

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1. Antecedentes**

#### **1.1 El Problema**

La necesidad de conocer si al utilizar cascote de ladrillo rojo como agregado en el hormigón estructural produce un gran aumento en la permeabilidad del mismo, que perjudique la durabilidad del hormigón y la integridad de las armaduras.

En el trabajo de investigación anterior titulado “Análisis del Hormigón con Cascote de ladrillo y su aplicación como alternativa del Hormigón Convencional” realizado por Gutiérrez Rodríguez Horacio José no se abordó el efecto que tiene en la permeabilidad del mismo la utilización del cascote de ladrillo como agregado en el hormigón, si aumenta en gran medida la permeabilidad puede ser dañino para la integridad del mismo.

La permeabilidad e higroscopicidad del hormigón ocasionan trastornos importantes y muy variables como ser:

- Modificación de las condiciones de estabilidad, influencia del hielo y deshielo en las regiones o épocas de bajas temperaturas.
- Acciones de ataque químico, si se trata de aguas muy puras, selenitosas, etc., que puedan producir efectos nocivos en el hormigón, ocasionando su destrucción paulatina.
- Acciones perjudiciales de oxidación y otras sobre las armaduras del hormigón.
- Daños en viviendas y edificios en general, con insalubridad en sótanos y viviendas semienterradas con mucha humedad, efectos de la lluvia caída en las fachadas, cubiertas, etc.

#### **1.1.1 Planteamiento del Problema**

La creciente generación de residuos de la industria cerámica y la construcción ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles para su gestión, siendo la reutilización como agregados en la producción de hormigón una opción prometedora.

El cascote de ladrillo, un componente significativo de los residuos de las cerámicas y la construcción, presenta un potencial para ser empleado como agregado reciclado en la industria de la construcción.

Sin embargo, las propiedades intrínsecas del cascote de ladrillo, como su mayor porosidad y absorción de agua en comparación con los agregados naturales tradicionales (grava y arena), podrían influir significativamente en las propiedades del hormigón resultante, particularmente en su permeabilidad. La permeabilidad del hormigón es una propiedad crucial que rige la velocidad a la que los fluidos pueden penetrar su estructura, afectando directamente su durabilidad frente a la acción de agentes agresivos del medio ambiente.

A pesar del interés en el uso del cascote de ladrillo como agregado reciclado, existe una necesidad de comprender de manera más profunda y cuantitativa cómo su incorporación, en diferentes proporciones de sustitución del agregado natural, afecta la permeabilidad del hormigón. La falta de claridad sobre esta relación dificulta la toma de decisiones informadas sobre la viabilidad y las limitaciones del uso de hormigones con cascote de ladrillo en aplicaciones donde la impermeabilidad es un factor de diseño relevante para la durabilidad.

### **1.1.2 Formulación del Problema**

¿Cómo influye la sustitución parcial de agregado natural (grava) por cascote de ladrillo en la permeabilidad de los hormigones, medidas a través del ensayo de profundidad de penetración de agua bajo presión y analizada mediante la ecuación de Valenta?

¿Cuánto incrementara el valor de la permeabilidad en hormigones que reemplacen en diferentes porcentajes de cascote de ladrillo al agregado grueso, en función a un hormigón patrón?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Analizar la permeabilidad en hormigones que combinen en su agregado grueso la grava y cascote de ladrillo en diferentes porcentajes, aplicando la ecuación de Valenta y el ensayo de Profundidad de penetración de agua bajo presión de la norma EN 12390-08.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Elaborar una dosificación de hormigón H-21 patrón y probetas, con el método ACI-211, aplicar dicha dosificación a las mezclas de hormigón con cascote de ladrillo.
- Realizar el ensayo de Profundidad de penetración de agua bajo presión de cada hormigón conseguido al sustituir grava por cascote de ladrillo.
- Aplicar la ecuación de Valenta para poder obtener valores de permeabilidad en los diferentes hormigones estudiados.
- Elaborar un análisis comparativo de la permeabilidad entre el hormigón patrón convencional y los diferentes hormigones realizados con cascote de ladrillo.

## **1.3 Justificación**

### **1.3.1 Académica**

Desde una perspectiva académica, esta investigación se justifica por la necesidad de profundizar el conocimiento científico sobre las propiedades de los materiales de construcción sostenibles. El uso de agregados reciclados, como el cascote de ladrillo, en la producción de hormigones es un campo en desarrollo que requiere una comprensión más exhaustiva de su impacto en las propiedades del material. Este estudio contribuirá al cuerpo de conocimiento existente al analizar específicamente cómo la sustitución de agregados naturales por cascote de ladrillo afecta una propiedad fundamental para la durabilidad del hormigón como ser la permeabilidad. Los resultados obtenidos permitirán ampliar la base teórica sobre el comportamiento de los hormigones con agregados reciclados, proporcionando información valiosa para futuros investigadores y la comunidad académica en el área de la ingeniería civil y la ciencia de los materiales. Además, la aplicación de las metodologías estandarizadas

como el ensayo EN 12390-8 y modelos teóricos como la ecuación de Valenta enriquecerá la comprensión de como evaluar la permeabilidad en este tipo de materiales.

### **1.3.2 Técnica**

Técnicamente, esta tesis se justifica por la relevancia de la permeabilidad en el diseño y la vida útil de las estructuras de hormigón. La capacidad del hormigón para resistir la penetración de agua y otras sustancias agresivas es crucial para garantizar su durabilidad a largo plazo. Comprender como la incorporación de cascote de ladrillo como agregado influye en esta propiedad es fundamental para determinar su viabilidad en diversas aplicaciones de construcción. Los resultados de este análisis proporcionaran información técnica valiosa para ingenieros y constructores al momento de seleccionar materiales y diseñar mezclas de hormigón más sostenibles. Se podrán establecer criterios técnicos sobre los porcentajes de sustitución de cascote de ladrillo que permitan alcanzar niveles de permeabilidad aceptables para diferentes tipos de estructuras y condiciones exposición. Asimismo, la aplicación y comparación de diferentes métodos de evaluación de la permeabilidad (ensayo y modelo teórico) aportará al conocimiento técnico sobre la caracterización de esta propiedad en hormigones con agregados reciclados.

### **1.3.3 Social**

Socialmente, esta investigación se justifica por su potencial contribución a la sostenibilidad y la gestión de residuos. La industria de la construcción y cerámica es una gran generadora de residuos, y la reutilización del cascote de ladrillo como agregado en el hormigón representa una alternativa para reducir la cantidad de residuos enviados a vertederos, disminuyendo el impacto ambiental asociado. Promover el uso de materiales reciclados en la construcción puede conducir a prácticas más sostenibles, a la conservación de recursos naturales y, potencialmente, a la reducción de costos a largo plazo. Al analizar la permeabilidad de estos hormigones reciclados, se busca asegurar que su uso no comprometa la durabilidad de las construcciones, garantizando así infraestructuras seguras y resilientes para la sociedad. En última instancia, esta

investigación apoya la transición hacia una economía más circular en el sector de la construcción, como beneficios ambientales económicos y sociales.

## **1.4 Alcance del Proyecto**

### **1.4.1 Consideraciones Generales**

Para la realización del trabajo de investigación se ensayará:

- ❖ Cemento: Determinar la finura y peso específico.
- ❖ Agregados: Análisis granulométrico, determinar los pesos específicos, absorción, pesos unitarios.
- ❖ Dosificación de mezclas: Relación agua cemento, asentamiento, correcciones, introducción del cascote de ladrillo.
- ❖ Rotura de probetas para relacionar las resistencias del hormigón convencional con hormigón con adición de porcentaje de cascote de ladrillo en reemplazo del agregado grueso.
- ❖ Permeabilidad: Determinar la profundidad de penetración de agua bajo presión en hormigón endurecido y la aplicación de la ecuación de Valenta para cuantificar el coeficiente de permeabilidad.

Comparar: Hormigón con ladrillo y Hormigón convencional

### **1.4.2 Resultados a lograr**

- Obtener y generar información necesaria para el desarrollo del estudio y del informe final para dar recomendaciones para su uso.
- Realizar ensayos de laboratorio para los componentes utilizados en la mezcla.
- Caracterizar los materiales que se utilizaran en la mezcla, comparar las similitudes y diferencias de las diferentes mezclas.
- Comparar el aumento de la permeabilidad en las probetas de mezclas con diferentes porcentajes de cascote de ladrillo como agregado grueso.

- Elaborar y ensayar probetas en el permeámetro para cada porcentaje de cascote de ladrillo, donde por lo menos el 90 % de las probetas den resultados semejantes para cada porcentaje de cascote de ladrillo como agregado grueso en el hormigón.
- Aplicar la ecuación de Valenta para obtener valores de permeabilidad al agua del hormigón estudiado.
- Comparar y contrastar los resultados obtenidos con la hipótesis planteada.

### **1.4.3 Hipótesis**

En hormigones con sustitución de porcentajes de grava por cascote de ladrillo la permeabilidad incrementa de manera directamente proporcional en un orden del 40 % según el incremento de dicho cascote y provoca que el hormigón reduzca su peso.

# **CAPÍTULO II**

## **MARCO TEORICO**

## **2. MARCO TEORICO**

### **2.1 Hormigón con cascote de ladrillo**

#### **2.1.1 Antecedentes**

En las construcciones civiles actuales, nos encontramos en la mayoría de los casos con distintos tipos de hormigón. Este es una mezcla íntima entre un material cementante, un árido fino y un árido grueso, más agua y eventualmente aditivos, que al endurecer a través de un proceso químico denominado fragüe adquiere una consistencia similar a las mejores piedras naturales. Podemos encontrar clasificaciones de los distintos tipos de hormigón según distintos aspectos. Según su tipo de agregado encontramos livianos y pesados. A su vez estos pueden tener distintos tipos de resistencia.

El hormigón liviano se caracteriza por su capacidad aislante y su baja densidad. Según CIRSOC 201 un hormigón se considera liviano cuando su densidad no excede los 2000 kg/m<sup>3</sup>. Las demás características dependerán del tipo de agregado.

El reciclado y la reutilización de ladrillos procedentes de defectuosa fabricación podría conducir a la industria de la construcción a un escenario de mayor sostenibilidad, reduciendo el uso de recursos no renovables y el impacto negativo que causa al medio ambiente el manejo inadecuado de los residuos sólidos.

Para esto es posible sustituir el agregado natural grueso por ladrillo triturado en diferentes proporciones, analizando las propiedades físico-mecánicas del ladrillo triturado, así mismo las propiedades mecánicas del hormigón endurecido y el efecto que produce la implementación del ladrillo triturado.

Los resultados de los distintos ensayos que se aplicarán a los materiales como al hormigón endurecido podrán indicar si utilizar ladrillo triturado como agregado grueso es viable o no en la elaboración de hormigones ligeros.

Durante las últimas décadas los residuos provenientes de la fabricación defectuosa de cerámicas han incrementado en gran medida debido a la demanda de cerámicas en la industria de la construcción. En la actualidad, estos residuos no reciben ninguna clase de tratamiento para poder ser reutilizado de manera eficiente y solo son utilizados para

rellenar huecos presentes en caminos cercanos a las fábricas cerámicas o solo son arrojados en previos baldíos dando un impacto visual negativo.

### **2.1.2 Cascote de Ladrillo**

Este residuo tiene el potencial para ser reciclado en comparación con otros residuos inertes, debido a que los residuos de ladrillo permiten la obtención de un material fragmentado que puede ser utilizado como agregado reciclado en la industria de la construcción.

El poder aprovechar este recurso constituye un aspecto muy importante a nivel mundial en el aspecto económico, el poder incorporar estos materiales de desecho ayudan a poder preservar los recursos naturales.

#### **2.1.2.1 Procedencia**

· Origen: Es un material proveniente de los hornos de ladrillos, residuos de la fabricación de baldosas o recuperación de escombros, que previa limpieza de impurezas, trituración y cribado pueden ser usados como agregados. El proceso general de la producción del mampuesto, consiste:

1- Selección y extracción de la materia prima:

a-Desgaste: La tierra es desmalezada de raíces y piedras.

b- Disgregación: consiste en desmenuzar los terrones de arcilla. Se los deja a la intemperie para que las heladas los desmenucen (helacidad). A demás las lluvias arrastran los elementos solubles y las lavan de los elementos orgánicos y minerales.

Este proceso dura naturalmente 1 año, industrialmente están tecnificados.

2- Humectación y amasado: Consiste en obtener la consistencia ideal para el posterior moldeo. Esto se obtiene hidratando la arcilla.

3- Moldeo: se les imprime la forma deseada, previendo un exceso de material por la contracción.

4- Secado: para reducir al mínimo el agua de amasado, evitando las grandes contracciones en la cocción.

5- Cocción a altas temperaturas. La cocción rápida da la estructura porosa.

6- Así se obtienen 3 tipos de ladrillo:

c- sobre el fuego: vitrificado casi negro, pero con escasa adherencia del mortero, piezas con gran contracción y deformación utilizados en cimientos.

d- Centro del horno: de primera o de cal, regulares, porosos, rojizos y sonido metálico.

e- Periferia: bayos o de media cal; rojo amarillento, sonido opaco.

Para usarlos como agregados, serán triturados, cribados y clasificados en grupos de acuerdo al tamaño de los granos. Se deben eliminar los de dimensión inferior a los 3mm. ya que son los que contienen mayor cantidad de impurezas perjudiciales. Si se desean agregados más finos se debe re triturar y cribar granos mayores.

### **2.1.2.2 Características del agregado**

Porosidad: Su porosidad depende de las tierras utilizadas y del proceso de elaboración. Los más porosos son aquellos ladrillos extraídos del centro del horno. Los poros pequeños aumentan la resistencia a la conductibilidad térmica.

- Peso específico: oscilan entre 900 y 1200 kg/m<sup>3</sup>, aunque es menor que el de agregados normales, es mayor que otros agregados livianos, aumentando la densidad del hormigón que constituirán.

- Resistencia: Tiene una resistencia a la compresión comprendida entre los 9,8 y los 29,42 Mpa, y si estos son de Clinker, resisten hasta 49 Mpa.

- Superficie: ásperas y rugosas.

- Color: La coloración se determina a partir de la cantidad de óxido constitutivo. Según donde fueron cocidos: son casi negros o vitrificados si se hicieron sobre el fuego, rojizos en el centro del horno, y rojo amarillento si fueron cocidos en la periferia.

- Forma: por su origen son irregulares y aristas angulosas, aunque en hornos rotatorios pueden conseguirse granos redondeados.
- Absorción: Por su estructura porosa (cámaras de aire comunicadas entre sí y con el exterior), son muy absorbentes, a tener en cuenta en el momento de proyectar las mezclas.
- Granulometría: gran variabilidad, debido que está dada por el hombre, extrayendo las inferiores a 3mm, por contener mayor grado de impurezas. Es preciso disminuir el tamaño de los agregados mayores para aumentar la baja resistencia, elasticidad y densidad que por su misma estructura tiene.
- Reciclado: es la base de su existencia, favoreciendo la economía.

Una condición necesaria es la separación cuidadosa, antes y durante la demolición, para prevenir la mezcla de materiales y la contaminación de los materiales reciclables. Los materiales se transportan a plantas de reciclaje donde son clasificados y triturados.

### **2.1.3 Hormigón con cascote de ladrillo**

#### **2.1.3.1 Características del Hormigón que forma**

Dosificación: De acuerdo a estudios realizados por el Departamento de Mecánica Aplicada y Estructuras de la Facultad de Ciencias Exactas Ingeniería y Agrimensura de la U.N.R. se hicieron ciertas mezclas que se muestran a continuación:

Según la finalidad del hormigón estas son (para 1 m<sup>3</sup>).

TABLA 2.1.3.1-1: MEZCLAZ DE PRUEBA APROXIMADAS PARA ALGUNOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

	Proporciones volumen			Materiales para 1 m <sup>3</sup>						
	Cem	cal	aren gr.	Polvo de Ladrillo	cascode	Cem .	cal	aren gr.	porland	cascode
						kg.	kg.	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
1- contrapisos	¼	1	3	2	10	35	65	0,26	0,175	0,88
2- base de cordones, conduntos, fundaciones, etc.	½	1	4		8	17	51	0,391		0,782
3-relleno de pozos, fondo de tanques	¼	1	3	1	6	60		0,342	0,114	0,684
4- fondo de cámaras		1	3		5		73	0,42		0,7

Fuente: Dpto. de Mecánica Aplicada U.N.R.

Resistencia: Partiendo de la arena y el cascode de ladrillo pueden confeccionarse dos tipos de hormigón:

- Hormigón de estructura compacta, que para pesos por unidad de volumen comprendidos entre 1,5 y 2,1 kg/dm<sup>3</sup> y dosis de cemento desde 130 a 350 kg/m<sup>3</sup> tienen una resistencia ala compresión de 6,86 a 31,38 Mpa. la resistencia a la flexotracción es de 5,88 Mpa.
- Hormigón de estructura porosa, que alcanza para pesos por unidad de volumen comprendidos entre 1 y 1,5 kg/dm<sup>3</sup> y para dosis en cemento de 150 a 350 kg/ m<sup>3</sup>, unas resistencias a la compresión de 1,96 a 6,86 Mpa. La estructura porosa se engendra por supresión del grano fino entre 0 y 1mm o entre 0 y 3 mm, o utilizando el llamado grano único de 1 a 3mm o de 3 a 7 mm o granulometrías similares. El limita la cantidad de cemento para evitar que llene todos los huecos que se producen.
- Los hormigones de cascode de ladrillo son relativamente elásticos, de mediana o pequeña retracción, se dilatan pocos y presentan coeficientes de dilatación térmica reducidos.

- Pesos específicos: caen entre  $1,250 \text{ kg/dm}^3$  y  $1,350 \text{ kg/m}^3$ .
- Trabajabilidad: debido a su variada granulometría, y sus lados angulosos, no permiten una gran trabajabilidad, así también el bombeo.

### **2.1.3.2 Usos**

Son utilizados en: cimientos, suelos, divisiones horizontales, paredes. Por lo general son utilizados como hormigones de relleno. Por ejemplo, en bases de columnas, es utilizado, ya que, aunque tiene menor resistencia, al aumentar su área soporta la misma tensión, y favoreciendo económicamente la estructura.

## **2.2 Dosificación de hormigones**

Diseñar una mezcla de concreto consiste en determinar las cantidades relativas de materiales que hay que emplear en la mezcla para obtener un concreto adecuado para un uso determinado.

### **❖ Clasificación del hormigón**

#### **a) Densidad**

- Hormigón de peso liviano: Aquel cuyo peso unitario es menor que  $2000 \text{ kg/m}^3$ .
- Hormigón de peso normal: Aquel cuyo peso unitario esta entre  $2000 \text{ kg/m}^3$  y  $2600 \text{ kg/m}^3$ .
- Hormigón pesado: Aquel cuyo peso unitario es mayor a  $2600 \text{ kg/m}^3$ .

#### **b) Consistencia**

Es una medida indirecta de la trabajabilidad de una mezcla de hormigón y se mide por medio del ensayo de asentamiento.

TABLA 2.2-1: CLASIFICACIÓN DEL HORMIGÓN POR SU CONSISTENCIA

ASENTAMIENTO (CM)	CONSISTENCIA (TIPO DE CONCRETO)	GRADO DE TRABAJABILIDAD	TIPO DE ESTRUCTURA Y CONDICIONES DE COLOCACIÓN
0-2,0	MUY SECA	MUY PEQUEÑO	Vigas o pilotes de alta resistencia con vibraciones de formaletas
2,0-3,5	SECA	PEQUEÑO	Pavimentos vibrados con máquina mecánica
3,5-5,0	SEMI-SECA	PEQUEÑO	Construcciones en masas voluminosas. Losas medianamente reforzadas con vibración. Fundaciones en concreto simple. Pavimentos con vibradores normales
5,0-10,0	MEDIA	MEDIO	Losas medianamente reforzadas y pavimentos, compactados a mano. Columnas, vigas, fundaciones y muros, con vibración
10,0-15,0	HUMEDA	ALTO	Secciones con mucho refuerzo. Trabajos donde la colocación sea difícil. Revestimiento de túneles. No recomendable para compactarlo con demasiada vibración

Fuente: Tecnología del Hormigón (Vitervo O'Reilly)

### c) Resistencia

De acuerdo al Código Boliviano de Hormigón (CBH-87), los hormigones se tipifican, de acuerdo con su resistencia a compresión de proyecto, a los 28 días, en probetas cilíndricas normales, según la siguiente serie:

H12,5; H15; H17,5; H20; H25; H30; H35; H40; H45; H50; H55

Donde las cifras correspondientes a las resistencias de proyecto,  $f_{ck}$ , en Mpa.

El ingeniero Vitervo O'Reilly, hace una referencia a la clasificación de hormigones por su resistencia a la compresión a los 28 días de la siguiente manera:

- Hormigón normal: Aquel con una resistencia entre 13,72 Mpa y 34,32 Mpa.

- Hormigón de alta resistencia: Aquel con una resistencia entre 34,32 Mpa y 98,06 Mpa.
- Hormigón de ultra alta resistencia: Aquel con una resistencia que supera a 98,06 Mpa.

### **2.2.1 Hormigón fresco**

#### **❖ Trabajabilidad o manejabilidad**

La facilidad de colocación, consolidación y acabado del concreto fresco y el grado que resiste a la segregación se llama trabajabilidad. El concreto debe ser trabajable pero los ingredientes no deben separarse durante el transporte y el manejo.

El grado de la trabajabilidad que se requiere para una buena colocación del concreto se controla por los métodos de colocación, tipo de consolidación y tipo de concreto. Los diferentes tipos de colocación requieren diferentes niveles de trabajabilidad.

Los factores que influyen en la trabajabilidad del concreto son: (1) el método y la duración del transporte; (2) cantidad y características de los materiales cementantes; (3) consistencia del concreto (asentamiento en cono de Abrams o revenimiento); (4) tamaño, forma y textura superficial de los agregados finos y gruesos; (5) aire incluido (aire incorporado); (6) cantidad de agua; (7) temperatura del concreto y del aire y (8) aditivos. La distribución uniforme de las partículas de agregado y la presencia de aire incorporado ayudan considerablemente en el control de la segregación y en la mejoría de la trabajabilidad.

Las propiedades relacionadas con la trabajabilidad incluyen consistencia, segregación, movilidad, bombeabilidad, sangrado (exudación) y facilidad de acabado. La consistencia es considerada una buena indicación de trabajabilidad.

#### **❖ Sangrado del concreto**

Sangrado (exudación) es el desarrollo de una lámina de agua en el tope o en la superficie del concreto recién colocado. Es causada por la sedimentación (asentamiento) de las partículas sólidas (cemento y agregados) y simultáneamente la subida del agua hacia la superficie. El sangrado es normal y no debería disminuir la

calidad del concreto adecuadamente colocado, acabado y curado. Un poco de sangrado es útil en el control de la fisuración por contracción (retracción) plástica. Por otro lado, si es excesiva aumenta la relación agua cemento cerca de la superficie; puede ocurrir una capa superficial débil y con poca durabilidad, particularmente si se hace el acabado cuando el agua de sangrado aún está presente. Los vacíos y bolsas de agua pueden ocurrir, resultantes del acabado prematuro de la superficie.

### ❖ **Proceso de fraguado y endurecimiento**

Una vez que el cemento y el agua entran en contacto, se inicia una reacción química que determina el paulatino endurecimiento de la mezcla, mientras exista agua en contacto con el cemento, progresa el endurecimiento del concreto.

El fraguado de la pasta de cemento es un proceso físico-químico mediante el cual pasa de un estado de plasticidad inicial a otro de cierta rigidez y firmeza. Aunque la pasta en este último estado, puede manifestar una ligera resistencia, para fines prácticos se acostumbra distinguir la etapa de fraguado de la adquisición de resistencia.

Se considera que la etapa de fraguado se inicia en el momento en que el cemento entra en contacto con el agua y termina cuando la pasta se convierte en cuerpo rígido capaz de resistir una presión arbitraria.

Durante la fabricación del concreto interesa que el fraguado no ocurra demasiado rápido, de tal suerte que se tenga suficiente tiempo para mezclarlo, transportarlo y acomodarlo en moldes. Tampoco conviene que el fraguado resulte demasiado lento porque las operaciones subsecuentes de desmolde y puesta en servicio en la obra sufriría retrasos. El proceso de fraguado es muy susceptible de cambiar con las variaciones de temperatura ambiente, con algunas limitaciones pueden suponerse que las temperaturas bajas retardan el fraguado y las altas lo aceleran.<sup>67</sup>

Resumiendo, podemos decir que antes de su endurecimiento, la mezcla del concreto experimenta dos etapas dentro de su proceso general que son el fraguado inicial y el fraguado final.

### 2.2.2 Concreto endurecido

#### ❖ Resistencia

La resistencia a compresión se puede definir como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto. Normalmente, se expresa en kilogramos por centímetros cuadrados ( $\text{kg/cm}^2$ ), mega pascales (MPa) o en libras por pulgadas cuadradas ( $\text{lb/pulg}^2$  o psi) a una edad de 28 días. Un mega pascal equivale a la fuerza de un newton por milímetro cuadrado ( $\text{N/mm}^2$ ) o 10.2 kilogramos-fuerza por centímetro cuadrado. Se pueden usar otras edades para las pruebas, pero es importante saber la relación entre la resistencia a los 28 días y la resistencia en otras edades. La resistencia a los 7 días normalmente se estima como 75% de la resistencia a los 28 días y las resistencias a los 56 y 90 días son aproximadamente 10% y 15% mayores que la resistencia a los 28 días.

La resistencia a compresión especificada se designa con el símbolo  $f'_c$  y la resistencia a compresión requerida del concreto  $f'_{cr}$  debe excederla.

Los factores que inciden en la resistencia del hormigón son:

- a) Tipo y cantidad de cemento.
- b) Relación agua/cemento.
- c) Características de los agregados.
- d) Agua.
- e) Influencia del fraguado del hormigón.
- f) Curado del hormigón.
- g) Influencia de la edad del hormigón.

TABLA 2.2.2-1: INCREMENTO DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN CON RESPECTO AL TIEMPO.

<b>INCREMENTO APROXIMADO PROMEDIO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DEL HORMIGÓN</b>	
<b>Edad (Días)</b>	<b>%Resistencia con respecto a la de 28 días.</b>
1	12
3	40
7	70
14	90
28	100
56	110
90	120
180	125

Fuente: Tecnología del Hormigón (Vitervo O'Reilly)

La resistencia a las edades de 7 y 28 días se puede relacionar mediante la fórmula que se muestra a continuación, teniendo en cuenta que es una relación aproximada ya que a edades tempranas influye notablemente las propiedades del cemento, la relación agua/cemento, la temperatura, la humedad, los aditivos, etc.

$$\text{Resis.28} = a + b * \text{Resis.7} (\text{kg/cm}^2)$$

Siendo a y b constantes que dependen de los factores anteriormente mencionados.

### **2.3 Criterios y metodología para la dosificación del hormigón con cascote de ladrillo**

Como se sabe, para el hormigón con cascote de ladrillo no existe una metodología, una normativa o una guía específica a seguir, pero basándose en la misma se puede conseguir una correcta dosificación, es por eso que este análisis se vuelve comparativo y parte de una mezcla del hormigón patrón.

Solo se cuenta con algunos elementos datos y criterios a través de los cuales, y con algunos criterios recogidos en los ensayos de laboratorio, se realizará una dosificación de mezclas de prueba que permitan llegar a los valores óptimos que se plantean, en lo

que se refiere a características físicas y mecánicas, como así también en la cantidad de hormigón en lo que se refiere a su resistencia y permeabilidad.

### ❖ **Criterios considerados en los materiales**

#### **a) Cemento**

A diferencia del hormigón convencional, el contenido total de pasta en el concreto permeable es menor que el contenido de vacíos en los agregados.

El cemento que se utilizara para la realización de los ensayos es el Cemento Portland de El Puente tipo IP-30, dicho producto cumple las especificaciones técnicas de la Norma Boliviana NB-011, y es apto para la elaboración de hormigones.

Desprende menor calor de hidratación, lo que reduce la retracción térmica debido a la inclusión de puzolana.

Tiene mayor trabajabilidad en morteros y revestimientos.

#### **b) Agregado grueso**

El agregado que se va utilizar será duro, lavado, canto rodado, no debiendo tener arcillas, arenas ni alguna otra impureza.

El agregado grueso a utilizar en los ensayos de laboratorio es grava procedente del banco del río Camacho zona la Compañía y sus propiedades físicas y mecánicas obtenidas en laboratorio se presentarán en el capítulo siguiente.

#### **c) Agregado fino**

El tipo de agregado fino que se va a utilizar será lavado, conto rodado, no debiendo tener limos o arcillas que perjudiquen la hidratación de la pasta de cemento.

El agregado fino a utilizar en los ensayos de laboratorio es grava procedente del banco del río Camacho zona la Compañía y sus propiedades físicas y mecánicas obtenidas en laboratorio se presentarán en el capítulo siguiente.

#### **d) Cascote de ladrillo**

Es un agregado procedente de machaqueo de material de mayor tamaño; sin embargo, se tomarán las mismas consideraciones que el agregado grueso, es un material semiduro, lavado, de geometría angular y textura rugosa.

El material a utilizar en los ensayos de laboratorio será procedente del desecho de fábricas de ladrillo de la ciudad y será sometido al proceso de machacado para así obtener el agregado que se utilizará para dosificar.

El ladrillo triturado, está conformado por 80% de arcilla, con el agregado del material ligante, como estiércol, cascarilla de cereales entre otros, más impurezas. Químicamente la arcilla está compuesta por: 45% a 70% de sílice, 10% a 40% de alúmina y 10% a 20% de agua.

#### **e) Agua**

la cantidad de agua en este tipo de hormigones es importante puesto que demasiada agua en la mezcla puede causar que los poros colapsen, y el agregado se lave, mientras que una cantidad inadecuada de agua impide un curado adecuado y ello puede llevar a una falla prematura de la superficie por una apreciable disminución de las adherencias. Por lo que el agua a utilizar será la mínima necesaria para recubrir cada elemento de agregado con una fina película de lechada de cemento.

#### **❖ Criterios considerados en la elaboración y colocado**

La dosificación a utilizar corresponderá a la de un hormigón tipo A ( $210 \text{ kg/cm}^2$ ) que se considera como hormigón patrón, y se reemplazará el agregado grueso (grava) por el cascote de ladrillo de manera porcentual para así realizar las comparaciones necesarias de diferentes maneras siempre tomando en cuenta y partiendo de la dosificación del hormigón patrón.

En este caso la dosificación será utilizada en peso; el hormigón debe amasarse en hormigonera, siendo conveniente, por razones de homogeneidad, verter los materiales en el orden siguiente:

- Una parte de la dosis de agua (aproximadamente la mitad)
- El cemento y la arena simultáneamente.
- El agregado grueso (grava, ladrillo o la combinación de ambos).
- El resto del agua.

La duración del amasado debe ser la necesaria para conseguir una mezcla íntima y homogénea de los distintos componentes, debiendo resultar el agregado bien cubierto por la pasta de cemento. Ello requiere en general un tiempo de amasado del orden del orden del minuto y medio; como mínimo.

Algunos tiempos de mezclado recomendados se muestran en la siguiente tabla:

Cuales quiera sean las formas de transporte, deben cumplirse las condiciones siguientes:

1. No debe transcurrir mucho tiempo entre el amasado y la puesta en obra del hormigón. Generalmente dicho intervalo no será superior de una hora cuando se empleen cementos portland comunes.
2. Durante el transporte no debe segregarse los áridos gruesos, lo que provocaría en el hormigón pérdidas de homogeneidad y resistencia. La resistencia y choques favorecen siempre a la segregación, por lo que a veces será necesario prever una suspensión especial en los vehículos de transporte.
3. Debe evitarse en lo posible que el hormigón seque durante el transporte.
4. Como característica de la masa del principio al final de cada descarga de la amasadora, no es conveniente dividir una misma amasada en distintos recipientes para su transporte.
5. Si al llegar al lugar de colocación, el hormigón acusa un principio de fraguado, masa debe desecharse y no ser puesto en obra.

El vertido y colocación del hormigón deben efectuarse de manera que no se produzca la disgregación de la mezcla. El peligro de la disgregación mayor, en general, cuando más grueso es el agregado y más discontinua su granulometría, siendo sus

consecuencias peores cuando menor es la sección del elemento que se hormigonara. Se tiene las siguientes recomendaciones:

- a) El vertido no debe efectuarse de gran altura (uno o dos metros como máximo en caída libre), procurando que su dirección sea vertical y evitando desplazamientos horizontales de la masa.
- b) La colocación se efectuará por capas de espesor inferior al que permita una buena compactación de la masa (en general, de 20 a 30 cm sin superar los 40 cm cuando se trate de hormigón en masa, ni lo 60 cm en hormigón armado).
- c) No se arrojará el hormigón con pala a gran distancia, ni se distribuirá con rastrillos para no disgregarlo.
- d) En las piezas muy armadas y, en general, cuando las condiciones de colocación son difíciles, puede ser conveniente para evitar cangrejas y falta de adherencia con las armaduras, colocar primero una capa de hormigón pobre de 2 o 3 cm para verter luego el hormigón normal.

#### ❖ **Criterios considerados en el curado del hormigón**

El desarrollo potencial de resistencias del hormigón y su durabilidad se producen gracias a la reacción química del agua con el cemento; por lo tanto, será necesario proteger el hormigón durante el tiempo necesario para que adquiera las resistencias requeridas en condiciones de humedad y temperatura en un proceso continuo que se denomina curado.

Relacionando lo expuesto anteriormente, hay tres condiciones básicas:

- Los hormigones deben estar suficientemente húmedos para garantizar la hidratación del cemento, en lo posible que este saturado (100% de humedad) o cerca de ello, ya que solo así evitaremos pérdida de humedad de la superficie del hormigón por evaporación.
- Una temperatura adecuada que le permita una buena hidratación del cemento. Cuando los diferenciales de temperatura del hormigón sean muy grandes, seguro favorecerá la pérdida de humedad por evaporación.

- Oportunidad en la iniciación del curado; se recomienda iniciar lo más pronto posible; en el hormigón es factible hacerlo tan pronto este reabsorbe el agua de exudación.

#### ❖ **Relación entre el curado y desarrollo de resistencia**

Si sabemos que la reacción química del agua con el cemento desarrolla resistencia, en los primeros 7 días de edad prácticamente desarrollara cerca del 80% de la resistencia especificada para los 28 días; es decir, esto se cumplirá si se dio un curado adecuado.

Por eso mientras más tardemos en iniciar el curado, menor potencial de resistencia disponemos.

#### ❖ **Dosificación de mezclas de hormigón con cascote de ladrillo**

A fin de simplificar el trabajo de investigación en su parte experimental, se tendrá que tomar en cuenta algunos criterios y consideraciones para volver constante algunas variables y poner en claro todas las condiciones que tienen que seguir los materiales y mezclas preparadas, para poder realizar la comparación final en los resultados que se obtengan.

Como ya se mencionó, a efectos prácticos se mantendrán constantes las cantidades de cemento y arena, variando de forma gradual el contenido de agregado grueso, reemplazándolo por el cascote de ladrillo inicialmente en un 18 % luego un 30% y por último en un 50% no así en su totalidad a efectos de no reducir demasiado la resistencia del hormigón convencional, pero asegurándose que reduzca el peso volumétrico del mismo de manera significativa tratando de obtener un hormigón ligero.

Otra variable que aparece en este caso será la cantidad de agua de amasado debido a las características constituyentes del ladrillo, por lo cual se deberá realizar un control a fin de que la mezcla que se obtenga sea de similares características a la convencional.

### **2.4 Permeabilidad de Hormigones**

La durabilidad del hormigón puede ser afectada peligrosamente por la penetración de líquidos agresivos o cuando el hidróxido de calcio que se forma como producto de hidratación del cemento es lavado por circulación del agua dentro del hormigón. Esta

penetración del líquido depende de la permeabilidad del hormigón, la que también determina la facilidad con que el hormigón puede ser saturado. Por lo tanto, también tiene una importancia fundamental en la resistencia a congelación y deshielo.

Asimismo, en el caso de hormigón armado, el ingreso de humedad y/o aire puede dar lugar a la corrosión del acero. El acero al corroerse puede llegar a aumentar un 200 por ciento su volumen, y se originan fisuras y desprendimiento del recubrimiento. También tiene relación con la presión hidrostática en el interior de las presas y por último el ingreso de agua en el hormigón afecta a las propiedades térmicas.

Recordemos que la pasta de cemento y los áridos contienen poros. Además, el hormigón tiene vacíos causados, por compactación incompleta (aire naturalmente incorporado) o por exudación. Luego los hormigones normales endurecidos de construcción, tienen volúmenes de poros comprendidos entre el 8 y 25 por ciento, Ese volumen de poros nos proporciona sólo la suma de poros en porcentual, pero nada expresa acerca del tamaño de los mismos, de su forma o de la distribución, factores que tienen notable influencia sobre esta propiedad que estamos analizando.

*“La permeabilidad en el concreto se refiere a la cantidad de migración de agua u otras sustancias líquidas por los poros del material en un determinado tiempo”*; y así ser el resultado de: la composición de la porosidad en la pasta de concreto, la hidratación o la asociación con la liberación de calor o calor de hidratación y evaporación del agua de mezcla, la temperatura del concreto, y la formación de cavidades y grietas por contracción plástica en el concreto durante el tiempo de fraguado.

#### **2.4.1 Introducción a la permeabilidad y durabilidad del hormigón**

La permeabilidad del hormigón es una propiedad fundamental que influye profundamente en la durabilidad y la vida útil de las estructuras de hormigón. Esta característica determina la tasa de ingreso de agua y sustancias agresivas, lo que conduce a diversos mecanismos de deterioro como el daño por ciclos de hielo-deshielo, la reacción álcali-agregado y la corrosión del refuerzo. La capacidad del hormigón para resistir la penetración de líquidos es, por lo tanto, un criterio principal que define su

vida útil en servicio. De hecho, la deformación y el deterioro del hormigón están intrínsecamente ligados a su permeabilidad, ya que esta controla la tasa de infiltración de sustancias y el movimiento de líquidos de entrada dentro de la estructura del hormigón.

Tradicionalmente, la relación agua/cemento (a/c) ha sido considerada el factor principal que controla la permeabilidad del hormigón, con relaciones a/c más bajas generalmente asociadas a un hormigón más denso y menos permeable. Sin embargo, la investigación contemporánea ha demostrado que la relación a/c no es el único factor que controla la permeabilidad del hormigón. Se ha comprendido que la permeabilidad es un fenómeno multifactorial, influenciado por una compleja interacción de propiedades del material. Por ejemplo, incluso con la misma relación a/c, dos mezclas de hormigón pueden presentar una permeabilidad muy variada debido a diferencias en el volumen de pasta de cemento y agua.

Más allá de la relación a/c, otros parámetros críticos que influyen en la permeabilidad incluyen:

- **Granulometría del agregado:** Se ha demostrado que las mezclas de hormigón con la misma relación a/c pueden tener una permeabilidad diferente únicamente debido a la granulometría del agregado. Esto subraya la importancia del empaquetamiento del agregado y su influencia en el volumen de pasta y la estructura de poros.
- **Porosidad y estructura de poros:** La permeabilidad del hormigón es fundamentalmente una función de su porosidad, abarcando tanto el volumen total de poros como su distribución. La permeabilidad intrínseca depende de la porosidad, la distribución del tamaño de los poros, la rugosidad de los poros, las constricciones del espacio poroso y la conectividad de los canales internos de los poros. Si bien la porosidad está generalmente vinculada a la permeabilidad, algunas investigaciones han indicado que la porosidad y el tamaño de los poros no siempre tienen una relación directa con la permeabilidad. Esta aparente contradicción sugiere que la relación es más

compleja de lo que parece, implicando que la tortuosidad y la conectividad de los poros son más críticas que solo su volumen o tamaño. Esta complejidad justifica la necesidad de métodos empíricos, como los desarrollados por Valenta, que capturan el efecto integrado de estas intrincadas características microestructurales en un valor de permeabilidad práctico.

- **Otros factores:** La relación cemento/agregado, el tamaño de grano, la textura superficial, la forma, la resistencia y la dureza del agregado, así como las microfisuras prematuras durante la hidratación temprana, también desempeñan roles significativos en la determinación de la permeabilidad.

Ante la naturaleza multifacética de la permeabilidad del hormigón, los investigadores han buscado métodos prácticos para cuantificarla. El trabajo de Valenta destaca como una contribución significativa, particularmente en el desarrollo de una fórmula para convertir la profundidad medible de penetración del agua bajo presión en un coeficiente de permeabilidad. Este enfoque se alinea con métodos de ensayo estándar como la norma EN 12390-8, que se centra en la profundidad de penetración.

#### **2.4.2 Estructura de poros y capilares del hormigón endurecido y su vinculación con la permeabilidad y absorción.**

Un mismo volumen de poros puede estar compuesto de una pequeña cantidad de poros grandes y oquedades, o bien, de numerosos poros de tamaños medio, o finalmente, de una infinidad de poros minúsculos. En general se trata de un conjunto de poros de los más diversos tamaños.

Consideramos la forma, en que dichos vacíos se originan en el hormigón endurecido.

a) En primer lugar, la necesidad de obtener mezclas trabajables y que permitan llenar con facilidad los encofrados, obliga a utilizar una cantidad de agua de mezclado mucho mayor que la necesaria para completar la hidratación y el endurecimiento del cemento, que es del orden del 20 por ciento del peso de cemento, quedando la mayor parte de ella como agua libre en la masa del hormigón. El volumen que esta agua libre ocupa, está inicialmente determinado por la razón agua/cemento y representa espacio libre

para ser ocupado por los productos de hidratación del cemento. De ahí la importancia que revisten los bajos contenidos unitarios de agua y un curado eficiente y prolongado. Los diámetros de estos poros son del orden de  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$  centímetros. El volumen total estará comprendido entre aproximadamente 8 y 40 por ciento del volumen de la pasta para razones agua/cemento dentro de la gama de valores de trabajo normal.

b) En segundo lugar, el volumen sólido de los productos que se forman por la hidratación del cemento, es menor que la suma de los volúmenes de agua y sólido del cemento que entran en la reacción. Así es como resulta imposible que la pasta endurecida de cemento y agua llene íntegramente el espacio que originariamente ocupaba la misma en estado fresco.

La consecuencia es que la pasta endurecida contiene cierta cantidad de vacíos. Estos pequeñísimos poros del gel, de diámetros del orden de  $10^{-7}$  centímetros ocupan aproximadamente el 25 por ciento del volumen aparente de los productos de hidratación.

c) En cuanto a los agregados, que constituyen algo más del 70 por ciento del volumen de hormigón, influyen sobre las características de aquél. El volumen de poros de los agregados del tipo normal varía entre 1 y 5 por ciento y sus diámetros son variables y del orden de los mayores diámetros de los canales capilares de la pasta.

d) El hormigón contiene cierta cantidad de aire natural o intencionalmente incorporado en su masa. Este volumen puede variar entre 1 y 10 por ciento aproximadamente, dependiendo del tipo y de la cantidad de agente incorporador de aire empleado y de otras circunstancias. Los diámetros oscilan entre  $10^{-1}$  a  $10^{-3}$  centímetros. Asimismo, si la mezcla no está correctamente proyectada o si existen defectos de compactación, en las estructuras se observan los tan indeseables nidos de abeja.

e) Otro tipo de vacíos se desarrolla cuando el hormigón está en estado plástico, inmediatamente después de haber sido colocado en obra. Estando las partículas sólidas, incluso el cemento, en un estado de equilibrio inestable, al producirse el asentamiento de dichas partículas como consecuencia de la acción de las fuerzas gravitatorias, el

agua es forzada a dirigirse hacia las partes superiores, comenzando entonces la formación de una serie de canales capilares que pueden llegar hasta las superficies exteriores de las estructuras (exudación). Estos pequeños e innumerables canales de agua interconectados, constituyen una red dentro de la masa, del hormigón.

Parte del agua que asciende como consecuencia de la exudación, es detenida debajo de algunas de las partículas de agregados de mayor tamaño, constituyendo una película de agua, que tenderá a desaparecer dejando vacíos, que constituyen zonas de debilidad, de alta razón agua/cementa y de pobre adherencia entre la pasta y los agregados. Por lo tanto, el hormigón es un material poroso, con vías de acceso abiertos al ingreso, dentro de su masa, de sustancias que están en contacto con el hormigón y también, naturalmente, al egreso, desde su masa al exterior de sustancias en condiciones de recorrer los poros y capilares en sentido inverso. Esto también indica que la superficie de contacto del hormigón con un medio agresivo, no es solamente la externa, delimitada por las formas exteriores de la estructura, sino que a ella debe agregarse la enorme superficie interna constituida por los poros, capilares. Resumiendo, el agua pasa por los capilares del hormigón, por los de la pasta, también puede circular por los correspondiente al gel y pasa en la interfase entre el árido grueso y la pasta.

La circulación de los líquidos, agresivos o no, pueden producirse tanto por permeabilidad, es decir líquido sometido a una presión exterior, como por capilaridad. (absorción capilar).

#### **2.4.3 Ensayo de Permeabilidad**

La absorción, que mide el volumen de poros en el hormigón, es un concepto distinto al de permeabilidad.

La permeabilidad del hormigón no es una simple función de su porosidad, pues depende también del tamaño, distribución y continuidad de dichos poros.

La permeabilidad de la pasta de cemento varía con el progreso de la hidratación. En la pasta fresca, el escurrimiento de agua es controlado por el tamaño, forma y concentración de los granos de cemento originales. Con el progreso de la hidratación,

la permeabilidad decrece rápidamente porque el aumento del volumen del gel es aproximadamente dos veces el volumen de cemento no hidratado, por lo tanto, el gel gradualmente llena el espacio que originalmente ocupa el agua que se va evaporando.

En la pasta endurecida de cierta edad, la permeabilidad depende del tamaño, forma y concentración de las partículas de gel y si los capilares son continuos o no.

En consecuencia, los hormigones que tengan un curado adecuado serán más impermeables que otros con curado deficiente.

Para pastas hidratadas de la misma edad, la permeabilidad es menor a medida que disminuye la razón agua/cemento.

La permeabilidad del hormigón es afectada también por las características del cemento. Asimismo, para las distintas composiciones en compuestos de los cementos, al variar las velocidades de hidratación, queda afectada la permeabilidad, pero sin que la permeabilidad a larga edad sufra variaciones.

La diferencia entre la permeabilidad de la pasta de cemento y el hormigón que contiene la pasta de la misma razón agua/cemento, está en función de la permeabilidad propia del árido. Si el árido tiene poca permeabilidad, se reduce el área efectiva a través de la cual puede escurrir el agua; en otras palabras, el hormigón logrado con ese árido, tendrá menor permeabilidad que la pasta de la misma razón agua/cemento.

Para conseguir hormigones de baja permeabilidad es fundamental, entre otros factores, el empleo de agregados con buena granulometría y limitación del agua de mezclado. Deben tener buen mezclado, consistencias aptas, una compactación completa y un curado en condiciones favorables; la sustitución del cemento portland por cenizas volantes o puzolanas, reduce la permeabilidad. Davis y Blanks, encontraron que, en muchos casos, la reducción alcanza a cifras significativas. Esto último es muy importante para presas, donde la permeabilidad es en general un factor, más importante que la resistencia, más si el agua embalsada es agresiva, o está emplazada en zonas de baja temperatura.

#### **2.4.4. Manual del equipo de permeabilidad del hormigón.**

Este instrumento se utiliza para determinar la profundidad de penetración del agua bajo presión en una muestra de hormigón.

Hasta 6 muestras se someten simultáneamente a la penetración de agua a presión en su cara inferior.

La cantidad de agua penetrada también se puede medir a través de las buretas graduadas instaladas en la parte superior del aparato.

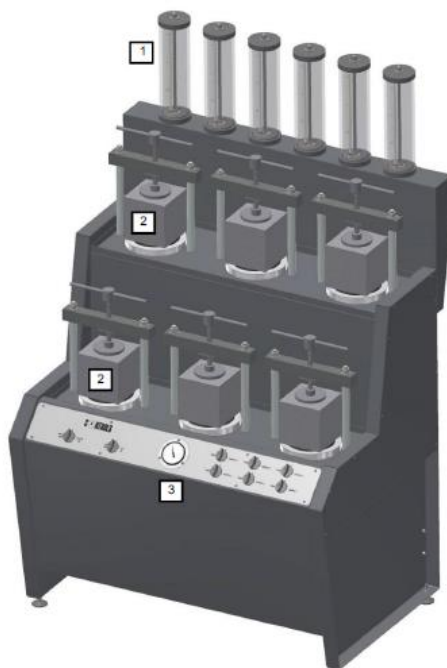
El aparato consta de una robusta estructura de acero con sistema de sujeción, que incorpora el circuito hidráulico, válvulas, manómetros para comprobar la presión del agua y buretas transparente de medición montadas en la parte superior del aparato.

Preparación de las probetas:

- La muestra debe ser cubica, cilíndrica o prismática con una dimensión mínima de la superficie de la muestra a ensayar no inferior a 150 mm y ninguna dimensión inferior a 100 mm,
- La edad de probetas para ser ensayada debe mayor de 28 días y menor de 1 año ya que superior a esta fecha el valor de la penetración del agua ya no es consistente.
- Previo 24 horas antes del ensayo se hará el desecado de las probetas a una temperatura de  $50 \pm 5$  °C y se dejará enfriar a temperatura ambiente.
- Se hará rugosa la cara del ensayo por cepillado o repicado
- La muestra se aplicará a una presión de  $5 \pm 0.5$  bar durante un tiempo de  $72 \pm 2$  hr. Durante la prueba se observará periódicamente la apariencia de la superficie de la muestra de prueba no expuesta a presión del agua para notar la presencia de agua. Si se observa una fuga, considere la validez del resultado y registre el hecho.
- Al final de un periodo de  $72 \pm 2$  hr, la muestra se divide en dos utilizando un dispositivo de tracción indirecta.

- Donde se examinarán las caras de la muestra rota serán examinadas, se dibujará el perfil de penetración del agua y se registra la profundidad máxima de penetración.

FIGURA 2.4.4-1: EQUIPO DE PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN



Fuente: Manual de permeabilidad del hormigón marca controls

#### 2.4.5 Descripción del ensayo de penetración de agua bajo presión de acuerdo a la norma UNE-EN 12390-8

Con objeto de facilitar la exposición de este trabajo se resume a continuación el contenido de la norma:

##### ❖ Aplicación

Este ensayo se aplica a hormigones de débil permeabilidad.

##### ❖ Probetas

- Forma: Preferentemente cúbicas o cilíndricas de ISO, 200 ó 300mm de arista ó diámetro. Las segundas tendrán una relación espesor/diámetro igual o mayor a 0,5. El espesor no será inferior a 100 mm.

- Número: Recomendable mayor o igual a 3 por ensayo.
- Edad: No se especifica
- Preparación: Hacer rugosa la cara de ensayo por cepillado o repicado.

#### ❖ Presión

Para la realización del ensayo se someterá a 5 bar de presión durante 72 horas en el equipo de Sistema de ensayo de Permeabilidad del Concreto.

#### ❖ Procedimiento de ensayo

- Agua: De la red, destilada o desionizada.
- Desecado previo de probetas: Si, durante las 24 horas previas al ensayo en estufa a  $50 \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Se deja enfriar a  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ .
- Pesado antes del ensayo: Si, (densidad aparente tras desecado)
- Condiciones del ensayo: Las de laboratorio, tomando nota de ellas (humedad y temperatura).
- Aplicación de la presión: Salvo que se indique lo contrario, en la dirección del hormigonado. En probetas enmoldadas, puede ejercerse sobre la cara de cerrado.
- Observaciones intermedias: Aparición de manchas en las caras libres anotando presión y, si es posible, el momento. Si hay fugas, parar el ensayo.
- Rotura de la probeta: Por ejemplo, según método brasileño previo secado del exceso de agua. Se marca el perfil del frente de penetración y se mide apoyando la probeta sobre la cara expuesta.

#### ❖ Edad de las probetas

La norma UNE no establece nada respecto a la edad de las probetas en el momento de realizar el ensayo. Únicamente indica que el informe debe contener la fecha de confección del hormigón y de las probetas, así como la fecha del ensayo. En el resto de las normas se establece una edad de 28 días para la realización de los ensayos.

A este respecto debe recordarse que los estudios consultados establecen que, con carácter general, para relaciones agua/cemento de hasta 0,60 la permeabilidad de la pasta de cemento no varía apreciablemente a partir de los 28 días y que para relaciones de 0,70 la variación es muy pequeña a partir de una edad de 90 días. Parece, pues, razonable que la norma, como las otras de su tipo establezca esa edad mínima de 28 días para las probetas.

#### ❖ **Tratamiento superficial**

Consiste en realizar un tratamiento superficial de la cara sobre la que se va aplicar la presión, justo en el área de ensayo, mediante un sistema adecuado (por ejemplo, por cepillado en caso de hormigón recién fraguado o repicado con alcotana, para hormigones más endurecidos).

#### ❖ **Superficie de aplicación de la presión**

La norma establece la prescripción de que el diámetro del área de ensayo sea la mitad del diámetro o arista de la probeta. En este punto, también se observa una total coincidencia entre todas las normas consultadas.

Esta prescripción obedece a un doble motivo:

- 1) Por un lado, se pretende establecer una base de medición común para todos los ensayos, que permita su comparación. La forma del frente de penetración en el momento en que la penetración máxima tiene un valor determinado depende del diámetro del área de aplicación de la presión.
- 2) Por otro lado, se pretende aplicar la presión en una zona que esté lo suficientemente alejada de los bordes de la probeta donde es previsible que el hormigón pueda tener un distinto comportamiento que en el núcleo.

#### ❖ **Dirección de aplicación de la presión**

Lógicamente, el establecimiento de las condiciones de la norma UNE tiene su origen en la necesidad de partir de iguales situaciones para todas las probetas, más que en consideraciones respecto al estado del hormigón en obra. Que la aplicación de la

presión sea en la dirección de hormigonado permite la realización de ensayos sobre probetas cilíndricas, aunque suponga una contradicción con la situación más habitual en la realidad, en la que la presión se ejerce perpendicularmente a la dirección de hormigonado (muros de contención de sótanos, depósitos, presas etc.).

#### **2.4.6 Ensayo de determinación de la densidad, la absorción de agua y vacíos en el concreto endurecido según norma ASTM C642-13.**

Este método de ensayo cubre las determinaciones de la densidad, el porcentaje de absorción de agua y el porcentaje de vacíos en el concreto endurecido.

La norma aplicada es esencialmente equivalente a la norma ASTM C642-13.

##### **❖ Aplicación**

Siempre que sea posible, la muestra debe consistir de varias porciones individuales de concreto, cada una de las cuales se debe ensayar por separado. Las porciones individuales pueden ser: porciones de cilindros, de núcleos extraídos del concreto o de vigas de cualquier forma o tamaño, excepto que el volumen de cada porción no debe ser menor de 350 cm<sup>3</sup>.

##### **❖ Procedimiento de ensayo**

**Masa seca al horno** – Se determina la masa de las porciones y se secan en un horno de secado a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  por no menos de 24h. Después se remueven los especímenes del horno, se secan en aire seco (preferiblemente en un desecador a una temperatura de 20 a 25 °C y se les determina su masa. Este valor de la masa seca al horno se designa como: A

**Masa saturada después de inmersión el agua** – Después de su secado final, enfriado y determinación de la masa, los especímenes se sumergen en agua a temperatura de aproximadamente 21°C por un período no menor de 48h. Con una toalla se remueve la humedad superficial de los especímenes para dejarlos en condición de saturados de superficie seca y se les determina su masa. El valor obtenido de masa saturada de superficie seca después de su inmersión en agua, se designa como: B.

**Masa saturada después de ebullición en agua** – El espécimen procesado cómo se describe, se coloca en un recipiente adecuado, cubierto con agua potable, y se hierve por un período de 5h. Luego se le deja enfriar al aire por pérdida natural de calor, por un período no menor de 14h, hasta que su temperatura final sea de 20 a 25°C. Se le remueve la humedad superficial con una toalla y se determina la masa del espécimen. La masa saturada de superficie seca después de ebullición, se designa como: C.

**Masa sumergida aparente** – Después de su inmersión en agua y ebullición, los especímenes se suspenden dentro del agua por un alambre y se determina su masa sumergida aparente, que se designa como: D

#### ❖ Cálculos a realizar

Usando los valores de la masa determinados de acuerdo a los procedimientos descritos, se procede a la ejecución de los siguientes cálculos.

- Absorción después de inmersión.  $\% = [(B-A) / A] \times 100 \quad (1)$

- Absorción después de inmersión y ebullición.  $\% = [(C-A) / A] \times 100 \quad (2)$

- Densidad seca global (o bruta).  $= [A / (C - D)] \cdot \rho = g_1 \quad (3)$

- Densidad global (o bruta) después de inmersión.  $= [B / (C - D)] \cdot \rho \quad (4)$

- Densidad global (o bruta) después de inmersión y ebullición.  $= [C / (C - D)] \cdot \rho \quad (5)$

- Densidad aparente.  $= [A / (A - D)] \cdot \rho = g_2 \quad (6)$

- Volumen de vacíos (espacio de poros permeables).  $\% = (g_2 - g_1) / g_2 \times 100 \quad (7)$

O bien  $\% = (C - A) / (C - D) \times 100$

Donde:

A = Masa de muestra seca al horno, al aire, g

B = Masa de muestra saturada de superficie seca después de inmersión, g

C = Masa de muestra saturada de superficie seca después de inmersión y ebullición, g

D= Masa sumergida aparente de la muestra suspendida en agua, después de inmersión y ebullición, g

$g_1$ = Densidad global (bruta) seca, Mg/m<sup>3</sup>

$g_2$ = Densidad aparente, Mg/m<sup>3</sup>

$\rho$ = Densidad del agua = 1Mg/m<sup>3</sup> = 1g/cm<sup>3</sup>

#### 2.4.7. Ecuación de Valenta Oldrich.

El Dr. Oldrich Valenta, un ingeniero checo, fue una figura influyente en el estudio de la durabilidad del hormigón, y sus trabajos en la década de 1950 y 1960 sentaron las bases para comprender la permeabilidad al agua del hormigón. Valenta no propuso una única "ecuación" universal para calcular la permeabilidad en todos los casos, sino que se enfocó en el ensayo de penetración de agua bajo presión como una herramienta práctica y desarrolló criterios y una fórmula para correlacionar la profundidad de penetración con el coeficiente de permeabilidad.

Una de las formas más citadas para convertir la profundidad de penetración (X) al coeficiente de permeabilidad ( $k_w$ ) es:

$$K_w = \varepsilon \frac{x^2}{2.H.t} \quad (8)$$

Donde:

$K_w$ : Coeficiente de permeabilidad al agua (en m/s o m/día).

X: Profundidad de penetración del agua (en metros). Es la profundidad máxima alcanzada por el frente de agua.

$\varepsilon$ : Fracción del volumen del hormigón ocupado por los poros (porosidad efectiva por donde el agua puede fluir. Este parámetro representa la parte de los poros que se llena con agua bajo presión.

H: Altura de la columna de agua o presión hidráulica aplicada (en metros de columna de agua,  $H=P/(\rho_w \cdot g)$ , donde P es la presión en Pa,  $\rho_w$  es la densidad del agua y g es la aceleración de la gravedad).

t: Tiempo de exposición bajo presión (en segundos).

**Consideraciones sobre la ecuación:** Es importante notar que la porosidad efectiva ( $\epsilon$ ) en esta ecuación no es la porosidad total del hormigón, sino la fracción de los poros interconectados que contribuyen al transporte de agua bajo presión. Valenta sugirió rangos típicos para este valor en hormigones de buena calidad.

#### **2.4.7.1. Criterios y Enfoque de Valenta para la Permeabilidad al Agua:**

Los criterios de Valenta se basan en la observación de la profundidad a la que el agua penetra en una probeta de hormigón bajo una presión hidrostática constante durante un período de tiempo determinado. Él argumentó que la profundidad de penetración es un indicador más directo y práctico de la impermeabilidad que el coeficiente de permeabilidad obtenido por métodos de flujo continuo, especialmente para hormigones de baja permeabilidad donde el flujo es extremadamente lento y difícil de medir directamente.

Los puntos clave del enfoque de Valenta son:

##### **1. Ensayo de Penetración de Agua bajo Presión:**

- Se utiliza una probeta de hormigón (generalmente cilíndrica) sellada en sus lados.
- Se aplica una presión de agua constante (típicamente 0.5 MPa o 5 bar, aunque puede variar) en una de las caras de la probeta.
- La presión se mantiene durante un tiempo predefinido (comúnmente 72 horas).
- Después del período de ensayo, la probeta se parte por la mitad (generalmente a lo largo de su eje) y se mide la profundidad máxima a la que el agua ha penetrado visiblemente en el hormigón. Esta zona húmeda suele ser más oscura.

##### **2. Correlación con la Ley de Darcy:** Valenta, reconociendo las dificultades de aplicar directamente la Ley de Darcy para medir el flujo en hormigones de muy

baja permeabilidad, propuso una ecuación que relaciona la profundidad de penetración observada con el coeficiente de permeabilidad. Su fórmula es una adaptación que considera la difusión del agua en el hormigón bajo un gradiente de presión.

3. **Criterio de Impermeabilidad:** Valenta estableció un criterio práctico para considerar un hormigón como "impermeable". Basado en sus estudios, si la profundidad de penetración (X) es inferior a un determinado valor (comúnmente 50 mm, aunque esto puede variar ligeramente según la norma o el código), el hormigón se considera suficientemente impermeable para la mayoría de las aplicaciones hidráulicas.

#### **Aplicación de los Criterios de Valenta:**

Los criterios y la metodología de Valenta son ampliamente utilizados, especialmente en las normas europeas (como la norma EN 12390-8 para el ensayo de penetración de agua bajo presión) y en la práctica de la ingeniería civil para:

- **Diseño de Estructuras Hidráulicas:** Presas, depósitos de agua, canales, túneles, cimientos en contacto con el agua subterránea, estructuras marinas. Para estas aplicaciones, la impermeabilidad es un requisito crítico de durabilidad.
- **Evaluación de la Durabilidad del Hormigón:** La permeabilidad es un indicador clave de la durabilidad del hormigón, ya que un hormigón más permeable permite una mayor intrusión de agentes agresivos (iones cloruro, dióxido de carbono, sulfatos) que pueden llevar a la corrosión del acero de refuerzo o a la degradación de la pasta de cemento.
- **Control de Calidad en Obra:** El ensayo de penetración de agua es un método relativamente sencillo y reproducible para evaluar la calidad del hormigón fresco y endurecido en términos de su resistencia a la penetración de agua. Permite verificar si el hormigón cumple con los requisitos de impermeabilidad especificados.

- **Optimización de Mezclas de Hormigón:** Permite evaluar la efectividad de diferentes relaciones agua/cemento, tipos de cemento, aditivos (plastificantes, reductores de permeabilidad) y curado en la mejora de la impermeabilidad del hormigón.

#### 2.4.7.2. Ventajas del enfoque de Valenta:

- **Práctico y Visual:** La medición de la profundidad de penetración es relativamente sencilla y visualmente detectable.
- **Relevante para Aplicaciones de Durabilidad:** Proporciona un indicador directo de la resistencia del hormigón a la entrada de agua y, por extensión, de otros agentes agresivos.
- **Sensible a la Calidad del Hormigón:** La profundidad de penetración es muy sensible a la relación agua/cemento, el grado de compactación y el curado del hormigón, lo que lo hace un buen indicador de la calidad general.

#### 2.4.7.3. Adaptación a partir de los Principios de Darcy planteada por Valenta para la obtención de la Ecuación de Permeabilidad

La ecuación de Valenta no es una deducción algebraica directa de la ley de flujo en estado estacionario de Darcy. Más bien, representa una adaptación pragmática que permite la cuantificación de la permeabilidad en condiciones donde el agua penetra en el hormigón en lugar de fluir continuamente a través de él. Esto es particularmente relevante para el "hormigón de buena calidad" donde el flujo a través de la muestra es insignificante. De hecho, se ha reconocido que, si bien el coeficiente de permeabilidad del agua derivado de la Ley de Darcy (donde se logra un flujo constante) no puede calcularse con el método de penetración, la profundidad de penetración del agua medida puede utilizarse para obtener un valor aproximado de este coeficiente mediante la ecuación de Valenta. Esto confirma que la fórmula de Valenta proporciona una aproximación en lugar de un coeficiente de Darcy directo, reconociendo los diferentes regímenes de flujo.

El genio de Valenta reside en su capacidad para adaptar los principios de Darcy a la naturaleza transitoria de la penetración del agua en el hormigón.

- **Del flujo en estado estacionario a la penetración transitoria:** La Ley de Darcy describe el caudal volumétrico ( $Q$ ) bajo un gradiente hidráulico constante ( $\Delta h/\Delta L$ ) en un medio saturado. La fórmula de Valenta, sin embargo, se ocupa de la profundidad de penetración ( $X$ ) durante un tiempo específico ( $t$ ) bajo una carga hidráulica dada ( $H$ ). Este cambio de una tasa de flujo a una profundidad de penetración en el tiempo es crucial. La inclusión explícita del tiempo ( $t$ ) en la fórmula de Valenta significa la naturaleza transitoria del ingreso de agua en el hormigón. Esta es una desviación clave del supuesto de estado estacionario de la Ley de Darcy clásica. La relación donde la profundidad de penetración es lineal con la raíz cuadrada del tiempo es característica de procesos de difusión, que son transitorios. Valenta esencialmente relaciona este comportamiento transitorio con un coeficiente de permeabilidad.
- **Papel de la Porosidad ( $\epsilon$ ):** Mientras que la conductividad hidráulica de Darcy ( $K_w$ ) tiene en cuenta implícitamente la estructura de poros del medio, la fórmula de Valenta incluye explícitamente la porosidad ( $\epsilon$ ). Este parámetro, a menudo determinado por el aumento de masa debido al llenado de poros con agua, considera el volumen de vacíos que pueden llenarse, contribuyendo a la saturación, incluso si no forman caminos de flujo continuos. La inclusión explícita de la porosidad en la fórmula de Valenta, que no es un término directo en las formas comunes de la Ley de Darcy (aunque la permeabilidad intrínseca  $k'$  está relacionada con ella), sugiere que la fórmula de Valenta captura aspectos de la capacidad de almacenamiento del sistema de poros además de sus propiedades conductivas. Esto la hace más completa para la evaluación de la durabilidad del hormigón, ya que el ingreso de agua puede conducir a la saturación y problemas de durabilidad (por ejemplo, daños por congelación-descongelación, ataque químico) incluso sin un flujo continuo a través de la muestra.

Valenta utilizó eficazmente los principios subyacentes de la mecánica de fluidos una carga de presión impulsora ( $H$ ) que causa el movimiento del fluido a través de un medio poroso con un cierto volumen de vacíos ( $\epsilon$ ) para formular un coeficiente práctico para el hormigón. Mientras que la Ley de Darcy se centra en la tasa de flujo a través de un medio saturado, la fórmula de Valenta se centra en la extensión de la penetración en un medio típicamente no saturado. La "deducción" es, por lo tanto, una reinterpretación y reformulación de la permeabilidad para un escenario específico y no idealizado, común en la ingeniería del hormigón. Permite a los ingenieros obtener un "valor aproximado" de la permeabilidad que es prácticamente útil para evaluar la durabilidad.

TABLA 2.4.7.3-1: PARÁMETROS DE LA FÓRMULA DE PERMEABILIDAD DE VALENTA

Parámetro (Símbolo)	Definición	Unidades Típicas	Notas/Contexto
Coeficiente de Permeabilidad al Agua ( $K_w$ )	Resistencia del hormigón a la penetración del agua	m/s (o cm/s)	Resultado del cálculo, análogo a la conductividad hidráulica de Darcy.
Profundidad de Penetración del Agua ( $X$ )	Distancia máxima que el agua penetra en el hormigón bajo presión.	m (o mm)	Medida experimentalmente al partir la muestra; el hormigón húmedo es más oscuro.
Porosidad / Volumen de Poros Aislados ( $\epsilon$ )	Fracción de volumen de los poros que se llenan de agua.	Adimensional (o fracción)	Puede determinarse por el aumento de masa de la muestra.
Presión Aplicada como Carga Hidráulica ( $H$ )	Altura de la columna de agua equivalente a la presión aplicada.	m (o equivalente en Pa/bar)	Fuerza impulsora para la penetración del agua.
Tiempo bajo Presión ( $t$ )	Duración durante la cual se aplica la presión de agua.	s	Período de ensayo.

Fuente: Valenta, O. (1964). The Permeability and Durability of Concrete.

# **CAPÍTULO III**

## **DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1 Generalidades**

En este capítulo se desarrollará todo en cuanto se refiere a la parte práctica de los ensayos que se efectuaron en laboratorio, como también a los procedimientos de dosificación de mezclas de hormigón;

Los cuales se desarrollan a continuación:

- Detalle de las planillas que se realizaron en la caracterización de los materiales que fueron utilizados en la mezcla de prueba.  
Son planillas estandarizadas por el laboratorio de suelos y hormigones de la U.A.J.M.S., en las cuales se puede apreciar cada uno de los resultados requeridos para poder abarcar el estudio y conseguir los objetivos propuestos.
- Detalle del cálculo de la dosificación realizada para la mezcla de prueba del hormigón patrón, que sirve de base para el hormigón con cascote de ladrillo.
- Detalle de las planillas que contienen los resultados de roturas de hormigones, que se procesaron para obtener los datos y resultados de compresión requeridos.
- Detalle de las planillas que contiene los resultados de los ensayos de penetración de agua que se realizaron.
- Detalle de las planillas que contiene los resultados de los ensayos de % de espacios vacíos en hormigón endurecido que se realizaron.
- Diagramas de los resultados obtenidos.
- Diagramas comparativos de los resultados de las mezclas.

#### **3.2 Ensayos a los componentes del hormigón para caracterización de los componentes de la mezcla.**

##### **3.2.1 Determinación de la finura del cemento**

El objetivo de este ensayo es la determinación de la finura del cemento por medio del tamizado por el tamiz de malla N°200.

##### **➤ Equipo utilizado**

1 tamiz N°200.

1 balanza de capacidad de 100 gr. y una sensibilidad al 0,5.

1 brocha.

➤ **Se calcula utilizando la formula.**

$$F = \frac{Pr}{50} * 100 \quad (9)$$

Donde:

F= Finura del cemento expresado como porcentaje en peso, del residuo que no pasa el Tamiz N°200.

Pr= Peso del residuo que no pasa el tamiz N°200 en gr.

➤ **Resultados**

La planilla de cálculo correspondiente se presenta en anexo A-1 del presente trabajo.

TABLA 3.2.1-1: VALORES DE FINURA DEL CEMENTO.

ENSAYO N°	Finura del Cemento %
1	1,36
2	1,46
3	1,38
Promedio	1,4

Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 3.2.1-1: MATERIALES Y EQUIPOS EMPLEADOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA FINURA DEL CEMENTO.



### 3.2.2 Determinación del peso específico del cemento (ASTM C 188 AASHTO T 133)

El ensayo tiene por objeto, presentar un método para determinar el peso específico del cemento, el valor que aquí se determina no se usara para el diseño, solo se presentara el método como referencia ya que los materiales del laboratorio ya están gastados y son poco confiables, para el diseño de la mezcla se usara el peso específico que nos brinda la especificación técnica del cemento El Puente.

#### ➤ **Equipo**

- Un matraz normal.
- Balanza sensible a 0,001 gr.
- Pipeta.
- Un termómetro.

#### ➤ **Insumos**

- Gasolina.
- Material de limpieza.
- Muestra de cemento.
- Embudo.

#### ➤ **Calculo.**

La diferencia entre las cantidades que representan el nivel final y el nivel inicial del líquido nos da el volumen de líquido desplazado por el cemento usado es el ensayo, luego:

$$P.E. = \frac{\text{Peso del cemento en gramos.}}{\text{Volumen desplazado en ml.}} \quad (10)$$

#### ➤ **Resultados.**

La planilla de cálculo correspondiente se presenta en el anexo A-1 del presente trabajo.

TABLA 3.2.2-1: VALORES DE PESO ESPECÍFICO DEL CEMENTO.

MUESTRA N°	Peso Especifico de cemento (kg/m <sup>3</sup> )
1	3168,32
2	3152,71
3	3168,32
Promedio	3163,11

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.2.3 Análisis granulométrico de los agregados (ASTM C-136).

Este método de ensayo abarca el procedimiento para la determinación de los tamaños de las partículas de agregado fino y grueso empleando tamices de aberturas cuadradas.

Estos porcentajes retenidos se calcularán tanto los parciales como acumulados, en cada malla, para poder graficar los valores y ver si está en los límites permitidos por la norma ASTM C33.

#### ➤ Materiales y equipos.

- Balanza electrónica.
- Juego de tamices. GRAVA 2 ½”, 2”, 1½”, 1”, ¾”, ½”, 3/8”, N°4  
ARENA N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100, N°200
- Muestra de grava (obtenida por cuarteo)
- Muestra de arena (obtenida por cuarteo)
- Brochas para limpiar los tamices.
- Recipientes o taras.

FIGURA 3.2.3-1: ANÁLISIS GRANULOMETRICO DEL AGREGADO GRUESO (GRAVA Y LADRILLO)



FIGURA 3.2.3-2: ANÁLISIS GRANULOMETRICO DEL AGREGADO FINO.



#### ➤ Cálculo

El peso del material retenido sobre cada tamiz será anotado y expresado como sigue:

- Por cinto retenido sobre cada tamiz.
- Por ciento total que pasa por cada tamiz.

#### ➤ Resultados.

Las planillas de cálculo y las curvas granulométricas correspondientes se presentan en anexo A-1 del presente trabajo.

Para el agregado Grueso:

Tamaño máximo del agregado: 1 ½"

Contenido de humedad: 0,74%

Para el cascote de ladrillo:

Tamaño máximo del agregado: 1 ½"

Para el agregado fino:

Modulo de finura: 2,9

Contenido de humedad: 1,22%

### 3.2.4 Determinación del peso específico y absorción del agregado grueso (ASTM C-127)

El ensayo que se describe a continuación tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua expresada como porcentaje que absorbe el agregado grueso cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas.

#### ➤ Material y equipo utilizado

El equipo a utilizar es el siguiente:

- Una balanza sensible con capacidad de 20 kg.
- Cesto de alambre o cilindro metálico de 20 cm de diámetro y 20 cm de alto. El cesto hecho con malla de 4,75mm. de abertura.
- Un recipiente en el que se puede sumergir la cesta de alambre y un aparato para suspender la cesta cuando se sumerge, con el fin de obtener el peso de la muestra sumergida.

#### ➤ Muestra

La muestra consiste aproximadamente en 5 kg de material separado por un método de cuarteo de manera que todo el material queda sobre el tamiz 3/8.

#### ➤ Cálculos

$$\text{Peso Específico a granel} = \frac{A}{B-C} \quad (11)$$

$$\text{Peso Específico saturado sup. Seca} = \frac{B}{B-C} \quad (12)$$

$$\text{Peso Específico aparente} = \frac{A}{A-C} \quad (13)$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{B-A}{A} * 100 \quad (14)$$

Donde:

A=Peso de la muestra secada en horno en gr.

B=Peso de la muestra saturada, pero con superficie seca en gr.

C=Peso de la muestra saturada dentro del agua en gr.

### ➤ Resultados

Los valores que se muestran son datos promedio, las planillas de cálculo para cada material se encuentran en Anexo A-1.

TABLA 3.2.4-1: VALORES DE PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO.

MUESTRA	PESO ESPECIFICO AL GRANEL (kg/m <sup>3</sup> )	PESO ESPECIFICO S.S.S. (kg/m <sup>3</sup> )	PESO ESPECIFICO APARENTE (kg/m <sup>3</sup> )	% DE ABSORCION
GRAVA	2589,821	2628,122	2692,965	1,479
LADRILLO	1991,698	2224,531	2596,181	11,690

Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: S.S.S = Saturado Superficie Seca.

FIGURA 3.2.4-1: DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO (GRAVA Y LADRILLO).



### 3.2.5 Determinación del peso específico y absorción del agregado fino (ASTM C 128).

El ensayo que se describe a continuación tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua expresada como porcentaje que absorbe el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresado como porcentaje en peso.

### ➤ Equipo necesario

El equipo necesario es el siguiente:

- Una balanza sensible de 0,1 gr con capacidad de 1 kg.
- Matraz de 500 ml.
- Horno eléctrico.
- Secador.
- Un molde cónico de acero con varilla.

### ➤ Muestra

Se selecciona una muestra de 1 kg que puede ser obtenida por cuarteo; luego se coloca la muestra dentro de un recipiente lleno de agua y se deja allí por un periodo de 24 horas.

### ➤ Cálculos

$$\text{Peso Específico a granel} = \frac{A}{V-W} \quad (15)$$

$$\text{Peso Específico saturado sup. Seca} = \frac{500}{V-W} \quad (16)$$

$$\text{Peso Específico aparente} = \frac{A}{(V-W)-(500-A)} \quad (17)$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{500-A}{A} * 100 \quad (18)$$

Donde:

A=Peso del aire de la muestra secada al horno en gr.

B=Volumen del frasco en ml.

C=Peso en gramos o volumen en ml del agua agregado al frasco.

### ➤ Resultados

Los valores que se muestran son datos promedio, las planillas de cálculo para cada material se encuentran en Anexo A-1.

TABLA 3.2.5-1: VALORES DE PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO.

MUESTRA	PESO ESPECIFICO AL GRANEL ( $\text{kg/m}^3$ )	ESPECIFICO S.S.S. ( $\text{kg/m}^3$ )	PESO ESPECIFICO APARENTE ( $\text{kg/m}^3$ )	% DE ABSORCION
ARENA	2582,001	2632,883	2720,437	1,971

Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: S.S.S = Saturado Superficie Seca.

FIGURA 3.2.5-1: DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO.



### 3.2.6 Determinación del peso unitario del agregado grueso (ASTM C29)

Este ensayo tiene como objetivo describir como se puede obtener el peso unitario de los agregados y de las mezclas de agregados a la temperatura ambiente.

#### ➤ Materiales y equipo

- Balanza electrónica.
- Una varilla de 60 cm de largo y 5/8 plg.
- Molde cilíndrico de 14 l.
- Recipientes.

#### ➤ Calculo

El peso neto del agregado dentro del molde se obtiene restando del peso del más la muestra compactada, el peso del molde. El peso por unidad de volumen de la muestra se obtiene multiplicando su peso neto por el inverso del volumen del molde.

### ➤ Resultados

Los valores que se muestran son datos promedio, las planillas de cálculo para cada material se encuentran en el anexo A-1.

TABLA 3.2.6-1: VALORES DE PESO UNITARIO DEL AGREGADO GRUESO.

MUESTRA	PESO UNITARIO SUELTO (kg/m <sup>3</sup> )	PESO UNITARIO COMPACTADO (kg/m <sup>3</sup> )
GRAVA	1592,303	1693,399
LADRILLO	1004,932	1051,402

Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 3.2.6-1: DETERMINACIÓN DEL PESO UNITARIO DEL AGREGADO GRUESO (GRAVA Y LADRILLO).



### 3.2.7 Determinación del peso unitario del agregado fino (ASTM C29)

Este ensayo tiene como objeto describir como se puede obtener el peso unitario de los agregados y de las mezclas de agregados a la temperatura ambiente.

#### ➤ Materiales y equipo

- Balanza electrónica.
- Cuchara.
- Muestra de arena.
- Varilla.

- Bandejas.
- Molde cilíndrico de 3 l.
- Brocha.

#### ➤ Cálculo

El peso neto del agregado dentro del molde se obtiene restando del peso del más la muestra compactada, el peso del molde. El peso por unidad de volumen de la muestra se obtiene multiplicando su peso neto por el inverso del volumen del molde.

#### ➤ Resultados

Los valores que se muestran son datos promedio, las planillas de cálculo para cada material se encuentran en el anexo A-1.

TABLA 3.2.7-1: VALORES DE PESO UNITARIO AGREGADO FINO.

MUESTRA	PESO UNITARIO SUELTO ( $\text{kg/m}^3$ )	PESO UNITARIO COMPACTADO ( $\text{kg/m}^3$ )
ARENA	1707,259	1863,425

Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 3.2.7-1: DETERMINACIÓN DEL PESO UNITARIO DEL AGREGADO FINO



### 3.2.8 Dosificación método ACI-211

#### Pesos secos de los ingredientes por m<sup>3</sup> de hormigón

TABLA 3.2.8-1: PESOS SECOS DE INGREDIENTES POR METRO CUBICO DE HORMIGON.

Ingrediente	Peso seco kg/m <sup>3</sup>	Volumen absoluto lt/m <sup>3</sup>	Peso específico gr/cm <sup>3</sup>
Cemento	361,70	120,17	3,01
Agua	170,00	170,00	1,00
Grava	1.185,38	440,66	2,69
Arena	704,95	259,17	2,72
Aire	-	10,00	-
TOTAL	2.422,03	1.000,00	

Fuente: Elaboración Propia.

#### Pesos húmedos de los ingredientes por m<sup>3</sup> de hormigón

TABLA 3.2.8-2: PESOS HÚMEDOS DE INGREDIENTES POR METRO CUBICO DE HORMIGÓN.

Ingrediente	Peso seco kg/m <sup>3</sup>	Peso húmedo kg/m <sup>3</sup>
Cemento	361,70	361,70
Agua	170,00	183,37
Grava	1.185,38	1.189,05
Arena	704,95	719,33
TOTAL	2.422,03	2.453,45

Fuente: Elaboración Propia.

#### Proporciones de mezcla

TABLA 3.2.8-3: PROPORCIÓN DE MEZCLA.

Cemento	Arena	Grava
1,0	2,0	3,3

Fuente: Elaboración Propia.

### Cantidad de Material Para Dosificación de 4 Probetas en Laboratorio

Cantidad de material para 4 Probetas.

TABLA 3.2.8-4: PESOS SECOS DE INGREDIENTES PARA 4 PROBETAS.

Ingrediente	Peso seco	Volumen absoluto	Peso específico
	kg	lt	gr/cm <sup>3</sup>
Cemento	7,67	2,55	3,01
Agua	3,60	3,60	1
Grava	25,13	9,34	2,69
Arena	14,95	5,50	2,72
Aire	-		-
TOTAL			

Fuente: Elaboración Propia.

### Cantidad de Material Para Dosificación de 4 Probetas en Laboratorio Realizando el reemplazo de grava por cascote de ladrillo en diferente porcentaje.

Para la dosificación del hormigón con cascote de ladrillo se procedió a reemplazar el agregado grueso por cascote de ladrillo en porcentajes de 18%, 30% y 50% en peso de manera directa en los pesos obtenidos en la dosificación patrón.

TABLA 3.2.8-5: CANTIDAD DE GRAVA Y LADRILLO PARA 4 PROBETAS.

Ingrediente	Peso seco (Kg)	18% Cascote de ladrillo		30% Cascote de ladrillo		50% Cascote de ladrillo	
		Cantidad de C.L.(Kg)	Cantidad de Grava (Kg)	Cantidad de C.L.(Kg)	Cantidad de Grava (Kg)	Cantidad de C.L.(Kg)	Cantidad de Grava (Kg)
Grava	25,13	4,524	20,611	7,540	17,594	12,567	12,567

Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: CL = Cascote de ladrillo

### **3.2.9 Preparación del hormigón en el laboratorio para los ensayos de compresión**

Abarca el procedimiento de preparación del hormigón, el mismo que se realizó en el laboratorio de hormigones de la UAJMS y que está a cargo del Ing. Moisés Díaz Ayarde, bajo un riguroso control de cantidades de materiales y condiciones de ensayo.

Preparación de los materiales:

- a) Por recomendación los materiales se tuvieron a la temperatura ambiente (entre 18° y 24° C) antes de empezar los ensayos.
- b) El cemento se almaceno en un lugar seco del laboratorio, a prueba de humedad. El cemento se mezcló completamente a fin de que la muestra pueda ser uniforme durante los ensayos.
- c) Los agregados para cada preparación de hormigón estuvieron de acuerdo con la granulometría deseada.

#### **➤ Pesado de los materiales**

Todos los materiales fueron debidamente pesados en balanzas precisas y sensibilidad al gramo, acorde a los requisitos exigidos en cuanto a sensibilidad reciproca y tolerancia.

FIGURA 3.2.9-1: PESADO DE MATERIALES PARA LA ELABORACION DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN.



### ➤ Mezclado del hormigón

a) El hormigón fue mezclado en una hormigonera mediana, la misma que era adecuada para la cantidad de hormigón que se debía preparar, dicha cantidad debe ser suficiente, tal que, después de moldear las probetas de ensayo, existiría un exceso o margen de seguridad por pérdidas de un 10 %.

b) Para tener una idea más clara del proceso de mezclado, a continuación, se indica el orden y manera de introducir los materiales a la hormigonera activada para obtener una mezcla homogénea y satisfactoria para la elaboración del hormigón.

1) Se introduce la mitad del agua necesaria para la mezcla, se la porción total de la arena y luego la de cemento, para que estas sean mezcladas hasta un estado homogéneo.

2) se añade el agregado grueso a la preparación y esta se mezcla hasta que dicho agregado grueso se distribuya uniformemente en toda la mezcla.

3) Se añade la otra mitad de la cantidad de agua medida y necesaria para luego ver como la masa se mezcla hasta que el hormigón toma un aspecto homogéneo y tenga la consistencia deseada para luego realizar los ensayos de asentamiento.

c) El método anteriormente indicado es un buen parámetro para lograr una mezcla satisfactoria, a menos que un procedimiento diferente se adapte mejor a la hormigonera que se está empleando.

FIGURA 3.2.9-2 MEZCLADO DE LAS MUESTRAS DE HORMIGÓN



### ➤ **Consistencia del Hormigón**

a) La consistencia de cada preparación de hormigón se mide inmediatamente después de mezclar, realizando el ensayo de asentamiento, utilizando el método del Cono de Abrams, para lo cual se necesita el siguiente equipo:

- Molde de metal galvanizado en forma de tronco cono, diámetro de la base superior 4", diámetro de la base inferior 8" y una altura de 12".
- Regla graduada o flexómetro para medir el asentamiento de la mezcla.
- Varilla para apisonar el hormigón de 5/8" y 60 cm de longitud.

Se toma una muestra representativa de la mezcla cuya consistencia se quiere determinar y se coloca el molde sobre una superficie plana que no sea absorbente.

El molde se llena usando tres capas de mezcla. Cada capa se compacta con 25 golpes de la varilla distribuidos uniformemente.

Después de llenar el molde como se indica, se retira este con movimiento vertical.

Inmediatamente después se determina por medio de una regla el asentamiento de la muestra con relación a su altura inicial, asimismo la consistencia es expresada en términos de asentamiento.

b) Todo el hormigón empleado para el ensayo de asentamiento es devuelto al recipiente de mezcla e inmediatamente se procede a vaciar la mezcla en los moldes de realización de probetas.

FIGURA 3.2.9-3: ENSAYO DE ASENTAMIENTO A LAS MEZCLAS REALIZADAS.



#### ➤ **Probetas realizadas para ensayo de compresión**

Las probetas que se realizaron para el ensayo a compresión y para ser también sometidas al ensayo de penetración de agua bajo presión son de forma cilíndrica con una longitud igual a dos veces el diámetro. Las probetas cilíndricas estándar son de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura para hormigón con agregado grueso de tamaño inferior a 2" que son las que fueron empleadas para los ensayos realizados.

Los moldes para las probetas de ensayo son de metal y están provistos de una placa metálica lisa y plana. El interior del molde y la placa metálica de la base se cubren con una capa delgada de aceite mineral o grasa antes de preparar cada cilindro de hormigón, para evitar que el hormigón se adhiera al molde cuando comience su endurecimiento.

FIGURA 3.2.9-4: PROBETAS REALIZADAS Y MOLDES UTILIZADOS EN LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS



➤ **Procedimiento de vaciado y realización de probetas**

- Los cilindros de hormigón son preparados colocando el hormigón en el molde en 3 capas de un volumen aproximadamente igual.
- Al colocar cada cucharada de hormigón, la cuchara se hace girar alrededor del borde superior, para que el hormigón se deslice por las paredes del molde y se distribuya uniformemente.
- Cada capa se debe golpear 25 veces distribuyéndose uniformemente sobre la sección con una barra de 5/8" de diámetro y 60 cm de largo con punta redondeada que es la misma que se utiliza para el ensayo de asentamiento, después la superficie debe ser alisada y en lo posible cubierta.
- Los cilindros de ensayo se remueven de 20 a 48 horas después de su preparación y son sumergidos completamente para su curado en un cuarto húmedo o en una piscina a modo de que este saturado completamente en agua entre 18 y 24°C.

FIGURA 3.2.9-5: VACIADO Y REALIZACIÓN DE PROBETAS



### ➤ **Curado de las probetas de prueba**

El curado de las probetas que se realizaron para los ensayos necesarios se realizó en la piscina del laboratorio de hormigones de la UAJMS.

Es un proceso simple que se debe realizar inmediatamente después de remover los moldes.

El proceso de desmolde se debe realizar de manera que los cilindros de hormigón no sufran golpes ya que en este estado las mismas se encuentran muy frágiles y esto puede producir fisuras que puedan incidir en su resistencia.

La etapa de curado finaliza de 10 a 24 horas antes de someterlas a su rotura.

FIGURA 3.2.9-6: CURADO DE LAS PROBETAS DE PRUEBA



### **3.2.10 Determinación de resistencia a compresión en probetas**

Este método abarca el procedimiento para los ensayos de compresión de cilindros de hormigón.

#### ➤ **Equipo**

La que se utilizó en el ensayo es una prensa automática de compresión que pertenece al laboratorio de hormigones de la UAJMS, la misma que proporciona una velocidad de carga adecuada y está equipada con placas de acero, retenedores y neoprenos.

#### ➤ **Calculo**

La resistencia a la compresión se obtendrá dividiendo la carga máxima aplicada por el área del cilindro, calculada con el diámetro obtenido antes de aplicar la carga. Las

planillas de cálculo para cada una de las mezclas se encuentran en el anexo A-2 del presente estudio.

FIGURA 3.2.10-1: ENSAYOS DE ROTURA DE PROBETAS



### 3.2.11 Valores de resistencia obtenidos

Después de haber realizado los ensayos podemos observar que la dosificación realizada es adecuada para las características de los materiales empleados, ya que los valores obtenidos de resistencia a compresión del hormigón patrón es superior a la de resistencia de diseño esperada. Asimismo se puede observar que la dosificación realizada es aplicable para el hormigón con cascote de ladrillo el cual se reemplazó en peso el agregado natural grueso por el ladrillo triturado en diferentes proporciones, obteniendo una reducción gradual de la resistencia a compresión la densidad, para el caso de la densidad, para el caso de la resistencia los valores mínimos obtenidos superan a la mínima resistencia a compresión para que un hormigón sea considerado estructural ( valores  $\geq 17,5$  Mpa). En el caso de la densidad se obtuvo una reducción de la misma en el orden del 7,82 % y en los valores obtenidos se puede notar una reducción considerable de densidad.

TABLA 3.2.11-1: VALORES DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN.

<b>RESISTENCIA A COMPRESIÓN A LOS 28 DIAS (Mpa)</b>				
<b>N° Probeta</b>	<b>Hormigón Patrón</b>	<b>Hormigón 18% CL</b>	<b>Hormigón 30% CL</b>	<b>Hormigón 50% CL</b>
1	27,60	22,30	18,35	16,32
2	27,80	24,64	19,13	15,97
3	27,48	24,03	19,01	15,63
4	26,58	23,89	18,27	16,24
5	28,12	23,55	18,40	17,14
6	28,18	23,20	18,18	16,41
7	28,89	23,74	19,31	16,64
8	28,21	24,08	17,97	15,67
9	28,69	25,05	18,49	15,79
10	28,67	24,13	18,40	15,44

Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: CL= Cascote de ladrillo.

Para poder evaluar la calidad del hormigón del presente trabajo, se siguieron los criterios del comité ACI 214. Este comité hace notar las variaciones en los valores de la resistencia, tomando en cuenta la desviación estándar y el coeficiente de variación.

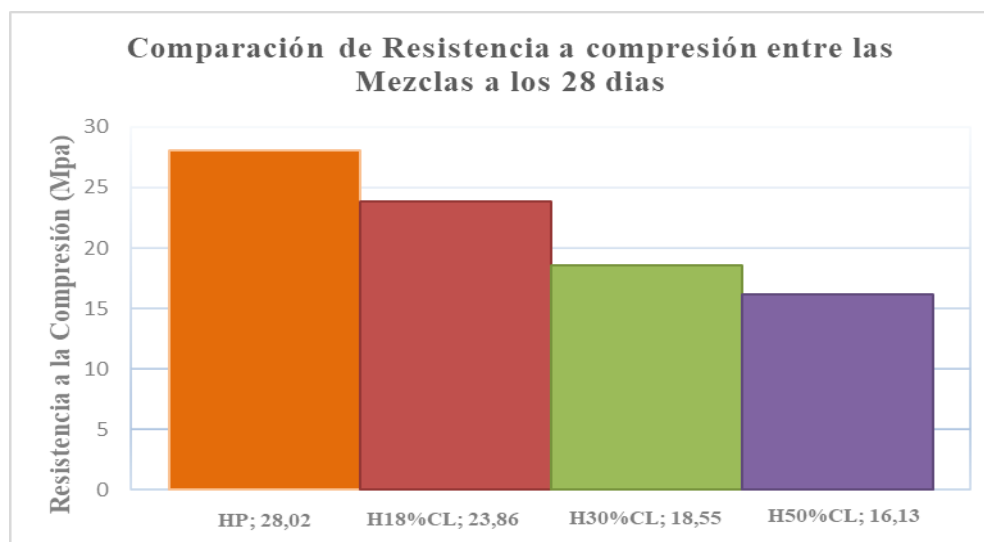
TABLA 3.2.11-2: ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS RESISTENCIAS A COMPRESIÓN.

<b>Variable</b>	<b>Hormigón Patrón</b>	<b>Hormigón 18% CL</b>	<b>Hormigón 30% CL</b>	<b>Hormigón 50% CL</b>
$\sigma=$	0,69	0,76	0,44	0,53
fcm	28,02	23,86	18,55	16,13
$\delta$	2,46	3,18	2,39	3,26
Calidad del Hormigón según ACI	EXELENTE	BUENO	EXELENTE	BUENO

Fuente: Elaboración Propia

Abreviaturas: CL= Cascote de ladrillo.

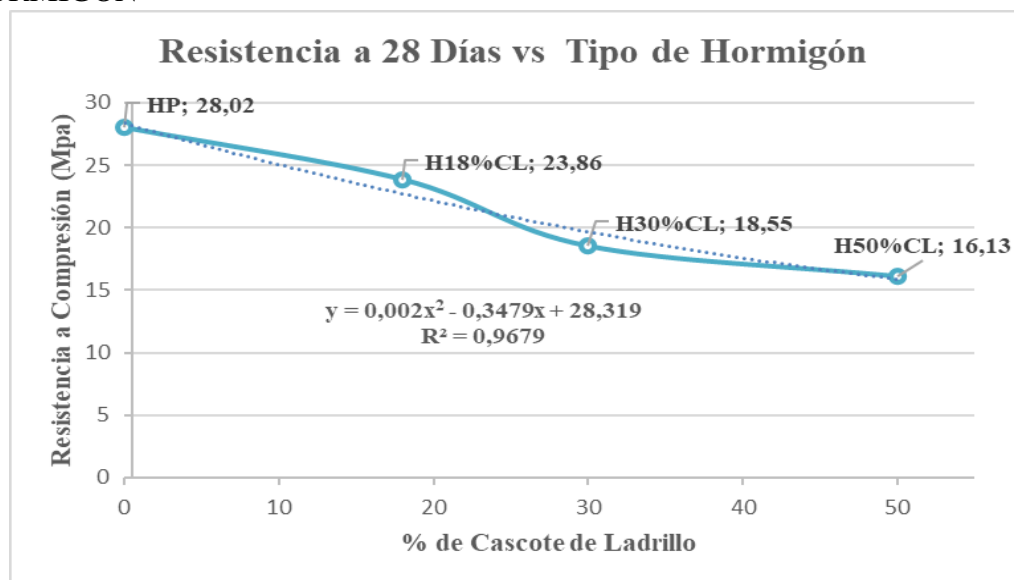
FIGURA 3.2.11-1: DIAGRAMA DE BARRAS DE COMPARACIÓN DE RESISTENCIA ENTRE LAS MEZCLAS



Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: HP=Hormigón patrón; H18%CL= Hormigón 18% Cascote de ladrillo.

FIGURA 3.2.11-2: CURVA RESISTENCIA A COMPRESIÓN VS TIPO DE HORMIGÓN



Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: HP=Hormigón patrón; H18%CL= Hormigón 18% Cascote de ladrillo.

### 3.2.12 Determinación de la densidad de las mezclas

El ensayo se realizó en las muestras de las cuales se determinó el peso de las mismas y el volumen respectivo, luego mediante la siguiente formula se determinó la densidad de las distintas muestras:

$$D = \frac{P}{V} \quad (19)$$

Donde:

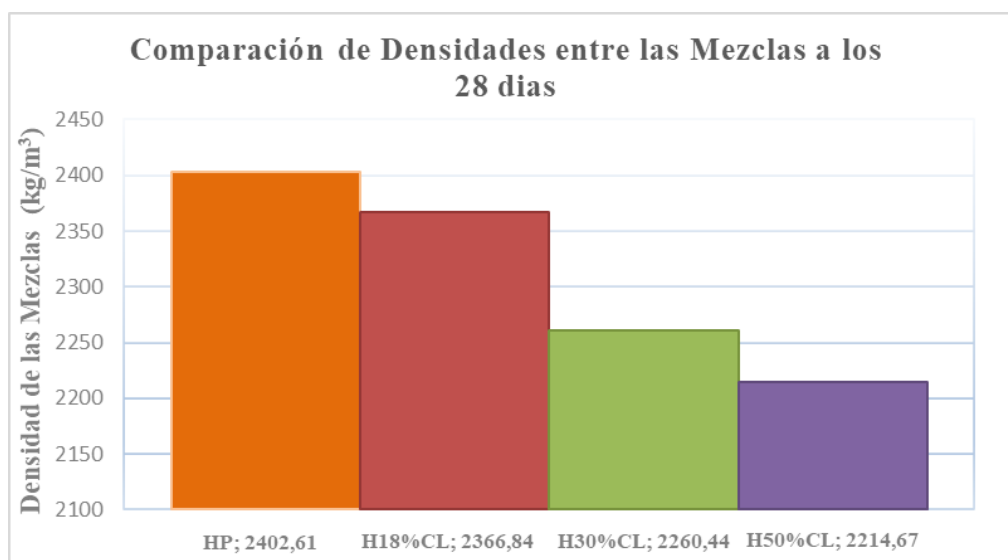
D=Densidad en kg/m<sup>3</sup>

P=Peso de la probeta en kg

V=Volumen de la probeta en m<sup>3</sup>

Las planillas de cálculo para cada una de las mezclas se muestran en el Anexo A-3 del presente estudio. Los resultados se detallan en el cuadro siguiente:

FIGURA 3.2.12-1: DIAGRAMA DE BARRAS DE COMPARACIÓN DE DENSIDADES ENTRE LAS MEZCLAS



Fuente: Elaboración Propia

Abreviaturas: HP=Hormigón patrón; H18%CL= Hormigón 18% Cascote de ladrillo.

### **3.2.13 Determinación de Penetración de agua bajo presión en probetas cilíndricas de hormigón**

Este método abarca el procedimiento para los ensayos de penetración de agua bajo presión de cilindros de hormigón.

Para poder determinar la penetración de agua bajo presión máxima y media se realizó el ensayo de profundidad de agua bajo presión el cual se encuentra desarrollado en la norma UNE EN 12390-8, se optó en apoyarse en esta norma porque es la recomendada por el fabricante del equipo utilizado para el ensayo.

#### **➤ Características de las probetas según norma UNE EN 12390-8**

- Forma: Preferentemente cúbicas o cilíndricas de ISO, 200 o 300mm de arista o diámetro. Las segundas tendrán una relación espesor/diámetro igualo mayor a 0,5. El espesor no será inferior a 100 mm.
- Número: Recomendable mayor o igual a 3 por ensayo.
- Edad: No se especifica, recomendable mayor a 28 días.
- Conservación: Según UNE 83.301.
- Preparación: Hacer rugosa la cara de ensayo por cepillado o repicado.

Para la realización de este ensayo se emplearon probetas cilíndricas, de 150mm x 300 mm ya que son las dimensiones de los moldes que dispone el laboratorio de hormigones de la U.A.J.M.S.

#### **➤ Equipo**

El equipo que se utilizó en el ensayo es un sistema de ensayo de permeabilidad del concreto que pertenece al laboratorio de hormigones de la UAJMS, el misma que proporciona la posibilidad de ejercer una presión hidrostática durante un periodo de tiempo pre fijado. El equipo consta de un resistente bastidor metálico, donde se sostienen 6 células galvanizadas en caliente para protegerlas contra la corrosión.

Manómetro de control de presión para cada célula. Una cámara de compresión recargable se incluye como parte del ensayo.

La presión es regulable de 0 a 10 bar y se suministra mediante una bomba automática de caudal variable. La alimentación de agua es directa a partir de la entrada de agua.

El sellado de presión se obtiene mediante dispositivos de sellado especial.

### ➤ **Procedimiento**

#### **- Preparación de la probeta de ensayo**

Inmediatamente después de desmoldar la probeta, se desbasta la superficie de la cara de la probeta que va a estar expuesta a la presión del agua, con un cepillo de púas metálicas y se cura la probeta en agua de acuerdo con los procedimientos indicados en la Norma EN 12390-2.

#### **- Aplicación del agua a presión**

El ensayo debe comenzar cuando las probetas tengan al menos una edad de 28 días. No se aplica el agua a presión a la cara fratasada de la probeta. La probeta se coloca en el equipo de ensayo y se aplica al agua una presión de (5) bar durante (72) h. Durante el ensayo, se observa periódicamente el estado de las superficies de la probeta de ensayo no expuestas al agua a presión para identificar la posible presencia de agua. Si se observaran filtraciones, se reconsiderará la validez del resultado y se registra el hecho en el informe.

NOTA Se puede usar agua de red.

#### **- Examen de probeta**

Después de aplicar la presión durante el tiempo especificado, se retira la probeta del equipo de ensayo.

Se limpia la cara a la que se aplicó la presión de agua para retirar el exceso de agua. Se rompe la probeta en dos mitades por medio del ensayo de tracción indirecta, perpendicularmente a la cara en la que se aplica la presión de agua. Cuando se rompa la probeta, y durante el examen, la cara de la probeta expuesta a la presión de agua se debe situar en el fondo. Tan pronto como la cara partida se ha secado de forma tal que se puede ver claramente la extensión del frente de penetración de agua, se marca en la

probeta dicho frente de penetración. Se mide la profundidad máxima de penetración bajo la superficie de ensayo y se redondea al mm más próximo.

### ➤ Cálculo

Para este ensayo se tiene como dato la penetración máxima y el área de penetración, por lo cual se tiene que calcular la penetración media, la cual puede ser calculada con la siguiente formula.

$$P_{media} = \frac{A}{D} \quad (20)$$

Donde:

$P_{media}$  = Penetración media (mm)

$A$  = Área de penetración en la probeta ( $\text{mm}^2$ )

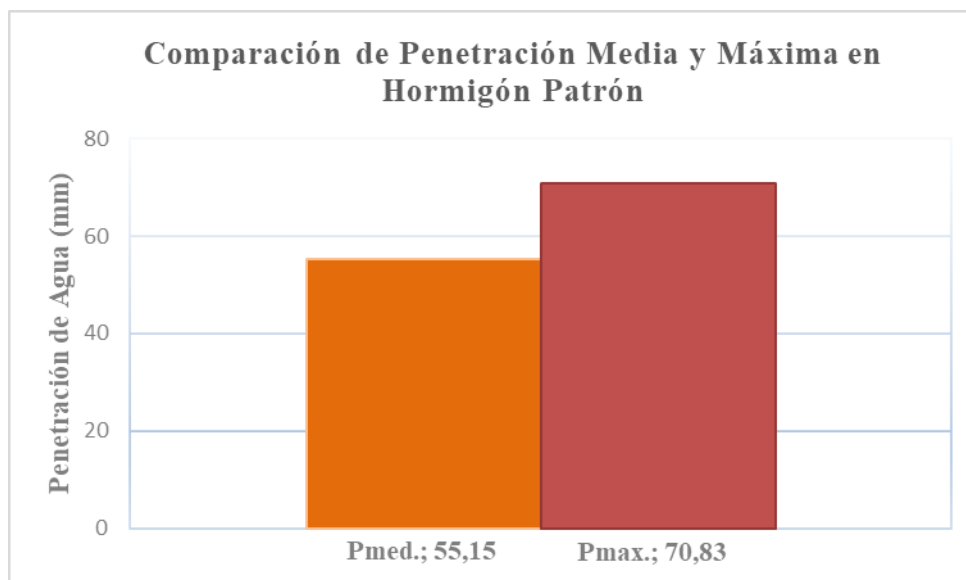
$D$  = Diámetro de la probeta (mm)

Las planillas de cálculo para cada una de las mezclas se muestran en el Anexo A-5 del presente estudio. Los resultados se detallan en el cuadro siguiente:

FIGURA 3.2.13: ENSAYO PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN

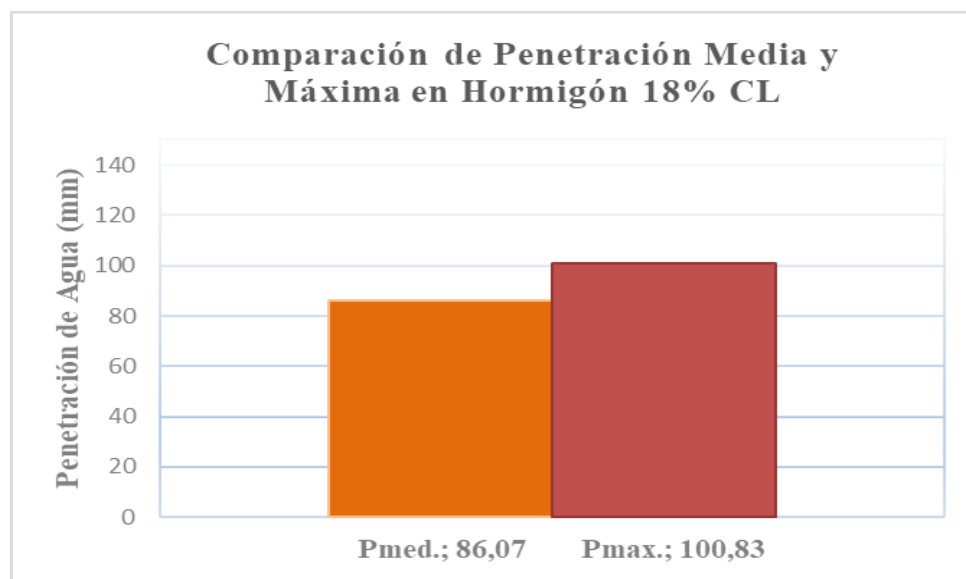


FIGURA 3.2.13-1: DIAGRAMA DE BARRAS DE COMPARACIÓN DE PENETRACIÓN MEDIA Y MÁXIMA.



Fuente: Elaboración Propia.

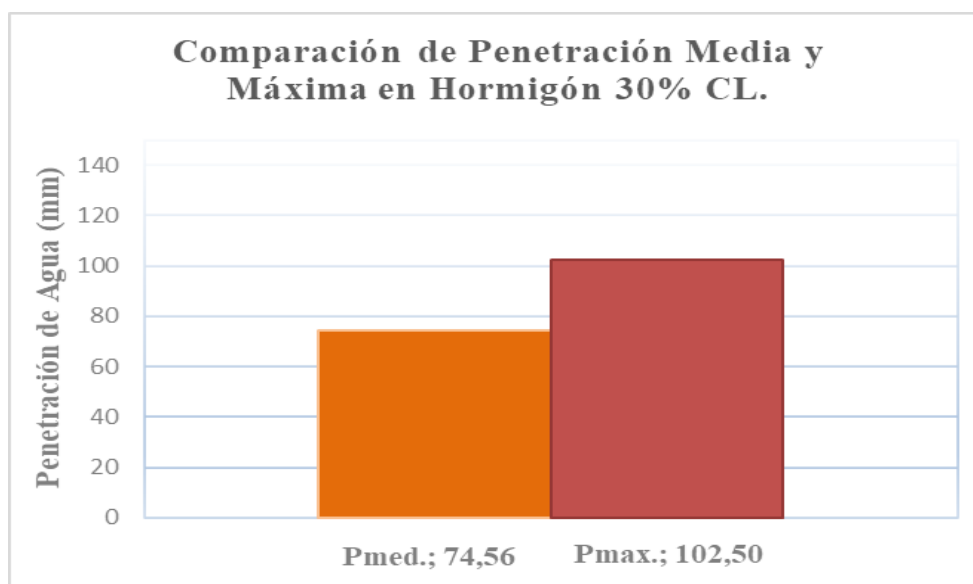
Abreviaturas: Pmed. =Penetración media; Pmax. =Penetración máxima.



Fuente: Elaboración Propia

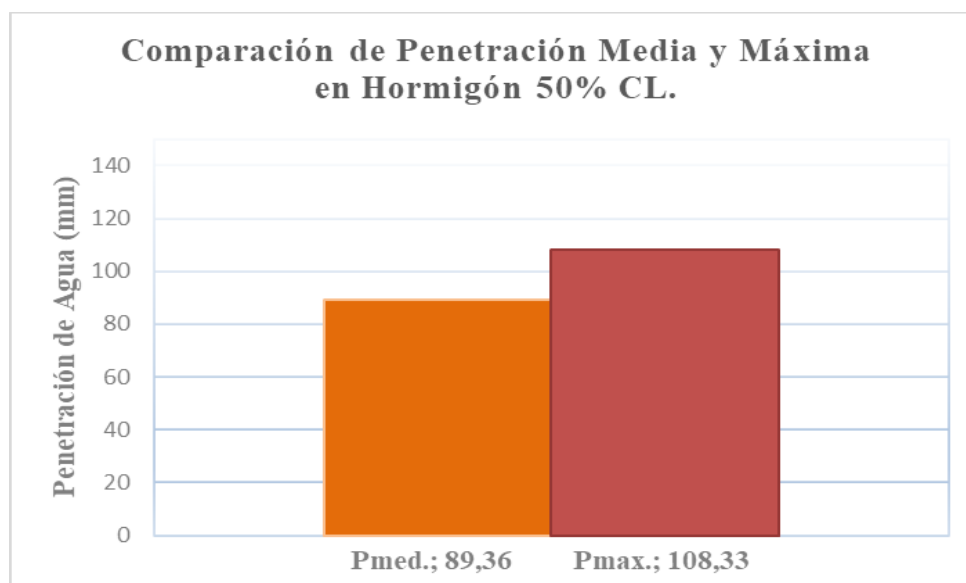
Abreviaturas: Pmed. =Penetración media; Pmax. =Penetración máxima; CL= Cascote de ladrillo.

FIGURA 3.2.13-1: DIAGRAMA DE BARRAS DE COMPARACIÓN DE PENETRACIÓN MEDIA Y MÁXIMA.



Fuente: Elaboración Propia.

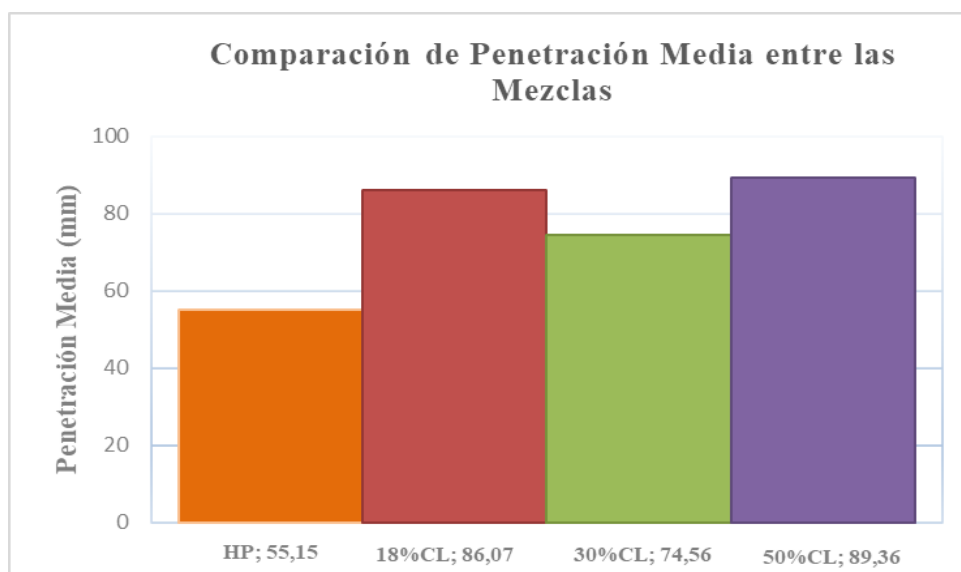
Abreviaturas: Pmed. =Penetración media; Pmax. =Penetración máxima; CL= Cascote de ladrillo.



Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: Pmed. =Penetración media; Pmax. =Penetración máxima; CL= Cascote de ladrillo.

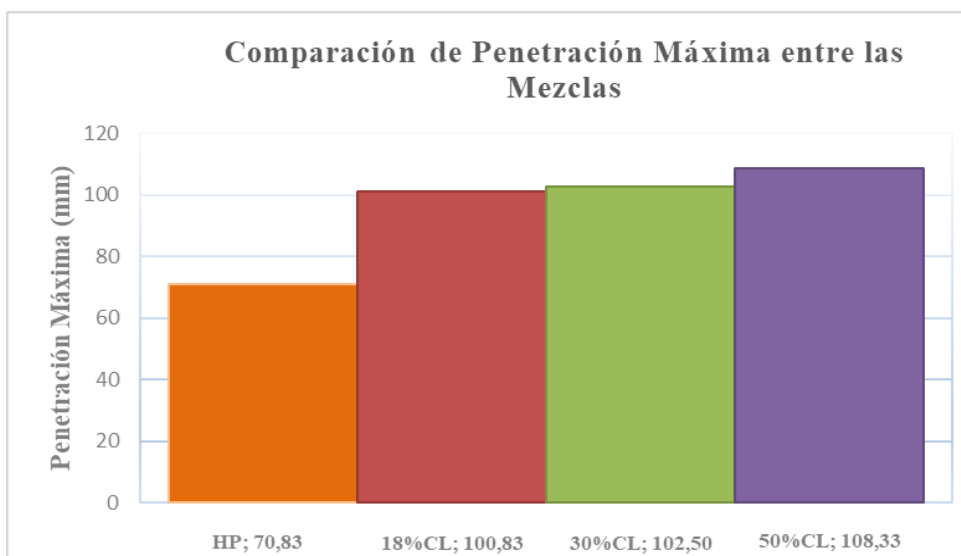
FIGURA 3.2.13-2: DIAGRAMA DE BARRAS DE COMPARACIÓN DE PENETRACIÓN MEDIA ENTRE LAS MEZCLAS



Fuente: Elaboración Propia-

Abreviaturas: HP= Hormigón patrón; CL= Cascote de ladrillo.

FIGURA 3.2.13-2: DIAGRAMA DE BARRAS DE COMPARACIÓN DE PENETRACIÓN MÁXIMA ENTRE LAS MEZCLAS



Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: HP= Hormigón patrón; CL= Cascote de ladrillo.

### 3.2.14 Determinación de volúmenes de agua bajo presión penetrada en probetas cilíndricas de hormigón

El equipo de penetración de agua bajo presión aparte de proporcionar los datos de penetración de agua bajo presión también nos brinda los datos de los volúmenes de agua que penetran en las probetas conforme transcurre el tiempo hasta llegar a las 72 horas.

Las planillas de cálculo para cada una de las mezclas se muestran en el Anexo A-6 del presente estudio. Los resultados se detallan en el cuadro siguiente:

**TABLA 3.2.14-1: VOLUMENES DE AGUA BAJO PRESIÓN PENETRADA EN PROBETAS DE HORMIGÓN (HORMIGÓN PATRÓN).**

FECHA	TIEMPO (h)	VOLUMEN (ml)					
		HP1 PER	HP2 PER	HP3 PER	HP4 PER	HP5 PER	HP6 PER
10/10/2023	11:40	1500	1500	1500	1500	1500	1500
13/10/2023	11:40	1300	1260	1250	1360	1300	1020
<b>VOL. PEN.</b>	72,00	200	240	250	140	200	480

Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: HP1 PER= Muestra de hormigón patrón 1 permeabilidad; VOL. PEN. =Volumen de penetración.

**TABLA 3.2.14-2: VOLUMENES DE AGUA BAJO PRESIÓN PENETRADA EN PROBETAS DE HORMIGÓN (HORMIGÓN CON 18%CL)**

FECHA	TIEMPO (h)	VOLUMEN (ml)					
		H1-18% CL PER	H2-18% CL PER	H3-18% CL PER	H4-18% CL PER	H5-18% CL PER	H6-18% CL PER
17/10/2023	17:20	1475	1450	1450	1475	1450	1430
20/10/2023	17:20	830	810	680	990	760	670
<b>VOL. PEN.</b>	72,00	645	640	770	485	690	760

Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: H1-18%CL PER= Muestra 1 de hormigón con 18% de cascote de ladrillo permeabilidad; VOL. PEN. =Volumen de penetración.

TABLA 3.2.14-3: VOLUMENES DE AGUA BAJO PRESIÓN PENETRADA EN PROBETAS DE HORMIGÓN (HORMIGÓN CON 30%CL)

FECHA	TIEMPO (h)	VOLUMEN (ml)					
		H1-30% CL PER	H2-30% CL PER	H3-30% CL PER	H4-30% CL PER	H5-30% CL PER	H6-30% CL PER
30/10/2023	08:30	1450	1450	1460	1450	1460	1450
2/11/2023	08:30	1000	850	1050	1000	1000	660
<b>VOL. PEN.</b>	72,00	450	600	410	450	460	790

Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: H1-30%CL PER= Muestra 1 de hormigón con 30% de cascote de ladrillo permeabilidad; VOL. PEN. =Volumen de penetración.

TABLA 3.2.14-4: VOLUMENES DE AGUA BAJO PRESIÓN PENETRADA EN PROBETAS DE HORMIGÓN (HORMIGÓN CON 50%CL)

FECHA	TIEMPO (h)	VOLUMEN (ml)					
		H1-50% CL PER	H2-50% CL PER	H3-50% CL PER	H4-50% CL PER	H5-50% CL PER	H6-50% CL PER
23/10/2023	09:30	1450	1450	1450	1450	1450	1420
26/10/2023	09:30	1000	850	890	1150	940	400
<b>VOL. PEN.</b>	72,00	450	600	560	300	510	1020

Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: H1-50%CL PER= Muestra 1 de hormigón con 50% de cascote de ladrillo permeabilidad; VOL. PEN. =Volumen de penetración.

### 3.2.15 Ensayo determinación de la densidad, la absorción de agua y los vacíos en el concreto endurecido.

Este método de ensayo cubre las determinaciones de la densidad, el porcentaje de absorción de agua y el porcentaje de vacíos en el concreto endurecido.

Los valores dados en unidades SI deben ser considerados como el estándar.

Para la realización de este ensayo nos basamos en a la norma ASTM C642-13.

#### ➤ **Espécimen de ensayo**

Siempre que sea posible, la muestra debe consistir de varias porciones individuales de concreto, cada una de las cuales se debe ensayar por separado.

Las porciones individuales pueden ser: porciones de cilindros, de núcleos extraídos del concreto o de vigas de cualquier forma o tamaño, excepto que el volumen de cada porción no debe ser menor de  $350 \text{ cm}^3$  (o para concreto de peso normal, de aproximadamente 800g): y cada porción debe estar libre de grietas o fisuras visibles, o de bordes rotos.

### ➤ **Equipo**

Balanza – Debe ser sensitiva al 0.025% de la masa del espécimen.

Recipiente – Adecuado para la inmersión del espécimen y provisto de un alambre apropiado para suspender el espécimen dentro del agua.

### ➤ **Procedimiento**

**Masa seca al horno** – Se determina la masa de las porciones y se secan en un horno de secado a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  por no menos de 24h. Después se remueven los especímenes del horno, se secan en aire seco (preferiblemente en un desecador a una temperatura de 20 a  $25^\circ\text{C}$  y se les determina su masa. Este valor de la masa seca al horno se designa como: A

**Masa saturada después de inmersión el agua** – Después de su secado final, enfriado y determinación de la masa, los especímenes se sumergen en agua a temperatura de aproximadamente  $21^\circ\text{C}$  por un período no menor de 48h. Con una toalla se remueve la humedad superficial de los especímenes para dejarlos en condición de saturados de superficie seca y se les determina su masa. El valor obtenido de masa saturada de superficie seca después de su inmersión en agua, se designa como: B.

**Masa saturada después de ebullición en agua** – El espécimen procesado cómo se describe, se coloca en un recipiente adecuado, cubierto con agua potable, y se hierve por un período de 5h. Luego se le deja enfriar al aire por pérdida natural de calor, por un período no menor de 14h, hasta que su temperatura final sea de 20 a  $25^\circ\text{C}$ . Se le remueve la humedad superficial con una toalla y se determina la masa del espécimen. La masa saturada de superficie seca después de ebullición, se designa como: C.

Masa sumergida aparente – Después de su inmersión en agua y ebullición, los especímenes se suspenden dentro del agua por un alambre y se determina su masa sumergida aparente, que se designa como: D

### ➤ Cálculos

Usando los valores de la masa determinados de acuerdo a los procedimientos descritos, se procede a la ejecución de los cálculos mediante las ecuaciones (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7) descritas anteriormente.

FIGURA 3.2.15: ENSAYO DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, LA ABSORCIÓN DE AGUA Y LOS VACÍOS EN EL CONCRETO ENDURECIDO.



TABLA 3.2.15-1: VALORES DE LA DENSIDAD, LA ABSORCIÓN DE AGUA Y LOS VACÍOS EN EL CONCRETO ENDURECIDO. (HORMIGÓN PATRÓN)

Nº	Identificación	Absorción Despues inmersión (%)	Absorción Despues inmersión y ebullicion (%)	Densidad bruta (Kg/m <sup>3</sup> ) g <sub>1</sub>	Densidad bruta Despues Inmersión (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad bruta Despues Inmersión y ebullición (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Aparente (Kg/m <sup>3</sup> ) g <sub>2</sub>	Volumen de vacios. Poros permeables (%)
1	HP1PORO	5,835	6,117	2261,146	2393,085	2399,454	2624,076	13,831
2	HP2 PORO	5,614	5,856	2256,859	2383,557	2389,026	2600,567	13,217
3	HP3 PORO	5,126	5,326	2284,538	2401,647	2406,221	2601,042	12,168

Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: HP1 PORO= Muestra 1 de hormigón patrón porosidad.

TABLA 3.2.15-2: VALORES DE LA DENSIDAD, LA ABSORCIÓN DE AGUA Y LOS VACÍOS EN EL CONCRETO ENDURECIDO. (HORMIGÓN 18% CL)

Nº	Identificación	Absorción Despues inmersión (%)	Absorción Despues inmersión y ebullicion (%)	Densidad bruta (Kg/m <sup>3</sup> ) g <sub>1</sub>	Densidad bruta Despues Inmersión (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad bruta Despues Inmersión y ebullición (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Aparente (Kg/m <sup>3</sup> ) g <sub>2</sub>	Volumen de vacios. Poros permeables (%)
1	H1-18% CL PORO	6,534	6,989	2204,394	2348,437	2358,465	2605,884	15,407
2	H2-18% CL PORO	7,621	8,040	2168,543	2333,818	2342,899	2626,485	17,436
3	H3-18% CL PORO	7,325	7,786	2162,382	2320,782	2330,739	2600,131	16,836

Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: H1-18% CL PORO= Muestra 1 de hormigón con 18% de cascote de ladrillo porosidad.

**TABLA 3.2.15-3: VALORES DE LA DENSIDAD, LA ABSORCIÓN DE AGUA Y LOS VACÍOS EN EL CONCRETO ENDURECIDO. (HORMIGÓN 30% CL)**

Nº	Identificación	Absorción Despues inmersión (%)	Absorción Despues inmersión y ebullicion (%)	Densidad bruta (Kg/m <sup>3</sup> ) g <sub>1</sub>	Densidad bruta Despues Inmersión (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad bruta Despues Inmersión y ebullición (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Aparente (Kg/m <sup>3</sup> ) g <sub>2</sub>	Volumen de vacios. Poros permeables (%)
1	H1-30% CL PORO	7,797	8,220	2138,068	2304,765	2313,825	2593,977	17,576
2	H2-30% CL PORO	8,160	7,650	2179,915	2357,791	2346,674	2616,189	16,676
3	H3-30% CL PORO	8,003	8,344	2133,127	2303,850	2311,115	2595,007	17,799

Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: H1-30% CL PORO= Muestra 1 de hormigón con 30% de cascote de ladrillo porosidad.

**TABLA 3.2.15-4: VALORES DE LA DENSIDAD, LA ABSORCIÓN DE AGUA Y LOS VACÍOS EN EL CONCRETO ENDURECIDO. (HORMIGÓN 50% CL)**

Nº	Identificación	Absorción Despues inmersión (%)	Absorción Despues inmersión y ebullicion (%)	Densidad bruta (Kg/m <sup>3</sup> ) g <sub>1</sub>	Densidad bruta Despues Inmersión (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad bruta Despues Inmersión y ebullición (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Aparente (Kg/m <sup>3</sup> ) g <sub>2</sub>	Volumen de vacios. Poros permeables (%)
1	H1-50% CL PORO	8,416	8,720	2094,312	2270,580	2276,940	2562,250	18,263
2	H2-50% CL PORO	8,688	9,079	2081,751	2262,615	2270,754	2566,905	18,900
3	H3-50% CL PORO	8,576	8,925	2093,129	2272,644	2279,934	2573,958	18,681

Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: H1-50% CL PORO= Muestra 1 de hormigón con 50% de cascote de ladrillo porosidad.

### 3.2.16 Determinación de la permeabilidad al agua del hormigón.

Utilizando los resultados de los ensayos realizados en este trabajo podemos aplicar la ecuación de Valenta para determinar los valores de la permeabilidad en el hormigón en estudio.

El resultado del ensayo de penetración de agua a presión  $x$  (m) permite calcular el coeficiente de permeabilidad al agua  $K_w$  (m/s), mediante la ecuación (8),

TABLA 3.2.16-1: VALORES DE COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD AL AGUA MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA ECUACION DE VALENTA.

Nº	Identificación	Fecha de Vaciado	Fecha de Ensayo	Edad (días)	Coeficiente de Permeabilidad al Agua $K_w$ (m/s)	Coeficiente de Permeabilidad al Agua $K_w$ (mm/día)
1	HP1 PER	11/9/2023	10/10/2023	29	2,42E-11	0,00209
2	HP2 PER	11/9/2023	10/10/2023	29	2,56E-11	0,00222
3	HP3 PER	11/9/2023	10/10/2023	29	2,42E-11	0,00209
4	HP4 PER	11/9/2023	10/10/2023	29	2,64E-11	0,00228
5	HP5 PER	11/9/2023	10/10/2023	29	2,42E-11	0,00209
6	HP6 PER	11/9/2023	10/10/2023	29	2,42E-11	0,00209

Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: HP1 PER= Muestra 1 de hormigón patrón permeabilidad.

TABLA 3.2.16-2: VALORES DE COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD AL AGUA MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA ECUACION DE VALENTA.

Nº	Identificación	Fecha de Vaciado	Fecha de Ensayo	Edad (días)	Coeficiente de Permeabilidad al Agua $K_w$ (m/s)	Coeficiente de Permeabilidad al Agua $K_w$ (mm/día)
1	H1-18% CL PER	18/9/2023	17/10/2023	29	5,65E-11	0,00489
2	H2-18% CL PER	18/9/2023	17/10/2023	29	6,26E-11	0,00541
3	H3-18% CL PER	18/9/2023	17/10/2023	29	6,26E-11	0,00541
4	H4-18% CL PER	18/9/2023	17/10/2023	29	6,91E-11	0,00597
5	H5-18% CL PER	18/9/2023	17/10/2023	29	6,26E-11	0,00541
6	H6-18% CL PER	18/9/2023	17/10/2023	29	6,91E-11	0,00597

Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: H1-18% CL PER= Muestra 1 de hormigón con 18% de cascote de ladrillo permeabilidad.

TABLA 3.2.16-3: VALORES DE COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD AL AGUA MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA ECUACION DE VALENTA.

Nº	Identificación	Fecha de Vaciado	Fecha de Ensayo	Edad (días)	Coficiente de Permeabilidad al Agua Kw (m/s)	Coficiente de Permeabilidad al Agua Kw (mm/día)
1	H1-30% CL PER	27/9/2023	30/10/2023	33	6,56E-11	0,00567
2	H2-30% CL PER	27/9/2023	30/10/2023	33	6,96E-11	0,00602
3	H3-30% CL PER	27/9/2023	30/10/2023	33	7,24E-11	0,00625
4	H4-30% CL PER	27/9/2023	30/10/2023	33	7,24E-11	0,00625
5	H5-30% CL PER	27/9/2023	30/10/2023	33	6,56E-11	0,00567
6	H6-30% CL PER	27/9/2023	30/10/2023	33	6,83E-11	0,00590

Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: H1-30% CL PER= Muestra 1 de hormigón con 30% de cascote de ladrillo permeabilidad.

TABLA 3.2.16-4: VALORES DE COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD AL AGUA MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA ECUACION DE VALENTA.

Nº	Identificación	Fecha de Vaciado	Fecha de Ensayo	Edad (días)	Coficiente de Permeabilidad al Agua Kw (m/s)	Coficiente de Permeabilidad al Agua Kw (mm/día)
1	H1-50% CL PER	25/9/2023	23/10/2023	28	8,52E-11	0,00736
2	H2-50% CL PER	25/9/2023	23/10/2023	28	8,52E-11	0,00736
3	H3-50% CL PER	25/9/2023	23/10/2023	28	7,76E-11	0,00671
4	H4-50% CL PER	25/9/2023	23/10/2023	28	7,76E-11	0,00671
5	H5-50% CL PER	25/9/2023	23/10/2023	28	8,52E-11	0,00736
6	H6-50% CL PER	25/9/2023	23/10/2023	28	8,52E-11	0,00736

Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: H1-50% CL PER= Muestra 1 de hormigón con 50% de cascote de ladrillo permeabilidad.

# **CAPÍTULO IV**

## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

## **4. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

El presente capítulo tiene como propósito fundamental la presentación, análisis y discusión detallada de los resultados obtenidos de la fase experimental de esta investigación. Estos resultados son el pilar empírico sobre el cuales evaluara la hipótesis planteada y se responderán los objetivos propuestos en el presente trabajo.

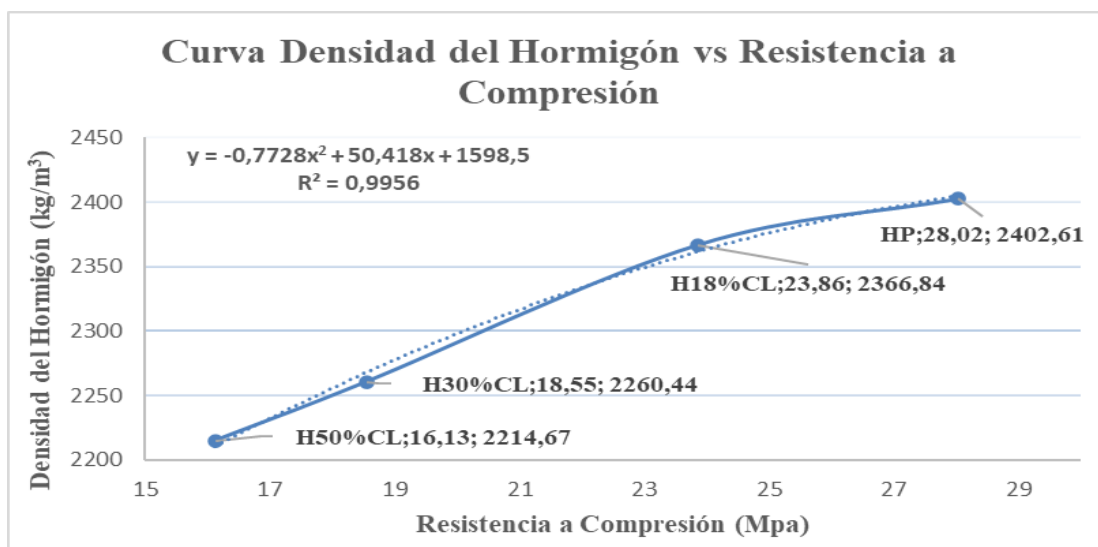
### **4.1 Planteamiento de curvas y ábacos**

Para poder realizar el ajuste de los datos obtenidos en los ensayos realizados, con el objeto de determinar las curvas de mejor ajuste de la relación de las diferentes propiedades que afectan a la permeabilidad vs el porcentaje de ladrilla, se utilizó el método de regresiones para obtener la curva que más se ajuste a los valores obtenidos y darle una ecuación representativa, donde se observó que el mejor ajuste el del tipo polinómico.

#### **4.1.1 Curvas de densidad del hormigón respecto de su resistencia a la compresión y % de cascote de ladrillo.**

Se puede realizar un análisis comparativo para poder observar el comportamiento de diferentes mezclas y así poder expresar en un gráfico que refleje el descenso gradual de la resistencia respecto de la densidad de las distintas mezclas al reemplazar el un porcentaje determinado el agregado grueso por cascote de ladrillo, esta grafica se convierte en un parámetro muy importante ya que se puede visualizar las variaciones que presenta las diferentes mezclas realizadas en laboratorio en una misma grafica para así poder obtener conclusiones del trabajo.

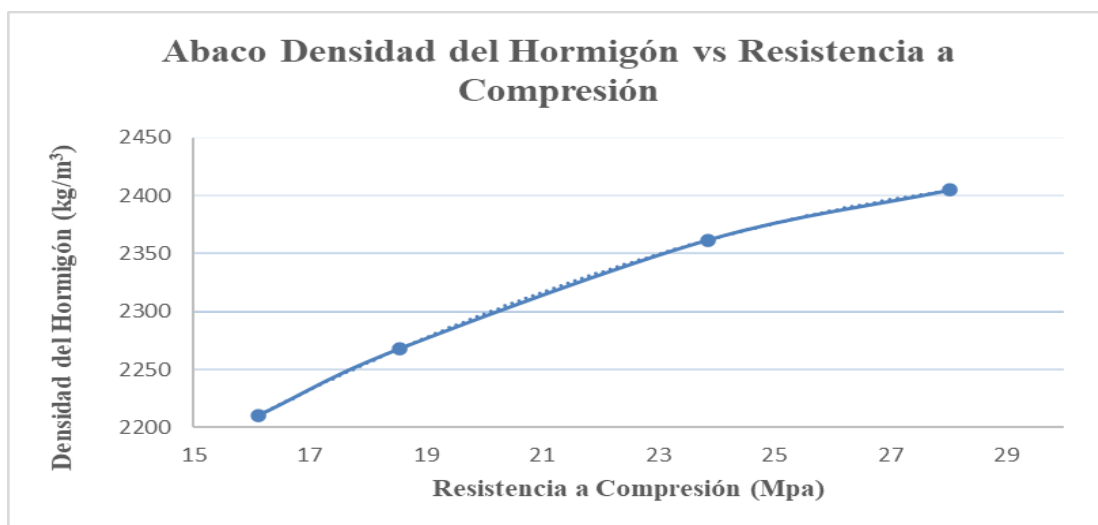
FIGURA 4.1.1-1: CURVA DENSIDAD DEL HORMIGÓN VS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS.



Fuente: Elaboración Propia.

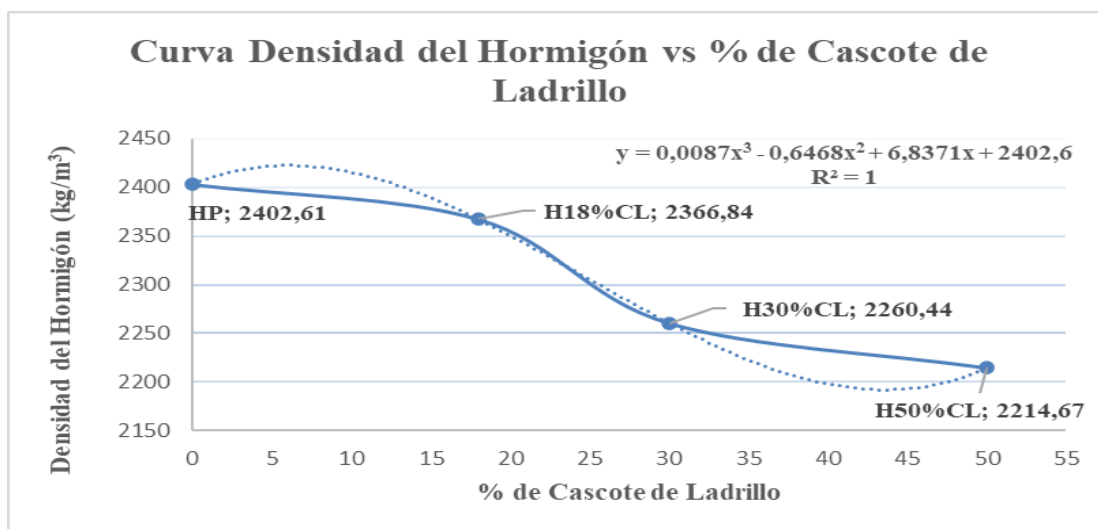
Abreviaturas: HP= Hormigón patrón; H18%CL= hormigón con 18% de cascote de ladrillo.

FIGURA 4.1.1-2: ABACO DENSIDAD DEL HORMIGÓN VS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS.



Fuente: Elaboración Propia.

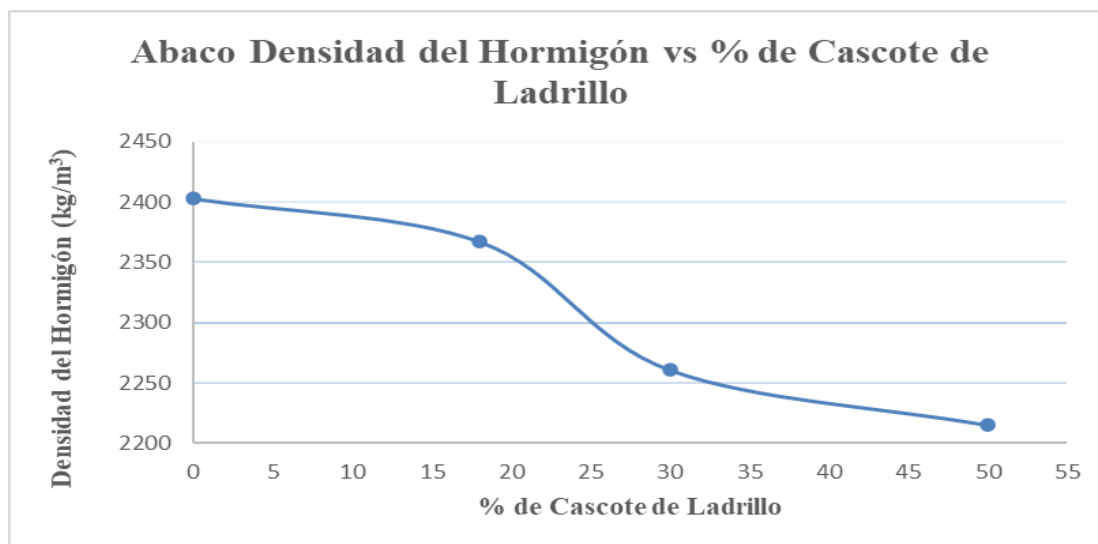
FIGURA 4.1.1-3: CURVA DENSIDAD DEL HORMIGÓN VS % DE CASCOTE DE LADRILLO.



Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: HP= Hormigón patrón; H18%CL= hormigón con 18% de cascote de ladrillo.

FIGURA 4.1.1-4: ABACO DENSIDAD DEL HORMIGÓN VS % DE CASCOTE DE LADRILLO.

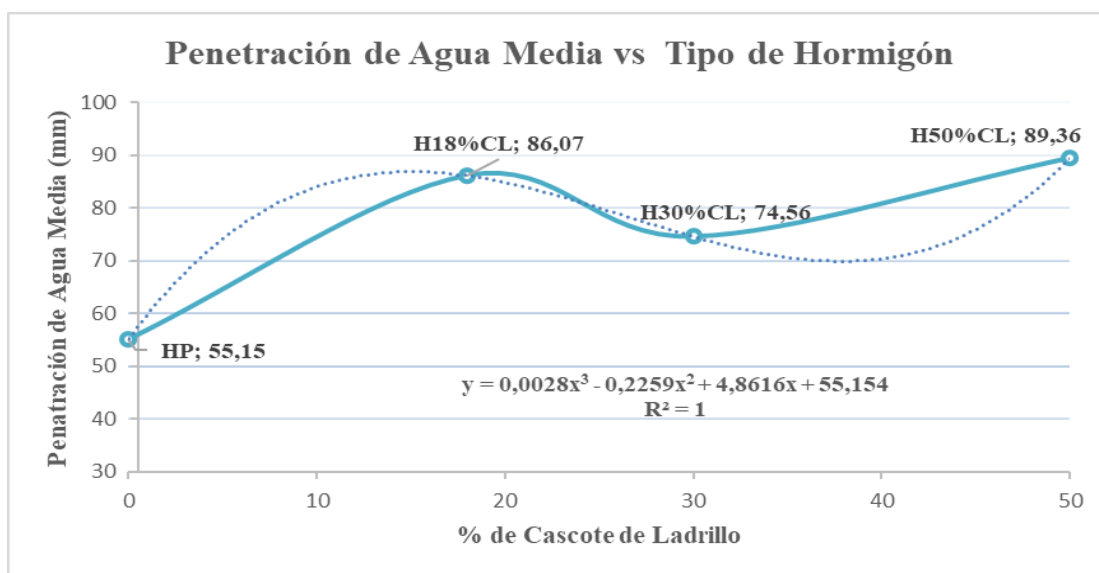


Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.1.2 Curvas penetración de agua bajo presión vs tipo de hormigón

Se puede realizar un análisis comparativo para poder observar el comportamiento de diferentes mezclas y así poder expresar en un gráfico que refleje el comportamiento de la penetración de agua bajo presión media y máxima respecto de distintas mezclas al reemplazar el un porcentaje determinado el agregado grueso por cascote de ladrillo, esta grafica se convierte en un parámetro muy importante ya que se puede visualizar las variaciones que presenta las diferentes mezclas realizadas en laboratorio en una misma grafica para así poder obtener conclusiones del trabajo.

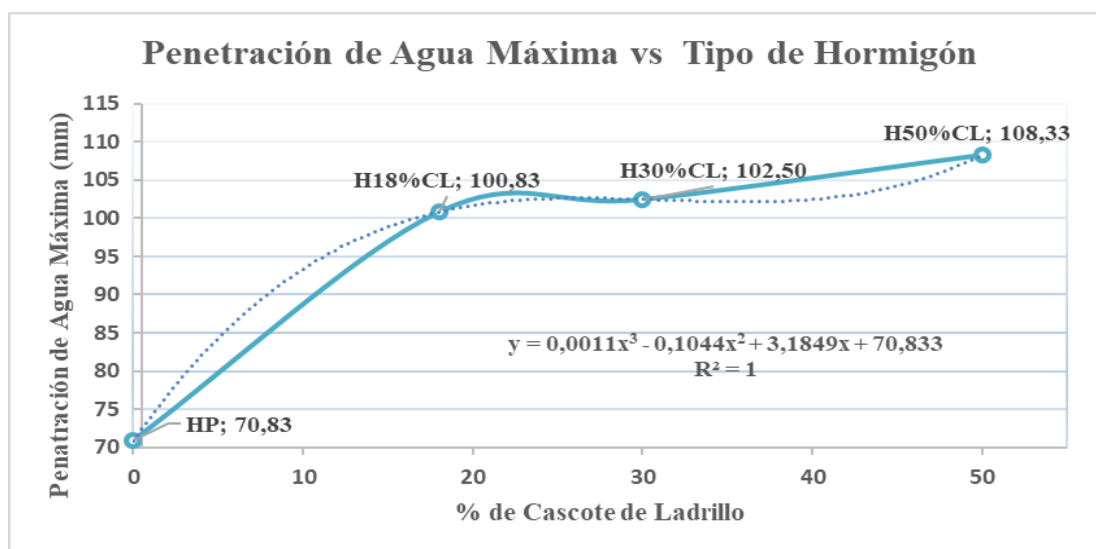
FIGURA 4.1.2-1: CURVA PENETRACIÓN DE AGUA MEDIA VS TIPO DE HORMIGÓN



Fuente: Elaboración Propia

Abreviaturas: HP= Hormigón patrón; H18%CL= hormigón con 18% de cascote de ladrillo.

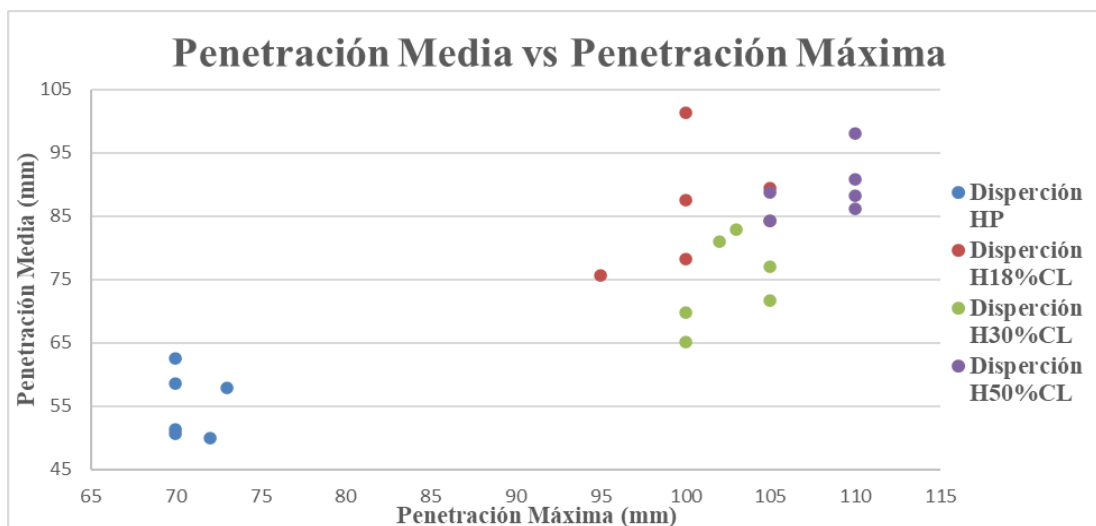
FIGURA 4.1.2-2: CURVA PENETRACIÓN DE AGUA MÁXIMA VS TIPO DE HORMIGÓN



Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: HP= Hormigón patrón; H18%CL= hormigón con 18% de cascote de ladrillo.

FIGURA 4.1.2-3: DISPERCIÓN DE PENETRACIÓN MEDIA VS PENETRACIÓN MÁXIMA



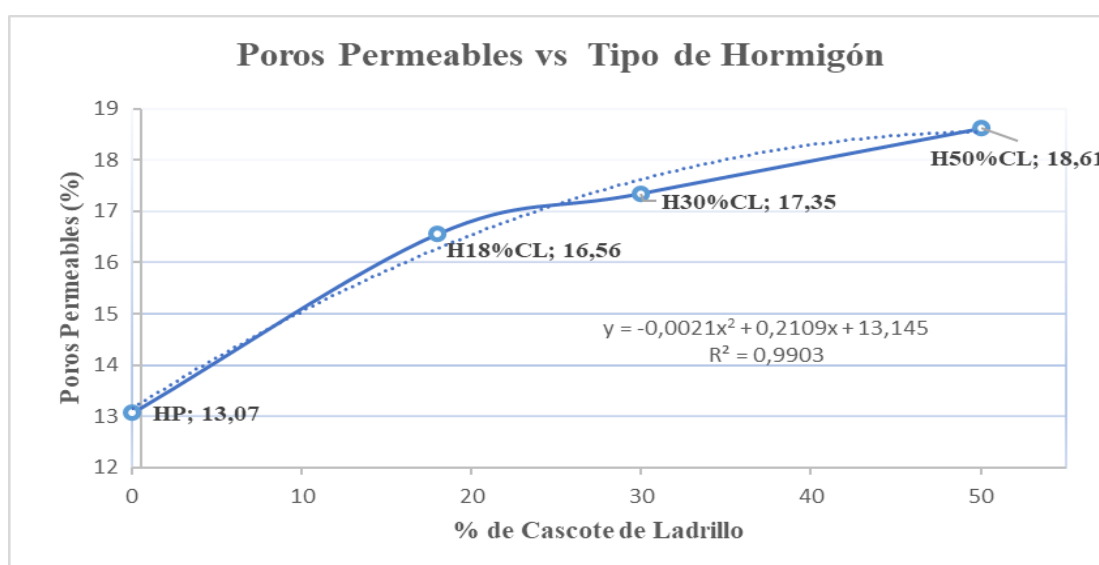
Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: HP= Hormigón patrón; H18%CL= hormigón con 18% de cascote de ladrillo.

### 4.1.3 Curvas poros permeables vs tipo de hormigón

Se puede realizar un análisis comparativo para poder observar el comportamiento de diferentes mezclas y así poder expresar en un gráfico que refleje el comportamiento de la del porcentaje de poros permeables (porosidad) en el hormigón respecto de distintas mezclas al reemplazar el un porcentaje determinado de agregado grueso por cascote de ladrillo, esta grafica se convierte en un parámetro muy importante ya que se puede visualizar las variaciones que presenta las diferentes mezclas realizadas en laboratorio en una misma grafica para así poder obtener conclusiones del trabajo.

FIGURA 4.1.3-1: CURVA POROS PERMEABLES VS TIPO DE HORMIGÓN



Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: HP= Hormigón patrón; H18%CL= hormigón con 18% de cascote de ladrillo.

## 4.2 Identificación y definición de parámetros de análisis

### 4.2.1 Características generales de los componentes del hormigón.

Los componentes de las mezclas de hormigón (cemento, arena, grava y cascote de ladrillo) los cuales se utilizaron en las pruebas, son materiales convencionales que se encuentran en nuestro medio, cuyas características y valores están de acuerdo a las especificaciones necesarias (Manual de la ASTM), por lo cual se considera confiable

relacionar cualquier valor de alguna característica presentada en planillas, con la resistencia, la permeabilidad y el comportamiento del hormigón en general.

#### 4.2.2 Evaluación de los valores de penetración de agua bajo presión obtenidos

En el ensayo de penetración de agua bajo presión realizado a las probetas se realizaron 6 ensayos para el hormigón patrón y 6 para el hormigón con cascote de ladrillo para los porcentajes de (18%, 30% y 50%).

TABLA 4.2.2-1: VALORES DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN MEDIA Y MÁXIMA.

PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN (mm)								
N° Probeta	Hormigón Patrón		Hormigón 18% CL		Hormigón 30% CL		Hormigón 50% CL	
	Pen.Med.	Pen. Max.	Pen.Med.	Pen. Max.	Pen.Med.	Pen. Max.	Pen.Med.	Pen. Max.
1	50,66	70,00	75,66	95	65,13	100,00	98,03	110,00
2	50,00	72,00	78,29	100	82,89	103,00	88,16	110,00
3	62,50	70,00	87,50	100	76,97	105,00	84,21	105,00
4	57,89	73,00	84,21	105	71,71	105,00	88,82	105,00
5	58,55	70,00	101,32	100	69,74	100,00	90,79	110,00
6	51,32	70,00	89,47	105	80,92	102,00	86,18	110,00

Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: CL= Cascote de ladrillo; Pen. Med. =Penetración media de agua bajo presión; Pen. Max. =Penetración máxima de agua bajo presión.

Se determino la confiabilidad de los resultados utilizado el método el método de distribución normal con ayuda de los criterios del comité ACI 214

TABLA 4.2.2-2: ANÁLISIS ESTADISTICO DE LAS PENETRACIONES MÁXIMAS.

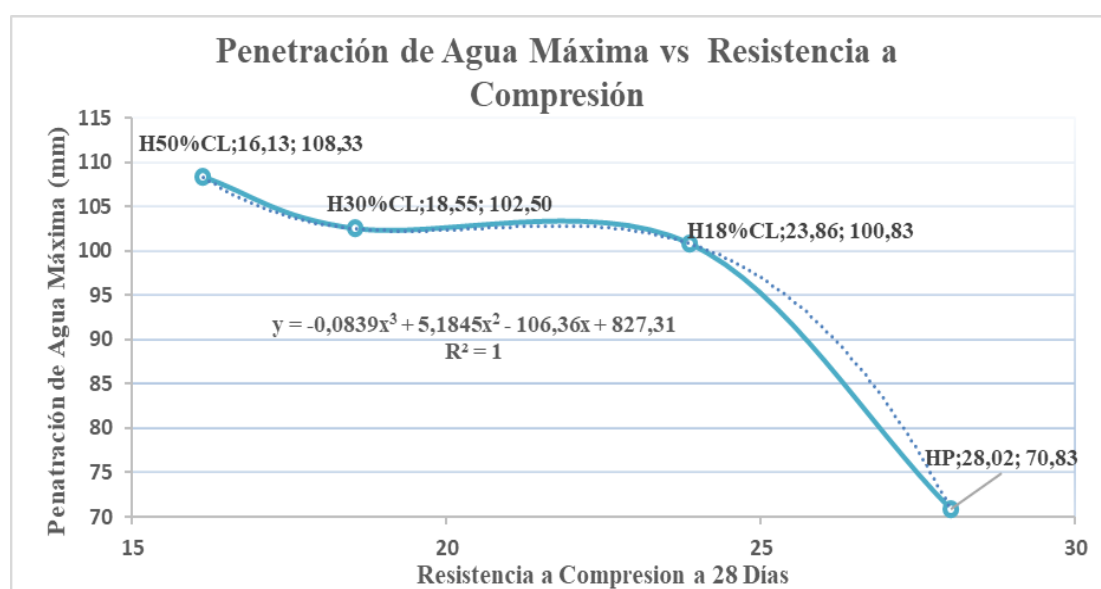
Variable	Hormigón Patrón	Hormigón 18% CL	Hormigón 30% CL	Hormigón 50% CL
$\sigma=$	1,33	3,76	2,26	2,58
PEN.MAX.	70,83	100,83	102,50	108,33
$\delta$	1,88	3,73	2,20	2,38
Calidad del Hormigón según ACI	EXELENTE	BUENO	EXELENTE	EXELENTE

Fuente: Elaboración Propia

### 4.2.3 Evaluación de relación de la profundidad de penetración agua bajo presión y la resistencia a compresión.

Para poder evaluar la relación que se existe entre la resistencia a compresión del hormigón el incremento de la profundidad de penetración de agua bajo presión se elaboró una curva que relaciona la penetración de agua bajo presión y la resistencia a compresión del hormigón.

FIGURA 4.2.3-1: ANÁLISIS DE RELACIÓN DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN VS RESISTENCIA A COMPRESIÓN.



Fuente: Elaboración Propia.

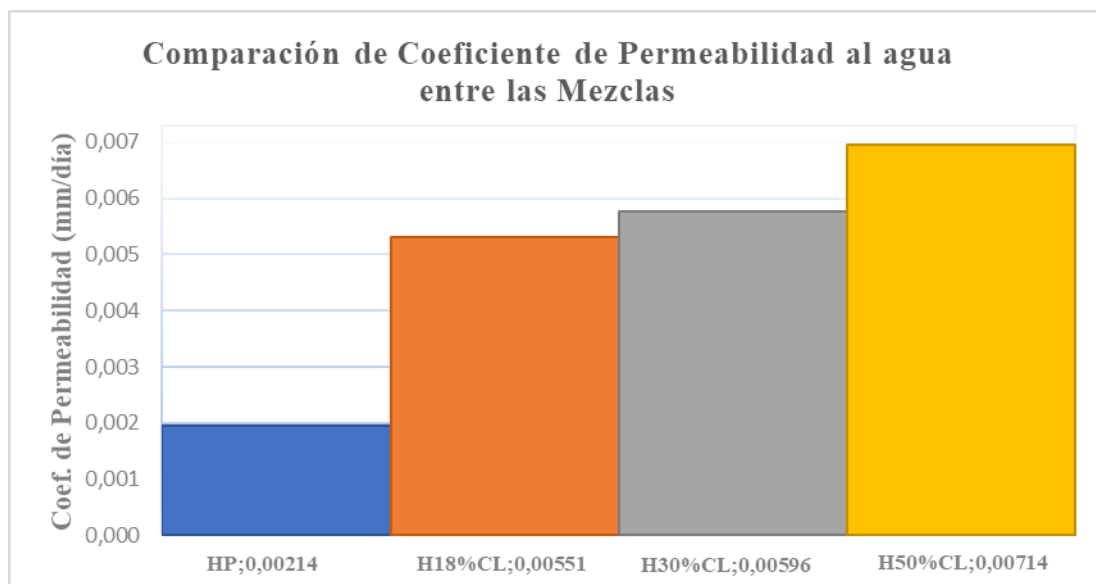
Abreviaturas: HP= Hormigón patrón; H18%CL= hormigón con 18% de cascote de ladrillo.

En la gráfica podemos observar que se produce una disminución de resistencia a compresión directamente proporcional al aumento de penetración de agua bajo presión.

### 4.3 Análisis de la permeabilidad en hormigones con cascote de ladrillo

Por medio de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos que se realizaron, se podrá realizar diferentes gráficos y curvas con las cuales se realizará un análisis de los valores de permeabilidad obtenidos para los diferentes porcentajes de cascote de ladrillo que se adiciono al hormigón en relación a un hormigón patrón H21.

FIGURA 4.3-1: COMPARACIÓN DE COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD AL AGUA ENTRE LAS MEZCLAS.



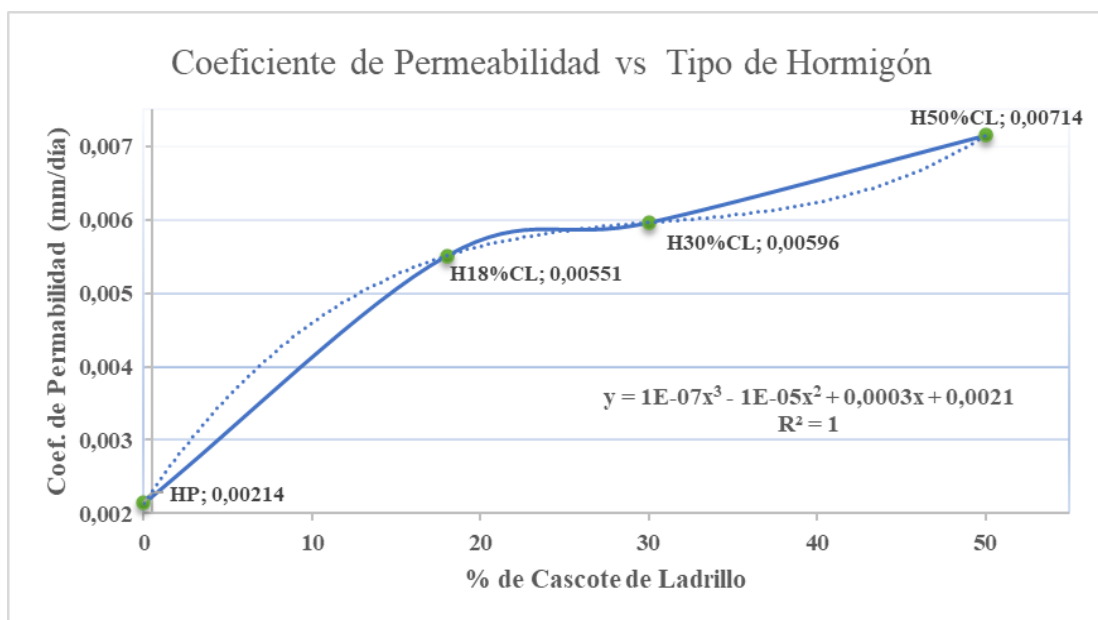
Fuente: Elaboración Propia

Abreviaturas: HP= Hormigón patrón; H18%CL= hormigón con 18% de cascote de ladrillo; Coef. = Coeficiente.

En la FIGURA 4.3-1 se puede apreciar que los valores de coeficiente de permeabilidad al agua en las diferentes mezclas de hormigón realizadas en laboratorio aumentan de manera directamente proporcional al porcentaje de cascote de ladrillo que se adiciono en reemplazo al agregado grueso, por lo cual se puede evidenciar que al realizar este reemplazo por un material más ligero y poroso el valor del coeficiente de permeabilidad al agua aumenta. Con valores de coeficiente de permeabilidad obtenidos para el HP es de 0,00214 (mm/día), pata H18%CL de 0,00551 (mm/día), pata H30%CL de 0,00596 (mm/día) y pata H50%CL de 0,00714(mm/día).

Como se puede ver en el gráfico se produce un incremento considerable de coeficiente de permeabilidad al agua y que entre los porcentajes de 18% y 30% de adición de cascote de ladrillo el incremento de dicho coeficiente es más moderado y que en el 50 % de adicción de cascote de ladrillo el valor del coeficiente es mucho mayor.

FIGURA 4.3-2: CURVA DE COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD VS TIPO DE HORMIGON.

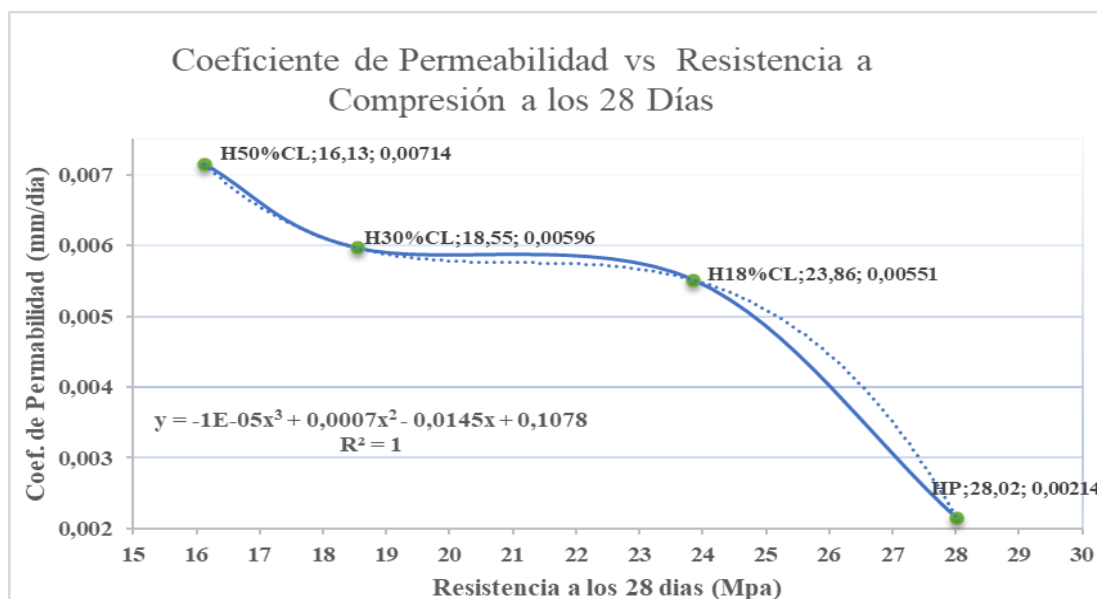


Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: HP= Hormigón patrón; H18%CL= hormigón con 18% de cascote de ladrillo; Coef. = Coeficiente.

Con los resultados obtenidos de coeficiente de permeabilidad al agua de las diferentes mezclas de hormigón estudiadas se pudo realizar una curva por medio de la cual se pudo obtener una ecuación para poder determinar valores aproximados de dicho coeficiente para otros % de cascote de ladrillo que se desee estudiar la cual nos da un valor de  $R^2=1$  el cual nos hace ver que la línea de tendencia polinómica es la que más se ajusta a los valores obtenidos.

FIGURA 4.3-3: CURVA DE COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD VS RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGON.



Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas: HP= Hormigón patrón; H18%CL= hormigón con 18% de cascote de ladrillo; Coef. = Coeficiente.

También se realizó una curva para poder relacionar el coeficiente de permeabilidad al agua y la resistencia, para poder visualizar el comportamiento de la resistencia en los hormigones con coeficiente de permeabilidad mayor, en la cual podemos observar que a la resistencia reduce de forma directamente proporcional al aumento de la permeabilidad del hormigón.

Con la curva realizada se obtuvo una ecuación con la cual se podrá tener los valores de coeficiente de permeabilidad al agua aproximados para mezclas de hormigones con porcentaje de cascote de ladrillo diferentes a los estudiados en este trabajo en base a los valores de resistencia que se necesite.

#### 4.4 Diferencia entre resultados obtenidos y esperados

Después de hacer un análisis de todo lo referente al hormigón con cascote de ladrillo se pudo hacer una evaluación de los resultados obtenidos en laboratorio con los que se

podieran encontrar en bibliografía y que constituyeron los criterios necesarios para poder realizar esta dosificación.

En cuanto a la resistencia del hormigón partimos con los parámetros que tenemos disponibles en bibliografía donde se nos indica que la misma puede variar de acuerdo al tipo de hormigón que se requiera de acuerdo a la norma ACI-318 a partir de los 17Mpa hasta 21Mpa que es el rango que se estableció para el desarrollo de este estudio, la resistencia a compresión del hormigón patrón que se obtuvo es 28,02 Mpa y para el hormigón con cascote de ladrillo varía entre 23,86 Mpa y 16,13 Mpa, que comparándola con el rango establecido se encuentra que el hormigón con 50 % de cascote de ladrillo no cumple con la resistencia mínima para un hormigón estructural simple.

En el caso de los valores de densidades de las mezclas de prueba, de acuerdo a la bibliografía con la que se cuenta, en la cual se establece una densidad promedio para el hormigón convencional de  $2400 \text{ kg/m}^3$  y menos a  $2000 \text{ kg/m}^3$  para los hormigones considerados livianos, el valor obtenido en laboratorio por las pruebas realizadas de la densidad promedio para el hormigón patrón es de  $2402,61 \text{ kg/m}^3$  y para el hormigón con ladrillo triturado se obtuvieron valores de densidad entre  $2366,84 \text{ kg/m}^3$  y  $2214,67 \text{ kg/m}^3$ ; este último valor no logro llegar al valor que se esperaba de densidad que era un valor cercano a  $2000 \text{ kg/m}^3$  para poder llegar a un hormigón ligero.

Para poder obtener los valores de la penetración de agua bajo presión, en cilindros de hormigón, se tuvo que realizar un ensayo adicional que es el ensayo de tracción indirecta.

En lo que se refiere al valor de la penetración máxima para el hormigón, la bibliografía nos indica que, para que un hormigón sea considerado impermeable la penetración máxima debe ser menor a 50 mm, para ello la resistencia mínima del hormigón debe ser 28 Mpa y una relación A/C máxima de 0,5. El valor de la penetración máxima obtenida en el ensayo para el hormigón patrón fue de 70,83 mm y para el hormigón con cascote de ladrillo varía entre 100,83 mm y 108,33 mm.

En el caso de la penetración media, el valor obtenido para el hormigón patrón fue de 55,15mm y para el hormigón con cascote de ladrillo se obtuvieron valores entre 86,07mm y 89,36 mm.

En estudios previos realizados, en los cuales se hizo una relación entre la profundidad de penetración media y máxima en diferentes tipos de hormigones, se puede observar que cuando la penetración no supera los 50 mm, se ajusta bastante bien y existe una buena correspondencia. Pero para hormigones que llegan a 60mm de profundidad máxima o más, ya se observa una dispersión, el frente de penetración ya empieza a alcanzar los laterales de las probetas y empieza a escapar agua. Realizando una relación entre la profundidad de penetración máxima y media, para las probetas ensayadas, se puede evidenciar que se produce dicha dispersión ya que las penetraciones máximas obtenidas son mayores a 50 mm, incluyendo a la penetración máxima del hormigón patrón. Lo cual corrobora lo ya observado en estudios anteriores.

En cuanto a los valores del coeficiente de permeabilidad al agua se aplicó la ecuación de Valenta para poder obtener el valor de dicho coeficiente, para poder utilizar esta ecuación se necesitó los datos del ensayo de penetración de agua bajo presión y adicionalmente se realizó un ensayo de determinación de la densidad, la absorción de agua y los vacíos en el concreto endurecido.

Con estos datos y la ecuación de Valenta se obtuvo que los valores de permeabilidad al agua del hormigón en estudio tubo los siguientes valores, para el hormigón patrón se obtuvo un valor de  $2,48E-11$  (m/s) y para el hormigón con cascote de ladrillo para un 18% se obtuvo  $6,38E-11$ (m/s), para 30% un valor de  $6,90E-11$ (m/s) y para 50% un valor de  $8,27E-11$ (m/s).

Los valores obtenidos se comportan de acuerdo a los esperados ya que se produce un incremento directamente proporcional al aumento de porcentaje de cascote de ladrillo adicionado al hormigón, ya que se está reemplazando el agregado grueso por un material de menor densidad y por ende de mayor porosidad el cual aumenta el valor de la permeabilidad.

#### 4.5 Análisis de Costos

Se realizó el costo de los materiales para 1 m<sup>3</sup> de hormigón, de los valores obtenidos se realizó un análisis técnico vs costo de las propiedades que nos brinda en el hormigón el reemplazo del agregado grueso por cascote de ladrillo en sus diferentes porcentajes.

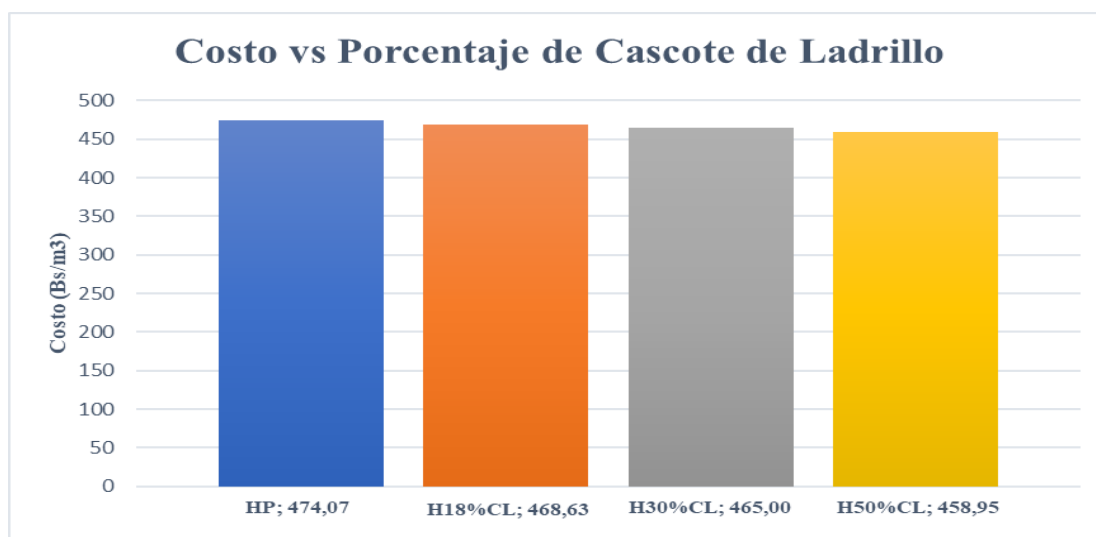
TABLA 4.5-1: ANÁLISIS DE COSTOS.

Tipo de Hormigón	Volumen (m <sup>3</sup> )	Costo (Bs)	Reducción de Costo (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Reducción de Densidad (%)	Resistencia (Mpa)	Reducción de Resistencia (%)	Penetración Máxima (mm)	Aumento de Penetración (%)	Coefficiente de Permeabilidad al Agua Kw (mm/día)	Aumento de Coeficiente de Permeabilidad al Agua Kw (%)
Hormigón Patron	1	474,07	0	2402,61	0	28,02	0	70,83	0	0,00214	0
H18%CL	1	468,63	1,15	2366,84	1,49	23,86	14,85	100,83	42,35	0,00551	156,93
H30%CL	1	465,00	1,91	2260,44	5,92	18,55	33,80	102,50	44,71	0,00596	177,96
H50%CL	1	458,95	3,19	2214,67	7,82	16,13	42,45	108,33	52,94	0,00714	233,15

Fuente: Elaboración Propia

Abreviaturas:H18%CL= hormigón con 18% de cascote de ladrillo.

FIGURA 4.5-2: COSTO DE LA ELAVORACIÓN DE HORMIGONES CON CASCOTE DE LADRILLO.



Fuente: Elaboración Propia.

Abreviaturas:H18%CL= hormigón con 18% de cascote de ladrillo.

#### **4.6 Análisis de la trabajabilidad en las mezclas de hormigón**

De acuerdo a la experiencia que se tuvo durante el vaciado de las probetas del hormigón patrón, respecto a la trabajabilidad se puede decir que se obtuvo una mezcla bien trabajable debido a las propiedades de los agregados, la cantidad de agua y cemento fueron las adecuadas para la mezcla, siendo menos trabajable las mezclas con ladrillo triturado debido a la naturaleza del agregado sus propiedades físicas, su textura y forma, provocaron que las mezclas sean más difíciles de trabajar, mientras más porcentaje de ladrillo triturado se añadía a la mezcla aumentaba la dificultad a la hora de elaborar las probetas, por lo que el vaciado de las probetas debía ser efectuado con rapidez para poder mantener la trabajabilidad de las mezclas.

#### **4.7 Aplicabilidad del trabajo de investigación**

En la actualidad, en nuestra ciudad el cascote de ladrillo es un material netamente de desecho que no se le da el valor para ser reutilizado como material de construcción, sino netamente para realizar rellenos y mejoramiento de caminos de tierra.

A partir de un anterior trabajo realizado y en conjunto con el estudio que se está realizando en el presente documento, se puede proponer aplicaciones como material de construcción para el tipo de hormigón estructural simple, de acuerdo al objeto de estudio.

Y también porque en diferentes regiones del trópico de nuestro país no se tiene buena disponibilidad de materiales áridos por lo cual en estas regiones se ve en la necesidad de recurrir al cascote de ladrillo para realizar hormigón, o si no se tiene que hacer traer de grandes distancias lo cual incide y encárese en el costo de su elaboración en esas zonas.

Basándose en el comportamiento de las mezclas obtenido en laboratorio, en lo que se refiere a resistencia, densidad y penetración de agua y la permeabilidad se puede recomendar el uso del concreto simple estructural se permite solamente en los casos (a) hasta (d):

(a) Miembros que están apoyados de manera continua sobre el suelo o que están apoyados sobre otros miembros estructurales capaces de proporcionarles un apoyo vertical continuo.

(b) Miembros en los cuales el efecto de arco genera compresión bajo todas las condiciones de carga.

(c) Muros.

(d) Pedestales.

El objetivo principal de la aplicación de hormigones ligeros en la construcción, es el de optimizar los recursos de la construcción manteniendo las condiciones funcionales, estéticas y de seguridad previstas.

La aplicación que se le puede dar al hormigón con cascote de ladrillo se basa exclusivamente en el diseño que se le dé, además que también interviene las características de los agregados que se vaya a emplear para la elaboración del mismo.

Este hormigón también puede ser utilizado para la construcción de elementos secundarios en edificios o viviendas, donde se requiera de elementos ligeros para poder reducir cargas muertas, para colar elementos de relleno que no soporten cargas estructurales, para la construcción de viviendas en las cuales se requiera de aislamiento térmico.

También se pueda emplear en la fabricación de elementos prefabricados como puede ser muros sin carga o muros divisorios, pero para esto se requiere de tecnologías más complejas, pero si se le daría un manejo adecuado nos podría dar grandes prestaciones técnicas, en montaje y transporte, planteando un esquema práctico de empleo y reducción de escombros en algunas obras.

Como también se implementó la ecuación de Valenta también se puede dar uso al presente trabajo como apoyo para poder hacer este análisis a cualquier tipo de hormigón para poder obtener valores de coeficientes de permeabilidad al agua, en obras que sea necesario conocer este coeficiente para poder calcular tiempos de penetración de agua en obras como ser presas, fundaciones cajón, muros de sótanos, etc.

#### 4.8 Valoración del análisis

A continuación, se presentan las ventajas más relevantes del trabajo de análisis realizado:

- Al ser un trabajo de investigación y además experimental, se asegura la veracidad de todos los resultados obtenidos, tanto de caracterización de los materiales como de la elaboración de muestras, análisis de rotura, análisis de penetración de agua y otros parámetros obtenidos.
- Como se mencionó anterior mente, los materiales que se emplearon en la realización de las mezclas de hormigón fueron materiales que se encuentran en nuestro medio, que diariamente son utilizados para las distintas obras de construcción. Por lo tanto, es propio y confiable que se puedan realizar cualquier consulta requerida en el presente trabajo, sobre las propiedades, características de alguno de los materiales ensayados para algún tipo de mezcla.
- El haber presentado los resultados de resistencia, densidad, penetración de agua y coeficientes de permeabilidad al agua en gráficas y cuadros que correlacionan las distintas mezclas, ayuda en gran medida y de una forma práctica en el mejor entendimiento del comportamiento del hormigón ante el esfuerzo de compresión con reemplazo en forma gradual de uno de sus agregados en este caso el agregado grueso.
- El haber identificado la aplicación de las mezclas realizadas colaboran con el aporte que se quiere realizar con la presente investigación al desarrollo de tecnologías alternativas en el diseño y cálculo de edificaciones.
- Al haber realizado el análisis de las profundidades de penetración de agua media, máxima y la permeabilidad en el hormigón estudiado se brinda criterios para poder emplear dicho hormigón y en los elementos que se pudiera aplicar.

#### **4.9 Contrastación de hipótesis**

Mediante los ensayos realizados se pudo comprobar que la permeabilidad en hormigones con adición de cascote de ladrillo en remplazo al agregado grueso en diferentes porcentajes incrementa de manera directamente proporcional según el incremento de dicho cascote, y que se produce una reducción de peso en el hormigón. La permeabilidad aumento en el orden de 156,93% para el hormigón con 18% de cascote de ladrillo, 177,96% para el hormigón con 30% de cascote de ladrillo y 233,15% para el hormigón con 50% de cascote de ladrillo, con lo cual se cumple parcialmente la hipótesis planteada.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- Combinando el ensayo EN 12390-08 y la ecuación de Valenta permitió una evaluación integral de la permeabilidad, proporcionando una comprensión más profunda del comportamiento de estos hormigones mixtos frente a la penetración de fluidos en este caso agua, revelo una tendencia general al incremento de la permeabilidad a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución de grava por cascote de ladrillo.
- Este procedimiento metodológico aseguro que las variaciones en la permeabilidad observadas en los hormigones con cascote de ladrillo son atribuidas principalmente a la influencia de este agregado reciclado, minimizando la variabilidad introducida por diferencias significativas en la composición de las mezclas.
- El análisis comparativo de las profundidades de penetración entre las diferentes mezclas revelo la influencia del contenido de cascote de ladrillo en la permeabilidad, se observó una tendencia a mayores profundidades de penetración de agua en aquellos hormigones con un mayor porcentaje de sustitución de grava por cascote de ladrillo, lo que indica una mayor permeabilidad.
- El análisis de los coeficientes de permeabilidad calculados mediante la ecuación de Valenta revelo tendencias consistentes con los resultados directos del ensayo de penetración.
- El análisis comparativo evidencio claramente que la incorporación de cascote de ladrillo como parte del agregado grueso afecta negativamente la impermeabilidad del hormigón, siendo este efecto más pronunciado a mayores porcentajes de sustitución. Esto es crucial para evaluar la viabilidad del uso de cascote de ladrillo en aplicaciones donde la baja permeabilidad es un factor de diseño importante para la durabilidad de la estructura.

## Recomendaciones

- Investigar como la pre-saturación, el recubrimiento con agentes impermeabilizantes puede influir en la permeabilidad del hormigón resultante. Esto podría mitigar el aumento de la permeabilidad observado.
- Realizar estudios de durabilidad a largo plazo en hormigones con cascote de ladrillo expuestos a diferentes condiciones ambientales para comprender como la permeabilidad inicial se relaciona con el desempeño a largo plazo.
- Investigar la combinación del uso de cascote de ladrillo con aditivos (puzolanas, superfluidificantes, etc.) para optimizar tanto las propiedades mecánicas como la permeabilidad del hormigón reciclado.
- En elementos con cascote de ladrillo en elementos estructurales o de contención, se debe tener en cuenta el potencial aumento de la permeabilidad y tomar las precauciones necesarias en el diseño para garantizar la durabilidad requerida.