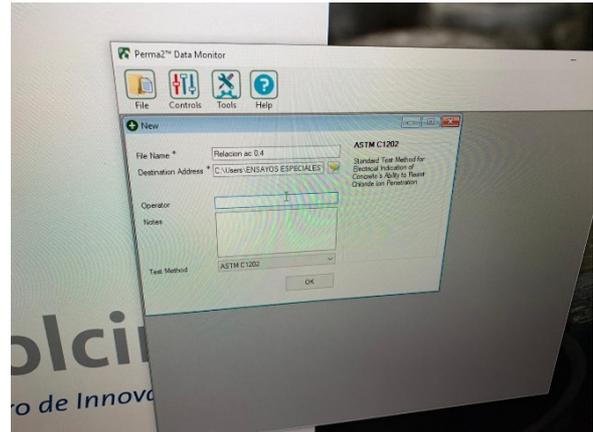


11. Conectar todo el cableado al Perma2™

12. Conectar todo el cableado a las celdas acrílicas y colocar el termómetro dentro de la solución de cloruro de sodio



13. Enchufar y encender el Perma2™
14. Encender y abrir el programa del equipo en una computadora.
15. Ingresar los datos del ensayo en el programa.



16. Correr el ensayo.



## 5 PROTOCOLO 4: Preparación de muestras

### Etapa 1: Proceso de vaciado de mezcla fresca dentro de los moldes cilíndricos

1. Humedecer las herramientas que se van a utilizar durante el ensayo y cubrir de aceite o desmoldaste el interior del recipiente cilíndrico en el cual se vaya a verter la mezcla.



2. La superficie en la que se vaya a realizar el ensayo debe de estar nivelado y no debe presentar ningún tipo de vibraciones para no alterar la el ensayo.

3. Luego de cumplir con los 2 pasos anteriores se procede con el llenado del primer tercio del recipiente.



4. Una vez que el primer tercio ha sido llenado, se utiliza la varilla y se imparten 25 varillazos creando una espiral en forma de caracol de fuera hacia dentro sin golpear bruscamente el fondo del recipiente.



5. Impartir 15 golpes en la parte exterior del recipiente de ensayo utilizando el mazo de goma, esto con el fin de cerrar los huecos dejados por el proceso de varillado descrito en el paso anterior.



6. Llenar el segundo tercio del recipiente y se repiten los procesos descritos en los pasos 4 y 5.

7. Llenar el último tercio del recipiente y luego se realiza nuevamente los procedimientos de los pasos 4 y 5.



8. Luego de proporcionar los 15 golpes con el mazo de goma se procede a utilizar la placa de enrase para darle un acabado liso a la superficie realizando movimientos de acerrado a donde se ubique el técnico.



9. Limpiar completamente el exterior del recipiente de ensayo.



- **Datos recolectados en el ensayo**

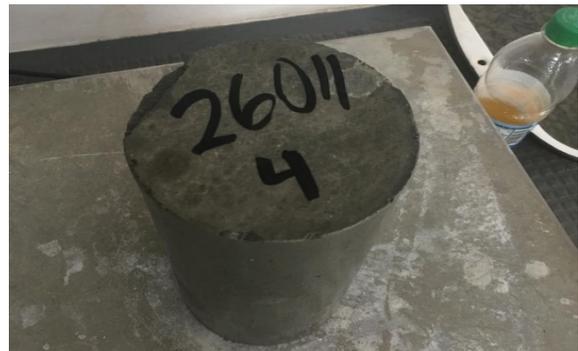
Relación A/C	Numero de cilindros
0.35	30
0.40	30
0.45	30

### **Etapa 2: Proceso de curado de cilindros de hormigón**

1. Una vez que los cilindros han reposado en sus respectivos moldes durante 24h luego de su elaboración se procede realizar el desmoldado de los mismos.



2. Luego de esto se les asigna un código el cual se registra en la base de datos del sistema de Holcim-Ecuador-Planta San Eduardo.



3. Cuidadosamente se procede a trasladarlos al cuarto de curados



4. Una vez dentro del cuarto se procede a utilizar los equipos necesarios para poder colocar los cilindros dentro de la piscina de curado la cual posee agua a temperatura de 23C°.



### **Etapa 3: Proceso de saturación de muestras al vacío**

1. Recubrir las probetas de hormigón con sikaflex en el contorno.



2. Lavar la olla de vacío.



3. Introducir las cuatro probetas en el interior de la olla.



4. Verificar que el anillo de goma se encuentre en la olla de vacío. Colocar vaselina en la junta de la olla de vacío y su tapa para conseguir un cierre hermético. Cerrar la olla de vacío con las probetas en el interior. Conectar la bomba de succión a la olla de vacío. Enchufar y encender la bomba. Subir lentamente la potencia de la olla hasta llegar a los 30 bares. Esperar 5 horas a que las probetas queden al vacío.



5. En una cubeta metálica calentar 5 lt de agua potable con el fin de eliminar el oxígeno que posee en el interior. Enfriar la olla hasta que la temperatura del agua sea de 23C°. Conectar una manguera a la válvula de la olla e introducir un extremo de la manguera dentro de la cubeta con agua. Apagar la bomba de succión.

Abrir lentamente la válvula de la olla con el fin de que ingrese el agua de la olla por diferencia de presión, el agua debe de ingresar lo más lento posible para evitar que esta se oxigene.

Una vez que las cuatro probetas se encuentren sumergidas dentro de la olla cerrar la válvula de agua. Dejar reposar durante 1h. Eliminar el vacío existente en la olla.

Dejar reposar las probetas sumergidas



durante 18h.

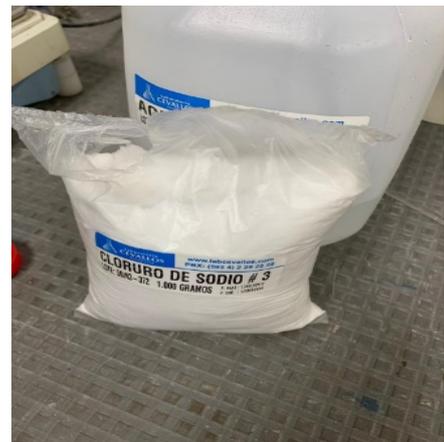
Retirar las probetas del interior de la olla.

**Etapa 4: Elaboración de solución de cloruro de sodio al 3%**

1. Pesar 1.5 lt de agua destilada



2. Pesar 45 gramos de cloruro de sodio  
Mezclar ambos compuestos dentro de la botella de agua destilada



## **Etapa 5: Elaboración de solución de hidróxido de sodio**

1. Pesar 1.5 lt de agua destilada



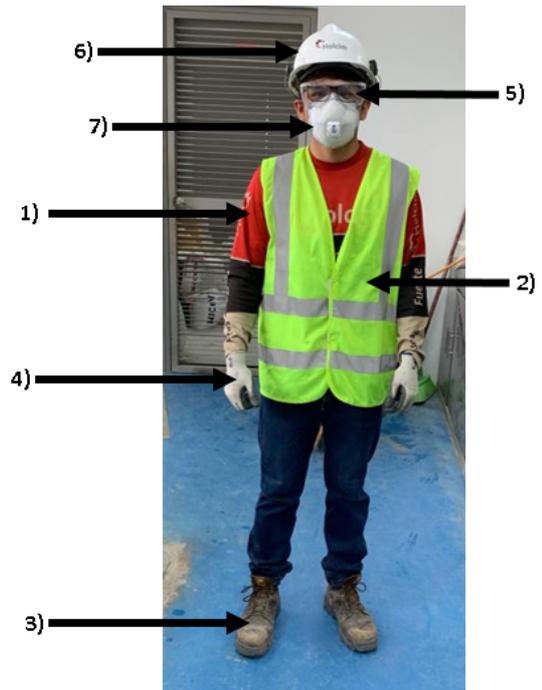
2. Pesar 18 gramos de hidróxido de sodio.  
Mezclar ambos compuestos dentro de la botella de agua destilada



## **Normativas de seguridad para realizar los ensayos**

Todos los ensayos previamente descritos deben seguir las normas de seguridad que se describen a continuación

1. Utilizar pantalón y camisa manga larga
2. Utilizar chaleco reflectante o camisa con material reflectante
3. Utilizar de calzado con punta de acero y suela antideslizante
4. Utilizar guantes de tela con palma de goma
5. Utilizar gafas protectoras
6. Utilizar casco con orejeras o en su defecto casco y tapones de oídos.
7. Utilizar mascarilla



### Normativas de higiene

Antes y después de cada ensayo hay que proceder a desinfectar las manos con agua y jabón (en su defecto se puede utilizar gel antibacterial) siguiendo el protocolo establecido por la empresa mostrado en la figura.



1. Se procederá a limpiar el área de trabajo y todos los equipos utilizados una vez concluido el ensayo.

# ANÁLISIS DE RESULTADO

## 1 Introducción

En esta investigación se realizaron 90 ensayos de resistencia a la compresión, 30 ensayos de permeabilidad y 30 ensayos de difusión de cloruros. Considerando que los resultados obtenidos de ensayos de laboratorio pierden gran parte de la validez si son erróneamente interpretados, en cuyo caso la consecuencia de esto repercutiría en la veracidad del estudio. Sharma en 1972 dice; *“La interpretación de los resultados de los ensayos es de por sí una técnica altamente especializada.”* (Sharma, 1972). En la actualidad las herramientas informáticas permiten procesar los datos utilizando análisis estadísticos para determinar tendencias, comportamientos y relaciones mediante su interpretación gráfica. Por lo tanto, en este capítulo se presentan los resultados obtenidos y su correspondiente análisis estadístico e interpretación basada en la experticia académica y profesional en Ingeniería Civil.

A continuación, se procederá a explicar cómo se procesaron los resultados obtenidos en el este estudio mediante la descripción del procedimiento para la relación A/C = 0,35 con 3 días de fraguado. Es importante tener presente que los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión provenientes de una misma mezcla, se encuentran distribuidos de tal manera que forman una curva Gaussiana según la Ley de Probabilidad Normal de la estadística. Lo que implica que se puede tomar la teoría de las probabilidades como un elemento confiable para generar una valoración de los resultados obtenidos. Por tanto, se selecciona la desviación estándar como herramienta para valorar los resultados obtenidos, la cual numéricamente se determina de la siguiente forma:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x - X)^2}{n - 1}}$$

Siendo:

$\sigma$  = desviación estándar de un conjunto de datos

$x$  = a un cierto valor de un conjunto de datos

$X$  = promedio de los valores

$n$  = número de observaciones

Según el ACI Committe 214, se toma la desviación estándar como medida de control. En la Tabla 4.1 se muestra un detalle de la información presentada por Sharma (1972), donde se expone se ha logrado un excelente control de resultados en los ensayos de laboratorio si la desviación estándar es inferior a 3,0.

**Tabla 4.1** *Estándar de control del hormigón*

Clase de operaciones	Coeficiente de valoración para los diferentes estándares de control			
	Excelente	Bueno	Medio	Pobre
(Variaciones dentro de una misma mezcla)  Control de laboratorio	Inferior a 3,0	3,0 a 4,0	4,0 a 5,0	Sobre 5,0

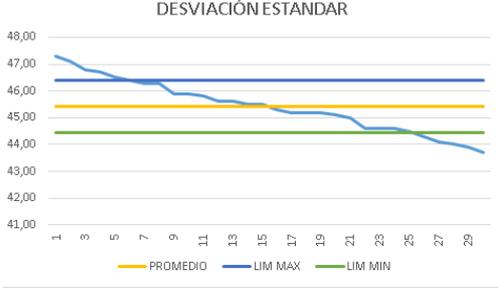
Si se obtiene una desviación estándar menor o igual a 3 entonces será apropiado considerar el valor promedio de los resultados como dato referencial del total de ensayos de resistencia a la compresión para cada relación A/C en estudio respectivamente.

Cuando se considera el valor promedio de la variable en estudio (resistencia a la compresión, permeabilidad, capacidad de difusión de cloruros) como parámetro referencial es importante asociar los valores de los límites máximos y mínimos, ello permite excluir los valores que no son representativos tal como se representa en la Tabla 4.2. Adicionalmente en la figura 4.1 se representa gráficamente la desviación

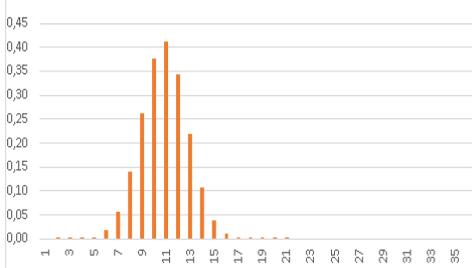
estándar, los límites máximos y mínimos y el valor promedio el cual se toma como valor representativo. En forma complementaria en las figuras 4.2 y 4.3 se representa gráficamente la distribución de puntos por intervalos y la distribución normal de esfuerzos. Ambas deben poseer una forma similar debido a que esto comprueba la veracidad de los resultados.

**Tabla 4.2 Valores obtenidos**

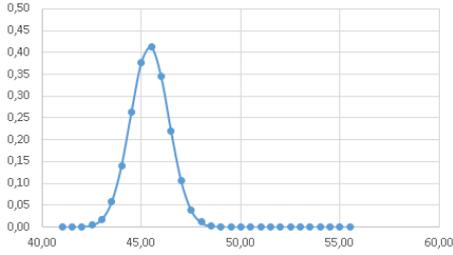
<b>Promedio</b>	<b>45,42</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>0,96</b>
<b>% coeficiente de Variación</b>	<b>2,12</b>
<b>Limite máx.</b>	<b>46,38</b>
<b>Limite min.</b>	<b>44,45</b>



**Figura 4.1 Gráfico de control de resultados**



**Figura 4.2 Distribución de puntos muestrales por intervalos.**



**Figura 4.3 Distribución normal de esfuerzos.**

*Figura 1-1*

Este proceso estadístico de validación fue aplicado a cada grupo de resultados obtenido en los diversos ensayos (por cada relación A/C).

**2 Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión**

Luego de realizar el análisis preliminar de los resultados obtenidos en los ensayos de compresión según lo descrito en la sección precedente se determinan los datos representativos de cada relación A/C en estudio los cuales se presentan en la Tabla

4.3. Adicionalmente se identifica en dicha tabla para cada relación la fecha de elaboración de cada mezcla, los días de fraguado (3, 7, 28).

**Tabla 4.3** Valores representativos de resistencia a la compresión ( $f'c$ )

Descripción	A/C 0,35	A/C 0,40	A/C 0,45
Fecha de elaboración	4/6/2019	11/6/2019	25/6/2019
$f'c$ (MPa) a 3días de curado	45,2	44,2	28,5
$f'c$ (MPa) a 7días de curado	60,5	53,6	40,9
$f'c$ (MPa) a 28días de curado	76,1	65,9	50,3

La representación gráfica de los datos registrados en la Tabla 4.3 se presentan en la figura 4.4. Como se observa la tendencia de incremento de la resistencia ocurre con el incremento de los días de fraguado tal como era de esperarse para cada relación A/C. Comparativamente existe un incremento de la resistencia a la compresión con la reducción de la relación A/C, ya que existe una mayor cantidad de cemento en la muestra. También se puede apreciar como la resistencia a la compresión del hormigón se relaciona con los días de fraguado en términos absolutos y relativos (criterio de desempeño), es decir, en forma absoluta a los 3 días de fraguado se obtiene:

59.39% de la resistencia de diseño (28 días) para la relación A/C = 0,35

67.07% de la resistencia de diseño (28 días) para la relación A/C = 0,40

56.66% de la resistencia de diseño (28 días) para la relación A/C = 0,45

Considerando que la resistencia de diseño corresponde con el 100% de la resistencia.

Un análisis similar corresponde a los 7 días de fraguado:

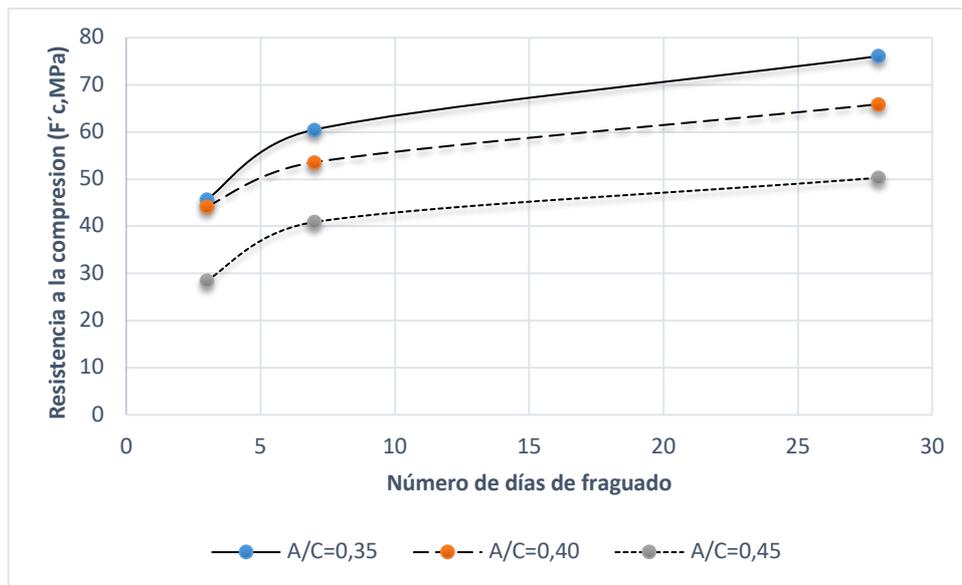
79,5% de la resistencia de diseño (28 días) para la relación A/C = 0,35

81.33% de la resistencia de diseño (28 días) para la relación A/C = 0,40

81.31% de la resistencia de diseño (28 días) para la relación A/C = 0,45

Y en forma relativa es en la relación  $A/C=0.40$  que se alcanza en menor tiempo el mayor porcentaje de resistencia a la compresión. Este resultado es de gran importancia cuando se relaciona con el trabajo de campo ya que, al alcanzar una resistencia mayor al 80% es posible desencofrar las estructuras lo que representa un ahorro en costos y tiempo de ejecución de la obra, es decir un mejor desempeño.

Finalmente se observa que la relación  $A/C = 0,35$  es la que posee las resistencias de diseño más alta, sin embargo, en vista de los porcentajes expresados anteriormente se evidencia que la relación  $A/C = 0,40$  posee un mayor desempeño. Estos rangos de incremento entran en el campo propuesto por Valcuende y colaboradores (2011) en su escrito sobre “Evolución de la resistencia del hormigón con la edad y la temperatura” (Valcuende, 2011).



**Figura 4.4** Número de días de fraguado vs Resistencia a la compresión

### 3 Resultados de los ensayos de permeabilidad

Para obtener el valor más representativo en cada relación  $A/C$  de los resultados obtenidos por los ensayos de permeabilidad en probetas con 28 días de fraguado se

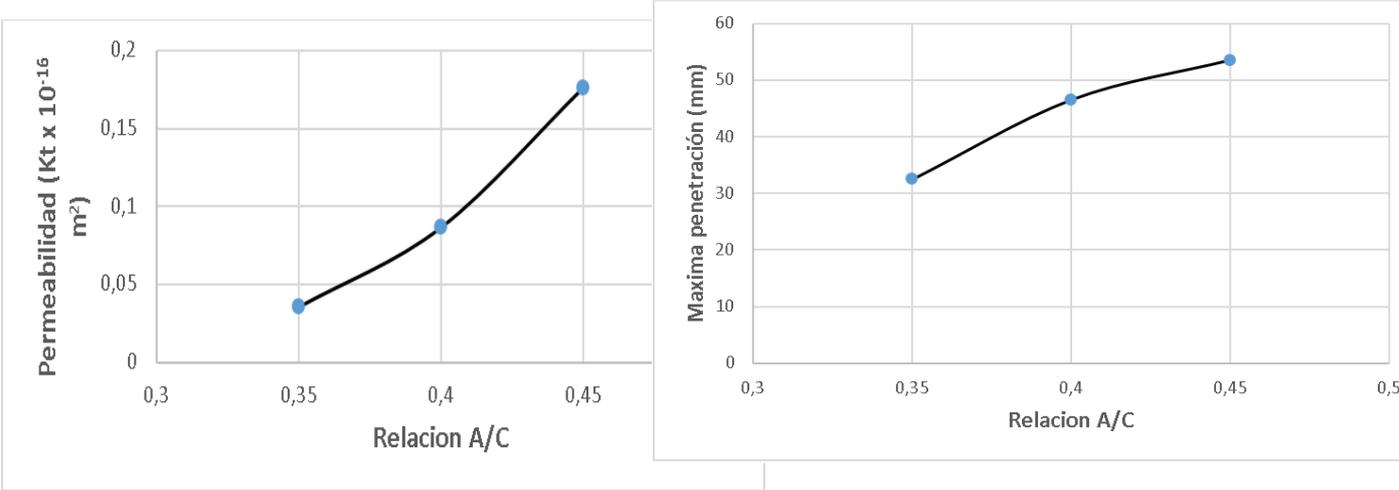
realiza una validación estadística de los mismos en forma equivalente a lo descrito en la sección de ensayo de compresión. Los valores resultantes se muestran en la Tabla 4.4, allí se representa el coeficiente de permeabilidad en el aire y la máxima penetración que alcanzó la succión producida por el equipo.

**Tabla 4.4** Valores representativos obtenidos a partir del ensayo con el permeabilmetro de Torrent.

Descripción	A/C 0,35	A/C 0,40	A/C 0,45
Método de Torrent ( $Kt \times 10^{-16} m^2$ )	0,0356	0,0865	0,176
Máxima penetración (mm)	32,5	46,5	53,5

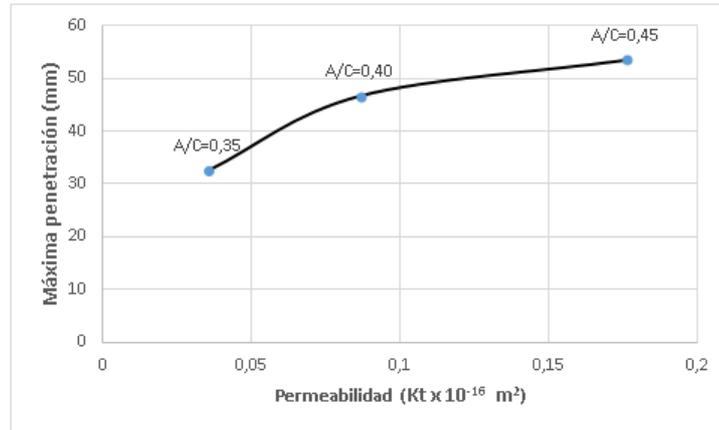
A continuación, se representa gráficamente en la figura 4.6.a el comportamiento de la permeabilidad en función de la relación A/C, en figura 4.6.b la máxima penetración en función de la relación A/C y figura 4.7 la máxima penetración en función de la permeabilidad.

La permeabilidad en función de la relación A/C, presenta un incremento relativo al incremento de la relación A/C. Un comportamiento similar ocurre con la penetración máxima y los incrementos de la relación A/C. Por tanto, incrementos de la permeabilidad se asocian con incrementos de la penetración máxima tal como era de esperarse.



**Figura 4.5a** Relación A/C vs Permeabilidad  
penetración

**Figura 4.5b** Relación A/C vs Max.



**Figura 4.6** Permeabilidad vs Máxima penetración

#### 4 Resultados de los ensayos de difusión de cloruros

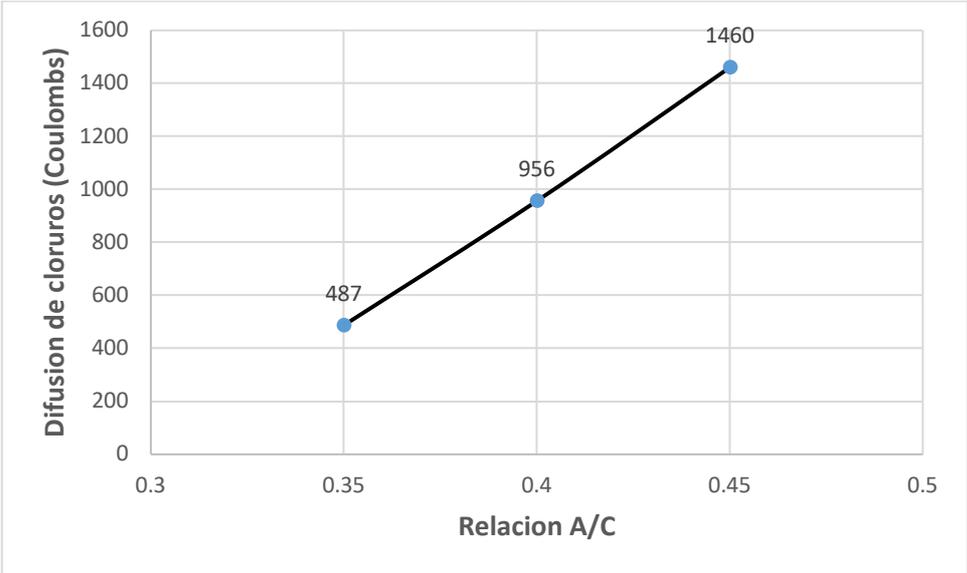
Siguiendo el procedimiento para obtener el valor más representativo en cada relación A/C de los resultados obtenidos por los ensayos de difusión de cloruros en muestras con 28 días de fraguado, se realiza una validación estadística de los mismos. Los valores resultantes se muestran en la Tabla 4.5, allí se representa el índice de difusión de cloruros medido en coulomb.

**Tabla 4.5** Valores representativos obtenidos a partir del ensayo de difusión de cloruros.

Descripción	A/C 0,35	A/C 0,40	A/C 0,45
Perma 2 TM (Coulomb)	487	956	1460

A continuación, se representa gráficamente en la figura 4.7 los resultados obtenidos con el ensayo de difusión de cloruros en función de la relación A/C. como se observa existe una relación de crecimiento lineal del índice de difusión respecto a los

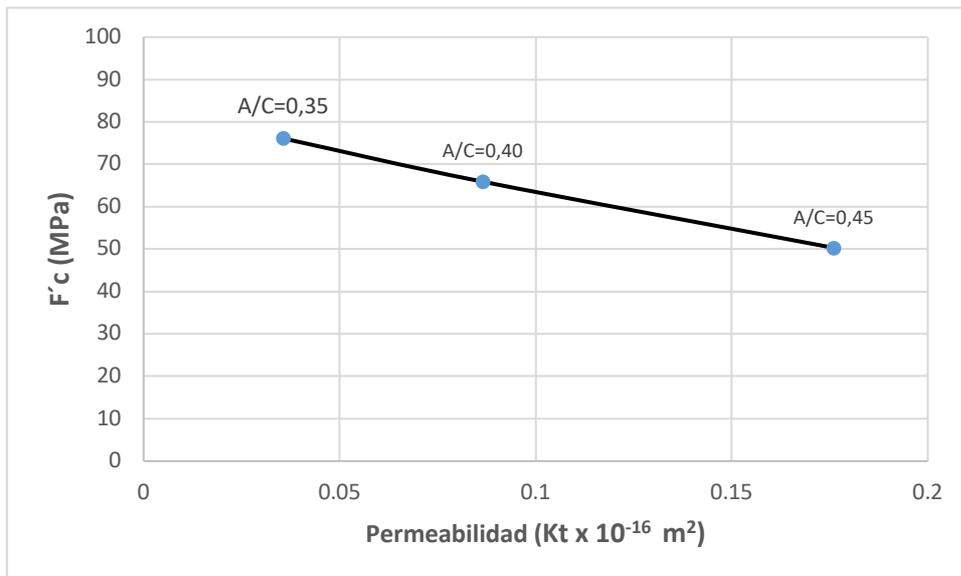
incrementos de la relación A/C, lo que resulta correcto ya que la máxima penetración también se incrementa con los incrementos de la relación A/C. mediante este ensayo se logró determinar los valores máximos de los índices de difusión para cada relación A/C tal como se observa en la Figura 4.7.



**Figura 4.7** Relación A/C vs Difusión de cloruros

### **5 Relación entre la resistencia y la permeabilidad**

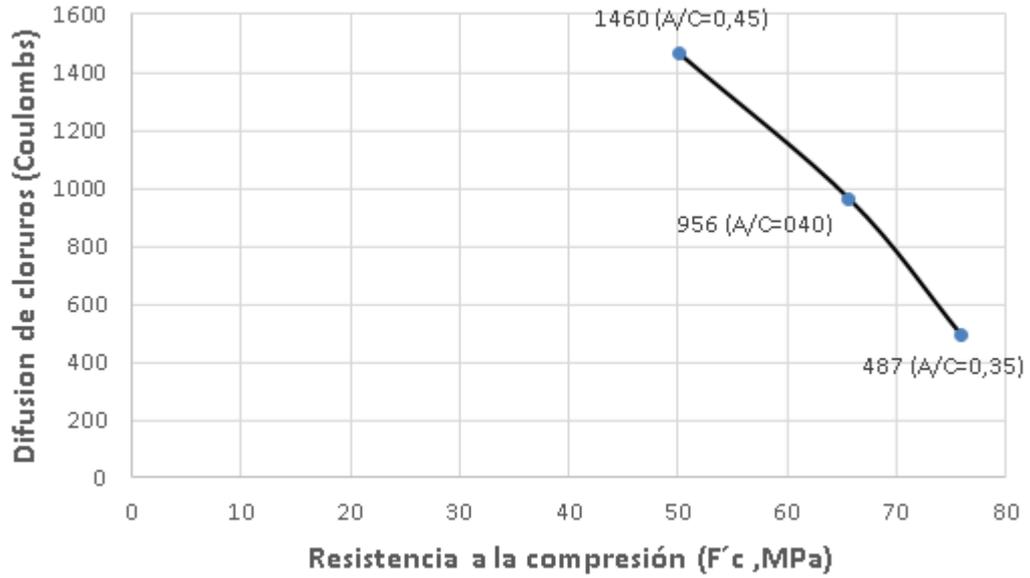
Cuando los valores de permeabilidad se incrementan las muestras de hormigón pierden resistencia, debido a que el incremento de la porosidad está directamente relacionado con el aumento de permeabilidad entonces la estructura de la muestra se debilita, trayendo como consecuencia la pérdida de resistencia. Es importante tener presente que al aumentar la permeabilidad el ingreso de cloruros será posible y ello debilitaría aún más la muestra incidiendo en pérdidas mayores de resistencia mecánica respecto del valor obtenido para cada relación A/C.



**Figura 4.8** Permeabilidad vs Resistencia en compresión

## 6 Relación entre la resistencia y la difusión de cloruros

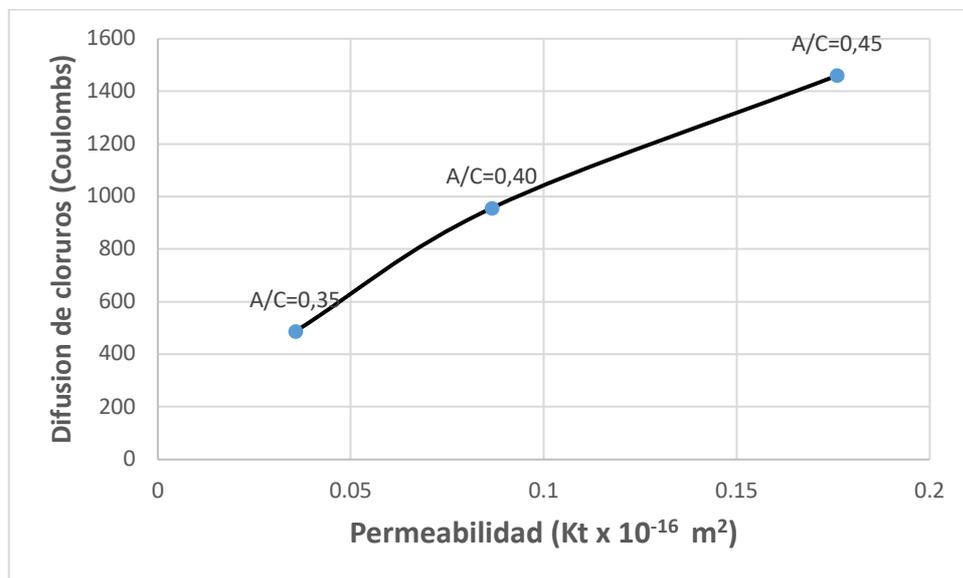
Como se comentó en la sección precedente el incremento de permeabilidad posibilita el incremento en la capacidad de difusión de cloruros, y es posible asociar la difusión de cloruros con la pérdida de resistencia en compresión. Representando dicha relación se observa que el incremento de la resistencia a la compresión implica una menor difusión de cloruros y que la resistencia se incrementa cuando la relación A/C es menor



**Figura 4.9** Resistencia en compresión vs Difusión de cloruros

### 7 Relación entre la permeabilidad y la difusión de cloruros

Las tres variables involucradas en este ensayo son directamente proporcionales, es decir, incrementos de la permeabilidad obedecen a incrementos de la relación A/C cuya consecuencia son incrementos en los índices de difusividad.



**Figura 4.10** Permeabilidad vs Difusión de cloruros

### 8 Relación de costo por metro cubico de mezcla por cada relación A/C

A continuacion en la tabla 4.6 se presentan los costos por metro cubico de cada relacion A/C estudiada. Como era de esperarse la relacion A/C = 0,35 posee un costo mas elebado debido a la mayor cantidad de cemento requerido. Sin embargo esta relacion brinda mayor seguridad en criterios de baja permeabilidad, alta resistencia y bajos indice de difusion de clorurors los que garantiza una mayor vida util.

Es importante resaltar que mayor vida util implica una adecuada relacion calidad / precio. Este enfoque requiere el analisis previo de la exposicion de la estructura a un medio de cloruro debido a que si el cloruro no prenetra en el hormigon este cumple con el total de su vida util. Al momento que la estructura cumple con el total de la vida util estimada genera un ahorro en el tiempo debido a que no se deben implementar costos de mantenimiento de la estructura.

**Tabla 4.6** Valores representativos obtenidos a partir de los ensayos y el precio de venta de la empresa Holcim-Ecuador.

	A/C = 0,35	A/C = 0,40	A/C = 0,45
<b>Resistencia a la compresión (28 días de fraguado)</b>	76,1 MPa	66,9 MPa	50,3 MPa
<b>Permeabilidad (Kt x 10-16 m<sup>2</sup>)</b>	0,0356	0,0865	0,176
<b>Máxima penetración (mm)</b>	32,5	46,5	53,5
<b>Difusión de cloruros (Coulomb)</b>	487	956	1460
<b>Costo (\$ / m<sup>3</sup>)</b>	86,54	78,62	70,03

# CAPITULO V

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

Debido a la característica anisótropa y heterogénea (desde los contornos y hacia el interior) que presentan las muestras de hormigón en estudio, se puede entender que la penetración de cloruros es un fenómeno que no es unidimensional. Por ello el trabajo de laboratorio realizados en las instalaciones de Holcim Ecuador donde se consideraron un número de 30 muestras por ensayo, el uso de los equipos especializados, el seguimiento de protocolos de trabajo acorde con las normativas establecidas, el apoyo de profesionales del área (documentado en este informe) resulto una opción confiable y estadísticamente representativa que permite alcanzar la certificación del complejo problema no lineal.

Durante el trabajo se documentaron los protocolos de laboratorio, mediante los cuales se describe el método a seguir para medir el comportamiento del hormigón al variar su relación A/C. Adicionalmente, dichos protocolos permiten identificar las mejoras a realizar, ya sea en las decisiones de los constructores en obra o también del personal especializado de la empresa Holcim-Ecuador a la hora de elegir el diseño de un hormigón para cualquiera de sus obras.

El buen uso de los equipos es fundamental al momento de realizar un ensayo, debido a que ello les brinda a los resultados de obtenidos en la investigación veracidad y confiabilidad. Al realizar un ensayo normalizado como los descritos por la ASTM se está brindando datos de calidad a pesar de los errores inherentes y demás factores que pueden influir.

En relación a los estudios propiamente dichos, se concluye que: si la relación A/C es baja se obtiene menor permeabilidad, mayor resistencia, menor penetración máxima

y menor índice de difusión de cloruros. Una relación inversa ocurre cuando la relación A/C es alta ( $A/C=0,45$ ), es decir, mayor A/C implica más permeabilidad, menor resistencia, más penetración máxima, mayor índice de difusión de cloruros. Estos resultados guían al constructor cuando quiere garantizar una protección del ataque por presencia de cloruro en estructuras de hormigón armado.

Es importante asociar la durabilidad de las estructuras reforzadas cuando se encuentran en medios contentivos de cloruro respecto a los diseños de la relación agua cemento en la mezcla de hormigón. Puede asociarse también criterios de costos vs resistencia, costos vs durabilidad y durabilidad vs resistencia según las posibilidades constructivas establecidas en los proyectos.

Es de suma importancia tomar en cuenta a las estructuras afectadas debido a los ambientes contentivos de cloruro de sodio. Para esto se necesita tomar en cuenta el ciclo de vida completo que posee la estructura. Con el fin que de esta manera se pueda generar diseños adecuados no solo para los usos que vaya a tener la estructura, sino también para las condiciones ambientales en las que se va a encontrar sometida. Debido a que de estas condiciones depende la durabilidad de la estructura.

## **Recomendaciones**

El hormigón reforzado con varillas de hierro es susceptible a la corrosión si es expuesto a medios contentivos de cloruros, y si se supera el valor crítico de cloruro se acelera el proceso de corrosión. Esta condición sumada con los niveles altos de permeabilidad debilita la capacidad resistiva de la estructura en un tiempo menor al tiempo de diseño considerado desde un enfoque netamente estructural. Por ello la importancia de este estudio.

Se propone mantener las muestras elaboradas en un medio contentivo de cloruros con el interés de utilizarlas en el estudio de su capacidad resistiva en ambientes

marinos según el tiempo de inmersión, llevando las muestras a grupos de 10/30 con intervalos de 150/450 días a ensayos de no destructivos de permeabilidad y posteriormente de resistencia en compresión. Esta propuesta permitirá conocer la evolución del perfil de difusión de cloruros de las muestras, luego del estudio básico realizado en esta investigación. También es posible considerar los trabajos propuestos por Barrios et al. (2017), quien utilizó el método químico de perfil de cloruros para determinar la corrosión a partir de las normas 114 (ASTM, 2013) y C-1218 (ASTM, 2013) por la relación del porcentaje de cloruros vs distancia radial de la muestra.

## Referencias

- Flores Luque, V., López Villarino, B., Dr. Barrios Sevilla, J., & Rodríguez García, M. R. (1995). Durabilidad del hormigón. Influencia de la concentración de cloruros en el agua de amasado y en disolución. *MATERTATJIS DE CONSTRUCCIÓN*, 45(237), 37-52.
- Ebensperger, L., & Torrent, R. (Diciembre de 2010). Medición "in situ" de la permeabilidad al aire del hormigón: status quo. *Revista ingeniería de construcción*, 25(3), 371-382. Obtenido de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/ric/v25n3/art03.pdf>
- Girón Vargas, H. A. (1998). *Revista imcyc*. Obtenido de Ataque por cloruros en el concreto: <http://www.imcyc.com/revista/1998/oct/ataque.htm>
- Pérez Ramos, D. (Agosto de 2009). *Facultad de ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México*. Obtenido de Estudio experimental de concretos permeables con agregados andesíticos: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/3443/perezramos.pdf?sequence=1>
- Sharma, R. C. (1972). Evaluación de los resultados de los ensayas a compresión del hormigón de obra. *Indian Concrete Journal*, 115-120.
- Abril Gavilanes, B. E. (Marzo de 2016). *Determinacion de la resistencia a compresion de hormigón preparado con policarbonato, vidrio templado y hormigon reciclado*. Obtenido de Repositorio UTA Universidad Técnica de Ambato : <http://repo.uta.edu.ec/bitstream/123456789/23039/1/Tesis%201012%20-%20Abril%20Gavilanes%20Bernarda%20Estefan%C3%ADa.pdf>
- Villagrán Zaccardi, Y. A. (2012). *Departamento de Construcciones, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata*. Obtenido de Estimaciones del ingreso de cloruro en el hormigón y de la despasivación localizada en armaduras: [file:///C:/Users/User/Downloads/Tesis%20Yury%20Villagrán\\_2u.pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/Tesis%20Yury%20Villagrán_2u.pdf)
- ACI\_214. Método recomendado para evaluar los resultados de los ensayos de compresión del hormigón en obra. ACI 214-65. ACI Manual of Concrete Practice, part 1. American Concrete Institute, Detroit, Michigan, USA (1968).
- ASTM\_C31. Especificaciones normalizadas para el hormigón preamasado. ASTM Designation: C 31. American Society for Testing and Materials, Piladelfla, Pennsylvania, U.S.A
- ASTM\_C39. Método de ensayo normalizado para resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón. ASTM Designación: C 39. American Society for Testing and Materials, Piladelfla, Pennsylvania, U.S.A
- ASTM\_C1202. Método de ensayo normalizado para determinar la capacidad resistiva del hormigón a la penetración del ion cloruro. ASTM Designación: C 1202. American Society for Testing and Materials, Piladelfla, Pennsylvania, U.S.A

ASTM\_C231. Método de ensayo normalizado de contenido de aire del hormigón recién mezclado obtenido mediante el método por presión. ASTM Designación: C 231. American Society for Testing and Materials, Piladelfla, Pennsylvania, U.S.A

ASTM\_C138. Método de ensayo normalizado de densidad y rendimiento del hormigón. ASTM Designación: C 138. American Society for Testing and Materials, Piladelfla, Pennsylvania, U.S.A

SIA (2003), Norma Suiza: Método de ensayo normalizado no destructivo en sitio para determinar la permeabilidad en el aire.