

# **CAPÍTULO 1**

## **ANTECEDENTES**

# **ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO INTERNO DE LOS HORMIGONES A EDADES TEMPRANAS SUMERGIDOS EN AGUAS RESIDUALES MEDIANTE TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA EN RAYOS X**

## **1 Introducción**

### **1.1 Antecedentes**

Hoy en día, la tomografía computarizada (TC) de rayos X se está aplicando en el campo de la ingeniería estructural. El escaneo de una muestra de hormigón mediante tomografía de rayos X proporciona una visión de la estructura interna sin necesidad de destruir la muestra.

Teniendo en cuenta a Bentz (2000) donde establece un vínculo entre la estructura del poro y las propiedades de transporte (sorbividad, difusividad y permeabilidad), este estudio se amplía analizando directamente la microestructura tridimensional de dos de los materiales (ladrillos) como lo ejemplifican las imágenes micro tomográficas de rayos X. El estudio llega a la conclusión que la micro tomografía de rayos X puede proporcionar información valiosa imágenes tridimensionales de la microestructura de materiales de construcción porosos, pero la resolución elegida de las imágenes debe seleccionarse cuidadosamente para equilibrar el tamaño de los poros y que la relación de Katz-Thompson se puede utilizar para caracterizar las propiedades de transporte y el tamaño de los poros de los ladrillos examinada en este estudio.

Según Burlion (2006), esboza la caracterización de la evolución microestructural en un mortero sometido a un ataque químico, mediante un potente método experimental no intrusivo, a saber, la microtomografía computarizada de rayos X, Este innovador método se utiliza para medir la variación de porosidad en un mortero lixiviado. El análisis demostró que los agregados silíceos no tenían un papel significativo en el proceso de lixiviación, aunque un aumento en la porosidad parece ser importante en la ITZ.

M. Tóth (2008), señala los beneficios de las mediciones de núcleos no destructivas mediante tomografía computarizada (TC) médica en la caracterización integrada de yacimientos en 3D.

Desde el punto de vista de Álvarez (2008) describe dos técnicas no destructivas basadas en la toma y procesamiento de imágenes que han sido exitosamente empleadas para caracterizar materiales de pavimentos: 1) tomografía computarizada con rayos-X, y 2) sistema de imágenes de Agregados. La primera técnica permite caracterizar la estructura interna de mezclas asfálticas con el fin de analizar y modelar su desempeño. El sistema de imágenes de agregados fue desarrollado para caracterizar las propiedades morfológicas de los agregados (i.e., forma, angularidad y

textura), técnica que proporciona importantes ventajas con respecto a los ensayos estándar ya que las mediciones son objetivas, de rápida ejecución, repetibles y reproducibles.

Se llegó a la conclusión la tomografía computarizada con rayos-X (*X-ray CT*) es un método eficaz para caracterizar la estructura interna de materiales porosos. Su empleo ha sido especialmente eficiente en el estudio de la microestructura de mezclas asfálticas, en particular en lo concerniente a la determinación de la estructura de vacíos (i.e., tamaño, distribución y conectividad) y al análisis de transporte de agua al interior del material. La principal ventaja de esta técnica es que, al ser no destructiva, es posible utilizar los mismos especímenes en pruebas de laboratorio posteriores con el fin de determinar sus características mecánicas, físicas, o químicas.

Erdem (2014) resalta que el análisis fractal y tomografía computarizada de rayos X 3D acompañada de análisis de imagen digital técnica se utilizan para la evaluación cuantitativa de la resistencia a la segregación, la fuerza estática y agrietamiento inducido por corrosión en concreto autocompactante normal y liviano autocompactante concreto. Se demostró que el concreto liviano autocompactante tenía menor susceptibilidad a la corrosión en la etapa inicial de exposición al ambiente de cloruro que el concreto autocompactante normal y se disiparon mayores energías fractales en el concreto autocompactante fabricado con materiales convencionales menos porosos y más rígidos.

Como afirma Czajkowska (2021) el contacto del hormigón con factores agresivos, estructuras tecnológicas, reduce su durabilidad a través de cambios microestructurales. Este trabajo presenta los resultados de una investigación sobre la determinación de la influencia de las aguas residuales de la cámara de arena posterior y las aguas residuales de la cámara de lodos activos en tres diferentes ambientes, es decir, ácidos, neutros y alcalinos, sobre la estructura y la resistencia a la compresión del hormigón.

## **1.2 Descripción del problema**

Las plantas de tratamiento de aguas residuales, en específico en el hormigón que forma parte de las estructuras, el mismo que está sumergido en aguas residuales y por efectos de agentes químicos puede llegar generar la degradación del mismo. También es posible que la reacción química del hormigón en contacto con aguas residuales genere un cambio en las características de los materiales que contiene el hormigón y de esta manera modificar sus características como ser la permeabilidad del mismo.

El problema afecta a las estructuras hechas de hormigón en las plantas de tratamiento de aguas residuales, ya que las estructuras están sumergidas en aguas que contienen sustancias agresivas (ácidos, sulfatos, ciertas sales de magnesio y soluciones orgánicas) que pueden causar deterioro en el hormigón, una propiedad a tomar en cuenta es la permeabilidad ya que al tener mayor porcentaje de vacíos la permeabilidad aumenta.

Se hicieron investigaciones sobre el tema “Reducción de la resistencia a la compresión de hormigones de edades tempranas por sumersión en aguas residuales domesticas” (Gamarra, 2021) para desarrollar un método de dosificación del hormigón que pueda ser empleado específicamente en aguas residuales.

No se realizó ensayo no destructivo de la parte interna del hormigón, lo que nos permite aplicar tecnología de tomografía computarizada de rayos-X para hacer el análisis del comportamiento interno.

### **1.3 Planteamiento del problema**

¿La aplicación de la tomografía computarizada de rayos X permite realizar el análisis del comportamiento interno del hormigón en contacto con aguas residuales para determinar el porcentaje de vacíos, contacto agregado-agregado, permeabilidad y resistencia?

### **1.4 Justificación del problema**

El hormigón es un material utilizado en la construcción, que se caracteriza por su resistencia a la compresión, la tracción, la flexo-tracción y la abrasión. Se encuentra expuesto a una gran variedad de condiciones ambientales y conocimiento de las características internas del hormigón es esencial para garantizar su resistencia y durabilidad en estas condiciones.

La exposición a aguas residuales es una condición ambiental que puede agravar los problemas de permeabilidad del hormigón. Las aguas residuales contienen una gran cantidad de sales, que pueden reaccionar con los componentes del hormigón y provocar su degradación.

La permeabilidad del hormigón es una de las principales causas de su degradación. La presencia de vacíos en la estructura interna del hormigón permite la entrada de fluidos, que pueden provocar la corrosión del acero de refuerzo y la pérdida de resistencia.

La relación agua/cemento (R/C) es un parámetro que puede ser controlado fácilmente en la fabricación del hormigón. Por lo tanto, es posible diseñar mezclas de hormigón con diferentes relaciones agua/cemento para evaluar el efecto de la R/C en la resistencia y permeabilidad del hormigón.

La tomografía computarizada (TC) es una técnica de imagen que permite obtener imágenes de la estructura interna de los materiales. La TC ha sido utilizada con éxito para estudiar la estructura interna del hormigón.

Con esta técnica podremos mejorar los procesos de dosificación y relación agua/cemento empleados en mezclas puesto que una vez obtenidos los resultados de análisis interno de las probetas de hormigón de acuerdo al porcentaje de vacíos y relación agua/cemento podremos determinar cómo actúan las propiedades del hormigón sumergido en aguas residuales.

## **1.5 Alcance**

El alcance del presente trabajo comprende la realización de 134 probetas con la dosificación adecuada y dos relaciones agua/cemento, 67 probetas con relación agua/cemento de 0.42 y 67 probetas con relación agua/cemento de 0.47, con un fraguado de 1 día que fueron curadas 28 días en el laboratorio de hormigón de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, posterior a estos días, 64 probetas serán sumergidas en aguas residuales de la planta de tratamiento de San Luis por 120 días.

Este trabajo se presenta cuatro capítulos.

En el primer capítulo se expone el planteamiento del problema y así mismo su justificación, se conocerá los objetivos de este proyecto tanto general como específicos, también se indicará todo lo referente al planteamiento de este tema.

En el segundo capítulo este guiado al marco teórico de conceptos básicos relacionados con los hormigones sus dosificaciones, propiedades y problemas, también se realiza una explicación de la definición, descripción de la tomografía computarizada con rayos-x.

En el tercer capítulo se detalla la fabricación de las probetas en laboratorio, llevadas a la planta de tratamiento donde fueron sumergidas por 120 días, pasado este tiempo se hizo las probetas, a través de las imágenes internas que se obtuvo de la tomografía y se estudió el porcentaje de vacíos y el contacto agregado-agregado de sus partículas.

En el cuarto capítulo tenemos las conclusiones, recomendaciones y resultados de la investigación.

## **1.6 Objetivos**

### **1.6.1 Objetivo general**

Analizar las características internas (porcentaje de vacíos y contacto agregado-agregado) del hormigón después de estar en contacto con aguas residuales mediante el análisis de imágenes internas de probetas de hormigón obtenidas por tomografía computarizada en rayos-x para

establecer cómo actúan las propiedades del hormigón sumergido en aguas residuales y tener un óptimo desarrollo en la dosificación y relación agua/cemento del hormigón para plantas de tratamiento de aguas residuales.

### **1.6.2 Objetivos específicos**

- Analizar los conceptos teóricos de los materiales y dosificación de hormigones para realizar mezclas de calidad y preparar las probetas con la dosificación adecuada para su aplicación en obras hidráulicas para poder evaluarlas internamente dentro de un determinado tiempo de sumersión.
- Retirar las probetas de investigación sumergidas en aguas residuales para llevarlas al tomógrafo y obtener imágenes tomográficas de su estructura interna.
- Obtener valores de las imágenes de la tomografía computarizada en rayos-X en probetas de investigación para evaluar internamente la estructura de las probetas sumergidas.
- Evaluar los parámetros de investigación de porcentaje de vacíos, contacto agregado-agregado en el hormigón inmerso en aguas residuales para ver los resultados de la parte interna de las probetas durante los 120 días.
- Correlacionar la permeabilidad con la resistencia a la rotura a la compresión del hormigón.

### **1.7 Hipótesis**

Se plantea que la aplicación de la tomografía computarizada de rayos X facilita el análisis detallado del comportamiento interno del hormigón en contacto a aguas residuales. Se espera que esta tecnología permita una evaluación precisa del porcentaje de vacíos y el contacto agregado-agregado proporcionando una herramienta eficaz para la inspección no destructiva del hormigón. Se espera que la resistencia del hormigón sumergido en aguas residuales se vea afectada negativamente ya que estará en contacto con aguas agresivas, con factores corrosivos y con la presencia de ataques químicos, estos factores afectaran a las características del hormigón, originando una disminución de la resistencia a la compresión con el tiempo.

**CAPÍTULO 2**  
**MARCO TEÓRICO**

## 2 Marco Teórico

### 2.1 Hormigón

#### 2.1.1 Definición del hormigón

El concreto (hormigón) es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, une los agregados, normalmente arena y grava (piedra triturada piedra machacada, pedrejón), creando una masa similar a una roca. Esto ocurre por el endurecimiento de la pasta en consecuencia de la reacción química del cemento con el agua.

#### Figura 1.

*Componentes del concreto: cemento, agua, agregado fino, agregado grueso, son combinados para formar el concreto.*



Nota. Tomado de *Diseño y Control de Mezclas de Concreto* (p.1), por *Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, y Jussara Tanesi, 2004.*

#### 2.1.2 Componentes del hormigón

##### 2.1.2.1 Cemento

El cemento es un conglomerante hidráulico, un material inorgánico que se obtiene de la calcinación a 1450°C de una mezcla de piedra caliza, arcilla y mineral de hierro, el producto de esa calcinación es el clinker que es finamente molido con yeso y otros aditivos químicos para producir el cemento, que, amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua. Para la elaboración de los distintos tipos de hormigones se debe hacer uso solo de cementos que cumplan las exigencias de las normas bolivianas referentes al Cemento Pórtland (NB 2.1-001 hasta NB 2.1-014).



### **2.1.2.1.1 Los componentes de los cementos:**

**Clinkere portland:** Se obtienen al calcinar hasta fusión parcial mezclas muy íntimas de calizas y arcillas, preparadas artificialmente hasta una combinación prácticamente total de sus componentes.

**Clinkeres aluminosos:** Se obtiene por fusión de calizas y bauxitas en unas condiciones tales con el contenido mínimo de alúmina sean del 36%.

**Escorias siderúrgicas (S)** obtenidas mediante templado de ganga fundida procedente de procesos siderúrgicos.

**Puzolanas naturales (P), cenizas volantes (V), humo de sílice (D)**

**Filleres calizos (L)**, compuestos de carbonato cálcico de molido junto con Clinker Portland, mejoran las propiedades y comportamiento de los morteros y hormigones, tanto frescos como una vez endurecidos: dispersión, hidratación, trabajabilidad, retención de agua, capilaridad, retracción, figuración. (Varona Moya, Lopez Juarez, & Bañón Blázquez, 2012).

#### **Cementos portland**

Con esta denominación existen tres tipos:

##### **Cementos portland, tipo I**

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: clinker Portland en proporción no menor del 95% en masa y de cualquiera de los componentes adicionales definidos en esta norma, o mezclas de ellos, en proporción no mayor del 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que deberá añadirse al mismo con la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos

##### **Cementos portland con puzolana, tipo IP**

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: clinker Portland en proporción no menor del 70% ni mayor del 94% en masa, de puzolana natural en proporción no menor del 6% ni mayor del 30% en masa y de otros de los componentes adicionales definidos en esta norma, en proporción comprendida entre el 0% y el 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que deberá añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos.

##### **Cementos portland con filler calizo, tipo IF**

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: clinker Portland en proporción no menor del 80% ni mayor del 94% en masa, filler calizo en proporción no menor del 6% ni mayor del 15% en masa y de otros de los componentes adicionales definidos en esta misma norma, en proporción comprendida entre el 0% y el 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que deberá añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos.

### Cementos puzolánicos, tipo P

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: clinker Portland en proporción no menor del 60% en masa, de puzolanas naturales, cenizas volantes u otros materiales puzolánicos en proporción total no mayor del 40% en masa y de otros de los constituyentes definidos en esta norma, en proporción total no mayor del 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que deberá añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos.

Estos cementos deberán cumplir con el ensayo de puzolanidad, de acuerdo con la norma NB 642-95. (Norma Boliviana NB 011-Cemento, 1995).

**Tabla 1.**

*Clasificación y composición de los cementos.*

Tipos de cemento			Proporción en masa % (1)			
Denominación	Designación	Tipo	Clinker	Componentes principales		Componentes adicionales (2) (3)
				Puzolana Natural	Filler Calizo (3)	
	Cemento Portland	I	95 a 100			0 a 5
Cemento Portland	Cemento Portland con puzolana	IP	70 a 94	6 a 30	-	0 a 5
	Cemento Portland con filler calizo	IF	80 a 94	-	6 a 15	0 a 5
	Cemento puzolánico	P	$\geq 60$	$\leq 40$	-	0 a 5

Nota: Tabla obtenida *Norma Boliviana NB 011*

#### 2.1.2.2 Áridos

La naturaleza de los áridos y su preparación serán tales que permitan garantizar la adecuada resistencia y durabilidad del hormigón, así como las demás características que se exijan a éste en el pliego de especificaciones técnicas.

Como áridos para la fabricación de hormigones, pueden emplearse arenas y gravas obtenidas de yacimientos naturales, rocas trituradas u otros productos cuyo empleo se encuentre aceptado por la práctica, o resulte aconsejable como consecuencia de estudios realizados en laboratorio.

Se entiende por “arena” o “árido fino”, el árido o fracción del mismo que pasa por el tamiz de 5 mm de malla (tamiz 5 NB/UNE 7050) por “grava” o “árido grueso”, el que resulte retenido por dicho tamiz.

Los áridos deberán almacenarse de tal forma que queden protegidos de una posible contaminación por el ambiente, y especialmente por el terreno, no debiendo mezclarse de forma incontrolada los distintos tamaños. Deberán también adoptarse las necesarias precauciones para eliminar en lo posible la segregación, tanto durante el almacenamiento como durante su transporte.

Como los agregados constituyen aproximadamente del 60% al 75% del volumen total del concreto, su selección es muy importante. Los agregados deben componerse de partículas con resistencia mecánica adecuada y con resistencia a las condiciones de exposición y no deben contener materiales que puedan causar deterioración del concreto.

### 2.1.2.3 Agua

En general, podrán ser utilizadas tanto para el amasado como para el curado del hormigón en obra, todas las aguas consideradas como aceptables por la práctica.

El agua, tanto para el amasado como para el curado del hormigón, debe ser limpia y deberán rechazarse las que no cumplan una o varias de las siguientes condiciones en **tabla 2**.

#### **Tabla 2.**

*Condiciones del agua para el amasado y curado del hormigón.*

---

Exponente de hidrogeno Ph .....	$\geq 5$
(Determinado según la norma NB/UNE 7234)	
Sustancias disueltas .....	$\leq 15 \text{ g/L}$
(Determinados según la norma NB/UNE 7130)	
Sulfatos, expresados en SO <sub>4</sub> .....	$\leq 1 \text{ g/L}$
(Determinados según la norma NB/UNE 7131)	

---

Ion cloro Cl .....	$\leq 6 \text{ g/L}$
(Determinado según la norma NB/UNE 7178)	
Hidratos de carbono .....	0
(Determinados según la norma NB/UNE 7132)	
Sustancias orgánicas solubles en éter .....	$\leq 15 \text{ g/L}$
(Determinados según la norma NB/UNE 7235)	

---

Nota. Tabla obtenida de *Norma Boliviana CBH 87*.

La toma de muestra para estos ensayos, se hará según la norma NB/UNE 7236.

La temperatura del agua para la preparación del hormigón será superior a los 5 °C.

### **2.1.3 Dosificación del hormigón**

La dosificación de un hormigón tiene por objeto determinar las proporciones en que hay que mezclar los distintos componentes del mismo para obtener masas y hormigones que reúnan las características y propiedades exigidas en el proyecto.

Existen muchos métodos y reglas para dosificar teóricamente un hormigón, pero todos deben considerarse orientativos. Por ello, las proporciones definitivas de los componentes deben establecerse mediante ensayos de laboratorio, introduciendo después las correcciones que resulten necesarias o convenientes. Actualmente y debido al gran desarrollo que ha experimentado en todos los países la industria del hormigón preparado, la mayor parte de los hormigones utilizados en edificación se dosifican y elaboran en central bajo condiciones bien controladas, con lo que se ha dado un gran paso para disponer de hormigones con las características y propiedades necesarias.

### **2.1.4 Propiedades del hormigón endurecido**

#### **2.1.4.1 Densidad**

La densidad o masa específica del hormigón endurecido depende de muchos factores, principalmente de la naturaleza de los áridos, de su granulometría y del método de compactación empleado. Será tanto mayor cuanto mayor sea la de los áridos utilizados y mayor cantidad de árido grueso contenga, bien clasificado; y tanto mayor cuanto mejor compactado esté.

De todas formas, las variaciones de densidad del hormigón son pequeñas, pudiendo tomarse en los cálculos el valor  $2.300 \text{ kg/m}^3$  para los hormigones en masa y  $2.500 \text{ kg/m}^3$  para los armados.

Los valores indicados corresponden a hormigones normales. *Los hormigones pesados*, fabricados con áridos de barita o metálicos, tienen densidades de  $3.000$  a  $3.500 \text{ kg/m}^3$  y aún mayores, empleándose en protecciones contra radiaciones. Los hormigones ligeros, fabricados con piedra pómez, arlita u otros áridos de pequeña masa específica, tienen densidades del orden de  $1.300 \text{ kg/m}^3$  e incluso inferiores a mil.

#### **2.1.4.2 Compacidad**

La compacidad, íntimamente ligada a la densidad, depende de los mismos factores que ésta, sobre todo del método de consolidación empleado.

Es evidente la relación directa que existe entre la compacidad de un hormigón y sus resistencias mecánicas, por cuanto dicha compacidad aumenta con el volumen de materias sólidas que componen el hormigón, en relación con los volúmenes ocupados por el agua y el aire.

Una buena compacidad no sólo proporciona una mayor resistencia mecánica (frente a esfuerzos, impactos, desgaste, vibraciones, etc.), sino también una mayor resistencia física (efecto de la helada) y química frente a las acciones agresivas, ya que, al contener una *cantidad* mínima de huecos o porosidades, las vías de penetración de los agentes exteriores son también mínimas.

#### **2.1.4.3 Permeabilidad**

Las dos formas en que el agua puede penetrar en el hormigón: por presión y por capilaridad. Los factores que influyen en la permeabilidad son los mismos que hacen variar su red capilar y se enuncian en dicho apartado.

El más influyente es, sin duda, la relación agua/cemento. Al disminuir ésta, disminuye la permeabilidad: mientras que para una relación agua/cemento igual a  $0,5$  el factor de permeabilidad es aproximadamente  $15$ , para  $0,8$  es alrededor de  $450$ , o sea, treinta veces mayor.

Medir la permeabilidad de un hormigón es un problema difícil, que no se encuentra resuelto satisfactoriamente. Existen diversos métodos, unos dedicados a la permeabilidad bajo presión y otros a la permeabilidad por succión (absorción). Las medidas se efectúan por diferencia de pesada, o por el tiempo requerido para que el agua atraviese de una cara a otra, o por medición de superficie de mancha en una sección obtenida por corte, etc.

Pero ningún método proporciona garantía completa, siendo incierta la concordancia entre medidas realizadas según distintos métodos sobre un mismo hormigón.

Es imprescindible partir de un hormigón muy compacto. Aparte del empleo de impermeabilizantes de masa o de superficie, cabe aplicar recubrimientos a base de chapas metálicas, fieltro asfaltado, etc., o simplemente, enlucir la superficie con un buen mortero de cemento, de 10 a 20 mm de espesor.

#### **2.1.4.4 Resistencia**

El hormigón endurecido presenta resistencia a las acciones de compresión, tracción y desgaste. La principal es la resistencia a compresión que lo convierte en el importante material que es. Se mide en Mpa (Megapascales) y llegan hasta 50 Mpa en hormigones normales y 100 Mpa. En hormigones de alta resistencia. La resistencia a tracción es mucho más pequeña, pero tiene gran importancia en determinadas aplicaciones. La resistencia a desgaste, de gran interés en los pavimentos se consigue utilizando áridos muy resistentes y relaciones agua cemento muy bajas.

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 ( $\text{kg/cm}^2$ ), megapascales (MPa) o en libras por pulgadas cuadradas ( $\text{lb/pulg}^2$  o psi) a una edad de 28 días.

#### **2.1.4.5 Dureza**

La durabilidad del concreto se puede definir como la habilidad del concreto en resistir a la acción del ambiente, al ataque químico y a la abrasión, manteniendo sus propiedades de ingeniería. Los diferentes tipos de concreto necesitan de diferentes durabilidades, dependiendo de la exposición del ambiente y de las propiedades deseables. Los componentes del concreto, la proporción de éstos, la interacción entre los mismos y los métodos de colocación y curado

#### **2.1.4.6 Retracción**

Es el fenómeno de acortamiento del hormigón debido a la evaporación progresiva del agua absorbida que forma meniscos en la periferia de la pasta de cemento, y el agua capilar. Es el agua menos fijada en los procesos de hidratación. Además, en el hormigón endurecido está presente el agua en distintos estados.

### **2.1.5 Características internas del hormigón**

#### **2.1.5.1 Contacto agregado-agregado**

El contacto agregado-agregado depende de la traba mecánica aportada por la superficie de los agregados, además de las propiedades químicas y físicas de ellos. El contacto es mayor cuanto más rugosa es la superficie y cuanto más limpios estén.

Una de las características más importante de los agregados para que haya un buen contacto agregado-agregado es su forma.

#### **2.1.5.2 Forma del agregado**

Se ha producido hormigón satisfactorio con agregado que consta de una gran diversidad de formas diferentes. Un agregado grueso con muchos ángulos, que presentará un mayor número de vacíos, exigirá una mayor cantidad de arena para dar lugar a un hormigón trabajable, pero tendrá un mayor contacto agregado-agregado. Inversamente, el agregado grueso bien redondeado que tiende hacia las partículas esféricas requerirá menos arena y tendrá un mayor contacto agregado-agregado. No obstante, resulta interesante hacer notar que los hormigones producidos con una gran disparidad en las formas de las partículas, con un contenido dado de cemento por metro cubico de hormigón, con frecuencia tendrán más o menos la misma resistencia a la compresión.

#### **2.1.5.3 Porcentaje de vacíos**

El porcentaje de vacíos se refiere a la cantidad de vacíos en función al volumen total de la muestra de hormigón.

El Diccionario Webster's New World define los vacíos como "poros o pequeños agujeros a través de los cuales pueden pasar fluidos, luz y/o aire". El hormigón suele ser una mezcla de cuatro componentes principales: arena, grava, cemento y agua. En el proceso de mezclado, se mezcla una cierta cantidad de aire con el hormigón. El agua y el aire ocupan espacio en el hormigón incluso después de su vertido y en la fase inicial de solidificación.

Cuando el hormigón es trabajado en su lugar y empieza a endurecerse, los ingredientes más pesados tienden a asentarse en el fondo mientras los ingredientes más livianos flotan arriba. Siendo el agua el más liviano de los cuatro ingredientes básicos, flota hacia arriba donde se evapora o se exprime por los lados o el fondo. Según se exprime se mueve en todas direcciones. El agua, al ocupar espacio, deja millones de huecos entrecruzados en todas direcciones. Según el aire escapa, tiene el mismo efecto.

Estos espacios huecos se atan entre sí creando lo que se llama porosidad (vacíos). Frecuentemente los poros crean unas quebraduras finísimas dentro del hormigón, debilitándolo.

La acción capilar del hormigón hace que fluya agua, o la lluvia golpea los lados de la pared de hormigón, o la hidrología del agua va contra la pared de un sótano, el agua viaja por los poros a través del hormigón.

Los poros están entretejidos y entre conectados, permitiendo así el pasaje lento del agua a través del hormigón. Mientras más denso el hormigón, más apretados los poros y menos agua puede pasar a través.

La estructura de la porosidad en el hormigón influye fuertemente en el actuar del mismo. Específicamente, la porosidad determina las proporciones a que las especies agresivas pueden entrar en la masa y causar destrucción. Los índices de la intrusión se relacionan con la permeabilidad del hormigón. De la manera más general, la permeabilidad depende de la forma en que la porosidad total es distribuida. La porosidad, a su vez, se relaciona a la reacción original del cemento, las mezclas minerales, y las partículas de agregados, la relación de agua-sólidos, y las condiciones de curado entre otras.

#### **2.1.5.3.1 Tipos de poros que se encuentran en el hormigón**

Como una consecuencia, es útil enumerar los varios tipos de poros presentes en el hormigón y establecer sus contribuciones relativas a la permeabilidad.

Hay una variedad de tipos de poros en el hormigón. Estos tipos pueden ser clasificados por lo que se refiere a su origen o por lo que se refiere a su efecto anticipado en los parámetros mensurables como la fuerza o permeabilidad. Las fuentes de porosidad en el concreto son:

- a) Poros en el gel de cemento
- b) Poros capilares pequeños
- c) Poros capilares grandes
- d) Vacíos grandes (también incluidos en esta categoría pueden estar los vacíos intencionalmente agregados por ejemplo por el arrastre del aire.)
- e) Porosidad asociada con las zonas de interfaz de pasta-agregado
- f) Micro-vacíos y discontinuidades asociadas con inestabilidades dimensionales que ocurren durante el curado
- g) Porosidad del agregado

Se asume que el diámetro de un poro de gel estable es de aproximadamente 2 nm. La selección de estos valores es basada en la suposición que los productos de hidratación no pueden precipitar en poros que tienen los diámetros más pequeños que el descrito anteriormente, porque la porosidad



de gel reside en la hidratación de productos que se acumulan entre la fase líquida y los granos anhídridos del cemento. La porosidad del gel tiene un efecto mayor en la hidratación, pero sólo un efecto menor en procesos de transporte que involucran los líquidos. Sin embargo, no hay en la actualidad ninguna justificación por ignorar los otros tipos de poros listados anteriormente. Así, la contribución de cada uno de los tipos restantes de porosidad a la permeabilidad debe ser considerada.

Desafortunadamente, las contribuciones relativas de cada uno de estas fuentes de porosidad a la permeabilidad no se han llevado a cabo. Por consiguiente, conclusiones alcanzadas con respecto a la permeabilidad concreta son frecuentemente basadas en la extrapolación de resultados obtenidos para las pastas de cemento. Sin embargo, puede ser razonable subdividir la porosidad en el hormigón en dos clases:

- a) En la matriz de pasta
- b) En la asociación entre el agregado e interfaz de pasta.

La fuente principal de la porosidad de la matriz que contribuye a la permeabilidad está asociada con el espacio residual entre granos de cemento que estaban originalmente llenos de agua. La contribución de esta fuente de porosidad puede ser dócil a la valoración por las investigaciones de pasta de cemento. Sin embargo, la contribución de la porosidad asociada con las zonas de interfaz entre pasta y agregados y las micro-grietas que se desarrollan en esta región de interface y se extienden dentro de la pasta deben de evaluarse por determinaciones llevadas directamente en los agregados por medio de su permeabilidad.

Puede considerarse que dos tipos de porosidad forman la red de porosidad capilar en el cemento y hormigón: la porosidad capilar tanto grande como pequeña. Una razón por categorizar la porosidad de esta manera se relaciona a la influencia química y las mezclas minerales en los dos tipos. Se asume que la porosidad capilar tiene un efecto mayor en los procesos de transporte, pero sólo un efecto menor en las proporciones de hidratación. Los diámetros de poros capilares pueden en teoría dar valores muy pequeños a grandes.

Sin embargo, ha sido propuesto que el más bajo límite del diámetro de porosidad capilar es 100 nm., hay que notar una diferencia clara entre el tamaño de un poro del gel (2 nm) y el límite más bajo en el tamaño del poro capilar.

### **2.1.6 Patologías en estructuras de hormigón (acciones de tipo químico)**

La corrosión del hormigón por agentes químicos suele ser la que mayores daños ocasiona en las estructuras y la que presenta, frecuentemente, mayores dificultades a la hora de aplicar remedios. La durabilidad de un hormigón se puede medir por la velocidad con la que el mismo se descompone como resultado de acciones químicas. En la mayor parte de los casos, el ataque de los agentes agresivos químicos tiene como blanco el cemento, de aquí la importancia de elegir el cemento más adecuado al medio con el que vaya a estar en contacto el hormigón; en otras ocasiones, las menos, el ataque se producirá sobre los áridos.

Un factor fundamental en el desarrollo de los procesos corrosivos es la presencia de agua, bien en forma líquida o de vapor, si ésta no existe, no se produce disolución de los componentes agresivos y por tanto, no habrá reacción - química; así, un hormigón totalmente seco no será dañado por agentes agresivos químicos aunque este en contacto con ellos. El agua es, por tanto, el elemento motor de todo proceso corrosivo. Otra condición para que se produzca una reacción de corrosión es que la sustancia agresiva sea transportada hasta tomar contacto con la sustancia con la que tiene que reaccionar. El contacto entre ambas sustancias puede ser interrumpido en mayor o menor grado por la creación de sustancias pasivantes formadas en la reacción. La velocidad de transporte de las sustancias agresivas hacia las reactivas depende de la temperatura debido a que ésta aumenta la permeabilidad del hormigón. Una reacción química que en sí no es nociva para el hormigón es la carbonatación del hidróxido cálcico procedente de la hidratación del cemento, sin embargo, esta reacción produce indirectamente una elevación del riesgo de corrosión de armaduras debido a la pérdida de alcalinidad del hormigón. Las diferentes acciones de tipo químico que se producen en el hormigón se pueden clasificar en las siguientes:

- Ataque por sulfatos, cloruros, carbonatos y otros iones.
- Ataque por ácidos.
- Ataque por aceites, grasas, combustibles, líquidos alimenticios.
- Reacción árido-álcalis.
- Reacción en áridos con sulfuros susceptibles de oxidarse.

La mayor parte de las agresiones que sufre el hormigón proceden de agentes químicos situados en el exterior del mismo y que le atacan de fuera a dentro como ocurre en el caso de hormigones de cimentaciones, muros de sostenimiento de tierras, tuberías, etc., que están en contacto con terrenos que contienen estos agentes, y al igual que pasa en el caso de tuberías de hormigón que transportan líquidos agresivos o, simplemente, en el caso de estructuras que están situadas en un

ambiente industrial o urbano con altas tasas de contaminación ambiental, o en suelos industriales en los que se producen derrames de líquidos agresivos como ocurre en muchas industrias de alimentación (lácteas, vinícolas, aceiteras, etc.) En otros casos la reacción química agresiva se produce entre componentes del propio hormigón como ocurre en el caso de los álcalis del cemento y ciertos áridos reactivos.

### **2.1.6.1 Ataque por ácidos**

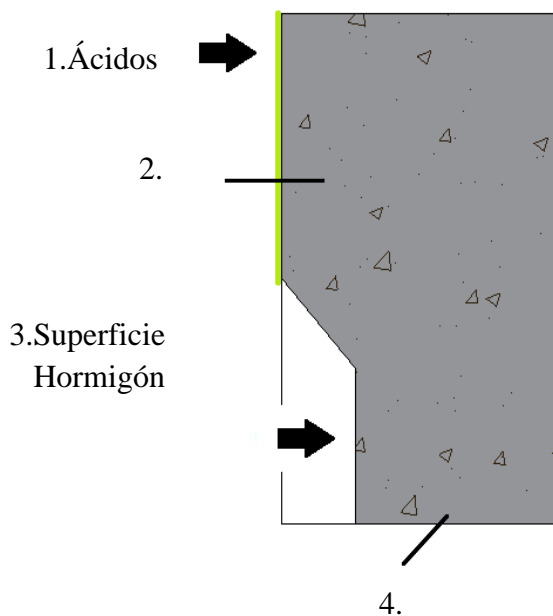
La acción de los ácidos sobre el hormigón endurecido consiste en la transformación de los compuestos cálcicos (hidróxido cálcico, silicato cálcico hidratado y aluminato cálcico hidratado) en sales cálcicas que disgregan el hormigón. Debido al marcado carácter alcalino de la pasta de cemento, causado por hidróxido cálcico procedente de la hidratación de los silicatos, los distintos tipos de ácidos atacan generando las mencionadas sales cálcicas. Estas sales generalmente son solubles y su eliminación provoca el aumento de la porosidad del hormigón dejando una mayor superficie expuesta al ataque. La velocidad de ataque de los ácidos en el hormigón depende del Ph que posean (se consideran altamente agresivos cuando son menores de 4'5) y de la solubilidad de la sal cálcica que resulta, cuanto menos solubles sean las sales más fuertes será el efecto pasivante de las sales precipitadas. Si por el contrario la sal cálcica es soluble la velocidad de reacción será mayor si la solución fluye que si está estancada.

Explicación del proceso **figura 2**

1. Los ácidos procedentes del ambiente entran en contacto con la superficie del hormigón.
2. Conversión, capa a capa, de los compuestos cálcicos del cemento endurecido dando lugar a las sales cálcicas de modo que se destruye la estructura porosa.
3. Remoción de los productos derivados de la reacción por disolución o abrasión.
4. Convertida una capa, sino se elimina resulta más permeable que el hormigón sano.

**Figura 2.**

*Ataque por Ácidos*



Fuente: Elaboración propia.

### 2.1.6.2 Ataque por sulfatos

El ataque por sulfatos es el ataque más perjudicial de los diferentes ataques que pueden desarrollar los aniones que componen las sales. Los sulfatos centran su ataque en el cemento creando unos componentes fuertemente expansivos que provocan la destrucción del hormigón.

El mecanismo de actuación es el siguiente: los iones sulfato reaccionan con el aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) del cemento en presencia de agua dando sulfoaluminato tricálcico, más comúnmente conocido por etringita, y en menor medida yeso. La etringita presenta la particularidad que su volumen es un 250% superior al aluminato origen, dando lugar a una fuerte expansión que disgrega el hormigón por la mencionada destrucción del cemento que deja suelto el árido. Esto provoca una fisuración irregular que permite el acceso de los sulfatos y de ataques posteriores. La degradación del hormigón comienza en la superficie con un cambio de coloración seguido de la aparición de fisuras entrecruzadas cuyo espesor aumenta a la vez que el hormigón superficial sufre una laminación con curvado de las capas más externas debido a las tensiones que producen la expansión de los productos producidos.

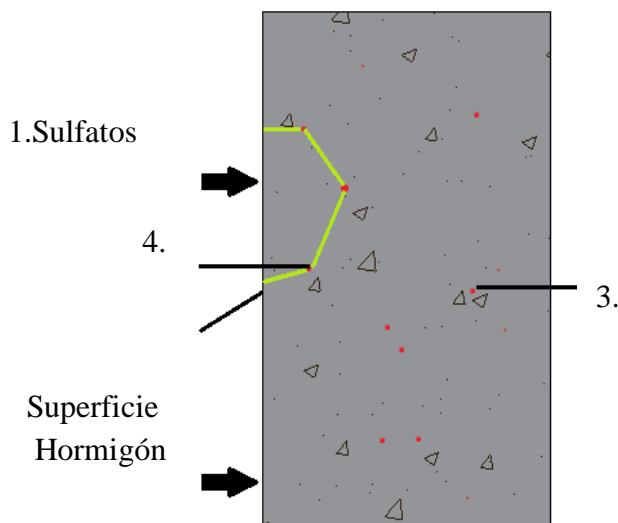
Explicación del proceso **figura 3**:

1. Difusión de los sulfatos procedentes del ambiente en el interior del hormigón.
2. Situación normal del aluminato tricálcico hidratado

3. Conversión del aluminato tricálcico hidratado ( $C_3A$ ), dando lugar a la temida ettringita que sufre la expansión.
4. Formación de fisuras que facilita el acceso a los ataques.

**Figura 3.**

*Ataque por sulfatos*



Fuente: Elaboración propia

## 2.2 Hormigones para plantas de tratamiento de aguas residuales

Una planta de tratamiento de aguas residuales es una infraestructura esencial diseñada para tratar el agua de forma eficiente y continua para que puedan ser reciclada y/o devuelta al medio ambiente. Las paradas y tiempos de inactividad de la planta que afectan críticamente al proceso de tratamiento deben minimizarse o evitarse.

La compleja naturaleza de las aguas residuales es especialmente agresiva para las infraestructuras circundantes. Las estructuras deben ser protegidas y mantenidas porque están expuestas diariamente a ataques químicos, abrasión, corrosión inducida por iones cloruro y otras acciones que deben comprenderse para poder reparar y proteger al hormigón de forma efectiva una vez se ha dañado.

Pero el deterioro del hormigón no se limita a la ocurrencia de procesos biológicos involucrando azufre.

El ataque conduce a un deterioro de la superficie del hormigón, lo que disminuye el espesor de la cubierta de hormigón que protege la armadura y con ella la durabilidad de la estructura.

Puesto que la estanquidad de un hormigón es difícil de controlar frecuentemente es necesario dar recomendaciones para la composición del hormigón (composición granulométrica de los áridos, contenido en elementos finos y relación a/c). Un hormigón integralmente compacto que tenga un buen acabado suele presentar, en general, suficiente capacidad resistente cuando la relación a/c se aproxime a 0,55 para las aguas débilmente agresivas y a 0,45 para aguas fuertemente agresivas.

### 2.2.1 Resistencias mínimas recomendadas

Las especificaciones de relación agua/cemento y contenido mínimo de cemento, definidas en función de la clase de exposición del elemento, condicionan la especificación de un hormigón cuyas características mecánicas deberán ser coherentes con dichos parámetros. Con el objetivo de hacer coherentes las especificaciones de durabilidad y de resistencia, la normativa define las resistencias del hormigón compatibles con las especificaciones de durabilidad:

- En el artículo 43.2 del Código Estructural
- En el Anexo F (Informativo) de UNE-EN 206
- En el Anejo Nacional de UNE-EN 1992-1-1 en el apartado correspondiente al Anexo E (Informativo) de esta norma. La parte 2 de la norma UNE-EN 1992 (puentes) remite a la parte general (UNE-EN 1992-1-1) A continuación, se expone la información incluida en las normas citadas.

#### **Tabla 3.**

*Resistencia característica mínima esperada para el hormigón en función de la clase de exposición, según el Código Estructural (Tabla 43.2.1.b del Código Estructural)*

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	Clase de exposición																				
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3
	Masa	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	30	30	30	30	30	35	30	30	30
Resistencia característica (MPa)	Armado	25	25	25	30	30	30	30	35	30	30	30	30	30	30	30	30	30	35	30	30	30
	Pretensado	25	25	25	30	30	35	35	35	35	35	35	30	30	30	30	30	35	35	30	30	30

Nota: Tabla obtenida de *Guía para especificaciones técnicas del hormigón*.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales están expuestas a corrosión por ataques químicos (XA), algún ataque débil (XA1) y ataque medio (XA2).

Es por esto que la resistencia característica que se usara es de H30.

## **2.3 Proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales**

### **2.3.1 Lagunas de estabilización**

Son estanques excavados con el propósito de embalsar agua residual con largos periodos de retención. En estas se realiza un tratamiento por medio de la actividad bacteriana con acciones simbióticas de algas y otros organismos (Rolim, 2000; Conagua/IMTA, 2007a; Conagua/ IMTA, 2007b).

Las lagunas son estructuras simples de fácil operación y mantenimiento que se basan en el proceso de auto purificación. Generalmente están constituidas por embalses naturales o artificiales, en tierra, expuestos al aire y al sol, por lo que las condiciones climáticas influyen significativamente en el funcionamiento de este dispositivo de tratamiento. Por esta razón el diseño de las lagunas es posiblemente, de todos los procesos de tratamiento biológico, el menos definido.

Las lagunas de estabilización pueden ser consideradas como un reactor horizontal de flujo disperso, aunque en ocasiones se asumen modelos de flujo ideal (mezcla completa ó flujo pistón) y donde ocurren diversos procesos a través de los cuales se produce la remoción de la materia orgánica y microorganismos patógenos. De acuerdo a la naturaleza de la actividad biológica que tiene lugar en la misma, y por tanto al metabolismo que prevalece durante su funcionamiento, las lagunas de estabilización se clasifican en:

- Aerobias
- Anaerobias
- Facultativas

Los sistemas lagunares tienen tres objetivos básicos: a) remoción de la materia orgánica de las aguas residuales, b) remoción de nutrientes: nitrógeno y fósforo, y c) eliminación de microorganismos patógenos. Según Rolim (2000) y Shelef y Kanarek (1995, citado por Conagua/IMTA, 2007a), los sistemas lagunares presentan las siguientes ventajas y desventajas.

#### **2.3.1.1 Ventajas**

- Costos bajos por construcción, operación y mantenimiento.
- Fáciles de construir, operar y mantener (no se necesita personal calificado).
- Buena remoción de materia orgánica y microorganismos patógenos.
- Absorben los picos hidráulicos, cargas orgánicas y compuestos tóxicos.
- Pueden tratar aguas residuales biodegradables.

- No presentan problemas de operación en el manejo y disposición de lodos.
- Utilización del agua tratada en agricultura y acuicultura.
- Se pueden utilizar como sistemas reguladores de riego.

### **2.3.1.2 Desventajas**

- La principal desventaja es que necesitan una gran área de terreno
- Debido a la infiltración, no deben construirse en suelos arenosos por la contaminación que causan a los mantos acuíferos
- Pueden generar olores desagradables cuando se incluya una laguna anaerobia y esta reciba alta concentración de carga orgánica
- El funcionamiento adecuado de un sistema de lagunas depende de las condiciones ambientales del lugar: viento, temperatura, nubosidad, etcétera
- Se recomienda que la ubicación del sistema de tratamiento se localice, por lo menos, a 500 metros de la mancha urbana
- El efluente descargado incluye alto contenido de algas (sólidos suspendidos) que puede ocasionar problemas en el suelo cuando se reutiliza en regadío de cultivos

### **2.3.2 Lagunas anaerobias**

Las lagunas anaerobias se utilizan normalmente como primera fase en el tratamiento de aguas residuales urbanas o industriales con alto contenido en materia orgánica biodegradable. El objetivo primordial de estas lagunas es la reducción de contenido en sólidos y materia orgánica del agua residual, y no la obtención de un efluente de alta calidad. Por esta razón, las lagunas anaerobias operan en serie con lagunas facultativas. Generalmente se utiliza un sistema compuesto por al menos una laguna de cada tipo en serie, para asegurar que el efluente final de la planta depuradora va a poseer una calidad adecuada durante todo el año. En las lagunas de este tipo la materia orgánica es estabilizada mediante un mecanismo similar al que existe en los tanques de digestión anaerobia

(formación de ácidos orgánicos y de metano). En las condiciones de climas tropicales la carga de las lagunas anaerobias puede variar entre 60 y 300 g DBO m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. La profundidad está limitada por elementos prácticos: nivel freático, tipo de suelo y facilidades para la limpieza eventual de los lodos o fangos que se depositan en el fondo con el transcurso del tiempo.

El propósito de las lagunas anaerobias es el desbaste de la materia orgánica, por lo que pueden recibir altas concentraciones de cargas orgánicas: la remoción de la DBO<sub>5</sub> se lleva a cabo debido



a la sedimentación de sólidos y el proceso anaerobio (Rolim, 2000; Conagua/ IMTA, 2007a; 2007b). Los estanques anaerobios generan malos olores debido a la producción de sulfuro de hidrógeno (Mara et ál., 1992; Rolim, 2000). Según Kalbermatten et ál. (1982), la cinética de remoción de la DBO en una laguna anaerobia es similar al efectuado en un digestor convencional anaerobio. El tratamiento del agua residual en lagunas anaerobias necesita de dos condiciones importantes: a) como ya se indicó, no debe contener oxígeno disuelto en el fondo de la laguna, y b) la temperatura debe ser mayor a 15 °C. Una vez establecidas las condiciones anteriores, la materia orgánica pasa por las siguientes etapas:

### 2.3.2.1 Licuefacción.

La materia orgánica presente es modificada por hidrólisis: las bacterias facultativas convierten los carbohidratos y gases en ácidos grasos. En esta etapa todavía no se presenta la remoción de la materia orgánica.

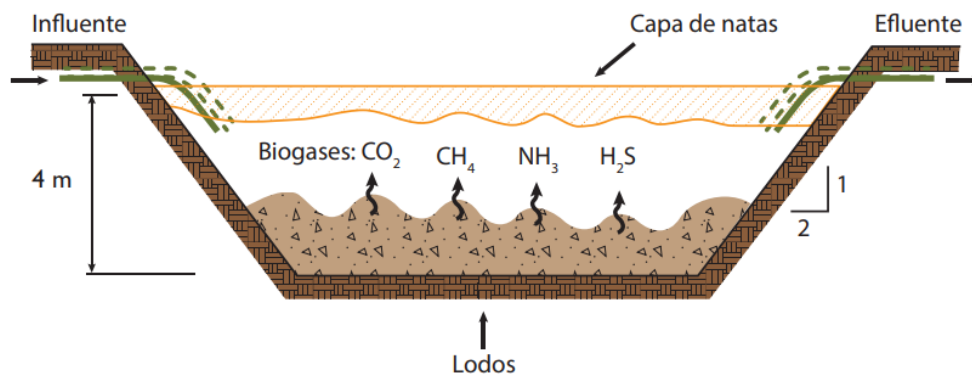
### 2.3.2.2 Gasificación

En esta etapa se lleva a cabo la remoción de la materia orgánica: las bacterias anaerobias generan gas metano ( $\text{CH}_4$ ). Luego, el carbono orgánico (C) es convertido a dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ); de esta manera se presenta la reducción de la materia orgánica.

Las profundidades sugeridas son de 3.0 a 5.0 metros, y la recomendación de tiempo para realizar el desazolve, considerando una operación continua, es de dos a cuatro años (Rolim, 2000; Oakley, 2005). En la **Figura 4** se muestra el proceso de una laguna anaerobia.

### Figura 4.

*Proceso de laguna anaerobia*



Nota. Adaptado de Oakley (2005)

### 2.3.3 Planta de tratamiento de aguas residuales de San Luis

#### 2.3.3.1 Ubicación de la PTAR

La planta de tratamiento se ubica entre las coordenadas 324232 E y 7613779 S, en el barrio de San Luis, ya se emplaza dentro de un área urbana, motivo por el que su permanencia es ampliamente cuestionada.

#### 2.3.3.2 Tipo de aguas a tratar

El afluente mayoritario proviene de las aguas residuales domésticas de la ciudad de Tarija, sin embargo, también recibe el aporte autorizado, pero no monitoreado de aguas industriales, entre los que destacan por el volumen de sus descargas, los siguientes establecimientos principales:

- Cervecería ASTRA
- Productos lácteos PIL
- Vitivinícola Aranjuez
- Embotelladora Coca Cola

#### 2.3.3.3 Tipo de tratamiento

La planta de tratamiento de aguas residuales de san Luis emplea lagunas de estabilización (anaeróbica, facultativa y de acabado).

#### 2.3.3.4 Unidades que la conforman

Esta planta está conformada por un canal Parshall, una estructura partidora de caudal que alimenta a 2 lagunas anaeróbicas que operan en paralelo, los efluentes de ambas son conducidos a una laguna facultativa que conecta con una laguna de acabado que mediante un canal con escalones conduce las aguas tratadas para su descarga final a la Quebrada Torrecillas. Las características de cada una de las unidades mencionadas es la siguiente:

- **Canal Aforador Parshall** de 0,445 m de garganta, construido en hormigón armado y emplazado a una profundidad aproximada de 2,3 m debajo de la superficie del terreno.
- **Laguna Anaeróbica N°1**, excavada en el terreno y con diques de tierra, con 3,5 m de ancho de coronamiento, esta laguna está impermeabilizada con arcilla, el agua ingresa mediante una estructura de hormigón armado que protege al canal conductor del agua residual y además sirve de plataforma de acceso, cabe anotar que el ingreso del agua residual es efectuado por encima del pelo de agua, las dimensiones de esta laguna son:

Largo:194,5 m

Ancho:166,5 m

Profundidad:4,0 m

Tirante de agua:3,5 m

- **Laguna Anaeróbica N.º 2** , es de similares características constructivas a la Laguna N° 1, pero con las dimensiones siguientes:

Largo 210,5 m

Ancho 142,5 m

Profundidad 4,0 m

Tirante de agua 3,5 m

- **Laguna Facultativa**, de similares características constructivas a las lagunas anaeróbicas, la interconexión de ingreso y salida son canales protegidos por una estructura de H<sup>o</sup>A<sup>o</sup>, en esta última el agua es recogida por un vertedero rectangular, las dimensiones de esta laguna son las siguientes:

Largo 286,0 m

Ancho 190,0 m

Profundidad 3,0 m

Tirante de agua 2,0 m

- **Laguna de Acabado**, también excavada en el terreno, con diques de tierra, coronamiento de 3,5 m e impermeabilizada con arcilla, las estructuras de ingreso y salida son similares a la anterior, las dimensiones de esta laguna son:

Largo 287,0 m

Ancho 158,0 m

Profundidad 3,0 m

Tirante de agua 2,0 m

#### **2.4 Definición tomografía computarizada en rayos-X:**

La Tomografía Computarizada (TC) es una técnica que genera imágenes de secciones transversales de una pieza. Esta técnica difiere de la radiografía en que el haz de energía y el detector están en el mismo plano que la superficie de la que se va a obtener la imagen.

La tomografía computarizada con rayos-X se basa en la adquisición de imágenes usando rayos-X y su posterior análisis empleando algoritmos computacionales. Esta técnica ha ganado amplia aceptación en los últimos años y ha sido empleada exitosamente para analizar la microestructura de diversos medios porosos, tales como textiles, materiales biológicos (Kosek , 2005), suelos

(Otani y Obara, 2004) y mezclas asfálticas (Masad, 2004). La importancia de la tomografía computarizada con rayos-X radica en que ha permitido contar con información confiable de su estructura interna para:

- Determinar las características de sus vacíos (tamaño, distribución y conectividad: Masad, 2002, Álvarez, 2007).
- Analizar el daño potencial por humedad (Arámbula, 2007a).
- Modelar el flujo de agua en su interior (Masad et al., 2004; Al-Omari y Masad, 2004; Masad, 2007)
- Caracterizar aspectos relacionados con su compactación (Watson, 2004)
- Identificar la degradación de los agregados que componen estos materiales (Gatchalian, 2006).

#### 2.4.1 Descripción de la técnica de rayos x

Los sistemas de rayos-X empleados en el análisis de mezclas asfálticas son similares a los utilizados en el ámbito médico. Sin embargo, a diferencia de estos, en el área de ingeniería, la intensidad de los rayos X y el tiempo de exposición de los empleados son normalmente mayores, lo que produce imágenes de mayor resolución. La resolución de una imagen,  $R$ , puede definirse como la razón entre la dimensión del objeto analizado,  $L_{x,y}$ , y el número de píxeles,  $\#p$ . Por lo tanto, una misma imagen puede tener diferentes resoluciones,  $R_x$  o  $R_y$ , a lo largo de sus ejes, si las dimensiones del objeto son distintas:

$$R_{x,y} = \frac{L_{x,y}}{\#p} \quad (1)$$

En general, es deseable contar con la mayor resolución posible, lo que se traduce en menores valores de  $R$ , es decir, una menor cantidad de material representado por cada píxel.

Existen diferentes equipos de rayos X de uso industrial cuya clasificación depende del tamaño del objeto a observar y de su resolución:

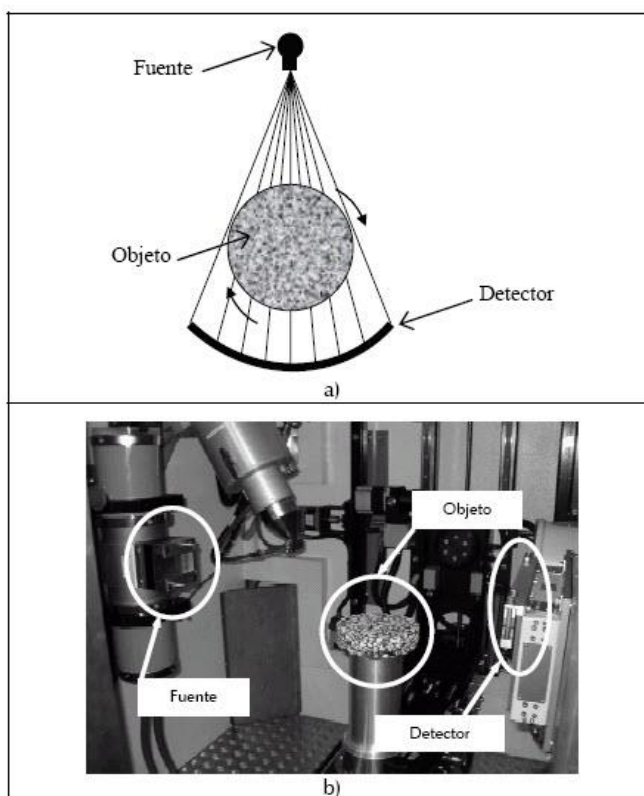
- 1) convencional
- 2) alta resolución
- 3) ultra alta resolución
- 4) microtomografía (Ketcham y Carlson, 2001).

Los equipos comúnmente utilizados en el análisis son los de alta resolución y ultra alta resolución, capaces de estudiar objetos con una resolución máxima de 100  $\mu$ m y 10  $\mu$ m, respectivamente (Ketcham y Carlson, 2001).

Los elementos básicos que conforman un equipo de rayos-X son una fuente y un detector. La geometría de los rayos-X y del detector varía dependiendo del equipo. Para el estudio de mezclas preferiblemente se utilizarán rayos colimados que cubrirán en su totalidad el ancho del objeto y una serie de detectores en línea **Figura 5a**. El objeto a escanear se ubica entre la fuente y el detector **Figura 5b** y se envía una descarga de rayos-X desde la fuente hacia el objeto, midiendo la intensidad de la radiación que llega al detector. La densidad del objeto determina la intensidad de los rayos-X que llegan al detector. Entre mayor es la densidad del objeto menor es la intensidad de radiación detectada, puesto que los rayos-X son absorbidos por el objeto o reflejados hacia la fuente.

### Figura 5.

*Sistema de rayos-X: (a) vista en planta de los principales componentes, (b) equipo típico de rayos-X*

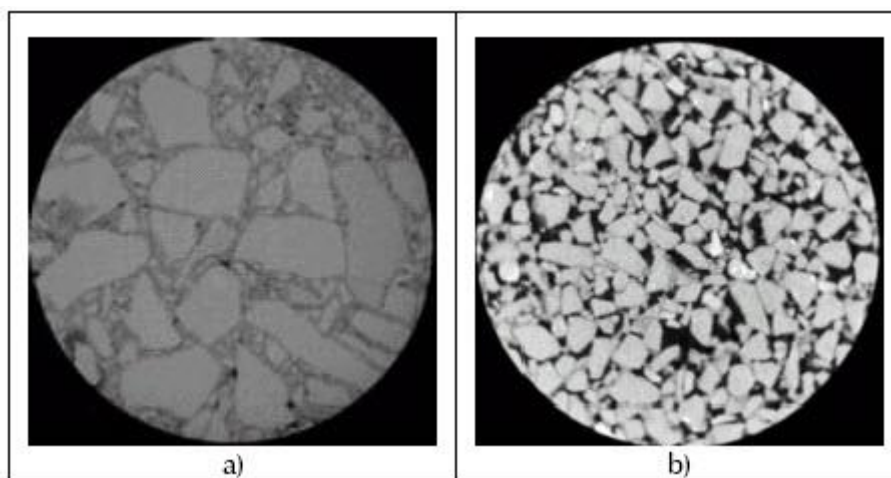


Nota. Tomado de *tomografía computarizada con rayos-x y sistema de imágenes de agregados (AIMS) para el estudio de mezclas asfálticas y agregados* (p.144), por Álvarez, Arámbula, Caro, 2008.

Cada una de las mediciones antes descritas se denomina vista. Es común que la fuente y el detector, o serie de detectores, sean fijos, y que el objeto se ubique sobre una mesa giratoria (flechas curvas en diagrama de **Figura 6a**). De esta manera, mientras la rota alrededor de su propio eje se adquiere vistas en todas sus posibles orientaciones, las cuales permiten la reconstrucción posterior del objeto de imágenes bidimensionales. Dichas imágenes se denominan secciones, ya que muestran la sección interior del objeto como si este hubiera sido cortado en un plano horizontal. Después de adquirir una sección, la posición del objeto en el sentido vertical se modifica con base en una distancia fija predeterminada y los pasos anteriores se repiten nuevamente. Al finalizar el proceso, es posible visualizar y reconstruir el volumen completo utilizando el conjunto de secciones del espécimen obtenido a diferentes alturas. Dependiendo del tamaño del objeto y la precisión deseada, las distancias verticales típicas para tomar secciones varían entre 0,5 mm y 1 mm (Masadet , 2007). La **figura 6** presenta ejemplos de secciones adquiridas en mezclas asfálticas. Estas imágenes permiten identificar los diferentes elementos que conforman la mezcla (agregados, matrices asfálticas y vacíos) y su distribución real, así como las diferencias que existen en términos de tamaño y proporción de agregados y vacíos en dos tipos diferentes de mezclas.

**Figura 6.**

*Ejemplos de secciones de mezclas: a) gradación densa, b) gradación abierta.*



Nota. Tomado de *tomografía computarizada con rayos-x y sistema de imágenes de agregados (AIMS) para el estudio de mezclas asfálticas y agregados* (p.145), por Álvarez, Arámbula, Caro, 2008.

#### **2.4.2 Caracterización de la estructura de vacíos y del flujo de agua en mezclas a mediante el análisis de imágenes de rayos-X**

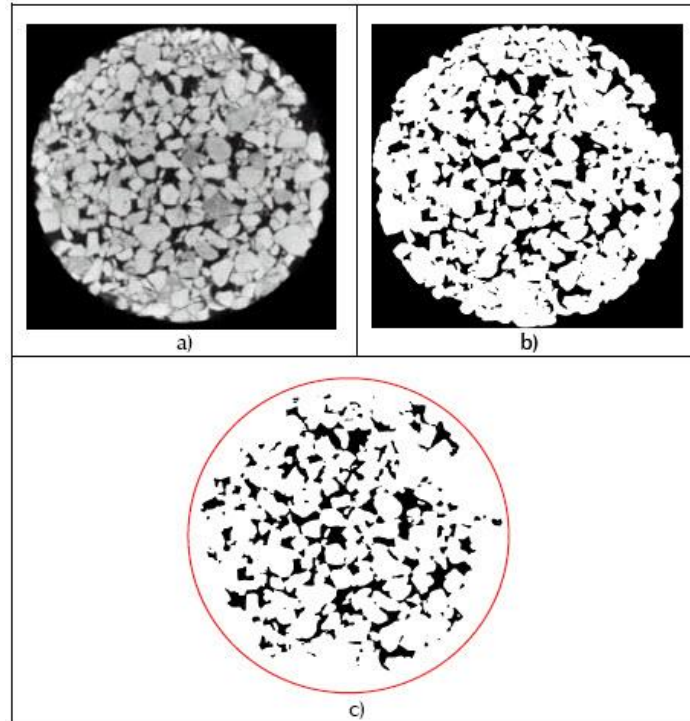
La estructura de vacíos de las mezclas determina en gran medida el desempeño del material en la obra. El parámetro que comúnmente se ha empleado para caracterizar los vacíos de mezclas es el contenido total de vacíos, el cual constituye uno de los principales parámetros de control dentro de los procesos de diseño (método Marshall o Superpave) y construcción de estas mezclas. Sin embargo, el contenido total de vacíos no permite cuantificar el tamaño, distribución o conectividad de los vacíos individuales que existen en el interior de la mezcla. Dicha cuantificación ha cobrado importancia en la medida en que investigaciones recientes, desarrolladas aplicando técnicas de rayos-X, han demostrado que mezclas compuestas por los mismos materiales;( Arámbula, 2007b; Masad, 2007). En estos estudios, las imágenes obtenidas a través de técnicas de rayos-X se procesaron usando algoritmos computacionales para:

- Realizar análisis probabilísticos del tamaño de vacíos en la muestra,
- Determinar las posibles rutas disponibles para el transporte de agua al interior de la mezcla (conectividad) con base en los resultados de conectividad, analizar los mecanismos de transporte de agua en la mezcla (permeabilidad y capilaridad), y cuantificar la tortuosidad de las rutas potenciales de transporte de agua (la razón entre la longitud real de una ruta de vacíos conectado y la longitud de una línea recta entre sus dos extremos).

La identificación de los vacíos al interior de la mezcla se basa en la escala de grises de las secciones obtenidas durante el escaneo con rayos-X **figura 7a**. Como se descubrió previamente, el color de cada partícula en la imagen está directamente relacionado con la densidad del material que representa, siendo los objetos más oscuros los de menor densidad (vacíos) y los más claros los de mayor densidad (agregados). De esta manera, a la graduación de grises se le asigna una escala numérica, que por lo general va desde cero (representando el color negro) hasta 255 (representando el color blanco). Para obtener la cantidad, tamaño y posición de los vacíos se utilizan algoritmos computacionales de procesamiento de imágenes que, con base en un valor límite dentro de la escala numérica de grises, transforman la imagen (sección) en una composición binaria (blanco y negro) con el fin de diferenciar el material sólido de los vacíos, tal como se muestra en la **Figura 7b**.

**Figura 7.**

Sección de una mezcla de gradación abierta: (a) imagen en escala de grises, (b) imagen binaria de contenido total de vacíos, (c) imagen binaria de vacíos efectivos



Nota. Tomado de *tomografía computarizada con rayos-x y sistema de imágenes de agregados (aims) para el estudio de mezclas asfálticas y agregados* (p.145), por Álvarez, Arámbula, Caro, 2008.

El porcentaje de vacíos en cada imagen binaria,  $P_i$ , y el total para un espécimen (contenido total de vacíos),  $P_{Total}$ , se calculan como:

$$P_i = \frac{A_{v_i}}{A_{T_i}} \quad (2)$$

$$P_{Total} = \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{N} \quad (3)$$

Donde  $A_{v_i}$  corresponde al área de vacíos en cada imagen,  $A_{T_i}$  es el área de la sección transversal del espécimen y  $N$  es el número de imágenes. Donde  $M_i$  es el número o cantidad de vacíos en cada imagen.



El proceso de selección del color correspondiente al valor límite es iterativo. Después de autorizar al grupo de imágenes un cierto valor límite en escala de grises, se realizará el cálculo del contenido total de vacíos utilizando las imágenes binarias resultantes ( $P_{Total}$ ). El valor obtenido de este análisis se compara con el contenido total de vacíos obtenido mediante ensayos de laboratorio. Este proceso se repite hasta que los dos contenidos de vacíos (es decir, calculados y de laboratorio) coinciden.

La identificación de los vacíos al interior de la mezcla se basa en la escala de grises de las secciones obtenidas durante el escaneo con Rayos-X. Como se mencionó previamente, el color de cada partícula en la imagen está directamente relacionado con la densidad del material que representa, siendo los objetos más oscuros los de menor densidad (vacíos) y los más claros los de mayor densidad (agregados). De esta manera, a la graduación de grises se le asigna una escala numérica, que por lo general va desde cero (representando el color negro) hasta 255 (representando el color blanco). Para obtener la cantidad, tamaño y posición de los vacíos se utilizan algoritmos computacionales de procesamiento de imágenes que, con base en un valor límite dentro de la escala numérica de grises, transforman la imagen (sección) en una composición binaria (blanco y negro) con el fin de diferenciar el material sólido de los vacíos.

#### **2.4.3 Ventajas de la tomografía computarizada en rayos-X, como método para analizar las características internas del hormigón**

- La principal ventaja de esta técnica es que, al ser no destructiva, es posible utilizar los mismos especímenes en pruebas de laboratorio posteriores con el fin de determinar sus características mecánicas, físicas o químicas.
- La tomografía computarizada es una técnica que permite el análisis no destructivo de piezas de hormigón en todo su volumen.
- La aplicación de esta técnica es de gran interés para diferentes tipos de estudios no solo en el campo de aplicación industrial sino también en investigación y permite obtener información más detallada, de forma menos costosa o a veces imposible de obtener por otros medios.
- Se puede utilizar un conjunto de imágenes de TC para caracterizar el volumen de la pieza, geometría, porosidad, fases materiales, grietas.

#### **2.4.4 Técnicas no destructivas para la inspección y diagnóstico del estado del hormigón**

El término ensayo no destructivo (END, en inglés non-destructive testing NDT), es una denominación general aplicada a una serie de técnicas destinadas a inspeccionar o probar un material sin perjudicar su estado de servicio futuro, es decir, sin menoscabo de sus propiedades físicas y químicas.

Diversos autores han clasificado los ensayos no destructivos aplicables al hormigón. Tobio (1967) propone una clasificación según el tipo de fuente que genera la energía necesaria para su realización. Fernández Gómez (2001) los clasifica según su campo de aplicación.

A menudo es necesario para inspeccionar estructuras de hormigón, una vez este ha endurecido, determinar si la estructura es adecuada para su uso proyectado. Lo ideal sería que tales pruebas pudieran hacerse sin dañar el hormigón.

Las técnicas que existen para la evaluación de un elemento de hormigón, engloban las que son completamente no destructivas, que no dañan de ningún modo el elemento estudiado, aquellas técnicas a través de las cuales resulta solo ligeramente dañada la superficie del elemento de hormigón, que se consideran técnicas cuasi no destructivas y, finalmente, las técnicas destructivas, donde la superficie del elemento debe ser reparada tras la prueba.

La gama de propiedades que pueden ser evaluadas utilizando pruebas no destructivas y pruebas destructivas es bastante amplia, e incluye parámetros fundamentales como la densidad, módulo elástico y resistencia, así como la dureza y la absorción de la superficie, la ubicación del armado, su tamaño y distancia a la superficie. En algunos casos también es posible comprobar la calidad de la puesta en obra y la integridad estructural por la capacidad de detectar huecos, grietas y fisuras. Los ensayos no destructivos se pueden aplicar a las estructuras antiguas y nuevas. Para las nuevas, las aplicaciones más probables estarán relacionadas con el control de calidad, o para resolver dudas sobre la calidad de los materiales de construcción. La prueba de las estructuras existentes normalmente está relacionada con la evaluación de la integridad estructural o su adecuación

Existen diversas técnicas no destructivas para la inspección de hormigón. A continuación, se enumeran las principales:

- Inspección visual
- Método de potencial eléctrico de media celda
- Métodos basados en ondas elásticas
- Georradar

- Termografía infrarroja

#### **2.4.4.1 Inspección visual**

Es el precursor esencial para cualquier ensayo no destructivo previsto. Sirve para poder establecer las posibles causas de los daños aparecidos en una estructura de hormigón armado y, por tanto, identificar cuáles de los diversos métodos de ensayos no destructivos disponibles, podrían ser de utilidad para la investigación de la patología.

#### **2.4.4.2 Método de potencial eléctrico de media celda**

Se utiliza para determinar el potencial de corrosión de las barras de acero del armado de las estructuras.

#### **2.4.4.3 Métodos basados en ondas elásticas**

Consisten en introducir un pulso elástico en el medio a estudio mediante un transductor (pulso-eco) o impacto mecánico (impacto-eco). El pulso-eco se propaga por el medio y se refleja en aquellos defectos del material o interfaces de diferentes densidades o módulos elásticos. Estas ondas reflejadas, se reciben en un segundo transductor, cuya salida es un osciloscopio o equipo similar. Se utiliza en la detección de discontinuidades o interfaces del elemento de hormigón a estudio, así como cocheras y calidad del hormigón.

Dentro de estas técnicas, la más empleada para la inspección de hormigón es la técnica de ultrasonidos.

La generación de las ondas ultrasónicas se basa en que una unidad de pulso envía una señal eléctrica al transductor, el cual, mediante un cristal piezoeléctrico interno, genera una onda de tensión de baja energía y alta frecuencia. La onda viaja entonces a través de la sección, siendo captada por el transductor receptor, que puede situarse en varias posiciones en función del método empleado, el cual a su vez convierte la energía de la onda en energía eléctrica.

El procedimiento de interpretación de esta técnica se realiza analizando las variaciones que experimentan el pulso u onda durante su tránsito por el medio objeto de estudio. Mediante la inspección ultrasónica se obtiene fundamentalmente información de los diferentes caminos de propagación que recorre la onda a través del material. Se determina el tiempo de recorrido y la potencia del impulso recibido respecto del emitido.

El hormigón se caracteriza por su carácter heterogéneo. Ello provoca comportamientos diversos ante la propagación de las ondas elásticas y es en este principio en el que se fundamenta la técnica de ultrasonidos.

#### **2.4.4.4 Georradar**

A grandes rasgos, es un método de investigación no destructivo del interior de medios materiales. Se basa en la emisión de pulsos electromagnéticos de muy corta duración a través de una antena y que se transmiten por el medio que se quiere analizar. Permite obtener imágenes del interior de un medio relacionadas con cambios en sus parámetros electromagnéticos. De este modo, se utiliza para localizar oquedades, nivel freático, elementos embebidos en el interior del medio, etc.

#### **2.4.4.5 Termografía infrarroja**

Cualquier objeto cuya temperatura sea superior al cero absoluto ( $0 \text{ Kelvin} = -273.15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) emite radiación infrarroja, invisible al ojo humano. Tal y como demostró el físico Max Planck en el año 1900, existe una correlación entre la temperatura de un cuerpo y la intensidad de la radiación infrarroja que emite. Una cámara termografía mide la onda larga de la radiación infrarroja recibida en el campo de visión, a partir de la cual calcula la temperatura del objeto a medir. El cálculo tiene en cuenta la emisividad de la superficie del objeto medido, así como la compensación de la temperatura reflejada. La termografía (medición de temperatura con una cámara termografía) es un método de medición pasivo, sin contacto. La imagen termografía muestra la distribución de temperatura en la superficie de un objeto, por lo que una cámara termografía no se debe usar para inspeccionar el interior o a través de los objetos. Se utiliza para detectar huecos, fisuras, presencia de humedad y otras patologías en el hormigón.

#### **2.4.5 eFilm lite**

Es una aplicación utilizada para la visualización y manipulación de imágenes. Las imágenes digitales y datos de diversas fuentes (incluyendo CT, MR, unidades estadounidenses y dispositivos radiográficos digitales, dispositivos de captura secundaria, escáneres, puertas de enlace de imágenes, o de las fuentes de imágenes) se pueden visualizar, analizar, procesar y almacenar a través de redes informáticas utilizando este programa.

La determinación de vacíos se basa en la calibración inicial realizada. Esta calibración permite determinar aquellas zonas que no están dentro del rango de densidades (niveles de gris) que corresponden al material y que por lo tanto pueden considerarse como vacíos. Estas zonas tienen que estar dentro del área delimitada por la pieza de hormigón que es la región de interés considerada.

### **2.5 Metodología**

#### **2.5.1 Diseño de la investigación**

El término diseño se refiere al plan o estrategia concebida para obtener la información que se desea con el fin de responder al planteamiento del problema (Hernández Sampieri et al., 2010)

Para este trabajo se recurrió a un diseño experimental de tipo experimental puro puesto que es el que mejor se adapta a las necesidades del proyecto.

Una acepción particular de experimento, más armónica con un sentido científico del término, se refiere a un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes (supuestas causas antecedentes), para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes (supuestos efectos consecuentes), dentro de una situación de control para el investigador (Hernández Sampieri et al., 2010)

## **2.5.2 Agregados**

### **2.5.2.1 Características y propiedades de los agregados**

#### **2.5.2.1.1 Análisis granulométrico y módulo de finura de los agregados ASTM C-136**

Este método de ensayo se utiliza para determinar la distribución del tamaño de partículas de agregados finos y gruesos mediante el uso de tamiz.

Este método de prueba se utiliza principalmente para determinar la distribución del tamaño de partículas de los materiales propuestos para su uso como agregados o para usarse como agregados. Los resultados se utilizan para determinar el cumplimiento de la distribución del tamaño de partículas con los requisitos de las especificaciones actuales y para proporcionar la información necesaria para controlar la producción de diversos productos agregados y mezclas que contienen agregados.

La información también puede ser útil para establecer relaciones con respecto a la porosidad y al macizo.

#### **2.5.2.1.2 Tamaño máximo del agregado grueso**

El estudio del tamaño máximo de los agregados y su influencia en las propiedades del concreto han sido ampliamente investigados, para obtener una óptima resistencia a la compresión de los concretos con baja relación agua / cemento diversos investigadores han concluido que el tamaño máximo a utilizarse debe variar entre  $\frac{1}{2}$ " a  $\frac{3}{4}$ ". Los agregados con tamaño menor contribuyen a producir concretos más resistentes debido a una menor concentración de esfuerzos alrededor de las partículas causados por la diferencia de módulos de elasticidad entre la pasta y el agregado.

### 2.5.2.1.3 Tamaño máximo nominal

Se calcula como la abertura del tamiz inmediatamente superior a aquel tamiz que retenga el 15% o más del material. Este se deriva del análisis granulométrico, y hace referencia al tamaño de las partículas del agregado en forma colectiva. Se diferencia del TM por que define de mejor forma el tamaño de las partículas más grandes del agregado en su fracción gruesa. La masa de la muestra de ensayo del agregado grueso seco, debe ser conforme con la **tabla 4** que indica lo siguiente:

**Tabla 4.**

*Masa mínima de la muestra de ensayo*

<b>Tamaño máximo nominal aberturas cuadradas</b>	<b>Masa mínima de la muestra de ensayo</b>
<b>mm</b>	<b>kg</b>
9.5	1.00
12.5	2.00
19	5.00
25	10.00
37.5	15.00
50	20.00
63	35.00
75	60.00
90	100.00
100	150.00
125	300.00

Nota. Tomado de *ASTM C-136*.

### 2.5.2.1.4 Modulo de finura (M.F)

El módulo de finura (FM) del agregado grueso o del agregado fino se obtiene, conforme a la norma ASTM C 125 se calcula sumando los porcentajes retenidos acumulados en los tamices estándar (nombrados más abajo) y dividiendo la suma entre 100. Cambios significativos en la granulometría de la arena tienen una repercusión importante en la demanda de agua y, en consecuencia, en la trabajabilidad del hormigón, por lo que si hubiese una variación significativa en la granulometría de la arena deben hacerse ajustes en el contenido de cemento y agua para conservar la resistencia

del hormigón. Para no tener que recalcular la dosificación del hormigón el módulo de finura del agregado fino, entre envíos sucesivos, no debe variar en más de  $\pm 0.2$ .

#### 2.5.2.1.5 Cálculo de módulo de finura

Los tamices especificados que deben usarse en la determinación del módulo de finura son: N°. 100, No. 50, No. 30, No. 16, No. 8, No. 4,  $\frac{3}{8}$ ",  $\frac{3}{4}$ ",  $1\frac{1}{2}$ ", 3" y de 6"

y el módulo de finura será según la ecuación 5:

$$MF = \frac{\sum \%retenido\_acumulado(6+3 + 1\frac{1}{2}'' + \frac{3}{4}'' + \frac{3}{8}'' + N^{\circ}4 + N^{\circ}8 + N^{\circ}16 + N^{\circ}30 + N^{\circ}50 + N^{\circ}100)}{100} \quad (4)$$

#### 2.5.2.2 Determinar la densidad aparente e índice de huecos en los agregados para hormigón ASTM C 29

Permite determinar la densidad aparente ("peso unitario") de un agregado tanto en su condición compactada o suelta y calcular los huecos entre las partículas en los agregados finos, gruesos o mezclas de agregados, basada en la misma determinación. Este método se aplica a los agregados que no exceden las 5 pulg. [125 mm] de tamaño máximo nominal

##### 2.5.2.2.1 Densidad aparente

Es la masa de una unidad de volumen de los agregados a granel, en la que el volumen incluye el volumen de las partículas individuales y el volumen de los huecos de aire entre las partículas. Se expresa en  $lb/ft^3$  [ $kg/m^3$ ].

##### 2.5.2.3 Método para determinar el peso específico y absorción del agregado grueso ASTM-C 127

Método que cubre la determinación de la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción del agregado grueso. Dependiendo del procedimiento usado, la densidad  $kg/m^3$ .

##### 2.5.2.3.1 Muestra

La masa mínima de la muestra de prueba a ser usada está dada en la tabla 5

**Tabla 5.**

*Peso mínimo de la muestra de prueba*

<b>Tamaño máximo nominal</b>	<b>Peso mínimo de la muestra de prueba</b>
<b>mm</b>	<b>kg</b>
12.5 o menor	2.0
19	3.0
25	4.0
37.5	5.0
50	8.0
63	12.0
75	18.0
90	25.0
100	40.0
112	50.0
125	75.0
150	125.0

Nota. Tomado de *ASTM C-127*

#### **2.5.2.4 Método para determinar el peso específico y absorción del agregado fino ASTM C-128**

Este método determina la densidad promedio de una cantidad de partículas de áridos finos, la densidad relativa y la absorción de los áridos finos. Dependiendo del procedimiento usado, la densidad en kg/m<sup>3</sup> (lb/ft<sup>3</sup>) es expresada como secada al horno, saturada superficialmente seca o como densidad aparente. La densidad y la densidad relativa se determinan después de secar los áridos.

##### **2.5.2.4.1 Absorción de los agregados**

Es el aumento de masa del agregado debido al llenado de sus poros por agua, expresado como porcentaje de su masa seca.

La porosidad de los agregados, su impermeabilidad y absorción influyen en las propiedades como la adherencia entre el agregado y los materiales cementicios, la resistencia del concreto a la



congelación y al deshielo, así como la estabilidad química y la resistencia a la abrasión. (Barriga, 2007)

### 2.5.2.5 Contenido de humedad en agregados ASTM C-566

Este método se utiliza para determinar el porcentaje de humedad evaporable en una muestra de áridos, por el método del secado, tanto de la humedad contenida en la superficie como en los poros de los áridos. Algunos áridos pueden contener agua que se encuentra combinada químicamente con los minerales. Esa agua no es evaporable y no se encuentra incluida dentro del porcentaje determinado por este método de ensayo.

#### 2.5.2.5.1 Muestreo

Obtener una muestra de acuerdo con Norma ASTM D75.

Asegurar una muestra representativa de agregado para contenido de humedad y teniendo una masa no menor que la cantidad de la **tabla 6**. Proteger la muestra contra pérdidas de humedad previa a la determinación de la masa.

#### **Tabla 6.**

*Muestra representativa de agregados*

<b>Tamaño de muestra para agregado</b>	
<b>Tamaño máximo nominal del agregado</b>	<b>Masa de la muestra de agregado</b>
<b>mm</b>	<b>kg</b>
4.75	0.5
9.5	1.5
12.5	2
19	3
25	4
37.5	6
50	8
63	10
75	13
90	16
100	25
150	50

Nota. Tomado de *ASTM C-566*

### 2.5.3 Procedimiento de diseño de mezcla de hormigón (ACI 211.1)

#### 2.5.3.1 Resistencia promedio requerida

La resistencia promedio a la compresión requerida,  $f'_{cr}$ , usada como base para la dosificación del concreto debe ser determinada según la **tabla 7**.

**Tabla 7.**

*Resistencia promedio a la compresión requerida cuando hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra*

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$f'_{c} \leq 35$	Usar el mayor valor obtenido de las ecuaciones (1) y (2) $f'_{cr} = f'_{c} + 1.34s_s$ (1) $f'_{cr} = f'_{c} + 2.33s_s - 3.5$ (2)
$f'_{c} > 35$	Usar el mayor valor obtenido con las ecuaciones (3) y (4) $f'_{cr} = f'_{c} + 1.34s_s$ (3) $f'_{cr} = 0.90f'_{c} + 2.33s_s$ (4)

Nota: Tabla obtenida de *ACI 318*.

#### 2.5.3.2 Dosificación basada en la experiencia en obra o en mezclas de prueba

##### 2.5.3.2.1 Desviación estándar

La desviación estándar es una medida de extensión o variabilidad en la estadística descriptiva. Se utiliza para calcular la variación o dispersión en la que los puntos de datos individuales difieren de la media.

Una desviación baja indica que los puntos de datos están muy cerca de la media, mientras que una desviación alta muestra que los datos están dispersos en un rango mayor de valores.

**Cuando se dispone de registros de ensayos, debe establecerse la desviación estándar de la muestra, Ss.**

Los registros de prueba de una planta de concreto se usan para calcular la desviación estándar de la muestra ( $S_s$ ) que representa la variabilidad en las propiedades del concreto. Estos registros deben cumplir ciertas condiciones:

- a) Deben representar materiales, controles de calidad y condiciones similares a las propuestas. La variación en los materiales y proporciones debe ser similar.
- b) Representar un concreto producido para que cumpla con una resistencia o resistencias especificadas, dentro de 7 MPa de  $f'c$ .
- c) Consistir al menos de 30 ensayos consecutivos, o de dos grupos de ensayos consecutivos totalizando al menos 30 ensayos.

**Cuando no se dispone de registros de ensayos que se ajusten a los requisitos**

Si no hay registros de pruebas que cumplan lo anterior, se pueden usar 15-29 pruebas consecutivas, pero  $s_s$  se calcula multiplicando el valor calculado por un factor de corrección de la **tabla 8**. Estos registros deben cumplir los criterios (a) y (b) del punto 1 y abarcar al menos 45 días consecutivos.

**Tabla 8.**

*Factor de modificación para la desviación estándar de la muestra cuando se dispone de menos de 30 ensayos*

Numero de ensayos	Factor de modificación para la desviación estándar de la muestra
<b>Menos de 15</b>	<b>Emplee la tabla 8.</b>
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 o mas	1

Nota: Tabla obtenida de *ACI 318*.

Cuando una instalación productora de concreto no tenga registros de ensayos de resistencia en obra para el cálculo de que se ajuste a los requisitos,  $f'cr$  debe determinarse de la **tabla 9**.

**Tabla 9.**

*Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra.*

<b>Resistencia especificada a la compresión, Mpa</b>	<b>Resistencia promedio requerida a la compresión, Mpa</b>
$f'c < 35$	$f'cr = f'c + 7.0$
$20 \leq f'c \leq 35$	$f'cr = f'c + 8.5$
$f'c > 35$	$f'cr = 1.10f'c + 5.0$

Nota: Tabla obtenida de *ACI 318*.

Las siguientes variables de control, que se utilizan.

$f'cr$ : resistencia promedio requerida, para asegurarse de que sólo aquella porción permisible de pruebas caerá por debajo de la resistencia especificada.

$f'c$ : Resistencia especificada.

$s_s$ : Desviación estándar.

### 2.5.3.3 Elección del asentamiento

Si el asentamiento no se ha especificado, su valor apropiado para el trabajo puede ser seleccionado a partir de la **Tabla 9**. Los rangos del revenimiento que se muestran aplican cuando se usa vibración para consolidar el hormigón. Deben emplearse mezclas de la consistencia más dura posible sin perder de vista que se puedan colocar con un buen rendimiento.

#### **Tabla 10.**

*Asentamientos recomendados para varios tipos de construcción.*

<b>Tipos de Construcción</b>	<b>Asentamiento pulg.</b>	
	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>
<b>Muros de cimentación y zapatas reforzadas</b>	3	1
<b>Zapatas, campanas y muros de subestructura</b>	3	1
<b>Vigas y muros reforzados</b>	4	1
<b>Columnas para edificación</b>	4	1

<b>Pavimentos y losas</b>	3	1
<b>Concreto masivo</b>	2	1

Nota: Tabla obtenida de *ACI 211*

#### 2.5.3.4 Selección del tamaño máximo nominal del agregado

Los tamaños más grandes de agregados bien graduados tienen menos vacíos que los tamaños más pequeños. Por esto, los hormigones con agregados de tamaño mayores requieren menos mortero por volumen unitario de hormigón. Por regla general, el tamaño máximo nominal de agregado debe ser el mayor disponible económicamente y guardar relación con las dimensiones de la estructura. En ningún caso el tamaño máximo nominal debe exceder de:

- 1/5 de la menor dimensión entre los costados de las cimbras.
- 1/3 del espesor de las losas.
- 3/4 del espaciamiento mínimo libre entre varillas o alambres individuales de refuerzo, paquetes de varillas, cables o ductos de pretensado.

#### 2.5.3.5 Estimación de la cantidad de agua y contenido de aire

La cantidad de agua por volumen unitario de hormigón requerida para producir determinado revenimiento, depende del tamaño máximo, de la forma de la partícula, la granulometría de los agregados y de la cantidad de aire incluido (aire adicionado a través de aditivos químicos), no le afecta significativamente el contenido de cemento. La **tabla 11** provee valores estimados del agua de mezclado requerida para hormigones hechos con varios tamaños máximos de agregados, con y sin aire incluido.

**Tabla 11.**

*Requerimiento aproximado de agua de mezcla*

Asentamiento, cm	Agua, kg/m <sup>3</sup> para el concreto de agregado de tamaño máximo nominal (mm) indicado							
	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
<b>Concreto sin aire incluido</b>								
2.5 A 5	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124

15 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	-
Cantidad aproximada de aire atrapado en concreto, %	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2
<b>Concreto con aire incluido</b>								
2.5 A 5	108	175	165	160	145	140	135	120
7.5 a 10	200	190	180	175	160	155	150	135
15 a 17.5	215	205	190	185	170	165	160	-
<b>Promedio recomendado del contenido total de aire, porcentaje de acuerdo con el nivel de exposición</b>								
Exposición ligera	4.4	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

Nota: Tabla obtenida de *ACI 211*

### 2.5.3.6 Selección de relación agua/cemento

La relación agua/cemento debe ser tan baja como sea posible, pero teniendo en cuenta que debe permitir una adecuada trabajabilidad y compactación del hormigón y que debe evitarse, además, el fenómeno de segregación de los áridos gruesos. A veces, para conseguir estas características, es necesario utilizar mayor cantidad de cemento de la estrictamente necesaria, o emplear aditivos adecuados.

La relación agua/cemento es el factor que más influye en la resistencia del hormigón, no pueden darse valores fijos que relacionen ambas magnitudes por depender, además, de otros muchos factores. En la **tabla 12.** se incluyen unos valores orientativos de la relación agua/cemento, que no deben superarse, en función de la resistencia del hormigón, del tipo de árido y de la clase de cemento, para unas condiciones de ejecución suficientemente buenas.

#### **Tabla 12.**

*Relación entre agua/cemento y la resistencia a la compresión del hormigón.*

Resistencia a la Compresión a los 28 días, Mpa	Relación agua-cemento	
	sin aire	aire
	incorporado	incorporado

40	0,42	-
35	0,47	0,39
30	0,54	0,45
25	0,61	0,52
20	0,69	0,60
15	0,79	0,70

Nota: Tabla obtenida de *Norma ACI 211.1-91*.

### 2.5.3.7 Cálculo del contenido de cemento

El contenido de cemento se calcula con la cantidad de agua y la relación agua cemento, cuando se requiera un contenido mínimo de cemento o los requisitos de durabilidad lo especifiquen, la mezcla se deberá basar en un criterio que conduzca a una cantidad mayor de cemento.

### 2.5.3.8 Estimación del contenido de grava

Los agregados de esencialmente el mismo tamaño máximo nominal y granulometría producen hormigones de trabajabilidad satisfactoria cuando se emplea un volumen dado de agregado grueso por volumen unitario de hormigón, con base en el peso unitario seco varillado. En la **tabla 13** aparecen valores apropiados para estos volúmenes de agregado. Puede observarse que, para igual trabajabilidad, el volumen de agregado grueso en volumen unitario de hormigón depende únicamente de su tamaño máximo y del módulo de finura del agregado fino.

**Tabla 13.**

*Volumen de agregado grueso por volumen unitario de hormigón*

Tamaño máximo nominal de agregado, (mm)	Volumen de agregado grueso* varillado en seco, por volumen unitario de hormigón para distintos módulos de finura de arena			
	2.4	2.6	2.8	3
10	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53

20	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
40	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
70	0.82	0.80	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

Nota: Tabla obtenida de *Norma ACI 211.1-91*

### 2.5.3.9 Estimación del contenido de arena

El agregado fino, cuya cantidad se determina por diferencia. Puede emplearse cualquiera de los dos procedimientos siguientes:

- a) Método de Peso del hormigón por unidad de volumen.
- b) Método de volumen absoluto ocupado por los ingredientes del hormigón.

Procedimiento:

#### a) Método de peso del hormigón por unidad de volumen

Si el peso del hormigón por volumen unitario se supone o puede estimarse por experiencia, el peso requerido del agregado fino es, simplemente, la diferencia entre el peso del hormigón fresco y el peso total de los demás componentes. A menudo se conoce con bastante precisión el peso unitario del hormigón, por experiencia previa con los materiales. En ausencia de dicha información, puede emplearse la **tabla 14** para hacer un cálculo tentativo. Aun si el cálculo del peso del hormigón por metro cúbico es aproximado, las proporciones de la mezcla serán suficientemente precisas para permitir un ajuste fácil con base en mezclas de prueba.

#### **Tabla 14.**

*Primera estimación del peso del hormigón fresco*

Tamaño máximo	Primea estimación del peso del hormigón fresco, kg/m <sup>3</sup>
------------------	--



nominal de agregado, (mm)	hormigón sin aire incluido	hormigón con aire incluido
10	2285	2190
12.5	2315	2235
20	2355	2280
25	2375	2315
40	2420	2355
50	2445	2375
70	2465	2400
150	2505	2435

Nota: Tabla obtenida de *Norma ACI 211.1-91*

#### ***b) Método de volumen absoluto ocupado por los ingredientes del hormigón***

Un procedimiento más exacto para calcular la cantidad requerida de agregados finos, implica el empleo de volúmenes desplazados por los componentes. En este caso, el volumen total desplazado por los componentes conocidos (agua, aire, cemento y agregado grueso) se resta del volumen unitario de hormigón para obtener el volumen requerido de agregado fino.

El volumen ocupado por cualquier componente en el hormigón es igual a su peso dividido entre la densidad de este material (siendo ésta el producto de la gravedad específica del agua por el peso específico del material).

#### **2.5.3.10 Ajustes por humedad de los agregados**

Las cantidades de agregado que realmente deben pesarse para el hormigón, deben considerar la humedad del agregado. Los agregados están generalmente húmedos y sus pesos secos deben incrementarse con el porcentaje de agua que contienen ya sea absorbida o libre en la superficie. Por lo tanto, el agua de mezclado será corregida dependiendo de los valores de humedad y absorción que tengan los agregados, así:

Si Absorción (%) > Humedad (%), el agregado absorberá agua del agua de mezclado, por lo tanto, hay necesidad de agregar una cantidad de agua equivalente a la diferencia entre la absorción y la humedad de los agregados a fin de evitar que este consumo adicional de agua se refleje en mezclas poco manejables.

Si Absorción (%) < Humedad (%), el agregado aportará agua al agua de mezclado, por lo tanto, hay necesidad de disminuir el agua de mezclado en una cantidad equivalente a la diferencia entre la humedad y la absorción a fin de evitar que la mezcla a elaborar sobrepase el revenimiento previsto.

Si Absorción (%) = Humedad (%), no se debe realizar ningún ajuste.

#### **2.5.4 Ensayo de resistencia a la compresión del hormigón (ASTM C 39)**

Este ensayo permite la determinación de la resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos de hormigones moldeados en laboratorio o en campo obtenido por medio de la extracción de núcleos. Se limita a hormigones con peso unitario mayor que  $800 \text{ kg/m}^3$ .

Se necesita ser cuidadoso en la interpretación del significado para determinar la resistencia a la compresión por este método de ensayo, porque la resistencia no es una propiedad fundamental o intrínseca del hormigón hecho con materiales dados. Los valores obtenidos dependerán del tamaño y forma del espécimen, revoltura, procedimiento de mezclado, los métodos de muestreo, moldeo, fabricación y edad, temperatura y condiciones de humedad durante el curado

##### **2.5.4.1 Tipos de fallas en cilindros sometidos a compresión**

Según la norma ASTM C39 hay seis tipos de fallas que depende de muchos factores como lo son: la formación de los conos, confinamiento de las partículas, nivelación de los cabezales, entre otros. En la **figura 7** se muestran los tipos de fallas que se presentaron en los ensayos.

Cuando se usa refrentado con placas de neopreno pueden ocurrir fallas en las esquinas antes de alcanzar la capacidad última de la probeta, del Tipo 5 o 6. Continúe comprimiendo la probeta hasta asegurarse que se ha alcanzado la capacidad última.

El ensayo de compresión presenta siete diferentes tipos de falla por diferentes causas:

**El tipo de falla N° 1** se tiene cuando la carga de compresión es aplicada correctamente sobre un espécimen cilíndrico bien preparado.

**El tipo de falla N°2** se presenta cuando las caras de aplicación de carga se encuentran en el límite de la tolerancia especificada o lo exceden.

**El tipo de falla N° 3** se origina cuando existe concavidad en el equipo que se utiliza ya sea el plato de cabeceo o la placa de aplicación de carga.

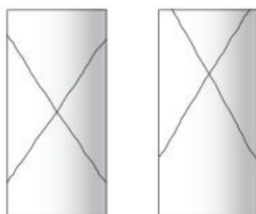
**El tipo de falla N° 4** se exhibe cuando alguna de las caras del espécimen se encuentra cóncava, cuando el material de cabeceo es deficiente o bien cuando alguno de los equipos que se utilizan presentan deficiencias de concavidad.

**El tipo de falla N° 5** se produce cuando la superficie de aplicación de carga no es totalmente plana y la carga es puntual en algunas partes, esto ocurre cuando el material de cabeceo es deficiente, los platos cabeceadores se encuentran dañados o bien cuando las placas de aplicación de carga tienen deficiencias.

**El tipo de falla N° 6** se ocasiona cuando alguna de las caras del espécimen se encuentra convexa, el material de cabeceo es deficiente, el plato cabeceador se encuentra dañado o bien las placas de aplicación de carga tienen deficiencias.

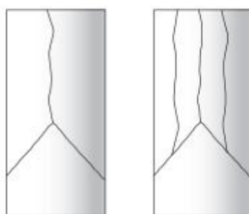
**Figura 8.**

### Esquema de los modelos típicos de fracturas



Tipo 1

Conos en ambos extremos razonablemente bien formados, fisuras a través de la cabecera menor a 25 mm.



Tipo 2

Cono bien formado en uno de los extremos, fisuras verticales que recorren a través de la cabecera, como no muy definido en el otro extremo.



Tipo 3

Fisura vertical columnar a través de ambos extremos, conos no muy definidos.



Tipo 4

Fractura diagonal sin fisuras a través de los bordes; golpear con un matillo para distinguir de Tipo 1.



Tipo 5

Fracturas a los lados en el fondo (ocurren comúnmente cuando se ensaya con neoprenos).



Tipo 6

Similar al tipo 5, pero el extremo del cilindro está en punta.

Nota. Tomado de (ASTM C39).

#### 2.5.4.2 Guía para evaluación de resultados de la prueba de resistencia del concreto (ACI 214R-11).

Esta guía proporciona una introducción a la evaluación de resultados de las pruebas de resistencia del hormigón. Los procedimientos descritos son aplicables a los resultados de la prueba de resistencia a la compresión requeridos por ACI 301, ACI 318 y especificaciones y códigos similares. Los conceptos estadísticos descritos son aplicables para el análisis de otros resultados comunes de pruebas de hormigón, incluida la flexión resistencia, revenimiento, contenido de aire, densidad, módulo de elasticidad, y otras pruebas utilizadas para evaluar el concreto y los ingredientes materiales. Esta guía asume que los resultados de las pruebas concretas ajustarse a una distribución normal.

##### 2.5.4.2.1 Indicadores estadísticos

De aquí en adelante se define como una prueba, el promedio de la resistencia de 2 cilindros, hechos de la misma mezcla de concreto a la edad especificada.

Para un análisis estadístico es recomendable utilizar al menos 30 pruebas, sin embargo, existe la posibilidad de utilizar menos de 30 datos, siempre que se considere un factor corrección en la desviación estándar, dada por la tabla 5.3.1.2 del código AC1-318.

Para los efectos del análisis estadístico, debe definirse las siguientes variables de control, que se utilizan.

$f'_{cr} \geq$  resistencia promedio requerida, para asegurarse de que sólo aquella porción permisible de pruebas caerá por debajo de la resistencia especificada.

$f'_c \geq$  Resistencia especificada.

$s$  = Desviación estándar.

$t$  = Multiplicador constante para la desviación estándar, que depende del número de pruebas que se espera caigan por debajo de  $f'_c$ .

$V$  = Coeficiente de variación.

#### **2.5.4.2.2 Control de calidad**

De acuerdo a la sección 5.6.3.3 del AC1- 318R, el nivel de resistencia de una clase individual de concreto será considerado satisfactorio si cumple con los siguientes requerimientos: El promedio aritmético de cualquiera de tres pruebas consecutivas es igual o superior a la resistencia especificada  $f'_c$ .

Ningún resultado individual de la prueba de resistencia (promedio de dos cilindros) será menor que  $f'_c$  por más de  $3.5 \text{ N/mm}^2$ , si  $f'_c$  es menor o igual a  $35 \text{ N/mm}^2$  o por más de  $0.10 f'_c$ , si es mayor de  $35 \text{ N/mm}^2$

Por otra parte, de acuerdo a los criterios del comité AC1 214R, las variaciones en la resistencia pueden ser evaluadas mediante un análisis estadístico, tomando en cuenta la desviación estándar y el coeficiente de variación, los cuales se pueden asociar el grado de control del concreto en el proyecto.

En este caso, la desviación estándar y coeficiente de variación para una resistencia especificada  $f'_c \leq$  de  $35 \text{ N/mm}^2$  (5000 psi), para control en laboratorio y campo de concreto, son los expuestos en la **tabla 15**.

**Tabla 15.**

*Estándares de control de concreto para  $f'c \leq$  de 35 Mpa (5000 psi).*

<b>Dispersión total</b>					
<b>Clase de operación</b>	<b>Desviación Estándar para diferentes grados de control (Mpa)</b>				
	<b>Excelente</b>	<b>Muy bueno</b>	<b>Bueno</b>	<b>Suficiente</b>	<b>Deficiente</b>
<b>Concreto en Obra</b>	< 2.8	2.8 a 3.4	3.4 a 4.1	4.1 a 4.8	> 4.8
<b>Concreto en laboratorio</b>	< 1.4	1.4 a 1.7	1.7 a 2.1	2.1 a 2.4	> 2.4
<b>Dispersión entre testigos</b>					
<b>Clase de operación</b>	<b>Coficiente de variación V para diferentes grados de control (%)</b>				
	<b>Excelente</b>	<b>Muy bueno</b>	<b>Bueno</b>	<b>Suficiente</b>	<b>Deficiente</b>
<b>Concreto en Obra</b>	< 3	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	5.0 a 6.0	> 6
<b>Concreto en laboratorio</b>	< 2	2.0 a 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	> 5

Nota: Tabla obtenida de *Norma ACI 214*

**CAPÍTULO 3**  
**DESARROLLO DE LA**  
**INVESTIGACIÓN**

### 3 DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1 Recopilación de datos

##### 3.1.1 Análisis granulométrico del agregado grueso

El agregado grueso utilizado en este estudio fue proporcionado por cemento el “El puente”, que fue retirado de la agencia el portillo.

Se realiza el ensayo de agregado grueso haciéndolo pasar por los tamices de la norma ASTM C-136, con el objeto de verificar si son aptos para la elaboración de hormigón.

Para realizar el análisis granulométrico de agregado grueso se utiliza una muestra que sea representativa ya cuarteada y se utilizará 10 kg de acuerdo a lo especificado en la **tabla 16**.

**Tabla 16.**

*Granulometría del agregado grueso*

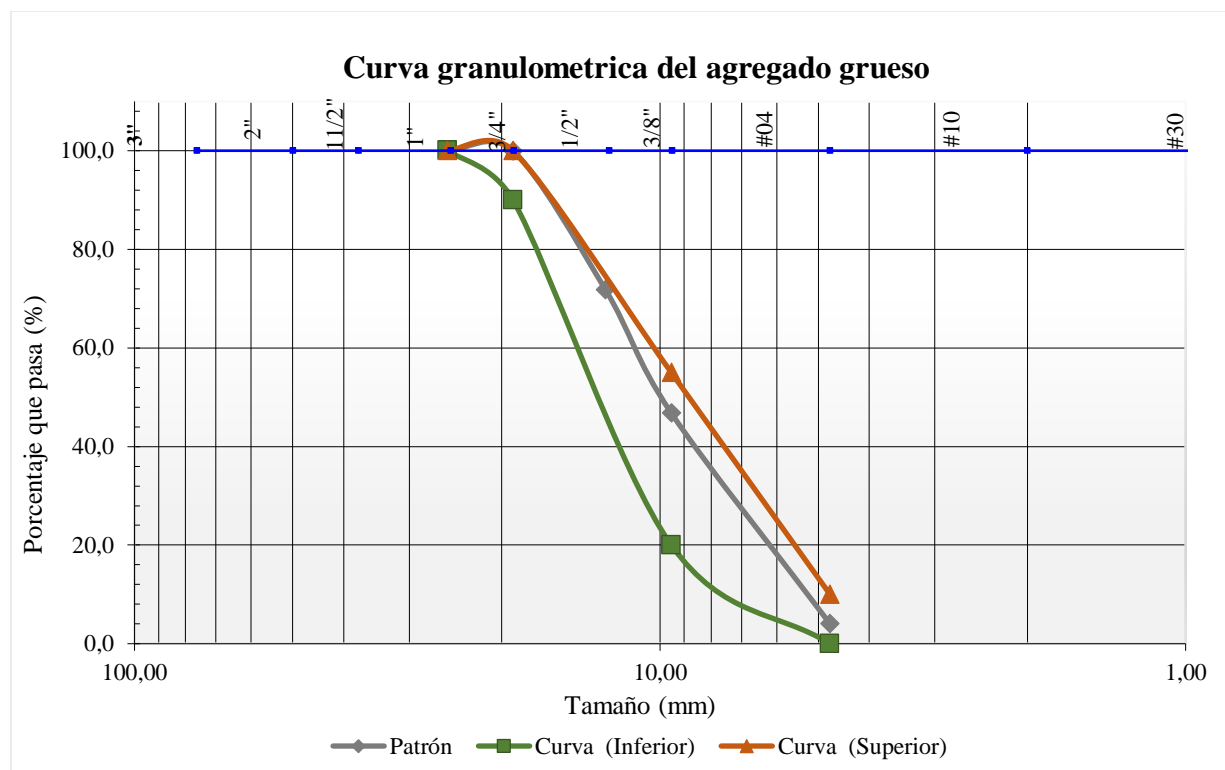
<b>Peso Total (gr.) =</b>		<b>10600</b>			
<b>Tamices</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>Peso Retenido (g)</b>	<b>Retenido Acumulado (gr)</b>	<b>(%)</b>	<b>% Que pasa del total</b>
2 1/2"	63	0,00	0,00	0,00	100,0
2"	50,8	0,00	0,00	0,00	100,0
1 1/2"	38,10	0,00	0,00	0,00	100,0
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,0
3/4"	19,05	10,30	10,3	0,10	99,9
1/2"	12,50	2981,10	2991,40	28,22	71,8
3/8"	9,50	2650,30	5641,70	53,22	46,8
Nº4	4,80	4530,20	10171,90	95,96	4,0
Base	0	427,00	10598,9	99,99	0,0
<b>Suma =</b>		<b>10598,90</b>			
<b>Pérdidas=</b>		<b>1,10</b>	<b>Tamaño Max= 1,00</b>		
<b>MF =</b>		<b>1,78</b>			

Fuente: Elaboración propia

#### **Figura 9.**

*Curva granulométrica del agregado grueso*





Fuente: Elaboración propia

### 3.1.2 Análisis granulométrico del agregado fino.

Para realizar el análisis granulométrico del agregado fino se utilizó una muestra representativa de 1000 gr que se muestra en la **tabla 17**.

**Tabla 17.**

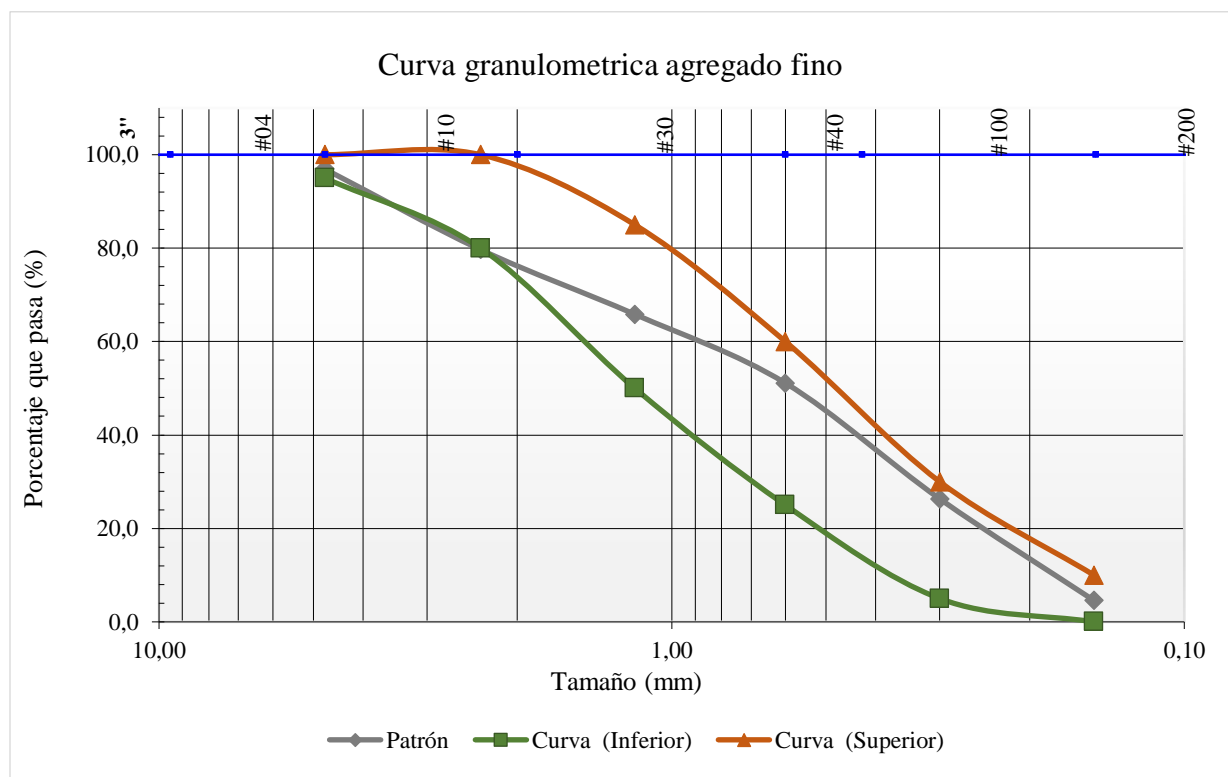
*Granulometría del agregado fino.*

<b>Peso Total (gr.) =</b>		<b>1008,9</b>			
<b>Tamices</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>Peso retenido (g)</b>	<b>Retenido acumulado (gr)</b>	<b>(%)</b>	<b>% Que pasa del total</b>
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	<b>100,0</b>
Nº4	4,75	30,90	30,90	3,06	<b>96,9</b>
Nº8	2,36	174,10	205,00	20,32	<b>79,7</b>
Nº16	1,18	139,70	344,70	34,17	<b>65,8</b>
Nº30	0,60	148,50	493,20	48,88	<b>51,1</b>
Nº50	0,30	250,00	743,20	73,66	<b>26,3</b>
Nº100	0,15	219,60	962,80	95,43	<b>4,6</b>
BASE		46,00	1008,80	99,99	<b>0,0</b>
<b>Suma =</b>		<b>1008,80</b>			
<b>Pérdidas=</b>		<b>0,10</b>			
<b>MF =</b>		<b>2,76</b>			

Fuente: Elaboración propia

**Figura 10.**

*Curva granulométrica del agregado fino*



Fuente: Elaboración propia

### 3.1.3 Densidad aparente “peso unitario” del agregado grueso.

#### 3.1.3.1 Pesos unitario suelto

Este tipo de ensayo permite calcular los huecos entre las partículas del agregado grueso tanto en estado suelto y compactado, los resultados son mostrados en la **tabla 18** y **tabla 19**

**Tabla 18.**

*Peso unitario suelto*

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm <sup>3</sup> )	Peso recipiente + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso unitario suelto (gr/cm <sup>3</sup> )
1	5840	9698,10	21830	15990	1,649
2	5840	9698,10	21770	15930	1,643

3	5840	9698,10	21810	15970	1,647
				<b>Promedio</b>	<b>1,646</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.3.2 Peso unitario compactado

**Tabla 19.**

*Peso unitario compactado*

Muestra Nº	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm3)	Peso recipiente + muestra compactada (gr)	Peso muestra compactada (gr)	Peso unitario compactada (gr/cm3)
1	5840	9698,10	22565	16725	1,725
2	5840	9698,10	22630	16790	1,731
3	5840	9698,10	22635	16795	1,732
				<b>Promedio</b>	<b>1,729</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.4 Densidad aparente “peso unitario” del agregado fino.

Este tipo de ensayo permite calcular los huecos entre las partículas del agregado fino tanto en estado suelto y compactado, los resultados son mostrados en la **tabla 20** y **tabla 21**.

**Tabla 20.**

*Peso unitario suelto*

Muestra Nº	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm3)	Peso recipiente + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso unitario suelto (gr/cm3)
1	2612,00	2915,79	7552,00	4940,00	1,694
2	2612,00	2915,79	7517,00	4905,00	1,682
3	2612,00	2915,79	7557,00	4945,00	1,696
				<b>Promedio</b>	<b>1,691</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 21.**

*Peso unitario compactado*

Muestra n°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm <sup>3</sup> )	Peso recipiente + muestra compactada (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso unitario suelto (gr/cm <sup>3</sup> )
1	2612,00	2915,79	7847,00	5235,00	1,795
2	2612,00	2915,79	7857,00	5245,00	1,799
3	2612,00	2915,79	7847,00	5235,00	1,795
<b>Promedio</b>					<b>1,797</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.5 Peso específico y absorción del agregado grueso.

Con este tipo de ensayo se determinará la densidad relativa y la absorción del agregado grueso

**Tabla 22.**

*Peso específico y absorción del agregado grueso*

Muestra N°	Peso muestra secada "a" (gr)	Peso muestra saturada con sup. seca "b" (gr)	Peso muestra sat. dentro del agua "c" (gr)	Peso específico a granel (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico s.s.s. (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	% de abs.
1	4935	5000	3105	2,60	2,64	2,70	1,32
2	4930	5000	3101	2,60	2,63	2,70	1,42
3	4935	5000	3100	2,60	2,63	2,69	1,32
<b>Promedio</b>				<b>2,60</b>	<b>2,63</b>	<b>2,69</b>	<b>1,35</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.6 Peso específico y absorción del agregado fino.

Con este tipo de ensayo se determinará la densidad relativa y la absorción del agregado fino.

**Tabla 23.**

*Peso específico y absorción del agregado fino.*

Peso muestra (gr)	Peso matríz (gr)	Muestra + matríz + agua (gr)	Agua agreg. al matríz "w" (ml) ó (gr)	Peso muestra secada "a" (gr)	Vol. del matríz "v" (ml)	p. e. a granel (gr/cm <sup>3</sup> )	p. e. sat. con sup. seca (gr/cm <sup>3</sup> )	p. e. aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	% de absorc.
-------------------	------------------	------------------------------	---------------------------------------	------------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--------------------------------------	--------------

500	193,50	990,10	296,60	493,3	500	2,43	2,46	2,51	1,34
500	177,70	981,30	303,60	493,20	500	2,51	2,55	2,60	1,36
500	196,00	975,40	279,40	493,10	500	2,24	2,27	2,31	1,38
<b>Promedio</b>						<b>2,39</b>	<b>2,42</b>	<b>2,47</b>	<b>1,36</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.7 Peso específico del cemento.

**Tabla 24.**

*Peso específico del cemento.*

<b>Muestra Nº</b>	<b>Peso muestra (gr)</b>	<b>Vol. matraz (ml)</b>	<b>Muestra+ matraz + gasolina (ml)</b>	<b>Vol. desplazado (ml)</b>	<b>p. e. (gr/cm3)</b>
1	64	300,00	310,00	10,00	6,40
2	64	300,00	320,00	493,20	0,13
3	64	300,00	975,40	493,10	0,13
					<b>2,22</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.8 Contenido de humedad de los agregados

#### 3.1.8.1 Agregado grueso

**Tabla 25.**

*Contenido de humedad agregado grueso*

<b>Humedad</b>	
<b>Dato</b>	<b>gr</b>
Peso muestra húmeda	300,00
Peso muestra seca	299,30
Peso agua	0,70
% de humedad	0,23

Fuente: Elaboración propia.

#### 3.1.8.2 Agregado fino

**Tabla 26.**

*Contenido de humedad agregado fino*

<b>Humedad</b>	
<b>Dato</b>	<b>gr</b>
Peso muestra húmeda	300,00
Peso muestra seca	299,20
Peso agua	0,80
% de humedad	<b>0,27</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.9 Dosificación del hormigón.

Las pruebas realizadas antes de la dosificación garantizan que los agregados cumplen los parámetros y valores especificados en las normas pertinentes y son aptos para su uso. A partir del mismo se determina la cantidad de hormigón que tendrá una resistencia a la compresión de 30 Mpa al cabo de 28 días.

#### 3.1.9.1 Determinar la resistencia promedio requerida ( $f'_{cr}$ )

Para el proyecto se consideró dos resistencias de  $f'_c = 26$  Mpa y  $f'_c = 30$  Mpa

Se obtiene de la “Resistencia promedio requerida  $f'_{cr}$ , Cuando no hay datos disponibles para establecer la desviación estándar.”

$$f'_{cr} = f'_c + 85 \quad (5)$$

$$f'_{cr} = 315 + 85 = 400 \text{ kg/cm}^2 \quad (6)$$

$$f'_{cr} = 265 + 85 = 350 \text{ kg/cm}^2 \quad (7)$$

#### 3.1.9.2 Determinación de la relación agua/cemento (A/C)

Para determinar este valor y teniendo como dato  $f'_{cr} = 400 \text{ kg/cm}^2$  y  $f'_{cr} = 350 \text{ kg/cm}^2$ , interpolamos límites superior e inferior de la Tabla 11, y tenemos:

$f'_c$	a/c
40 =	0.42
35 =	0.47

### 3.1.9.3 Determinación de la cantidad de agua

Para poder obtener la cantidad de agua primero se seleccionó un asentamiento “S” de 1” de la **tabla 10**. También se requiere el tamaño máximo del agregado que es de 3/4”.

Con todos estos valores se obtiene la cantidad de agua de la **tabla 11**:

$$\text{Agua} = 190 \text{ Kg/m}^3$$

### 3.1.9.4 Cálculo de la cantidad de cemento (Cc).

$$\text{Cantidad de cemento} = \frac{190}{0.42} = 452.38 \text{ kg/m}^3 \quad (8)$$

$$\text{Cantidad de cemento} = \frac{190}{0.47} = 404.25 \text{ kg/m}^3 \quad (9)$$

### 3.1.9.5 Cálculo del peso agregado grueso (Gr)

Se obtiene el Vol. Agr. Grueso / Vol. unitario concreto ( $V_r/v$ ), para calcular este valor se necesita el módulo de finura de la arena (M.F.) y el tamaño máximo nominal de la grava (T.M.A) con estos valores ingresamos a la **tabla 12**:

$$\begin{array}{rcl} 2.6 & & 0.64 \\ 2.76 & = & V_r/v \\ 2.8 & & 0.62 \end{array}$$

Realizando la interpolación nos da:

$$\frac{V_r}{v} = 0.624 \quad (10)$$

Determinar la cantidad de grava, multiplicando  $V_r/V$  y P.U.C

$$Gr = 0.624 * 1729 = 985.92 \text{ kg/m}^3 \quad (11)$$

### 3.1.9.6 Determinación de la cantidad de arena (Ar) por el método de los volúmenes absolutos.

Determinadas las cantidades de cemento, agua, grava para un metro cúbico de hormigón en peso, se procedemos a calcular las cantidades convirtiéndolo en volumen al metro cúbico de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Ar = \left( 1m^3 - \left( \left( \frac{C}{Pe(c)} \right) + \left( \frac{Gr}{Pe(Gr)} \right) + \left( \frac{Ag}{Pe(Ag)} \right) \right) \right) \quad (12)$$

Reemplazando los datos de las cantidades obtenidas y de los ensayos preliminares en la ecuación anterior, tenemos:

$$Ar = \left( 1m^3 - \left( \left( \frac{404.26}{3060} \right) + \left( \frac{1078.89}{1729} \right) + \left( \frac{190}{1000} \right) \right) \right) \quad (13)$$

$$Ar = 588.82 \text{ kg/m}^3$$

$$Ar = 547.93 \text{ kg/m}^3$$

Las cantidades finales son expuestas en la **tabla 27** y **tabla 28**

#### **Tabla 27.**

*Cantidad de material para 1m<sup>3</sup> de hormigón patrón, para el diseño de mezcla a/c:0.42*

<b>Cemento</b>	452.38	kg/m <sup>3</sup>
----------------	--------	-------------------



<b>Agua de diseño</b>	190	lt/m <sup>3</sup>
<b>Agregado fino seco</b>	1078.90	kg/m <sup>3</sup>
<b>Agregado grueso seco</b>	547.93	kg/m <sup>3</sup>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 28.**

*Cantidad de material para 1m<sup>3</sup> de hormigón patrón, para el diseño de mezcla a/c:0.47*

<b>Cemento</b>	404.26	kg/m <sup>3</sup>
<b>Agua de diseño</b>	190	lt/m <sup>3</sup>
<b>Agregado fino seco</b>	1078.90	kg/m <sup>3</sup>
<b>Agregado grueso seco</b>	588.82	kg/m <sup>3</sup>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 29.**

*Porción de mezcla a/c:0.42*

<b>Cemento</b>	<b>Arena</b>	<b>Grava</b>	<b>Agua</b>
1.00	1.21	2.38	190

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 30.**

*Porción de mezcla a/c:0.47*

<b>Cemento</b>	<b>Arena</b>	<b>Grava</b>	<b>Agua</b>
1.00	1.46	2.67	190

### 3.1.9.7 Elaboración de muestras

Después de haber obtenido ya las cantidades de los materiales, se procedió a realizar la elaboración de las mezclas.

Para garantizar una buena adherencia de los agregados utilizados (grava y arena) al momento de realizar el hormigón, éstos fueron lavados con anterioridad a la elaboración de las mezclas.

#### **3.1.9.7.1 El proceso de mezclado**

- Para el mezclado de los materiales en la mezcladora, se introdujo en el tambor una pequeña porción del agua de mezcla, luego los materiales sólidos, grava, arena, cemento, en este orden, con la mitad de agua restante. El agua restante, se la va añadiendo de poco hasta que todos los materiales se encuentran en la mezcladora. El tiempo de mezclado fue un tiempo de 5 minutos, a partir del instante en que todos los materiales han sido colocados en la mezcladora.

- Una porción de la mezcla fue vaciada en un recipiente para realizar el ensayo de asentamiento en el cono de Abrams, el que fue llenado en tres capas, apisonándolas con la varilla con 25 golpes cada una, una vez lleno el cono se enrasó la mezcla, por último, se retiró el cono y midió el asentamiento.

- Una vez realizado el control de la mezcla se prosiguió con el llenado de los moldes y al enrase de la parte superior del molde.

#### **3.1.9.7.2 Curado de probetas**

Después de 24 horas del vaciado del hormigón en las probetas, se procedió a desmoldar las mismas y sumergirlas en su totalidad en agua, teniendo el cuidado de no golpear los especímenes en la piscina del laboratorio del hormigón de la UAJMS.

El proceso de curado de probetas consistió en la sumersión de las mismas, en las piscinas con agua que se encuentran en el laboratorio, hasta que cumplan 28 días de edad.

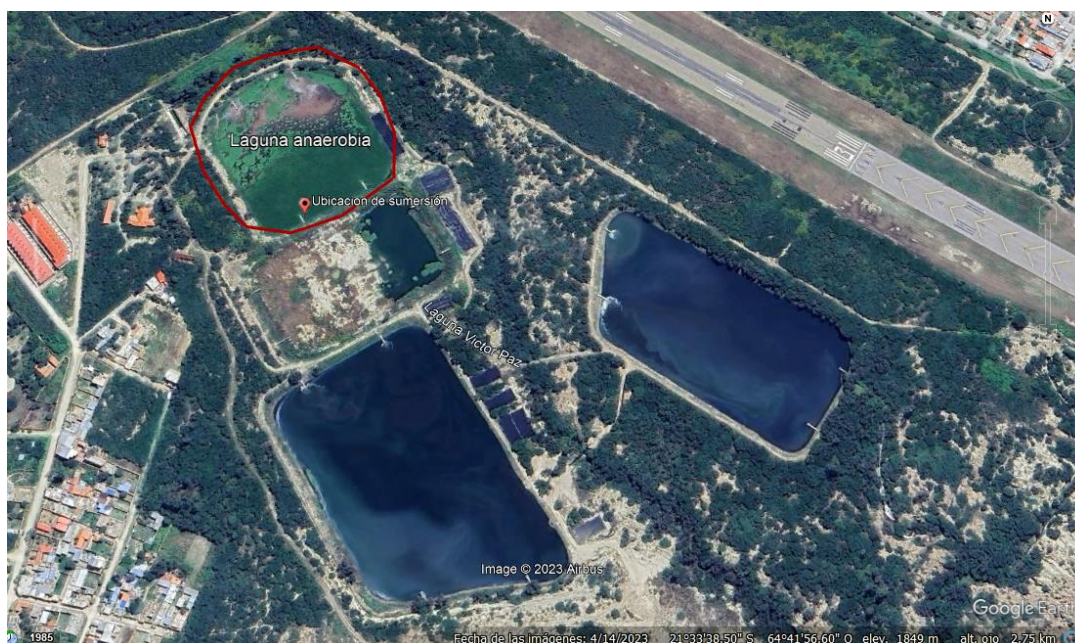
### **3.2 Sumersión de probetas en la planta de tratamiento de aguas residuales de San Luis**

#### **3.2.1 Preparado de probetas**

Se identifico a las 64 probetas que fueron sumergidas con relación *a/c*, y numero de probeta, se procedió a pesar cada una de ellas para después introducir en las jaulas, cada jaula tenía una capacidad de 8 probetas, todas las jaulas con las probetas fueron llevadas a la PTAR de San Luis. La sumersión de las 64 probetas de hormigón se realizó en la laguna N°1 con un tratamiento anaerobio de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Luis, las probetas fueron sumergidas a 1.3 m. de mencionada laguna durante 45, 60, 90 y 120 días.

**Figura 11.**

### Planta de tratamiento de aguas residuales de San Luis



Fuente: Elaboración propia con el uso del software Google Earth.

### 3.2.2 Análisis de calidad de agua

Las muestras de calidad de agua fueron obtenidas los días que fueron sacadas las probetas sumergidas.

Estas muestras fueron llevadas a los laboratorios del CIAGUA Y CEANID, para sacar resultados de los diferentes parámetros que pueden causar algún daño en la estructura del hormigón

### 3.3 Análisis y resultados

Los resultados obtenidos del ensayo de compresión a las distintas edades en las probetas elaboradas se presentan en las siguientes tablas

#### 3.3.1 Ensayo mecánico de resistencia a compresión del hormigón

El ensayo mecánico de resistencia de las probetas cilíndricas, se efectuó según la norma ASTM C 39; donde se obtiene el esfuerzo a la compresión y la máxima carga del espécimen.

#### **Tabla 31.**

*Resistencia de esfuerzo a compresión de hormigón patrón y hormigón sumergido hasta los 45 días relación a/c=0.42*

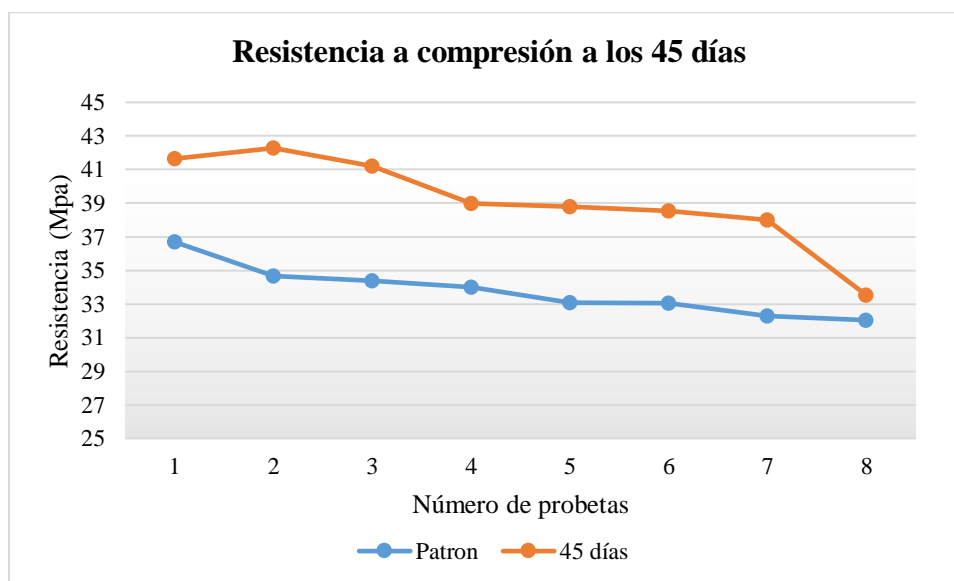
Nº	Identificación	F. de Vaciado	F. de Rotura	Peso (gr)	Edad (días)	Área (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Lectura (Mpa)	Carga (N)	Resist. (N/mm <sup>2</sup> )
----	----------------	---------------	--------------	-----------	-------------	-------------------------	--------------	---------------	-----------	------------------------------

1	SS1	10/04/2023	07/09/2023	3671,6	28	78,54	253,60	32,28	253600	32,28
2	SS2	10/04/2023	07/09/2023	3706,90	28	78,54	259,60	33,04	259600	33,04
3	SS3	10/04/2023	07/09/2023	3685,50	28	78,54	251,60	32,04	251600	32,04
4	SS4	10/04/2023	07/09/2023	3611,80	28	78,54	272,30	34,67	272300	34,67
5	SS5	13/04/2023	07/09/2023	3734,50	28	78,54	288,20	36,69	288200	36,69
6	SS6	13/04/2023	07/09/2023	3742,10	28	78,54	259,80	33,08	259800	33,08
7	SS7	19/04/2023	07/09/2023	3740,80	28	78,54	270,10	34,39	270100	34,39
8	SS8	26/04/2023	07/09/2023	3685,90	28	78,54	267,20	34,01	267200	34,01
9	S1	03/07/2023	17/08/2023	3793,10	45	78,54	327,20	41,65	327200	41,65
10	S2	03/07/2023	17/08/2023	3724,20	45	78,54	306,20	38,99	306200	38,99
11	S3	03/07/2023	17/08/2023	3742,00	45	78,54	302,80	38,55	302800	38,55
12	S4	03/07/2023	17/08/2023	3778,20	45	78,54	332,10	42,28	332100	42,28
13	S5	03/07/2023	17/08/2023	3770,60	45	78,54	323,70	41,21	323700	41,21
14	S6	03/07/2023	17/08/2023	3747,50	45	78,54	263,30	33,53	263300	33,53
15	S7	03/07/2023	17/08/2023	3762,40	45	78,54	298,40	37,99	298400	37,99
16	S8	03/07/2023	17/08/2023	3714,20	45	78,54	304,60	38,79	304600	38,79

Fuente: Elaboración propia

### Figura 12.

Comparación de la resistencia a compresión para el hormigón patrón y para el hormigón sumergido por 45 días  $a/c=0.42$



Fuente: Elaboración propia

Interpretación: en la figura 10 se muestra el ensayo de resistencia a la compresión de probetas de hormigón a los 45 días de edad sumergidas en aguas residuales y de probetas patrón, los cuales muestran que las probetas sumergidas alcanzan una mayor resistencia a las probetas patrón y todas las probetas tanto sumergidas como no sumergidas cumplen con la resistencia de diseño de 31.89 Mpa.

**Tabla 32.**

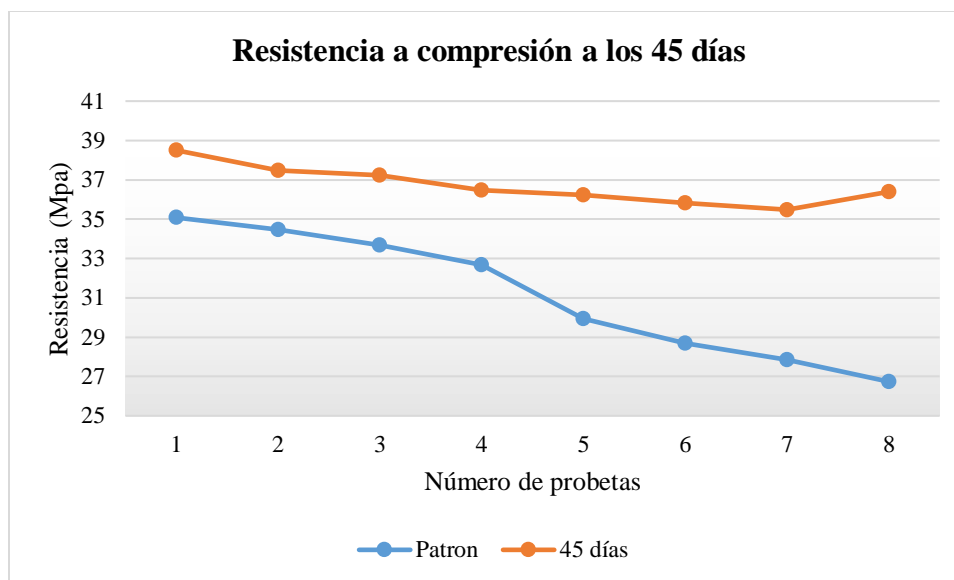
*Resistencia de esfuerzo a compresión de hormigón patrón y hormigón sumergido hasta los 45 días relación a/c=0.47*

N°	Identificación	F. de Vaciado	F. de Rotura	Peso (gr)	Edad (días)	Area (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Lectura (Mpa)	Carga (N)	Resist. (N/mm <sup>2</sup> )
1	SS1	24/04/2023	06/09/2023	3702,5	28	78,54	270,80	34,47	270800	34,47
2	SS2	27/04/2023	06/09/2023	3687,40	28	78,54	264,60	33,69	264600	33,69
3	SS3	12/04/2023	06/09/2023	3688,00	28	78,54	218,80	27,86	218800	27,86
4	SS4	27/04/2023	06/09/2023	3696,80	28	78,54	256,70	32,68	256700	32,68
5	SS5	12/04/2023	06/09/2023	3678,30	28	78,54	235,10	29,94	235100	29,94
6	SS6	24/04/2023	06/09/2023	3720,50	28	78,54	275,50	35,08	275500	35,08
7	SS7	17/04/2023	06/09/2023	3675,40	28	78,54	225,40	28,70	225400	28,70
8	SS8	27/04/2023	06/09/2023	3793,50	28	78,54	210,40	26,74	210400	26,74
9	S1	03/07/2023	17/08/2023	3729,40	45	78,54	284,50	36,22	284500	36,22
10	S2	03/07/2023	17/08/2023	3597,20	45	78,54	294,40	37,48	294400	37,48
11	S3	03/07/2023	17/08/2023	3704,80	45	78,54	278,70	35,48	278700	35,48
12	S4	03/07/2023	17/08/2023	3797,20	45	78,54	286,50	36,47	286500	36,47
13	S5	03/07/2023	17/08/2023	3755,90	45	78,54	302,40	38,50	302400	38,50
14	S6	03/07/2023	17/08/2023	3713,10	45	78,54	281,40	35,81	281400	35,81
15	S7	03/07/2023	17/08/2023	3710,20	45	78,54	292,40	37,22	292400	37,22
16	S8	03/07/2023	17/08/2023	3719,00	45	78,54	285,80	36,39	285800	36,39

Fuente: Elaboración propia

**Figura 13.**

*Comparación de la resistencia a compresión para el hormigón patrón y para el hormigón sumergido por 45 días relación a/c=0.47*



*Fuente:* Elaboración propia

Interpretación: en la figura 11 se muestra el ensayo de resistencia a la compresión de probetas de hormigón a los 45 días de edad sumergidas en aguas residuales y de probetas patrón, los cuales muestran que las probetas sumergidas alcanzan una mayor resistencia a las probetas patrón y todas las probetas tanto sumergidas como no sumergidas cumplen con la resistencia de diseño de 25.99 Mpa.

**Tabla 33.**

*Resistencia de esfuerzo a compresión de hormigón patrón y hormigón sumergido hasta los 60 días relación a/c=0.42*

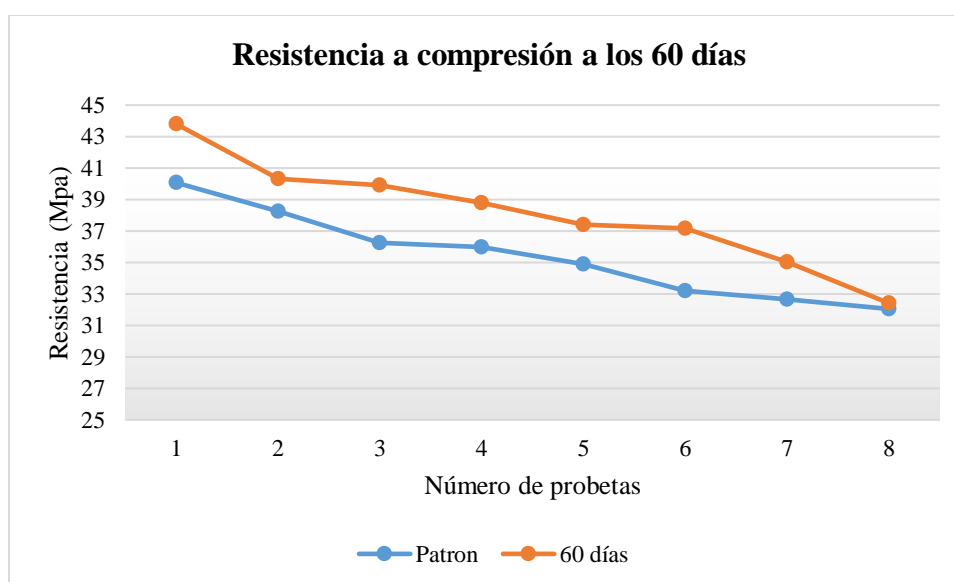
Nº	Identificación	F. de Vaciado	F. de Rotura	Peso (gr)	Edad (días)	Área (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Lectura (Mpa)	Carga (N)	Resist. (N/mm <sup>2</sup> )
1	SS1	10/04/2023	13/09/2023	3643,8	28	78,54	256,50	32,66	256500	32,66
2	SS2	26/04/2023	13/09/2023	3783,20	28	78,54	300,60	38,27	300600	38,27
3	SS3	26/04/2023	13/09/2023	3601,90	28	78,54	282,50	35,97	282500	35,97
4	SS4	10/04/2023	13/09/2023	3798,80	28	78,54	260,90	33,21	260900	33,21
5	SS5	20/04/2023	13/09/2023	3729,90	28	78,54	314,70	40,07	314700	40,07
6	SS6	10/04/2023	13/09/2023	3728,80	28	78,54	274,10	34,90	274100	34,90
7	SS7	26/04/2023	13/09/2023	3671,30	28	78,54	284,60	36,24	284600	36,24
8	SS8	10/04/2023	13/09/2023	3688,00	28	78,54	251,70	32,05	251700	32,05
9	S1	03/07/2023	01/09/2023	3719,70	60	78,54	305,10	38,81	305100	38,81
10	S2	03/07/2023	01/09/2023	3763,80	60	78,54	313,40	39,91	313400	39,91

11	S3	03/07/2023	01/09/2023	3758,70	60	78,54	344,10	43,80	344100	43,80
12	S4	03/07/2023	01/09/2023	3756,60	60	78,54	254,70	32,42	254700	32,42
13	S5	03/07/2023	01/09/2023	3750,20	60	78,54	316,70	40,33	316700	40,33
14	S6	03/07/2023	01/09/2023	3727,30	60	78,54	293,70	37,40	293700	37,40
15	S7	03/07/2023	01/09/2023	3736,30	60	78,54	275,40	35,04	275400	35,04
16	S8	03/07/2023	01/09/2023	3680,70	60	78,54	292,00	37,18	292000	37,18

Fuente: Elaboración propia

**Figura 14.**

Resistencia de esfuerzo a compresión de hormigón patrón y hormigón sumergido hasta los 60 días relación  $a/c=0.42$



Fuente: Elaboración propia.

Interpretación: en la figura 12 se muestra el ensayo de resistencia a la compresión de probetas de hormigón a los 60 días de edad sumergidas en aguas residuales y de probetas patrón, los cuales muestran que las probetas sumergidas alcanzan una mayor resistencia a las probetas patrón y todas las probetas tanto sumergidas como no sumergidas cumplen con la resistencia diseñada de 31.89 Mpa.

**Tabla 34.**

Resistencia de esfuerzo a compresión de hormigón patrón y hormigón sumergido hasta los 60 días relación  $a/c=0.47$

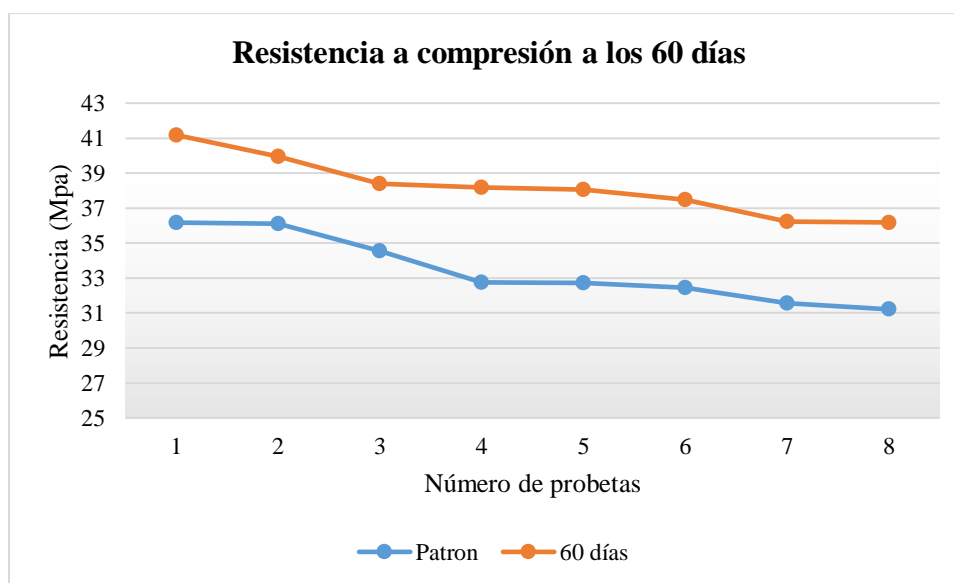
N°	Identificación	F. de Vaciado	F. de Rotura	Peso (gr)	Edad (días)	Área (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Lectura (Mpa)	Carga (N)	Resist. (N/mm <sup>2</sup> )
----	----------------	---------------	--------------	-----------	-------------	-------------------------	--------------	---------------	-----------	------------------------------

1	SS1	12/04/2023	14/09/2023	3754,8	28	78,54	245,20	31,21	245200	31,21
2	SS2	24/04/2023	14/09/2023	3739,50	28	78,54	284,00	36,17	284000	36,17
3	SS3	17/04/2023	14/09/2023	3649,20	28	78,54	257,20	32,75	257200	32,75
4	SS4	24/04/2023	14/09/2023	3733,00	28	78,54	283,70	36,11	283700	36,11
5	SS5	12/04/2023	14/09/2023	3777,90	28	78,54	247,90	31,55	247900	31,55
6	SS6	24/04/2023	14/09/2023	3686,90	28	78,54	271,30	34,54	271300	34,54
7	SS7	27/04/2023	14/09/2023	3685,50	28	78,54	255,00	32,46	255000	32,46
8	SS8	12/04/2023	14/09/2023	3703,70	28	78,54	257,00	32,72	257000	32,72
9	S1	03/07/2023	01/09/2023	3841,10	60	78,54	323,40	41,18	323400	41,18
10	S2	03/07/2023	01/09/2023	3745,20	60	78,54	284,10	36,18	284100	36,18
11	S3	03/07/2023	01/09/2023	3797,00	60	78,54	301,60	38,40	301600	38,40
12	S4	03/07/2023	01/09/2023	3741,90	60	78,54	284,60	36,23	284600	36,23
13	S5	03/07/2023	01/09/2023	3722,40	60	78,54	294,40	37,47	294400	37,47
14	S6	03/07/2023	01/09/2023	3659,90	60	78,54	300,00	38,19	300000	38,19
15	S7	03/07/2023	01/09/2023	3735,90	60	78,54	313,80	39,95	313800	39,95
16	S8	03/07/2023	01/09/2023	3705,80	60	78,54	298,90	38,05	298900	38,05

Fuente: Elaboración propia

**Figura 15.**

*Resistencia de esfuerzo a compresión de hormigón patrón y hormigón sumergido hasta los 60 días relación a/c=0.47*



Fuente: Elaboración propia



Interpretación: en la figura 13 se muestra el ensayo de resistencia a la compresión de probetas de hormigón a los 60 días de edad sumergidas en aguas residuales y de probetas patrón, los cuales muestran que las probetas sumergidas alcanzan una mayor resistencia a las probetas patrón y todas las probetas tanto sumergidas como no sumergidas cumplen con la resistencia diseñada de 25.99 Mpa.

**Tabla 35.**

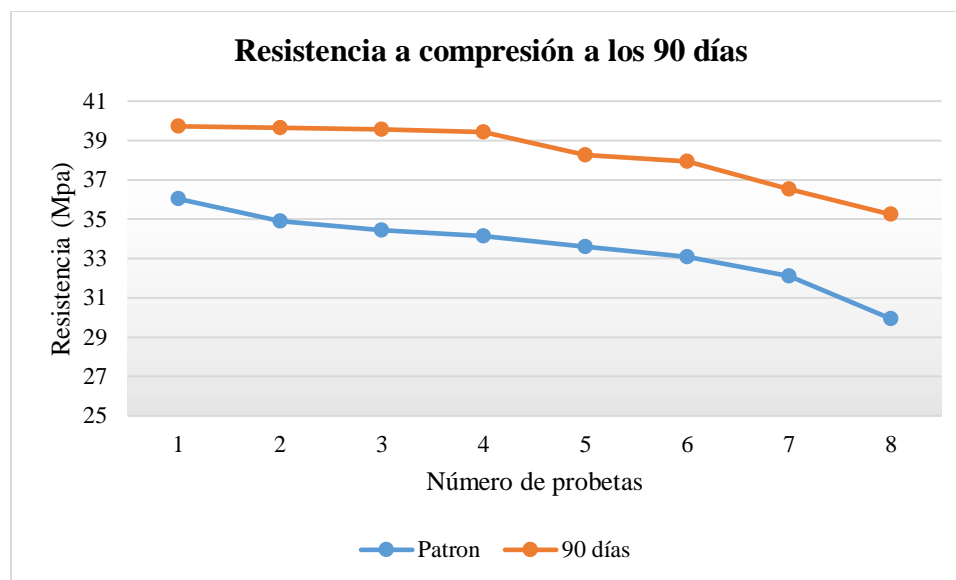
*Resistencia de esfuerzo a compresión de hormigón patrón y hormigón sumergido hasta los 90 días relación a/c=0.42*

Nº	Identificación	F. de Vaciado	F. de Rotura	Peso (gr)	Edad (días)	Área (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Lectura (Mpa)	Carga (N)	Resist. (N/mm <sup>2</sup> )
1	SS1	26/04/2023	03/10/2023	3744,2	28	78,54	274,20	34,90	274200	34,90
2	SS2	26/04/2023	03/10/2023	3594,30	28	78,54	259,80	33,07	259800	33,07
3	SS3	10/04/2023	03/10/2023	3659,00	28	78,54	235,20	29,94	235200	29,94
4	SS4	10/04/2023	03/10/2023	3701,20	28	78,54	270,70	34,45	270700	34,45
5	SS5	10/04/2023	03/10/2023	3680,70	28	78,54	252,30	32,12	252300	32,12
6	SS6	13/04/2023	03/10/2023	3735,10	28	78,54	283,00	36,03	283000	36,03
7	SS7	19/04/2023	03/10/2023	3739,90	28	78,54	268,20	34,15	268200	34,15
8	SS8	10/04/2023	03/10/2023	3665,80	28	78,54	263,90	33,59	263900	33,59
9	S1	03/07/2023	01/10/2023	3726,60	90	78,54	286,90	36,52	286900	36,52
10	S2	03/07/2023	01/10/2023	3767,90	90	78,54	276,80	35,24	276800	35,24
11	S3	03/07/2023	01/10/2023	3770,70	90	78,54	312,00	39,72	312000	39,72
12	S4	03/07/2023	01/10/2023	3763,30	90	78,54	311,30	39,64	311300	39,64
13	S5	03/07/2023	01/10/2023	3770,60	90	78,54	300,40	38,26	300400	38,26
14	S6	03/07/2023	01/10/2023	3757,50	90	78,54	310,65	39,56	310650	39,56
15	S7	03/07/2023	01/10/2023	3729,40	90	78,54	297,95	37,94	297950	37,94
16	S8	03/07/2023	01/10/2023	3718,20	90	78,54	309,60	39,43	309600	39,43

*Fuente:* Elaboración propia

**Figura 16.**

*Resistencia de esfuerzo a compresión de hormigón patrón y hormigón sumergido hasta los 90 días relación a/c=0.42*



*Fuente:* Elaboración propia

Interpretación: en la figura 14 se muestra el ensayo de resistencia a la compresión de probetas de hormigón a los 90 días de edad sumergidas en aguas residuales y de probetas patrón, los cuales muestran que las probetas sumergidas alcanzan una mayor resistencia a las probetas patrón y solo una probeta patrón de resistencia 29.94 Mpa no cumple con la resistencia de diseño de 31.89 Mpa. Siendo una variación mínima del 1% es un resultado irrelevante.

**Tabla 36.**

*Resistencia de esfuerzo a compresión de hormigón patrón y hormigón sumergido hasta los 90 días relación a/c=0.47*

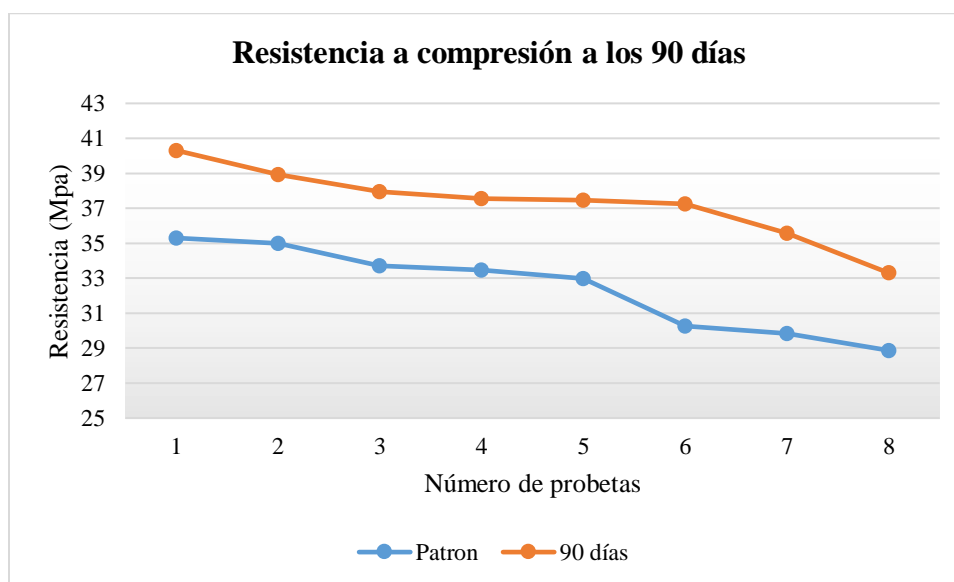
Nº	Identificación	F. de Vaciado	F. de Rotura	Peso (gr)	Edad (días)	Área (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Lectura (Mpa)	Carga (N)	Resist. (N/mm <sup>2</sup> )
1	SS1	24/04/2023	04/10/2023	3731,6	28	78,54	262,90	33,46	262900	33,46
2	SS2	17/04/2023	04/10/2023	3644,60	28	78,54	234,30	29,83	234300	29,83
3	SS3	12/04/2023	04/10/2023	3718,10	28	78,54	226,90	28,87	226900	28,87
4	SS4	17/04/2023	04/10/2023	3688,30	28	78,54	264,70	33,71	264700	33,71
5	SS5	12/04/2023	04/10/2023	3705,60	28	78,54	259,10	32,99	259100	32,99
6	SS6	17/04/2023	04/10/2023	3683,90	28	78,54	237,70	30,26	237700	30,26
7	SS7	27/04/2023	04/10/2023	3567,90	28	78,54	274,90	35,00	274900	35,00
8	SS8	24/04/2023	04/10/2023	3758,30	28	78,54	277,20	35,30	277200	35,30
9	S1	03/07/2023	01/10/2023	3732,60	90	78,54	305,90	38,94	305900	38,94
10	S2	03/07/2023	01/10/2023	3756,00	90	78,54	279,30	35,56	279300	35,56

11	S3	03/07/2023	01/10/2023	3846,40	90	78,54	316,60	40,31	316600	40,31
12	S4	03/07/2023	01/10/2023	3734,50	90	78,54	294,90	37,54	294900	37,54
13	S5	03/07/2023	01/10/2023	3750,60	90	78,54	261,50	33,30	261500	33,30
14	S6	03/07/2023	01/10/2023	3752,50	90	78,54	292,60	37,26	292600	37,26
15	S7	03/07/2023	01/10/2023	3730,00	90	78,54	294,05	37,45	294050	37,45
16	S8	03/07/2023	01/10/2023	3728,50	90	78,54	297,95	37,94	297950	37,94

Fuente: Elaboración propia

### Figura 17.

Resistencia de esfuerzo a compresión de hormigón patrón y hormigón sumergido hasta los 90 días relación a/c=0.47



Fuente: Elaboración propia

Interpretación: en la figura 15 se muestra el ensayo de resistencia a la compresión de probetas de hormigón a los 90 días de edad sumergidas en aguas residuales y de probetas patrón, los cuales muestran que las probetas sumergidas alcanzan una mayor resistencia a las probetas patrón y todas las probetas tanto sumergidas como no sumergidas cumplen con la resistencia diseñada de 25.99 Mpa.

### Tabla 37.

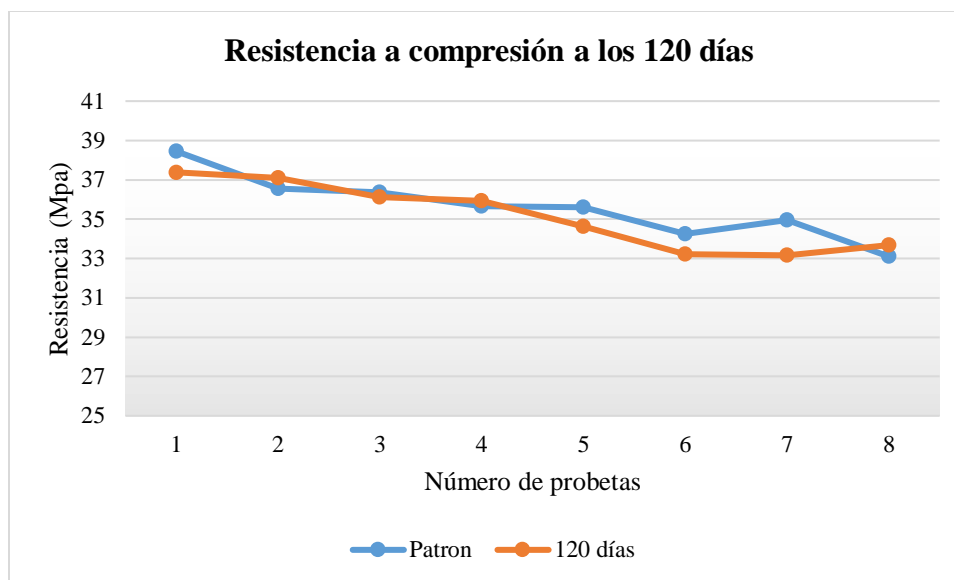
Resistencia de esfuerzo a compresión de hormigón patrón y hormigón sumergido hasta los 120 días relación a/c=0.42

Nº	Identificación	F. de Vaciado	F. de Rotura	Peso (gr)	Edad (días)	Area (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Lectura (Mpa)	Carga (N)	Resist. (N/mm <sup>2</sup> )
1	SS1	26/04/2023	04/10/2023	3726,70	28	78,54	302,00	38,45	302000	38,45
2	SS2	19/04/2023	04/10/2023	3728,90	28	78,54	287,00	36,54	287000	36,54
3	SS3	26/04/2023	04/10/2023	3718,20	28	78,54	285,60	36,36	285600	36,36
4	SS4	20/04/2023	04/10/2023	3575,80	28	78,54	280,00	35,65	280000	35,65
5	SS5	13/04/2023	04/10/2023	3654,40	28	78,54	279,60	35,60	279600	35,60
6	SS6	19/04/2023	04/10/2023	3747,20	28	78,54	268,90	34,24	268900	34,24
7	SS7	19/04/2023	04/10/2023	3719,60	28	78,54	274,50	34,95	274500	34,95
8	SS8	10/04/2023	04/10/2023	3719,5	28	78,54	260,00	33,10	260000	33,10
9	S1	03/07/2023	31/10/2023	3746,60	120	78,54	293,60	37,38	293600	37,38
10	S2	03/07/2023	31/10/2023	3711,00	120	78,54	291,40	37,09	291400	37,09
11	S3	03/07/2023	31/10/2023	3750,70	120	78,54	283,70	36,12	283700	36,12
12	S4	03/07/2023	31/10/2023	3763,30	120	78,54	282,30	35,94	282300	35,94
13	S5	03/07/2023	31/10/2023	3731,20	120	78,54	272,10	34,64	272100	34,64
14	S6	03/07/2023	31/10/2023	3767,80	120	78,54	260,90	33,22	260900,00	33,22
15	S7	03/07/2023	31/10/2023	3698,60	120	78,54	260,40	33,16	260400,00	33,16
16	S8	03/07/2023	31/10/2023	3751,20	120	78,54	264,50	33,67	264500,00	33,67

*Fuente:* Elaboración propia

### **Figura 18.**

*Resistencia de esfuerzo a compresión de hormigón patrón y hormigón sumergido hasta los 120 días relación a/c=0.42*



*Fuente:* Elaboración propia

Interpretación: en la figura 16 se muestran los resultados del ensayo de resistencia a la compresión de probetas de hormigón a los 120 días de edad sumergidas en aguas residuales y de probetas patrón, los cuales muestran que las probetas sumergidas presentan una ligera disminución en su resistencia a las probetas patrón y todas las probetas tanto sumergidas como no sumergidas cumplen con la resistencia diseñada de 31.89 Mpa.

**Tabla 38.**

*Resistencia de esfuerzo a compresión de hormigón patrón y hormigón sumergido hasta los 120 días relación a/c=0.47*

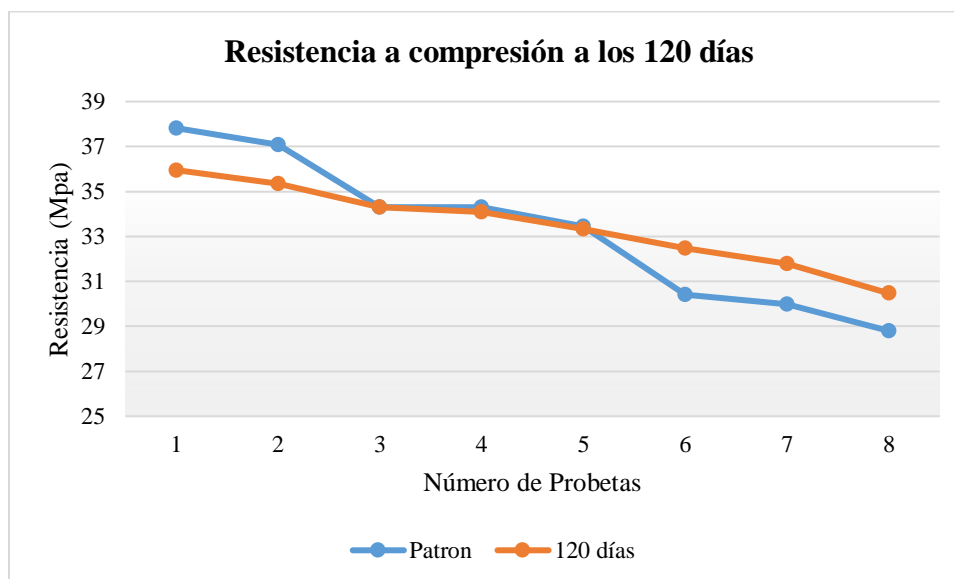
Nº	Identificación	F. de Vaciado	F. de Rotura	Peso (gr)	Edad (días)	Area (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Lectura (Mpa)	Carga (N)	Resist. (N/mm <sup>2</sup> )
1	SS1	24/04/2023	31/10/2023	3671,00	28	78,54	297,00	37,82	297000	37,82
2	SS2	24/04/2023	31/10/2023	3679,90	28	78,54	291,20	37,07	29120	37,07
3	SS3	12/04/2023	31/10/2023	3719,20	28	78,54	269,50	34,31	269500	34,31
4	SS4	12/04/2023	31/10/2023	3673	28	78,54	269,50	34,31	269500	34,31
5	SS5	24/04/2023	31/10/2023	3700,90	28	78,54	262,70	33,45	262700	33,45
6	ss11	17/04/2023	31/10/2023	3757,20	28	78,54	239,00	30,42	23900	30,42
7	ss3	17/04/2023	31/10/2023	3565,80	28	78,54	235,50	29,98	235500	29,98
8	ss2	17/04/2023	31/10/2023	3614,20	28	78,54	226,40	28,80	226400	28,80
9	S3	03/07/2023	31/10/2023	3750,60	120	78,54	282,60	35,95	282600	35,95
10	S1	03/07/2023	31/10/2023	3799,60	120	78,54	277,70	35,35	277700	35,35

11	S2	03/07/2023	31/10/2023	3722,50	120	78,54	269,50	34,31	269500	34,31
12	S4	03/07/2023	31/10/2023	3805,30	120	78,54	267,80	34,09	267800	34,09
13	S8	03/07/2023	31/10/2023	3731,70	120	78,54	261,80	33,34	261800	33,34
14	S7	03/07/2023	31/10/2023	3753,90	120	78,54	255,00	32,47	255000	32,47
15	S6	03/07/2023	31/10/2023	3767,20	120	78,54	249,70	31,79	249700,00	31,79
16	S5	03/07/2023	31/10/2023	3768,80	120	78,54	239,30	30,47	239300,00	30,47

*Fuente:* Elaboración propia

### Figura 19.

*Resistencia de esfuerzo a compresión de hormigón patrón y hormigón sumergido hasta los 120 días relación a/c=0.47*



*Fuente:* Elaboración propia

Interpretación: en la figura 17 se muestran los resultados del ensayo de resistencia a la compresión de probetas de hormigón a los 120 días de edad sumergidas en aguas residuales y de probetas patrón, los cuales muestran que las probetas sumergidas disminuyen su resistencia a las probetas patrón y todas las probetas tanto sumergidas como no sumergidas cumplen con la resistencia diseñada de 25.99 Mpa.

### Tabla 39.

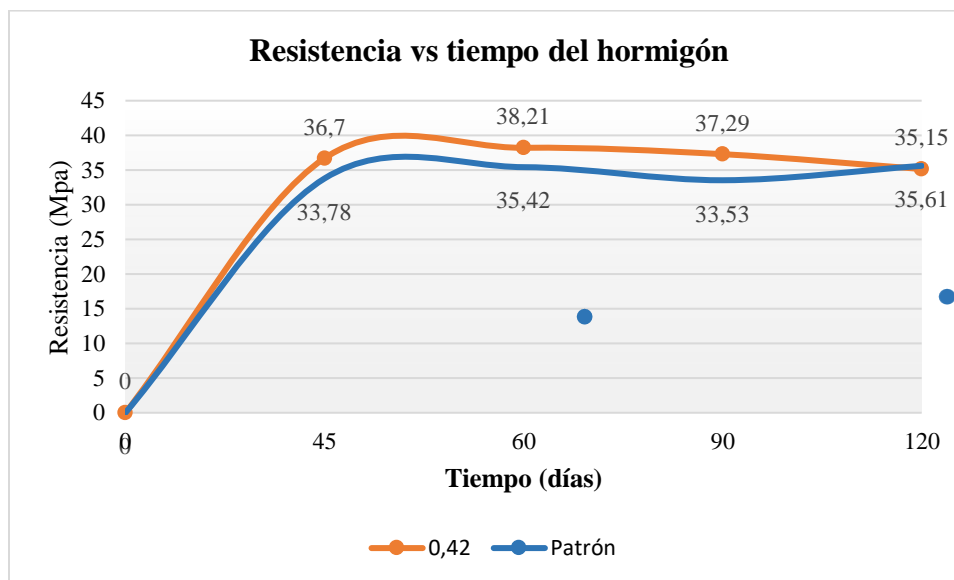
*Resistencia promedio de esfuerzo a compresión en 45, 60, 90 y 120 días relación a/c: 0.42 y 0.47*

Días	Sumergida 0,42	Patrón 0,42	Sumergida 0,47	Patrón 0,47
0	0	0	0	0
45	36,7	33,78	39,12	31,15
60	38,21	35,42	38,11	33,44
90	37,29	33,53	38,29	32,43
120	35,15	35,61	33,47	33,27

Fuente: Elaboración propia

**Figura 20.**

Resistencia promedio de esfuerzo a compresión en 45, 60, 90 y 120 días relación  $a/c=0.42$

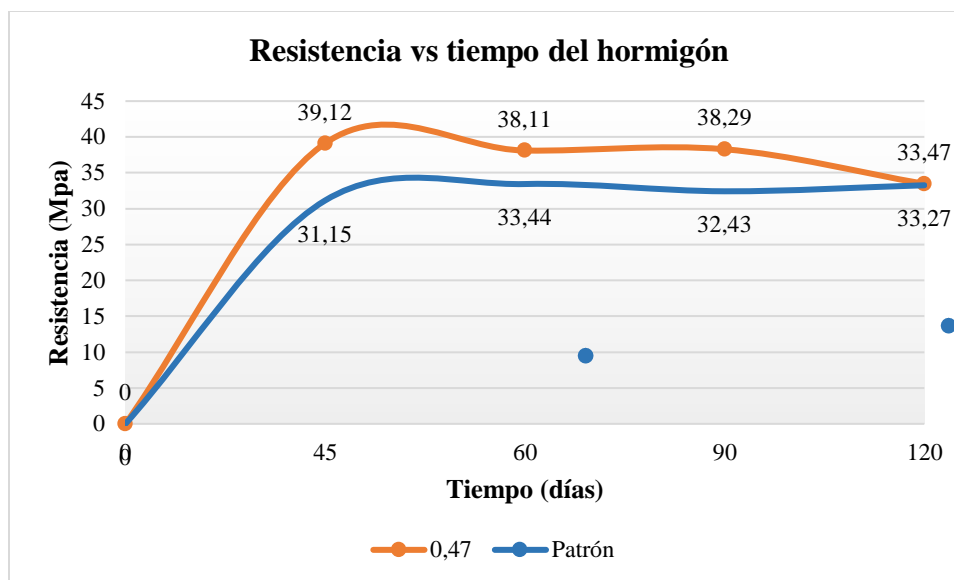


Fuente: Elaboración propia

Interpretación: en la figura 18 se muestran los resultados promedio del ensayo de resistencia a la compresión de probetas de hormigón a 45, 60, 90 y 120 días de edad de una relación  $a/c$  de 0.42 sumergidas en aguas residuales y de probetas patrón, los cuales muestran que las probetas sumergidas tienen una mayor resistencia a las probetas patrón.

**Figura 21.**

Resistencia promedio de esfuerzo a compresión en 45, 60, 90 y 120 días relación  $a/c=0.47$



*Fuente:* Elaboración propia

Interpretación: en la figura 19 se muestran los resultados promedio del ensayo de resistencia a la compresión de probetas de hormigón a 45, 60, 90 y 120 días de edad de una relación a/c de 0.47 sumergidas en aguas residuales y de probetas patrón, los cuales muestran que las probetas sumergidas tienen una mayor resistencia a las probetas patrón.

**Tabla 40.**

*Promedio de esfuerzo de resistencia de probeta patrón y probetas sumergidas a 45, 60, 90 y 120 día relación a/c=0.42*

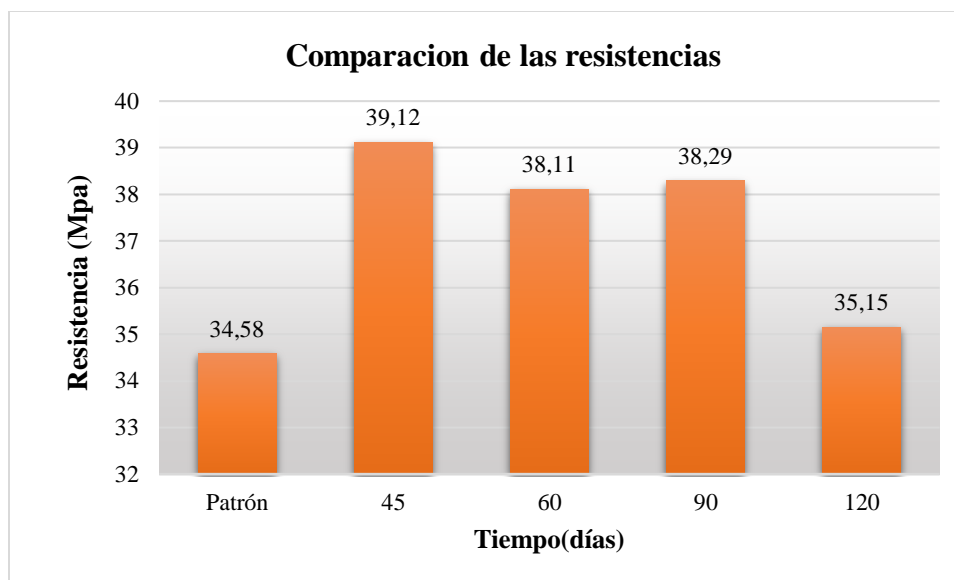
Días	Resistencia (Mpa)
Patrón	34,58
45	39,12
60	38,11
90	38,29
120	35,15

*Fuente:* Elaboración propia

**Figura 22.**

*Promedio de esfuerzo de resistencia de probeta patrón y probetas sumergidas a 45, 60, 90 y 120 día relación a/c=0.42*





*Fuente:* Elaboración propia

Interpretación: en la figura 20 se muestran los resultados promedio del ensayo de resistencia a la compresión de probetas de hormigón a 45, 60, 90 y 120 días de edad de una relación a/c de 0.42 sumergidas en aguas residuales y de probetas patrón, los cuales muestran que las probetas sumergidas van disminuyendo de resistencia a la compresión y presentando una ligera anomalía en las probetas de 90 días, podemos observar que a 120 días la resistencia es aún más baja con un promedio de 35.15 Mpa.

**Tabla 41.**

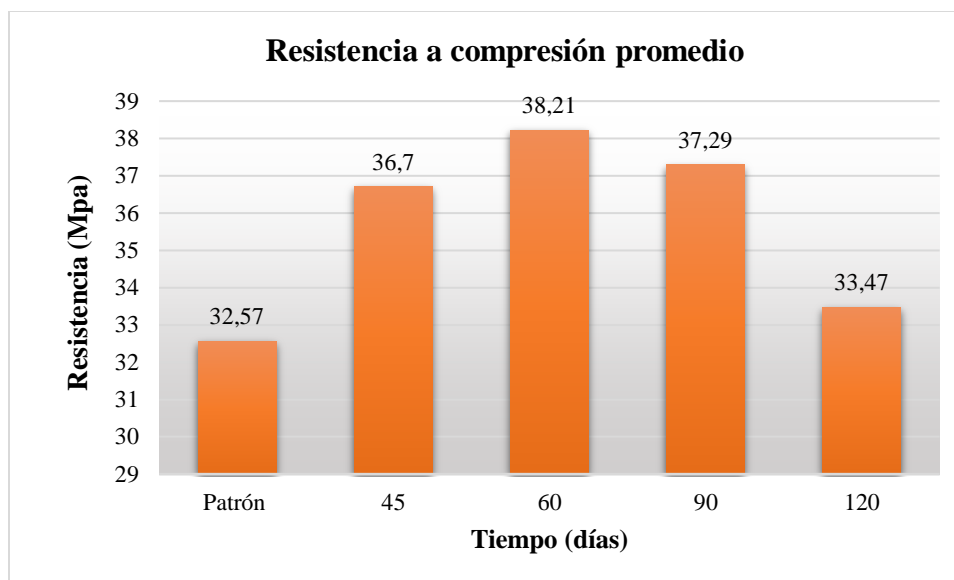
*Promedio de esfuerzo de resistencia de probeta patrón y probetas sumergidas a 45, 60, 90 y 120 día relación a/c=0.47*

Días	Resistencia (Mpa)
Patrón	32,57
45	36,7
60	38,21
90	37,29
120	33,47

*Fuente:* Elaboración propia

**Figura 23.**

*Promedio de esfuerzo de resistencia de probeta patrón y probetas sumergidas a 45, 60, 90 y 120 día relación a/c=0.47*



*Fuente:* Elaboración propia

Interpretación: en la figura 20 se muestran los resultados promedio del ensayo de resistencia a la compresión de probetas de hormigón a 45, 60, 90 y 120 días de edad de una relación a/c de 0.47 sumergidas en aguas residuales y de probetas patrón, los cuales muestran que las probetas a partir de los 60 días de sumergidas van disminuyendo de resistencia a la compresión, podemos observar que a 120 días la resistencia es aún más baja con un promedio de 33.47 Mpa.

### 3.3.1.1 Validación de datos

Para realizar un análisis estadístico de los resultados de las muestras de concreto se prosiguió la norma (ACI 214, 211)

#### **Tabla 42.**

*Distribución normal del hormigón patrón relación a/c=0.42*

N°	Resistencia (Mpa)	Distribución normal
1	29,94	0,0175892
2	32,04	0,0918744
3	32,05	0,0923868
4	32,12	0,0959956
5	32,28	0,1043613
6	32,66	0,1244417
7	33,04	0,1437669
8	33,07	0,145219
9	33,08	0,1456999
10	33,10	0,1466569

11	33,21	0,1517957
12	33,59	0,1675232
13	34,01	0,1800609
14	34,15	0,1828686
15	34,24	0,1842786
16	34,39	0,1859183
17	34,45	0,1863211
18	34,67	0,1865428
19	34,90	0,1846702
20	34,90	0,1846702
21	34,95	0,1839833
22	35,60	0,1667645
23	35,65	0,1648756
24	35,97	0,1513091
25	36,03	0,1485212
26	36,24	0,1383009
27	36,36	0,1322051
28	36,54	0,1228331
29	36,69	0,1149082
30	38,27	0,0421963
31	38,45	0,0363616
32	40,07	0,0069231

*Fuente:* Elaboración propia

De acuerdo a la especificado en la **tabla 15** norma ACI 214-11 se considera que se llegó:

**Tabla 43.**

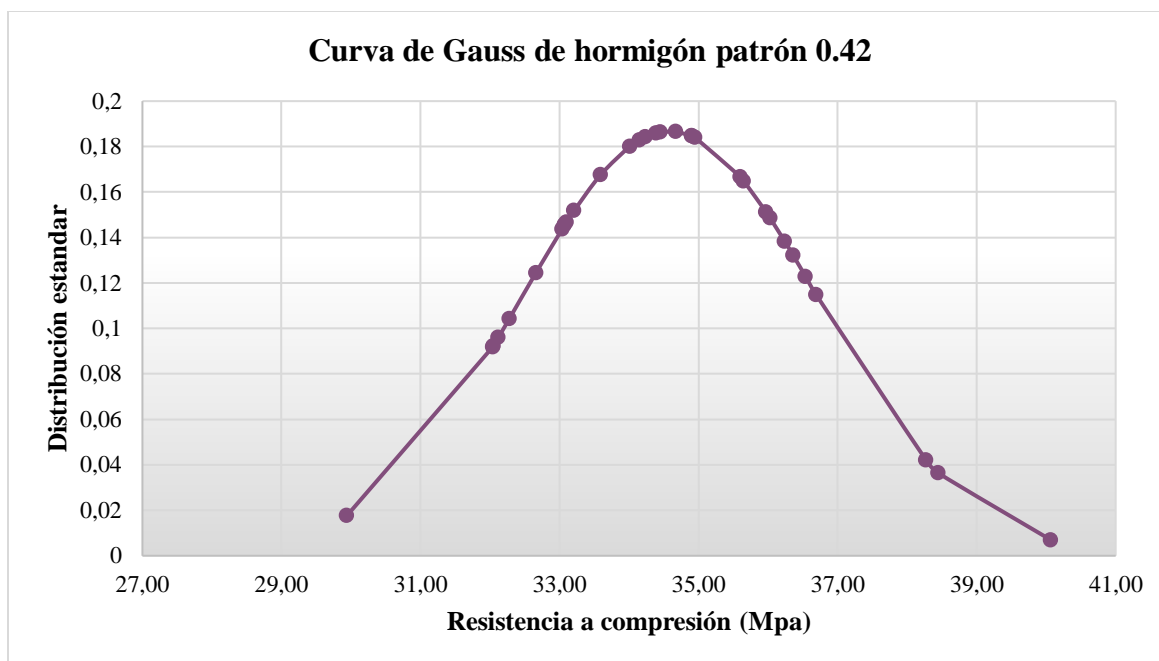
*Resultados estadísticos de probetas relación a/c=0.42*

	<b>Datos</b>
<b>Promedio (Mpa)</b>	34,6
<b>Desviación estándar (Mpa)</b>	2,1
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	6,2

*Fuente:* Elaboración propia

**Figura 24.**

*Campana de Gauss del hormigón patrón relación a/c=0.42*



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 44.**

*Distribución normal del hormigón patrón relación a/c=0.47*

Nº	Resistencia (Mpa)	Distribución normal
1	26,74	0,016400
2	27,86	0,034726
3	28,70	0,054900
4	28,80	0,057632
5	28,87	0,059579
6	29,83	0,088253
7	29,94	0,091629
8	29,98	0,092853
9	30,26	0,101313
10	30,42	0,106014
11	31,21	0,126445
12	31,55	0,133119
13	32,46	0,142113
14	32,68	0,142114
15	32,72	0,142020
16	32,75	0,141931
17	32,99	0,140640
18	33,45	0,135398
19	33,46	0,135246

20	33,69	0,131332
21	33,71	0,130955
22	34,31	0,117340
23	34,31	0,117340
24	34,47	0,113077
25	34,54	0,111147
26	35,00	0,097735
27	35,08	0,095311
28	35,30	0,088580
29	36,11	0,064149
30	36,17	0,062426
31	37,07	0,039282
32	37,82	0,024683

*Fuente:* Elaboración propia

De acuerdo a la especificado en la **tabla 15** norma ACI 214-11 se considera que se llegó:

**Tabla 45.**

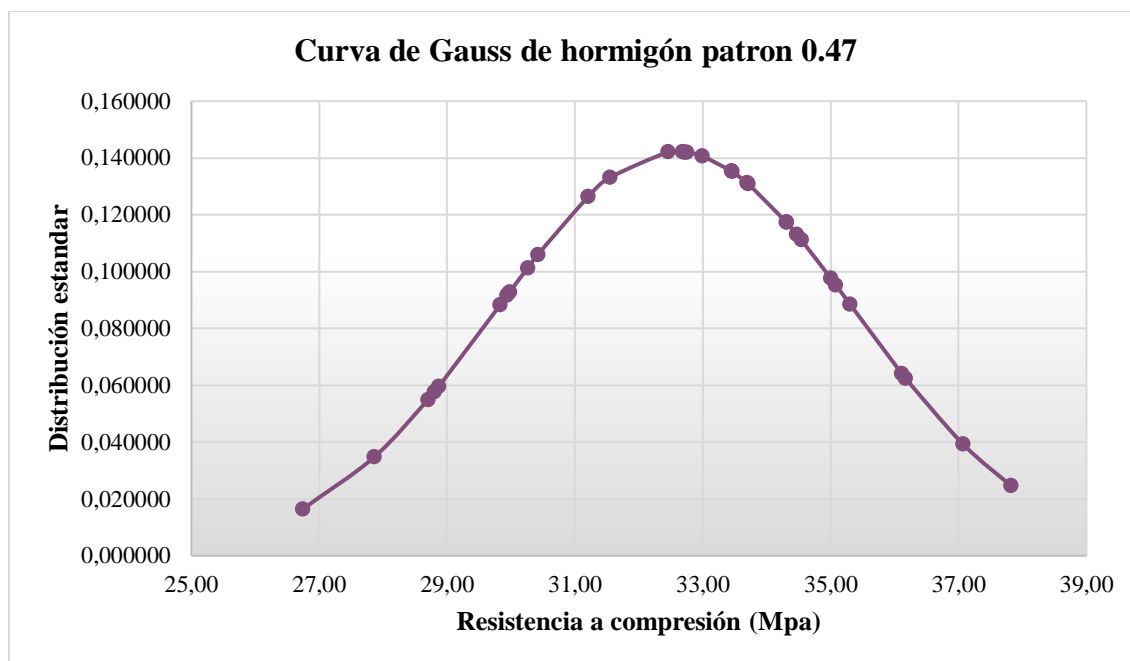
*Análisis estadísticos*

	<b>Datos</b>
<b>Promedio (Mpa)</b>	32,6
<b>Desviación estándar (Mpa)</b>	2,8
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	8,6

*Fuente:* Elaboración propia

**Figura 25.**

*Campana de Gauss del hormigón patrón relación a/c=0.47*



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 46.**

*Distribución normal del hormigón sumergido relación a/c=0.42*

Nº	Resistencia (Mpa)	Distribución normal
1	32,42	0,0254452
2	33,16	0,0398187
3	33,22	0,0411683
4	33,53	0,0485586
5	33,67	0,0521137
6	34,64	0,0795352
7	35,04	0,0915198
8	35,24	0,0974452
9	35,94	0,1167221
10	36,12	0,1210724
11	36,52	0,1294531
12	37,09	0,1376074
13	37,18	0,1384302
14	37,38	0,1397727
15	37,40	0,1398695
16	37,94	0,1398607
17	37,99	0,1396043
18	38,26	0,1374889

19	38,55	0,1338972
20	38,79	0,1299666
21	38,81	0,1296025
22	38,99	0,1260894
23	39,43	0,1159197
24	39,56	0,1125566
25	39,64	0,1104206
26	39,72	0,1082392
27	39,91	0,1029016
28	40,33	0,0905677
29	41,21	0,0645631
30	41,65	0,0525832
31	42,28	0,0375893
32	43,80	0,0136558

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 47.**

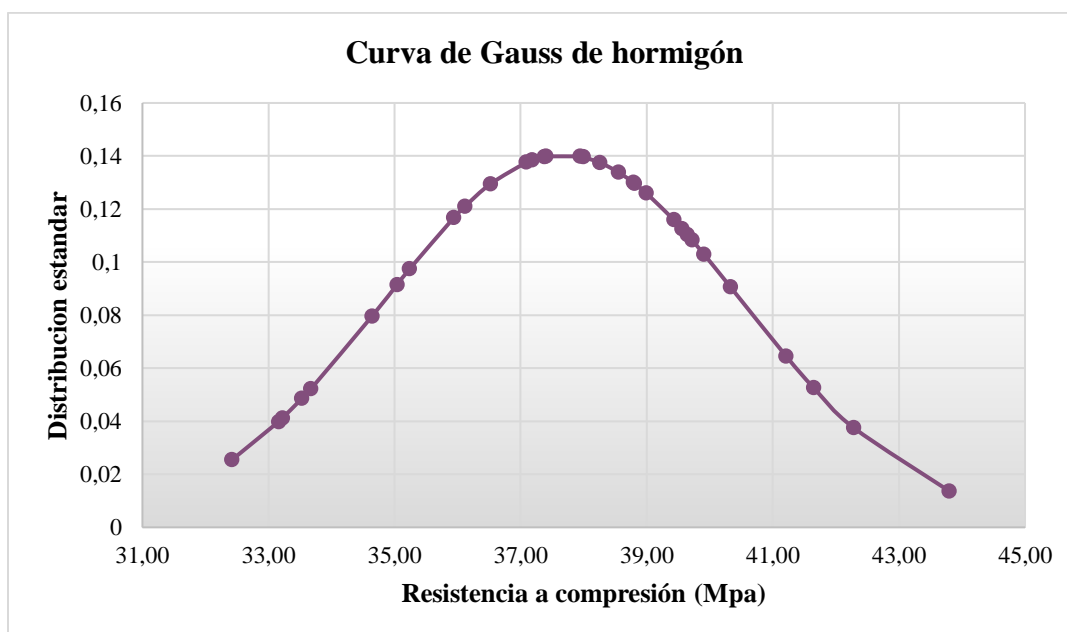
*Análisis estadísticos*

<b>Datos</b>	
<b>Promedio (Mpa)</b>	37.67
<b>Desviación estándar (Mpa)</b>	2,8
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	7.5

Fuente: Elaboración propia

**Figura 26.**

*Campana de Gauss del hormigón sumergido relación a/c=0.42*



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 48.**

*Distribución normal del hormigón sumergido relación a/c=0.47*

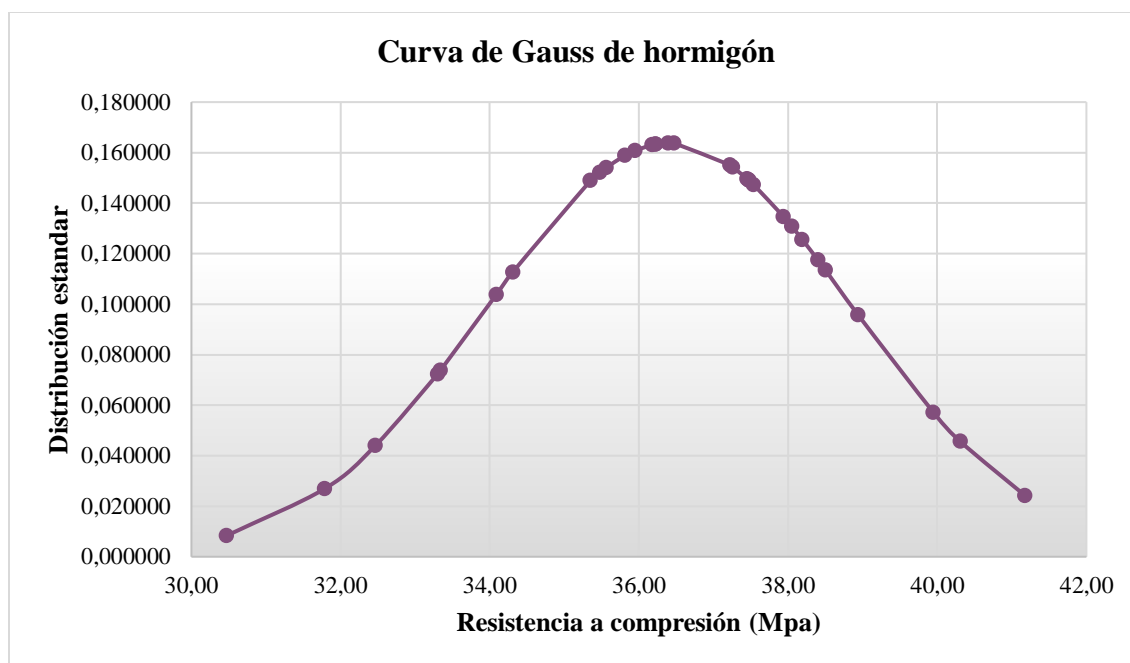
N°	Resistencia (Mpa)	Distribución normal
1	30,47	0,008324
2	31,79	0,026985
3	32,47	0,044105
4	33,30	0,072282
5	33,34	0,073807
6	34,09	0,103843
7	34,31	0,112736
8	35,35	0,148861
9	35,48	0,152161
10	35,56	0,154009
11	35,81	0,158823
12	35,95	0,160843
13	36,18	0,163043
14	36,22	0,163279
15	36,23	0,163332
16	36,39	0,163797
17	36,47	0,163764
18	37,22	0,155104
19	37,26	0,154244
20	37,45	0,149670
21	37,47	0,149144
22	37,48	0,148878
23	37,54	0,147238
24	37,94	0,134655
25	38,05	0,130768
26	38,19	0,125611
27	38,40	0,117524
28	38,50	0,113561
29	38,94	0,095715
30	39,95	0,057139
31	40,31	0,045606
32	41,18	0,024167

Fuente: Elaboración propia



**Tabla 49.***Análisis estadísticos*

<b>Datos</b>	
<b>Promedio (Mpa)</b>	36.42
<b>Desviación estándar (Mpa)</b>	2,4
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	6.7

*Fuente:* Elaboración propia**Figura 27.***Campana de Gauss del hormigón sumergido relación a/c=0.47**Fuente:* Elaboración propia

### 3.3.2 Ensayo de permeabilidad

El ensayo de permeabilidad de las probetas cilíndricas, se efectuó según la norma UNE 83309-1990 para determinar la profundidad de penetración de agua bajo presión.

**Tabla 50.***Resultados ensayo permeabilidad*

Nº	Identificación	Forma	Peso seco (gr)	Peso húmedo (gr)	Peso del agua	Penetración max (mm.)	Penetración media (mm.)
1	SS1-0,47	cilíndrico	3607,5	3707,1	99,6	50,0	30,0
2	SS2-0,47	cilíndrico	3581,7	3691,8	110,1	50,0	20,0

3	SS3-0,47	cilíndrico	3605,9	3716,5	110,6	55,0	20,0
4	SS1-0,42	cilíndrico	3645,5	3745,8	100,3	35,0	10,0
5	SS2-0,42	cilíndrico	3633,6	3739,1	105,5	30,0	10,0
6	SS3-0,42	cilíndrico	3629,2	3734,9	105,7	35,0	10,0

*Fuente:* Elaboración propia

Se realizó el ensayo de permeabilidad en el cual se determinó la profundidad de penetración la cual tiene como valor máximo y valor medio mostrados en **tabla 49**

### **Figura 28.**

*Profundidad de penetración*



*Fuente:* Elaboración propia

### **Tabla 51.**

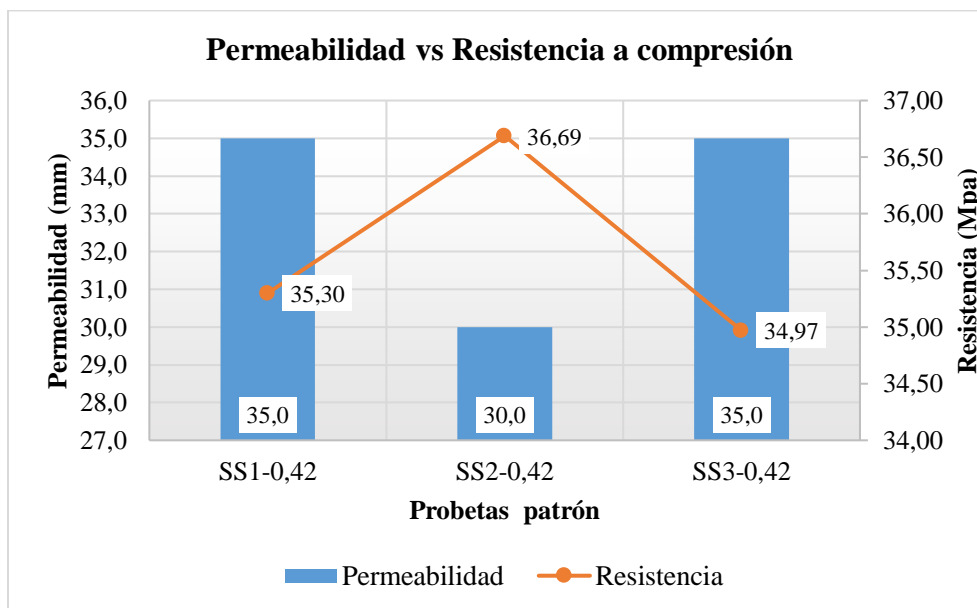
*Promedio de profundidad de penetración*

<b>Promedio de penetración máximo (mm.)</b>	<b>Promedio de penetración media (mm.)</b>
42,5	16,7

*Fuente:* Elaboración propia

**Figura 29.**

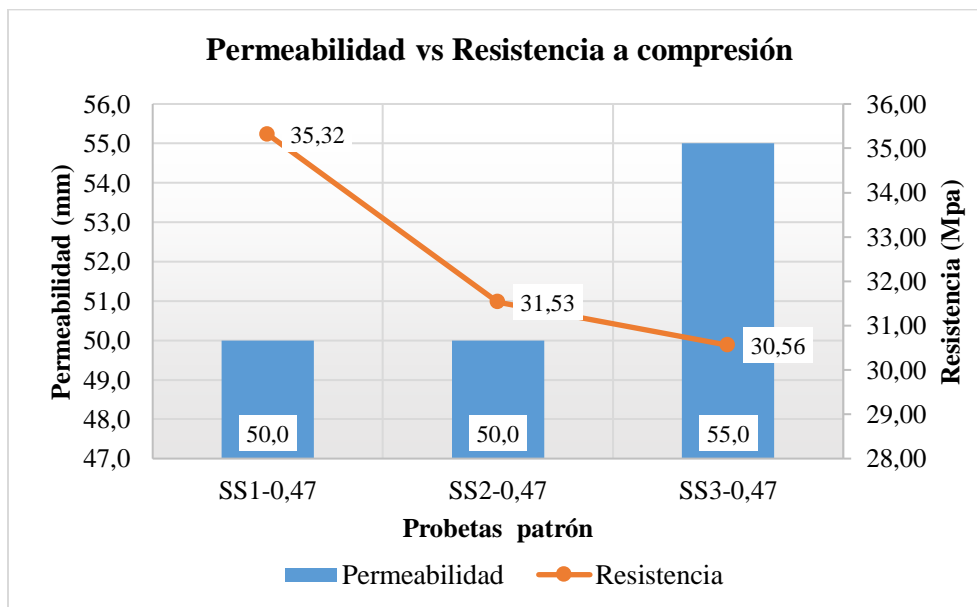
*Permeabilidad y resistencia relación a/c=0.42*



*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 30.**

*Permeabilidad y resistencia relación a/c=0.47*



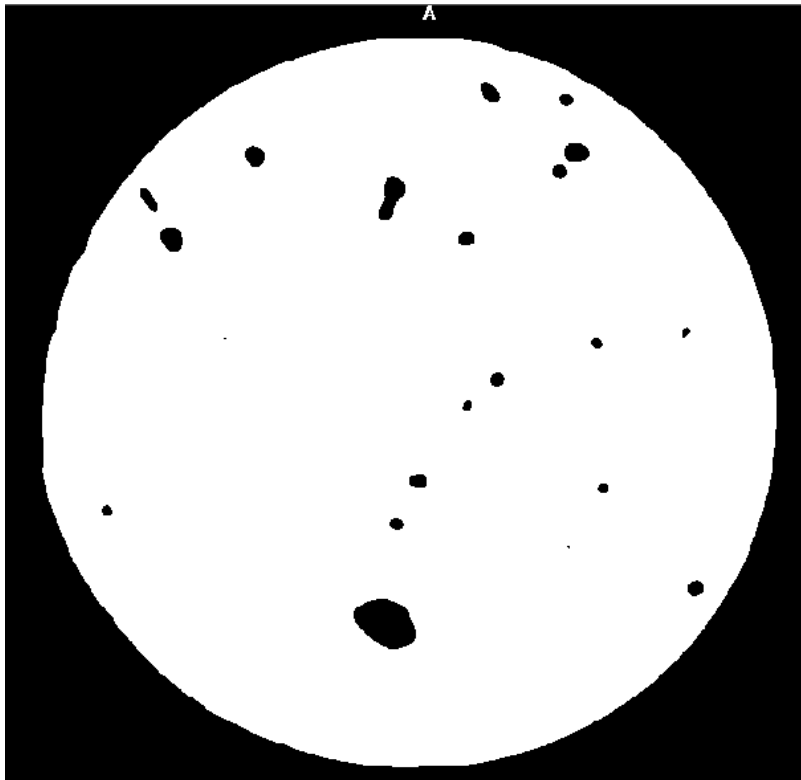
### 3.3.3 Análisis de imágenes tomográficas

#### 3.3.3.1 Determinación porcentaje de vacíos

El color de cada partícula en la imagen está directamente relacionado con la densidad del material, los de menor densidad son los más oscuros (vacíos) y más claros mayor densidad (agregados). Para obtener el área se utilizaron algoritmos computacionales de procesamiento de imágenes, en base a un valor en escalas grises se transforma la imagen en una imagen binaria con el fin de poder diferenciar los sólidos con los vacíos.

**Figura 31.**

*Imagen en composición binaria*



*Fuente:* Elaboración propia

Para determinar el porcentaje de vacíos se obtuvo el área total de vacíos con ayuda de programas y luego se aplicó ecuaciones correspondientes.

$$Pi = \frac{A_{vi}}{A_{Ti}} \quad (15)$$

$$Pi = \frac{0,0001317}{0,0077951} * 100\% = 1,69\% \quad (16)$$

$$PTotal = \sum_{i=1}^N \frac{Pi}{N} \quad (17)$$

Donde:

Pi= porcentaje de vacíos en cada imagen

Avi= área de vacíos en cada imagen

ATi= área total de la sección del espécimen

PTotal= contenido total de vacíos

N= número de imágenes

M= cantidad de vacíos

### 3.3.3.1.1 Procedimiento

**Tabla 52.**

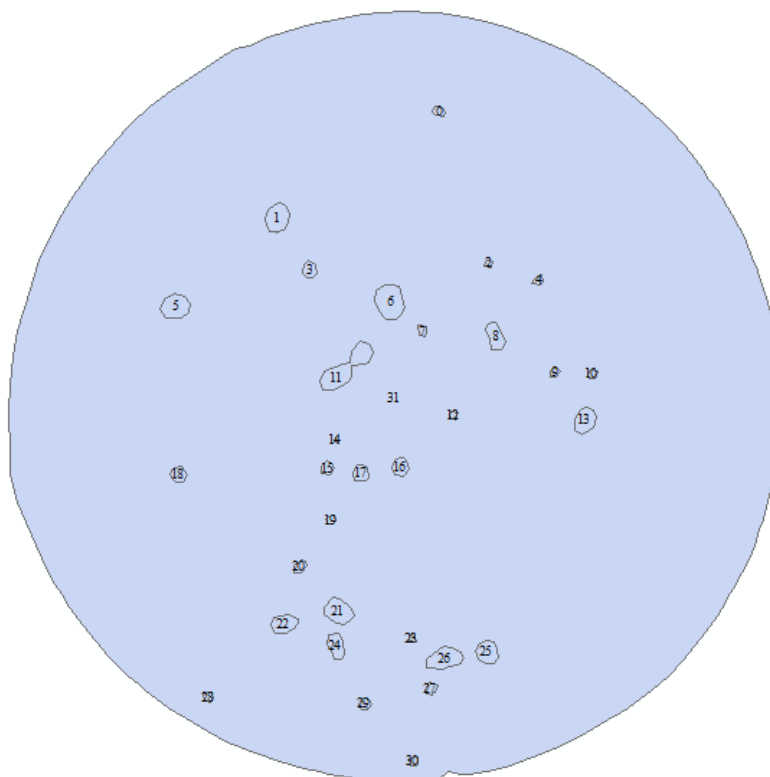
*Porcentaje de vacíos probeta sumergida SI-0.42*

N°	Avi	ATi	Pi	Promedio del contenido total de vacíos	M
1	0,000132	0,00780	1,69%		31
2	0,000138	0,00784	1,76%		27
3	0,000194	0,00783	2,48%		23
4	0,000109	0,00784	1,39%		24
5	0,000098	0,00783	1,25%	1,15%	26
6	0,000041	0,00782	0,53%		19
7	0,000063	0,00785	0,80%		18
8	0,000036	0,00784	0,46%		16
9	0,000053	0,00784	0,67%		9
10	0,000036	0,00783	0,46%		14

*Fuente:* Elaboración propia

### **Figura 32.**

*Imagen 1 de probeta sumergida SI-0.42*



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 53.**

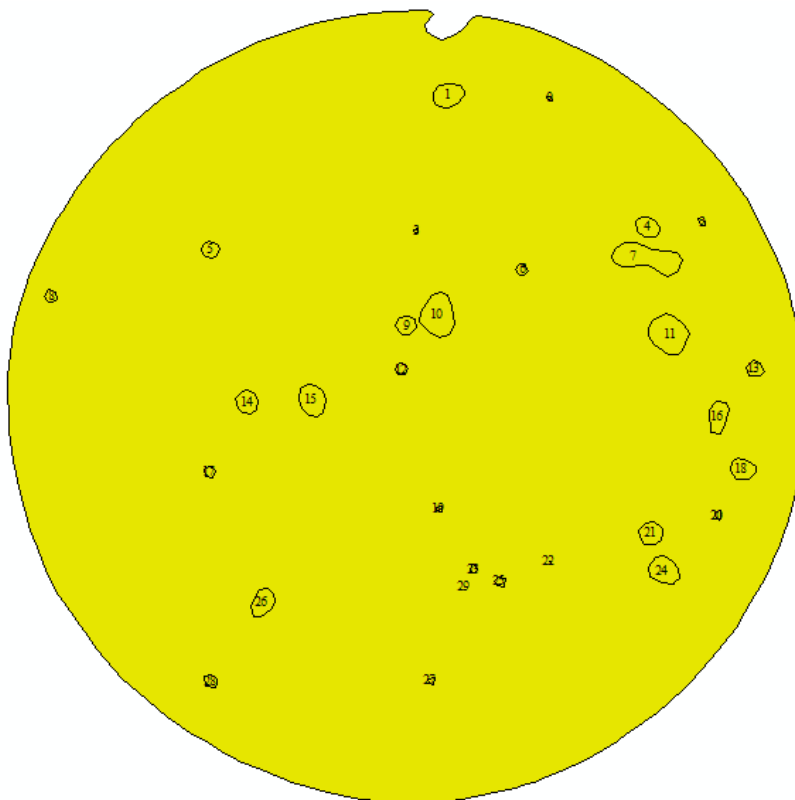
*Porcentaje de vacíos probeta sumergida S1-0.47*

N°	Avi	ATi	Pi	Promedio del contenido total de vacíos	M
1	0,000152	0,00781	1,95%	1,38%	29
2	0,000154	0,00782	1,97%		43
3	0,000123	0,00782	1,57%		29
4	0,000109	0,00783	1,40%		19
5	0,000083	0,00783	1,06%		16
6	0,000098	0,00784	1,25%		21
7	0,000085	0,00784	1,08%		22
8	0,000059	0,00783	0,76%		22

Fuente: Elaboración propia

**Figura 33.**

*Imagen 1 de probeta sumergida S1-0.47*



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 54.**

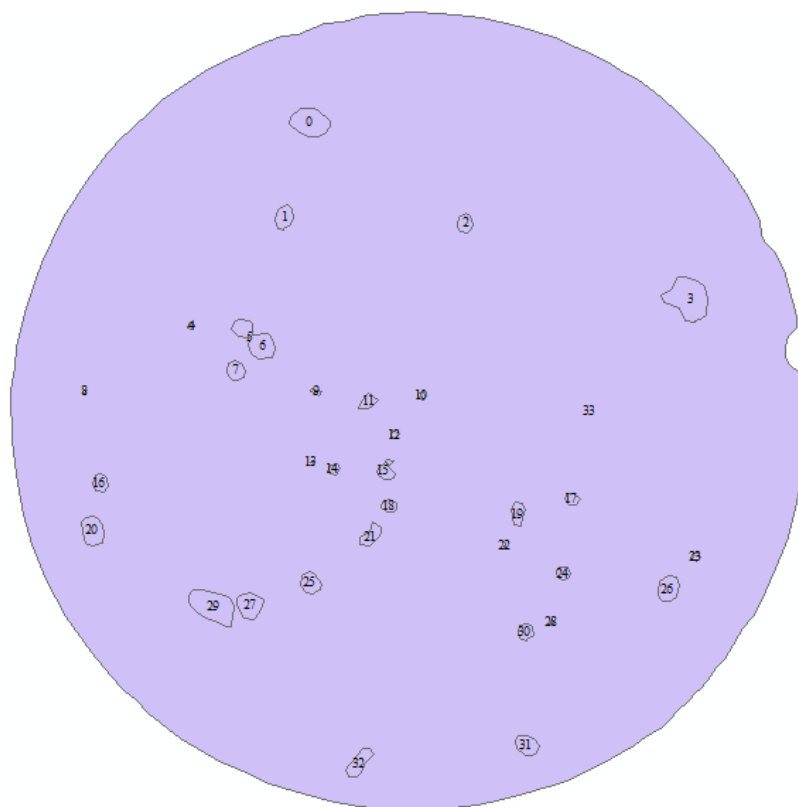
Porcentaje de vacíos probeta patrón SS1-0.42

N°	Avi	Ati	Pi	Promedio del contenido total de vacíos	M
1	0,000150	0,00783	1,91%	1,91%	33
2	0,000121	0,00785	1,55%		42
3	0,000200	0,00785	2,54%		50
4	0,000088	0,00784	1,13%		21
5	0,000201	0,00784	2,56%		51
6	0,000153	0,00785	1,95%		34
7	0,000183	0,00784	2,34%		46
8	0,000102	0,00784	1,30%		30

Fuente: Elaboración propia

**Figura 34.**

Porcentaje de vacíos probeta patrón imagen 1 SS1-0.42



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 55.**

Porcentaje de vacíos probeta patrón SS1-0.47

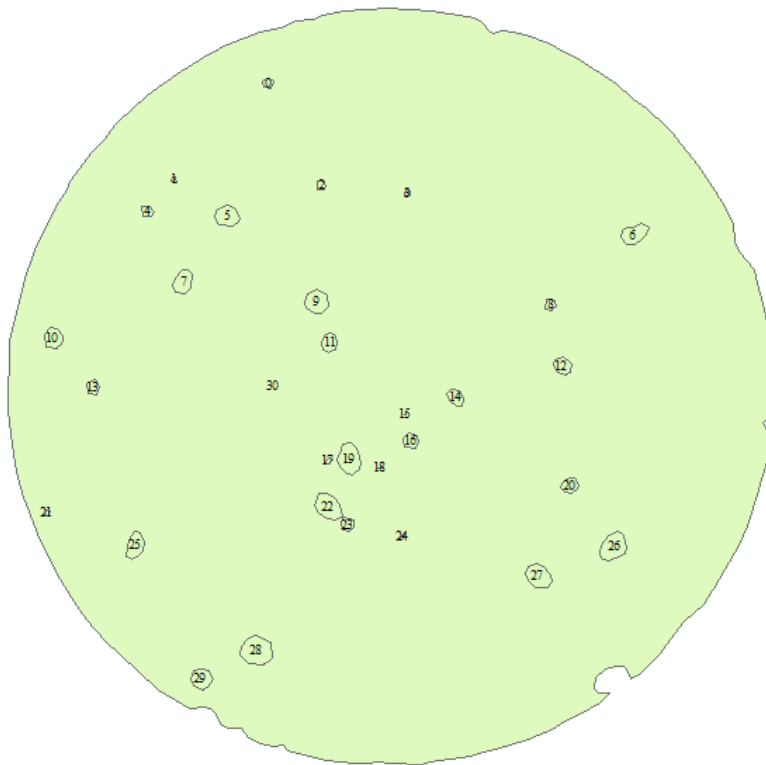
N°	Avi	Ati	Pi	Promedio del contenido total de vacíos	M
1	0,000123	0,00785	1,57%	1,08%	30
2	0,000193	0,00784	2,46%		43
3	0,000102	0,00785	1,30%		29
4	0,000051	0,01568	0,33%		18
5	0,000047	0,02352	0,20%		19
6	0,000060	0,00785	0,76%		23
7	0,000090	0,00785	1,15%		17
8	0,000068	0,00784	0,86%		19

Fuente: Elaboración propia

**Figura 35.**

Porcentaje de vacíos probeta patrón imagen 1 SS1-0.47

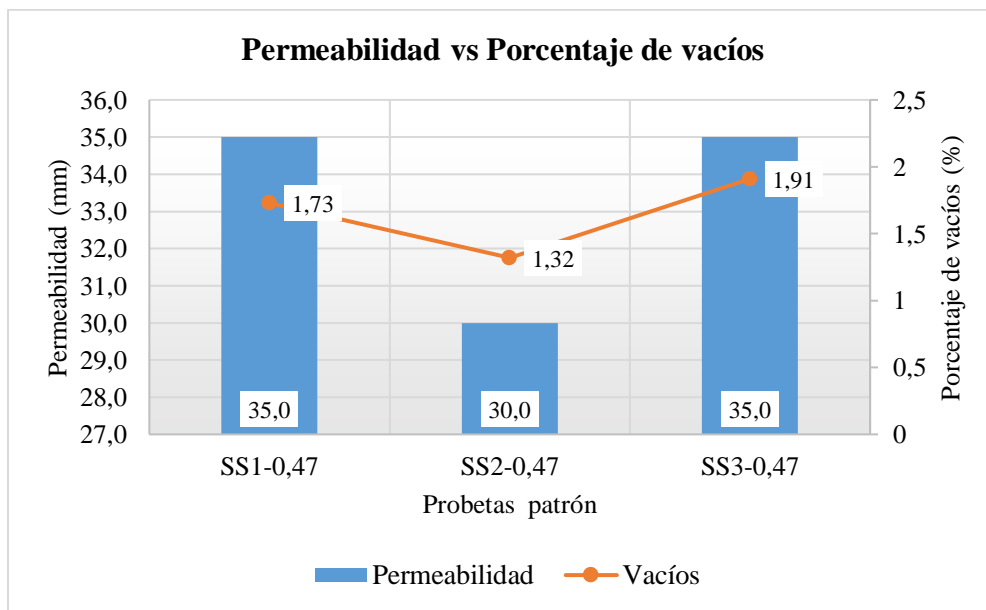




Fuente: Elaboración propia

**Figura 36.**

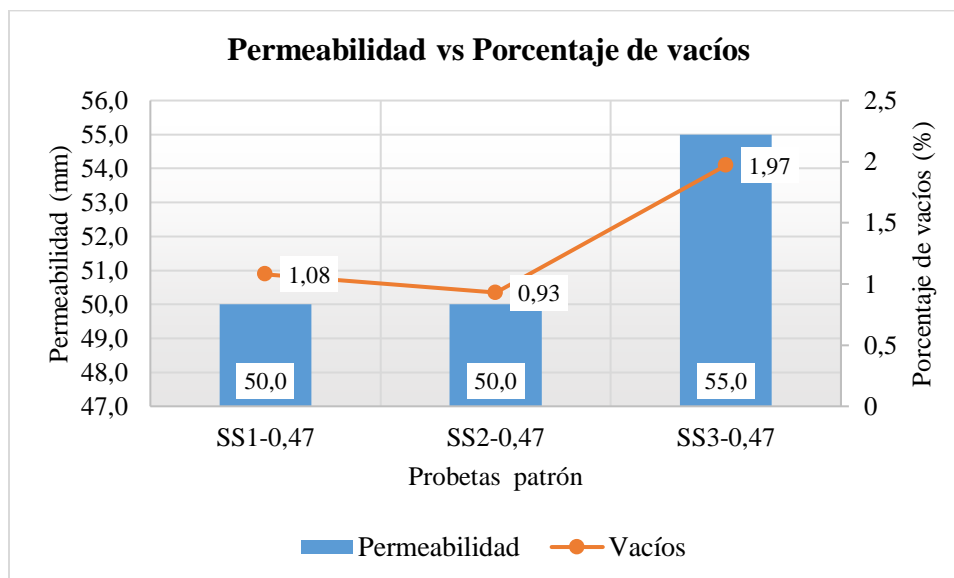
*Permeabilidad vs porcentaje de vacíos  $a/c=0.42$*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 37.**

*Permeabilidad vs porcentaje de vacíos  $a/c=0.47$*



*Fuente:* Elaboración propia

### 3.3.3.2 Contacto agregado-agregado

La cuantificación del contacto agregado-agregado del hormigón se realizó a partir de las imágenes digitales obtenidas mediante TC-RX. Cada imagen digital corresponde a una representación bidimensional de la sección transversal en escalas grises. La cuantificación se realizó de manera visual lo primero que se hizo es determinar el número de contactos para cada imagen y obtener el total de contacto agregado-agregado.

**Tabla 56.**

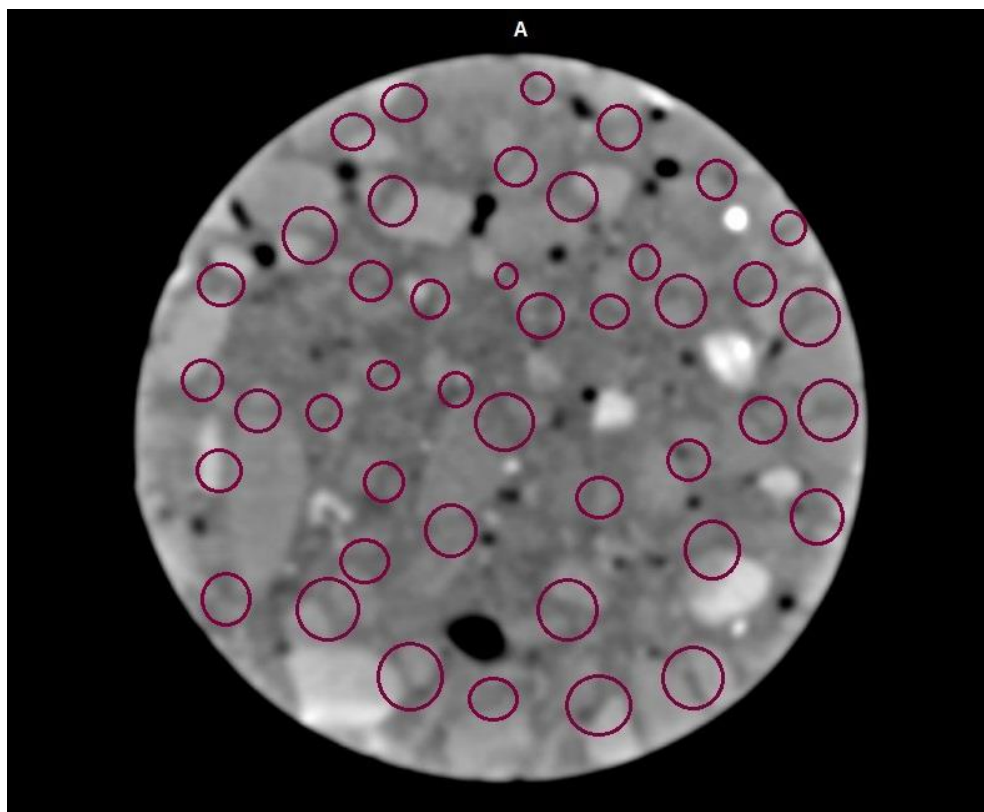
*Cantidad de contacto agregado-agregado probeta sumergida S1-0.42*

N° imagen	N° de contacto
1	42
2	54
3	58
4	56
5	55
6	64
7	58
8	53
9	63
<b>Σ</b>	<b>503</b>

*Fuente:* Elaboración propia

**Figura 38.**

*Cantidad de contacto agregado-agregado imagen 1 probeta sumergida S1-0.42*



*Fuente:* Elaboración propia

**Tabla 57.**

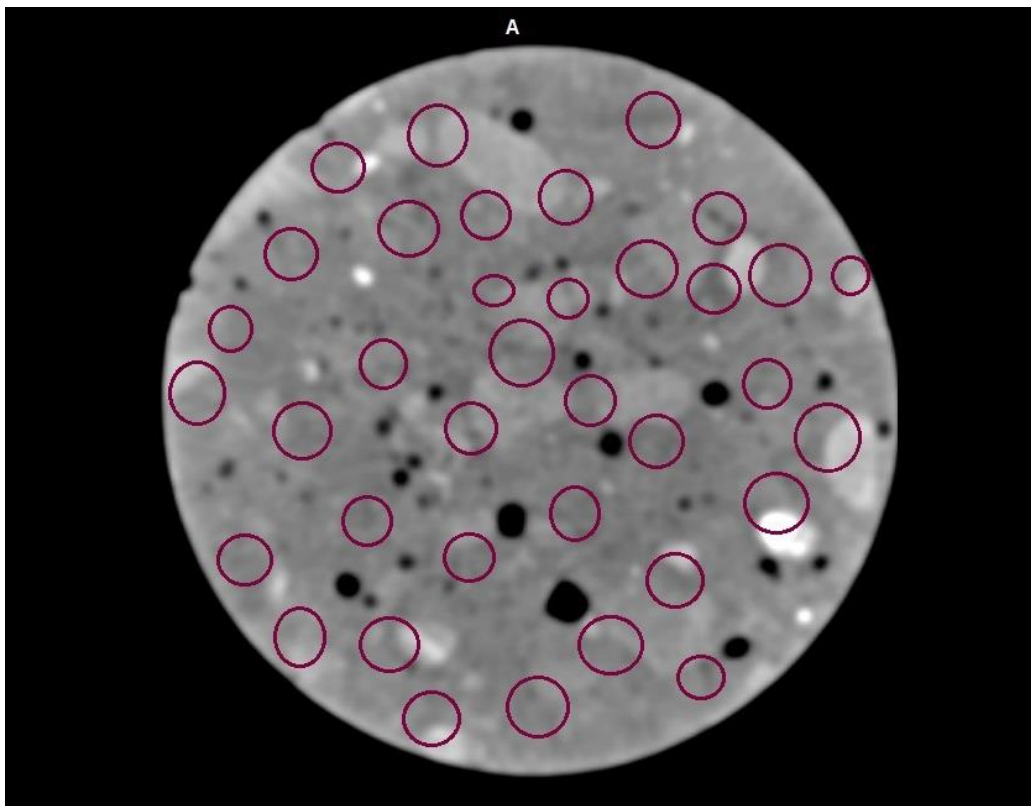
*Cantidad de contacto agregado-agregado probeta sumergida S1-0.47*

<b>N° imagen</b>	<b>N° de contacto</b>
1	37
2	38
3	48
4	46
5	45
6	50
7	47
8	45
<b>Σ</b>	<b>356</b>

*Fuente:* Elaboración propia

**Figura 39.**

*Cantidad de contacto agregado-agregado imagen 1 probeta sumergida S1-0.47*



*Fuente:* Elaboración propia

**Tabla 58.**

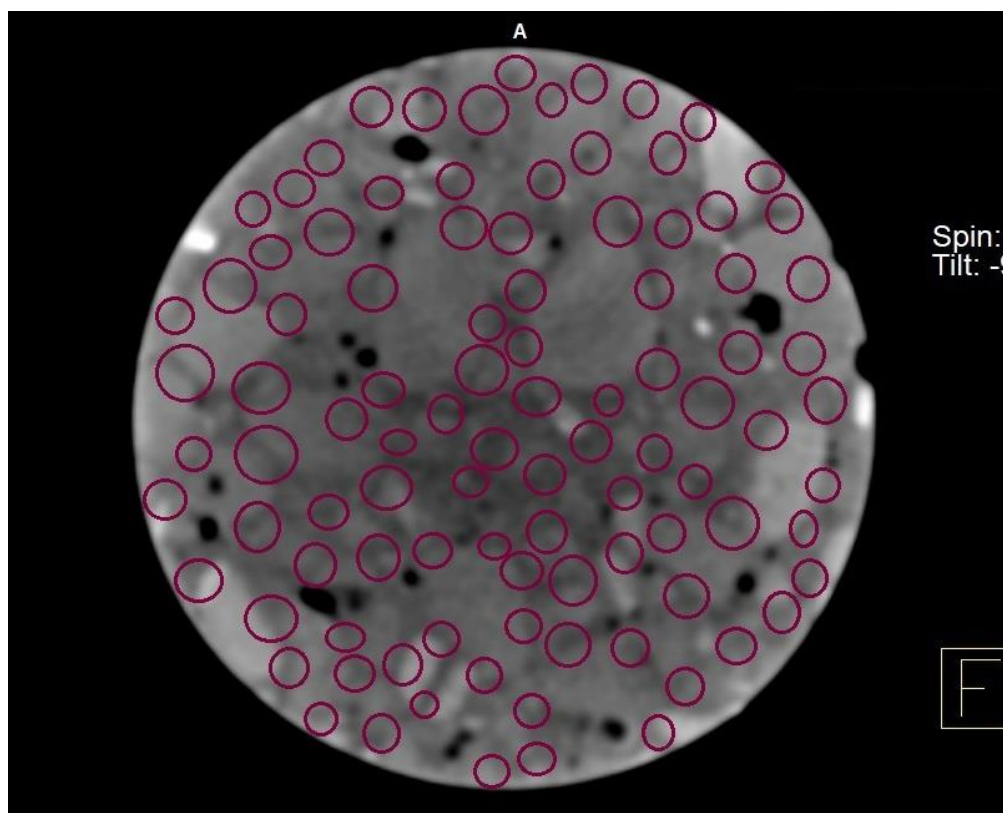
*Cantidad de contacto agregado-agregado probeta patrón SS1-0.42*

<b>N° imagen</b>	<b>N° de contacto</b>
1	79
2	81
3	70
4	79
5	67
6	74
7	80
8	80
<b>Σ</b>	<b>610</b>

*Fuente:* Elaboración propia

**Figura 40.**

*Cantidad de contacto agregado-agregado imagen 1 probeta patrón SS1-0.42*



*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 59.**

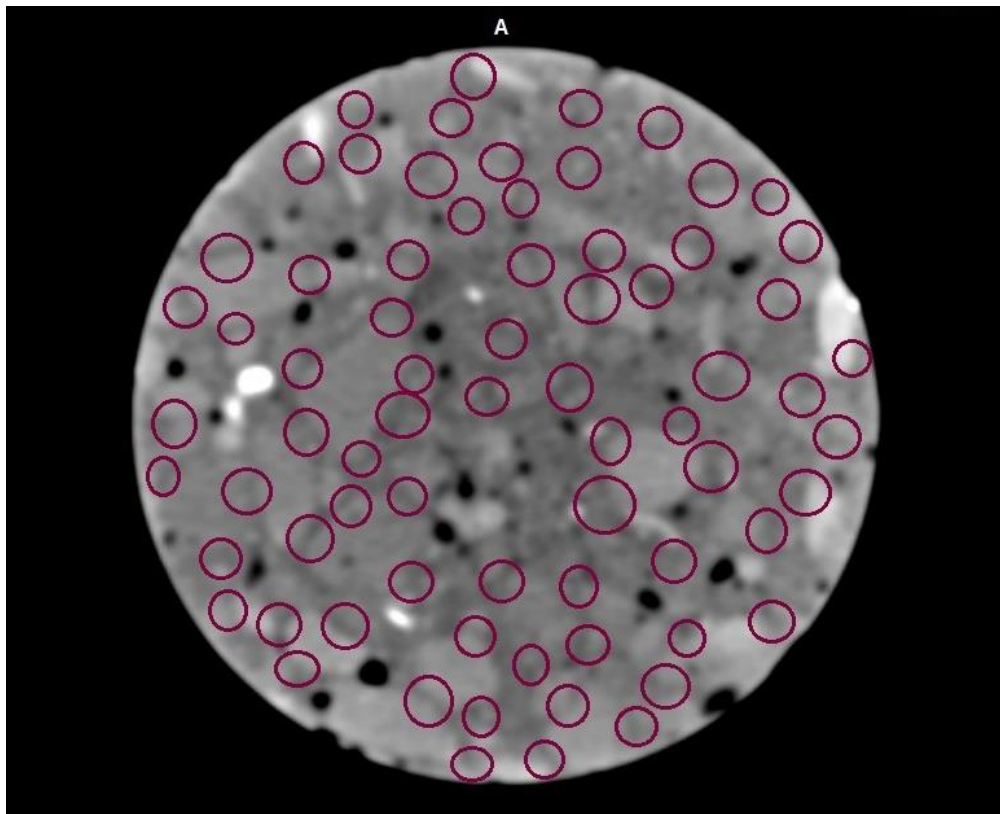
*Cantidad de contacto agregado-agregado probeta patrón SS1-0.47*

<b>N° imagen</b>	<b>N° de contacto</b>
1	72
2	76
3	73
4	85
5	76
6	77
7	64
8	72
<b>Σ</b>	<b>595</b>

*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 41.**

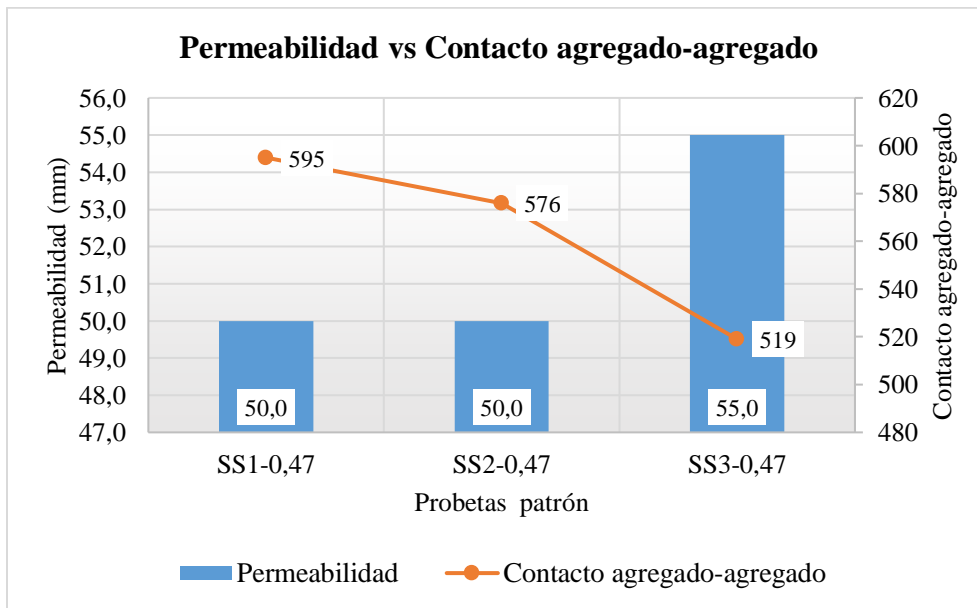
*Cantidad de contacto agregado-agregado imagen 1 probeta patrón SS1-0.47*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 42.**

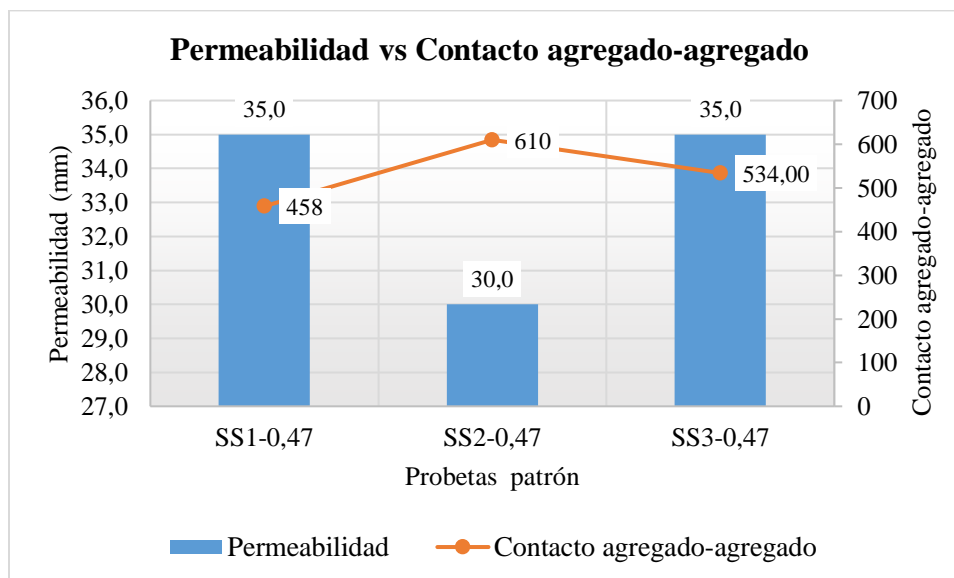
*Permeabilidad vs contacto agregado-agregado relación a/c=0.42*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 43.**

*Permeabilidad vs contacto agregado-agregado relación a/c=0.47*



*Fuente:* Elaboración propia

### 3.3.3.3 Ensayo de resistencia a compresión

**Tabla 60.**

*Resistencia de esfuerzo a compresión de hormigón patrón y hormigón sumergido relación a/c=0.42*

Nº	ID	F. de Vaciado	F. de Rotura	Peso (gr)	Edad (días)	Área (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Lectura (Mpa)	Carga (N)	Resist. (Mpa)	Promedio resistencia (Mpa)
1	SS2	26/04/2023	04/10/2023	3726,70	28	78,54	302,00	38,45	302000	38,45	35,50
2	SS3	19/04/2023	04/10/2023	3719,60	28	78,54	274,50	34,95	274500	34,95	
3	SS1	10/04/2023	04/10/2023	3719,5	28	78,54	260,00	33,10	260000	33,10	
4	S3	03/07/2023	31/10/2023	3711,00	120	78,54	291,40	37,09	291400	37,09	35,42
5	S2	03/07/2023	31/10/2023	3763,30	120	78,54	282,30	35,94	282300	35,94	
6	S1	03/07/2023	31/10/2023	3767,80	120	78,54	260,90	33,22	260900	33,22	

*Fuente:* Elaboración propia

**Tabla 61.**

*Resistencia de esfuerzo a compresión de hormigón patrón y hormigón sumergido relación a/c=0.42*

Nº	ID	F. de Vaciado	F. de Rotura	Peso (gr)	Edad (días)	Área (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Lectura (Mpa)	Carga (N)	Resist. (Mpa)	Promedio resistencia (Mpa)
1	SS1	17/04/2023	31/10/2023	3757,20	28	78,54	239,00	30,42	239000	30,42	29,73

2	SS3	17/04/2023	31/10/2023	3565,80	28	78,54	235,50	29,98	235500	29,98	
3	SS2	17/04/2023	31/10/2023	3614,20	28	78,54	226,40	28,80	226400	28,80	
4	S3	03/07/2023	31/10/2023	3750,60	120	78,54	282,60	35,95	282600	35,95	35,20
5	S1	03/07/2023	31/10/2023	3799,60	120	78,54	277,70	35,35	277700	35,35	
6	S2	03/07/2023	31/10/2023	3722,50	120	78,54	269,50	34,31	269500	34,31	

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 62.**

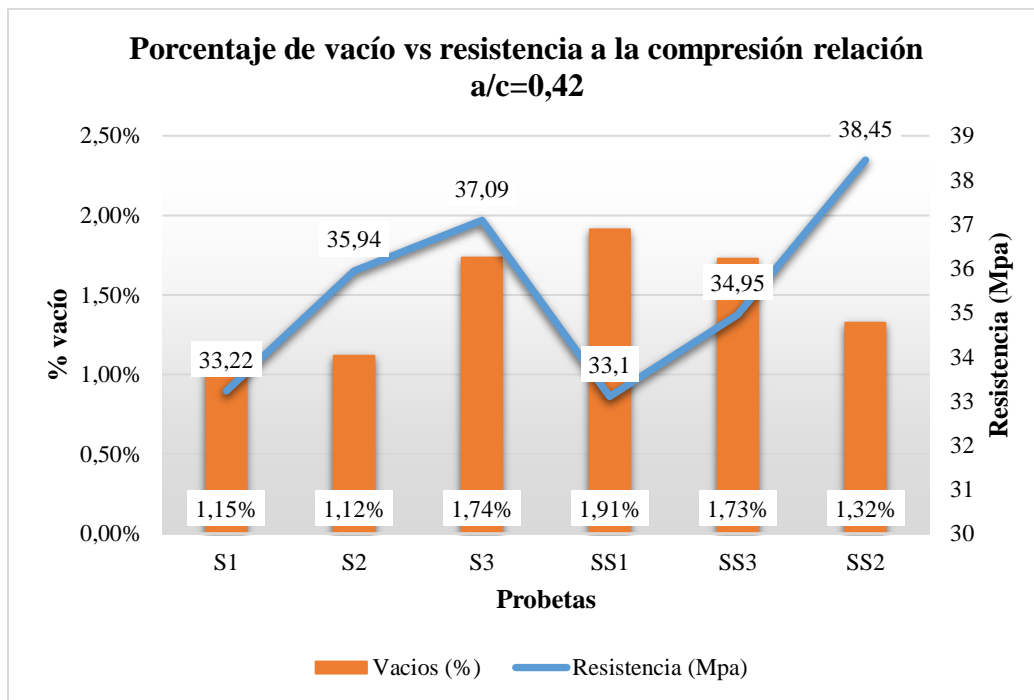
Relación porcentaje de vacíos y resistencia  $a/c=0.42$

0,42			
N°	ID	Vacíos (%)	Resistencia (Mpa)
1	S1	1,15%	33,22
2	S2	1,12%	35,94
3	S3	1,74%	37,09
4	SS1	1,91%	33,1
5	SS3	1,73%	34,95
6	SS2	1,32%	38,45

Fuente: Elaboración propia

**Figura 44.**

Relación porcentaje de vacíos y resistencia  $a/c=0.42$



Fuente: Elaboración propia



**Tabla 63.**

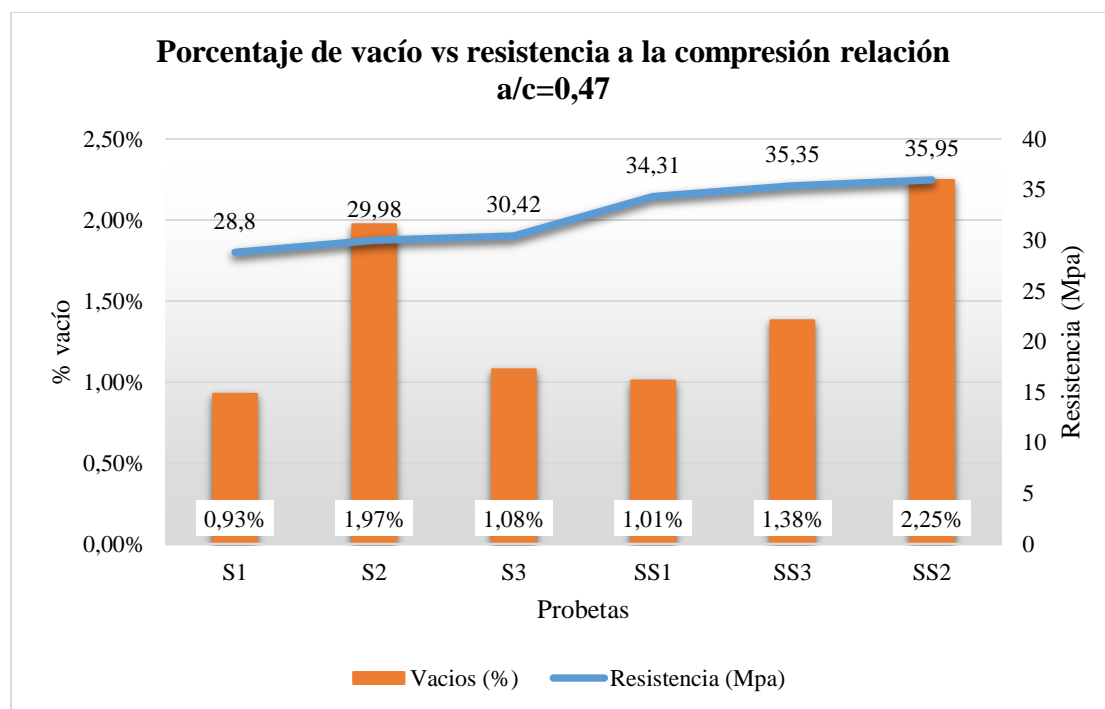
Relación porcentaje de vacíos y resistencia  $a/c=0.47$

<b>0,47</b>			
N°	ID	Vacíos (%)	Resistencia (Mpa)
1	SS2	0,93%	28,8
2	SS3	1,97%	29,98
3	SS1	1,08%	30,42
4	S2	1,01%	34,31
5	S1	1,38%	35,35
6	S3	2,25%	35,95

Fuente: Elaboración propia

**Figura 45.**

Relación porcentaje de vacíos y resistencia  $a/c=0.47$



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 64.**

Relación contacto agregado-agregado y resistencia  $a/c 0.42$

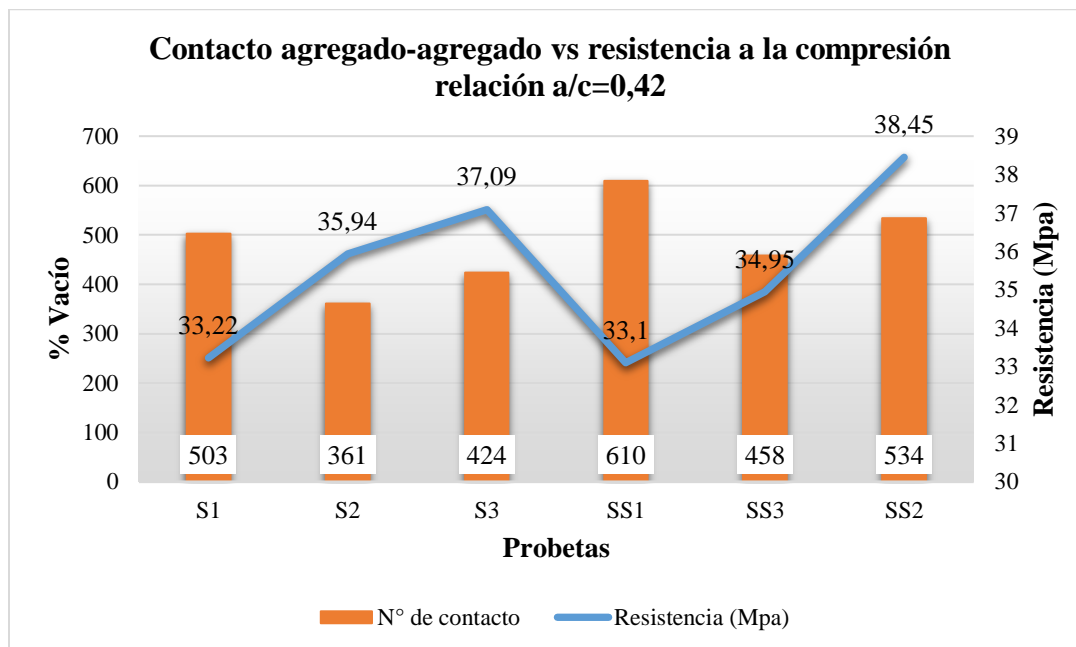
<b>0,42</b>			
N°	ID	N° de contacto	Resistencia (Mpa)
1	S1	503	33,22

2	S2	361	35,94
3	S3	424	37,09
4	SS1	610	33,1
5	SS3	458	34,95
6	SS2	534	38,45

Fuente: Elaboración propia

**Figura 46.**

Relación contacto agregado-agregado y resistencia a/c 0.42



**Tabla 65.**

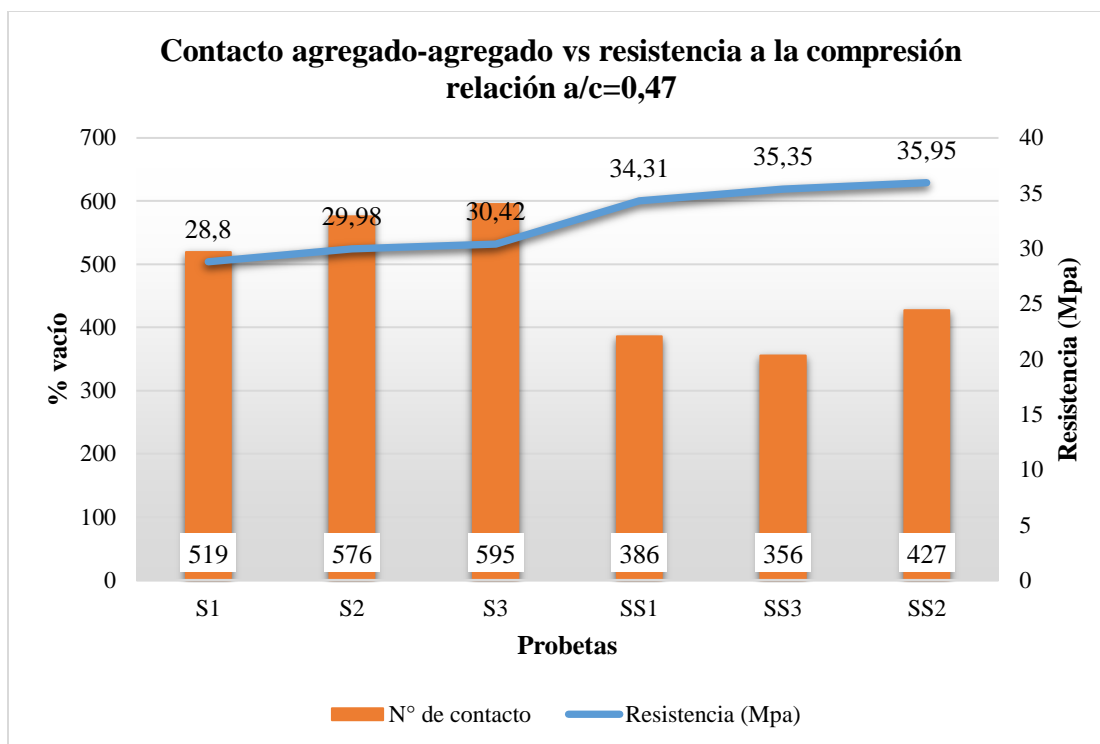
Relación contacto agregado-agregado y resistencia a/c 0.47

0,47			
N°	ID	N° de contacto	Resistencia (Mpa)
1	SS2	519	28,8
2	SS3	576	29,98
3	SS1	595	30,42
4	S2	386	34,31
5	S1	356	35,35
6	S3	427	35,95

Fuente: Elaboración propia

**Figura 47.**

Relación contacto agregado-agregado y resistencia a/c 0.47



Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3.4 Resultados análisis de calidad de agua residual

**Tabla 66.**

Resultado de análisis 17/08/23

N°	Parámetro	Resultados	Unidad	Técnica empleada	Referencia
1	Ph	7,15		Potenciometría	Sin referencia
2	Conductividad	1140	Us/cm	Potenciometría	Sin referencia
3	Temperatura	21	°C	Termometría	Sin referencia
4	Sólidos totales	557	mg/l	Gravimetría	Sin referencia
5	sólidos disueltos	500	mg/l	Gravimetría	Sin referencia
6	Sólidos suspendidos	57	mg/l	Gravimetría	Sin referencia
7	Sólidos sedimentables	<0,5	mg/l	Gravimetría	Sin referencia
8	Oxígeno Disuelto	4,3	mg/l	Potenciometría	Sin referencia
9	Aluminio	0,04	mg/l	Fotometría	Sin referencia
10	Calcio	210	mg/l	Fotometría	Sin referencia
11	Cobre	0	mg/l	Fotometría	Sin referencia
12	Cromo VI	0,113	mg/l	Fotometría	Sin referencia

13	Demanda Química de Oxígeno	140	mg/l	Fotometría	Sin referencia
14	Fosfato	29,3	mg/l	Fotometría	Sin referencia
15	Hierro	0,08	mg/l	Fotometría	Sin referencia
16	Manganeso	0	mg/l	Fotometría	Sin referencia
17	Molibdeno	0,7	mg/l	Fotometría	Sin referencia
18	Magnesio	10	mg/l	Fotometría	Sin referencia
19	Níquel	0,04	mg/l	Fotometría	Sin referencia
20	Nitrito	0,1	mg/l	Fotometría	Sin referencia
21	Nitrato	26,7	mg/l	Fotometría	Sin referencia
22	Alcalinidad	335	mg/l	Fotometría	Sin referencia
23	Potasio	160	mg/l	Fotometría	Sin referencia
24	Sulfato	75	mg/l	Fotometría	Sin referencia
25	Zinc	0	mg/l	Fotometría	Sin referencia

Fuente: CIAGUA

**Tabla 67.**

Resultado de análisis 17/08/23

Parámetro	Técnica y/o Método de ensayo	Unidad	Resultados	Limites permisible (agua residual)	Referencia de los límites
DBO <sub>5</sub>	SM 5210-B	mg/l	132	300	LMA 1333
Grasas y aceites	SM 5520-B	mg/l	24	200	LMA 1333
Sulfuros	SM 4500-S <sup>-2</sup> -E	mg/l	8	2	LMA 1333

Fuente: CEANID

**Tabla 68.**

Resultado de análisis 04/09/23

N°	Parámetro	Resultados	Unidad	Técnica Empleada	Referencia
1	Ph	7,32		Potenciometría	Sin referencia
2	Conductividad	1124	uS/cm	Potenciometría	Sin referencia
3	Temperatura	17	°C	Termometría	Sin referencia
4	Sólidos totales	549	mg/l	Gravimetría	Sin referencia
5	sólidos disueltos totales	498	mg/l	Gravimetría	Sin referencia

6	Sólidos suspendidos totales	51	mg/l	Gravimetría	Sin Referencia
7	Sólidos sedimentables	<0,5	mg/l	Gravimetría	Sin Referencia
8	Oxígeno Disuelto	3,9	mg/l	Potenciometría	Sin Referencia
9	Aluminio	0,03	mg/l	Fotometría	Sin Referencia
10	Calcio	170	mg/l	Fotometría	Sin Referencia
11	Cobre	0	mg/l	Fotometría	Sin Referencia
12	Cromo VI	56	mg/l	Fotometría	Sin Referencia
13	Demanda Química de Oxígeno	488	mg/l	Fotometría	Sin Referencia
14	Fosfato	26,9	mg/l	Fotometría	Sin Referencia
15	Hierro	0	mg/l	Fotometría	Sin Referencia
16	Manganeso	0	mg/l	Fotometría	Sin Referencia
17	Molibdeno	1,8	mg/l	Fotometría	Sin Referencia
18	Magnesio	10	mg/l	Fotometría	Sin Referencia
19	Níquel	0,05	mg/l	Fotometría	Sin Referencia
20	Nitrito	0,08	mg/l	Fotometría	Sin Referencia
21	Nitrato	13,6	mg/l	Fotometría	Sin Referencia
22	Alcalinidad	350	mg/l	Fotometría	Sin Referencia
23	Potasio	150	mg/l	Fotometría	Sin Referencia
24	Sulfato	50	mg/l	Fotometría	Sin Referencia
25	Zinc	0	mg/l	Fotometría	Sin Referencia

Fuente: CIAGUA

**Tabla 69.**

Resultado de análisis 04/09/23

Parámetro	Técnica y/o Método de ensayo	Unidad	Resultados	Limites permisible (agua residual)	Referencia de los limites
DQO	USEPA 410.4	mgO <sub>2</sub> /l	302	375	LMA 1333
Grasas y aceites	SM 5520-B	mg/l	4	200	LMA 1333
Sulfuros	SM 4500-S <sup>-2</sup> -E	mg/l	12	2	LMA 1333

Fuente: CEANID

**Tabla 70.**

Resultado de análisis 05/10/23

N°	Parámetro	Resultados	Unidad	Técnica Empleada	Referencia
1	Ph	7,18		Potenciometría	Sin referencia

2	Conductividad	1112	uS/cm	Potenciometría	Sin referencia
3	Temperatura	25,3	°C	Termometría	Sin referencia
4	Sólidos totales totales	537	mg/l	Gravimetría	Sin referencia
5	sólidos disueltos totales	478	mg/l	Gravimetría	Sin referencia
6	Sólidos suspendidos totales	59	mg/l	Gravimetría	Sin referencia
7	Sólidos sedimentables	1,3	mg/l	Gravimetría	Sin referencia
8	Oxígeno Disuelto	4,5	mg/l	Potenciometría	Sin referencia
9	Aluminio	0,06	mg/l	Fotometría	Sin referencia
10	Calcio	200	mg/l	Fotometría	Sin referencia
11	Cobre	0,04	mg/l	Fotometría	Sin referencia
12	Cromo VI	0,1	mg/l	Fotometría	Sin referencia
13	Demanda Química de Oxígeno	359	mg/l	Fotometría	Sin referencia
14	Fosfato	27,5	mg/l	Fotometría	Sin referencia
15	Hierro	0,39	mg/l	Fotometría	Sin referencia
16	Manganeso	0	mg/l	Fotometría	Sin referencia
17	Molibdeno	0,1	mg/l	Fotometría	Sin referencia
18	Magnesio	5	mg/l	Fotometría	Sin referencia
19	Níquel	0,06	mg/l	Fotometría	Sin referencia
20	Nitrito	0,08	mg/l	Fotometría	Sin referencia
21	Nitrato	19,7	mg/l	Fotometría	Sin referencia
22	Alcalinidad	2420	mg/l	Fotometría	Sin referencia
23	Potasio	200	mg/l	Fotometría	Sin referencia
24	Sulfato	65	mg/l	Fotometría	Sin referencia
25	Zinc	0	mg/l	Fotometría	Sin referencia
26	Amonio	93,39	mg/l	Fotometría	Sin referencia

Fuente: CIAGUA

**Tabla 71.***Resultado de análisis 05/10/23*

<b>Parámetro</b>	<b>Técnica y/o Método de ensayo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultados</b>	<b>Limites permisible (agua residual)</b>	<b>Referencia de los limites</b>
Bicarbonato	SM 3500-AsB	mg HCO <sup>-3</sup> /l	224,6	Sin referencia	Sin referencia
Carbonatos	SM 2320-B		n.d.	Sin referencia	Sin referencia
Cloruros	SM 4500-Cl-B	mg/l	87,1	Sin referencia	Sin referencia
DBO5	SM 5210-B	mgO <sub>2</sub> /l	195	Sin referencia	Sin referencia
Dureza					
Total	SM 2340-C	MgCaCO <sub>3</sub> /l	49,9	Sin referencia	Sin referencia
Grasas y Aceites	SM 5520-B	mg/l	2	Sin referencia	Sin referencia
Sodio Total	SM 3500-Na-B	mg/l	90,4	Sin referencia	Sin referencia
Sulfuros	SM 4500-S <sup>-2</sup> -E	mg/l	< 1	Sin referencia	Sin referencia

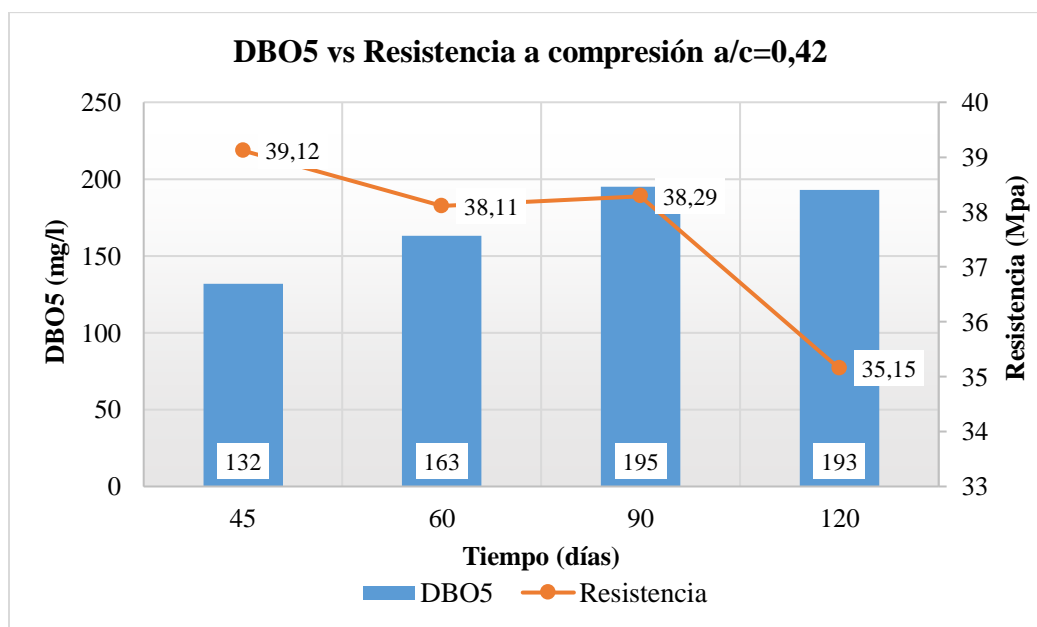
*Fuente: CEANID***Tabla 72.***Resultado de análisis 27/10/23*

<b>Parámetro</b>	<b>Técnica y/o Método de ensayo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultados</b>	<b>Limites permisible (agua residual)</b>	<b>Referencia de los limites</b>
Bicarbonato	SM 3500-AsB	mg CO <sub>3</sub> H-/l	22,8	Sin referencia	Sin referencia
Carbonatos	SM 2320-B		n.d.	Sin referencia	Sin referencia
Cloruros	SM 4500-Cl-B	mg/l	117,2	Sin referencia	Sin referencia
DBO5	SM 5210-B	mgO <sub>2</sub> /l	193	Sin referencia	Sin referencia
Dureza					
Total	SM 2340-C	MgCaCO <sub>3</sub> /l	119,8	Sin referencia	Sin referencia
Grasas y Aceites	SM 5520-B	mg/l	3	Sin referencia	Sin referencia
Sodio Total	SM 3500-Na-B	mg/l	75	Sin referencia	Sin referencia
Sulfuros	SM 4500-S <sup>-2</sup> -E	mg/l	12	Sin referencia	Sin referencia

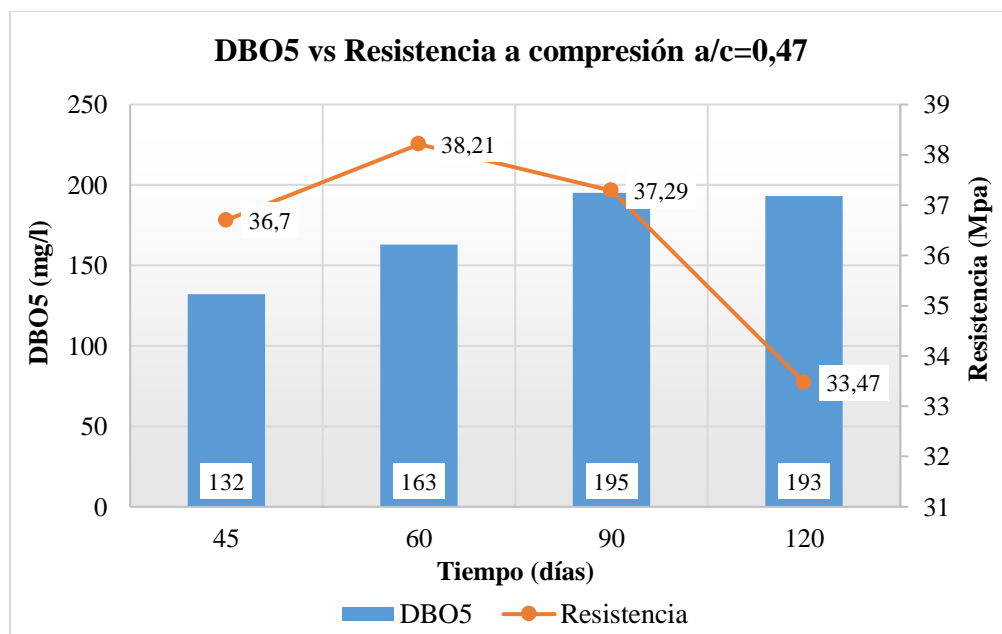
*Fuente: CEANID*

**Tabla 73.***Parámetros agresivos para el hormigón sumergido*

Fecha	Ph	Sulfatos (mg/l)	DBO5 (mgO2/l)	Sulfuros (mg/l)	DQO (mg/l)	Grasas y aceites (mg/l)	Magnesio (mg/l)	Sólidos totales (mg/l)	Sodio Total (mg/l)	Cloruros (mg/l)
17/08/2023	7,15	75	132	8	140	24	10	557	-	-
04/09/2023	7,32	50	163	12	488	4	10	549	-	-
02/10/2023	7,18	65	195	< 1	359	2	5	537	75	87,1
05/11/2023	-	-	193	12	-	3	-	-	90,4	117,2
$\bar{x}$	7,22	63,33	163,33	10,67	329,00	8,25	8,33	547,67	82,70	102,15

*Fuente: Elaboración propia.***Figura 48.***Demanda bioquímica de oxígeno y resistencia a compresión relación a/c=0.42**Fuente: Elaboración propia***Figura 49.***Demanda Bioquímica de Oxígeno y resistencia a compresión relación a/c=0.47*

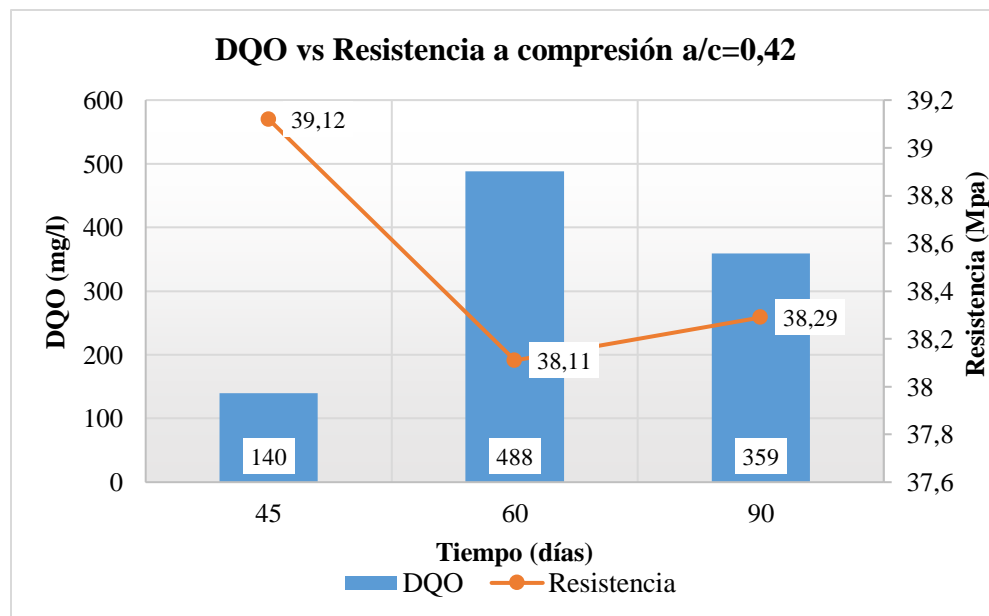




Fuente: Elaboración propia

**Figura 50.**

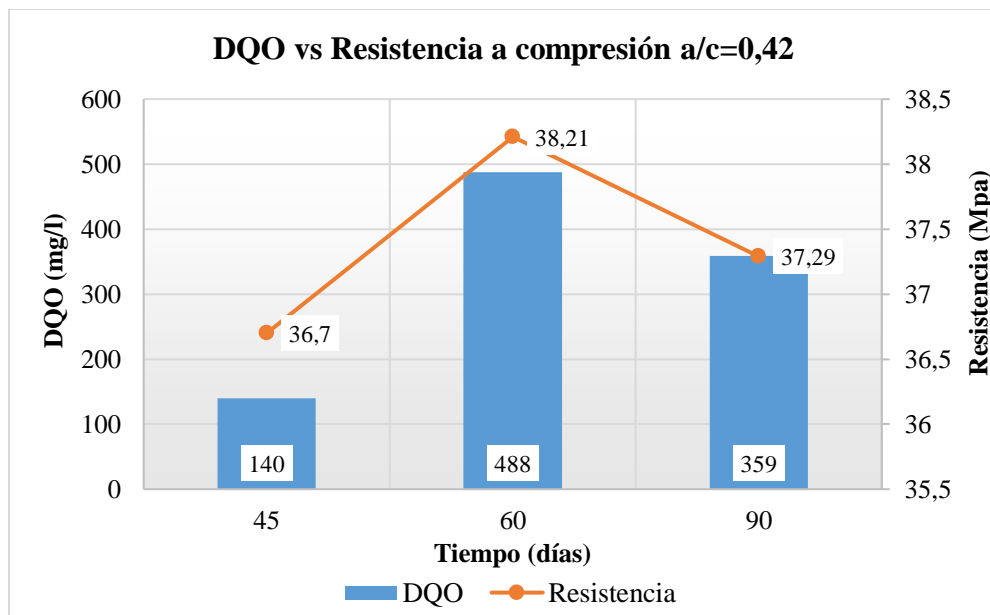
*Demanda Química de Oxígeno y resistencia a compresión relación a/c=0.42*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 51.**

*Demanda Química de Oxígeno y resistencia a compresión relación a/c=0.47*



*Fuente:* Elaboración propia

**CAPÍTULO 4**

**CONCLUSIONES Y**

**RECOMENDACIONES**

## 4 Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

- Se realizó un análisis de 12 probetas, de las cuales se seleccionaron 96 imágenes obtenidas por la tomografía computarizada, de este análisis cuidadoso se logró obtener los resultados de porcentaje de vacíos y contacto agregado-agregado.
- Los resultados del análisis de porcentaje de vacíos determinados a través de tomografía computarizada de rayos-x en las muestras de probetas se encuentran en un rango de 0.93 % - 2.25 %.
- Los resultados del análisis de número de puntos de contacto agregado-agregado determinados a través de tomografía computarizada de rayos-x en las muestras de probetas se encuentran en un rango de 361 – 610.
- Los resultados del ensayo a compresión de las probetas sumergidas a los 45 días superan en la relación  $a/c = 0.42$  con 8.6 % y en la relación  $a/c = 0.47$  con 25.6 % a las probetas patrón.
- Los resultados del ensayo a compresión de las probetas sumergidas a los 60 días superan en la relación  $a/c = 0.42$  con 7.9 % y en la relación  $a/c = 0.47$  con 13.9 % a las probetas patrón.
- Los resultados del ensayo a compresión de las probetas sumergidas a los 90 días superan en la relación  $a/c = 0.42$  con 11.2 % y en la relación  $a/c = 0.47$  con 18.1 % a las probetas patrón.
- Los resultados del ensayo a compresión de las probetas sumergidas a los 120 días superan en la relación  $a/c = 0.47$  con 0.6 % y en la relación  $a/c = 0.42$  no superan a las probetas patrón.
- Se evidenció que a mayor número de vacíos es menor la resistencia a compresión del hormigón.
- Se demostró que a menor porcentaje de vacíos es menor la permeabilidad del hormigón.
- Los resultados fueron a mayor contacto agregado-agregado menor permeabilidad.
- Adicionalmente, al decrecer el contenido de vacíos se reportó un incremento del número de puntos de contacto.

- Los resultados de permeabilidad nos muestran que el hormigón con relación agua/cemento de 0.42 es impermeable ya que nos da como resultado de penetración de agua (35 mm., 30 mm y 35 mm) estos resultados son menores al permitido de 50 mm.
- Los resultados de permeabilidad nos muestran que el hormigón con relación agua/cemento de 0.47 no es impermeable ya que nos da como resultados (55 mm, 50 mm y 50 mm.) son iguales o superiores al permitido de 50 mm.
- Los análisis de calidad de agua residual nos muestran que el ph promedio del agua es de 7.22 esto nos indica que es débilmente agresivo ya que no es  $> 4.5$  donde se considera fuertemente agresivo.
- Se demuestra que el contenido de magnesio promedio 8.33 mg/l en los resultados de calidad de agua es de poca concentración es de agresividad débil. Es un parámetro de tener en cuenta y tener un monitoreo regular de la calidad del agua residual ya que al tener mayor concentración puede reaccionar con los componentes del cemento y contribuir a la formación de la brucita, que ocasiona fisuras y agrietamientos en el hormigón.
- La cantidad de sulfato promedio 63.33 mg/l obtenido en el análisis de calidad de agua es débilmente agresivo el resultado no supera los 600 mg/l donde se considera una fuerte agresividad también hay que tener inspecciones periódicas y realizar calidad de agua para prevenir los efectos de los sulfatos ya que al reaccionar con el cemento produce la etringita este se puede expandir que debilitan la estructura del hormigón.
- El parámetro de sulfuros en el análisis tiene como promedio de 10.67 mg/l, los sulfuros pueden reaccionar con el concreto y dar lugar a sulfuros ácidos estos pueden corroer el concreto en especial las armaduras de acero.
- La presencia de cloruros es de 102.15 mg/l, estos pueden penetrar en el hormigón y desencadenar procesos de corrosión en las armaduras de acero este proceso debilita la estructura de hormigón y puede comprometer la infraestructura a lo largo de su vida.
- El resultado de las grasas y aceites en el agua residual es de 8.25 mg/l, es un resultado permisible no supera los 200 mg/l, ya que estos pueden penetrar en el concreto reduciendo su resistencia, puede contribuir a la corrosión de las armaduras también afecta a la adherencia de revestimientos protectores.

- El promedio de sólidos totales es de 547.67 mg/l es un resultado bueno ya que no se eleva a 600 mg/l, los sólidos totales nos indica la carga total de materiales sólidos presentes y nos indica el grado de contaminación.
- El promedio de sodio total es de 82.70 mg/l, altas concentraciones contribuyen a reacción de álcali-sílice que pueden generar expansión y fisuras en el hormigón también afecta a la durabilidad del hormigón.
- El promedio de DBO5 es de 163.33 mg/l el cual está dentro del límite permisible no supera los 300 mg/l.
- El promedio de DQO es de 329 mg/l el cual está dentro del límite permisible no supera los 375 mg/l.
- Los resultados obtenidos a los 45, 60, 90 y 120 días de la resistencia a la compresión del concreto con diferentes DBO5 muestra que la resistencia en relación a/c de 0.42 y relación a/c de 0.47 es mayor mientras la cantidad de DBO5 es menor.
- Los resultados obtenidos a los 45, 60, 90 días de la resistencia a la compresión del concreto con diferentes DQO muestra que la resistencia en relación a/c de 0.42 es mayor mientras la cantidad de DQO es menor.
- Los resultados obtenidos a los 45, 60, 90 días de la resistencia a la compresión del concreto con diferentes DQO muestra que la resistencia en relación a/c de 0.47 es menor mientras la cantidad de DQO es mayor.
- La evaluación realizada sustenta que el número de puntos de contacto de los agregado-agregado en las probetas evaluadas se incrementa al elevarse el número de partículas de agregado en función de la granulometría del agregado.
- Estos resultados sugieren la posibilidad de optimizar a futuro la respuesta mecánica de las mezclas de concreto, maximizando el número de puntos de contacto, en función de un análisis más detallado de la granulometría de las mezclas.
- Los resultados enfatizan la necesidad de controlar en campo el contenido de vacíos actualmente evaluado en muchos casos mediante inspección visual para garantizar indirectamente el mayor número de puntos de contacto posible y de esta forma asegurar una adecuada resistencia a la desintegración en las mezclas.

## 4.2 Recomendaciones

- Se recomienda que para próximos estudios la sumersión de las probetas en aguas residuales de haga hasta la base de la laguna para obtener mejores resultados de la investigación.
- Se recomienda sacar parámetros necesarios para el análisis de calidad de agua.
- Se recomienda que al momento de realizar la dosificación tener todos los materiales bien pesados.
- Se recomienda seleccionar las probetas por fecha de dosificación para cualquier ensayo que se vaya a realizar para tener una mejor estadística.
- Se recomienda cuando se esté vaciando el concreto a los moldes varillar bien y hacer un buen vibrado para eliminar el mayor porcentaje de vacíos.
- Se recomiendo enrazar lo más parejo con los bordes para evitar que se fragüe desigual.
- Se recomienda tener ambos lados de la probeta liso y recto para que en el ensayo de resistencia a compresión no tenga fallas.
- Se recomienda que después de sacar las probetas sumergidas, dejarlas secar por lo menos 24 horas antes de su ruptura.
- Se recomienda considerar como método de control de mezclas de concreto desde el inicio y durante su vida útil a la aplicación de TC-RX, para conocer el estado de su estructura interna.
- La muestra extraída de probeta no debe sufrir ningún daño durante la operación y posterior traslado para la aplicación del proceso tomográfico.
- Se recomienda prestar mucha atención al momento de utilizar el programa de procesamiento de imágenes digitales para realizar un correcto análisis.
- Se recomienda la aplicación de esta metodología por el grado de confiabilidad de los datos obtenidos, haciendo uso del avance tecnológico y siendo un método disponible de aplicar en nuestro medio.

