

## CAPITULO I

### 1.1 Introducción

El hormigón es un material fundamental en la construcción, reconocido por su resistencia y durabilidad. Sin embargo, su exposición a ambientes adversos, como las aguas residuales domésticas, puede comprometer sus propiedades mecánicas y acortar su vida útil.

Las aguas residuales domésticas pueden provocar el deterioro de las estructuras de hormigón debido a su contenido de sustancias químicas y microorganismos que fomentan la corrosión y el desgaste del material. Por ello, es crucial investigar cómo la exposición a estas aguas afecta la resistencia a compresión del hormigón, especialmente en el caso del hormigón H30 y el aditivo (KIM), cuyas propiedades pueden influir en su rendimiento en ambientes agresivos.

En la actualidad, en Santa Cruz, existe una empresa que comercializa el producto conocido como Membrana Interna Krystol™ (KIM), un aditivo en polvo diseñado para mejorar la resistencia y la durabilidad del hormigón. Este estudio busca comparar la efectividad del KIM en mezcla con el hormigón en ambientes agresivos, en contraste con el hormigón patrón. El KIM es un aditivo hidrofilico cristalino que se utiliza para impermeabilizar permanentemente estructuras de hormigón, reduciendo significativamente su permeabilidad. Al prevenir la migración de agua, el KIM aumenta la durabilidad del hormigón, protegiendo el acero de refuerzo contra la corrosión y el ataque químico.

Este estudio tiene como objetivo determinar la influencia de las aguas residuales domésticas sobre la resistencia a compresión de un hormigón H30 elaborado con cemento tipo IP-40 y el aditivo Membrana Interna Krystol™ (KIM) . Para ello, se realizarán pruebas de resistencia a compresión tras períodos de inmersión en agua residual doméstica de 30, 60, 90 y 120 días. Los resultados proporcionarán información valiosa para comprender cómo las aguas residuales afectan la resistencia a compresión del hormigón, contribuyendo a mejorar las prácticas de diseño y mantenimiento de estructuras expuestas a estas condiciones.

El proyecto de investigación se centrará en la planta de tratamiento de San Luis, en la ciudad de Tarija, y analizará la resistencia del hormigón en condiciones desafiantes. Se abordarán dos fases específicas: la exposición en sumersión a aguas residuales y la inmersión parcial, que representan escenarios comunes donde las estructuras de hormigón pueden enfrentar condiciones adversas durante su vida útil.

## 1.2 Antecedentes

La resistencia del hormigón en condiciones adversas ha sido un campo de investigación crítico en la ingeniería civil, especialmente en lo que respecta a la utilización de aditivos. Estos compuestos han transformado el panorama de los materiales de construcción, permitiendo no solo mejoras en la resistencia estructural, sino también en la durabilidad del hormigón frente a entornos hostiles, como los que presentan las aguas residuales.

En la actualidad, el manejo y tratamiento de aguas residuales se ha convertido en una cuestión de gran relevancia medioambiental y de salud pública. Las aguas residuales, que se vierten a menudo en ríos, lagos y mares, contienen una variedad de contaminantes, incluyendo metales pesados como arsénico y boro, así como disolventes, aceites, detergentes, y productos químicos. Este tipo de contaminación representa un riesgo significativo para la salud humana y animal, generando enfermedades asociadas al consumo de agua contaminada y a la degradación de ecosistemas acuáticos.

En este contexto, diversas investigaciones han abordado el impacto de las aguas residuales en las propiedades del hormigón.

(Mallón Arias, 2022): En su estudio titulado "Análisis de la influencia del agua residual doméstica en la resistencia a compresión del hormigón con aditivos impermeabilizantes", Antonio llevó a cabo una investigación en Tarija, Bolivia, en respuesta a la creciente necesidad de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). El objetivo del estudio fue evaluar cómo las aguas residuales domésticas afectan la resistencia a compresión del hormigón endurecido. Para ello, se fabricaron probetas cilíndricas de hormigón H-35, utilizando cemento tipo IP y diversos aditivos impermeabilizantes (Sika WT-200 P, Sikaguard 63 CL, Sikatop 107 Seal, Sikaguard Antiácido). Las probetas fueron sumergidas en aguas residuales de la laguna facultativa de la PTAR de San Luis durante períodos de 30, 60, 90, 120 y 180 días. Los resultados mostraron que, a pesar de la inmersión prolongada, el hormigón mantuvo su resistencia a compresión tras 180 días, aunque se observaron leves corrosiones superficiales mediante microscopía. Esto sugiere que, si bien el hormigón puede ser resiliente, hay indicios de posibles daños a largo plazo que justifican investigaciones adicionales para comprender mejor los mecanismos de degradación.

(Vargas Fernández, 2023): En el estudio "Análisis del comportamiento interno de los hormigones a edades tempranas sumergidos en aguas residuales mediante tomografía

computarizada en rayos X", Fernández utilizó tecnología de punta para investigar la estructura interna del hormigón, centrando su análisis en la interacción entre los agregados y el porcentaje de vacíos. Se fabricaron 134 probetas de hormigón con relaciones agua/cemento de 0,42 y 0,47, de las cuales 64 fueron sumergidas en aguas residuales durante 120 días. A través de intervalos de 45, 60, 90 y 120 días, se extrajeron probetas para comparar sus resistencias a compresión con las de control. Los hallazgos indicaron que el hormigón en contacto con aguas residuales mostró un incremento en la resistencia a compresión durante los primeros 90 días, aunque se registró una leve disminución a los 120 días. Estos resultados resaltan la complejidad de la interacción entre el hormigón y las aguas residuales, sugiriendo que los efectos iniciales pueden ser positivos, pero pueden derivar en problemas a largo plazo.

(G. Coni, 2022): En sus investigaciones sobre el deterioro de estructuras de hormigón, los autores han documentado un severo deterioro superficial en elementos de hormigón y morteros de reparación aplicados en plantas de tratamiento. Este deterioro se ha asociado con ataques ácidos a los materiales fabricados con cemento Portland. La corrosión del hormigón, además de ser un problema técnico, representa una preocupación económica significativa, ya que se gastan millones de dólares en la reparación y mantenimiento de infraestructuras de alcantarillado y plantas de tratamiento de aguas residuales.

(Tazaki, 1992): La presencia de bacterias, como las reductoras de azufre y las proteolíticas, combinadas con desechos orgánicos, son factores que agravan este fenómeno corrosivo. En la década de 1970, CanWest Waterproofing Company, bajo la dirección de Ron G. Yuers, actual presidente de la junta de Kryton, comenzó a abordar problemas de impermeabilización. Con la ayuda de un químico y tras cientos de horas de trabajo en laboratorio, nació Krystol. En 1973, se fundó Kryton International Inc. para lanzar esta tecnología en el mercado global. La retroalimentación obtenida en los primeros años fue crucial para el desarrollo de Kryton, lo que llevó a la expansión de su línea de productos para incluir epóxidos, recubrimientos y limpiadores, diversificando su enfoque hacia la impermeabilización del hormigón.

Durante la década de 1980, Kryton introdujo la primera mezcla de impermeabilización cristalina del mundo, conocida como Krystol Internal Membrana (KIM). Este avance creó una nueva categoría de productos dentro de la industria de impermeabilización de hormigón.

La empresa experimentó una expansión global en esta época, pasando de máquinas de télex a faxes avanzados para cerrar acuerdos con una red global en crecimiento. Kryton se ha consolidado como el proveedor líder de soluciones de hormigón inteligente y, en 2011, abrió un nuevo almacén en la Zona de Libre Comercio de Jebel Ali. Para 2019, Kryton había continuado su crecimiento en el sector.

### **1.3. Justificación**

#### **1.3.1. Justificación técnica**

Este estudio tiene como objetivo evaluar el comportamiento del hormigón, tanto con aditivo como sin él, frente a la exposición continua a aguas residuales en una planta de tratamiento ubicada en el barrio San Luis de la ciudad de Tarija. La investigación abarca dos aspectos fundamentales: la mejora de los materiales de construcción y la optimización de los diseños estructurales en plantas de tratamiento de aguas residuales dentro de la región.

En primer lugar, la evaluación de la resistencia del hormigón en condiciones operativas reales permitirá identificar mejoras en su composición, orientadas a incrementar su durabilidad. La incorporación del aditivo Kryton constituye una estrategia técnica avanzada orientada a mejorar las propiedades del hormigón H30, promoviendo la obtención de estructuras con mayor resistencia y durabilidad. Si bien el cemento IP-30 cumple con los requisitos básicos de resistencia, el uso del cemento IP-40 resulta más recomendable debido a su superior desempeño mecánico y a la menor dosificación requerida, lo que conlleva una reducción en el contenido de Clinker. Esta disminución es relevante, ya que un exceso de Clinker puede incrementar el riesgo de fisuración en los elementos estructurales. En este sentido, la elección del cemento IP-40 contribuye a optimizar la durabilidad del hormigón y a mitigar posibles fallas estructurales a largo plazo.

La investigación se desarrollará en dos fases: una con probetas completamente sumergidas y otra con probetas parcialmente sumergidas. Esta metodología busca simular con precisión las condiciones reales a las que están expuestas las estructuras de hormigón en plantas de tratamiento de aguas residuales. Ambas fases permitirán analizar distintos mecanismos de degradación y proporcionar una comprensión integral del comportamiento del hormigón con aditivo Kryton. El objetivo final es optimizar tanto el diseño estructural como los planes de

mantenimiento de estas infraestructuras, garantizando así su resistencia y durabilidad ante diversas condiciones.

La elección del estado parcialmente sumergido responde a la necesidad de replicar con fidelidad las condiciones reales que enfrentan muchas estructuras de concreto en ambientes húmedos y contaminados, pero no completamente inundados, como:

- Muros de cámaras de bombeo, canales, bordes de lagunas facultativas.
- Zonas de salpicadura, salidas de rebose y áreas donde fluctúa el nivel del agua.

En estas zonas, el hormigón está expuesto a un entorno mixto, donde coexisten el oxígeno atmosférico, la humedad constante y contaminantes químicos presentes en el agua residual.

Esta combinación promueve procesos de deterioro como:

- Ataques por sulfatos y ácidos generados a través de ciclos de humedecimiento y secado.
- Formación de eflorescencias y cristalización de sales solubles en los poros del concreto.
- Mayor succión capilar, que facilita la penetración de contaminantes hacia el interior del material.
- Mayor disponibilidad de oxígeno, que intensifica los procesos de oxidación y corrosión (en estructuras armadas).

Estas condiciones hacen que el entorno parcialmente sumergido sea más agresivo que el completamente sumergido, donde la ausencia de oxígeno inhibe varias reacciones químicas y biológicas. Adicionalmente, el estudio contribuirá al mejoramiento de los diseños estructurales en plantas de tratamiento de aguas residuales. Comprender cómo se comporta el hormigón ante distintos niveles de exposición al agua permitirá diseñar estructuras más duraderas y con menores requerimientos de mantenimiento, lo cual es esencial para garantizar la seguridad y eficiencia operativa de estas instalaciones, fundamentales en la gestión ambiental y la salud pública.

Finalmente, esta investigación validará técnicas de protección del hormigón mediante el uso de aditivos. La evaluación del desempeño del aditivo Kryton bajo condiciones reales proporcionará datos empíricos útiles para mejorar las prácticas constructivas en el sector del saneamiento, desarrollando soluciones más efectivas para proteger el hormigón frente a la agresividad química de las aguas residuales.

### **1.3.2. Justificación económica**

La relevancia económica de la investigación es notable, ya que aborda la eficiencia y la reducción de costos en la construcción y mantenimiento de infraestructuras de saneamiento. Esta investigación tiene el potencial de reducir significativamente los costos de mantenimiento. Al desarrollar y validar hormigones más duraderos y resistentes, se disminuirán los costos asociados con la reparación y el mantenimiento de infraestructuras de tratamiento de aguas residuales. Esto es especialmente relevante para entidades que gestionan estas infraestructuras con presupuestos limitados.

Además, el estudio contribuirá a la eficiencia en la utilización de materiales y recursos. Al identificar las mejores mezclas de hormigón y evaluar el impacto del aditivo Kryton, se pueden optimizar las cantidades de materiales utilizados, lo que se traduce en una mejor relación costo-beneficio. Esto no solo reduce los costos de construcción, sino que también minimiza el impacto ambiental de las obras, alineándose con principios de sostenibilidad económica.

La investigación tiene un impacto positivo en el sector de la construcción al proporcionar soluciones más eficientes y económicas. Empresas constructoras y entidades gubernamentales podrán aplicar los resultados de este estudio para mejorar sus prácticas de construcción y mantenimiento, lo que fortalecerá la competitividad del sector y atraerá nuevas inversiones en tecnologías de construcción y saneamiento.

### **1.3.3. Justificación social**

Desde una perspectiva social, la investigación tiene un impacto significativo en la mejora de la calidad de vida y la salud pública.

La investigación contribuye a la mejora de la infraestructura sanitaria. Al desarrollar hormigones más resistentes, se garantiza que las plantas de tratamiento de aguas residuales funcionen de manera eficiente y continua, reduciendo el riesgo de fallos y problemas de saneamiento que pueden afectar la salud pública. Infraestructuras de saneamiento confiables son esenciales para prevenir enfermedades y asegurar un ambiente limpio.

Esta investigación promueve la sostenibilidad ambiental. Infraestructuras más duraderas y resistentes a la agresividad química de las aguas residuales ayudan a minimizar la contaminación del suelo y del agua, protegiendo los ecosistemas locales. Esto es crucial en un contexto global donde la protección del medio ambiente es una prioridad creciente.

Finalmente, la investigación tiene un impacto positivo en las comunidades locales. Proyectos de infraestructura más eficientes y sostenibles aseguran que los recursos públicos se utilicen de manera efectiva, beneficiando a un mayor número de personas. Esto es especialmente importante en países en desarrollo, donde los recursos para la construcción y mantenimiento de infraestructuras pueden ser limitados. Al optimizar el uso de estos recursos, se puede mejorar el acceso a servicios de saneamiento de calidad, fomentando el desarrollo socioeconómico y mejorando las condiciones de vida de las comunidades.

#### **1.4. Planteamiento del problema**

En 1988 se instaló la Planta de Lagunas de Oxidación de San Luis, ubicada en el barrio San Luis de la ciudad de Tarija. Esta planta fue diseñada con el objetivo de recolectar, tratar y descontaminar las aguas residuales domésticas e industriales, con una vida útil estimada de 10 años. Sin embargo, han transcurrido más de 35 años desde su puesta en funcionamiento, tiempo durante el cual ha continuado recibiendo la totalidad de los desechos del sistema de alcantarillado urbano, superando ampliamente su capacidad y tiempo de servicio proyectado. Como consecuencia, la planta se ha convertido en uno de los principales focos de contaminación en la ciudad, y sus estructuras de hormigón presentan signos de deterioro acelerado debido a la exposición continua a un ambiente altamente agresivo. Factores como la presencia de sulfatos, cloruros, ácidos generados por actividad biológica y una elevada carga orgánica generan procesos de fisuración, pérdida de resistencia y disminución de la vida útil del hormigón.

Pese a estas condiciones, en la práctica local sigue utilizándose cemento tipo IP-30 para obras de infraestructura sanitaria, a pesar de su limitada capacidad frente a estos entornos. El cemento IP-40, que ofrece mayor resistencia inicial y menor porosidad, podría representar una alternativa más adecuada; sin embargo, no existen estudios técnicos locales que analicen su comportamiento frente a aguas residuales domésticas en condiciones reales de servicio.

Asimismo, el uso de aditivos cristalinos como Kryton KIM ha cobrado relevancia por su capacidad de reducir la permeabilidad del concreto. No obstante, su eficacia ha sido mayormente evaluada en condiciones controladas de laboratorio, sin considerar escenarios reales de inmersión prolongada en aguas residuales.

Particularmente, la laguna facultativa de la planta representa una zona crítica, siendo la salida el punto donde se concentra la mayor carga contaminante y donde el contacto del hormigón

con los efluentes es más constante y severo. Sin embargo, no se cuenta con estudios específicos que evalúen cómo varía la resistencia del hormigón H-30 bajo condiciones de inmersión parcial y total en este entorno, ni cómo incide el uso del aditivo Kryton en este comportamiento.

Todo lo anterior evidencia la necesidad de investigar el desempeño del hormigón H-30 elaborado con cemento IP-40, con y sin aditivo, en un entorno agresivo real como el de la laguna facultativa de San Luis. Comprender cómo responde este material frente a las condiciones de exposición permitirá identificar sus limitaciones y generar criterios técnicos válidos para el diseño y mantenimiento de infraestructuras sanitarias sometidas a aguas residuales.

#### **1.4.1. Formulación del problema.**

¿De qué manera influye la exposición a aguas residuales domésticas, específicamente en la zona de salida de la laguna facultativa de San Luis (Tarija), sobre el comportamiento del hormigón H30 con y sin aditivo Kryton, en términos de resistencia a compresión y durabilidad, considerando dos condiciones de sumergimiento (parcial y total) y cuatro períodos de exposición: 30, 60, 90 y 120 días?

#### **1.5. Objetivos.**

##### **1.5.1. Objetivo general.**

Evaluar experimentalmente la resistencia mecánica del hormigón H30, elaborado con cemento IP-40, con y sin la adición del aditivo Kryton, sumergida de forma parcial y total, mediante ensayos a compresión a los 30, 60, 90 y 120 días. En condiciones reales de exposición en el punto de descarga de la laguna facultativa de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Luis – Tarija

##### **1.5.2. Objetivos específicos.**

- Realizar un análisis físico-químico de las aguas residuales domésticas en la salida de la laguna facultativa de San Luis para determinar el grado de agresividad al cual está expuesto el hormigón, identificando los principales compuestos químicos que pueden dañarlo.
- Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de los áridos empleados en la mezcla de hormigón, mediante ensayos normalizados (granulometría, densidad, absorción,

porcentaje de finos y peso unitario), de acuerdo con las normas ASTM C33, ASTM C136, ASTM C127-128, ASTM 30 y ASTM 566 y NB 1225002

- Realizar la dosificación según la normativa ACI 211.1
- Establecer los dos escenarios de sumergimiento (parcial y total) para las probetas en las aguas residuales de la salida de la laguna facultativa de San Luis.
- Realizar pruebas de resistencia a la compresión de las probetas después de 30, 60, 90 y 120 días de exposición a las aguas residuales en la salida de la laguna facultativa de San Luis, tanto en probetas con uso de aditivo como en probetas sin la adición del aditivo.
- Comparar los resultados de resistencia a la compresión entre las probetas con aditivo Kryton y sin aditivo en cada escenario de sumergimiento y periodo de exposición.
- Analizar los costos asociados con el uso del hormigón con adición de cemento IP-40 y el aditivo Kryton, incluyendo los costos iniciales y de proceso.

## **1.6. Hipótesis**

La incorporación del aditivo Kryton KIM en mezclas de hormigón H-30 elaboradas con cemento IP-40 podría mejorar su resistencia frente a la exposición a aguas residuales domésticas provenientes de la laguna facultativa de San Luis. Se estima que las probetas con aditivo presentarán una pérdida de resistencia a compresión entre un 2% y un 8% menor en comparación con las probetas sin aditivo, bajo condiciones de inmersión parcial como total, evaluadas a los 30, 60, 90 y 120 días de exposición.

## **1.7 Alcance de la investigación.**

Este proyecto se clasifica como un estudio no experimental y longitudinal, en el que se analizarán diferentes grupos de probetas de hormigón IP-40 en múltiples momentos específicos, como a los 30, 60, 90 y 120 días de inmersión en aguas residuales domésticas. La naturaleza no experimental del estudio implica que no se manipulan variables independientes; en cambio, se observan y analizan las condiciones reales en las que se encuentra el hormigón, lo que permite un diagnóstico preciso de su comportamiento en un entorno agresivo. Al adoptar un enfoque longitudinal, el proyecto proporciona una comprensión detallada de la evolución de las propiedades del hormigón a lo largo del tiempo, permitiendo identificar patrones de resistencia y durabilidad que son esenciales para la aplicación de este material en infraestructuras expuestas a aguas residuales. Así, este estudio

no solo aporta datos valiosos para la ciencia de materiales, sino que también contribuye a la mejora de las prácticas constructivas en entornos urbanos.

### **Figura 1**

Ubicación de las aguas residuales de Tarija - Bolivia



Fuente: Google Earth

## **1.8 Limitaciones**

### **1.8.1 Limitación temporal**

La investigación se desarrolló en un período limitado de 120 días, lo cual restringe la posibilidad de evaluar el comportamiento del hormigón en exposiciones de largo plazo, que serían más representativas de la vida útil real de una estructura en contacto constante con aguas residuales.

### **1.8.2 Condiciones controladas vs. condiciones reales**

Aunque se utilizó una laguna facultativa real como medio de exposición, no fue posible controlar todas las variables ambientales día tras días debido a que los cambios del clima en el periodo no favorecieron rotundamente (como temperatura, radiación solar, y variaciones extremas del agua residual), lo que puede afectar la reproducibilidad exacta de los resultados.

### **1.8.3 Variabilidad del agua residual**

Las propiedades fisicoquímicas del agua residual cambiaron durante el período de exposición (pH, sulfatos, DQO, sólidos suspendidos, etc.), lo cual introduce una variabilidad que puede influir en los resultados y dificulta aislar el efecto directo del aditivo Kryton.

#### **1.8.4 Ensayos limitados a la resistencia a compresión**

Si bien la resistencia a compresión fue el parámetro central evaluado, no se incluyeron ensayos adicionales de durabilidad (como permeabilidad, absorción, retracción o carbonatación), que también serían relevantes para un análisis integral del comportamiento del hormigón en ambientes agresivos. Debido a la falta de colaboración económica para obtener mayor estudio de los diferentes parámetros que se hubiese estudiado

## CAPITULO II: MARCO TEORICO

### 2.1 Hormigón

#### 2.1.1 Definición de hormigón

El hormigón es un material de uso común, o convencional y se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales, cemento, agua y agregados, a los cuales eventualmente se incorpora un cuarto componente que genéricamente se designa como aditivo. Al mezclar estos componentes y producir lo que se conoce como concreto, se introduce de manera simultánea un quinto participante representado por el aire. La mezcla íntima de los componentes del concreto convencional produce una masa plástica que puede ser moldeada y compactada con relativa facilidad; pero gradualmente pierde esta característica hasta que al cabo de algunas horas se torna rígida y comienza a adquirir el aspecto, comportamiento y propiedades de un cuerpo sólido, para convertirse finalmente en el material mecánicamente resistente que es el concreto endurecido. El concreto convencional en estado fresco, es un conjunto de fragmentos de roca, globalmente definidos como agregados, dispersos en una matriz viscosa constituida por una pasta de cemento de consistencia plástica. Esto significa que en una mezcla así hay muy poco o ningún contacto entre las partículas de los agregados, característica que tiende a permanecer en el concreto ya endurecido (Ana & Torre Calani, 2004).

En el campo de la construcción el hormigón es un material no homogéneo que se obtiene mediante una mezcla cuidadosamente de materiales inertes granulares los cuales deben estar debidamente gradados, que se unen entre sí por acción del agua y el cemento, después de un tiempo de proceso de curado proporcionando un ambiente húmedo para evitar la deshidratación, esta mezcla se endurece por interacción química del cemento y el agua para unir las partículas de agregado fino y grueso, con la finalidad de conformar una masa sólida, no obstante debemos tener en cuenta que la cantidad de agua que se utiliza en la mezcla debe ser aquella, que nos produzca la reacción química y nos garantice la trabajabilidad de la mezcla. (Calidad & NB 1225001, 2020)

**Figura 2**

Mezcla del hormigón en el campo de construcción



*Fuente: Google-mezcladehormigonenobra.com*

### **2.1.2 Componentes del Hormigón**

En la actualidad el hormigón que se utiliza en la fabricación de elementos pretensados debe cumplir con requisitos para garantizar que la calidad de estos productos sea adecuada permitiendo ser usados en aplicaciones tales como suelos, paredes prefabricadas, estructuras de construcción y otros.

Teniendo en cuenta los componentes del hormigón, se debe tomar en cuenta que para el trabajo en pretensado se requiere un hormigón de muy alta calidad con resistencia cubica mayor de 550 kg/m<sup>2</sup>, Por lo que se debe tener muy en cuenta que es imposible usar elementos pretensado utilizando hormigón de baja calidad.

Para la composición del hormigón, no es conveniente dejar a la mano de obra, sino que debe ser completamente probada y estudiada en el laboratorio para encontrar los y dosificaciones correctas.

#### **2.1.2.1 Cemento**

El cemento es uno de los materiales de argamasa cementantes, caracterizado por sus propiedades de adherencia y cohesión, que permite unir fragmentos minerales entre sí, formando una masa sólida, continua, de resistencia y durabilidad adecuadas. Para fabricar hormigón estructural se empleará únicamente los cementos hidráulicos (que utilizan agua

para reaccionar químicamente y adquirir sus propiedades cementantes durante los procesos de endurecimiento inicial y fraguado). Entre los diferentes cementos hidráulicos se destaca, por su uso extendido el cemento Portland, existiendo además los cementos naturales y los cementos con alto contenido de alúmina, cuya utilización deberá ser justificado con sus respectivos estudios de condiciones locales para su empleo.

#### **Clasificación de los Cementos Portland según la (NB 011, 2012):**

- **Cementos Pórtland, tipo I**

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: Clinker Pórtland 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 debe añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos.

- **Cementos Pórtland con puzolana, tipo IP:**

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: Clinker Pórtland en proporción no menor del 60 % ni mayor del 94 % en masa, de puzolana en proporción no menor del 6 % ni mayor del 40 % 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 debe añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos.

- **Cementos Pórtland con filler o caliza, tipo IF:**

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: Clinker Pórtland en proporción no menor del 65 % ni mayor del 94 % en masa, filler o caliza en proporción no menor del 6 % ni mayor del 20 % 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 debe añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos.

- **Cemento Pórtland con adición de escoria, tipo IS**

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: Clinker Pórtland en proporción no menor a 65 % y no mayor a 94 %, escoria en proporción no menor al 6 % ni mayor al 35 % en masa y de otros componentes adicionales definidos en esta norma en proporción entre 0 % y 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador

de fraguado (que debe añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos.

- **Cemento Pórtland mixto, tipo IM**

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: Clinker Pórtland en proporción no menor a 65 % y no mayor a 94 % y la combinación entre escoria; filler; caliza y puzolana en proporciones entre el 6 % al 35 % en masa y de otros componentes adicionales definidos en esta norma en proporción entre 0 % y 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que debe añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos.

- **Cementos puzolánicos, tipo P**

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: Clinker Pórtland en proporción no menor del 45 % ni mayor de 60 % en masa, de puzolanas, cenizas volantes u otros materiales puzolánicos en proporción total no menor del 40 % ni mayor del 55 % 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 debe añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos.

En este estudio se utiliza cemento tipo IP, donde la letra “P” hace referencia a la incorporación de puzolana como adición mineral, la cual contribuye a mejorar la durabilidad del hormigón frente a ambientes agresivos. La designación “30” o “40” se refiere a la resistencia mínima a compresión (en MPa) a los 28 días de curado, conforme a lo establecido en la norma boliviana NB 011. Por ejemplo, el cemento IP-30 alcanza una resistencia máxima de 30 MPa, mientras que el IP-40 garantiza una resistencia de al menos 40 MPa, siendo este último más adecuado para condiciones de exposición exigentes.

IP-30: Se utilizará en todos los casos en que las obras no requieran altas resistencias iniciales como, por ejemplo: muros de contención, mampostería, canales de drenaje, pisos, revoques, cámaras de alcantarillas, muros de ladrillos (cerramientos), desagües industriales, alcantarillados, plantas de aguas servidas, piletas para tratamiento de aguas, plantas de industrias químicas (especialmente para procesos fermentativos), hormigón masivo. Para este tipo de cementos se tiene que según la (NB - 011: Cemento - Definiciones, clasificación y especificaciones, 2012) el cemento debe cumplir las siguientes características.

**Tabla 1**

Parámetros Normativos del Cemento Portland IP 30 Compuesto (NB 001)

| PARÁMETRO                      | UNIDAD              | NB-001 |
|--------------------------------|---------------------|--------|
| P.P.I.                         | %                   | <7,00  |
| SiO <sub>2</sub>               | %                   | -      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %                   | -      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %                   | -      |
| CaO                            | %                   | -      |
| MgO                            | %                   | <=6,00 |
| SO <sub>3</sub>                | %                   | <=4,00 |
| RI                             | %                   | -      |
| Inicio de Fraguado             | hr                  | >0,75  |
| Final de Fraguado              | hr                  | <10,00 |
| Blaine                         | cm <sup>2</sup> /gr | <2.600 |
| Residuo Tamiz N°200            | %                   | -      |
| Expansión                      | %                   | <=1,00 |
| Resistencia 3 Días             | Kg/cm <sup>2</sup>  | -      |
| Resistencia 7 Días             | Kg/cm <sup>2</sup>  | >=170  |
| Resistencia 28 Días            | Kg/cm <sup>2</sup>  | >=300  |

Fuente: (NB - 011: Cemento - Definiciones, clasificación y especificaciones, 2012)

IP-40: Se utilizará en todos los casos que las obras hidráulicas y civiles requieran de altas resistencias iniciales como por ejemplo el hormigón pretensado, hormigones armados de resistencias mayores, prefabricados en climas cálidos, morteros predosificados, prefabricados, obras estructurales, hormigón proyectado (shotcrete), pavimentos, hormigón compactado con rodillo.

**Tabla 2**

Parámetros Normativos del Cemento Portland IP 40 Compuesto (NB 001)

| PARÁMETRO                      | UNIDAD              | NB-001 |
|--------------------------------|---------------------|--------|
| P.P.I.                         | %                   | <5,00  |
| SiO <sub>2</sub>               | %                   | -      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %                   | -      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %                   | -      |
| CaO                            | %                   | -      |
| MgO                            | %                   | <=6,00 |
| SO <sub>3</sub>                | %                   | <3,50  |
| RI                             | %                   | 3,00   |
| Inicio de Fraguado             | hr                  | >0,75  |
| Final de Fraguado              | hr                  | <10,00 |
| Blaine                         | cm <sup>2</sup> /gr | <2.600 |
| Residuo Tamiz N°200            | %                   | -      |
| Expansión                      | %                   | <=0,80 |
| Resistencia 3 Días             | Kg/cm <sup>2</sup>  | >=170  |
| Resistencia 7 Días             | Kg/cm <sup>2</sup>  | >=250  |
| Resistencia 28 Días            | Kg/cm <sup>2</sup>  | >=400  |

Fuente: (NB - 011: Cemento - Definiciones, clasificación y especificaciones, 2012)

Se debe emplear cemento de fabricación nacional, cuyas características satisfagan las especificaciones para cemento Pórtland Tipo I (ASTM C -150) y que cumplan las exigencias de las (NB 2.1-011 Características de cemento Portland) y (Calidad N. )

**El Clinker Pórtland:** Es un producto semiacabado de forma de piedras negruzcas de tamaños de 3/4" aproximadamente, obtenido de la calcinación de una mezcla de materiales calcáreos y arcillosos en proporciones convenientes, hasta llegar a una fusión incipiente (Clinkerización) a 1.450 °C. Está compuesto químicamente por Silicatos de calcio, aluminatos de calcio, ferro aluminatos de calcio y otros en pequeñas cantidades, los cuales se forman por la combinación del Óxido de Calcio (CaO) con los otros óxidos: dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y óxido férrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). El Clinker Pórtland se enfriá rápidamente y se almacena en canchas al aire libre. El cemento Pórtland es un polvo muy fino de color verdoso. Al mezclarlo con agua forma una masa (pasta) muy plástica y

moldeable que luego de fraguar y endurecer, adquiere gran resistencia y durabilidad. (Ana & Torre Calani, 2004)

**Análisis químico:** La tabla 3 muestra los porcentajes típicos en que se presentan los compuestos en el cemento y las abreviaturas con las que suelen ser denominados:

**Tabla 3**

Porcentajes típicos de intervención de los óxidos

| Oxido componente                               | Porcentaje Típico | Abreviatura |
|--|-------------------|-------------|
| Cal combinada (CaO)                            | 62.5%             | C           |
| Sílice (SiO <sub>2</sub> )                     | 21%               | S           |
| Alúmina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )      | 6.5%              | A           |
| Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )       | 2.5%              | F           |
| Cal Libre (CaO)                                | 0%                | -           |
| Azufre (SO <sub>3</sub> )                      | 2%                | -           |
| Magnesio (MgO)                                 | 2%                | -           |
| Álcalis (Na <sub>2</sub> O y K <sub>2</sub> O) | 0.5%              | -           |
| Pérdida al Fuego (P.F.)                        | 2%                | -           |
| Residuo insoluble (R.I.)                       | 1%                | -           |

Fuente: (Tecnología del Hormigón, 2006)

Los cuatro primeros componentes nombrados en la tabla 3 no se encuentran libremente en el cemento, si no combinados formando los componentes potenciales, conocidos como “compuestos Boguea” Los compuestos Bogue, sus fórmulas químicas y abreviaturas simbólicas son los siguientes:



Estos compuestos o “Fases”, como se les llama, no son compuestos verdaderos en el sentido químico; sin embargo, las proporciones calculadas de estos compuestos proporcionan información valiosa en la predicción de las propiedades del cemento. Las fórmulas utilizadas para calcular los compuestos Bogue se pueden encontrar en la (ASTM C150/C150M Especificación Normalizada para Cemento Portland, 2018).

**El Silicato Tricálcico, C3S,** es el compuesto activo por excelencia del Clinker, es el que produce la alta resistencia inicial del cemento Pórtland hidratado. Pasa del fraguado inicial al final en unas cuantas horas. El C3S reacciona con el agua desprendiendo una gran cantidad de calor (calor de hidratación). La rapidez de endurecimiento de la pasta de cemento está en relación directa con el calor de hidratación; cuanto más rápido sea el fraguado, mayor será la exotermia. El C3S hidratado alcanza gran parte de su resistencia en siete días. Debe limitarse el contenido de S3C en los cementos para obras de grandes masas de hormigón, no debiendo rebasarse un 35%, con objeto de evitar valores elevados del calor de hidratación.

**El Silicato Dicálcico, C2S,** requiere algunos días para fraguar. Es el causante principal de la resistencia posterior de la pasta de cemento Pórtland. Debido a que su reacción de hidratación avanza con lentitud, genera un bajo calor de hidratación. Este compuesto en el cemento Pórtland desarrolla menores resistencias que el C3S en las primeras edades; sin embargo, aumenta gradualmente, alcanzando a unos tres meses una resistencia similar a la del C3S. Los cementos con alto contenido en silicato dicálcico son más resistentes a los sulfatos.

**Aluminato Tricálcico, C3A,** presenta fraguado instantáneo al ser hidratado y gran retracción. Es el causante primario del fraguado inicial del cemento Pórtland y desprende grandes cantidades de calor durante la hidratación. El yeso, agregado al cemento durante el proceso de fabricación, en la trituración o en la molienda, se combina con el C3A para controlar el tiempo de fraguado, por su acción al retardar la hidratación de este. El compuesto C3A muestra poco aumento en la resistencia después de un día. Aunque el C3A hidratado, por si solo, produce una resistencia muy baja, su presencia en el cemento Pórtland hidratado produce otros efectos importantes. Por ejemplo, un aumento en la cantidad de C3A en el cemento Pórtland ocasiona un fraguado más rápido, pero conduce a propiedades indeseables del hormigón, como una mala resistencia a los sulfatos y un mayor cambio de volumen. Su estabilidad química es buena frente a ciertas aguas agresivas (de mar, por ejemplo) y muy débil frente a sulfatos. Con objeto de frenar la rápida reacción del aluminato tricálcico con el agua y regular el tiempo de fraguado del cemento, se añade al Clinker un sulfato (piedra de yeso).

**El Ferro aluminato Tetracálcico, C4AF,** El uso de más óxido de hierro en la alimentación del horno ayuda a disminuir el C3A, pero lleva a la formación de C4AF, un producto que actúa como relleno con poca o ninguna resistencia. No obstante, es necesario como fundente

para bajar la temperatura de formación del Clinker. Es semejante al C3A, porque se hidrata con rapidez y sólo desarrolla baja resistencia. No obstante, al contrario del C3A, no muestra fraguado instantáneo. Su resistencia a las aguas selenítosas y agresivas en general es la más alta de todos los constituyentes. Su color oscuro le hace prohibitivo para los cementos blancos por lo que en este caso se utilizan otros fundentes en la fabricación.

### **2.1.2.2 Agregados**

Los agregados son un conjunto de partículas, de origen natural o artificial, que pueden ser tratados o elaborados. Pueden tener tamaños que van desde partículas casi invisibles hasta pedazos de piedra, junto con el agua y el cemento, conforman el trío de ingredientes necesarios para la fabricación de concreto. La importancia del uso, tipo y calidad correcta del agregado no se puede subestimar. Los agregados fino y grueso ocupan cerca del 60% al 75% del volumen del concreto, e influyen fuertemente en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido, en las propiedades de la mezcla del concreto

Los agregados deben de ser transportados y acopiados de manera que se evite su segregación y contaminación, debiendo mantener las características granulométricas de cada una de sus fracciones hasta su incorporación a la mezcla, tienen que cumplir con las especificaciones técnicas establecidas en las normas (ASTM C-33) Y (ASTM C-136)

En Bolivia de acuerdo con la norma Boliviana NB 594 hormigón estructural, se define árido como Material granular, generalmente inerte, resultante de la desintegración natural y desgaste de las rocas o que se obtiene mediante la trituración de ellas, de escorias siderúrgicas o de otros materiales suficientemente duros que permiten obtener partículas de forma y tamaño estables. (Carreteras, 2007)

Para la clasificación de los agregados para el hormigón, de acuerdo con la variedad de material granular que se incorpora es complicado una definición satisfactoria del agregado. Por lo que se da varias definiciones según sus tres clasificaciones que son: por su procedencia, por su tamaño y por su gravedad específica.

Para el hormigón es importante saber la calidad del árido y su preparación serán tales que permitan garantizar la adecuada resistencia y durabilidad, así como las demás características que se exijan a éste en el Pliego de Especificaciones Técnicas.

**a) Agregado grueso.**

El agregado grueso está compuesto por grava, grava triturada, roca triturada, o escoria de alto horno enfriada al aire, también se puede utilizar una combinación de ellos, este material es retenido en el tamiz 4,75 mm (Nº 4), conforme a los requisitos de la (ASTM C-136). El material debe estar conformado por partículas limpias, con un perfil preferiblemente angular, duro, compacto, resistente y con una textura preferiblemente rugosa, debe ser un material químicamente estable y libre de escamas, tierra, polvo, limo y materia orgánica, además de otras sustancias dañinas.

**b) Agregado fino.**

El agregado fino debe estar compuesto de arena natural, arena triturada o una mezcla de esta, que pasa por el tamiz Nº4 (4,75mm) y queda retenido en el tamiz Nº 200 que cumple con los límites establecidos en la (ASTM C-136). Los agregados finos deben estar compuestos de partículas limpias de perfil angular duras, libres de materia orgánica y sustancias dañinas; esto es determinado mediante los ensayos estipulados en la norma (ASTM C-136), así mismo debe estar graduado dentro de los límites dados en la norma (ASTM C-33)

**Tabla 4**

Límites De Granulometría del Agregado Fino

| Tamiz            | Porcentaje que pasa (%) |
|------------------|-------------------------|
| 9.5mm. (3/8")    | 100                     |
| 4.75mm (N.º 4)   | 100 - 95                |
| 2.36mm (N.º 8)   | 100 - 80                |
| 4.75mm (N.º 16)  | 85 - 50                 |
| 4.75mm (N.º 30)  | 60 - 25                 |
| 4.75mm (N.º 50)  | 30 - 10.                |
| 4.75mm (N.º 100) | 10 - 2.                 |



Fuente: Norma (ASTM C-33)

**2.1.2.3 Agua**

Considerada como materia prima para la elaboración del hormigón en el proceso de amasado y el curado del mismo.

- a) **El agua de amasado.** - Es el agua agregada al elaborar una pasta, siendo sus principales funciones: Reaccionar con el cemento, produciendo su hidratación y contribuir con la trabajabilidad de la mezcla fresca.
- b) **El agua de curado.** - Tiene como función aportar con la humedad necesaria durante las primeras edades de endurecimiento para compensar la pérdida de agua por evaporación y permitir que siga produciendo la progresiva hidratación del cemento que va dando lugar al aumento de resistencias mecánicas. El agua empleada en la elaboración del hormigón deberá ser limpia y fresca hasta donde sea posible y no deberá contener residuos de aceites, ácidos, sulfatos de magnesio, sodio y calcio (llamados álcalis blandos) sales, limo, materias orgánicas u otras sustancias dañinas y estará así mismo exenta de arcilla, lodo y algas
- c) **Relación Agua/Cemento.** - Constituye un parámetro importante de la composición del hormigón. La relación agua / cemento (a/c) es el valor característico más importante de la tecnología del hormigón. De ella dependen la resistencia y la durabilidad, así como los coeficientes de retracción y de fluencia. También determina la estructura interna de la pasta de cemento endurecida. La relación agua cemento es el cociente entre las cantidades de agua y de cemento existentes en el hormigón fresco. La relación agua / cemento crece cuando aumenta la cantidad de agua y decrece cuando aumenta el contenido de cemento. En todos los casos, cuanto más baja es la relación agua / cementos tanto más favorables son las propiedades de la pasta de cemento endurecida.

Según la ((ACI), ACI 211.1, 1991), el agua no potable no será utilizada en hormigón a menos que cumpla las siguientes condiciones:

- La dosificación del hormigón debe basarse en pruebas en que se ha usado el agua de la fuente que será utilizada.
- El mortero de las pruebas hechos con agua no potable debe tener resistencias a los 7 y 28 días iguales o por lo menos del 90% de la resistencia de muestras idénticas, excepto por el agua de mezclado, que será potable.

La norma ((ACI), ACI 211.1, 1991) establece que el agua debe estar limpia y libre de cantidades perjudiciales de aceites, álcalis, sales, materia orgánica y otras sustancias nocivas

para el hormigón, dando límites para la concentración del ion cloruro proveniente tanto del agua como del cemento, agregados y aditivos.

**Tabla 5**

Requisitos de calidad del agua para hormigón y morteros

| Requisitos   | Límites                               |
|--|---------------------------------------|
| Potencial Hidrogeno pH                               | $\geq 5$                              |
| Sustancias disueltas                                 | $\leq 15 \text{ gr/L (15.000 p.p.m)}$ |
| Sulfatos expresados en ion sulfato ( $\text{SO}_4$ ) | $\leq 1 \text{ gr/L (1.000 p.p.m)}$   |
| Cloruros expresados en ion cloro (Cl)                | $\leq 5 \text{ gr/L (5.000 p.p.m)}$   |
| Hormigón armado                                      | $\leq 1 \text{ gr/L (1.000 p.p.m)}$   |
| Hormigón pretensado                                  | $\leq 0,5 \text{ gr/L (500 p.p.m)}$   |
| Hormigón en masa                                     | $\leq 3 \text{ gr/L (3.000 p.p.m)}$   |
| Hidratos de Carbono                                  | 0                                     |
| Aceites y Grasas                                     | $\leq 15 \text{ g/L (15.000 p.p.m)}$  |

*Fuente: (NB 637, 2018)*

### 2.1.3 Diseño de mezcla del hormigón método del comité ACI -211.1

#### 2.1.3.1 Definición.

El campo de aplicación del método (ACI 211.1R-91 (Reapproved 2009), 2019) se limita a la fabricación de hormigones con dos agregados (grueso y fino) y con un peso unitario superior a 2,0 gr/cm<sup>3</sup>, además se toma en cuenta requisitos tales como la trabajabilidad, la resistencia y la durabilidad exigidas para cualquier mezcla de hormigón fabricado en el sitio. Y con requisitos de resistencia menores a 35 MPa, los cuales son llamados usualmente hormigones Normales.

#### 2.1.3.2 Especificación para el diseño de hormigón.

La obtención de los pesos para la colada de hormigón, se hace siguiendo una secuencia de pasos lógicos y directos, los cuales acomodan las características de los materiales disponibles, en una mezcla adecuada para el trabajo.

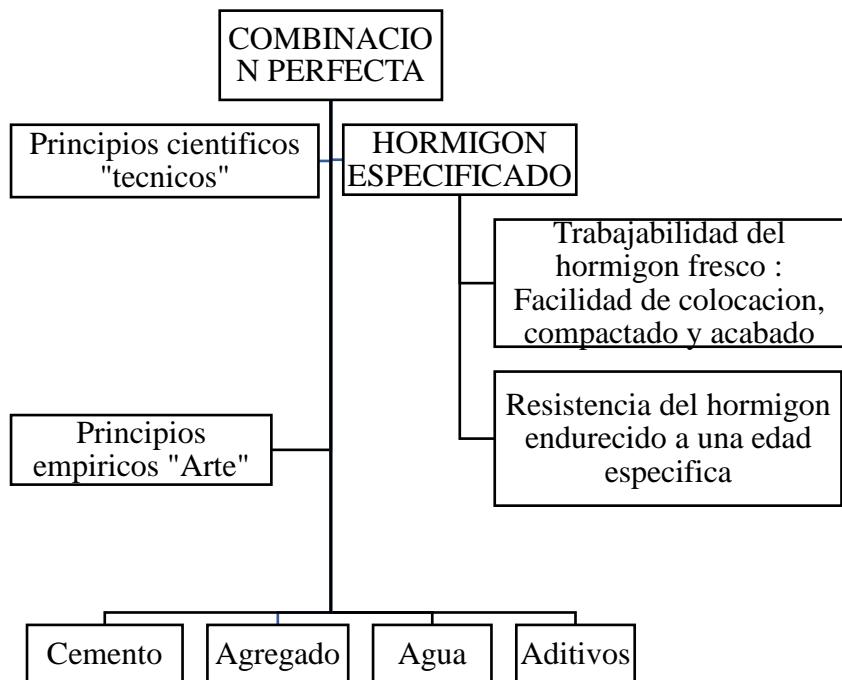
Las especificaciones con que el diseñador debe contar es:

- Elección del revestimiento
- Elección del tamaño máximo de agregado
- Cálculo del agua de mezclado y el contenido de aire
- Selección de la relación agua – cemento
- Cálculo del contenido de cemento
- Estimación del contenido de agregado grueso
- Estimación del contenido de agregado fino
- Ajuste por humedad del agregado
- Ajuste en las mezclas de prueba

Los métodos descritos proporcionan una aproximación preliminar de las cantidades de materiales necesarios para elaborar la mezcla de concreto, que luego deben ser verificadas mediante mezclas de prueba en el laboratorio o en el campo y efectuar los ajustes que sean necesarios con el objetivo de lograr las características deseadas en el concreto fresco y endurecido

**Figura 3**

Diagrama conceptual de la combinación perfecta en el diseño del hormigón.



Fuente: Bascocay, Daniel A 2010 *Tecnología del Hormigón Construcciones Civiles*

### 2.1.3.3 Datos que se requiere para el diseño de mezclas de hormigón

- Granulometría de los agregados (módulo de fineza y % de gruesos y finos).
- Peso unitario suelto y compactado de los agregados.
- Pesos específicos de los materiales.
- Contenido de humedad y absorción de los agregados.
- requerimientos aproximados de agua para la mezcla (tablas)
- Relaciones entre la resistencia y la relación de agua cemento para las combinaciones de cemento agregados (tablas)

### 2.1.3.4 Selección del asentamiento

Si el asentamiento no se ha especificado, su valor apropiado para el trabajo puede ser seleccionado a partir de la **Tabla 6**. 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 6**

Asentamientos recomendados para varios tipos de construcción.

| Asentamiento pulg.                         |        |        |
|--|--------|--------|
| Tipos de Construcción                      |        |        |
| Característica                             | Máximo | Mínimo |
| Muros de cimentación y zapatas reforzadas  | 3      | 1      |
| Zapatas, campanas y muros de subestructura | 3      | 1      |
| Vigas y muros reforzados                   | 4      | 1      |
| Columnas para edificación                  | 4      | 1      |

|                    |   |   |
|--------------------|---|---|
| Pavimentos y losas | 3 | 1 |
| Concreto masivo    | 2 | 1 |

Fuente: (ACI 211.1, 1991)

### **2.1.3.5 Determinación del tamaño máximo del agregado grueso**

Tamaños máximos grandes, bien gradados, tienen menos vacíos que tamaños más pequeños.

Por lo tanto, hormigones con agregados grandes requieren menos mortero por volumen de unidad de hormigón. Generalmente, el tamaño máximo nominal del agregado debe ser el más grande que

se disponga, pero en ningún caso debe exceder los siguientes valores:

- $D_{\text{máx.}} \leq 1/5$  de la cara más angosta entre las caras interiores del encofrado.
- $D_{\text{máx.}} \leq 1/3$  del espesor de las losas.
- $D_{\text{máx.}} \leq 3/4$  de la distancia libre entre armaduras o cables de presfuerzo.

Estas limitaciones pueden ser obviadas si la trabajabilidad y los métodos de compactación son tales que el hormigón puede ser vaciado sin crear cangrejeras ni vacíos.

En las zonas muy armadas, el ingeniero encargado de la dosificación debe seleccionar un tamaño máximo de agregado de manera que el hormigón pueda ser vaciado sin segregación excesiva ni vacíos.

Cuando se requiera hormigón de alta resistencia, mejores resultados pueden ser obtenidos con agregados de tamaño máximo menor, ya que éstos desarrollan resistencias más altas para una cantidad de cemento dada.

### **2.1.3.6 Estimación del contenido de agua de mezclado y aire incorporado**

La cantidad de agua por unidad de volumen de hormigón requerida para producir un revenimiento dado depende de:

- El tamaño máximo, forma de la partícula y la gradación de los agregados
- La temperatura del hormigón
- La cantidad de aire incluido (burbujas de aire atrapadas en la mezcla)
- y el uso de aditivos.

El revenimiento no es muy afectado por la cantidad de cemento (dentro de los niveles normales)

**Tabla 7**

Requerimiento aproximado de agua de mezcla

| Agua, kg/m <sup>3</sup> para el concreto de agregado de tamaño |                              |      |     |     |     |     |     |     |
|--|------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Asentamiento, cm   | Máximo nominal (mm) indicado |      |     |     |     |     |     |     |
|  | 9.5                          | 12.5 | 19  | 25  | 38  | 50  | 75  | 150 |
| Concreto sin aire incluido                                     |                              |      |     |     |     |     |     |     |
| 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 |
| Concreto con aire incluido                                     |                              |      |     |     |     |     |     |     |
| 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 | -   |

| Promedio recomendado del contenido total de aire, porcentaje de acuerdo con el nivel de exposición |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 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 |

Fuente: (ACI 211.1, 1991)

### 2.1.3.7 Selección de la relación agua/cemento (a/c)

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 8**. No se encuentra el origen de la referencia. 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 8**

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

| Relación agua-cemento                             |                      |                  |
|---|----------------------|------------------|
| Resistencia a la Compresión<br>a los 28 días, Mpa | Sin aire incorporado | Aire 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                 | 0,7              |

*Fuente: (ACI 211.1, 1991)*

#### 2.1.3.8 Determinación de la cantidad de cemento

Para el cálculo del cemento se utiliza la ecuación siguiente, que relaciona el agua y la relación agua/cemento (a/c), cuyos valores ya han sido calculado en pasos anteriores.

Ecuación de la relación agua cemento:

$$\text{Cemento } \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{Agua de la mezcla } \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{\text{relacion } \left( \frac{a}{c} \right)} \quad (1)$$

Si las especificaciones incluyen un límite mínimo de cemento además de los requisitos para la resistencia y la durabilidad, en la mezcla se usará el que sea mayor. (Tecnología del Hormigón, 2006). Tomar en cuenta que El uso de aditivos o materiales puzolánicos afectarán las propiedades del hormigón fresco y endurecido.

#### 2.1.3.9 Estimación del contenido de agregado grueso

Se observa que este volumen solamente depende de su tamaño máximo y el módulo de finura del agregado fino. Las diferencias en la cantidad de mortero requerido con diferentes agregados, debido a las diferencias en la forma de la partícula y gradación, se compensan automáticamente por diferencias en el contenido de vacío en varillado seco. (Tecnología del Hormigón, 2006)

El peso seco del agregado grueso por metro cúbico de concreto, en base al volumen seco y compactado del mismo, es igual al valor obtenido del cuadro 15 multiplicado por el peso unitario seco y compactado del agregado.

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Cantidad del Agregado} \\ \dots \text{Grueso (kg)} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Volumen del Agregado} \\ \text{Grueso de Tabla No 16 (m}^3\text{)} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} \text{Peso Unitario Seco del Agregado} \\ \text{Grueso (kg/m}^3\text{)} \end{array} \right]$$

El método ((ACI), ACI 211.1, 1991). es usado cuando los agregados cumplen con las recomendaciones granulométricas (ASTM C-33), y este consiste en hallar el volumen de agregado grueso por metro cúbico de hormigón. Después se determina el volumen de las partículas de agregado grueso por metro cúbico de agregado grueso, y se obtiene dividiendo la masa unitaria compacta (MUC) y la densidad aparente de la grava (dg).

Para un hormigón más trabajable, requerido cuando la colocación es por bombeo o cuando el hormigón se debe vaciar una zona muy armada, se puede reducir el contenido de agregado grueso hasta un 10%. Sin embargo, se debe hacer con precaución ya que el revestimiento resultante, la relación A/C y la resistencia del hormigón sean consistentes y que cumplan con las especificaciones del proyecto. (Tecnología del Hormigón, 2006)

**Tabla 9**

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 |

Fuente: (ACI 211.1, 1991)

#### 2.1.4 Estimación del contenido de agregado fino

Hasta el paso 6 todos los ingredientes del hormigón se han determinado, excepto el agregado fino, la cantidad de este será lo que falta para completar 1m<sup>3</sup> de hormigón. (Tecnología del Hormigón, 2006)

Existen dos procedimientos: el método por peso y el método por volumen absoluto.

$[Peso del Agregado fino (Kg)] =$

$[Peso del Hormigón (kg)][Peso Agregado Grueso (Kg)] +$

$[Peso del cemento (Kg)] + [Peso del Agua mezclada (kg)]$

Método por peso. - Cuando el peso del hormigón por unidad de volumen se asume o se estima por experiencia, el peso requerido de agregado fino es simplemente la diferencia entre el peso del hormigón fresco y el peso total de los otros ingredientes.

A menudo el peso unitario del hormigón es conocido con razonable exactitud de experiencias anteriores con los materiales

**Tabla 10**

Primera estimación del peso del hormigón fresco

| Tamaño<br>máximo<br>nominal de<br>agregado,<br>(mm) | Primer estimación del peso del<br>hormigón fresco, kg/m <sup>3</sup> |                                  |
|---|--|----------------------------------|
|   | hormigón sin aire<br>incluido  | hormigón<br>con aire<br>incluido |
| 10  | 2.285  | 2.190                            |
| 12.5  | 2.315  | 2.235                            |
| 20  | 2.355  | 2.280                            |
| 25  | 2.375  | 2.315                            |
| 40  | 2.420  | 2.355                            |
| 50  | 2.445  | 2.375                            |
| 70  | 2.465  | 2.400                            |
| 150   | 2.505  | 2.435                            |

Fuente: (ACI 211.1, 1991)

Método por Volumen Absoluto. - Un procedimiento más exacto para calcular la cantidad requerida de agregado fino implica el uso de volúmenes desplazados por los ingredientes. En este caso, el volumen total desplazado por los ingredientes conocidos (agua, aire, cemento y

agregado grueso) se quitan del volumen unitario del hormigón para obtener el volumen requerido de agregado fino.

El volumen ocupado en el hormigón por cualquier ingrediente es igual a su peso dividido por su densidad (densidad = peso unitario del agua × gravedad específica del material).

#### 2.1.4.1 Ajustes por humedad de los agregados

En este paso se ajustan las cantidades de agregado que realmente se pesarán para el hormigón, deben considerar la humedad de estos. En obra, generalmente, los agregados estarán húmedos y su peso seco debe ser incrementado en el porcentaje de agua, absorbida y superficial, que contengan. El agua de mezclado añadida a la mezcla se debe reducir en una cantidad igual a la humedad superficial (humedad total menos absorción) contribuida por el agregado. (Tecnología del Hormigón, 2006)

$$\left[ \frac{\text{Agregado del Peso}}{\text{Grueso Humedo (Kg)}} \right] = \left[ \frac{\text{Peso del Agregado}}{\text{Grueso Seco (Kg)}} \right] \times [Wg(\%)]$$

$$\left[ \frac{\text{Agregado del Peso}}{\text{Grueso Humedo (Kg)}} \right] = \left[ \frac{\text{Peso del Agregado}}{\text{Fino Seco (Kg)}} \right] \times [Wg/Wf(\%)]$$

$$\left[ \frac{\text{Agua en el Agregado}}{\text{Grueso}} \right] = \left[ \frac{\text{Peso del Agregado}}{\text{Grueso Seco (Kg)}} \right] \times [Wg(\%) - Ag (\%)]$$

$$\left[ \frac{\text{Agua en el Agregado}}{\text{Fino (Kg)}} \right] = \left[ \frac{\text{Peso del Agregado}}{\text{Fino Seco (Kg)}} \right] \times [Wf(\%) - Af(\%)]$$

$$\begin{aligned} [\text{Agua neta en la mezcla}] &= [\text{Agua de Diseño de la mezcla}] - \\ &[\text{Agua en el Agregado Fino (Kg)}] - [\text{Agua en el Agregado Grueso (Kg)}] \end{aligned}$$

Donde:

Humedad Total del Agregado Grueso = Wg (%)

Porcentaje de Absorción del Agregado Grueso = Ag (%)

Humedad Total del Agregado Fino = Wf (%)

Porcentaje de Absorción del Agregado Fino = Af (%)

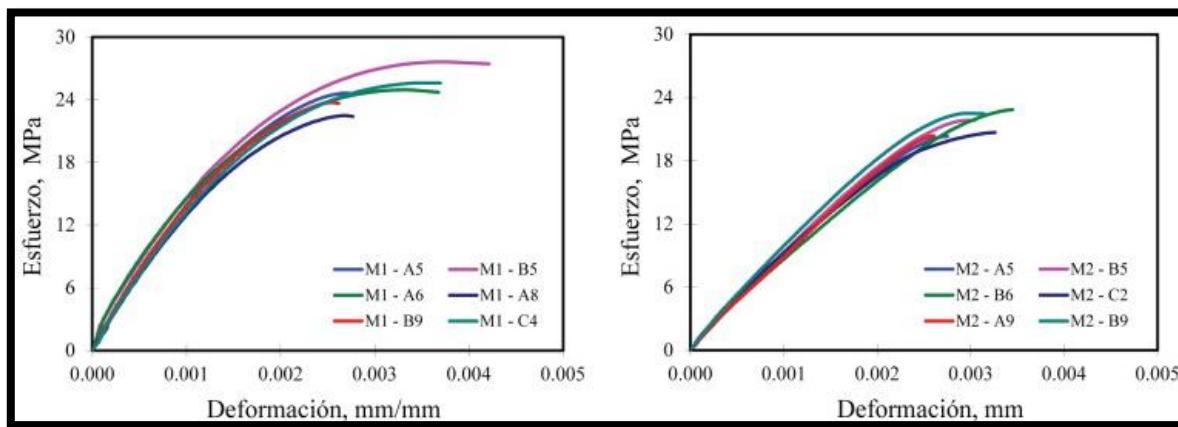
#### 2.1.4.2 Determinación de la resistencia del hormigón C-39

Para las diferentes mezclas de hormigón que se realizan para edificios, vías, puentes y otras construcciones de obras civiles, es necesario determinar su resistencia a la compresión, de tal manera que compruebe que la mezcla es factible o apropiada para su uso en la obra.

“La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del hormigón. Se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm<sup>2</sup>, MPa y con alguna frecuencia en libras por pulgada cuadrada (psi)” Osorio (2013). Para determinar la resistencia a la compresión del hormigón, se utiliza la norma (International, ASTM C39/C39M-24 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2018) la cual nos permitirá mediante este ensayo obtener los valores adecuados para graficar el diagrama de esfuerzo – deformación unitaria y conocer el comportamiento del hormigón sometido a compresión. El comportamiento del hormigón sometido a compresión se representa dentro de la gráfica de esfuerzo – deformación como una línea recta, demostrando como punto más alto el esfuerzo último para dicho hormigón, después de sobrepasar dicho punto el hormigón sigue soportando cargas, sin embargo el comportamiento en la gráfica ya no se observaría como una tendencia lineal; si no que comenzaría a presentar variaciones significativas representadas gráficamente como una línea semi - parabólica con una tendencia a permanecer continua (paralelo) a la deformación, de tal manera que no es confiable aplicar cargas por encima de este punto.

**Figura 4**

Comportamiento esfuerzo – deformación



Fuente: Carrillo, Alcocer, & Aperador (*Propiedades mecánicas del concreto para viviendas de bajo costo*, 2013)

#### 2.1.4.3 Parámetros de resistencia del hormigón.

Según Sánchez de Guzmán (como se citó en Silvestre 2015) La resistencia a compresión del concreto varía según los siguientes parámetros:

- **La Relación Agua – Cemento (a/c):** Tiene influencia sobre la resistencia, la durabilidad, así como los coeficientes de retracción y de fluencia. También determina la estructura interna de la pasta de cemento endurecida. La relación agua/cemento crece cuando aumenta la cantidad de agua y decrece cuando aumenta el contenido de cemento. En todos los casos, cuanto más baja es la relación agua/ cementos más favorables son las propiedades de la pasta de cemento endurecida.
- **Tamaño Máximo del Agregado:** El tamaño del agregado a elegir para el diseño de una mezcla de concreto se basará en el tamaño y forma del elemento de hormigón.
- **Condiciones de Humedad Durante el Curado:** El curado es el mantenimiento de un adecuado contenido de humedad y temperatura en el hormigón a edades tempranas, de manera que este pueda desarrollar las propiedades para las cuales fue diseñada la mezcla. El curado comienza inmediatamente después del vaciado y el acabado, de manera que el hormigón pueda desarrollar la resistencia y la durabilidad deseada. Sin un adecuado suministro de humedad, los materiales cementantes en el hormigón, no pueden reaccionar para formar un producto de calidad.
- **Edad del Hormigón:** El tiempo de curado del hormigón es fundamental para garantizar que se eviten problemas en la resistencia proyectada del hormigón, el tiempo óptimo está considerado en 28 días.
- **Cantidad Aditivo:** El porcentaje de aditivo a agregar a la mezcla será relativo. Un ensayo de resistencia debe ser el resultado del promedio de resistencia de 2 cilindros tomados de una misma mezcla y ensayados a los 28 días, el nivel de resistencia para cada clase de hormigón se considera satisfactorio si cumple simultáneamente los siguientes requisitos:

Que los promedios aritméticos de todo el conjunto de tres resultados consecutivos de ensayos de resistencia a la compresión, igualen o excedan el valor especificado para  $F'_{cm}$  (resistencia media).

Que ningún resultado individual de las pruebas de resistencia a la compresión (promedio de al menos dos cilindros), sea inferior a F'cm. 12,5 MPa.

#### **2.1.4.4 Ensayo de compresión de cilindros ASTM C-39**

Esta práctica cubre la determinación del esfuerzo de compresión en especímenes cilíndricos, sean estos moldeados, o núcleos obtenidos por extracción. Esta norma se limita a hormigones que tengan un peso unitario en exceso de 800 kg/m<sup>3</sup> (50 lb/pie<sup>3</sup>).

El esfuerzo a la compresión del espécimen es calculado dividiendo la máxima carga obtenida durante el ensayo por el área de la cara axial del espécimen. Los resultados a la compresión obtenidos pueden depender de forma y el tamaño del espécimen, la pasta del cemento, los procedimientos de mezcla, los métodos de muestreo, fabricación y la edad y las condiciones de humedad durante el curado.

#### **2.1.5 Propiedades del hormigón endurecido**

El carácter de hormigón endurecido lo adquiere a partir del final de fraguado. El hormigón endurecido se compone del árido, la pasta de cemento endurecido y la red de poros abiertos o cerrados resultado de la evaporación del agua sobrante, el aire ocluido (natural o provocado por un aditivo). Las propiedades del hormigón endurecido son:

##### **2.1.5.1 Densidad.**

Es la relación de la masa del hormigón y el volumen ocupado. Para un hormigón bien compactado de áridos normales oscila entre 2.300-2.500 kg/m<sup>3</sup>. En caso de utilizarse áridos ligeros la densidad oscila entre 1.000-1.300 kg/m<sup>3</sup>. Y en caso de utilizarse áridos pesados la densidad oscila entre 3.000- 3.500 kg/m<sup>3</sup>.

##### **2.1.5.2 Compacidad.**

Es la cualidad de tener la máxima densidad que los materiales empleados permiten. Un hormigón de alta compacidad es la mejor protección contra el acceso de sustancias perjudiciales.

##### **2.1.5.3 Permeabilidad.**

Es el grado en que un hormigón es accesible a los líquidos o a los gases. El factor que más influye en esta propiedad es la relación entre la cantidad de agua añadida y de cemento en el hormigón (a/c). Cuanto mayor es esta relación mayor es la permeabilidad y por tanto más expuesto el hormigón a potenciales agresiones.

#### **2.1.5.4 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. La resistencia a tracción es mucho más pequeña, pero tiene gran importancia en determinadas aplicaciones.

#### **2.1.5.5 Dureza.**

Es una propiedad superficial que en el hormigón se modifica con el paso del tiempo debido al fenómeno de carbonatación. Un método de medirla es con el índice de rebote que proporciona el esclerómetro Smichtd.

#### **2.1.5.5 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.

### **2.1.6 Características internas del hormigón**

#### **2.1.6.1 Contacto agregado-agregado**

El contacto entre agregados es fundamental en la resistencia y durabilidad de los materiales compuestos, como el hormigón. Este contacto depende de varios factores, siendo la traba mecánica proporcionada por la rugosidad de las superficies uno de los más relevantes. Cuanto más rugosa y áspera sea la superficie de los agregados, mayor será la interacción física entre ellos, lo que contribuye a una mejor cohesión.

Además, la limpieza de los agregados es crucial. Las impurezas, como el polvo o la suciedad, pueden interferir en el contacto entre las partículas, reduciendo la efectividad de la traba mecánica. Agregados limpios permiten una mejor unión, lo que mejora la resistencia del material final.

Por otro lado, la forma de los agregados también juega un papel importante. Agregados con formas angulares tienden a entrelazarse mejor, aumentando el contacto y, por ende, la resistencia a la compresión y a la tracción del material. En contraste, los agregados más redondeados pueden resultar en una menor traba mecánica, lo que puede afectar negativamente la estabilidad del conjunto.

### **2.1.6.2 Forma del agregado.**

La forma del agregado tiene gran influencia en las propiedades del hormigón fresco y endurecido, particularmente en lo que hace a la docilidad y resistencias mecánicas respectivamente. Como en el caso de la textura superficial, se ha producido hormigón satisfactorio con agregado que consta de una gran diversidad de formas diferentes. Las partículas naturales de agregado que han sido sujetas a la acción de las olas y el agua durante la historia geológica pueden ser esencialmente esféricas; las otras, rotas por la trituración, pueden ser cúbicas o tener muchos ángulos con vértices agudos, debiendo tener por lo menos una cara fracturada, resultante del proceso de trituración. 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 una mayor trabazón. Inversamente, el agregado grueso bien redondeado que tiende hacia las partículas esféricas requerirá menos arena y tendrá mayor trabajabilidad, pero tendrá una menor trabazón. 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 cúbico de hormigón, con frecuencia tendrán más o menos la misma resistencia a la compresión. También se ha medido la forma y textura de las partículas del agregado fino, la investigación indica que la forma de la partícula y la textura superficial del agregado fino puede tener una influencia más importante sobre la resistencia del hormigón que la del agregado grueso.

Las formas delgadas y alargadas dan lugar a hormigones de peor calidad. Disminuyen la trabajabilidad del hormigón, obligando a una mayor cantidad de agua y arena, lo que en definitiva se traduce en una disminución de la resistencia. Además, las formas planas tienden a orientarse en un plano horizontal, acumulando agua y aire debajo de ellas, lo que repercute desfavorablemente en la durabilidad de los hormigones. Por otra parte, aunque el tipo de material sea muy resistente, estas formas son frágiles y se pueden romper en el mezclado y la compactación del hormigón. Algunas especificaciones para el agregado grueso limitan la cantidad de partículas delgadas o alargadas a un máximo del 10 al 15% en peso, más o menos. Esas partículas se definen como aquéllas cuya relación de la dimensión más larga de un prisma rectangular y la dimensión menor sea mayor que 5. Los agregados triturados resultan en hormigones con alta resistencia a la flexo tracción, por lo que son preferidos para pavimentos en carreteras. No se ha probado que la forma de la partícula del agregado grueso

en el hormigón sea un problema importante si se incrementa y se elige el contenido de modo que se haga una compensación en los agregados que tienden a producir mezclas ásperas, como las que pueden resultar al usar por completo agregado de piedra triturada o escoria siderúrgica. La norma boliviana NB 596 prescribe que el coeficiente de forma, determinado según el método de ensayo indicado en la NB 610, no debe ser inferior a 0.15, (la EHE restringe este valor a 0.20). En caso de serlo, se deberán realizar ensayos de resistencia en laboratorio, antes de autorizar su uso.

(Tecnología del Hormigón, 2006)

#### **2.1.6.3 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. Segundo se exprime se mueve en todas direcciones. El agua, al ocupar espacio, deja millones de huecos entrecruzados en todas direcciones. Segundo 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.

#### **2.1.6.4 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

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

La corrosión del hormigón por agentes químicos es una de las principales causas de daño en las estructuras, y a menudo presenta serias dificultades en la implementación de soluciones. Aunque el hormigón tiene un buen desempeño frente a diversas condiciones atmosféricas, así como ante la mayoría de las aguas y suelos que contienen químicos agresivos, existen entornos específicos donde incluso el mejor hormigón tendrá una vida útil limitada. Esto ocurre a menos que se tomen medidas específicas para prevenir el deterioro o reducir la velocidad a la que este ocurre.

La durabilidad del hormigón se mide en función de la rapidez con la que se descompone debido a acciones químicas. Generalmente, los agentes químicos agresivos atacan el cemento, lo que resalta la importancia de seleccionar el tipo de cemento más adecuado para el entorno específico al que estará expuesto el hormigón. En casos menos comunes, el ataque puede dirigirse a los áridos.

Un factor crucial en el proceso de corrosión es la presencia de agua, ya sea en forma líquida o vapor. Sin agua, no ocurre la disolución de los componentes agresivos y, por lo tanto, no se produce una reacción química. Esto significa que un hormigón completamente seco no sufrirá daños, incluso si está en contacto con agentes químicos agresivos. Así, el agua actúa como el motor principal de todos los procesos corrosivos.

Además, para que se produzca una reacción de corrosión, es necesario que la sustancia agresiva llegue a contactar con el material que debe reaccionar. Este contacto puede verse interrumpido en distintos grados por la formación de sustancias pasivantes durante la reacción. La velocidad con la que las sustancias agresivas son transportadas hacia las reactivas está influenciada por la temperatura, ya que esta aumenta la permeabilidad del hormigón.

Una reacción química que, aunque no es dañina para el hormigón en sí, puede aumentar el riesgo de corrosión de las armaduras es la carbonatación del hidróxido cálcico generado por la hidratación del cemento. Esta reacción puede resultar en una pérdida de alcalinidad del hormigón, lo que favorece la corrosión.

Las diversas acciones químicas que afectan al hormigón se pueden clasificar de la siguiente manera:

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

La mayoría de las agresiones químicas que sufre el hormigón provienen de agentes externos que atacan desde el exterior hacia el interior, como es el caso de hormigones en cimentaciones, muros de sostenimiento de tierras o tuberías que están en contacto con terrenos contaminados. También se presenta en estructuras que transportan líquidos

agresivos o que están situadas en entornos susceptibles a este tipo de ataque. Por lo tanto, para garantizar la longevidad del hormigón en condiciones adversas, es crucial implementar estrategias adecuadas de prevención y control del deterioro. (Tecnología del Hormigón. Quiroz C. Salamanca O. 2006)

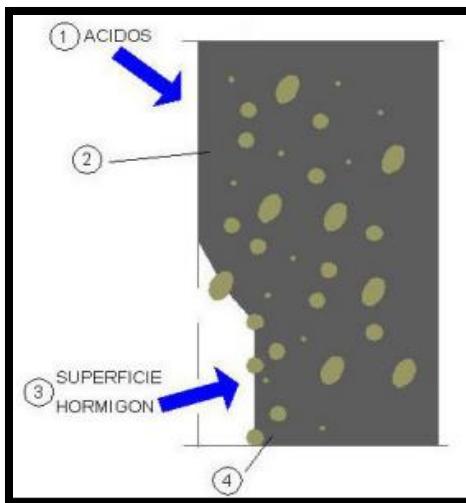
#### **2.1.7.1 Ataque por ácidos**

En general el cemento Pórtland no tiene una buena resistencia al ataque de los ácidos; aunque algunos ácidos débiles pueden ser tolerados, especialmente si su exposición es ocasional. Los ácidos inorgánicos están presentes en la atmósfera (lluvia ácida) y los ácidos orgánicos están en las aguas superficiales y freáticas procedentes de las industrias manufactureras, ensilajes agrícolas, productos de fermentación, productos de pulpa de madera o caña de azúcar, destilerías, aguas de minas, etc. Algunos suelos, como la Turba, y suelos arcillosos, pueden contener sulfato de hierro (FeS) el cual luego de oxidarse, produce ácido sulfúrico, y luego puede reaccionar y producir el ataque por sulfatos. El deterioro de los morteros y hormigones en servicio expuestos a ácidos, es principalmente el resultado de la reacción entre estos químicos y el hidróxido de calcio del cemento Pórtland hidratado. En la mayor parte de los casos la reacción resulta en la formación de compuestos de calcio que son lavados por la solución acuosa. El ácido fosfórico es una excepción ya que las sales de calcio resultantes son insolubles en agua y por esto no son removidas inmediatamente de la superficie del hormigón. Además del deterioro del hormigón, los ácidos pueden llegar hasta el acero de refuerzo, por los poros y/o por grietas, y ocasionar su corrosión, con consecuencias lamentables para la estructura.

. (Tecnología del Hormigón. Quiroz C. Salamanca O. 2006)

**Figura 5**

Ataque por ácidos



Fuente: Porto Quintian Jesús Manuel (*Manual de patologías en las estructuras de hormigón armado*, 2005)

Explicación del proceso:

1. Los ácidos procedentes del ambiente entran en contacto con la superficie del hormigón.
2. Conversión, capa a capa, de los compuestos cárnicos del cemento endurecido dando lugar a las sales cárnicas. 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.

#### **2.1.7.2 Ataque por sulfatos.**

Los sulfatos de sodio, potasio y magnesio, presentes en los subsuelos y agua con álcalis, son muchas veces los responsables del deterioro de las estructuras de hormigón. La causa del deterioro puede tener dos orígenes:

1. en primer lugar, porque los sulfatos reaccionan químicamente con la cal y el aluminato de calcio hidratados en la pasta de cemento. Dichas reacciones van acompañadas de una considerable expansión, que ocasionan esfuerzos de tracción internos y que culminan con agrietamiento y rompimiento de la masa de hormigón.
2. La segunda causa se presenta cuando el hormigón está en contacto con aguas alcalinas, lo cual produce la deposición de cristales de sulfato en los poros y canales capilares como consecuencia de la evaporación.

La resistencia del hormigón a la acción de los sulfatos puede mejorarse mucho de varias maneras:

1. Un cemento puzolánico con un contenido del 15 al 30% de puzolana puede ser muy eficaz, para cuando se tienen presentes más del 2% de sulfatos en el suelo y más de 10.000 ppm (partes por millón de masa) de sulfatos en el agua.
2. Tratar en autoclave los productos de hormigón, a 175°C o más, mejora la resistencia a los sulfatos.
3. Todos los cementos normales desarrollan completa desintegración dentro de uno o dos años, pero con los cementos de bajo contenido de C3A, la resistencia al deterioro se prolonga a períodos mucho más largos.
4. La resistencia a la desintegración por el crecimiento de cristales, se logra mediante el uso de un hormigón denso, de muy baja permeabilidad, elaborado con una relación agua-cemento baja y preferiblemente con inclusión de aire.

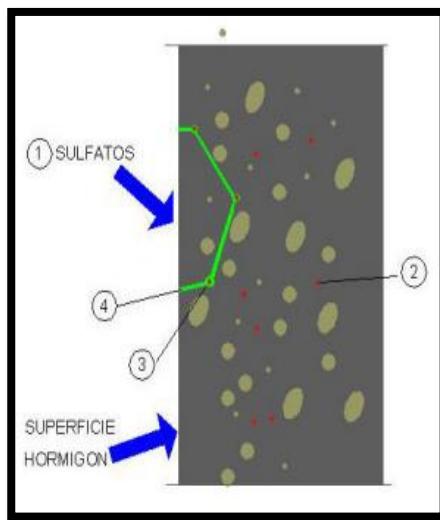
La velocidad y severidad de los ataques por sulfatos aumentan al aumentar la temperatura.

El hormigón seco no es atacado en suelos secos que contienen sulfatos.

. (Tecnología del Hormigón. Quiroz C. Salamanca O. 2006)

**Figura 6**

Ataque por sulfatos



Fuente: Porto Quintian Jesús Manuel (*Manual de patologías en las estructuras de hormigón armado*, 2005)

Explicación del proceso:

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 etringita que sufre la expansión.
4. Formación de fisuras que facilita el acceso a los ataques.

#### **2.1.7.3 Reacción Álcali agregado**

Las reacciones entre ciertos componentes intensamente silíceos de los agregados y cements que tienen contenidos elevados de álcali conducen a pérdida de resistencia, expansión excesiva, agrietamiento y desintegración. Las expansiones asociadas con esta reacción pueden cerrar las juntas de expansión, causar que los miembros estructurales se desplacen con respecto a los otros, provocar que las maquinarias se salgan de su ubicación y otros efectos indeseables. Esta reacción se puede controlar o reducir:

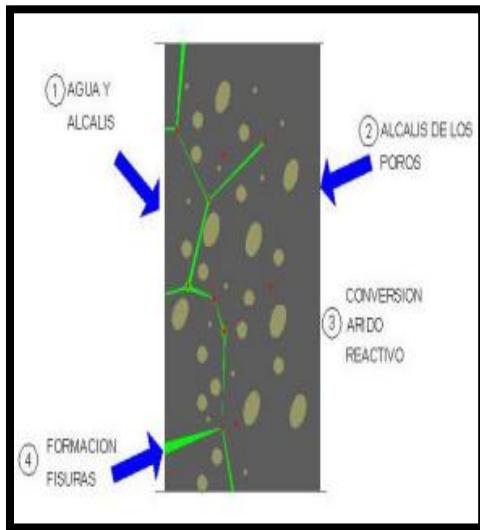
- Mediante el empleo de cements con un contenido de álcali de menos del 0.60%, expresado como  $Na_2O$  equivalente;
- Con el uso de agregados no reactivos;
- con la aplicación de ciertos materiales puzolánicos finamente molidos que reaccionen químicamente con los álcalis antes de que ataquen los agregados reactivos.

En caso de estar utilizando un agregado cuestionable, se puede reemplazar un 30% o más, en peso, para el control parcial de la expansión indeseable.

Algunos agregados conocidos que reaccionan con el álcali del cemento son: el sílice opalino, la caliza silícea y en general rocas con alto contenido de sílice. En consecuencia, cuando se requiere aprovechar una fuente de agregados cuyo comportamiento sea desconocido, es muy aconsejable hacer ensayos petrográficos y exámenes químicos, así como ensayos de expansión de morteros

**Figura 7**

Reacción álcali agregado



Fuente: Porto Quintian Jesús Manuel (*Manual de patologías en las estructuras de hormigón armado*, 2005)

Explicación del proceso:

1. Difusión del agua y los álcalis, procedentes del ambiente al hormigón.
2. Difusión de los álcalis existentes en la red de poros.
3. Conversión de los áridos reactivos causando la expansión.
4. Formación de fisuras: Fisuración en mapa y Fisuración paralela a la superficie.

#### 2.1.7.4 Carbonatación

Cuando el hormigón o el mortero están expuestos al dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), se genera una reacción con el calcio de los compuestos del cemento para formar carbonato de calcio, esta reacción viene acompañada de contracción irreversible y de un aumento significativo en peso. Todos los constituyentes del cemento Pórtland hidratado son susceptibles a la carbonatación.

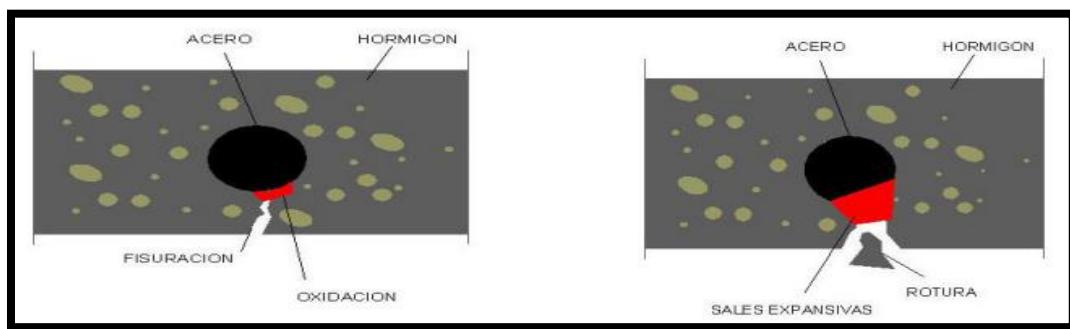
Los resultados pueden ser beneficiosos o dañinos, dependiendo del tiempo, grado, y extensión de exposición en que ocurra esto. Por un lado, la carbonatación intencional durante la producción del hormigón puede mejorar la resistencia, dureza y estabilidad volumétrica de los productos del hormigón. Sin embargo, en otros casos, la carbonatación puede resultar en

deterioro y descenso en el pH de la pasta de cemento resultando en la corrosión del refuerzo cercano a la superficie.

La exposición al CO<sub>2</sub> durante el proceso de endurecimiento debido a la exposición a emisiones de gas de equipos u otras fuentes pueden producir superficies altamente porosas que quedarán expuestas a ataques químicos más profundos. Esta exposición puede afectar a la superficie acabada de las losas, dejando una superficie suave, polvorienta y menos resistente al uso, la única manera de eliminar la mala superficie es por esmerilado de la misma

### Figura 8

Deterioro del hormigón reforzado por corrosión del acero



Fuente: Porto Quintian Jesús Manuel (*Manual de patologías en las estructuras de hormigón armado*, 2005)

Esquema del proceso:

1. Una vez el CO<sub>2</sub> ha penetrado en el hormigón, con dirección al acero, y se producido la despasivación del mismo; comienza la corrosión en presencia de humedad apareciendo la primera fisuración.
2. Se produce la oxidación del acero, con la formación de sales expansivas que provocan la rotura del borde de la pieza.

### 2.1.8 Hormigones para plantas de tratamiento de aguas residuales

Una planta de tratamiento de aguas residuales es una infraestructura crucial, diseñada para tratar el agua de manera eficiente y continua, permitiendo su reciclaje y/o su retorno al medio ambiente en condiciones adecuadas. Es fundamental minimizar o evitar las paradas y tiempos de inactividad en la planta, ya que estos pueden afectar gravemente el proceso de tratamiento y, por ende, la eficacia del sistema.

La naturaleza compleja de las aguas residuales es especialmente agresiva para las infraestructuras circundantes. Por ello, las estructuras que conforman la planta deben ser protegidas y mantenidas adecuadamente, dado que están expuestas diariamente a una serie de ataques químicos, así como a la abrasión y corrosión inducida por iones cloruro. Para reparar y proteger el hormigón de manera efectiva una vez que ha sufrido daños, es crucial entender estos mecanismos de deterioro.

Es importante destacar que el deterioro del hormigón no se limita únicamente a procesos biológicos que involucran azufre. Este tipo de ataque puede resultar en un deterioro significativo de la superficie del hormigón, lo que a su vez disminuye el espesor de la cubierta de hormigón que protege las armaduras. La reducción de esta protección compromete directamente la durabilidad de la estructura.

Dado que la estanquidad del hormigón es difícil de controlar, es frecuentemente necesario proporcionar recomendaciones específicas para la composición del hormigón. Esto incluye aspectos como la composición granulométrica de los áridos, el contenido de elementos finos y la relación agua/cemento (a/c). Un hormigón que sea integralmente compacto y que tenga un acabado adecuado tiende a presentar una capacidad resistente suficiente, especialmente cuando la relación a/c se aproxima a 0,55 para aguas débilmente agresivas y a 0,45 para aguas fuertemente agresivas. Estas consideraciones son fundamentales para asegurar la longevidad y el buen funcionamiento de la planta de tratamiento, protegiendo así tanto la infraestructura como el medio ambiente.

### **2.1.9 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 Anejo Nacional AN/UNE-EN 1992-1-1 Euro código
- En el Anexo F (Informativo) de la norma UNE-EN 1992-1-1, así como en su Anejo Nacional, se incluye información relevante contenida en el Anexo E (también informativo) de dicha norma. Por su parte, la Parte 2 de la norma UNE-EN 1992,

correspondiente a puentes, remite a la parte general (UNE-EN 1992-1-1) para los aspectos comunes. A continuación, se expone dicha información.

**Tabla 11**

Resistencia característica mínima esperada para el hormigón en función de la clase de exposición, según el Euro código Estructural

| Parámetro de dosificación        | Tipo de hormigón | Clase de exposición |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|----------------------------------|------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                                  |                  | X <sub>0</sub>      | X <sub>C1</sub> | X <sub>C2</sub> | X <sub>C3</sub> | X <sub>C4</sub> | X <sub>S1</sub> | X <sub>S2</sub> | X <sub>S3</sub> | X <sub>D1</sub> | X <sub>D2</sub> | X <sub>D3</sub> | X <sub>F1</sub> | X <sub>F2</sub> | X <sub>F3</sub> | X <sub>A1</sub> | X <sub>A2</sub> | X <sub>A3</sub> | X <sub>M1</sub> | X <sub>M2</sub> | X <sub>M3</sub> |
| Masa                             |                  | 20                  | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -               | -               | 30              | 30              | 30              | 30              | 30              | 35              | 30              | 30              | 30              |
| Resistencia característica (MPa) | Armado           | 25                  | 25              | 25              | 30              | 30              | 30              | 35              | 30              | 30              | 30              | 30              | 30              | 30              | 30              | 30              | 35              | 30              | 30              | 30              | 30              |
|                                  | Pretensado       | 25                  | 25              | 25              | 30              | 30              | 35              | 35              | 35              | 35              | 35              | 35              | 30              | 30              | 30              | 30              | 35              | 30              | 30              | 30              | 30              |

Fuente: ((España Eurocodigo), 2018)

Las plantas de tratamiento de aguas residuales están expuestas a corrosión por ataques químicos (XA), algún ataque débil (XA1) y ataque medio (XA2) (Vargas Fernández, 2023) Según la NB-122500 los límites de los cloruros en la Categoría de Exposición C: Los límites de iones cloruro deben ser aplicados a las Clases de Exposición C0, C1 y C2. Para el hormigón no pretensado, la cantidad máxima de iones cloruro solubles en agua, incorporados al hormigón, y medidos según la (International, Método de Ensayo Normalizado para Cloruro Soluble en Agua en Mortero y Concreto (ASTM C1218M), 2018) a edades que van de 28 a 42 días, dependen del grado de exposición proveniente de la fuente externa de humedad y cloruros. Para el hormigón pretensado, se aplica el mismo límite de 0,06 % de iones cloruro por peso de cemento independientemente de la exposición. Según la (IBNORCA), la Categoría de Exposición C: está subdividida en tres clases de exposición:

- La Clase de Exposición C0 se asigna cuando las condiciones de exposición no requieren protección adicional contra el inicio de corrosión de la armadura.
- Las Clases de Exposición C1 y C2 se asignan a elementos de hormigón no pretensados y pretensados, dependiendo del grado de exposición a fuentes externas de humedad y cloruros en servicio. Algunos ejemplos de fuentes externas de cloruro son el hormigón en contacto

directo con productos químicos des congelantes, sal, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen.

- b) Clase de Exposición C2: para el hormigón no pretensado y pretensado en la Clase de Exposición C2, se deben considerar los requisitos básicos de máxima relación a/mc, resistencia mínima a la compresión especificada y recubrimiento mínimo

**Tabla 12**

Requisitos para el hormigón según la clase de exposición

| Clase de Exposición  | Relación a/mc máx. [1] | $f'_c$ Mínimo MPa | Requisitos mínimos adicionales           |  | Límites en los Materiales cementantes |
|--|------------------------|-------------------|--|--|---------------------------------------|
|  |                        |                   | Contenido de aire                        |  |                                       |
| <b>F0</b>  | N/A                    | 17                | N/A                                      |  | N/A                                   |
| <b>F1</b>  | 0,55                   | 24                | Tabla 19.3.3.1                           |  | N/A                                   |
| <b>F2</b>  | 0,45                   | 31                | Tabla 19.3.3.1                           |  | N/A                                   |
| <b>F3</b>  | 0,40 [2]               | 35 [2]            | Tabla 19.3.3.1                           |  | 26.4.2.2(b)                           |
| Tipos de material cementante [3]   |                        |                   | Aditivo cloruro de calcio                |  |                                       |
|  |                        |                   | <b>ASTM C 150M</b>                       | <b>ASTM C 595M</b>   | <b>ASTM C 1157M</b>                   |
| <b>S0</b>  | N/A                    | 17                | Sin restricción en el tipo               | Sin restricción en el tipo   | Sin restricción                       |
| <b>S1</b>  | 0,50                   | 28                | II [4] [5]                               | Tipos IP, IS o IT con designación (MS)                             | MS                                    |
| <b>S2</b>  | 0,45                   | 31                | V [6]                                    | Tipos IP, IS o IT con designación (HS)                             | HS                                    |
| <b>S3</b>  | 0,45                   | 31                | V más puzolanas o cemento de escoria [6] | Tipos IP, IS o IT con designación (HS) más puzolanas o escoria [6] | HS más puzolanas o escoria [6]        |
|  |                        |                   |  |  |                                       |
| <b>W0</b>  | N/A                    | 17                | Ninguna                                  |  |                                       |
| <b>W1</b>  | 0,50                   | 28                | Ninguna                                  |  |                                       |
| Contenido máximo de iones de cloruro ( $Cl^-$ ) soluble en agua en el hormigón, porcentaje por peso de cemento [7] |                        |                   | Requisitos adicionales                   |  |                                       |
|  |                        |                   | <b>Hormigón no pretensado</b>            | <b>Hormigón pretensado</b>   |                                       |
| <b>C0</b>  | N/A                    | 17                | 1,00                                     | 0,06   | Ninguno                               |
| <b>C1</b>  | N/A                    | 17                | 0,30                                     | 0,06   |                                       |
| <b>C2</b>  | 0,40                   | 35                | 0,15                                     | 0,06   | Recubrimiento de hormigón [8]         |

Fuente: (Calidad & NB 1225001, 2020)

El uso de escoria que cumpla con ASTM C989M o cenizas volantes que cumplan con ASTM C618 y un mayor nivel de resistencia aumentan la protección. El uso de humo de sílice que cumpla con ASTM C1240 con un adecuado aditivo reductor de agua de amplio rango, ASTM C494M, Tipos F y G, o ASTM C1017M puede también proporcionar una protección adicional (Ozyildirim and Halstead 1988). La norma ASTM C1202 para ensayar mezclas de hormigón proporciona información adicional sobre el comportamiento de las mezclas.

Los límites para la máxima relación a/mc en la Tabla 19.3.2.1 no aplican a hormigón liviano. Para hormigón simple, la máxima a/mc debe ser 0,45 y el mínimo  $ffcc'$  debe ser 31 MPa. Las combinaciones alternativas de materiales cementantes de la Tabla 19.3.2.1 se permiten cuando se ensayan para resistencia a los sulfatos y en el cumplimiento de Tabla 26.4.2.2(c) de la (Calidad & NB 1225001, 2020).

Para exposición a agua marina, se permiten otros tipos de cemento portland con aluminato tricálcico (C3A) hasta de 10 % si la relación a/c no excede 0,40.

Se permiten otros tipos disponibles de cemento tales como Tipo I o Tipo III en las Clases Exposición S1 ó S2 si el contenido de C3A es menos del 8 % en la Clase de Exposición S1 o menos de 5 % en la Clase de Exposición S2.

La cantidad a usar de la fuente específica de puzolanas o cemento de escoria debe ser al menos la cantidad que se haya determinado por medio del registro de servicio para mejorar la resistencia a los sulfatos cuando se utilice en hormigón que contenga cemento Tipo V. Alternativamente, la cantidad a usar de la fuente específica de puzolanas o cemento de escoria debe ser al menos la cantidad que se haya determinado por medio del ensayos de la mezcla hechos cumpliendo la norma ASTM C1012M.

El contenido de ion cloruro soluble en agua que contribuyen los ingredientes incluyendo el agua, agregados, materiales cementantes y aditivos debe determinarse en la mezcla de hormigón por medio de la norma ASTM C1218M a una edad entre 28 y 42 días.

Información adicional sobre los efectos de los cloruros en la corrosión del acero de armadura aparece en ACI 201.2R, que presenta una guía sobre durabilidad del hormigón y el ACI 222R, que informa sobre los factores que influyen en la corrosión de metales en el hormigón. Puede obtenerse una evaluación inicial del contenido de iones cloruro de la mezcla de hormigón propuesta ensayando los componentes individuales del hormigón respecto al contenido total de iones de cloruro. Cuando el contenido total de iones cloruro, calculado a

partir de los componentes del hormigón, excede los valores permitidos en la Tabla 19.3.2.1, puede ser necesario ensayar muestras de hormigón endurecido respecto al contenido de iones cloruro solubles en agua. Parte del total de iones cloruro presentes en los componentes, o bien es insoluble en agua, o reacciona con el cemento durante la hidratación y se vuelve insoluble, según los procedimientos de ensayo descritos en ASTM C1218M. Cuando los hormigones se ensayan para obtener el contenido de ion cloruro soluble en agua, los ensayos deben hacerse a una edad de 28 a 42 días. Los límites establecidos en la Tabla 19.3.2.1 deben aplicarse a los cloruros aportados por los componentes del hormigón y no a los del ambiente que rodea al hormigón. Para hormigón no pretensado que estará seco en servicio (Clase de Exposición C0), se ha incluido un límite de 1 % para controlar los cloruros solubles en agua introducidos por los materiales componentes del hormigón.

## **2.2 Proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales.**

### **2.2.1 Lagunas de estabilización**

Una **laguna de estabilización** es un sistema de tratamiento extensivo de aguas residuales que funciona a través del almacenamiento controlado del agua, permitiendo la acción conjunta de bacterias y algas en un proceso simbiótico que degrada la materia orgánica presente. Este tipo de tratamiento utiliza principalmente procesos naturales de descomposición biológica y es ideal para zonas con suficiente disponibilidad de terreno ((CONAGUA), 2015)

Existen dos tipos principales de lagunas de estabilización:

- Lagunas anaerobias, donde predominan procesos sin presencia de oxígeno, eficaces en la degradación de aguas residuales con alta carga orgánica.
- Lagunas facultativas, que combinan zonas aeróbicas y anaeróbicas, permitiendo un tratamiento más completo y estable de las aguas residuales domésticas.

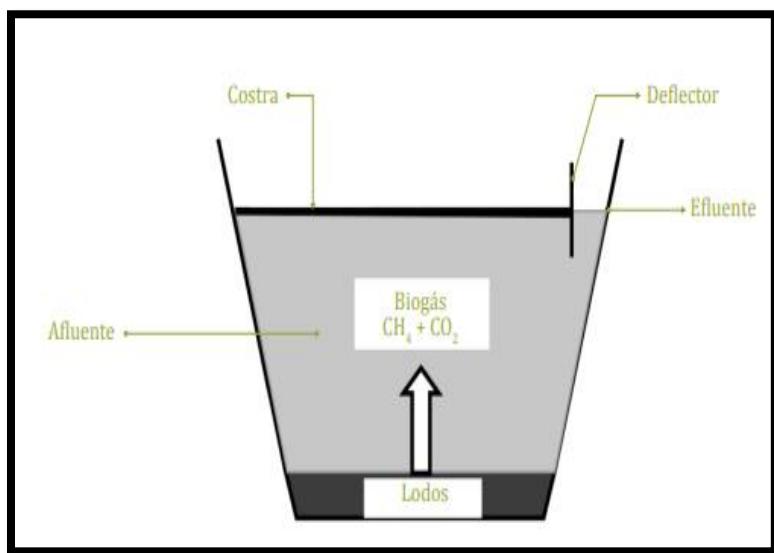
#### **2.2.1.1 Laguna de Estabilización Anaerobia**

Son lagunas profundas (3-5 m) (Figura 8), que operan con elevadas cargas orgánicas ( $>100 \text{ g DBO}_5 / \text{m}^3 / \text{d}$ ) (Mara et al., 1998) y que persiguen dos objetivos básicos: i) la reducción de la materia en suspensión (sedimentable y flotante) presente en las aguas residuales afluente y ii) la estabilización, vía anaerobia, de los lodos que se van acumulando en su fondo. De acuerdo con el primero de estos objetivos, puede encuadrarse este tipo de lagunas dentro de

los tratamientos primarios, mientras que en consonancia con el segundo objetivo, se englobaría dentro de los tratamientos de decantación-digestión, a semejanza de los Tanques Sépticos y de los Tanques Imhoff. Las elevadas cargas de DBO5 por unidad de volumen con las que operan este tipo de lagunas, conllevan a que en ellas imperen condiciones de ausencia de oxígeno (anaerobiosis), salvo en una fina capa de agua superficial, por lo que los microorganismos que proliferan en las mismas son, casi exclusivamente, bacterias anaerobias (Rojo, 1988; Romero 1999). Como resultado de las reacciones anaerobias se genera biogás, mezcla de metano y dióxido de carbono, principalmente, y en mucha menor cuantía, de compuestos del azufre (sulfuro de hidrógeno, mercaptanos, etc.), principales responsables de los olores desagradables que se desprenden.

**Figura 9**

Diagrama del proceso de tratamiento anaerobio de aguas residuales



Fuente: ((VAPSB), *Guía Técnica para la Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento de Aguas Residuales – Módulo 2, 2021*)

Los lodos permanecen en las Lagunas Anaerobias un largo periodo de tiempo ( $\leq 7$  años) (von Sperling, 2005) mineralizándose y disminuyendo su volumen, tras el que se procede a su extracción

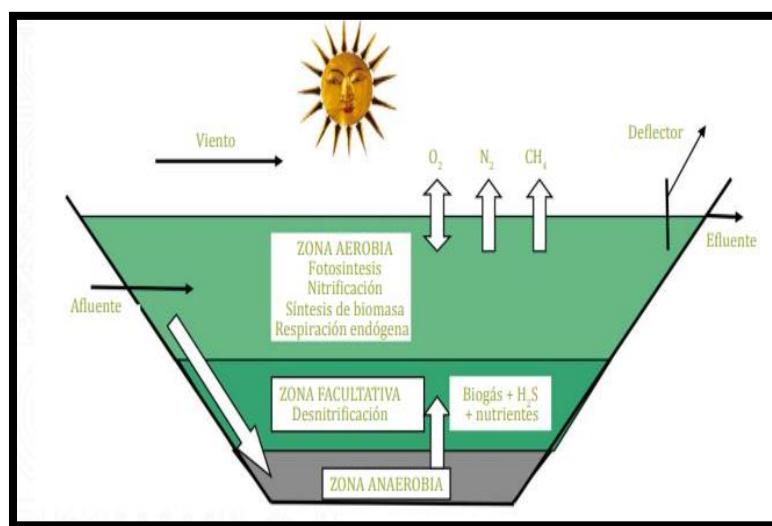
Dado el elevado grado de mineralización alcanzado, los lodos tan sólo precisan ser deshidratados antes de su adecuada disposición final.

### 2.2.1.2 Lagunas Facultativas.

Presentan una menor profundidad (1,5-2 m) y ocupan mucha más superficie que las Lagunas Anaerobias. El principal objetivo que se persigue en este tipo de lagunas es la biodegradación, fundamentalmente vía aerobia, de la materia orgánica presente en las aguas residuales a tratar, gracias al oxígeno aportado por la actividad fotosintética de las microalgas que en ellas se desarrollan y, en menor medida, por fenómenos de Re aireación superficial, promovidos por el viento, dada la gran extensión de estas lagunas. La DBO5 soluble y la finamente particulada se estabilizan vía aerobia por la acción de bacterias heterotróficas dispersas en el medio, mientras que la DBO5 particulada tiende a sedimentar, transformándose vía anaerobia por las bacterias que proliferan en el fondo. En la columna de agua se diferencian claramente tres estratos: uno inferior (ocupado por los sedimentos/lodos) de características anaerobias; el superior, en contacto con la atmósfera, aerobio (como consecuencia, principalmente, de la presencia de microalgas, responsables de los procesos fotosintéticos); y uno intermedio, en el que se dan unas condiciones muy variables (con ausencia y presencia de oxígeno), predominando bacterias de tipo facultativo, que son las que dan nombre a este tipo de lagunas (Rojo, 1988; Romero, 1999)

**Figura 10**

Esquema de tratamiento de aguas residuales en una laguna facultativa

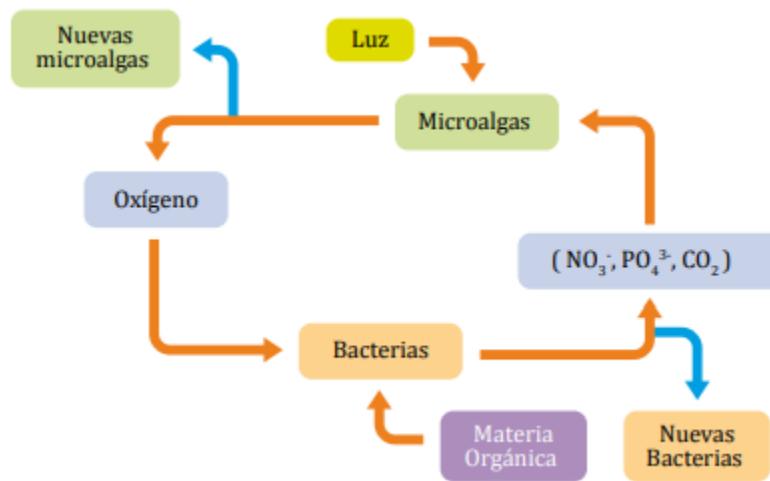


Fuente: ((VAPSB), Guía Técnica para la Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento de Aguas Residuales, 2021)

En la zona aerobia se establece un equilibrio entre la producción y el consumo de oxígeno y de dióxido de carbono, a través de un ciclo simbiótico microalgas/ bacterias, de modo que la respiración bacteriana consume oxígeno y libera dióxido de carbono, mientras que las microalgas, mediante procesos fotosintéticos, generan oxígeno y consumen dióxido de carbono. Este ciclo simbiótico es el verdadero “motor” de este tipo de lagunas (Figura 10).

**Figura 11**

Ciclo simbiótico



*Fuente: Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales*

### 2.3.1.2 Ventajas.

- Costos bajos: Menor inversión en construcción, operación y mantenimiento.
- Facilidad de construcción y operación: No requieren personal calificado.
- Eficiente remoción de materia orgánica: Buena eliminación de contaminantes y microorganismos patógenos.
- Absorción de picos hidráulicos: Capacidad para manejar variaciones en flujo y carga orgánica.
- Tratamiento de aguas biodegradables: Efectivas para diversas industrias.
- Manejo sencillo de lodos: No generan problemas significativos en disposición de lodos.

- Reutilización del agua tratada: Apta para agricultura y acuicultura.
- Sistemas reguladores de riego: Pueden optimizar el uso de recursos hídricos en la producción agrícola.

#### 2.2.1.3 Desventajas.

- Espacio requerido: Necesitan grandes áreas de terreno.
- Dependencia climática: Eficacia afectada por condiciones climáticas extremas.
- Tiempo de retención: Requieren períodos prolongados de retención.
- Olores: Pueden generar malos olores.
- Contaminación visual: Consideradas poco atractivas en ciertos entornos.
- Proliferación de mosquitos: Pueden atraer insectos.
- Limitaciones en tipos de aguas residuales: No son eficaces para compuestos tóxicos o no biodegradables.
- Mantenimiento de vegetación: Necesario para evitar problemas de obstrucción

#### 2.2.2 Aprovechamiento y reusó de efluentes tratados

Si se decide reusar el efluente de la nueva PTAR a construir, deben establecerse las características exigidas para el efluente regenerado, en función del uso o los usos a que se vaya a destinar. En este caso, el sistema de depuración debe incorporar los tratamientos necesarios para permitir la regeneración del efluente. Por lo tanto, el proyecto de la PTAR debe definir:

El caudal y la periodicidad de las aguas depuradas que se quiere reusar. Las calidades exigidas para el tipo de reúso al que se destinen los efluentes de la PTAR. El tratamiento de regeneración a adoptar, entendiendo por tal el tratamiento adicional que se debe dar a los efluentes de la PTAR para cumplir con los requisitos según el tipo de reúso que se les vaya a dar a los mismos.

Los sistemas de almacenamiento y distribución necesarios de las aguas regeneradas, que permitan su empleo en el tipo de reúso elegido.

Los costos de construcción y explotación del sistema de regeneración y la forma de su financiación.

El RMCH recoge, en su Cuadro nº 1, la clasificación de los cuerpos de agua según su aptitud de uso. Estos usos son:

- USO 1: para abastecimiento doméstico de agua potable después de:
  - a. Sólo una desinfección y ningún tratamiento (Clase A).
  - b. Tratamiento solamente físico y desinfección (Clase B)
  - c. Tratamiento físico-químico completo: coagulación, floculación, filtración desinfección
- (Clase C). d. Almacenamiento prolongado o presedimentación, seguidos de tratamiento, al igual que (Clase D).
- USO 2: para recreación de contacto primario: natación, esquí, inmersión (Clases A, B y C).
- USO 3: para protección de los recursos hidrobiológicos (Clases A, B y C)
- USO 4: para riego de hortalizas consumidas crudas y frutas de cáscara delgada, que sean ingeridas crudas sin remoción de ella (Clases A y B).
- USO 5: para abastecimiento industrial (Clases A, B, C y D).
- USO 6: para la cría natural y/o intensiva (acuicultura) de especies destinadas a la alimentación humana (Clases A, B y C).
- USO 7: para abrevadero de animales (Clases B y C).
- USO 8: para la navegación (Clases B, C y D). La Tabla 4.9 muestra los valores máximos admisibles de parámetros indicadores de contaminación en reúso de aguas para los usos mencionados anteriormente. En las últimas filas de esta tabla se presentan los valores admisibles de los nutrientes: nitrógeno (como nitrógeno total, amoniaco, nitritos y nitratos), y fósforo (como fosfatos).

**Tabla 13**

Valores máximos admisibles de parámetros indicadores de contaminación en reúso de aguas

| Parámetro                             | Clase A                       | Clase B                            | Clase C                              | Clase D                               |
|---------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Sólidos sedimentarios (mg/L)          | < 10                          | 30                                 | < 50                                 | < 100                                 |
| DBO <sub>5</sub> (mg/L)               | < 2                           | < 5                                | < 20                                 | < 30                                  |
| DQO (mg/L)                            | < 5                           | < 10                               | < 40                                 | < 60                                  |
| Coliformes fecales (NMP/100 mL)       | < 50 y < 5 en 80% de muestras | < 1.000 y < 200 en 80% de muestras | < 5.000 y < 1.000 en 80% de muestras | < 50.000 y < 5.000 en 80% de muestras |
| Parásitos (N/L)                       | < 1                           | < 1                                | < 1                                  | < 1                                   |
| Fosfato total (mg PO <sub>4</sub> /L) | 0.4                           | 0.5                                | 1                                    | 1                                     |
| Amoniaco(mgNH <sub>3</sub> /L)        | 0.05                          | 1                                  | 2                                    | 4                                     |
| Nitrato (mg NO <sub>3</sub> /L)       | 20                            | 50                                 | 50                                   | 50                                    |
| Nitrito (mg N/L)                      | < 1                           | 1                                  | 1                                    | 1                                     |
| Nitrógeno total (mg N/L)              | 5                             | 12                                 | 12                                   | 12                                    |

Fuente: (Guía Técnica para la Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento de Aguas Residuales – Módulo 2, 2021)

### 2.2.3 Descripción de las características del aditivo hidrofílico cristalino (KIM).

**Tabla 14**

Descripción de las características del aditivo hidrofílico cristalino (KIM)

| ADITIVO HIDROFÍLICO CRISTALINO (KIM) |   |
|--------------------------------------|---|
| Usos                                 | Estructuras subterráneas estacionamientos, sótanos, fosos de elevador y cimentaciones de edificios.       |
|                                      | Instalaciones recreativas centros acuáticos, acuarios, zoológicos, parques de agua y estructuras marinas. |

|   |   |
|---|---|
| <b>Características</b>  | Estructuras arquitectónicas con agua fuentes y cascadas.  |
|   | Infraestructura de transporte túneles, tuberías subterráneas y túneles para sistemas de transporte colectivo.                   |
|   | Obras hidráulicas tanques de contención de agua, PTAR, drenajes y pozos de inspección.  |
|   | Infraestructura vial puentes, presas y autopistas.  |
|   | Construcción residencial casas de concreto, incluyendo sótanos, cimentaciones, albercas, balcones, baños, garajes y exteriores. |
|   | Cubiertas y losas techos verdes, losas de motor lobby y plazas diseñadas adecuadamente.   |
|   | Protección y durabilidad cualquier concreto que requiera el máximo grado de protección y durabilidad.                           |
| <p>*KIM es un aditivo reductor de permeabilidad para condiciones de presión hidrostática (PRAH).</p>  |   |
| <p>*Reemplaza el uso de membranas exteriores poco confiables, mantos asfálticos y recubrimientos</p>  |   |
| <p>Se añade directamente al camión de concreto premezclado o en la planta concretera</p>  |   |
| <p>Auto sella fisuras de hasta 0.5mm (0.02 plg.)</p>  |   |
| <p>Se reactiva en presencia de humedad</p>  |   |
| <p>Efectivo contra presión hidrostática de hasta 140 m (460 pies) presión columna de agua</p>   |   |
| <p>Impermeabiliza desde cualquier dirección (lado positivo o negativo)</p>  |   |
| <p>Impenetrable al daño físico o deterioro</p>  |   |
| <p>Aprobado para el contacto con agua potable, certificado por NSF de acuerdo al Estándar 61 NSF/ANSI Componentes del Sistema de Agua Potable – Efectos en la Salud</p> |   |
| <p>Reduce la contracción y el agrietamiento</p>   |   |

|            |  |
|------------|--|
|            | Provee excelente resistencia a los químicos hidrosolubles como sulfatos, cloruros y ácidos |
|            | Compatible con el concreto auto-compactable (AC)   |
| Beneficios | Impermeabiliza el concreto permanentemente.  |
|            | Incrementa la confiabilidad y el control de calidad.                                       |
|            | Reduce el costo de impermeabilización hasta en un 40%.                                     |
|            | Ahorra semanas en el programa constructivo.  |
|            | Reduce el costo de mantenimiento y reparación.   |
|            | Incrementa la rentabilidad al maximizar el área constructiva.                              |

*Fuente: Elaboración propia*

## CAPITULO III: METODOLOGÍA

### 3.1 Tipo de investigación

El presente estudio es de tipo cuantitativo, aplicado y no experimental. Se basa en la observación y análisis de variables previamente definidas sin manipular intencionalmente las condiciones del entorno, evaluando el comportamiento del hormigón IP-40 con y sin aditivo Kryton bajo condiciones reales de exposición a aguas residuales domésticas. Asimismo, es un estudio transeccional, ya que la recolección de datos se realizará en momentos específicos (30, 60, 90 y 120 días), permitiendo obtener un diagnóstico del comportamiento del material en diferentes etapas de exposición.

### 3.2 Enfoque metodológico

Se adopta un enfoque cuantitativo y experimental comparativo, ya que se medirá la resistencia a compresión de probetas de hormigón en dos condiciones de inmersión (parcial y total), con y sin la adición del aditivo KIM (Krystol Internal Membrane de Kryton). Los resultados se analizarán estadísticamente para determinar la influencia del aditivo y del entorno de exposición en la resistencia del hormigón.

### 3.3 Diseño experimental

El diseño de esta investigación es de tipo cuantitativo, comparativo y factorial, ya que evalúa el comportamiento del hormigón H30 con y sin aditivo Kryton (KIM) expuesto a aguas residuales domésticas, bajo dos condiciones de inmersión (parcial y total), en cuatro tiempos de exposición: 35, 63, 91 y 124 días.

Se fabricaron un total de 388 probetas cilíndricas de hormigón H30 las cuales 338 rompieron las demás fueron descartadas por fallas (10×20 cm), divididas en los siguientes grupos experimentales:

- 15 probetas Patrón sin aditivo Kryton (curado estándar)
- 15 probetas Patrón con aditivo Kryton (curado estándar)
- 150 probetas sin aditivo Kryton
  - 75 completamente sumergidas
  - 75 parcialmente sumergidas

- 140 probetas con aditivo Kryton
  - 70 completamente sumergidas
  - 70 parcialmente sumergidas

Cada una de estas condiciones fue evaluada en los cuatro tiempos establecidos, con un número variable de réplicas por combinación (entre 15 y 21), lo que permite una comparación estadísticamente válida.

Se prepararon dos grupos de probetas patrón: uno sin aditivo y otro con aditivo, ambos curados en condiciones estándar durante 28 días y ensayados a compresión para determinar su resistencia inicial de referencia. Durante la elaboración de la mezcla patrón con aditivo Kryton, se evidenció una trabajabilidad deficiente, registrándose un cono de Abrams de 0 cm, lo que dificultó el moldeo y compactado adecuado de las probetas debido al rápido fraguado del hormigón. Ante esta condición, se evaluó la incorporación de un aditivo fluidificante para mejorar la manejabilidad de la mezcla sin alterar la relación agua/cemento. Se optó por el uso del aditivo Viscocrete 5-800 (Sika) en una proporción del 0,9 % respecto al peso del cemento, lo cual permitió alcanzar una trabajabilidad óptima de 15 cm de asentamiento, adecuada para hormigón bombeado mediante hormigoneras móviles. Además se verificó que, a los 30 minutos de preparado, la mezcla conservaba una trabajabilidad aceptable, con un cono entre 5 y 6 cm.

A partir del grupo patrón sin aditivo, se fabricaron cuatro nuevos grupos de probetas con la misma dosificación, los cuales fueron curados durante 28 días y posteriormente expuestos a aguas residuales por períodos de 30, 60, 90 y 120 días. El mismo procedimiento se aplicó a las probetas con aditivo. El mismo procedimiento se aplicó a las probetas con aditivo kryton en cada grupo de exposición, se incluyeron probetas patrón de referencia, correspondientes a la resistencia del hormigón curado en condiciones estándar sin contacto con aguas residuales. Estas probetas permiten evaluar la evolución de la resistencia a lo largo del tiempo y analizar la influencia del uso de aditivos en la durabilidad del hormigón frente a la acción de las aguas residuales. A continuación, se presenta un resumen:

**Tabla 15**

Distribución de Probetas Según Tipo de Hormigón, Condición de Inmersión y Tiempo de Exposición a Aguas Residuales

| Tipo de Hormigón     | Condición de inmersión                              | Tiempos de exposición en Aguas Residuales (días) | N.º aproximado de probetas |
|----------------------|---|--|----------------------------|
| Sin aditivo (Patrón) | Curado estándar (sin inmersión en aguas residuales) | 7-28   | 3-15                       |
| Con aditivo (Patrón) | Curado estándar (sin inmersión en aguas residuales) | 7-28   | 3-15                       |
| Sin aditivo          | Completamente sumergidas                            | 30, 60, 90, 120                                  | 75                         |
| Sin aditivo          | Parcialmente sumergidas                             | 30, 60, 90, 120                                  | 75                         |
| Con aditivo          | Completamente sumergidas                            | 30, 60, 90, 120                                  | 70                         |
| Con aditivo          | Parcialmente sumergidas                             | 30, 60, 90, 120                                  | 70                         |
| <b>TOTAL</b>         |   |  | <b>326</b>                 |

*Fuente: Elaboración propia*

Las probetas fueron sometidas a curado estándar durante 28 días y posteriormente ubicadas en la laguna facultativa de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Luis (Tarija), en celdas de exposición especialmente diseñadas para mantener las condiciones de inmersión parcial o total. Las mediciones de resistencia a compresión se realizaron conforme a la norma ASTM C-39, y los resultados fueron documentados individualmente para cada condición.

### 3.4 Materiales y equipos

- Cemento Portland tipo IP-40
- Aditivo KIM (Krystol Internal Membrane de Kryton)
- Agregado fino y grueso (según ensayo granulométrico)
- Agua potable para mezcla
- Aguas residuales de la laguna facultativa de San Luis
- Moldes cilíndricos estándar (10x20)
- Máquina universal para ensayo de compresión (según ASTM C-39)

- Recipientes de inmersión
- Fluidificante

### **3.5 Procedimiento experimental**

#### **3.5.1 Diseño de mezcla y elaboración de probetas**

Se seguirán los procedimientos de la norma ACI 211.1 para la dosificación de las mezclas.

El proceso incluirá:

- Cálculo de relación agua/cemento adecuado para hormigón H-30.
- Preparación de la mezcla con y sin aditivo.
- Moldeo de probetas cilíndricas de 10 cm x 20 cm.
- Curado inicial en condiciones estándar durante 28 días.

#### **3.5.2 Exposición a aguas residuales**

Las probetas serán trasladadas a la laguna facultativa de la Planta de Tratamiento de San Luis y ubicadas en los dos escenarios definidos:

- Parcialmente sumergidas (hasta la mitad)
- Completamente sumergidas

#### **3.5.3 Análisis fisicoquímico del agua**

Previo a la exposición, se tomará una muestra del agua residual para análisis de:

- pH
- Temperatura
- Concentración de sulfatos, cloruros y otros compuestos agresivos

Este análisis permitirá determinar el nivel de agresividad química del medio de exposición.

#### **3.5.4 Ensayo de resistencia a compresión**

Se realizarán ensayos a compresión de acuerdo con la norma ASTM C-39, en los tiempos definidos: 30, 60, 90 y 120 días. Se utilizará una máquina universal calibrada para registrar los resultados en MPa.

### 3.6 Procesamiento y análisis de datos

Los datos obtenidos de los ensayos de resistencia a compresión y del análisis fisicoquímico del agua residual fueron organizados en tablas y gráficos para facilitar su interpretación comparativa. El procesamiento de datos incluyó:

- Cálculo de valores promedio y desviación estándar para cada grupo de probetas (según tipo de hormigón, condición de inmersión y tiempo de exposición).
- Análisis porcentual de variación de la resistencia respecto a las probetas patrón.
- Comparación entre mezclas con y sin aditivo Kryton (KIM), en cada uno de los tiempos de inmersión (30, 60, 90 y 120 días).
- Representación gráfica de la evolución de la resistencia mecánica a lo largo del tiempo.
- Análisis descriptivo de los parámetros del agua residual y su posible impacto sobre el desempeño del concreto.
- Evaluación económica del costo por  $m^3$  de las mezclas con y sin aditivo.

Este enfoque permitió obtener una visión integral del comportamiento del concreto H-30 expuesto a condiciones agresivas, destacando las diferencias entre las distintas condiciones de ensayo, sin recurrir a procedimientos estadísticos avanzados.

## CAPITULO IV: PROCESAMIENTO DE DATOS

### 4.1. Análisis físico-químico del agua residual

#### 4.1.1. Introducción

Para evaluar el comportamiento del hormigón H30 con un cemento IP-40 expuesto a condiciones reales de tratamiento de aguas residuales, se realizó un monitoreo físico-químico de las aguas en distintos puntos y momentos durante el periodo experimental. Estas muestras corresponden a la salida de la laguna facultativa de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Luis, en la ciudad de Tarija, y coinciden con los tiempos de inmersión parcial y total de las probetas de hormigón con y sin aditivo Kryton. Esta condición se ve agravada por el estado actual de dicha planta, cuya laguna facultativa ha excedido ampliamente su vida útil y los años de diseño establecidos, operando actualmente en un estado de colmatación y sobrecarga hidráulica. Esta situación limita considerablemente su capacidad de depuración, generando un efluente con mayores concentraciones de contaminantes fisicoquímicos como materia orgánica, sólidos suspendidos, cloruros, sulfatos y otras sales disueltas. En consecuencia, las probetas de hormigón fueron sometidas a un entorno de aguas agresivas químicamente del que originalmente fue considerado en el diseño del sistema, lo que permite analizar de forma más realista y exigente su comportamiento frente a condiciones de exposición crítica.

**Figura 12**

Inmersión de probetas de hormigón H30



*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.1.2. Tabla comparativa de parámetros

La siguiente tabla muestra los resultados más relevantes del análisis realizado entre octubre de 2024 y febrero de 2025.

**Tabla 16**

Parámetros del agua - Entrada a la laguna facultativa

| Fecha      | Hora extracción de muestra | pH  | Conductividad (µS/cm) | Oxígeno disuelto (mg/L) | DQO (mg/L) | Sulfatos (mg/L) | Sólidos totales (mg/L) | Sólidos suspendidos (mg/L) |
|------------|----------------------------|-----|-----------------------|-------------------------|------------|-----------------|------------------------|----------------------------|
| 11/10/2024 | 11:28                      | 6,8 | 1057                  | 1,45                    | 316        | 10              | 475                    | 7                          |

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 17**

Parámetros del agua - salida a la laguna facultativa

| Fecha      | Hora extracción de muestra | pH   | Conductividad (µS/cm) | Oxígeno disuelto (mg/L) | DQO (mg/L) | Sulfatos (mg/L) | Sólidos totales (mg/L) | Sólidos suspendidos (mg/L) |
|------------|----------------------------|------|-----------------------|-------------------------|------------|-----------------|------------------------|----------------------------|
| 11/10/2024 | 11:13                      | 7,09 | 1.106,00              | 0,31                    | 248,00     | 10,00           | 511,00                 | 56,00                      |
| 18/10/2024 | 09:50                      | 7,32 | 998,50                | 0,20                    | 230,00     | 20,00           | 425,00                 | 42,00                      |
| 8/11/2024  | 10:30                      | 7,32 | 891,00                | 0,19                    | 176,00     | 45,00           | 386,50                 | 22,00                      |
| 13/12/2024 | 16:42                      | 7,08 | 978,00                | 0,49                    | 221,60     | 52,00           | 907,91                 | 178,16                     |
| 16/1/2025  | 10:50                      | 6,81 | 960,50                | 0,32                    | 187,00     | 35,00           | 476,00                 | 24,00                      |
| 11/2/2025  | 10:15                      | 7,19 | 932,20                | 0,18                    | 245,00     | 32,70           | 425,00                 | 26,00                      |
| 14/2/2025  | 09:50                      | 7,32 | 982,50                | 0,35                    | 285,00     | 35,00           | 423,00                 | 28,00                      |

*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 13**

Extracción de muestras de agua



*Fuente: Elaboración propia*

#### **4.1.3. Análisis de las Variaciones de Parámetros del Agua Residual**

En relación con los parámetros del agua residual, se evidenciaron variaciones significativas en diferentes fechas:

- En PH, se detectó una caída del -3,81% del 13/12/2024 al 16/1/2025, lo que podría estar relacionado con la entrada de aguas ácidas, posiblemente de origen industrial o debido a eventos de lluvia intensa que arrastran contaminantes.
- En conductividad, se observaron fluctuaciones destacadas, con un aumento del 9,76% en diciembre y una caída del -10,77% en noviembre. Estos cambios pueden deberse a fenómenos de dilución por ingreso de agua de lluvia o a descargas de aguas con baja carga iónica.
- En oxígeno disuelto, el aumento del 157,89% del 8/11/2024 al 13/12/2024 podría estar relacionado con un proceso de aireación natural o artificial, o con la entrada de aguas con mayor contenido de oxígeno, seguido de una caída del -34,69% en enero, posiblemente debido a aumento de carga orgánica o reducción del intercambio gaseoso.
- En DQO, el aumento del 31,02% en febrero sugiere un aporte considerable de materia orgánica no degradada, probablemente vinculado a vertimientos no controlados o acumulación de residuos orgánicos.

- En sulfatos, los picos del 125% y 100% en octubre y noviembre podrían estar asociados a descargas industriales con alto contenido de compuestos sulfatados, o al arrastre de sólidos en suspensión durante lluvias intensas.

En sólidos suspendidos, se destaca un aumento crítico del 709,82% en diciembre, lo que indica un evento de arrastre considerable, posiblemente originado por lluvias torrenciales que movilizan grandes cantidades de sedimentos y residuos.

**Tabla 18**

Variación de los parámetros

| Fecha      | pH    | Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | Oxígeno disuelto (mg/L) | DQO (mg/L) | Sulfatos (mg/L) | Sólidos totales (mg/L) | Sólidos suspendidos (mg/L) |
|------------|-------|---|-------------------------|------------|-----------------|------------------------|----------------------------|
| 11/10/2024 | 4,26% | 4,64%                                     | 78,62%                  | 21,52%     | 0,00%           | 7,58%                  | 700,00%                    |
| 18/10/2024 | 3,24% | 9,72%                                     | 35,48%                  | 7,26%      | 100,00%         | 16,83%                 | 25,00%                     |
| 8/11/2024  | 0,00% | 10,77%                                    | 5,00%                   | 23,48%     | 125,00%         | 9,06%                  | 47,62%                     |
| 13/12/2024 | 3,28% | 9,76%                                     | 157,89%                 | 25,91%     | 15,56%          | 134,91%                | 709,82%                    |
| 16/1/2025  | 3,81% | 1,79%                                     | 34,69%                  | 15,61%     | 32,69%          | 47,57%                 | 86,53%                     |
| 11/2/2025  | 5,58% | 2,95%                                     | 43,75%                  | 31,02%     | 6,57%           | 10,71%                 | 8,33%                      |
| 14/2/2025  | 1,81% | 5,40%                                     | 94,44%                  | 16,33%     | 7,03%           | 0,47%                  | 7,69%                      |

*Fuente: Elaboración propia*

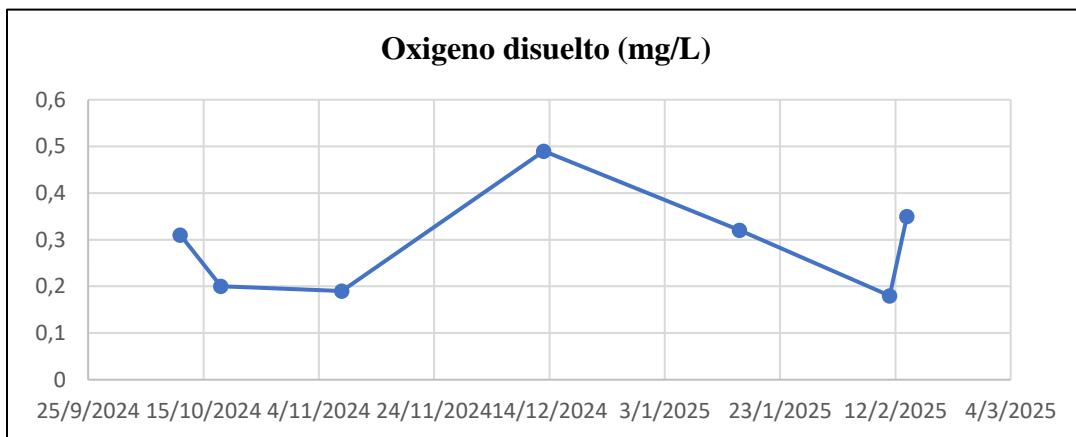
#### 4.1.4. Análisis gráfico de la variación de parámetros

La visualización gráfica de los parámetros clave del agua residual correspondiente a la salida de la laguna facultativa, lugar donde fueron sumergidas las probetas de hormigón, permite identificar comportamientos críticos que influyen directamente en su durabilidad.

Los gráficos generados a partir de siete fechas de muestreo muestran lo siguiente:

**Figura 14**

El oxígeno disuelto

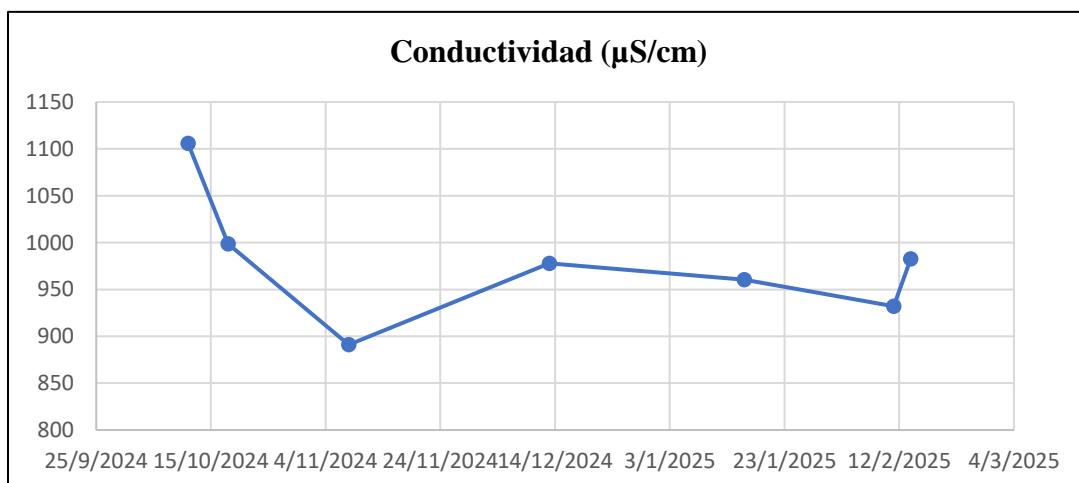


*Fuente: Elaboración propia*

El oxígeno disuelto presenta valores consistentemente bajos, todos por debajo de 0.5 mg/L, con un mínimo de 0.18 mg/L. Estos niveles tan bajos confirman un ambiente anaeróbico, lo cual favorece la proliferación de bacterias reductoras de sulfato que producen ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). Este compuesto penetra en la matriz del hormigón y reacciona con componentes del cemento, provocando expansión, disgragación y pérdida de resistencia mecánica ((ACI), "Guide to Durable Concrete" (Guía para el Hormigón Duradero).ACI 201.2R, 2016)

**Figura 15**

La conductividad eléctrica



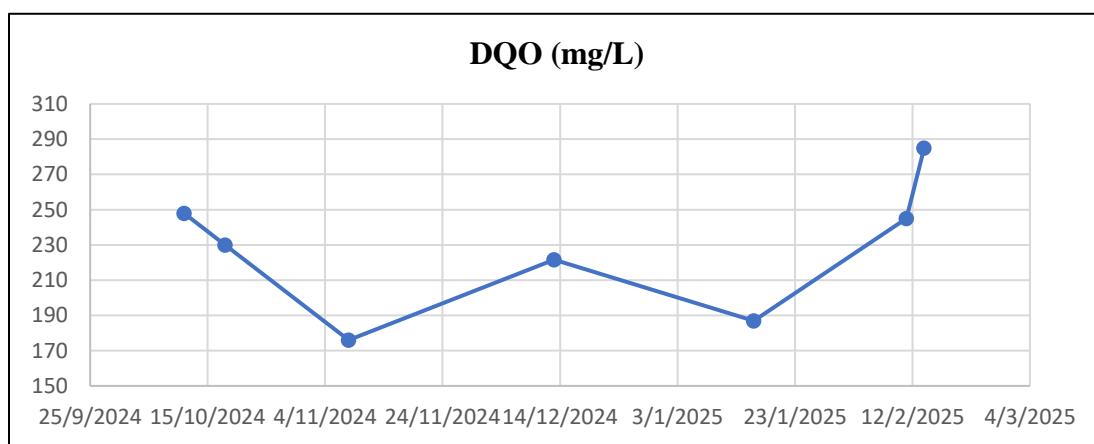
*Fuente: Elaboración propia*

La conductividad eléctrica varió entre 891 y 1106  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , indicando una elevada presencia de sales disueltas (iones como  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ , entre otros). Estas sales pueden facilitar reacciones químicas de lixiviación y deterioro superficial, debilitando la estructura del hormigón expuesto

(International, (Especificación Normalizada para el Agua de Mezclado Utilizada en la Producción de Concreto de Cemento Hidráulico). ASTM C1602/C1602M, 2021)

**Figura 16**

Demanda química de oxígeno (DQO)

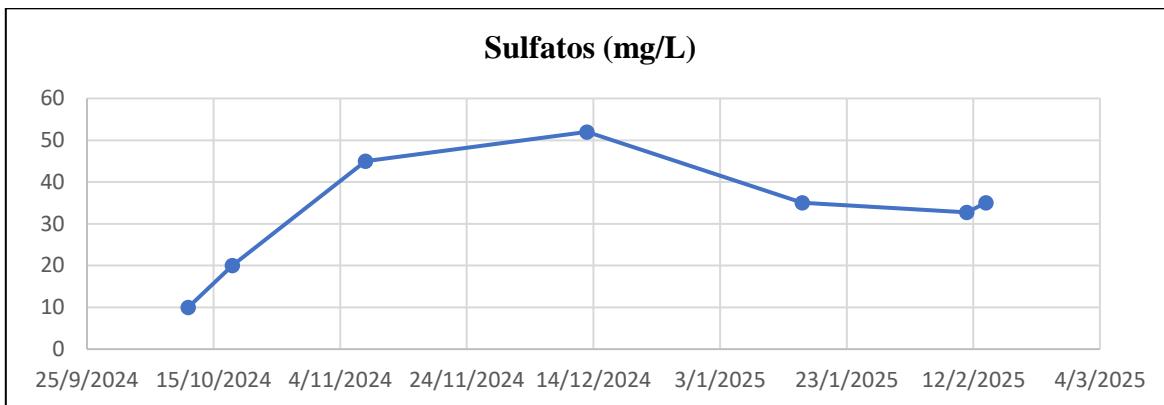


*Fuente: Elaboración Propia*

superá el umbral recomendado de 250 mg/L en dos de los siete muestreos, alcanzando hasta 245 mg/L. Este parámetro refleja la cantidad de materia orgánica presente en el agua, la cual puede fomentar el desarrollo de microorganismos que afectan la integridad del material cementante ( (Guia\_Tec\_Sane (Tomo 2), 2019);

**Figura 17**

Concentración de sulfatos

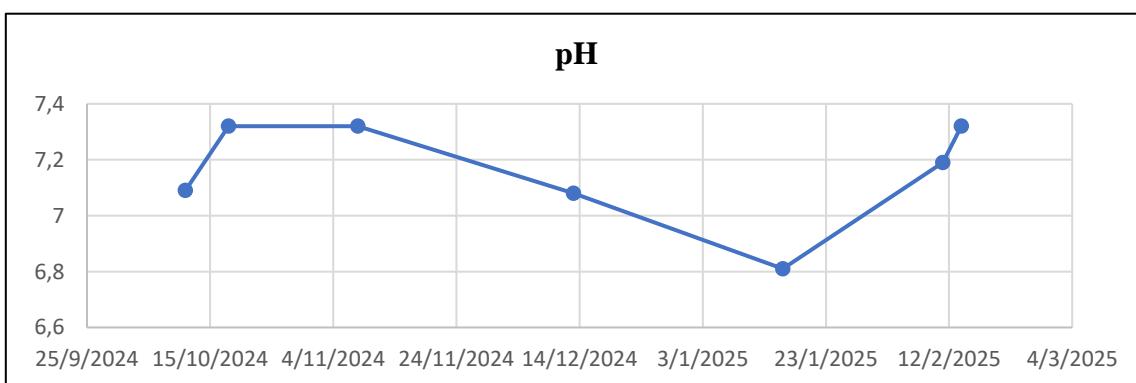


*Fuente: Elaboración Propia*

registró un pico de 52 mg/L en noviembre de 2024. Si bien estos valores están por debajo del límite máximo establecido por la norma boliviana NTB 39010 (200 mg/L), su presencia constante y acumulativa puede iniciar procesos de expansión y fisuración del hormigón, especialmente si el contenido de aluminatos en el cemento es alto (NTB 39010, IBNORCA; ACI 201.2R, 2016).

**Figura 18**

Concentración de PH



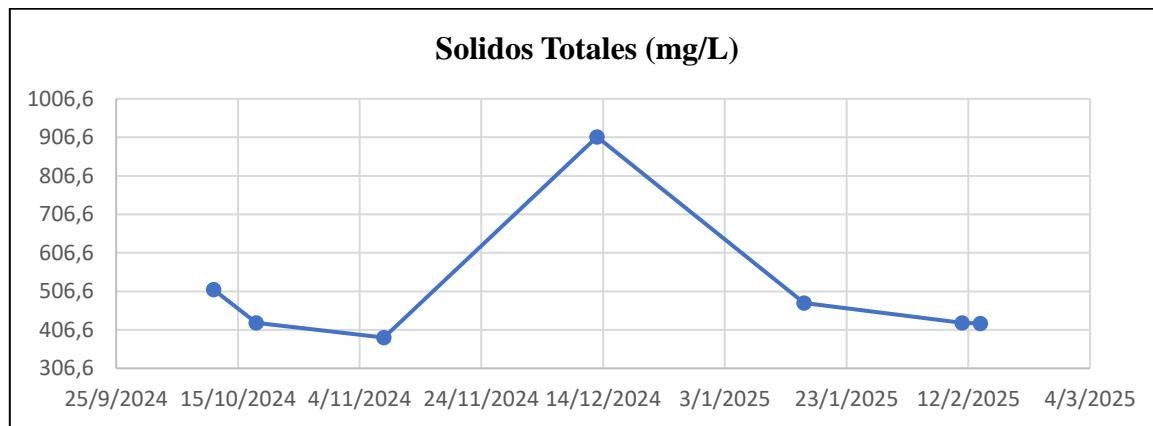
*Fuente: Elaboración propia*

El PH del agua se mantuvo en un rango cercano a neutro, entre 6.81 y 7.32. Si bien estos valores son considerados aceptables, algunos se acercan al límite inferior del rango de seguridad para el concreto (6.5–8), lo cual podría intensificar reacciones químicas indeseadas

en presencia de otros agentes agresivos como cloruros o sulfatos ( (P. Jimenez Montoya, 2000), ASTM C94, 2020).

**Figura 19**

Concentración de sólidos totales



*Fuente: Elaboración Propia*

La concentración de sólidos totales mostró una variación significativa, con un valor máximo de 907.91 mg/L. Aunque este parámetro no produce reacciones químicas internas por sí solo, su alta presencia puede generar abrasión superficial, obstrucción de poros capilares y formación de biopelículas, acelerando el deterioro estructural en condiciones de inmersión prolongada ( (OMS06); SEMAPA, 2018).

**Figura 20**

Extracción de muestras de agua residual en la salida de la laguna facultativa



*Fuente: Elaboración propia*

#### **4.1.5. Identificación de factores críticos presentes en el agua residual**

Con base en el análisis físico-químico realizado a lo largo del periodo de estudio, se identificaron los principales parámetros que pueden comprometer la durabilidad del

hormigón. A partir de los resultados obtenidos y la revisión de normativa técnica nacional e internacional, se seleccionaron tres factores con mayor potencial de agresividad para el material

**Tabla 19**

Factores de agresividad del agua residual sobre el hormigón

| Factor identificado       | Justificación técnica  |
|---------------------------|--|
| Bajo oxígeno disuelto     | Favorece el desarrollo de bacterias anaeróbicas reductoras de sulfato, que generan ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), causante de la corrosión química del hormigón. |
| Alta carga orgánica (DQO) | Indica una gran presencia de materia orgánica, que puede potenciar procesos microbiológicos y reacciones químicas perjudiciales para el cemento.                 |
| Presencia de sulfatos     | Reaccionan con los aluminatos del cemento, generando productos expansivos que provocan agrietamientos y pérdida de cohesión estructural.                         |

*Fuente: Elaboración propia con base en ACI 201.2R-16, Neville (2011) Properties of Concrete, y (Guia\_Tec\_Sane (Tomo 2), 2019)*

Los parámetros identificados como críticos en el análisis del agua residual fueron comparados con los límites establecidos por ACI y ASTM y recomendaciones técnicas de organismos como la OMS, OPS y algunos autores que nos recomiendan como ser (John Diego Bolaños-Alfarol, 2015) (P. Jimenez Montoya, 2000), con el fin de determinar su grado de agresividad hacia el hormigón expuesto.

A continuación, se presenta la tabla de comparación entre los valores registrados en las muestras analizadas y los límites de tolerancia definidos por dichas normativas y referencias:

**Tabla 20**

Parámetros fisicoquímicos del agua residual y su impacto sobre el hormigón estructural

| Parámetro                        | Efecto sobre el hormigón   | Límite recomendado   | Valor máximo observado | Nivel de ataque | Fuente                             |
|----------------------------------|--|--|------------------------|-----------------|------------------------------------|
| pH                               | Corrosión química en ambientes ácidos o muy básicos  | 6.5 – 8  | 6.81                   | Bajo            | (P. Jimenez Montoya, 2000)         |
| Oxígeno disuelto                 | Ambientes anaeróbicos → bacterias SRB → ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ )                              | > 2 mg/L   | 0.18 mg/L              | Bajo            | ACI 201.2R-16                      |
| DQO (Demanda Química de Oxígeno) | Indica mediana carga orgánica → mayor acción microbiana  | (250 – 1.000 mg/L)   | 285 mg/L               | Medio           | (Guia_Tec_Sane (Tomo 2), 2019)     |
| Sulfatos ( $SO_4^{2-}$ )         | Reacción expansiva con aluminatos del cemento → fisuras  | < 200 mg/L   | 52 mg/L                | Bajo            | (John Diego Bolaños-Alfaro1, 2015) |
| Cloruros ( $Cl^-$ )              | Corrosión del acero en estructuras armadas   | < 250 mg/L   | 110 mg/L               | Bajo            | (Real Decreto 2661/1998, 1998)     |
| Conductividad eléctrica          | Indicador de sales disueltas ( $Cl^-$ , $Na^+$ , $SO_4^{2-}$ ); favorece disagregación superficial | > 2.000 $\mu S/cm$ (alta concentración de sales disueltas) | 1.057 $\mu S/cm$       | Bajo            | (5900 Folsom Blvd., 2021)          |
| Sólidos totales                  | Potencial obstrucción de poros y abrasión superficial inicia efectos adversos                      | 1.000 mg/L (1 g/L)   | 907,91 mg/L            | Medio           | (Aldossary, 2020)                  |
| Sólidos suspendidos              | Formación de biopelículas, abrasión, deposición superficial  | < 200 mg/L Aguas contaminadas término medio                | 178,16 mg/L            | Medio           | (Guia_Tec_Sane (Tomo 2), 2019);    |

Fuente: Elaboración propia con base a la, ACI 201.2R-16, (Guia\_Tec\_Sane (Tomo 2),

2019) (John Diego Bolaños-Alfaro1, 2015) (5900 Folsom Blvd., 2021) (Real Decreto

2661/1998, 1998) (Aldossary, 2020) y (P. Jimenez Montoya, 2000) (Calidad & NB

1225001, 2020)

## 4.2. Dosificación del Hormigón

### 4.2.1. Resultados Generales de Laboratorio

Para caracterizar adecuadamente los materiales utilizados en la mezcla de hormigón, se realizaron diversos ensayos de laboratorio a los agregados provenientes de la planta COFAL de la empresa SOBOCE S.A. Las muestras fueron identificadas con los códigos 905-A y 905-

B, correspondientes a arena y grava respectivamente. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cuanto a pesos específicos, porcentaje de absorción y pesos unitarios, conforme a las normas técnicas aplicables.

**Figura 21**

Extracción de áridos



*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 21**

Estudios en laboratorio caracterización de los agregados

|  |                       |
|--|-----------------------|
| Muestra:                                   | 905-A      905-B      |
| Material:                                  | Planta cofal          |
| Obra :                                     | Control de producción |
| Empresa:                                   | Soboce S.A            |
| Fecha de muestreo: 22/08/2024              |                       |
| Fecha de Ingreso a laboratorio: 18/08/2024 |                       |

| CARACTERISTICAS   | UNIDAD | ARENA                 | GRAVA 3/4"              |
|-------------------|--------|-----------------------|-------------------------|
|                   |        | Planta COFAL COF - A3 | Planta COFAL COF - gch3 |
| PESOS ESPECIFICOS | U.U    |                       |                         |
| Real seco:        | gr/cm3 | 2,501                 | 2,582                   |

|                                 |        |       |       |
|---------------------------------|--------|-------|-------|
| Saturado superficialmente seco: | gr/cm3 | 2,536 | 2,612 |
| Neto:                           | gr/cm3 | 2,593 | 2,661 |
| PORCENTAJE DE ABSORCION         | %      | 1,427 | 1,158 |
| PESOS UNITARIOS                 | U.U    |       |       |
| Peso Unitario Suelto:           | gr/cm3 | 1,446 | 1,663 |
| Peso Unitario Asentado:         | gr/cm3 | 1,58  | 1,768 |

*Fuente: Elaboración Propia*

#### 4.2.2. Análisis Granulométrico de los Áridos

El análisis granulométrico es esencial para determinar la distribución del tamaño de las partículas en los agregados fino y grueso, ya que esta propiedad incide directamente en la trabajabilidad, resistencia y durabilidad del hormigón. El estudio se realizó siguiendo los procedimientos de la norma ASTM C136, tanto para el agregado fino (arena) como para el agregado grueso (grava), permitiendo establecer si los materiales cumplen con los rangos especificados para una adecuada dosificación. Los resultados obtenidos se presentan en las tablas siguientes, comparados con los límites establecidos por la norma ASTM C-33

**Figura 22**

Ensayo de granulometría por tamizado



*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 22**

Análisis granulométrico del Agregado Grueso

| Peso Total (gr.) = |        | 3000      |                    |       |            |
|--------------------|--------|-----------|--------------------|-------|------------|
| Tamices            | Tamaño | Peso Ret. | Retenido Acumulado |       | % Que pasa |
|                    | (mm)   | (g)       | (gr)               | (%)   | del total  |
| 2 1/2"             | 63     | 0         | 0                  | 0     | 100        |
| 2                  | 50,8   | 0         | 0                  | 0     | 100        |
| 1 1/2              | 38,1   | 0         | 0                  | 0     | 100        |
| 1                  | 25,4   | 0         | 0                  | 0     | 100        |
| 3/4                | 19,05  | 75,6      | 75,6               | 2,52  | 97,5       |
| 1/2                | 12,5   | 1.462,5   | 1.538,1            | 51,27 | 48,7       |
| 3/8                | 9,5    | 642,9     | 2181               | 72,7  | 27,3       |
| Nº4                | 4,8    | 749,4     | 2.930,4            | 97,68 | 2,3        |
| Nº8                | 2,36   | 43,5      | 2.973,9            | 99,13 | 0,87       |
| Nº16               | 1,18   | 0         | 0                  | 0     | 0          |
| Nº30               | 0,6    | 0         | 0                  | 0     | 0          |
| Nº50               | 0,3    | 0         | 0                  | 0     | 0          |
| Nº100              | 0,15   | 0         | 0                  | 0     | 0          |
| BASE               | 0      | 0         | 0                  | 0     | 100        |
| SUMA =             |        | 2973,9    |                    |       |            |
| PÉRDIDAS =         |        | 26,1      | TAMAÑO MAX =       |       | 1 1/2 "    |
| MF =               |        | 3,23      |                    |       |            |

*Fuente: Elaboración Propia***Tabla 23**

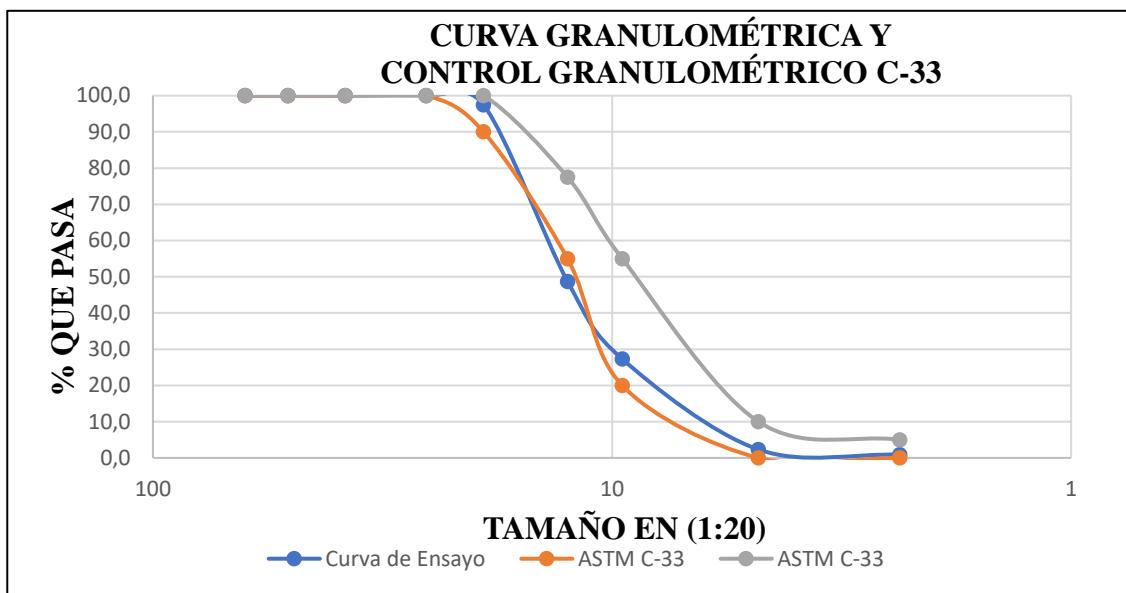
Resultados de Tamizado según Norma ASTM C-33

| Tamices | Tamaño (mm) | % Que pasa del total | Norma ASTM C-33 |      |
|---------|-------------|----------------------|-----------------|------|
| 2 1/2"  | 63          | 100                  | 100             | 100  |
| 2       | 50,8        | 100                  | 100             | 100  |
| 1 1/2   | 38,1        | 100                  | 100             | 100  |
| 1       | 25,4        | 100                  | 100             | 100  |
| 3/4     | 19,05       | 97,48                | 90              | 100  |
| 1/2     | 12,5        | 48,73                | 55              | 77,5 |
| 3/8     | 9,5         | 27,3                 | 20              | 55   |
| Nº4     | 4,8         | 2,32                 | 0               | 10   |
| Nº8     | 2,36        | 0,87                 | 0               | 5    |

*Fuente: Elaboración Propia*

**Figura 23**

Curva granulométrica del agregado grueso C-33



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 24**

Ánálisis granulométrico del Agregado fino

| Peso Total (gr.) = |        | 500       |             |       |                      |
|--------------------|--------|-----------|-------------|-------|----------------------|
| Tamices            | tamaño | Peso Ret. | Ret. Acum   | % Ret | % que pasa del total |
|                    | (mm)   | (g)       |             |       |                      |
| 3/8                | 9,5    | 0         | 0           | 0     | 100                  |
| Nº4                | 4,75   | 36,7      | 36,7        | 7,34  | 92,7                 |
| Nº8                | 2,36   | 67,35     | 104,05      | 20,81 | 79,2                 |
| Nº16               | 1,18   | 46,6      | 150,65      | 30,13 | 69,9                 |
| Nº30               | 0,6    | 51,7      | 202,35      | 40,47 | 59,5                 |
| Nº50               | 0,3    | 159,1     | 361,45      | 72,29 | 27,7                 |
| Nº100              | 0,15   | 112,7     | 474,15      | 94,83 | 5,2                  |
| BASE               |        | 23,46     | 497,61      | 99,52 | 0,5                  |
|                    |        | SUMA      | 497,6       |       |                      |
|                    |        | PÉRDIDAS  | 2,4         |       |                      |
|                    |        | MF =      | <b>2,66</b> |       |                      |

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 25**

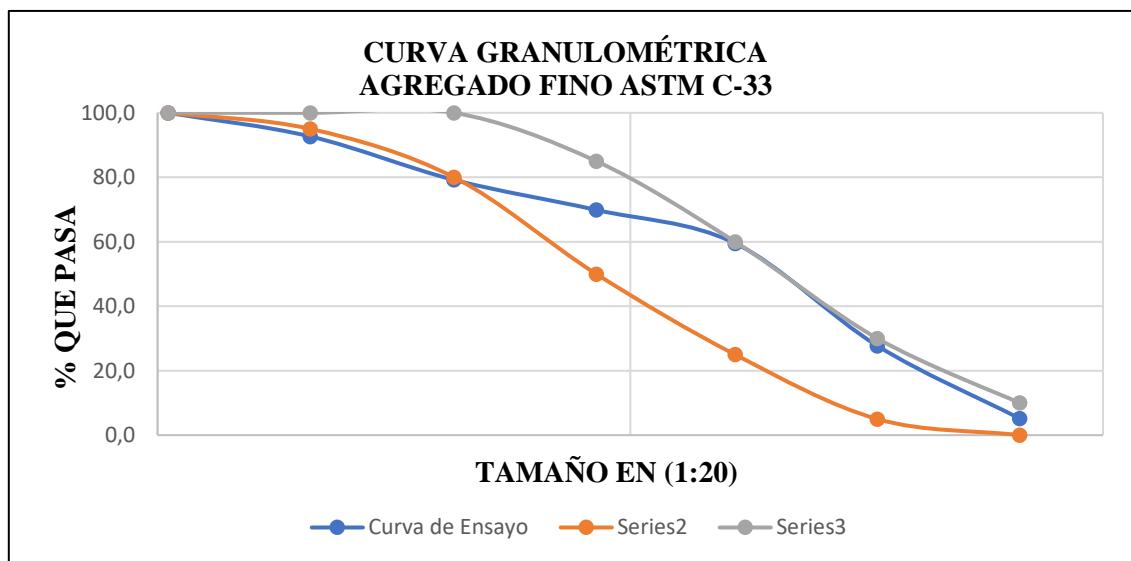
Resultados de Tamizado según Norma ASTM C-33

| Tamices | % que pasa del total | Norma ASTM C-33 |     |
|---------|----------------------|-----------------|-----|
| 3/8"    | 100                  | 100             | 100 |
| Nº4     | 92,7                 | 95              | 100 |
| Nº8     | 79,2                 | 80              | 100 |
| Nº16    | 69,9                 | 50              | 85  |
| Nº30    | 59,5                 | 25              | 60  |
| Nº50    | 27,7                 | 5               | 30  |
| Nº100   | 5,2                  | 0               | 10  |
| BASE    | 0,5                  | 0               | 0   |

Fuente: *Elaboración Propia*

**Figura 24**

Curva granulométrica del agregado fino ASTM C-33



Fuente: *Elaboración propia*

#### 4.2.3. Resumen de Resultados de Caracterización de Materiales

En la siguiente tabla se resumen los principales resultados obtenidos en los ensayos físicos realizados a los materiales empleados (arena, grava y cemento), los cuales fueron utilizados como base para la dosificación del hormigón. Todos los ensayos se realizaron conforme a normas ASTM y AASHTO, como se indica.

**Figura 25**

Ensayos físicos de los áridos



*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 26**

Resultados de Ensayos Físicos de Agregados según Normas ASTM y AASHTO

| RESUMEN DE RESULTADOS                                   |          |                          |                              |
|---|----------|--------------------------|------------------------------|
| PROCEDENCIA ENSAYO                                      | MATERIAL | RIO CAMACHO<br>RESULTADO | OBSERVACIONES                |
| Peso Específico (ASTM C 127 - AASHTO T 185)             | Grava    | 2,58 gr/cm <sup>3</sup>  |                              |
| Peso unitario suelto (ASTM 30 - ASTM 29)                | Grava    | 1.663 kg/m <sup>3</sup>  |                              |
| Peso unitario varillado (ASTM 30 - ASTM 29)             | Grava    | 1.768 kg/m <sup>3</sup>  |                              |
| Absorción (ASTM C 127 - AASHTO T 185)                   | Grava    | 1,16%                    |                              |
| Contenido de Humedad (ASTM 566 - NB 595)                | Grava    | 1,55%                    | (Varía de acuerdo al tiempo) |
| Peso Específico (ASTM C 127 - AASHTO T 185)             | Arena    | 2,5 gr/cm <sup>3</sup>   |                              |
| Peso unitario suelto (ASTM 30 - ASTM 29)                | Arena    | 1.446 kg/m <sup>3</sup>  |                              |
| Peso unitario varillado (ASTM 30 - ASTM 29)             | Arena    | 1.580 kg/m <sup>3</sup>  |                              |
| Absorción (ASTM C 127 - AASHTO T 185)                   | Arena    | 1,43%                    |                              |
| Contenido de Humedad (ASTM 566 - NB 595)                | Arena    | 6,10%                    | (Varía de acuerdo al tiempo) |
| Peso Específico del Cemento (ASTM C 188 - AASHTO T 133) | Cemento  | 3,06 gr/cm <sup>3</sup>  |                              |

*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.2.4. Dosificación teórica del hormigón patrón H30

Para la dosificación del hormigón patrón H30, se consideró una resistencia de diseño de 300 kg/cm<sup>2</sup>, incorporando un aditivo hidrofílico cristalino en un 2% respecto al peso del cemento. Esta dosificación se realizó en base a tablas empíricas, respaldadas por ensayos, años de experiencia y la aplicación de la norma ACI 211.1. Con el apoyo técnico de la empresa SOBOCE S.A., se llevó a cabo el seguimiento detallado de cada uno de los pasos necesarios para determinar con precisión las cantidades de materiales requeridas para la elaboración de 1 m<sup>3</sup> de hormigón fresco. Asimismo, se recurrió a la norma ACI 211.4, junto con fichas técnicas y bibliografía especializada, para definir la dosificación adecuada del aditivo hidrofílico cristalino, asegurando su correcta incorporación y compatibilidad con el cemento utilizado.

##### 4.2.4.1. Selección del asentamiento

El hormigón que se dosificará estará aplicado para el área de estructuras como ser Columnas en Edificios de HoAo y estructuras que requieran un hormigón con buena resistencia, por lo tanto, según el cuadro siguiente que se mostrará, se determinará que el asentamiento esperado será entre 1" y 3". (8-2.5) cm, adoptando la media de 2" como máximo asentamiento.

**Tabla 27**

Asentamiento para tipos de construcción

| TIPOS DE CONSTRUCCION                             | ASENTAMIENTOS |           |
|---|---------------|-----------|
|   | Máximos       | Mínimos   |
| zapatas y muros de fundaciones de HoAo            | 3" (80mm)     | 1" (25mm) |
| Zapatas simples, cajones y muros de subestructura | 3" (80mm)     | 1" (25mm) |
| Vigas y muros de HoAo                             | 4" (100mm)    | 1" (25mm) |
| Columnas de HoAo                                  | 4" (100mm)    | 1" (25mm) |
| Losas y pavimentos                                | 3" (80mm)     | 1" (25mm) |

*Fuente: Instituto Americano del Concreto (1991). Manual de Tecnología del Concreto*

##### 4.3.4.2. Selección del tamaño máximo del agregado grueso

$D_{max} \leq 1/5$  dimensión más angosta entre caras del encofrado  $\leq 1/5$  (20 cm)  $\leq 4$  cm

$D_{max} \leq 1/3$  del espesor de las losas  $\leq 1/3$  (20 cm)  $\leq 6.67$  cm

$D_{max} \leq 3/4$  distancia libre entre armaduras o cables de presfuerzo  $\leq 3/4$  (7.60 cm)  $\leq 5.7$  cm

De acuerdo con la granulometría del agregado grueso realizada por el personal de la empresa SOBOCE, se determinó que el tamaño máximo del agregado grueso es de 3/4" (20 mm). Este tipo de agregado fue extraído del río Camacho

#### 4.2.4.3. Estimación del contenido de agua de mezclado y aire incorporado

Según el cuadro siguiente, se estimó que el contenido de agua está en un rango de 185 a 190 litros/m<sup>3</sup> y consideramos sin aire incorporado a la mezcla.

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**:

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

#### Determinar la resistencia promedio requerida (f 'cr)

Para el proyecto se consideró una sola resistencia f'c = 30 MPa

Se obtiene de la "Resistencia promedio requerida f 'cr, Cuando no hay datos disponibles para establecer la desviación estándar."

$$f'cr = 215 + 85 = 300 \text{ kg/cm}^2$$

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

Para determinar este valor y teniendo como dato f 'cr = 300 kg/cm<sup>2</sup> interpolamos límites superior e inferior de la Tabla 12, y tenemos:

|       |      |
|-------|------|
| f 'c  | a/c  |
| 300 = | 0.54 |

se adoptó una relación (a/c) de 0,54

#### 4.3.4.4. Determinación de la cantidad de cemento

La cantidad de cemento se determinó con la ecuación de relación agua cemento descrita a continuación:

$$\text{Cemento} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{Agua de la mezcla} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{\text{relacion} \left( \frac{a}{c} \right)}$$

$$\text{Cemento} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{190 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{0,54 \left( \frac{a}{c} \right)} = 351,81 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$\text{Cemento} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 351,81 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

#### 4.2.4.5. Cálculo del peso agregado grueso (Gr)

Se obtiene el Vol. Agr. Grueso / Vol. unitario concreto (Vr/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**.

Interpolación:

|      |   |      |
|------|---|------|
| 2,80 |   | 0,62 |
| 2,70 | = | Vr/v |
| 3,00 |   | 0,60 |

Realizando la interpolación nos da:

$$\frac{Vr}{v} = 0,63 \text{ m}^3$$

#### Peso del Agregado Grueso (Pag)

$$\text{Pag} = (Vr/v) * P.U.A$$

$$\text{Pag} = 0,63 \text{ m}^3 * 1.580 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 1.001,72 \text{ kg}$$

#### Volumen del Agregado Grueso (Vag)

$$(\text{Vag}) = \text{Pag} / \text{Peso específico de la Grava}$$

$$(\text{Vag}) = \frac{1.001,72 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{2,58 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}} = 388,26 \left( \frac{\text{lt}}{\text{m}^3} \right)$$

$$(\text{Vag}) = 388,26 \text{ lt/m}^3$$

#### Volumen del Cemento (Vc)

$$(\text{Vc}) = \text{Pc} / \text{Peso específico del cemento}$$

$$(\text{Vc}) = \frac{351,81 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{3,06 \left( \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)} = 114,98 \left( \frac{\text{lt}}{\text{m}^3} \right)$$

$$(\text{Vc}) = 114,98 \left( \frac{\text{lt}}{\text{m}^3} \right)$$

#### Volumen de Arena (Vaf)

$$(\text{Vaf}) = 1.000 - \text{Vc} - \text{A} - \text{Vag}$$

$$(\text{Vaf}) = 1.000 - 114,98 - 190 - 388,26$$

$$(\text{Vaf}) = 306,75 \left( \frac{\text{lt}}{\text{m}^3} \right)$$

#### Peso del agregado fino (Paf)

(Paf) = Vaf/ Peso específico de la arena

$$(Vc) = 304,16 \left( \frac{lt}{m^3} \right) * 2,50 \left( \frac{gr}{cm^3} \right) = 766,88 \left( \frac{kg}{m^3} \right)$$

**Tabla 28**

Contenido seco de los componentes por (m<sup>3</sup>) de concreto

| Contenido seco de los componentes por (m <sup>3</sup> ) de concreto |                   |                   |                    |
|---|-------------------|-------------------|--------------------|
| Componentes   | Peso Seco         | Volumen Absoluto  | Peso específico    |
|   | kg/m <sup>3</sup> | lt/m <sup>3</sup> | gr/cm <sup>3</sup> |
| Cemento   | 351,85            | 114,98            | 3,06               |
| Agua  | 190,00            | 190,00            | 1,00               |
| Grava   | 1.001,72          | 388,26            | 2,58               |
| Arena   | 766,88            | 306,75            | 2,50               |
| <b>TOTAL</b>  | <b>2.310,45</b>   | <b>1.000,00</b>   |                    |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.4.6. Cálculo de los pesos húmedos de los materiales

##### Peso húmedo de la arena (Pha)

$$(Pha) = Paf * (1 + Ha)$$

$$(Pha) = 766,88 \left( \frac{kg}{m^3} \right) \left( 1 + \frac{6,10}{100} \right)$$

$$(Pha) = 813,66 \left( \frac{kg}{m^3} \right)$$

##### Pesos húmedos de la grava (Phg)

$$(Phg) = Pag * (1 + Hg)$$

$$(Phg) = 1.001,72 \left( \frac{kg}{m^3} \right) \left( 1 + \frac{1,55}{100} \right)$$

$$(Phg) = 1.017,25 \left( \frac{kg}{m^3} \right)$$

#### 4.2.4.7. Corrección del contenido de agua

##### Agua corregida a la grava (Acg)

$$(Acg) = Pag * (Ag - Hg)$$

$$(Acg) = 1.001,72 \left( \frac{kg}{m^3} \right) * \left( \frac{1,16}{100} - \frac{1,55}{100} \right)$$

$$(Acg) = -3,91 \left( \frac{lt}{m^3} \right)$$

#### Agua corregida a la arena (Acf)

$$(Acf) = Paf * (Aa-Ha)$$

$$(Acg) = 766,88 \left( \frac{kg}{m^3} \right) * \left( \frac{1,43}{100} - \frac{6,10}{100} \right)$$

$$(Acf) = -35,81 \left( \frac{lt}{m^3} \right)$$

#### Total, agua corregida (Atc)

$$(Atc) = (Acg) - (Acf)$$

$$(Atc) = -3,91 - 35,81 = -39,72 \left( \frac{lt}{m^3} \right)$$

$$(Atc) = -39,72 \left( \frac{lt}{m^3} \right)$$

#### 4.2.4.8. Contenido húmedo y proporciones finales de la mezcla teórica

A partir de los valores corregidos por humedad de los materiales y la relación agua-cemento establecida, se determina el contenido húmedo final de los componentes por metro cúbico de concreto, así como las proporciones relativas de la mezcla teórica. Estos resultados se presentan en las siguientes tablas:

**Tabla 29**

Contenido Húmedo y Seco de los Componentes por  $m^3$  de Concreto

| Componentes  | Peso Seco       | Peso Húmedo     |
|--------------|-----------------|-----------------|
|              | $kg/m^3$        | $kg/m^3$        |
| Cemento      | 351,85          | 351,85          |
| Agua         | 190,00          | 150,28          |
| Grava        | 1.001,72        | 1.010,25        |
| Arena        | 766,88          | 813,66          |
| <b>TOTAL</b> | <b>2.310,45</b> | <b>2.333,04</b> |

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 30**

Proporciones de mezcla

| Cemento | Arena | Grava |
|---------|-------|-------|
| 1       | 2,18  | 2,85  |

Fuente: Elaboración propia

**4.2.4.9. Dosificación práctica en campo del hormigón patrón H30**

En la presente dosificación, se observa que los valores obtenidos mediante el cálculo teórico difieren de aquellos utilizados en una dosificación práctica en campo, proporcionada por la empresa SOBOCE. Esta diferencia se explica porque los cálculos teóricos se basan en condiciones ideales y suposiciones estándar, que no siempre reflejan las particularidades de los materiales y condiciones locales. En cambio, la empresa SOBOCE, con amplia experiencia en la industria, ha desarrollado dosificaciones optimizadas a partir de su conocimiento técnico, la experiencia de su personal, y los resultados obtenidos en su banco de pruebas.

Dichos valores prácticos representan una adaptación basada en ensayos reales, en los cuales se consideran factores como la granulometría y humedad específicas de los agregados, así como el comportamiento del concreto en condiciones reales de obra. Por lo tanto, la empresa ha realizado ajustes a la dosificación teórica para obtener una mezcla que cumpla con los requisitos de resistencia de un concreto H30, utilizando cemento IP-40, asegurando así su aplicabilidad y desempeño en el medio local.

Los siguientes Datos son:

**Tabla 31**Composición Corregida del contenido seco de los ingredientes por (m<sup>3</sup>) de concreto

| Componentes  | Contenido seco de los ingredientes por (m <sup>3</sup> ) de concreto |                                       |                                       |
|--------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
|              | Peso Seco<br>kg/m <sup>3</sup>                                       | Volumen Absoluto<br>lt/m <sup>3</sup> | Peso específico<br>gr/cm <sup>3</sup> |
| Cemento      | 350  | 114,98                                | 3,06                                  |
| Agua         | 196  | 196,00                                | 1,00                                  |
| Grava        | 945  | 385,81                                | 2,58                                  |
| Arena        | 773,01   | 309,21                                | 2,50                                  |
| <b>TOTAL</b> | <b>2.264,01</b>  | <b>1.000,00</b>                       |                                       |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 32**

Contenido Húmedo y Seco corregido de los Componentes por m<sup>3</sup> de Concreto

| Contenido húmedo de los componentes por (m3) de hormigón |                   |                   |
|--|-------------------|-------------------|
| Componentes  | Peso Seco         | Peso Húmedo       |
|  | kg/m <sup>3</sup> | kg/m <sup>3</sup> |
| Cemento  | 350,00            | 350,00            |
| Agua   | 196,00            | 156,21            |
| Grava  | 945,00            | 959,65            |
| Arena  | 773,01            | 820,17            |
| TOTAL  | 2.264,01          | 2.286,03          |

*Fuente: Elaboración propia*

Usando el aditivo Membrana Interna Krystol™ (KIM), al 2% de la cantidad de cemento

**Tabla 33**

Proporciones de mezcla corregida

| PROPORCIONES DE MEZCLA |       |       |
|------------------------|-------|-------|
| Cemento                | Arena | Grava |
| 1                      | 2,21  | 2,7   |

*Fuente: Elaboración Propia*

Después de haber obtenido ya las cantidades de los materiales, se procedió a realizar la elaboración de las mezclas juntamente con los técnicos de la planta de SOBOCE

**Figura 26**

Elaboración de mezclas de hormigón



*Fuente: Elaboración propia*

Para garantizar una adecuada adherencia entre los agregados utilizados (grava y arena) durante la elaboración del hormigón, se procedió al lavado y secado previo de la mezcladora. Esta acción fue necesaria para eliminar restos de mezclas anteriores, residuos de cemento endurecido o partículas contaminantes que podrían afectar la homogeneidad y calidad del nuevo hormigón. Una mezcladora limpia asegura que los materiales se integren correctamente desde el inicio del proceso, evitando la presencia de cuerpos extraños que puedan interferir en la hidratación del cemento o reducir la resistencia mecánica del concreto final.

#### **4.2.10 Proceso de mezclado, moldeado y curado de las probetas**

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 vertida en un recipiente para realizar el ensayo de asentamiento mediante el cono de Abrams, el cual se llenó en tres capas, compactando cada una con 25 golpes utilizando una varilla metálica. Una vez lleno el cono, se niveló la mezcla en la parte superior y posteriormente se retiró el cono cuidadosamente para medir el asentamiento. En la mezcla inicial, sin aditivo, se obtuvo un asentamiento mínimo de aproximadamente 1 cm, lo que evidenció una baja trabajabilidad. Por esta razón, se optó por incorporar el aditivo fluidificante Sika Viscocrete 5-800, lo que permitió mejorar notablemente la consistencia y facilidad de manejo del concreto. La mezcla fue agitada durante 3 minutos adicionales para garantizar una integración homogénea del aditivo, obteniendo así un asentamiento de 15cm adecuado para su bombeo y colocación durante el vaciado

**Figura 27**

Determinación de la consistencia del concreto fresco mediante el ensayo de asentamiento



*Fuente: Elaboración propia*

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. Curado de probetas Despues 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 de las instalaciones de SOBOCE

**Figura 28**

Cilindros de concreto de 10x20 en proceso



*Fuente: Elaboración propia*

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.

#### **4.3. Evaluación de la resistencia a compresión de las probetas H30**

Con el objetivo de establecer una base comparativa sobre el comportamiento mecánico del hormigón, se realizaron ensayos de compresión en probetas elaboradas con una dosificación

de 350 kg de cemento por metro cúbico, en dos condiciones: sin aditivo y con la adición del aditivo hidrofílico cristalino Kryton (KIM). Esta sección presenta los resultados obtenidos bajo condiciones estándar de curado, los cuales serán utilizados como referencia para posteriores comparaciones con probetas expuestas a ambientes agresivos.

#### 4.3.1 Resistencia característica

Para determinar la resistencia característica se utiliza la siguiente fórmula:

$$f'c = X_{\text{prom}} * (1 - tv)$$

Fuente: Fuente: Abanto Castillo (2009). Tecnología del Concreto

Donde:

$f'c$  = Resistencia característica o especificada a compresión a los 28 días.

$X_{\text{prom}}$  = Resistencia promedio a compresión o flexión a los 28 días.

$v$  = Coeficiente de variación.

$t$  = Coeficiente estadístico

Los valores del coeficiente “ $t$ ” se determinaron en función del nivel de confianza de los resultados de resistencias, según las exigencias estructurales de las obras. Para determinar la influencia del aditivo en el hormigón adoptamos un nivel de confianza de 95 % por tratarse de hormigones elaborados en laboratorio donde se toman todas las previsiones necesarias para obtener un buen hormigón.

#### Figura 29

Determinación de la resistencia a la compresión del concreto



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 34**

Valores De Coeficiente Estadístico “T”

| NÚMERO DE MUESTRAS | 80%   | 90%   | 95%   |
|--------------------|-------|-------|-------|
| 1                  | 1.376 | 3.078 | 6.314 |
| 2                  | 1.061 | 1.886 | 2.920 |
| 3                  | 0.978 | 1.638 | 2.353 |
| 4                  | 0.941 | 1.533 | 2.132 |
| 5                  | 0.920 | 1.476 | 2.015 |
| 6                  | 0.906 | 1.440 | 1.943 |
| 7                  | 0.896 | 1.415 | 1.895 |
| 8                  | 0.889 | 1.397 | 1.860 |
| 9                  | 0.883 | 1.383 | 1.833 |
| 10                 | 0.879 | 1.372 | 1.812 |
| 15                 | 0.866 | 1.341 | 1.753 |
| 20                 | 0.860 | 1.325 | 1.725 |
| 25                 | 0.856 | 1.316 | 1.708 |
| 30                 | 0.854 | 1.310 | 1.697 |
| >30                | 0.842 | 1.282 | 1.645 |

Fuente: *Instituto Americano del Concreto (1991). Manual de Tecnología del Concreto*

El coeficiente de variación (V) es el resultado de dividir la desviación estándar entre la resistencia promedio, expresado de la siguiente manera:

$$V = \frac{Ss}{X_{\text{prom}}}$$

Fuente: Abanto Castillo (2009). Tecnología del Concreto

Donde:

V = Coeficiente de variación.

Ss = Desviación estándar de la muestra.

X<sub>prom</sub> = Promedio de “n” resultados de ensayos

La manera de hallar la desviación estándar depende del número de muestras que se tenga en cuenta para la ejecución del control de calidad de la producción. La ecuación de la desviación estándar para datos menores de 30 la muestra se la expresa de la siguiente manera:

$$Ss = \sqrt{\frac{\sum (X_i - X_{\text{prom}})^2}{n - 1}}$$

Donde:

$S_s$  = Desviación estándar de la muestra.

$X_i$  = Segundo normativa.

$X_{\text{prom}}$  = Promedio de  $n$  resultados de ensayo.

$n$  = número de probetas

Siguiendo el procedimiento indicado se obtienen los siguientes resultados:

#### 4.3.2 Hormigón patrón H30 con y sin aditivo

**Tabla 35**

Resistencia a compresión del Hormigón Patrón H30 (Mezcla sin uso de Aditivo)

| Edad (Días) | F(t)<br>Mpa(mm <sup>2</sup> ) | Resistencia promedio | Desviación estándar (S <sub>s</sub> ) | Coeficiente de variación (V) | Coeficiente estadístico "t" | Resistencia característica Mpa (mm <sup>2</sup> ) |
|-------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|
| 7           | 40,50                         | 40,960               | 1,579                                 | 0,039                        | 2,353                       | 37,245  |
|             | 39,66                         |                      |                                       |                              |                             |   |
|             | 42,72                         |                      |                                       |                              |                             |   |
| 28          | 46,04                         | 46,945               | 0,918                                 | 0,020                        | 1,753                       | 45,336  |
|             | 46,36                         |                      |                                       |                              |                             |   |
|             | 47,69                         |                      |                                       |                              |                             |   |
|             | 46,63                         |                      |                                       |                              |                             |   |
|             | 46,72                         |                      |                                       |                              |                             |   |
|             | 45,30                         |                      |                                       |                              |                             |   |
|             | 45,14                         |                      |                                       |                              |                             |   |
|             | 47,39                         |                      |                                       |                              |                             |   |
|             | 47,83                         |                      |                                       |                              |                             |   |
|             | 46,91                         |                      |                                       |                              |                             |   |
|             | 47,19                         |                      |                                       |                              |                             |   |
|             | 48,01                         |                      |                                       |                              |                             |   |
|             | 47,25                         |                      |                                       |                              |                             |   |
|             | 47,96                         |                      |                                       |                              |                             |   |
|             | 47,74                         |                      |                                       |                              |                             |   |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 36**

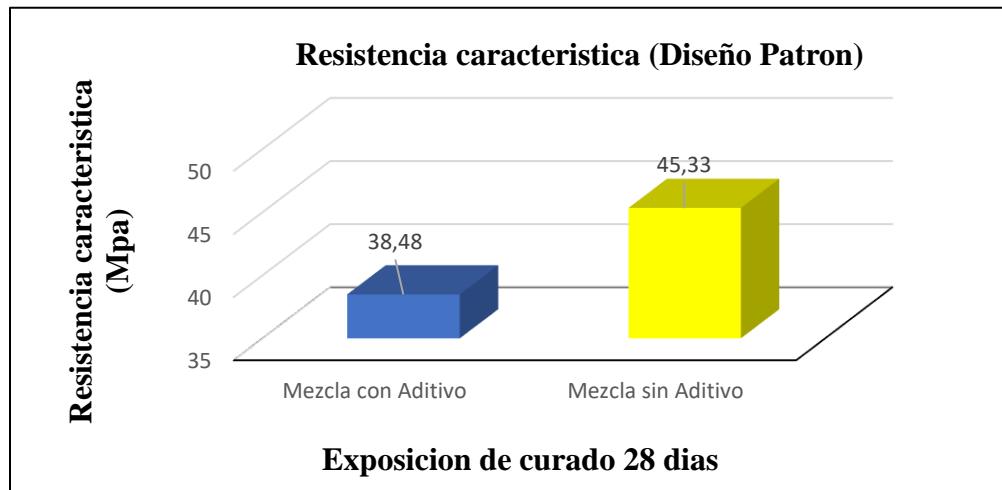
Resistencia a compresión del Hormigón Patrón H30 (Mezcla con uso de Aditivo)

| Descripción                        | Edad (Días) | F(t) Mpa(mm2) | Resistencia promedio | Desviación estándar (Ss) | Coeficiente de variación (V) | Coeficiente estadístico "t" | Resistencia característica Mpa (mm2) |
|------------------------------------|-------------|---------------|----------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Diseño patrón (Mezcla con Aditivo) | 7           | 35,80         | 36,032               | 0,205                    | 0,0057                       | 2,353                       | 35,550                               |
|                                    |             | 36,15         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                    |             | 36,15         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                    | 28          | 43,40         | 40,999               | 1,436                    | 0,0350                       | 1,753                       | 38,481                               |
|                                    |             | 39,28         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                    |             | 37,67         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                    |             | 40,93         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                    |             | 40,80         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                    |             | 41,78         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                    |             | 39,98         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                    |             | 42,09         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                    |             | 41,80         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                    |             | 42,72         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                    |             | 42,09         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                    |             | 40,09         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                    |             | 40,56         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                    |             | 41,31         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                    |             | 40,49         |                      |                          |                              |                             |                                      |

*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 30**

Resistencia Característica a los 28 Días: Diseño Patrón vs. Diseño patrón con Aditivo



*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 37**

Resumen del comportamiento del Hormigón H30

| Tabla Resumen (Curado Normal)    |      |                      |                          |                              |                             |                                  |
|----------------------------------|------|----------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Descripción                      | Edad | Resistencia promedio | Desviación estándar (Ss) | Coeficiente de variación (V) | Coeficiente estadístico "t" | Resistencia característica (Mpa) |
| Diseño patrón mezcla sin Aditivo | 28   | 46,94                | 9,179                    | 0,020                        | 1,753                       | 45,33                            |
| Diseño patrón mezcla con Aditivo | 28   | 40,99                | 14,364                   | 0,035                        | 1,753                       | 38,48                            |

*Fuente: Elaboración propia*

### 4.3.3 Comparación de comportamiento del hormigón patrón

**Tabla 38**

Comparación de Parámetros Estadísticos y de Resistencia a Compresión: Hormigón Patrón con y sin Aditivo

| Parámetro Evaluado               | Mezcla sin Aditivo | Mezcla con Aditivo | Interpretación Técnica   |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|--|
| Resistencia Promedio (Mpa)       | 46,94              | 40,99              | La mezcla sin aditivo muestra una mayor resistencia promedio a compresión.   |
| Desviación Estándar (Ss)         | 9,18               | 14,36              | La mezcla con aditivo presenta mayor dispersión en los resultados, menor uniformidad.  |
| Coef. de Variación (V)           | 0,02               | 0,035              | Valores más bajos indican mayor homogeneidad: mejor comportamiento sin aditivo.  |
| Resistencia Característica (Mpa) | 45,33              | 38,48              | El diseño sin aditivo supera al diseño con aditivo en 68,55 kg/cm <sup>2</sup> , lo que representa un incremento del 15,12% en la resistencia característica, brindando una mayor confiabilidad estructural. |

*Fuente: Elaboración propia*

Este comportamiento podría atribuirse a una posible incompatibilidad entre el aditivo y los componentes del concreto, a una dosificación no óptima, o bien a que los efectos del aditivo estén diseñados para manifestarse en condiciones más agresivas o en edades avanzadas del hormigón. En este sentido, se hace necesaria una evaluación más profunda bajo otras condiciones de exposición, como la inmersión prolongada en aguas residuales, donde el aditivo podría demostrar ventajas relacionadas con la impermeabilización y la resistencia química. Es importante destacar que el aditivo Kryton no está formulado específicamente para mejorar la resistencia mecánica del hormigón en condiciones estándar de curado, sino para aumentar su durabilidad en ambientes agresivos. Esto se logra mediante la reducción de la permeabilidad y la formación de cristales que obstruyen los poros capilares del material. Por lo tanto, no se espera que el hormigón con Kryton supere en resistencia a compresión al hormigón convencional bajo condiciones normales, pero sí podría mostrar un desempeño superior cuando se expone a agentes químicos presentes en aguas residuales.

En los siguientes apartados se presentarán y analizarán los resultados obtenidos en condiciones de inmersión total y parcial, donde podrán observarse con mayor claridad los efectos del aditivo en escenarios de exposición real.

#### 4.3.4 Probetas sumergidas en aguas residuales (30 días)

Este apartado presenta los resultados de resistencia a compresión corregida de probetas de hormigón con y sin aditivo Kryton, luego de estar expuestas durante 30 días en condiciones de inmersión total y parcial en aguas residuales

**Tabla 39**

Resistencia Característica de Hormigón con Aditivo Kryton Exposición Total durante 30 días en Aguas Residuales (Diseño 1)

| Descripción                          | Edad (Días) | F(t)<br>Mpa(mm2) | Resistencia<br>promedio | Desviación<br>estándar<br>(Ss) | Coeficiente<br>de<br>variación<br>(V) | Coeficiente<br>estadístico<br>"t" | Resistencia<br>característica<br>Mpa (mm2) |
|--------------------------------------|-------------|------------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--|
| Diseño 1<br>(Expuesto completamente) | 30          | 37,52            | 40,51                   | 1,505                          | 0,037                                 | 1,753                             | 37,87                                      |
|                                      |             | 39,22            |                         |                                |                                       |                                   |  |
|                                      |             | 39,24            |                         |                                |                                       |                                   |  |
|                                      |             | 39,48            |                         |                                |                                       |                                   |  |
|                                      |             | 39,61            |                         |                                |                                       |                                   |  |
|                                      |             | 39,77            |                         |                                |                                       |                                   |  |
|                                      |             | 39,98            |                         |                                |                                       |                                   |  |
|                                      |             | 40,22            |                         |                                |                                       |                                   |  |
|                                      |             | 40,47            |                         |                                |                                       |                                   |  |
|                                      |             | 40,92            |                         |                                |                                       |                                   |  |
|                                      |             | 41,36            |                         |                                |                                       |                                   |  |
|                                      |             | 42,14            |                         |                                |                                       |                                   |  |
|                                      |             | 42,17            |                         |                                |                                       |                                   |  |
|                                      |             | 42,68            |                         |                                |                                       |                                   |  |
|                                      |             | 42,90            |                         |                                |                                       |                                   |  |

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 40**

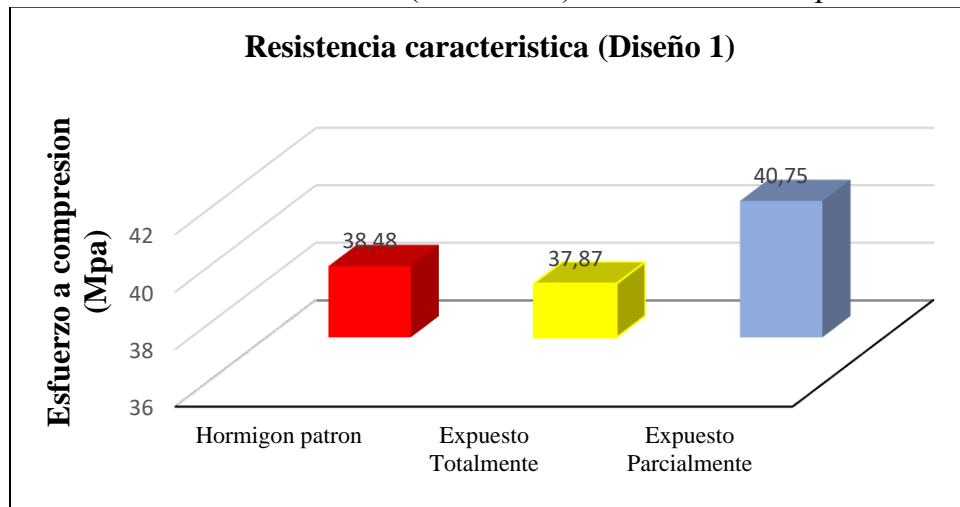
Resistencia Característica de Hormigón con Aditivo Kryton Exposición Parcial durante 30 días en Aguas Residuales (Diseño 1)

| Descripción                         | Edad (Días) | F(t)<br>Mpa(mm2)   | Resistencia promedio | Desviación estándar (Ss) | Coeficiente de variación (V) | Coeficiente estadístico "t" | Resistencia característica Mpa (mm2) |
|-------------------------------------|-------------|--|----------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Diseño 1<br>(Expuesto Parcialmente) | 30          | 41,02<br>41,26<br>41,46<br>41,91<br>42,24<br>42,40<br>42,69<br>42,79<br>42,80<br>42,92<br>42,99<br>43,61<br>43,68<br>43,78<br>44,58<br>45,55 | 42,86                | 1,205                    | 0,028                        | 1,747                       | 40,75                                |

Fuente: Elaboración propia

**Figura 31**

Resistencia Característica del Diseño 1 (con aditivo) tras 30 Días de Exposición a Aguas



Fuente: Elaboración propia

Las probetas parcialmente sumergidas presentaron una resistencia ligeramente mayor que las totalmente sumergidas, lo cual puede deberse a una menor exposición directa a agentes agresivos disueltos. Comparado con el hormigón patrón con Kryton a 28 días (38,48 MPa), estas probetas lograron mantener o incluso mejorar su resistencia, indicando un desempeño positivo del aditivo bajo condiciones de ataque moderado.

**Tabla 41:** Resistencia Característica de Hormigón sin Aditivo Kryton Exposición Total durante 30 días en Aguas Residuales (Diseño 1)

| Descripción                          | Edad (Días) | F(t) Mpa(mm2)   | Resistencia promedio | Desviación estándar (Ss) | Coeficiente de variación (V) | Coeficiente estadístico "t" | Resistencia característica Mpa (mm2) |
|--------------------------------------|-------------|---|----------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Diseño 1<br>(Expuesto completamente) | 30          | 40,47<br>41,24<br>41,78<br>41,84<br>42,34<br>42,77<br>43,01<br>43,17<br>43,40<br>43,50<br>44,18<br>44,55<br>44,55<br>44,61<br>44,76 | 43,08                | 1,340                    | 0,031                        | 1,753                       | 40,73                                |

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 42**

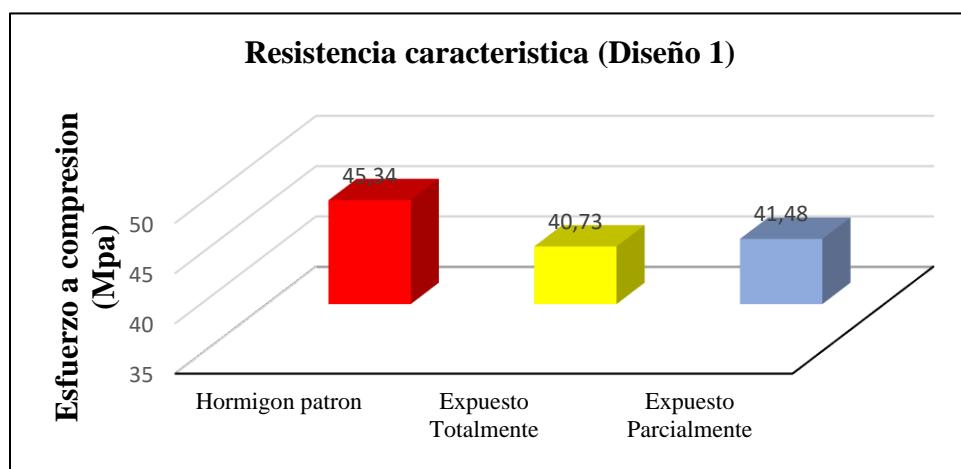
Resistencia Característica de Hormigón sin Aditivo Kryton Exposición Parcial durante 30 días en Aguas Residuales (Diseño 1)

| Descripción                      | Edad (Dias) | F(t) Mpa(mm2) | Resistencia promedio | Desviación estándar (Ss) | Coeficiente de variación (V) | Coeficiente estadístico "t" | Resistencia característica Mpa (mm2) |
|----------------------------------|-------------|---------------|----------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Diseño 1 (Expuesto Parcialmente) | 30          | 41,07         | 44,36                | 1,646                    | 0,037                        | 1,747                       | 41,48                                |
|                                  |             | 41,71         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 43,33         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 43,45         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 43,54         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 43,89         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 43,89         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 44,09         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 44,48         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 44,56         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 44,59         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 45,14         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 45,93         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 46,26         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 46,87         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 46,92         |                      |                          |                              |                             |                                      |

Fuente: Elaboración propia

**Figura 32**

Resistencia Característica del Diseño 1 (sin aditivo) tras 30 Días de Exposición a Aguas



Fuente: Elaboración propia

En este caso, las probetas sin aditivo mostraron valores de resistencia superiores a las que contenían Kryton. Esto refuerza la idea de que el aditivo no está orientado a mejorar la resistencia estructural inmediata, sino a preservar la integridad del hormigón a largo plazo frente a agentes químicos presentes en medios agresivos.

#### 4.3.5 Probetas sumergidas en aguas residuales (60 días)

En esta sección se presentan los resultados de las probetas elaboradas con y sin aditivo Kryton expuestas durante 60 días en aguas residuales, bajo dos condiciones de inmersión.

**Tabla 43**

Resistencia Característica de Hormigón con Aditivo Kryton Exposición Total durante 60 días en Aguas Residuales (Diseño 2)

| Descripción                       | Edad (Días) | F(t) Mpa(mm2)   | Resistencia promedio | Desviación estándar (Ss) | Coeficiente de variación (V) | Coeficiente estadístico "t" | Resistencia característica Mpa (mm2) |
|-----------------------------------|-------------|---|----------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Diseño 2 (Expuesto completamente) | 60          | 45,10<br>44,16<br>43,22<br>42,09<br>42,22<br>42,33<br>45,52<br>43,76<br>44,29<br>45,74<br>42,08<br>44,05<br>43,08<br>43,81<br>44,66<br>40,65<br>42,07 | 43,46                | 1,413                    | 0,033                        | 1,742                       | 41,00                                |

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 44**

Resistencia Característica de Hormigón con Aditivo Kryton Exposición Parcial durante 60 días en Aguas Residuales (Diseño 2)

| Descripción                      | Edad (Días) | F(t) Mpa(mm2)   | Resistencia promedio | Desviación estándar (Ss) | Coeficiente de variación (V) | Coeficiente estadístico "t" | Resistencia característica Mpa (mm2) |
|----------------------------------|-------------|---|----------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Diseño 2 (Expuesto Parcialmente) | 60          | 43,06<br>44,04<br>44,12<br>44,36<br>44,71<br>44,76<br>44,91<br>44,94<br>44,95<br>46,08<br>46,23<br>46,72<br>46,79<br>46,80<br>46,96<br>47,12<br>47,27<br>47,39<br>49,08 | 45,80                | 1,520                    | 0,033                        | 1,731                       | 43,17                                |

*Fuente: Elaboración propia*

Se observa que las probetas parcialmente sumergidas presentan una resistencia característica superior en comparación con las totalmente sumergidas, lo cual concuerda con el comportamiento registrado a los 30 días. Este patrón sugiere que el aditivo Kryton muestra mayor efectividad en condiciones de exposición intermitente, donde el ciclo de humedad y secado puede favorecer la formación progresiva de cristales bloqueadores de poros.

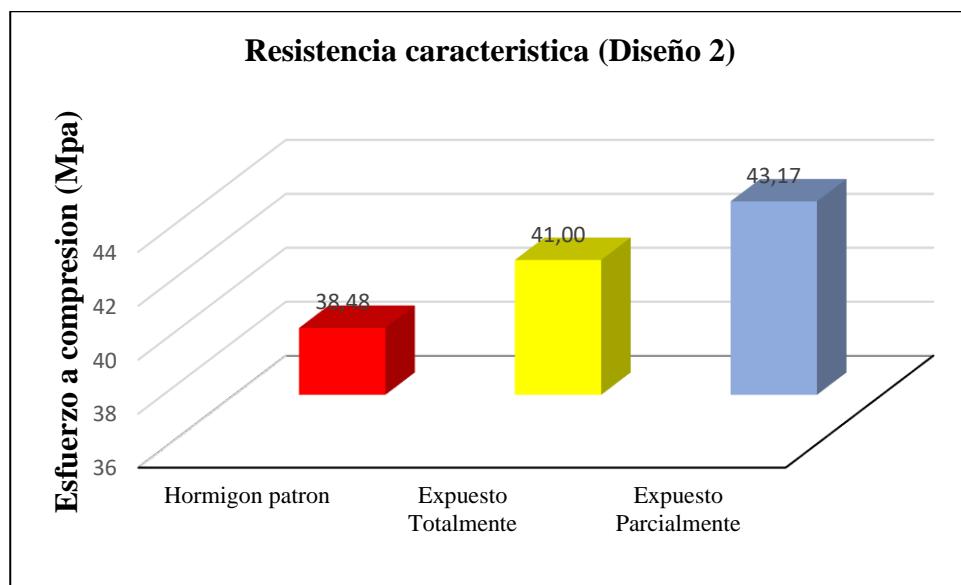
El incremento observado en la resistencia a los 60 días indica una evolución favorable del proceso de hidratación del cemento y un posible efecto tardío del aditivo, relacionado con el sellado interno de los poros capilares. Aunque las resistencias del hormigón con aditivo aún

son ligeramente inferiores a las del hormigón sin aditivo en condiciones normales, este comportamiento apunta a una mejora progresiva en el tiempo.

El gráfico evidencia que, bajo ciertas condiciones de exposición, el hormigón tratado con aditivo puede experimentar una ganancia significativa de resistencia a edades más avanzadas. Este comportamiento es relevante para aplicaciones donde la durabilidad y el desempeño a largo plazo son prioritarios, como en infraestructuras expuestas a ambientes agresivos. Se recomienda realizar evaluaciones complementarias, como ensayos de absorción, penetración de agua o resistencia a ataques químicos, para determinar con mayor precisión los beneficios del aditivo en el contexto de aguas residuales

**Figura 33**

Resistencia Característica del Diseño 2 (con aditivo) tras 60 Días de Exposición a Aguas Residuales



*Fuente: Elaboración propia*

Existe una diferencia de 21,73 kg/cm<sup>2</sup>, lo que representa un incremento del 5,3%. Esto indica una mejora significativa en la resistencia del hormigón con el paso del tiempo o ante ciertas condiciones (probablemente relacionadas con el uso del aditivo o el tipo de curado/exposición).

**Tabla 45**

Resistencia Característica de Hormigón sin Aditivo Kryton Exposición Total durante 60 días en Aguas Residuales (Diseño 2)

| Descripción                       | Edad (Días) | F(t) Mpa(mm2)  | Resistencia promedio | Desviación estándar (Ss) | Coeficiente de variación (V) | Coeficiente estadístico "t" | Resistencia característica Mpa (mm2) |
|-----------------------------------|-------------|--|----------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Diseño 2 (Expuesto completamente) | 60          | 42,45<br>43,63<br>44,06<br>44,32<br>45,71<br>46,08<br>46,30<br>46,78<br>46,83<br>47,90<br>48,55<br>48,64<br>48,81<br>49,27<br>49,74<br>50,10 | 46,82                | 2,336                    | 0,050                        | 1,747                       | 42,74                                |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 46**

Resistencia Característica de Hormigón sin Aditivo Kryton Exposición parcial durante 60 días en Aguas Residuales (Diseño 2)

| Descripción                      | Edad (Días) | F(t) Mpa(mm2)   | Resistencia promedio | Desviación estándar (Ss) | Coeficiente de variación (V) | Coeficiente estadístico "t" | Resistencia característica Mpa (mm2) |
|----------------------------------|-------------|---|----------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Diseño 2 (Expuesto Parcialmente) | 60          | 46,58<br>46,79<br>46,83<br>47,17<br>47,50<br>47,87<br>47,89 | 48,58                | 1,156                    | 0,024                        | 1,731                       | 46,58                                |

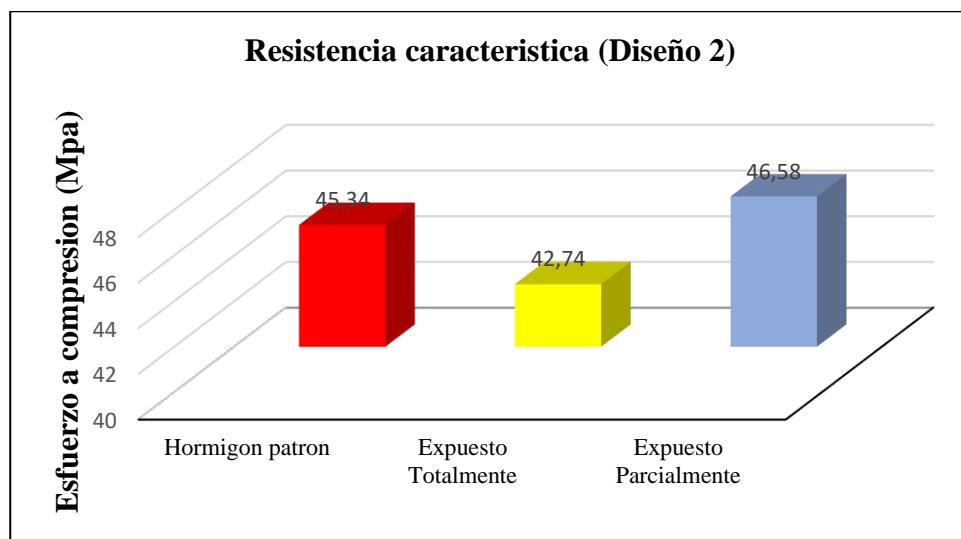
|  |       |  |  |  |  |
|--|-------|--|--|--|--|
|  | 48,84 |  |  |  |  |
|  | 48,86 |  |  |  |  |
|  | 48,99 |  |  |  |  |
|  | 49,11 |  |  |  |  |
|  | 49,13 |  |  |  |  |
|  | 49,25 |  |  |  |  |
|  | 49,48 |  |  |  |  |
|  | 49,48 |  |  |  |  |
|  | 49,60 |  |  |  |  |
|  | 49,69 |  |  |  |  |
|  | 49,74 |  |  |  |  |
|  | 50,32 |  |  |  |  |

*Fuente: Elaboración propia*

Las probetas sin aditivo nuevamente presentan mayores valores de resistencia a compresión en ambas condiciones de inmersión. El comportamiento es similar al registrado en la evaluación a 30 días, y reafirma que el aditivo Kryton no actúa sobre la resistencia estructural inmediata, sino sobre la durabilidad del hormigón frente a ambientes agresivos. Por tanto, esta diferencia no debe interpretarse como una deficiencia del aditivo, sino como parte de su función especializada.

**Figura 34**

Resistencia Característica del Diseño 2 (sin aditivo) tras 60 Días de Exposición a Aguas residuales



*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.3.6 Probetas sumergidas en aguas residuales (90 días)

En esta sección se presentan los resultados de las probetas elaboradas con y sin aditivo Kryton expuestas durante 90 días en aguas residuales, bajo dos condiciones de inmersión. Cabe resaltar que a partir de estas fechas iniciaron las señales de degradación en el Hormigón convencional y una exponente ganancia de resistencia a la compresión por parte del Hormigón con Aditivo

**Tabla 47**

Resistencia Característica de Hormigón con Aditivo Kryton Exposición Total durante 90 días en Aguas Residuales (Diseño 3)

| Descripción                       | Edad (Días) | F(t) Mpa(mm2)   | Resistencia promedio | Desviación estándar (Ss) | Coeficiente de variación (V) | Coeficiente estadístico "t" | Resistencia característica Mpa (mm2) |
|-----------------------------------|-------------|---|----------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Diseño 3 (Expuesto completamente) | 90          | 36,64<br>38,84<br>39,40<br>41,36<br>42,22<br>42,36<br>42,45<br>42,64<br>42,70<br>43,71<br>43,73<br>43,82<br>43,84<br>43,89<br>44,00<br>45,24<br>45,59 | 42,50                | 2,326                    | 0,055                        | 1,742                       | 38,44                                |

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 48**

Resistencia Característica de Hormigón con Aditivo Kryton Exposición Parcial durante 90 días en Aguas Residuales (Diseño 3)

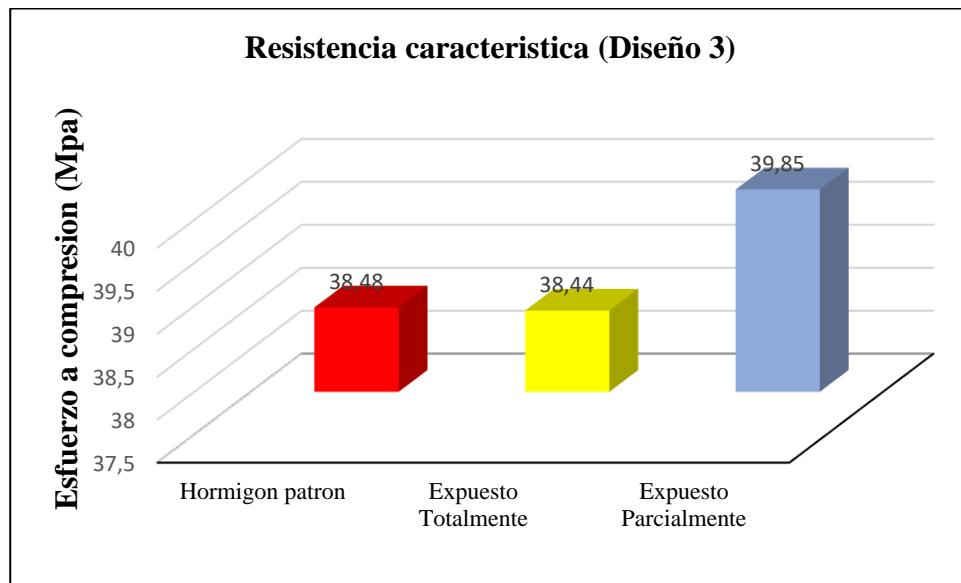
| Descripción                            | Edad (Días) | F(t)<br>Mpa(mm2)  | Resistencia promedio | Desviación estándar (Ss) | Coeficiente de variación (V) | Coeficiente estadístico "t" | Resistencia característica Mpa (mm2) |
|--|-------------|---|----------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Diseño 3<br>(Expuesto<br>Parcialmente) | 90          | 39,19<br>40,47<br>40,88<br>41,35<br>41,45<br>42,36<br>42,79<br>43,03<br>43,26<br>43,84<br>43,88<br>44,27<br>44,62<br>45,04<br>45,08<br>45,09<br>45,22<br>45,52<br>45,99 | 43,05                | 1,846                    | 0,043                        | 1,731                       | 39,85                                |

*Fuente: Elaboración propia*

Los resultados muestran una estabilidad en los valores mecánicos entre los 60 y 90 días, lo que indica un comportamiento duradero del hormigón con Kryton. No obstante, la resistencia sigue siendo levemente menor frente al hormigón convencional, lo cual es esperable considerando que su función principal es la durabilidad frente a ambientes agresivos.

**Figura 35**

Resistencia Característica del Diseño 3 (con aditivo) tras 90 Días de Exposición a Aguas Residuales



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 49**

Resistencia Característica de Hormigón sin Aditivo Kryton Exposición Total durante 90 días en Aguas Residuales (Diseño 3)

| Descripción                       | Edad (Días) | F(t) Mpa(mm <sup>2</sup> )  | Resistencia promedio | Desviación estándar (S <sub>s</sub> ) | Coeficiente de variación (V) | Coeficiente estadístico "t" | Resistencia característica Mpa (mm <sup>2</sup> ) |
|-----------------------------------|-------------|---|----------------------|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|
| Diseño 3 (Expuesto completamente) | 90          | 42,00<br>42,92<br>42,97<br>44,14<br>44,23<br>44,36<br>44,49<br>44,50<br>44,80<br>45,26<br>45,37<br>45,43<br>45,44 | 45,20                | 1,460                                 | 0,032                        | 1,7182                      | 42,70   |

|  |       |  |  |  |  |
|--|-------|--|--|--|--|
|  | 45,51 |  |  |  |  |
|  | 45,51 |  |  |  |  |
|  | 45,91 |  |  |  |  |
|  | 46,18 |  |  |  |  |
|  | 46,61 |  |  |  |  |
|  | 46,72 |  |  |  |  |
|  | 47,25 |  |  |  |  |
|  | 47,29 |  |  |  |  |
|  | 47,60 |  |  |  |  |

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 50**

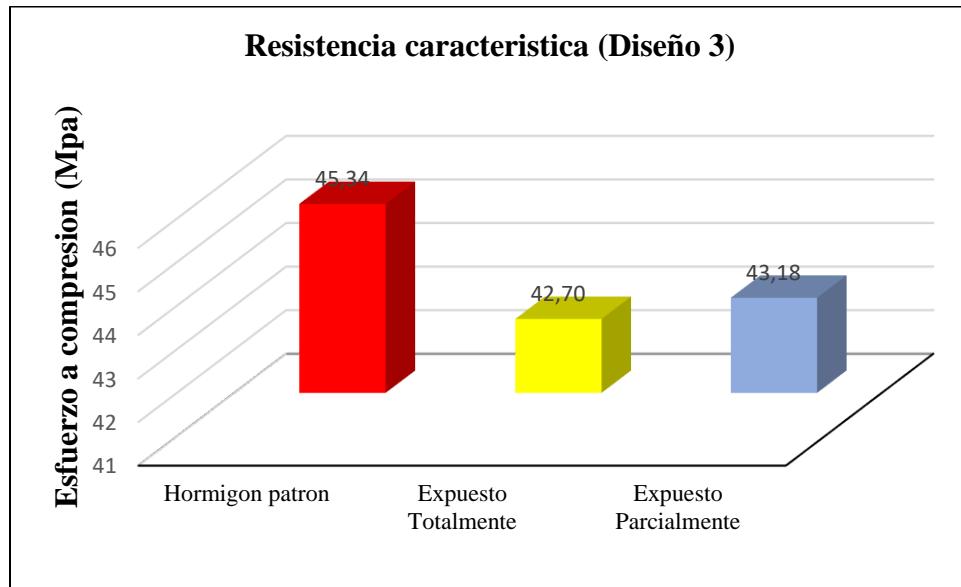
Resistencia Característica de Hormigón sin Aditivo Kryton Exposición Parcial durante 90 días en Aguas Residuales (Diseño 3)

| Descripción                      | Edad (Días) | F(t) Mpa(mm2) | Resistencia promedio | Desviación estándar (Ss) | Coeficiente de variación (V) | Coeficiente estadístico "t" | Resistencia característica Mpa (mm2) |
|----------------------------------|-------------|---------------|----------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Diseño 3 (Expuesto Parcialmente) | 90          | 42,78         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 43,48         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 44,20         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 44,80         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 44,88         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 45,05         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 45,88         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 46,26         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 46,46         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 46,76         | 46,42                | 1,869                    | 0,040                        | 1,731                       | 43,18                                |
|                                  |             | 46,92         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 46,96         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 47,08         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 47,43         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 47,57         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 48,27         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 48,34         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 48,99         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                  |             | 49,83         |                      |                          |                              |                             |                                      |

*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 36**

Resistencia Característica del Diseño 3 (sin aditivo) tras 90 Días de Exposición a Aguas Residuales



*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.3.7 Probetas sumergidas en aguas residuales (120 días)

En esta sección se presentan los resultados de las probetas elaboradas con y sin aditivo Kryton expuestas durante 120 días en aguas residuales, bajo dos condiciones de inmersión.

**Tabla 51**

Resistencia Característica de Hormigón con Aditivo Kryton Exposición Total durante 120 días en Aguas Residuales (Diseño 4)

| Descripción                       | Edad (Días) | F(t) Mpa(mm2)   | Resistencia promedio | Desviación estándar (Ss) | Coeficiente de variación (V) | Coeficiente estadístico "t" | Resistencia característica Mpa (mm2) |
|-----------------------------------|-------------|---|----------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Diseño 4 (Expuesto completamente) | 120         | 42,94<br>43,92<br>44,49<br>44,95<br>45,06<br>45,15<br>45,44<br>45,49<br>45,63 | 46,00                | 1,393                    | 0,030                        | 1,747                       | 43,57                                |

|  |       |  |  |  |  |  |
|--|-------|--|--|--|--|--|
|  | 46,10 |  |  |  |  |  |
|  | 46,35 |  |  |  |  |  |
|  | 46,47 |  |  |  |  |  |
|  | 46,52 |  |  |  |  |  |
|  | 47,22 |  |  |  |  |  |
|  | 47,68 |  |  |  |  |  |
|  | 49,49 |  |  |  |  |  |

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 52**

Resistencia Característica de Hormigón con Aditivo Kryton Exposición Parcial durante 120 días en Aguas Residuales (Diseño 4)

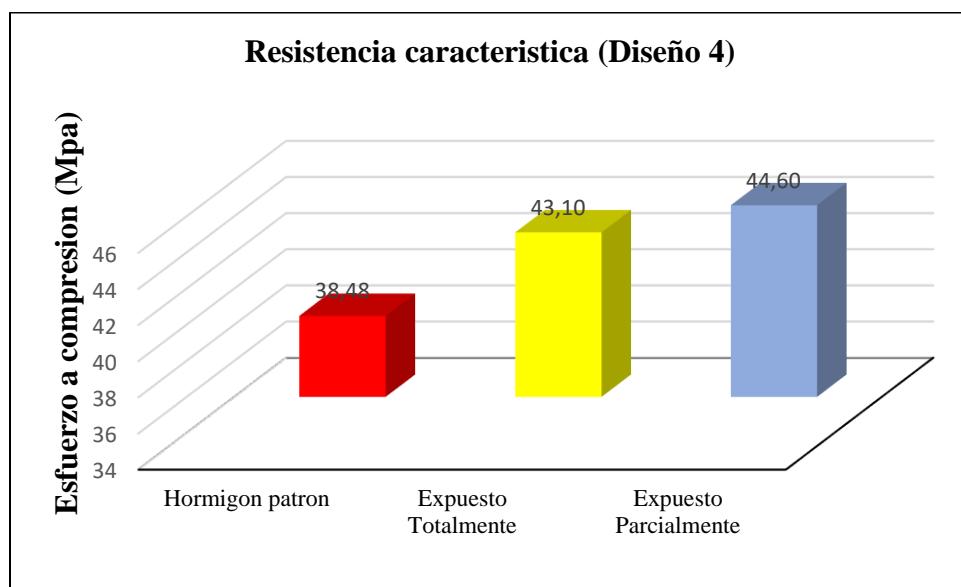
| Descripción                            | Edad (Días) | F(t)<br>Mpa(mm2)  | Resistencia<br>promedio | Desviación<br>estándar<br>(Ss) | Coeficiente<br>de<br>variación<br>(V) | Coeficiente<br>estadístico<br>"t" | Resistencia<br>característica<br>Mpa (mm2) |
|--|-------------|---|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--|
| Diseño 4<br>(Expuesto<br>Parcialmente) | 120         | 44,45<br>44,58<br>45,10<br>45,37<br>45,71<br>46,21<br>46,36<br>46,36<br>46,42<br>46,54<br>46,92<br>47,08<br>47,34<br>47,34<br>47,55<br>47,62<br>47,62<br>48,09<br>48,32<br>48,79<br>49,44 | 46,39                   | 1,037                          | 0,022                                 | 1,722                             | 44,60                                      |

*Fuente: Elaboración propia*

Se confirma nuevamente que las probetas parcialmente sumergidas presentan una ligera ventaja de resistencia, a diferencia de etapas anteriores, la diferencia entre condiciones total y parcial se ha reducido, indicando una estabilización mecánica del material con el tiempo, esto refleja la capacidad del Kryton para conservar el comportamiento estructural incluso tras una exposición prolongada en un medio agresivo.

**Figura 37**

Resistencia Característica del Diseño 4 (con aditivo) tras 120 Días de Exposición a Aguas Residuales



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 53**

Resistencia Característica de Hormigón sin Aditivo Kryton Exposición Total durante 120 días en Aguas Residuales (Diseño 4)

| Descripción                       | Edad (Días) | F(t) Mpa(mm2) | Resistencia promedio | Desviación estándar (Ss) | Coeficiente de variación (V) | Coeficiente estadístico "t" | Resistencia característica Mpa (mm2) |
|-----------------------------------|-------------|---------------|----------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Diseño 4 (Expuesto completamente) | 120         | 44,53         | 46,31                | 0,888                    | 0,019                        | 1,7114                      | 44,79                                |
|                                   |             | 45,04         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                   |             | 45,15         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                   |             | 45,19         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                   |             | 45,49         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                   |             | 45,51         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                   |             | 45,87         |                      |                          |                              |                             |                                      |
|                                   |             | 46,03         |                      |                          |                              |                             |                                      |

|  |       |  |  |  |  |  |
|--|-------|--|--|--|--|--|
|  | 46,19 |  |  |  |  |  |
|  | 46,30 |  |  |  |  |  |
|  | 46,37 |  |  |  |  |  |
|  | 46,50 |  |  |  |  |  |
|  | 46,52 |  |  |  |  |  |
|  | 46,69 |  |  |  |  |  |
|  | 46,78 |  |  |  |  |  |
|  | 46,79 |  |  |  |  |  |
|  | 46,84 |  |  |  |  |  |
|  | 47,00 |  |  |  |  |  |
|  | 47,07 |  |  |  |  |  |
|  | 47,21 |  |  |  |  |  |
|  | 47,80 |  |  |  |  |  |
|  | 47,90 |  |  |  |  |  |
|  | 48,38 |  |  |  |  |  |
|  | 49,48 |  |  |  |  |  |

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 54**

Resistencia Característica de Hormigón sin Aditivo Kryton Exposición Parcial durante 120 días en Aguas Residuales (Diseño 4)

| Descripción                      | Edad (Días) | F(t) Mpa(mm2)  | Resistencia promedio | Desviación estándar (Ss) | Coeficiente de variación (V) | Coeficiente estadístico "t" | Resistencia característica Mpa (mm2) |
|----------------------------------|-------------|--|----------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Diseño 4 (Expuesto Parcialmente) | 120         | 45,82<br>45,93<br>47,08<br>47,33<br>47,43<br>47,51<br>47,52<br>47,93<br>48,04<br>48,20<br>48,23<br>48,31<br>48,31<br>48,33 | 47,95                | 1,041                    | 0,022                        | 1,731                       | 46,15                                |

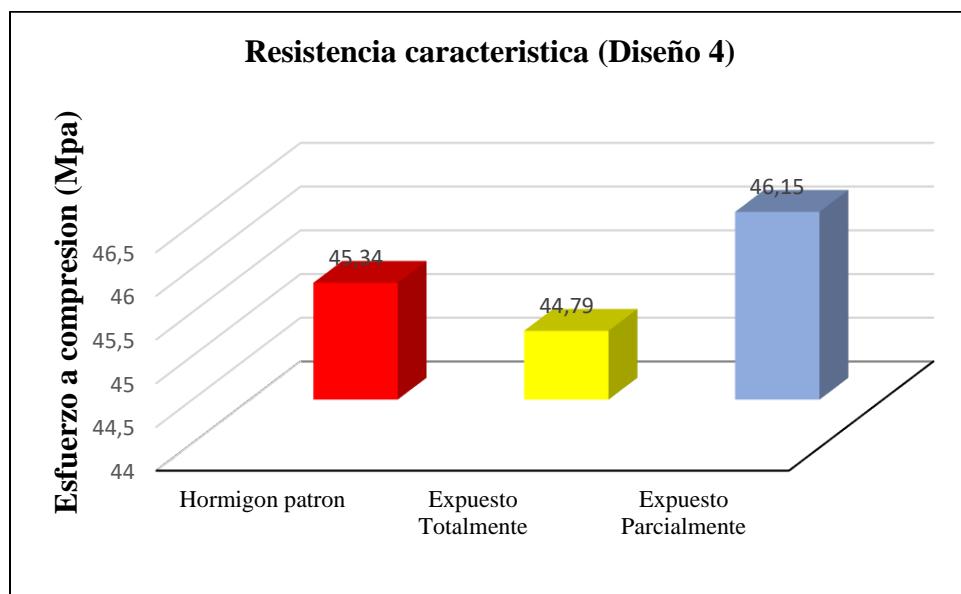
|  |       |  |  |  |  |
|--|-------|--|--|--|--|
|  | 48,34 |  |  |  |  |
|  | 48,67 |  |  |  |  |
|  | 48,68 |  |  |  |  |
|  | 48,89 |  |  |  |  |
|  | 50,49 |  |  |  |  |

*Fuente: Elaboración propia*

Se mantiene la tendencia general observada a lo largo del tiempo: mayor resistencia en condiciones de sumersión parcial, el hormigón sin aditivo sigue presentando mejores resultados en términos de resistencia mecánica que el aditivado, aunque la diferencia es cada vez menor, sugiriendo que el Kryton ofrece estabilidad a largo plazo frente a la pérdida de resistencia.

**Figura 38**

Resistencia Característica del Diseño 4 (sin aditivo) tras 120 Días de Exposición a Aguas Residuales



*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.3.8 Análisis Comparativo del Comportamiento del Hormigón con Aditivo

##### Hidrofilico (KIM) en Condiciones de Inmersión

Con el fin de visualizar la evolución de la resistencia mecánica del hormigón bajo distintas condiciones de exposición, se generaron gráficos comparativos entre el hormigón patrón (28 días, con aditivo en curado estándar) y los distintos grupos de probetas sumergidas.

**Tabla 55**

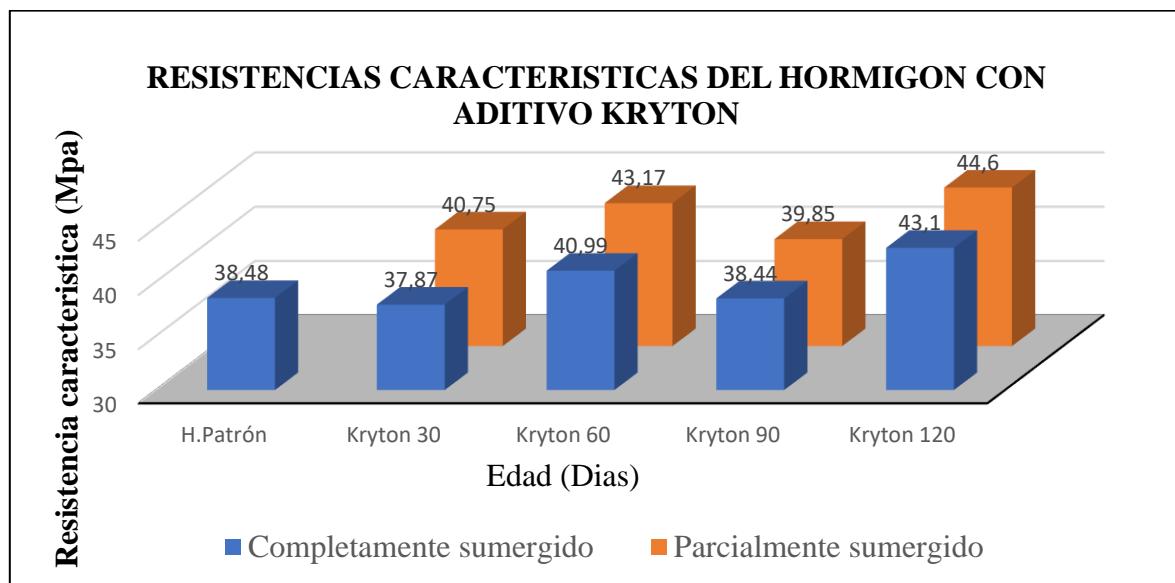
Resumen de Resistencia Característica del Hormigón Aditivado y Patrón por Condición de Exposición

| Descripción   | Completamente sumergido | Parcialmente sumergido |
|---|-------------------------|------------------------|
| H. Aditivado Patrón 28 (Curado)                         | 38,48                   |                        |
| H. Aditivado 30 (Curado + exposición aguas residuales)  | 37,87                   | 40,75                  |
| H. Aditivado 60 (Curado + exposición aguas residuales)  | 40,99                   | 43,17                  |
| H. Aditivado 90 (Curado + exposición aguas residuales)  | 38,44                   | 39,85                  |
| H. Aditivado 120 (Curado + exposición aguas residuales) | 43,10                   | 44,60                  |

*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 39**

Evolución de la Resistencia Característica del Hormigón con Aditivo Kryton en Diferentes Condiciones de Sumergencia



*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 56**

Resistencia característica comparada frente al hormigón patrón Aditivado

| Resistencia característica comparada frente al hormigón patrón (38,48 Mpa) |                         |                   |                  |                |
|--|-------------------------|-------------------|------------------|----------------|
| Edad (días)  | Estado de exposición    | Resistencia (Mpa) | Incremento (Mpa) | Incremento (%) |
| 30   | Parcialmente sumergido  | 40,75             | 2,26             | 5,90%          |
| 30   | Completamente sumergido | 37,87             | -0,60            | -1,58%         |
| 60   | Parcialmente sumergido  | 43,17             | 4,69             | 12,19%         |
| 60   | Completamente sumergido | 40,99             | 2,51             | 6,54%          |
| 90   | Parcialmente sumergido  | 39,85             | 1,37             | 3,56%          |
| 90   | Completamente sumergido | 38,44             | -0,04            | -0,09%         |
| 120  | Parcialmente sumergido  | 44,60             | 6,12             | 15,91%         |
| 120  | Completamente sumergido | 43,10             | 4,62             | 12,01%         |

*Fuente: Elaboración propia*

El hormigón con aditivo Kryton presenta una evolución positiva en su resistencia a compresión conforme avanza el tiempo de curado, siendo más notoria a partir de los 60 y especialmente a los 120 días. Este comportamiento se atribuye a la acción progresiva del aditivo, basado en la formación de cristales que obstruyen los poros capilares, mejorando la densificación interna del hormigón.

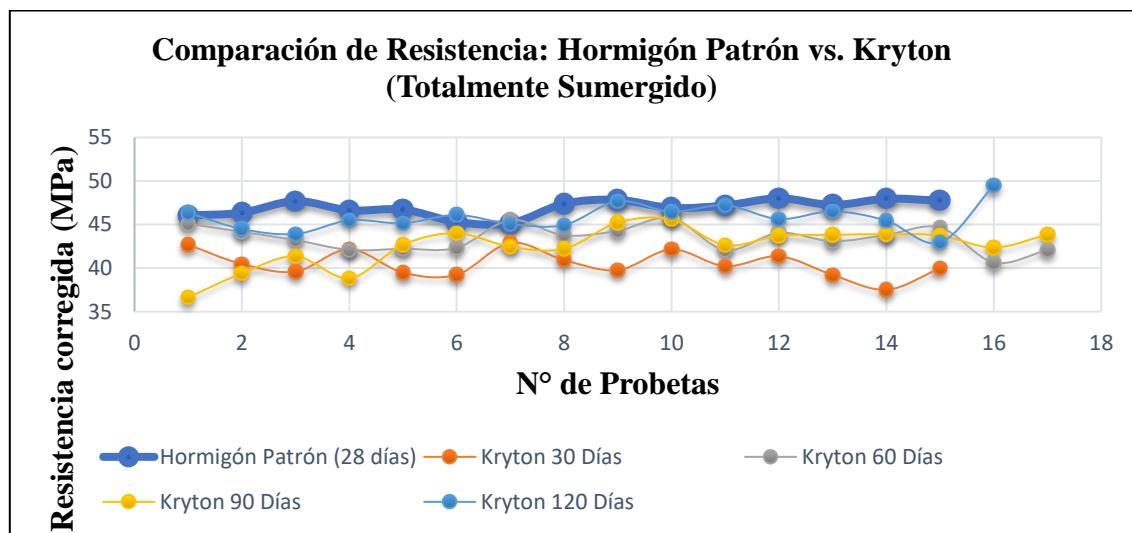
Además, las probetas expuestas parcialmente a aguas residuales mostraron un desempeño superior respecto a las totalmente sumergidas en todas las edades analizadas. Esta tendencia sugiere que el aditivo responde mejor en condiciones donde existe intercambio de humedad y oxígeno, lo cual favorece tanto la hidratación del cemento como la activación del aditivo.

A los 120 días, el hormigón con aditivo Kryton expuesto a condiciones de inmersión parcial supera al diseño patrón en un 15,91 %, lo que demuestra su eficacia en entornos donde la durabilidad a largo plazo es crítica. En cambio, bajo condiciones de inmersión total, el incremento de resistencia fue más moderado, alcanzando un 12 % respecto al patrón. Esta

diferencia sugiere que el rendimiento del aditivo Kryton está estrechamente ligado al tipo de exposición, mostrando un comportamiento más eficiente en ambientes con ciclos de humedad y secado, mientras que en condiciones severamente agresivas como las aguas residuales de una laguna facultativa su acción se ve limitada, aunque aún aporta beneficios importantes en términos de sellado y protección del hormigón.

**Figura 40**

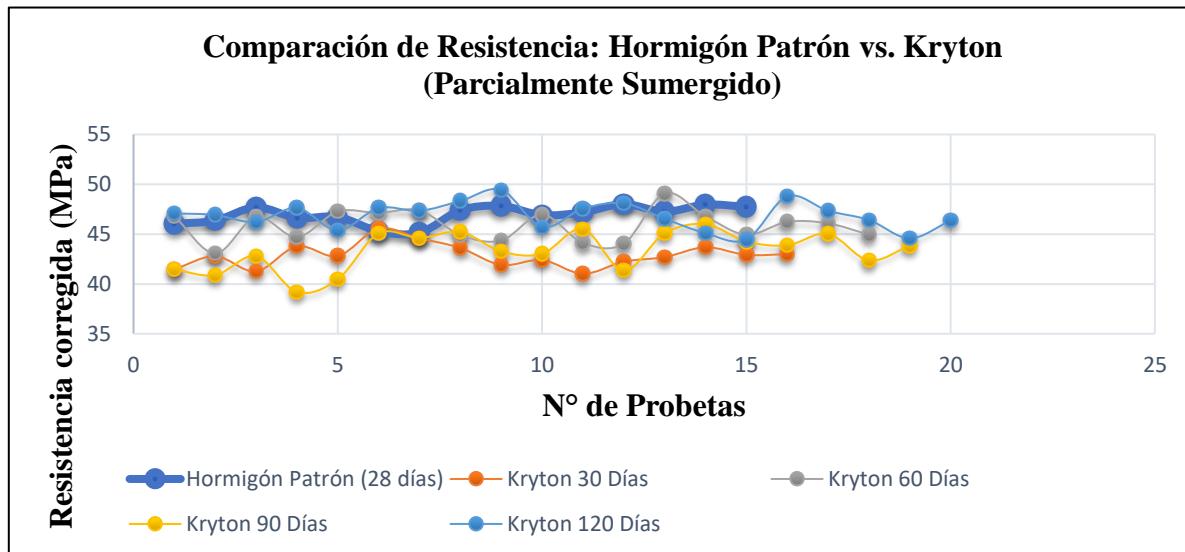
Evolución de la Resistencia a Compresión del Hormigón con Aditivo Kryton en Inmersión Total



Fuente: Elaboración propia

**Figura 41**

Evolución de la Resistencia a Compresión del Hormigón con Aditivo Kryton en Inmersión



Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.9 Análisis Comparativo del Comportamiento del Hormigón Sin Aditivo Hidrofílico (KIM) en Condiciones de Inmersión

Analizando el comportamiento del hormigón sin aditivo, se presenta a continuación la evolución de su resistencia a compresión en función del tiempo de exposición en aguas residuales. Como referencia, se toma el hormigón patrón con una edad inicial de 28 días, correspondiente al momento en que concluye su curado convencional, a partir del cual inicia su exposición al medio agresivo.

**Tabla 57**

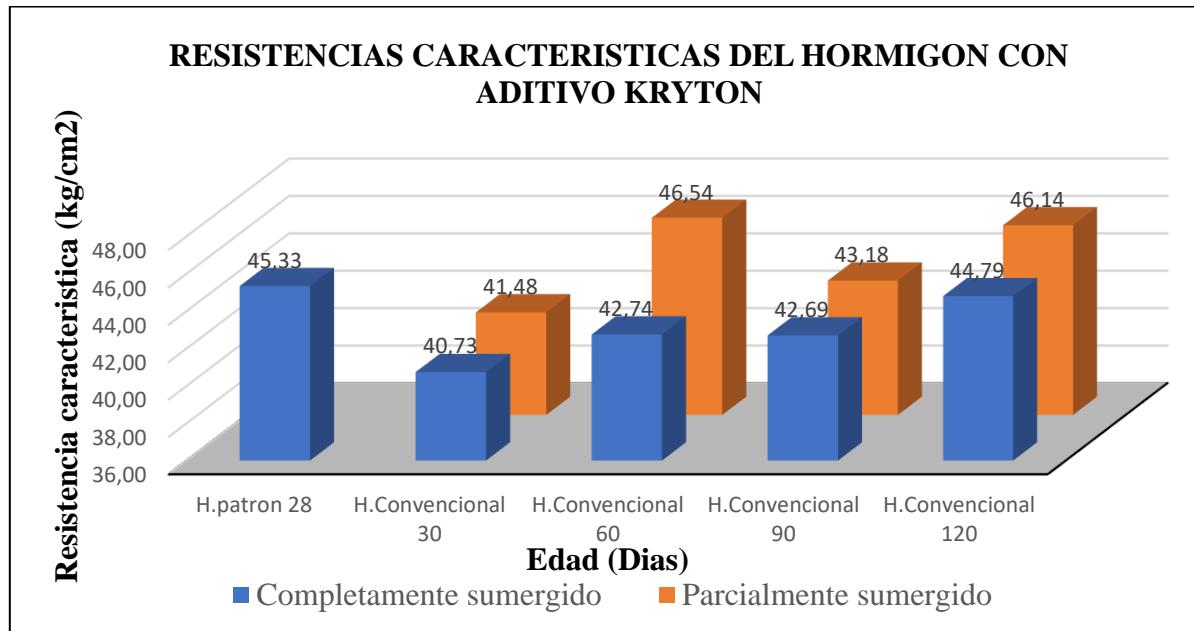
Resumen de Resistencia Característica del Hormigón Convencional y Patrón por Condición de Exposición.

| Descripción  | Completamente sumergido | Parcialmente sumergido |
|--|-------------------------|------------------------|
| H. Patrón Convencional 28 (Curado)                         | 45,33                   |                        |
| H. Convencional 30 (Curado + exposición aguas residuales)  | 40,72                   | 41,48                  |
| H. Convencional 60 (Curado + exposición aguas residuales)  | 42,74                   | 46,58                  |
| H. Convencional 90 (Curado + exposición aguas residuales)  | 42,69                   | 43,18                  |
| H. Convencional 120 (Curado + exposición aguas residuales) | 44,78                   | 46,14                  |

Fuente: Elaboración propia

**Figura 42**

Evolución de la Resistencia Característica del Hormigón sin Aditivo en Diferentes Condiciones de Sumergencia



*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 58**

Resistencia característica comparada frente al hormigón patrón convencional

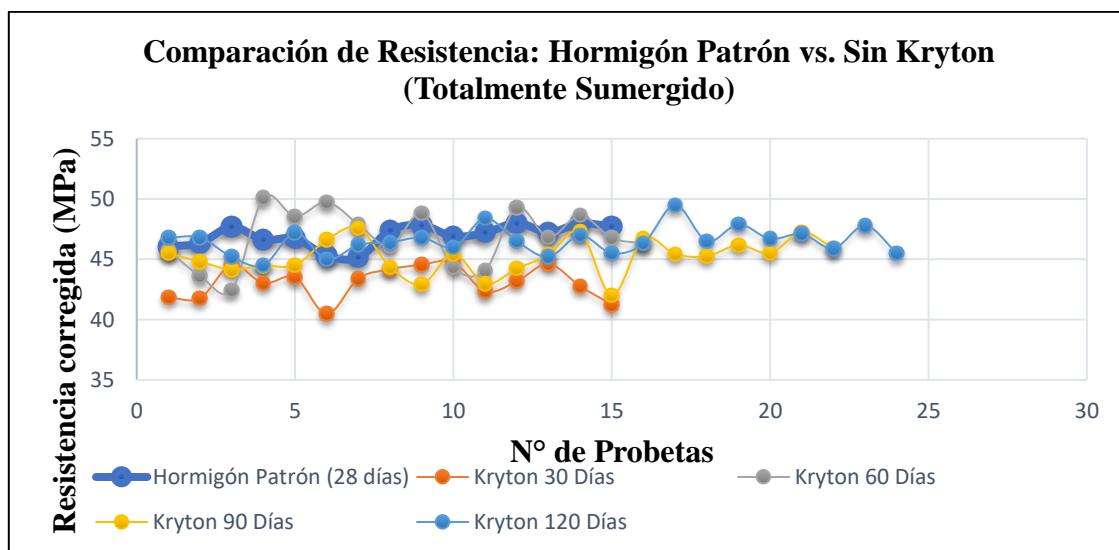
| Resistencia característica comparada frente al hormigón patrón (45,33 kg/cm²) |                         |                      |                     |                      |
|---|-------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Edad (días)   | Estado de exposición    | Resistencia (kg/cm²) | Diferencia (kg/cm²) | Ganancia/perdida (%) |
| 30  | Parcialmente sumergido  | 41,48                | -3,85               | -8,50%               |
|   | Completamente sumergido | 40,72                | -4,60               | -10,16%              |
| 60  | Parcialmente sumergido  | 46,58                | 1,24                | 2,75%                |
|   | Completamente sumergido | 42,74                | -2,59               | -5,73%               |
| 90  | Parcialmente sumergido  | 43,18                | -2,15               | -4,75%               |
|   | Completamente sumergido | 42,69                | -2,64               | -5,82%               |
| 120   | Parcialmente sumergido  | 46,14                | 0,81                | 1,79%                |
|   | Completamente sumergido | 44,78                | -0,54               | -1,21%               |

*Fuente: Elaboración propia*

En general, el hormigón con dosificación convencional sin aditivo Kryton mostró un desempeño mecánico inferior en todas las edades analizadas, tanto en condiciones de inmersión parcial como total, evidenciando una pérdida progresiva de resistencia frente al ambiente agresivo de aguas residuales. A los 30 días se registraron las caídas más pronunciadas, con disminuciones del 8,50 % y 10,16 % en resistencias respecto al patrón para los estados parcialmente y completamente sumergidos, respectivamente, lo cual indica una alta vulnerabilidad del concreto sin protección química en las primeras etapas de exposición. Si bien se observa una ligera recuperación en las condiciones parcialmente sumergidas a los 60 y 120 días (+2,75 % y +1,79 %, respectivamente), este repunte puede atribuirse a una hidratación prolongada, aunque no representa una mejora significativa desde el punto de vista de durabilidad. Por el contrario, en estado de inmersión total, el concreto sin aditivo mantiene pérdidas constantes en todas las edades, alcanzando hasta -5,82 % a los 90 días, lo que confirma su incapacidad de resistir condiciones de saturación química sin asistencia de aditivos. Estos resultados subrayan la necesidad de implementar soluciones complementarias, como aditivos impermeabilizantes tipo Kryton, en ambientes altamente agresivos como lagunas facultativas, donde no solo se exige resistencia mecánica, sino también una protección efectiva contra la permeabilidad y el ataque químico.

**Figura 43**

Evolución de la Resistencia a Compresión del Hormigón sin Aditivo Kryton en Inmersión Total

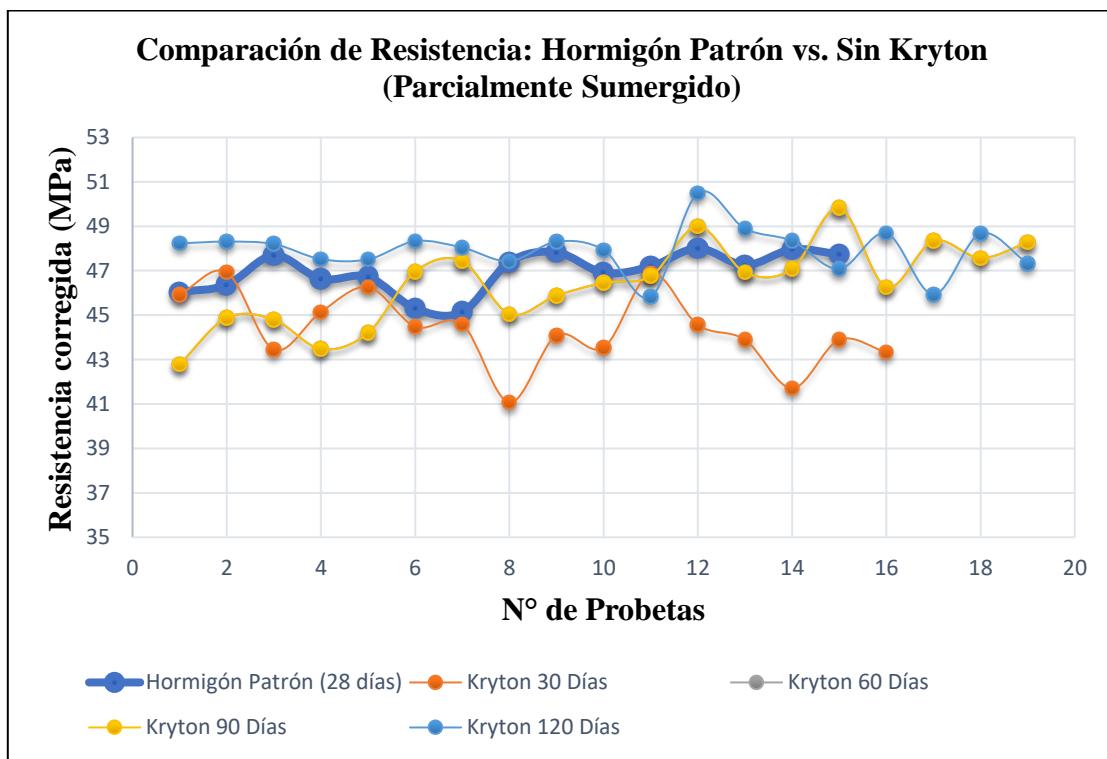


Fuente: Elaboración propia

Las probetas sin aditivo presentan una respuesta más dispersa. Aunque algunas muestras alcanzan niveles similares al patrón a los 60 y 90 días, la variabilidad es mayor y los resultados menos estables. La resistencia tiende a estancarse, lo que sugiere una menor capacidad de adaptación del hormigón convencional ante la agresión continua del medio líquido.

**Figura 44**

Evolución de la Resistencia a Compresión del Hormigón sin Aditivo Kryton en Inmersión Parcial



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, las probetas parcialmente sumergidas sin Kryton muestran un comportamiento intermedio. A 120 días, algunas resistencias incluso superan las del patrón, pero también se observan altos niveles de dispersión. Esto refuerza la hipótesis de que la condición parcial favorece la conservación de propiedades mecánicas, aunque sin la regularidad que aporta un aditivo especializado.

#### 4.4 Análisis comparativo de costos unitarios entre mezclas

Con el objetivo de evaluar la viabilidad económica de la incorporación del aditivo Kryton en mezclas de hormigón expuestas a aguas residuales, se realizó un análisis del costo unitario por probeta. Los valores de referencia se obtuvieron a partir de la dosificación real aplicada para cada tipo de mezcla.

**Tabla 59**

Cantidad de material para una probeta sin Aditivo Krystol (KIM)

| Cantidad de material para una probeta |        |               |              |              |
|---------------------------------------|--------|---------------|--------------|--------------|
| Material                              | kg     | kg en probeta | g en probeta | Precio (bs)  |
| Cemento                               | 13,65  | 0,59348       | 593,48       | 0,6694       |
| Agua                                  | 6,07   | 0,26391       | 263,91       | 0,0004       |
| Arena                                 | 32     | 1,3913        | 1391,3       | 0,1304       |
| Grava                                 | 39     | 1,69565       | 1695,65      | 0,1413       |
| Viscocrete 5-800                      | 0,1092 | 0,00475       | 4,75         | 0,2374       |
|                                       |        |               | <b>TOTAL</b> | <b>1,179</b> |

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 60**

Cantidad de material para 1 m<sup>3</sup> sin Aditivo Krystol

| Material         | Cantidad (kg/m <sup>3</sup> ) | Precio Unitario (Bs/kg) | Costo (Bs/m <sup>3</sup> ) |
|------------------|-------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Cemento          | 350                           | 1,128                   | 394,8                      |
| Agua             | 196                           | 0,0015                  | 0,29                       |
| Arena            | 773,01                        | 0,0937                  | 72,42                      |
| Grava            | 945                           | 0,0834                  | 78,41                      |
| Viscocrete 5-800 | 0,9555                        | 50                      | 47,775                     |
| Precio Total     |                               |                         | 593,695                    |

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 61**

Cantidad de material para una probeta con Aditivo Krystol (KIM)

| Cantidad para una probeta con Aditivo Krystol (KIM) |       |               |              |             |
|---|-------|---------------|--------------|-------------|
| Material  | kg    | kg en probeta | g en probeta | Precio (bs) |
| Cemento   | 13,65 | 0,590         | 593,48       | 0,6694      |
| Agua  | 6,07  | 0,260         | 263,91       | 0,0004      |
| Arena   | 32,00 | 1,390         | 1.391,30     | 0,1304      |
| Grava   | 38,00 | 1,650         | 1.652,17     | 0,1377      |
| Viscocrete 5-800                                    | 0,09  | 0,004         | 4,15         | 0,2077      |
| Kristol (KIM)                                       | 0,273 | 0,012         | 11,87        | 2,3739      |
|   |       |               | TOTAL        | 3,5196      |

*Fuente: Elaboración propia***Tabla 62**Cantidad de material para un 1 m<sup>3</sup> con Aditivo Krystol (KIM)

| Material               | Cantidad (kg/m <sup>3</sup> ) | Precio Unitario (Bs/kg) | Costo (Bs/m <sup>3</sup> ) |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Cemento                | 350                           | 1,128                   | 394,8                      |
| Agua                   | 196                           | 0,0015                  | 0,29                       |
| Arena                  | 773,01                        | 0,0937                  | 72,42                      |
| Grava                  | 945                           | 0,0834                  | 78,41                      |
| Viscocrete 5800 (0,9%) | 0,9555                        | 50                      | 47,775                     |
| kristol (KIM) 2%       | 7                             | 200                     | 1.400                      |
| Precio Total (Bs)      | 1.993,695                     |                         |                            |

*Fuente: Elaboración propia***Tabla 63**

Tabla precio por probeta

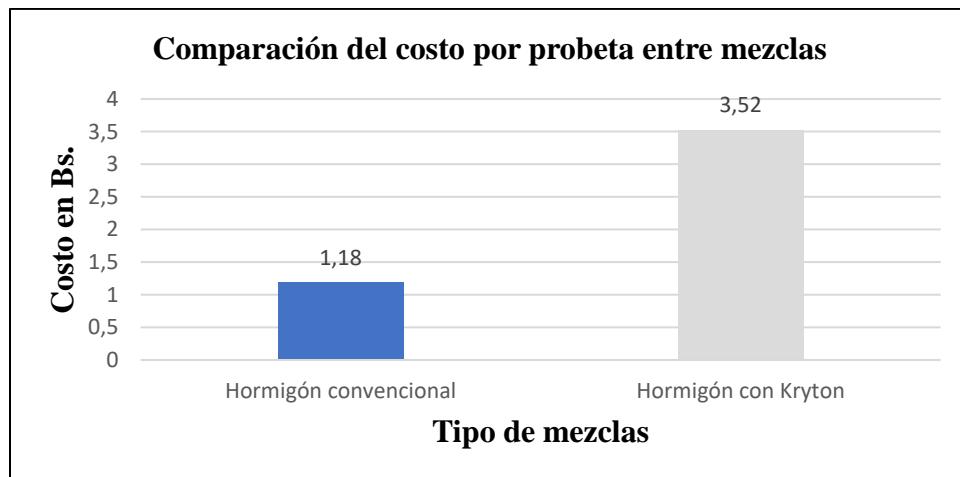
| Mezcla de Hormigón | Precio por probeta (Bs) |
|--------------------|-------------------------|
| Con Aditivo        | 1,18                    |
| Sin Aditivo        | 3,52                    |

*Fuente: Elaboración propia*

Se observa que el costo por unidad del hormigón con Kryton es aproximadamente tres veces mayor que el del hormigón convencional, representando un incremento del 235,8%.

**Figura 45**

Comparación del costo por probeta entre mezclas de Hormigón Convencional y Hormigón con Kryton



*Fuente: Elaboración propia*

Este análisis permite visualizar que, si bien la resistencia a compresión y durabilidad del hormigón con aditivo Kryton mostró mejoras en etapas avanzadas (a partir de 60 hasta los 120 días), esta mejora técnica debe ponderarse frente a su incremento en costo. Esta relación costo-beneficio debe ser evaluada con base en la vida útil esperada de la estructura, el nivel de agresividad del ambiente y los costos de mantenimiento evitados a futuro.

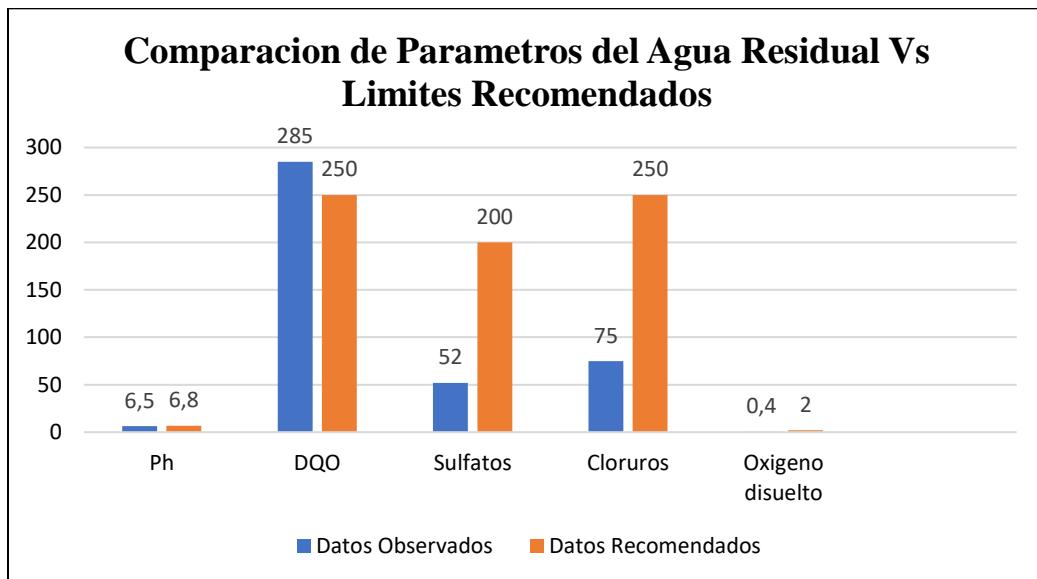
#### **4.5 Análisis de Resultados**

En este apartado se presenta una interpretación detallada de los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental de la investigación. Se analiza el comportamiento del concreto IP-40, tanto con como sin el aditivo hidrofílico cristalino Kryton (KIM), frente a la exposición a aguas residuales domésticas en condiciones de inmersión parcial y total. Los aspectos evaluados comprenden la calidad del agua residual, la resistencia a compresión del concreto, el análisis estadístico de los datos y una evaluación económica del uso del aditivo.

##### **4.5.1 Análisis del Agua Residual**

**Figura 46**

Análisis Comparativo de la Calidad del Agua Residual Frente a Estándares de Referencia



*Fuente: Elaboración propia*

El análisis fisicoquímico del agua residual recolectada de la laguna facultativa N.º2 de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de San Luis evidenció un entorno En el gráfico comparativo se exponen los valores observados frente a los límites recomendados por normas técnicas, literatura especializada y estudios científicos, como ACI 201.2R-16, la Guía Técnica de Saneamiento (Tomo 2, 2019), Bolaños-Alfaro (2015), Aldossary (2020), Jiménez Montoya (2000) y otros artículos relevantes (5.900 Folsom Blvd., 2021). Esta comparación permite identificar con mayor claridad el grado de agresividad del medio sobre el concreto.

- **pH (6.8):** Si bien se encuentra ligeramente dentro del rango aceptable (6.5–8.0 según (P. Jimenez Montoya, 2000)), su tendencia levemente ácida puede acelerar la disolución de los compuestos de cemento portland en especial al concreto armado acelerando su corrosión.
- **Oxígeno Disuelto (<0.5 mg/L):** Se observó un nivel muy por debajo del mínimo recomendado (>2.0 mg/L según ACI), lo cual favorece procesos anaerobios y la

proliferación de bacterias que pueden producir ácidos orgánicos, intensificando la corrosión del concreto.

- **DQO (316 mg/L):** Supera ampliamente el valor máximo sugerido (<250 mg/L), lo que evidencia una alta carga orgánica en el agua residual. Esto incrementa el riesgo de formación de compuestos agresivos como ácidos grasos volátiles y sulfuros.
- **Sulfatos (52 mg/L):** Aunque se encuentra dentro del límite aceptado (<200 mg/L según (John Diego Bolaños-Alfarol, 2015)), su presencia puede contribuir a reacciones expansivas en la matriz cementicia, especialmente si se acumulan por exposición repetida.
- **Cloruros (65 mg/L):** Aunque no supera niveles críticos, la presencia de cloruros representa un factor de riesgo por su potencial de iniciar procesos de corrosión en armaduras de acero si estas estuvieran presentes.

El gráfico evidencia de forma visual que los factores más críticos corresponden a la baja concentración de oxígeno disuelto y la alta carga orgánica (DQO). Ambos indicadores comprometen la estabilidad del concreto, justificando la necesidad de evaluar medidas de protección como aditivos impermeabilizantes o diseños especiales de mezcla para ambientes agresivos.

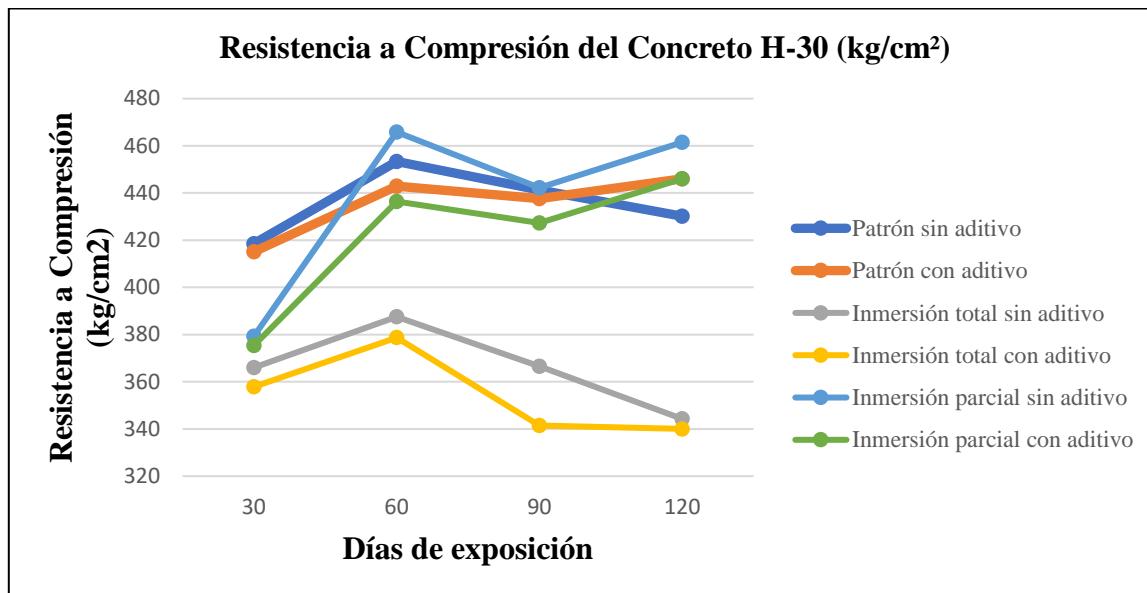
Este entorno fisicoquímico, caracterizado por acidez leve, alta materia orgánica y condiciones anaerobias, plantea un desafío significativo para la durabilidad del concreto en estructuras expuestas a aguas residuales, y debe ser considerado como un parámetro crítico en proyectos sanitarios

#### 4.5.2 Análisis de la Resistencia a Compresión

**Figura 47**

Evolución de la Resistencia Característica a Compresión del Concreto IP-40 bajo

Diferentes Condiciones de Exposición y comportamiento del aditivo



*Fuente: Elaboración propia*

El comportamiento mecánico del concreto IP-40, tanto con como sin el aditivo Kryton (KIM), fue evaluado mediante ensayos de compresión a edades de 30, 60, 90 y 120 días. Se analizaron probetas bajo tres condiciones: patrón (curado estándar sin exposición), inmersión total y parcial en aguas residuales.

El gráfico de resistencia a compresión muestra varias tendencias destacables:

- **Condición patrón:** La resistencia inicial del concreto sin aditivo fue ligeramente superior (45,33 Mpa) respecto al concreto con aditivo (44,60 Mpa). Esta diferencia se mantuvo estable en el tiempo, sugiriendo que el aditivo no mejora la resistencia inicial del concreto en condiciones estándar de curado.
- **Inmersión total:** Ambas mezclas presentaron pérdidas progresivas de resistencia. A los 120 días, el concreto sin aditivo redujo su resistencia a 33,96 Mpa, mientras que el concreto con aditivo alcanzó apenas 32,30 Mpa. Este comportamiento indica que el aditivo Kryton no generó un beneficio tangible bajo inmersión total, y en ciertos puntos incluso tuvo un desempeño menor al convencional, como a los 90 días.

- **Inmersión parcial:** Esta condición mostró el mejor desempeño relativo para ambas mezclas. El concreto sin aditivo alcanzó una resistencia de 46,14 Mpa a los 120 días, mientras que el concreto con aditivo llegó a 44,60 Mpa. Aunque el valor absoluto del concreto convencional fue mayor, la mezcla con Kryton presentó una evolución más estable y progresiva a lo largo del tiempo, lo que podría asociarse a un efecto retardado del aditivo en condiciones con ciclos de humedad y oxígeno.

En resumen, los datos reflejan que el aditivo Kryton no aporta mejoras significativas en la resistencia a compresión en el corto o mediano plazo, especialmente bajo condiciones de inmersión total. Sin embargo, su comportamiento más uniforme en inmersión parcial podría indicar un beneficio potencial a largo plazo en términos de durabilidad estructural, sujeto a validación mediante ensayos adicionales de permeabilidad y ataque químico.

#### 4.5.3 Análisis de Costos

El análisis económico comparó el costo por  $m^3$  del concreto convencional IP-40 frente al concreto modificado con el aditivo Kryton (KIM):

- Costo del concreto convencional: 593,7 Bs/ $m^3$
- Costo del concreto con aditivo: 1.994 Bs/ $m^3$

La diferencia representa un aumento del 235,8% (aproximadamente 1.400,3 Bs/ $m^3$ ). Si bien no se observaron beneficios inmediatos en la resistencia mecánica, la inversión en el aditivo puede estar justificada en obras expuestas a condiciones agresivas, como sistemas sanitarios, tanques, PTARs o estructuras subterráneas.

En estos casos, el uso del aditivo podría prolongar la vida útil del concreto, disminuir la penetración de agentes agresivos y reducir la frecuencia de intervenciones correctivas, compensando su costo en el largo plazo.

## CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

- El hormigón elaborado con cemento IP-40 sin aditivo presentó una resistencia a compresión adecuada bajo condiciones estándar de curado, no obstante, tras su exposición en aguas residuales en condiciones de inmersión total, evidenció una disminución significativa de resistencia, alcanzando hasta un 10%.
- El hormigón con Kryton mostró un aumento progresivo de la resistencia con el tiempo, alcanzando su mejor rendimiento a los 120 días, especialmente bajo condiciones de exposición parcial, donde superó en un 15,91 % al hormigón patrón aditivado. Esto evidencia que el aditivo actúa más eficientemente en plazos prolongados, lo que es clave en obras donde la durabilidad es prioritaria.
- La exposición parcial resultó menos agresiva que la inmersión total para ambos tipos de hormigón. Las condiciones de exposición parcialmente sumergidas permitieron mejores resultados de resistencia, posiblemente por un balance favorable entre oxígeno y humedad para la hidratación del cemento.
- El análisis fisicoquímico del agua residual evidenció un entorno potencialmente agresivo para el hormigón. Se identificaron parámetros que pueden comprometer su durabilidad, tales como un pH ligeramente ácido (6.81), lo que favorece procesos de corrosión química. La concentración del DQO (285 mg/L) indica una carga orgánica significativa que promueve la actividad microbólica, especialmente de bacterias sulfato-reductoras, acelerando la degradación del concreto. Asimismo, aunque los valores de sulfatos (52 mg/L) y cloruros (110 mg/L) se encuentran por debajo de los límites normativos, su presencia sostenida puede inducir fisuración por reacción expansiva con aluminatos del cemento y corrosión en armaduras.
- Desde el punto de vista económico, el uso del aditivo Kryton incrementa el costo del concreto en un 235,8% por metro cúbico. Si bien no se justificó este sobrecosto en términos de resistencia mecánica inmediata, podría considerarse en obras que prioricen la durabilidad, impermeabilidad o menor mantenimiento a largo plazo.
- En general, los resultados obtenidos indican que el aditivo Kryton no debe ser evaluado únicamente por su aporte mecánico, sino considerando propiedades como

la reducción de permeabilidad, resistencia a agentes químicos y prolongación de vida útil, lo cual requiere ensayos adicionales a largo plazo.

- El aditivo Kryton no es compatible con productos de la marca (SIKA) ya que al dosificar el aditivo tiene un rápido fraguado a los 10 minutos después de su vaciado llega a tener un cono 0 de asentamiento en otras palabras pierde trabajabilidad lo que puede dificultar en el momento de vaciar estructuras de Hormigón
- Durante la etapa de exposición en aguas residuales, se observó una coloración rojiza en las probetas de hormigón que contenían el aditivo Kryton (KIM). Esta alteración visual podría estar relacionada con una reacción entre el aditivo y los agentes químicos agresivos presentes en el entorno, como sulfatos, óxidos metálicos o componentes ácidos. La aparición de esta coloración sugiere que el aditivo no permaneció inerte, sino que interactuó activamente con el medio, generando posibles mecanismos de “repelencia” o neutralización frente a sustancias potencialmente dañinas. Esta evidencia visual puede interpretarse como un indicio del funcionamiento del aditivo: al activarse químicamente en presencia de agua y compuestos agresivos, el Kryton genera cristales que bloquean micro fisuras y poros, formando una barrera interna. La coloración rojiza podría ser, por tanto, una manifestación superficial de esta reacción protectora, indicando que el aditivo contribuye activamente a la durabilidad del hormigón al evitar la penetración profunda de contaminantes.
- Según la dosificación calculada teóricamente para un Hormigón H 30 con cemento IP 40 se llegó que esta dosificación no pertenece a un H30 Si no a un Hormigón H40
- Cabe llegar a la conclusión que el Hormigón con Aditivo a los 28 días en curado normal la resistencia es menor frente a un Hormigón convencional con la misma dosificación

## 5.2 Recomendaciones

- Complementar futuros estudios con ensayos de absorción capilar, penetración de cloruros, análisis de microestructura (microscopía electrónica, porosidad) y ciclos de ataque químico, para evaluar integralmente el impacto del aditivo en la durabilidad del concreto.

- Extender el periodo de evaluación más allá de 120 días, incluyendo mediciones a 180 y 360 días, podría revelar efectos diferidos del aditivo que no se evidencian en el corto plazo.
- No asumir que la incorporación de un aditivo garantiza mejoras mecánicas inmediatas; se debe realizar una verificación experimental para cada contexto específico de uso, especialmente si se trata de condiciones ambientales severas.
- Evaluar el uso de Kryton o aditivos similares en estructuras donde la durabilidad y la impermeabilidad son prioritarias, como plantas de tratamiento de aguas, tanques de almacenamiento, túneles o cimentaciones en contacto constante con humedad.
- En el diseño de mezcla, se recomienda considerar estrategias combinadas, como el uso de aditivos más especializados, fibras, concretos de alta performance o recubrimientos impermeabilizantes, cuando se busque una protección efectiva en ambientes agresivos.
- Es fundamental que los próximos estudios evalúen el aditivo en condiciones mucho más severas, como ambientes extremadamente corrosivos, ciclos intensos de congelación-descongelación, o directamente en una laguna anaerobia. Esta evaluación es vital porque los ensayos en condiciones no tan severas no revelan completamente el potencial ni las limitaciones del aditivo. Al someterlo a estos entornos agresivos, se podrá validar de forma concluyente su capacidad para resistir ataques químicos, biológicos y físicos específicos, lo cual es indispensable para garantizar la durabilidad del concreto en proyectos de infraestructura crítica
- Se sugiere evaluar rigurosamente el aditivo en hormigón expuesto a aguas residuales durante la temporada de estiaje. Esto se debe a que, en estiaje, la concentración de agentes agresivos como el fósforo y la materia orgánica aumenta, lo que intensifica la corrosión biogénica. Demostrar la eficacia del aditivo bajo estas condiciones extremas, aunque su costo inicial sea mayor, validará su capacidad para mejorar la durabilidad y prolongar la vida útil de las estructuras de hormigón en ambientes hostiles, justificando así la inversión a largo plazo.