

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se está viendo una tendencia creciente en realizar diseños más enfocados en la durabilidad de las estructuras, buscando que las estructuras alcancen una mayor vida útil por la creciente dificultad de encontrar recursos naturales que sean aptos como materiales de construcción. Toda agua residual recogida de comunidades o municipios deben ser conducidas y tratadas en plantas de tratamiento de aguas residuales, donde gran parte de sus estructuras están conformadas por hormigón, que al ser de naturaleza porosa en ciertos entornos agresivos puede deteriorarse a consecuencia de ataques químicos y biológicos, generando daños en la estructura acortando su vida útil.

El agua residual por la compleja variedad de componentes químicos y biológicos se considera un entorno agresivo para el hormigón, las diversas reacciones químicas que se producen pueden ser perjudiciales, llegando a generar corrosión, micro roturas y desprendimientos en el hormigón. La resistencia a compresión del hormigón es un indicador de la vulnerabilidad que este presenta ante ataques que sufre por agentes químicos o biológicos externos, cualquier daño interno o externo que presente en el hormigón se reflejará con una disminución de la resistencia a compresión.

A nivel nacional se está viendo una creciente demanda en la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, al contar con pocos estudios a nivel nacional sobre los efectos que pueden ocasionar el agua residual doméstica en hormigones que conducen o almacenan agua residual, a nivel regional un estudio reciente realizado por CIAGUA con un hormigón de relación agua/cemento 0,6, determino una notable reducción en la resistencia a compresión tras estar sumergido por 90 días en agua residual doméstica.

Para analizar esta problemática de la reducción de resistencia a compresión del hormigón sumergido en agua residual doméstica, es necesario mencionar como una de las principales causas del deterioro del hormigón en agua residual son los sulfatos, que al encontrarse en agua residual genera diversas reacciones químicas adversas para el hormigón.

Por lo que esta investigación podrá darnos una visión de una posible degradación a través del tiempo que puede sufrir un hormigón elaborado con cemento IP tras estar sumergido en agua residual doméstica para prever posibles fallas en estructuras que albergan agua residual doméstica.

1.1. Planteamiento del Problema

Uno de los principales materiales que se utiliza en la construcción de planta de tratamiento u obras de saneamiento en el mundo es el hormigón por sus beneficios, alta resistencia a compresión, facilidad de puesta en obra y su bajo costo en su elaboración.

El hormigón por ser de naturaleza porosa permite que penetren los líquidos y gases, por lo cual lo hace susceptible al deterioro por ataques químicos y biológicos sobre todo cuando la exposición es directa en un entorno agresivo como es el agua residual de origen doméstico.

Los daños de este tipo de ataque en estructuras de hormigón pueden llegar a producir agrietamientos, pérdida de masa por micro desprendimiento del hormigón generando reducción de sus propiedades mecánicas (resistencia a compresión) como uno de sus principales efectos, provocando un riesgo en la integridad de la estructura, acortando su vida útil y elevando el costo por mantenimiento. Las fisuras en estructuras de hormigón que albergan agua residual doméstica generan filtración contaminando de suelos adyacentes, aguas subsuperficiales y subterráneas llegando a provocar daños a la fauna y flora generando enfermedades en la población.

El mecanismo preventivo más empleado en el mundo para mitigar los daños causados en el hormigón por exposición a entornos agresivos son los aditivos impermeabilizantes. El incumplimiento de la ley N°1333 (ley del Medio Ambiente) en el manejo del agua vertida al alcantarillado por algunas industrias y población, hace que en el agua residual estén disueltos una gran diversidad de compuestos químicos que interaccionan con el hormigón de plantas de tratamiento, por lo que el uso de aditivos impermeabilizante con resistencia química son necesarios en cierta medida para la protección del hormigón, cada aditivo tiene sus propias características por lo cual se debe estudiar y ensayar los aditivos in situ para conocer la protección real que tienen ante ataques químicos.

Lo que nos lleva a la pregunta ¿Cuál es la influencia que tiene el agua residual doméstica de la ciudad de Tarija en la resistencia a compresión del hormigón endurecido con aditivos impermeabilizantes (Sika WT-200 P, Sikaguard 63 CL, Sikatop 107 Seal, Sikaguard Antiácido)?.

1.2. Justificación

Basándose en resultados de anteriores investigaciones regionales realizadas por CIAGUA conjuntamente con SOCIECIV de la UAJMS donde determinaron que se presenta una notable reducción de la resistencia a compresión del hormigón en 81 días, esta investigación pretende analizar esta problemática del hormigón sumergido en agua residual doméstica, elaborando un hormigón de cemento IP con una dosificación que cumpla las especificaciones técnicas de la Norma Boliviana NB 1225001-1 del Hormigón Estructural para el diseño de hormigones de plantas de tratamiento de agua residual doméstica y ACI 350 Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures and Commentary, en intervalos de tiempo de 30, 60, 90, 120, 180 días similar al realizado por CIAGUA en su investigación en la laguna facultativa de la PTAR San Luis de la ciudad de Tarija.

El estudio de la influencia del agua residual doméstica en la resistencia a compresión del hormigón con diferentes aditivos impermeabilizantes es de gran importancia para los profesionales que se encargan de diseñar de estructuras que conducen o almacenan agua residual, porque la resistencia a compresión es un buen indicador de la resistencia que este tiene ante agentes químicos externos, brindándonos un panorama general sobre la agresividad que tiene el agua residual doméstica sobre el hormigón.

En el transcurso del tiempo el hormigón de una planta de tratamiento se deteriora por acción de ataques químicos y biológicos sufriendo desprendimiento, fisuras en la estructura lo que conlleva a filtraciones de agua residual contaminando los suelos adyacentes, aguas subsuperficiales y aguas subterráneas provocando daños en la fauna y flora, generando enfermedades en la población.

La presente investigación es viable debido a que se cuenta con el interés y los materiales necesarios para la realización del mismo, este estudio tiene un beneficio social porque se podrá realizar mayores estudios a futuro que contribuirán con el conocimiento, así diseñar estructuras de mejor calidad para el beneficio de la población.

En el aspecto disciplinario el estudio pretende contribuir a estudios similares regionales y nacionales, ampliando el conocimiento en el área de la construcción de obras de saneamiento y plantas de tratamiento de agua residual.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Determinar la influencia que tiene las aguas residuales domésticas sobre la resistencia a compresión de un hormigón H-35, elaborado con cemento tipo IP y aditivos impermeabilizantes, por intervalos de tiempo de 30, 60, 90, 120, 180 días de sumersión en agua residual doméstica.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar un análisis físico-químico de los parámetros del agua residual de la PTAR San Luis que especifique la normativa la Norma boliviana NB 1225001-1 del Hormigón Estructural, ACI 350 Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures and Commentary para el diseño de mezcla de hormigón que está expuesto en ambientes agresivos.
- Determinar si existe alguna variación en la resistencia a compresión de las probetas de hormigón en función del tiempo (30, 60, 90, 120, 180 días) que han permanecido sumergidas en agua residual doméstica.
- Identificar que aditivo impermeabilizante (Sika WT-200 P, Sikaguard 63 CL, Sikatop 107 Seal, Sikaguard Antiácido) nos brinda una mayor impermeabilización mediante el ensayo de penetración de agua bajo presión.

1.4. Alcance y limitaciones

1.4.1. Alcance

La Técnica de investigación que se empleará en la presente investigación será la técnica de observación científica debido a que se pretende conocer las características de las probetas de hormigón antes y después de la sumersión en aguas residuales y analizar las variaciones en la resistencia a compresión de las probetas hormigón sumergidas en agua residual doméstica en un tiempo de 30, 60, 90, 120, 180 días.

El alcance del estudio se limita a elaborar 205 probetas cilíndricas de hormigón, con dimensiones de 100 mm x 200 mm y 10 probetas cilíndricas de 150 mm x 300 mm, la mezcla de hormigón se realizará con cemento del tipo IP-30 (El Puente), agregado grueso $\frac{3}{4}$ plg, agregado fino, ambos de la Planta Viracocha, aditivos impermeabilizantes (Sika WT-200 P, Sikaguard 63 CL, Sikatop 107 Seal, Sikaguard Antiácido), cumpliendo con los requerimientos de durabilidad indicados en las normas NB 1250001-1, ACI 318, ACI 350.

La presente investigación se lo efectuará en la laguna facultativa de la PTAR San Luis de la ciudad de Tarija que realiza la función de tratamiento primario, en estas aguas se sumergirán 75 probetas de hormigón endurecido de dimensiones 100 mm x 200 mm para el estudio y se determinará la resistencia a compresión junto con 75 probetas patrón, el ensayo estará dividido en función del tiempo (30, 60, 90, 120, 180 días) que estará sumergido las probetas en agua residual doméstica.

Se realizará el ensayo de penetración máxima de agua bajo presión con 10 probetas con dimensiones de 150 mm x 300 mm de hormigón endurecido sin y con aditivos impermeabilizantes (Sika WT-200 P, Sikaguard 63 CL, Sikatop 107 Seal, Sikaguard Antiácido).

Se extraerán muestras de agua residual los días que se extraerán las probetas de hormigón de la PTAR de San Luis, dando en total de 5 días de extracción de muestras de las cuales se analizarán los siguientes parámetros sulfatos, cloruros, pH, conductividad, sólidos totales.

1.4.2. Limitaciones

Las limitaciones de la presente investigación será el número de probetas de hormigón que serán sumergidas en las aguas residuales domésticas, por motivos de espacio en la laguna facultativa de la planta de tratamiento de San Luis, lo que no hace imposible sumergir una mayor cantidad de probetas sin interferir con el funcionamiento de la planta de tratamiento.

No contar con estudios de caracterización del agua residual doméstica de la PTAR San Luis por las instituciones del Gobierno Municipal, por lo tanto se tuvo una limitación económica por parte del estudiante.

1.5. Hipótesis

Por antecedentes internacionales y regionales previo a esta investigación con diferentes hormigones de diferentes características de cementos, agregados, relación agua/cemento a esta investigación, se prevé obtener una reducción en la resistencia a compresión del hormigón en un quince por ciento, por efecto del ataque químico generado en el agua residual doméstica.

En hormigones con aditivos impermeabilizantes con resistencia química especializados para plantas de tratamiento no se espera tener una reducción a compresión del hormigón.

En hormigones con aditivo impermeabilizante sin resistencia química se espera un buen funcionamiento en los primeros dos meses de estar en contacto con el agua residual doméstica, pero en el transcurso del tiempo se espera un deterioro progresivo del aditivo.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

En Tarija de acuerdo con Gamarra Mendoza et al., (2019, p. 5), deduce que un hormigón endurecido y con una relación agua/cemento de 0,6 sumergido en aguas residuales domésticas por 81 días su resistencia a compresión disminuye un 44,5 por ciento y en el hormigón con aditivos impermeabilizantes sin resistencia a los ataques química la resistencia a compresión disminuye entre un 31 a un 41 por ciento.

En China según Kong et al., (2020, p. 5), señala que el hormigón con diferentes grados de carbonatación expuesto en aguas residuales domésticas de alta concentración podría tener una disminución en su resistencia a la compresión hasta en un 54,39 por ciento en 90 días.

En Irlanda se realizó un estudio donde se determinó que un hormigón que incorpora Escorias Granuladas De Horno Alto (GGBS por sus siglas en inglés) sometido en aguas residuales agresivas por 168 días puede llegar a tener una reducción entre 62-70 por ciento de su resistencia a la compresión(O'Connell et al., 2011, p. 6).

En Inglaterra, de acuerdo con Saeed, (2009, p. 123), destaca que el hormigón en una solución de sulfato de sodio para simular los efectos que tiene este compuesto que está presente en las aguas residuales domésticas obtiene una pérdida entre 26 al 16 por ciento de su resistencia a compresión en 361 de sumersión del hormigón en la solución.

En Brasil se realizó un estudio donde se logró determinar que en hormigones con relaciones a/c de 0,4 elaborados con diferentes tipos de cemento que estaban expuesto a los gases producidos por el agua residual por 360 días se obtuvo una reducción del 63 por ciento de su resistencia a compresión mientras que en hormigones con relación a/c de 0,5 se obtuvo una disminución del 53 por ciento de la resistencia a compresión (Capraro et al., 2019, p. 6).

2.2. El Hormigón

El concreto u hormigón es un material semejante a la piedra que se obtiene mediante una mezcla cuidadosamente proporcionada de cemento, arena, grava, agua.(Arthur, 1999, p. 1)

El hormigón hidráulico es considerado como una mezcla homogénea formada por proporciones adecuadas de un aglomerante, árido grueso, árido fino y agua que luego de endurecer adquiere la apariencia de una roca. Es un material que por lo general es durable y

resistente, además al poseer una fase líquida o semilíquida puede ser moldeado, resultando en una amplia gama de formas. (Farfán Samperio, 2002)

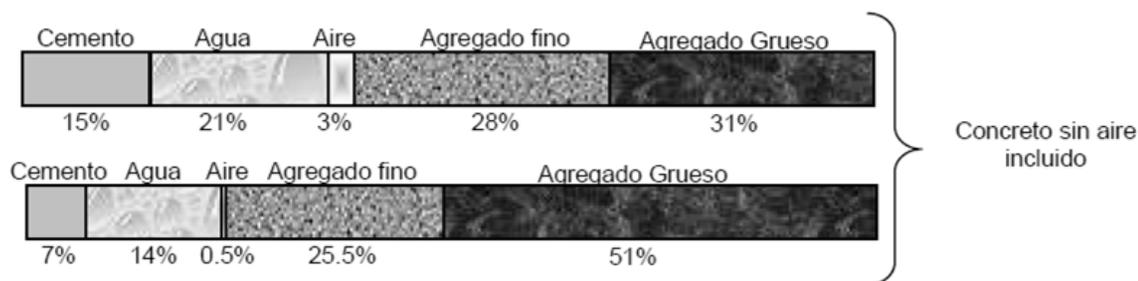


Figura N°1: Componentes de Una Mezcla Común de Hormigón Sin Aire Incluido.

Fuente: Sánchez de Guzmán, 2001, p. 22 .

2.2.1. Componentes del Hormigón

2.2.1.1. Cemento

Son conglomerantes hidráulicos, o sea materiales artificiales de naturaleza inorgánica y mineral, que finamente molido y convenientemente amasados con agua, forman pastas que fraguan y endurecen tanto al aire como bajo agua, a causa de las reacciones de hidrólisis o hidratación de sus componentes, dando lugar a productos hidratados, mecánicamente resistentes y estables tanto al aire como bajo agua. (Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA), 2009, p. 1 NB-011)

Clasificación de Tipo de Cemento Portland

➤ Cemento Portland, tipo I

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de Clinker Portland en proporción no menor del 95% en masa, de otros componentes adicionales definidos en la norma en proporción no mayor del 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que deberá añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos (Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA), 2009, p. 4 NB-011).

➤ **Cementos Portland con puzolana, tipo IP**

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de Clinker Portland una proporción no menor del 70% ni mayor del 94%, en masa de puzolana natural una proporción no menor del 6% ni mayor del 30% en masa y de otros de los componentes adicionales en una proporción comprendida entre el 0% y el 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que deberá añadirse al mismo en la proporción adecuada). (Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA), 2009, p. 4 NB 011)

➤ **Cementos Portland con filler calizo, tipo IF**

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de Clinker Portland con una proporción no menor del 80% ni mayor del 94% en masa, filler calizo con una proporción no menor del 6% ni mayor del 15% en masa y de otros de los componentes adicionales una proporción comprendida entre el 0% y el 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que deberá añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos (Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA), 2009, p. 4NB 011).

➤ **Cementos puzolánicos tipo P**

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de Clinker Portland en proporción no menor del 60% en masa, de puzolanas naturales, cenizas volantes u otros materiales puzolánicos en proporción total no mayor del 40% en masa y de otros de los componentes con una proporción total no mayor del 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que deberá añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos. (Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA), 2009, p. 4 NB 011)

2.2.1.2. Agregado o Árido

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

El agregado en el concreto ocupa de 60 a 80 por ciento del volumen.

Los agregados se clasifican de acuerdo con la dimensión de las partículas, el término de agregado grueso se utiliza para describir partículas mayores de 4,75 mm (retenidas en una malla No. 4), y el término agregado fino se utiliza para las partículas menores de 4,75 mm generalmente.(Kumar Mehta y Monteiro, 1985, p. 165)

2.2.1.3. Agua

El agua se puede definir como aquel componente del concreto que produce reacciones químicas en el cemento. Estas propiedades son el fraguado y el endurecimiento para formar un sólido único con los Agregados. Para esto el agua se lo clasifica en agua de mezclado y agua de curado.

El agua usada en el mezclado de concreto y mortero por lo general el agua debe ser potable y no tener un pronunciado olor o sabor.

Las misiones del agua de amasado del hormigón son dos:

- Hidratación del conglomerante hidráulico.
- Dotar a la masa de trabajabilidad suficiente.

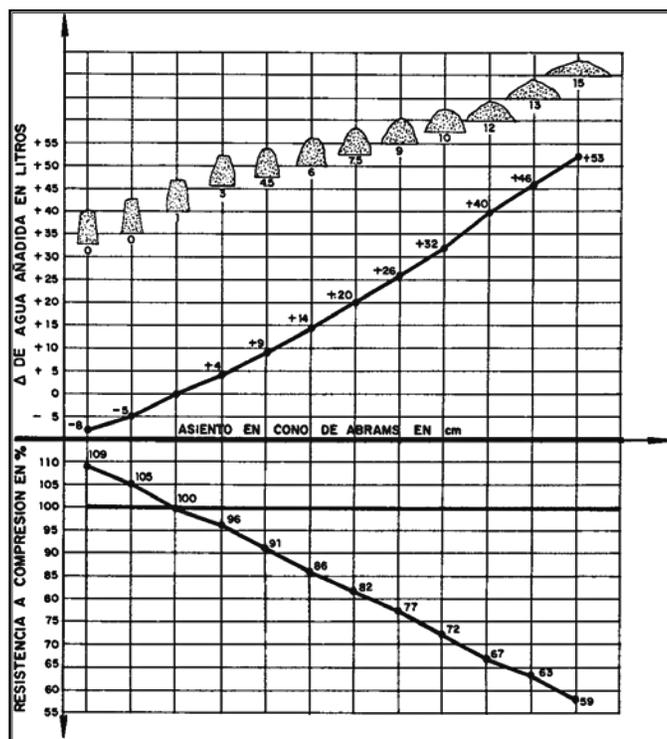


Figura N°2: Relación entre la Cantidad de Agua para el Amasado con la Resistencia a Compresión y el Asentamiento en el Ensayo del Cono de Abrams.

Fuente: Jiménez et al., 2008, p. 23.

El agua para el amasado y para el curado del hormigón, debe ser limpia y deberán cumplir las siguientes condiciones establecidas por la Norma Española 7235 por sus siglas (UNE 7235):

- Exponente de hidrógeno pH ≥ 5
(Determinando según la Norma NB/UNE 7234)
- Sustancias disueltas ≤ 15 g/L
(Determinadas según la Norma NB/UNE 7130)
- Sulfatos, expresados en SO_4 ≤ 1 g/L
(Determinados según la Norma NB/UNE 7131)
- Ion cloro Cl ≤ 6 g/L
(Determinado según la Norma NB/UNE 7178)
- Hidratos de carbono..... 0
(Determinados según la Norma NB/UNE 7132)
- Sustancias orgánicas solubles en éter ≤ 15 g/L
(Determinados según la Norma NB/UNE 7235)

2.2.2. Propiedades de Hormigón Fresco

2.2.2.1. Consistencia

Es la menor o mayor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse. Varía por multitud de factores como ser: cantidad de agua de amasado, tamaño máximo del agregado grueso, granulometría y forma de los áridos, etc. Pero el más influye es la cantidad de agua de amasado (Jiménez et al., 2008, p. 55).

El método más utilizado para determinar la consistencia es el cono de Abrams.

El cono de Abrams es un molde troncocónico de 30 cm de altura, que se rellena con hormigón compactado, y al quitar el cono y se mide el asentamiento que experimenta la masa fresca del hormigón y se lo mide en centímetros como nos muestra la figura N°3.

Los hormigones se clasifican por su consistencia que pueden ser secos, plásticos, blandos, fluidos y líquidos en función de su asentamiento, como se indica en la Tabla N°1.

Tabla N°1: Clasificación de Consistencia

Consistencia	Asentamiento (cm)	Tolerancia (cm)
Seca	0 - 2	0
Plástica	3 - 5	± 1
Blanda	6 - 9	± 1
Fluida	10 - 15	± 2

Fuente: Jiménez et al., 2008, p. 41.



Figura N°3: Ensayo de Cono de Abrams.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.2.2. Trabajabilidad

Es la facilidad que presenta el concreto fresco para ser mezclado, colocado, compactado y acabado sin segregación y exudación durante estas operaciones.

2.2.2.3. Homogeneidad

Es la cualidad por la cual los diferentes componentes del hormigón aparecen regularmente distribuidos en toda la masa, de manera tal que dos muestras tomadas de distintos lugares de la misma resulten similares.

La homogeneidad se consigue con un buen amasado y para mantenerse requiere un transporte cuidadoso y una colocación adecuada.

2.2.3. Características Mecánicas del Hormigón

2.2.3.1. Resistencia a compresión (f'_c)

La resistencia a compresión es la relación entre fuerza distribuida sobre un área axial.

La relación agua/cemento al momento de la dosificación del hormigón es muy importante, según cuánta agua se emplee en la mezcla esta disminuirá o aumentará la porosidad del hormigón como también su resistencia a compresión.

A pesar de que la relación agua/cemento es el factor que más influye en la resistencia del hormigón no es el único factor, también el tipo de árido y el tipo de cemento influyen sobre la resistencia a compresión del hormigón.

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, 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 (Jiménez et al., 2008, p. 37).

2.2.4. Resistencia Promedio Requerida (f'_{cr})

Según (Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA), (2017, p. 41) NB 1225001-1), la resistencia requerida (f'_{cr}) es el valor estadístico de la resistencia que corresponde a una probabilidad del 95 por ciento de todos los resultados de ensayos supere o iguale la resistencia.

2.3. Permeabilidad

La permeabilidad es la cantidad de agua que migra a través del concreto o también es la habilidad del hormigón en resistir a la penetración del agua u otras sustancias como ser líquidos, gases (Steven H et al., 2004, p. 10).

Los agentes agresivos en estado gaseoso o líquido penetran y se transportan por la red porosa de la estructura del hormigón, los mecanismos de transporte difieren unos de otros por la fuerza impulsora que actúa, pudiendo ser esta un gradiente de concentraciones o difusión, absorción capilar, diferencia en densidad o temperatura (convección) y diferencia de potencial electrostático o migración iónica (Molina Bas, 2008, pp. 2-15).

➤ Gradiente de Concentración o Difusión

La difusión es un proceso físico en el que partículas materiales se introducen en un medio que inicialmente estaba ausente de ellas, este es inducido por la existencia de un gradiente de concentración que tiende a equilibrar los diferentes niveles de concentración. El proceso puede producirse en régimen estacionario (donde el caudal se mantiene constante en el tiempo) o transitorio.

➤ Absorción Capilar

La absorción capilar es una succión que se debe a que la superficie libre de los sólidos que tiene un exceso de energía debido a la falta de enlaces con otras moléculas cercanas. Esto tiende a compensarse absorbiendo moléculas de agua que están en la superficie y continúa hasta alcanzar un estado de equilibrio. El transporte de líquido a través de los poros capilares por la tensión superficial se genera sobre los vacíos provocando que el líquido se eleve a través del poro. Este proceso depende de las propiedades de líquido (viscosidad, densidad, tensión superficial) y del sólido (estructura porosa).

➤ Convección

El transporte por convección se produce por la diferencia de temperatura existente entre dos zonas del material. Los fluidos existentes en la zona de mayor temperatura aumentan de volumen, disminuyen su densidad. El fluido tiende a homogeneizar sus propiedades para lo que necesita desplazarse hacia las zonas más frías.

➤ **Migración iónica**

La migración ocurre si entre distintos puntos de un electrolito se producen diferencias en el potencial electrostático, el campo eléctrico resultante es causa de un flujo de carga en sentido del campo. En el hormigón el electrolito es la fase acuosa embebida en los poros del material.

2.4. Durabilidad

Según Institute Concrete American, (2001, p. 2) por sus siglas ACI 201.2R-01, define como su capacidad para resistir la acción de la meteorización, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un concreto durable conservará su forma, calidad y servicio originales al estar expuesto en cualquier ambiente.

2.4.1. Agentes Agresivos al Hormigón

Los agentes que pueden atentar contra la durabilidad del hormigón son muchos y no es fácil su clasificación en forma simplificada pueden agruparse en:

1. Acciones mecánicas: Cargas, sobrecargas, impactos, vibraciones. Producidos por causas naturales (agua corriente, aire) o artificiales.
2. Acciones físicas: Variaciones de temperatura y humedad, heladas, temperaturas extremas, corrientes eléctricas, erosión, fuego, radiaciones.
3. Acciones biológicas: Vegetación, microorganismos (bacterias y otras formas microscópicas de vida orgánica).
4. Acciones químicas: Aire y otros gases, en atmósfera natural o contaminada. Aguas agresivas (de curado, naturales superficiales o profundas, de mar, industriales, negras agrícolas, negras urbanas) y otros líquidos. Áridos reactivos. Productos químicos orgánicos (aceites, gasas) o inorgánicos. Suelos y terrenos agresivos.

(Jiménez et al., 2008, p. 134).

2.4.2. Exposición Del Hormigón a Sustancias Químicas Agresivas

Generalmente el concreto es capaz resistir diversas condiciones atmosféricas bajo exposición química contenidas en agua y suelos, en ciertos ambientes agresivos pueden deteriorar el hormigón con el paso del tiempo, cuando el concreto es atacado por sustancias químicas estas

deben encontrarse en una solución y sobrepasar una determinada concentración para deteriorar el hormigón.

Las materias que atacan el hormigón son en general las aguas que contienen ácidos, sulfatos, ciertas sales de magnesio o de amonio, así como ciertas soluciones orgánicas. Las aguas ácidas y los ácidos minerales como el ácido sulfúrico, el ácido clorhídrico y el nítrico, tienen la propiedad de disolver el cemento fraguado y los áridos a base de carbonatos. Su capacidad corrosiva se expresa al tener un pH inferior a 7 clasificado como ácido (Bonzel, 1964, p. 1).

Según Neville, (2013, p. 353), las sustancias que causan ataque químico muy severo al concreto son los ácidos carbónico, clorhídrico, fluorhídrico, nítrico, fosfórico, sulfúrico, acético, cítrico, fórmico, húmico, láctico, tánico, cloruro de aluminio, sales de amonio, sulfuro de hidrógeno, grasas animales y vegetales, aceites vegetales, sulfatos.

Según Bonzel, (1964, p. 2), el sulfuro de hidrógeno es un ácido relativamente débil que no puede disolver el cemento, sin embargo en forma de gas puede penetrar profundamente en el hormigón y en contacto con el aire en presencia de SO_4^- propio del cemento generar ácido sulfúrico y gases sulfurados que atacan al hormigón.

Según Bonzel, (1964, p. 2), los sulfatos se transforman en presencia de contenidos de cal del cemento en sulfoaluminato cálcico. El sulfoaluminato cálcico llamado ettringita al consolidarse aumenta considerablemente de volumen, generando expansiones internas en el hormigón.

2.4.2.1. Ataque Ácido

El concreto al ser altamente alcalino no es resistente al ataque de ácidos fuertes o de compuestos que pueden convertirse en ácidos, no existe defensa contra el ataque de ácido por lo que estos deben ser eliminados o se deben evitar que entren en contacto con el hormigón mediante aditivos impermeabilizantes resistentes al ácido.

El ataque químico al concreto ocurre por la vía de descomposición de los productos de hidratación y de la formación de nuevos compuestos.

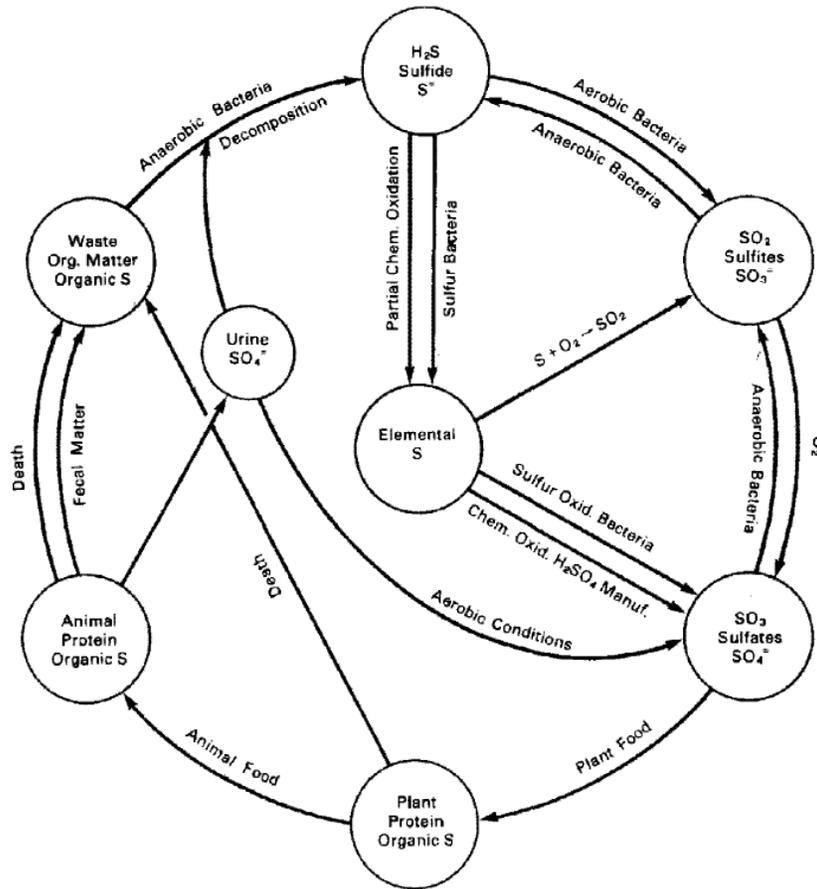


Figura N°4: Ciclo del Azufre.
Fuente: EPA, 1985

El agua residual doméstica por sí misma es alcalina y no ataca al concreto, pero se ha observado daños severos en los ductos de drenaje, especialmente cuando existen temperaturas regularmente altas, cuando compuestos de azufre llegan a reducirse por bacterias anaeróbicas generando ácido sulfhídrico (H_2S). Éste no es un agente destructivo en sí mismo, pero se disuelve en películas de humedad sobre la superficie expuesta del concreto y es sometido a oxidación por bacteria anaeróbica se produce finalmente ácido sulfúrico (H_2SO_4) (Neville, 2013, p. 354).

Las consecuencias de los ataques del ácido sulfhídrico son la disminución del pH, deterioro de la pasta de cemento, generación de sulfato de calcio, generando condiciones aptas para la corrosión del acero del hormigón armado.

Según Vincke et al., (2002, p. 5), los ataques de ácido sulfúrico o sulfato son responsables de una quinta parte del deterioro del hormigón en los sistemas de alcantarillado.

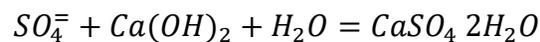
Según Monteny et al., (2001), destacó el efecto perjudicial del ácido sulfúrico que se vierte en el sistema de alcantarillado, la razón principal de la existencia de estas sustancias en el sistema de alcantarillado es la eliminación de residuos industriales.

2.4.2.2. Ataque por Sulfatos

El sulfato de sodio, potasio, calcio y magnesio que están naturalmente en el suelo o disueltos en agua freática.

La combinación de sulfatos con hidróxidos de calcio (cal hidratada), liberada durante el proceso de hidratación del cemento se convierte en sulfato de calcio (Yeso), y este si se combina con el aluminato hidratado de calcio formará sulfoaluminato de calcio (ettringita) (Sánchez de Guzmán, 2001, p. 154).

Consecuencias del ataque por sulfatos son expansiones internas, fisuraciones del concreto, fallas de adherencia de la pasta, reducción de la resistencia mecánica.



Ion sulfato

sulfato de calcio (yeso)



Aluminato de calcio hidratado

ettringita

2.4.2.3. Ataque por Cloruros

El ataque de cloruros genera corrosión del acero de refuerzo como consecuencia de esta corrosión se daña el concreto circundante.

Los cloruros penetran en el concreto por transporte de agua que los contiene, así como por difusión de los iones en el agua y por absorción, el ingreso prolongado y repetido con el tiempo puede dar por resultado una alta concentración de iones de cloruro en la superficie del acero de refuerzo.

2.4.3. Mecanismo de Ataque por Sulfatos

los iones sulfato reaccionan con el aluminato tricálcico (C₃A) del cemento en presencia de agua dando sulfoaluminato tricálcico, más comúnmente conocido por ettringita.

La ettringita presenta la particularidad que su volumen es un 250% superior al aluminato origen, dando lugar a una fuerte expansión (Ver Anexo 7).

Esto provoca una fisuración irregular que permite el acceso de los sulfatos y de ataques posteriores, pérdida de resistencia del concreto debido a la pérdida de cohesión en la pasta de cemento hidratado y de adhesión entre ésta y las partículas de agregado.

2.4.4. Mecanismo de Ataque por Ácido

los tipos de deterioro originados por la agresividad de los fluidos circulantes en las plantas de tratamiento de aguas y los originados por el ácido de origen biogénico (Ver Anexo 7).

Un ataque por ion amonio o CO_2 agresivo disuelto en los fluidos circulantes de las plantas de tratamiento de aguas residuales suele ocasionar un deterioro superficial del hormigón en los paramentos directamente expuestos al agua residual en las zonas permanentemente sumergidas, esta degradación se limita a espesores reducidos (del orden de 1 o varios milímetros) más allá de los cuales el hormigón aparenta mantener sus propiedades intactas (López Sánchez y Díaz-Pavón Cuaresma, 2020, p. 2).

Ácido Sulfúrico (H_2SO_4): es muy agresivo, ya que además de neutralizar la alcalinidad del hormigón, éste sufre el efecto añadido de las reacciones expansivas originadas por los sulfatos formados por las reacciones del (H_2SO_4). Estos sulfatos expansivos contribuyen como causa principal de la destrucción del hormigón.

2.4.5. Mecanismo del Ataque por Reacción Álcali- Árido

El deterioro del hormigón se inicia con pequeñas fisuras superficiales distribuidas de manera irregular seguidas por la desintegración completa. La expansión general se desarrolla en la dirección menos resistente, dando lugar a fisuras superficiales paralelas que progresan hacia el interior y fisuración paralela a las trayectorias de las tensiones de compresión en elementos comprimidos. Otras manifestaciones típicas son los hinchamientos locales y exudación a la superficie de gotas gelatinosas.

La Norma Boliviana NB 1225001-1 del Hormigón Estructural nos proporciona la tabla N°2 y tabla N°3 con valores mínimos de resistencia compresión en función de las condiciones de exposición.

Tabla N°2: Valor Mínimo de (f_c) a Especificar en el Proyecto Estructural en Función de las Condiciones de Exposición.

Medio ambiente en contacto con la estructura	$f_{c,min}$ (MPa)	
	Hormigón armado	Hormigón pretensado
<ul style="list-style-type: none"> • Interiores de edificios no sometidos a condensaciones • Exteriores de edificios, revestidos. Hormigón masivo interior • Ambientes rurales y climas desérticos, con precipitación media anual < 250 mm 	17,5	25
<ul style="list-style-type: none"> • Ambientes húmedos o muy húmedos ($H \geq 65\%$ o con condensaciones) y temperatura moderada a fría, sin congelación • Exteriores expuestos a lluvias con precipitación media anual ≥ 600 mm • Elementos enterrados en suelos húmedos o sumergidos 	20	25
<ul style="list-style-type: none"> • Climas tropical y subtropical (precipitación media anual = 1 000 mm y temperatura media mensual durante más de 6 meses al año ≥ 25 °C). • Ambiente marino, a más de 1 km de la línea de marea alta y contacto eventual con aire saturado de sales. • Ambientes con agresividad química moderada 	20	30
<ul style="list-style-type: none"> • Congelación y deshielo sin uso de sales descongelantes 	25	30
<ul style="list-style-type: none"> • Congelación y deshielo con uso de sales descongelantes 	30	30
<ul style="list-style-type: none"> • Superficies de hormigón expuestas al rociado o la fluctuación del nivel de agua con cloruros. Hormigón expuesto a aguas naturales contaminadas por desagües industriales. • Ambiente marino: a menos de 1 km de la línea de marea alta y contacto permanente o frecuente con aire saturado con sales sumergidos en agua de mar, por debajo del nivel mínimo de mareas. • Ambientes con agresividad química fuerte 	35	40
<ul style="list-style-type: none"> • Ambiente marino, en la zona de fluctuación de mareas o expuesto a salpicaduras del mar • Ambientes con agresividad química muy fuerte. 	40	45

Fuente: Norma Boliviana NB 1225001-1 del Hormigón Estructural.

Tabla N°3: *Requisitos para Hormigones Expuestos a Soluciones que Contienen Sulfatos.*

Exposición a sulfatos	Sulfato acuoso soluble (SO_4) en suelo, porcentaje en peso	Sulfato (SO_4) en el agua, (ppm)	Tipo de Cemento	Hormigón de peso normal, relación máxima a/c en peso*	Hormigón de peso normal y ligero, f_c mínimo, (MPa)
Insignificante	$0,00 \leq (SO_4) < 0,10$	$0 \leq (SO_4) < 150$	--	--	--
Moderada †	$0,10 \leq (SO_4) < 0,20$	$150 \leq (SO_4) < 1.500$	II, IP(MS), IS(MS), P(MS), I(PM) (MS), I(SM)(MS)	0,5	28
Severa	$0,20 \leq (SO_4) < 2,00$	$1.500 \leq (SO_4) < 10.000$	V	0,45	31
Muy severa	$(SO_4) > 2,00$	$(SO_4) > 10.000$	V más puzolana‡	0,45	31

*Cuando se consideran ambas tablas N°2 y N°3, se debe usar la menor relación máxima agua-material cementante aplicable y el mayor f_c mínimo.

† Agua de mar.

‡ Puzolana que se ha determinado por medio de ensayos o por experiencia que mejora la resistencia a sulfatos cuando se usa en hormigones que contienen cemento tipo V.

Fuente: Norma Boliviana NB 1225001-1 del Hormigón Estructural.

2.4.6. Factores que Influyen en el Comportamiento Durable y Mecánico del Hormigón

2.4.6.1. Relación agua/cemento (a/c)

La relación agua/cemento constituye un parámetro importante en la composición del hormigón, la relación agua/cemento tiene una influencia en la resistencia, durabilidad y la retracción del hormigón.

En todos los casos, cuanto más baja es la relación agua/cemento, más favorables son las propiedades del hormigón endurecido.

La resistencia química del hormigón está relacionada con su porosidad, un material con menos porosidad es más compacto y dificulta el ingreso de gases o líquidos agresivos.

En consecuencia, la relación agua/cemento también tiene una influencia determinante en este aspecto de la resistencia y la durabilidad están íntimamente correlacionadas.

2.4.6.2. Curado del Hormigón

El curado posiblemente es lo más importante si queremos que un hormigón durable esto por la influencia decisiva que tiene en la resistencia.

Durante el proceso de fraguado y primeros días de endurecimiento se producen pérdidas de agua por evaporación, creándose una serie de huecos o capilares en el hormigón que disminuyen su resistencia. Para compensar estas pérdidas y permitir que se desarrollen nuevos procesos de hidratación con aumento de resistencias, el hormigón debe curarse con abundancia de agua, la falta de curado es especialmente grave para la durabilidad de la estructura.

2.4.6.3. Influencia de los Áridos

Según Kumar Mehta y Monteiro, (1985, p. 88), la adición de un agregado a una pasta de cemento o a un mortero incrementa la permeabilidad considerablemente y establece que a mayor tamaño del agregado mayor será el coeficiente de permeabilidad.

Reacción álcalis-agregado se presenta cuando los agregados que tienen sílice reactiva.

Si el agregado contiene sílice y reacciona con los hidróxidos alcalinos derivados de los álcalis del cemento, formará geles expansivos en presencia de agua, que generan esfuerzos de internos capaces de romper el concreto (Matallana Rodríguez, s. f., p. 79).

2.4.6.4. El Agua como Agente de Deterioro

En los sólidos porosos (hormigón) el agua puede se transporta internamente generando cambios volumétricos en la estructura generando rupturas, el agua también puede transportar agentes extérnenos que pueden provocar reacciones químicas deteriorando al hormigón.

2.5. Agua Residual Doméstica

Según Ministerio del Agua Viceministerio de Servicios Básicos, (2007, p. 27), las aguas residuales domésticas son desechos líquidos provenientes de los hábitos higiénicos del hombre en actividades domésticas.

Esta agua son las que provienen de desechos humanos y limpieza general de una vivienda como ser baños, cocinas, lavanderías, etc.

Naturaleza cambiante de las aguas residuales es muy complejo los compuestos orgánicos que se ha conseguido sintetizar desde principios de siglo pasa hoy en día del medio millón, y aparecen unos 10.000 compuestos nuevos cada año (García Brage, 1995, p. 5).

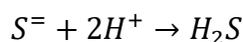
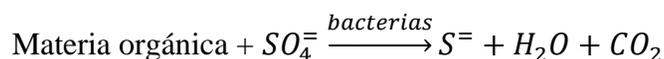
2.5.1. Características Químicas del Agua Residual

2.5.1.1. Acidez

La acidez se origina por la disolución de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico en la oxidación biológica de la materia orgánica o en la descarga de aguas residuales industriales.

2.5.1.2. Ácido Sulfhídrico (H_2S)

El ácido sulfhídrico (H_2S) es un producto de la descomposición anaerobia de las aguas residuales:



Según Romero Rojas, (2010, p. 29), al exponer el agua residual a la atmósfera se desprende ácido sulfhídrico (H_2S) y se detecta un claro mal olor ofensivo a huevo podrido, cuando este gas se disuelve con la humedad condensada sobre las paredes un alcantarillado se oxida biológicamente en ácido sulfúrico.

El color negro de muchas aguas residuales es comúnmente causado por la combinación de ácido sulfhídrico con hierro, formándose sulfuro ferroso (FeS).

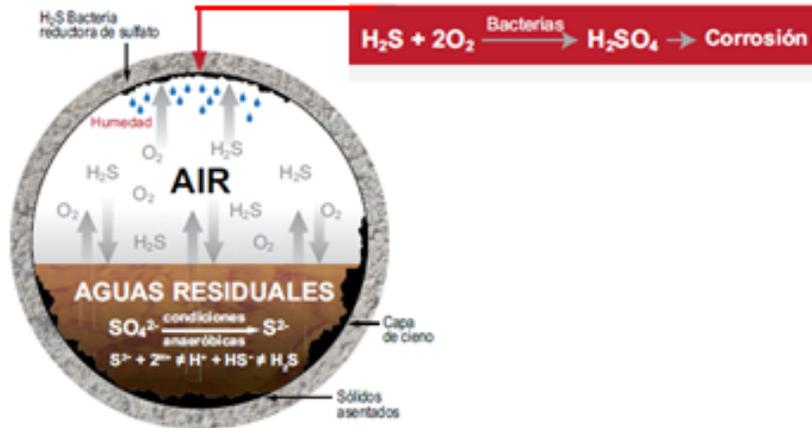


Figura N°5: Proceso Químico de la Formación de Ácido Sulfhídrico.
Fuente: XYPEX.

2.5.1.3. Alcalinidad

Las aguas residuales domésticas son generalmente alcalinas, la alcalinidad puede generarse por hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, magnesio, sodio, potasio o de amonio siendo la causa más común los bicarbonatos de calcio y magnesio (Romero Rojas, 2010, p. 29).

2.5.1.4. Algas

Las algas proveen el oxígeno requerido para la actividad biológica aeróbica, estas usan los nutrientes y el dióxido de carbono contenidas en agua residual.

El uso que hacen las algas del dióxido de carbono (CO_2) en la fotosíntesis puede conducir a lagunas con pH alto especialmente en aguas de baja alcalinidad, en otros casos las algas usan el ion bicarbonato como fuente del carbono requerido para su crecimiento celular y se presentan variaciones altas de pH durante el día.

Si el agua residual contiene suficiente calcio, este se precipitará como carbonato al excederse el producto de solubilidad, la remoción del carbonato por precipitación impide que el pH continúe aumentando (Romero Rojas, 2010, p. 31).

2.5.1.5. Detergentes

Los detergentes son compuestos constituidos por moléculas orgánicas grandes, polares, solubles en agua y aceite que tienen la propiedad de disminuir la tensión superficial de los líquidos en los que se hallan disueltos. Generalmente se fabrican mediante la mezcla del

detergente o agente tensoactivo con sales sódicas como sulfatos, fosfatos, carbonatos, silicatos o boratos (Romero Rojas, 2010, p. 57).

2.5.1.6. Dióxido de Carbono (CO_2)

Es un gas que generalmente proviene de la atmosfera y de la descomposición microbiana de sustancias orgánicas disuelto en el agua reacciona para formar ácido carbónico, cuando el pH del agua es mayor de 4,5 el ácido carbónico se ioniza para formar bicarbonato, el cual a su vez se transforma en carbonato cuando el pH es mayor a 8,3. (Romero Rojas, 2010, p. 57)

Una concentración de dióxido de carbono (CO_2) de 30 a 60 ppm da por resultado un ataque severo y superior de 60 ppm da por resultado un ataque muy severo.

2.5.1.7. pH

Según Romero Rojas, (2010, p. 66), el pH es la medida de concentración de ion hidrógeno en el agua. En aguas con un pH menor a seis en tratamiento biológico favorecen el crecimiento de hongos sobre las bacterias.

Los líquidos con un pH entre el rango de 6,5 a 5,5 pueden atacar al concreto, un ataque severo ocurre cuando se produce un valor de pH esta entre el rango de 5,5 a 4,5 por debajo de 4,5 el ataque es muy severo (Neville, 2013, p. 353).

2.5.1.8. Sulfato

La combinación de sulfatos con hidróxido de calcio (cal hidratada) origina sulfato de calcio (yeso) y la combinación del sulfato de calcio con el aluminato hidratado de calcio forma sulfoaluminato de calcio (ettringita), estas reacciones dan como resultado un aumento de volumen de sólido por ende provoca esfuerzos internos que provocan ruptura interna del concreto (Sánchez de Guzmán, 2001, p. 156).

El sulfato es muy común en aguas residuales en condiciones anaerobias y origina problemas de olor y corrosión en alcantarillas (Romero Rojas, 2010, p. 69).

2.5.1.9. Cloruros

Los cloruros que se encuentran en el agua natural proceden de la disolución de suelos y rocas que los contengan y que están en contacto con el agua, las heces humanas suponen unos 6 gramos de cloruros por persona al día.

2.5.2. Características Biológicas del Agua Residual

Bacterias son microorganismos que realizan los procesos de descomposición y estabilización de la materia orgánica.

La calidad del hormigón puede verse alterada en gran medida cuando se expone al agua residual, este proceso es complicado porque intervienen varios elementos como ser los microorganismos, el ácido sulfúrico, el sulfuro de hidrógeno o una combinación de estos factores, que puede tener un efecto devastador en el rendimiento y la vida útil del hormigón.

Según Abdulwahid Sarray, (2013, p. 25), los problemas microbiológicos tienen el mayor efecto sobre el deterioro del hormigón, especialmente en las plantas de tratamiento de aguas residuales, las bacterias crean un ciclo de azufre, que puede conducir a la formación de ácido sulfúrico.

2.6. Tratamiento de Aguas Residuales

El tratamiento de las aguas residuales, es un proceso de separación y estabilización de materia orgánica y desinfección, haciendo que los sólidos orgánicos complejos putrescibles queden convertidos en sólidos minerales o en sólidos orgánicos estables (Ministerio de Servicios y Obras Públicas de la República de Bolivia, 2005, p. 59).

Los métodos más usados para el tratamiento de aguas residuales pueden ser tratamiento preliminar, tratamiento primario, tratamiento secundario, cloración o desinfección, tratamiento de lodos.

En la PTAR San Luis para el tratamiento del agua residual emplea Lagunas de Estabilización.

2.6.1. Lagunas de Estabilización

Una laguna de estabilización es básicamente método de tratamiento extensivo del agua residual, que consiste en el almacenamiento del agua por medio de la actividad bacteriana con acciones simbióticas de las algas y otros organismos (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2015, p. 1).

Existe dos tipos de laguna de estabilización anaerobias y facultativas.

2.6.1.1. Laguna de Estabilización Anaerobia

La depuración se realiza en ausencia de oxígeno libre (condiciones aerobia) y/o combinado (anaerobia), el propósito de las lagunas anaerobias es el desbaste de la materia orgánica, por lo que pueden recibir altas concentraciones de cargas orgánicas.

Los estanques anaerobios generan malos olores debido a la producción de sulfuro de hidrógeno, las profundidades que estas tienen son de 3,0 a 5,0 metros aproximadamente (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2015, pp. 11-12).

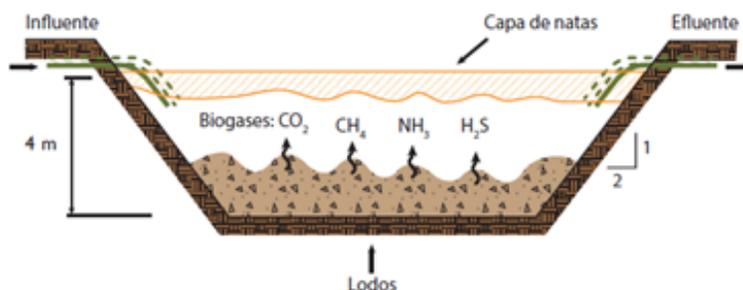


Figura N°6: Proceso Químico en Lagunas Anaerobias.

Fuente: Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2015

2.6.1.2. Laguna de Estabilización Facultativa

La estabilización de la materia orgánica se lleva a cabo tanto en condiciones aerobias como anaerobias, las primeras se mantienen en el estrato superior de la laguna, mientras que en el inferior, se realiza la degradación anaerobia en ausencia de oxígeno.

El tratamiento del agua residual en lagunas facultativas considera tres zonas:

- Se establecen condiciones aerobias en la parte superior es decir existe oxígeno disuelto.
- Una parte facultativa intermedia en donde las bacterias aerobias, anaerobias y facultativas (las bacterias facultativas pueden vivir tanto en condiciones anaerobias como aerobias) llevan a cabo la descomposición de la materia orgánica (DBO).
- Una zona anaerobia en la parte inferior de la laguna, donde los sólidos que sedimentan se descomponen de manera fermentativa.

Las lagunas facultativas por lo general tienen una profundidad entre 1,5 a 2,5 metros.

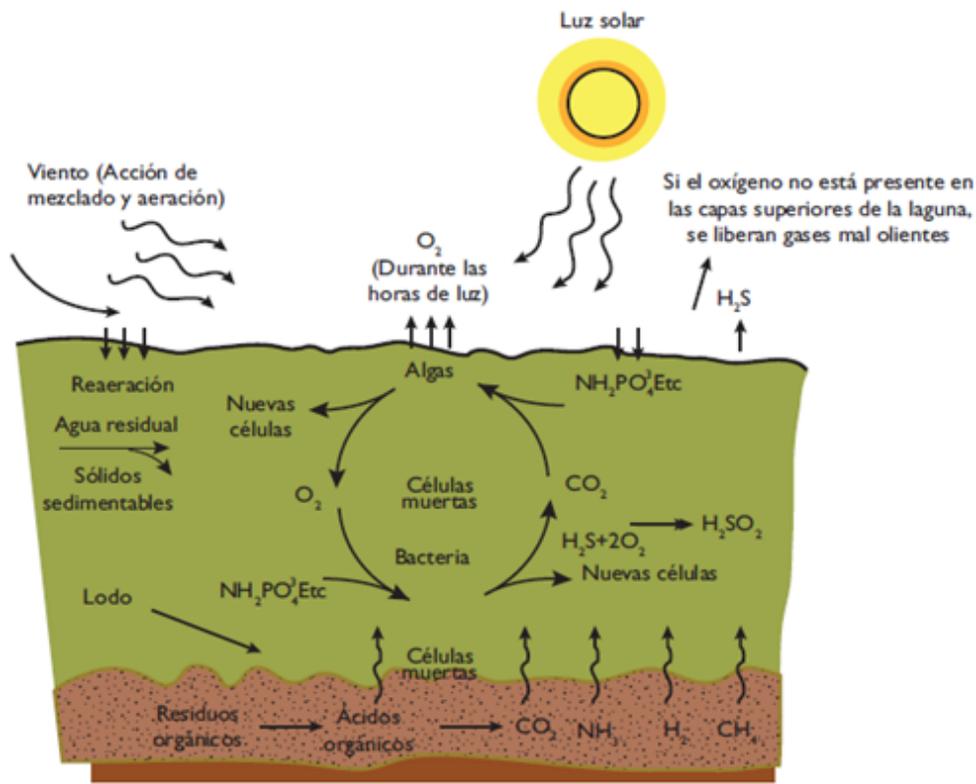


Figura N°7: Proceso Químico en Lagunas Facultativa.

Fuente: Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2015

2.7. Aditivos

Según Instituto Boliviano de normalización y calidad (IBNORCA), (2000, p. 1) NB 1000 los aditivos son aquellas sustancias o productos que incorporados al hormigón, mortero o pasta, antes o durante el amasado y/o durante un amasado suplementario, en una proporción no mayor del 5% con relación al contenido del cemento, producen modificación deseada en sus propiedades habituales del concreto.

Los aditivos utilizados en esta investigación son los siguientes:

- Según Sika Bolivia S.A., (2019, p. 1), el aditivo Sika Viscocrete 5-800 es un aditivo superplastificante para hormigón y mortero sus usos son:

Reducción de agua en hormigones que requieren altísimas resistencias mecánicas.

Colocación de hormigón en sitios con gran cuantía de acero o poco accesibles.

Hormigonado de elementos esbeltos y formas complicadas.

Su dosificación recomendada por Sika es de 0,5 a 2 por ciento referente al peso del cemento.

- Según Sika Bolivia S.A., (2014, p. 1) el Aditivo Plastiment RMC (T), es un aditivo líquido químico plastificante reductor de agua y sus usos son:

Como plastificante: Para una mezcla con relación agua/cemento dado manteniéndola constante se incrementará notablemente el asentamiento con la adición únicamente del aditivo, reduciendo hasta 12 por ciento de agua manteniendo el mismo asentamiento de la mezcla original.

Como economizador de cemento: Puesto que la pasta (cemento+agua) del hormigón tiene como parte de sus funciones la de dar manejabilidad a la mezcla, podemos reducir su cuantía y el aditivo adicionado realizará esta función. (permite una reducción de 10–12 por ciento del cemento, por metro cúbico de hormigón sin sacrificar resistencias).

Su dosificación varía entre 0,3 a 0,5 por ciento del peso de cemento.

- Según (Sika S.A. Chile, 2018, p. 1), el aditivo Sika WT-200 P es un aditivo impermeabilizante que actúa por cristalización para reducir la permeabilidad del hormigón y promover la capacidad de autosellado de microfisuras del hormigón.

El aditivo Sika WT-200P reduce la penetración de agua bajo presión, reduce la absorción de agua, realiza las propiedades de autosellado del hormigón, mejora la resistencia al ataque químico, reduce la transmisión de vapor, para su dosificación se empleará el uno por ciento del peso del cemento.

- Aditivo Sikaguard 63 CL es un sistema epóxico de dos componentes de viscosidad mediana libre de solventes para revestimientos que requiera protección química, su dosificación es una proporción de 4,71 del componente A y uno del componente B en función del peso, tiene rendimiento de 1,3 a 1,5 kg/m^2 , se debe aplicar en dos capas del aditivo (Sika Bolivia S.A., 2020, p. 1).

- Aditivo Sikatop Seal 107 es un producto pre dosificado, de dos componentes de excelente impermeabilidad, adherencia y resistencias mecánicas, elaborado a base de cemento, áridos de Granulometría seleccionada, aditivos especiales y una emulsión de resinas sintéticas.

El aditivo Sikatop 107 Seal es un excelente impermeabilizante que se aplica sobre el hormigón, su dosificación es una proporción del componente A y tres del componente B en función al peso, tiene un rendimiento de 4 kg/m^2 , se debe aplicar dos a tres capas como mínimo (Sika Bolivia S.A., 2014b, p. 1).

- Aditivo Sikaguard Antiácido es un revestimiento epóxico de dos componentes de alta resistencia química, para proteger pisos de hormigón y estructuras de acero.

Sirve para aplicaciones con rodillo sobre acero y en elementos verticales de hormigón.

El aditivo Sikaguard Antiácido es resistente a la abrasión, con una alta protección contra la corrosión, desgaste y ataque químico, su dosificación es una proporción del 77 % del componente A y 23 % del componente B en función a su peso y su rendimiento es de $1,27 \text{ kg/m}^2$ (Sika S.A. Chile, 2019, p. 1).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Introducción

Según Hoogendam, (1999, p. 17), es el conjunto de actividades que se deben realizar para alcanzar los objetivos específicos, objetivo general, en otras palabras son todas las actividades con las cuales se efectuaran todos los objetivos planteados en dicho estudio.

3.2. Tipo de Investigación

La presente investigación es cuantitativa de tipo experimental exploratorio porque se analizó la influencia de las aguas residuales domésticas en la resistencia a compresión del hormigón con y sin aditivos impermeabilizantes.

3.3. Técnica de Recolección de Datos

3.3.1. Técnica

La técnica que se utilizó en la presente investigación es la de observación científica porque se observó las diferentes fuerzas máximas que soporta cada probeta de hormigón en el ensayo a compresión.

3.3.2. Instrumento

El instrumento empleado en esta investigación es la guía de observación es porque se analizó la variación en la resistencia a compresión del hormigón en tiempos y grupos definidos.

3.4. Variables Dependientes

3.4.1. Resistencia a la Compresión (f'_c)

La resistencia a compresión es de naturaleza cuantitativa porque se puede medir expresados en valores numéricos en unidades de (MPa), es una variable continua porque está entre dos valores dentro el intervalo que está entre mayor a cero a más infinito, por su forma de medición es indirecta, porque su variación está en función del tiempo que estuviese sumergido el hormigón en agua residual doméstica y del tipo de aditivo impermeabilizante que contenga la probeta de hormigón.

Se realizó los ensayos a compresión de las probetas de hormigón a las edades de 7 y 28 días para comprobar que cumpla con la resistencia especificada, también se realizó el ensayo a compresión en las probetas que estaban sumergidas en agua residual por 30, 60, 90, 120, 180 días.

Para el ensayo a compresión se tomó al azar muestras del hormigón como indica la Norma Boliviana NB 639 Hormigones – Rotura por Compresión y la Norma Boliviana NB 1225001-1 del Hormigón Estructural.

3.5. Variable Independiente

3.5.1. Tiempo Sumergido en Agua Residual Doméstica

Es una variable cuantitativa debido a que se expresó en valores numéricos con unidades de tiempo (días) que el estuvieron sumergidas en agua residual doméstica las probetas de hormigón.

Es una variable continua porque está entre dos valores dentro de un intervalo entre cero a más infinito.

3.6. Variables Intervinientes

3.6.1. Aditivos Impermeabilizantes (Sika WT-200 P, Sikaguard 63 CL, Sikatop 107 Seal, Sikaguard Antiácido)

Los aditivos son de naturaleza cuantitativa porque se puede contar y medir expresados en valores numéricos, es una variable continua porque está entre dos valores dentro del intervalo de cero a más infinito, por su escala de razón es constante porque tiene las propiedades de las escalas de intervalos más un cero absoluto, por su forma de medición es directa porque su inclusión influirá en la permeabilidad del hormigón disminuyendo los daños causados por el agua residual.

3.7. Diseño de Investigación

La presente investigación es de tipo experimental puro porque se tenía dos grupos de muestras el primer grupo hormigón que se sumergió en agua residual doméstica y el segundo grupo de muestras de hormigón que serán de control para comparar los cambios en la resistencia a compresión del hormigón a los 30, 60, 90, 120, 180 días de estar sumergidas en aguas residuales domésticas.

3.8. Población

Según Levin y Rubin, (2010, p. 9), la población son todos los elementos que estamos estudiando acerca de los cuales intentamos sacar conclusiones.

La población es finita debido a que se contó con un total de 205 probetas cilíndricas de 100 mm x 200 mm y 10 probetas cilíndricas de 150 mm x 300 mm elaboradas en el laboratorio de SOBOCE READY MIX.

La población de estudio se conformó por cinco grupos, cuatro grupos con aditivos impermeabilizantes y un grupo con el hormigón sin aditivo, de cada grupo se empleó dos probetas al azar para realizar el ensayo resistencia a compresión a los siete días.

Se empleó nueve probetas al azar por cada grupo para realizar el ensayo de resistencia a los 28 días para calcular la resistencia que ha alcanzado el hormigón.

Para el análisis de la influencia del agua residual doméstica sobre la resistencia a compresión del hormigón cada grupo se sub dividió en cinco sub grupos, cada sub grupo contaba con diferentes tiempos de estudio que son 30, 60, 90, 120, 180 días que el hormigón ha estado sumergido en agua residual.

Por cada tiempo de estudio se utilizó seis probetas por grupo, tres probetas para sumergir en agua residual doméstica y tres probetas patrón para comparar la variación.



Figura N°8: Probetas de Hormigón con sus Respective Aditivo Impermeabilizantes.
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°4: Población de Probetas Realizadas para la Investigación.

 <div style="text-align: center;"> UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAE SARACHO" FACULTADA DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA INGENIERIA CIVIL </div> 						
TRABAJO EXPERIMENTAL						
TEMA:	Análisis de la Influencia del Aguas Residuales Domésticas en la Resistencia a Compresión del Hormigón con Aditivos Impermeabilizantes					
Probetas 100x200 mm para Rotura a los 7 días						
Grupo	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Total
N° probetas	2	2	2	2	2	10
Probetas 100x200 mm para Determinación de Resistencia Requerida a los 28 días (f'_{cr})						
Grupo	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Total
N° probetas	9	9	9	9	9	45
Probetas 100x200 mm Empleadas el Análisis de Resistencia a Compresión						
Grupo	Probetas Patrón					
	Días de Sumerción en Aguas Residuales Domésticas					
	30	60	90	120	180	Total
Grupo 1	3	3	3	3	3	15
Grupo 2	3	3	3	3	3	15
Grupo 3	3	3	3	3	3	15
Grupo 4	3	3	3	3	3	15
Grupo 5	3	3	3	3	3	15
Total					75	
Grupo	Probetas 100x200 mm Sumergidas en Agua Residual					
	Días de Sumerción en Aguas Residuales Domésticas					
	30	60	90	120	180	Total
Grupo 1	3	3	3	3	3	15
Grupo 2	3	3	3	3	3	15
Grupo 3	3	3	3	3	3	15
Grupo 4	3	3	3	3	3	15
Grupo 5	3	3	3	3	3	15
Total					75	
Probetas 150x300 mm a Emplear en Análisis de Permeabilidad						
Tipo de mezcla	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Total
N° probetas	3	3	3	3	3	15
Población de Probetas 100x200mm Total				205		
Población de Probetas 150x300mm Total				15		

Fuente: Elaboración Propia.

3.9. Muestra y Muestreo

El tipo de muestreo fue probabilístico estratificado porque las muestras se agruparon por grupos en función de los diferentes aditivos y a su vez en distintos tiempos de sumersión en agua residual doméstica.

3.10. Procedimientos de Recolección de Datos

Ensayos de caracterización de los agregados gruesos, finos, elaboración de probetas de hormigón, ensayo a compresión de probetas que fueron en sumergidas en agua residual doméstica por 30, 60, 90, 120,180 días.

3.10.1. Ensayos de caracterización de los Agregados

Para esta investigación se emplearon agregados de la planta de SOBOCE estos agregados se sometieron a los ensayos de análisis granulométrico, absorción, porcentaje de humedad, tamaño máximo nominal, tamaño máximo, módulo de finura, peso específico y peso unitario como establece la Norma Boliviana NB 1225001-1 del Hormigón Estructural.

3.10.2. Elaboración de Probetas de Concreto

En la elaboración de las probetas de hormigón se empleó moldes cilíndricos estañar de 100 mm x 200 mm y 150 mm x 300 mm cumpliendo los requerimientos de la Norma Boliviana NB 1225001-1 del Hormigón Estructural.

Para el diseño de la mezcla de hormigón previo se requiere un análisis de la cantidad de sulfatos contiene el agua residual doméstica, en una investigación que lleva el nombre de (Caracterización Físico-Química y Biológica Continua Durante 24 Horas De Las Aguas Residuales Que Ingresan a La PTAR De San Luis) realizada en el 2021 por CIAGUA el cual indica que los valor de sulfatos del agua residual que llega a la PTAR de San Luis fluctúa entre los 27 a 41,75 mg/l (véase Anexo 8), según la Tabla N°3 la exposición a sulfatos es Insignificante según, por lo que no existe ningún tipo de restricción para al momento de elegir el tipo de cemento, por lo cual se ha utilizado un cemento Portland Tipo IP 30 de marca El Puente.

Para la selección de relación agua/cemento se adoptó un valor de 0,45 para hormigones que se exponen a aguas residuales y gases corrosivos, por recomendaciones de la norma ACI

350-06 (Code Requirements For Environmental Engineering Concrete Structures And Commentary).

Como resistencia de diseño se adoptó el valor de 35 MPa que es la resistencia que se usó para la construcción de la Planta de Tratamiento de San Blas Tarija, que está diseñada para soportar las cargas del caudal líquido y sólido del agua residual de una parte de la ciudad de Tarija, este valor cumple con los requerimientos mínimos indicados en la Tabla N°2.

El agua utilizada en la elaboración del hormigón en masa fue agua potable, para la conservación y cuidados de las probetas de hormigón se siguió las recomendaciones de la Norma Boliviana NB 586 Hormigones - Fabricación y Conservación de Probetas.

Con la información obtenida de los agregados gruesos y finos se elaboró el cálculo dosificación de la mezcla para las probetas aplicando el método de diseño que establece la Norma del Institute American Concrete Standard Practice for Selecting Proportions for Normal Heavyweight and Mass Concrete por sus siglas en inglés (ACI 211).

Los aditivos que se emplearon son de la marca Sika, que se aplicarán en distintos porcentajes según sus especificaciones técnicas de cada producto. Los aditivos Sika Viscocrete 5-800, Plastiment RMC(T) se empleó en todas las mezclas, el aditivo Sika WT-200 P solo en las probetas del grupo 3, el aditivo Sikaguard Antiácido, se colocó después de 33 días (28 días de fraguado más 5 días que se dejó secar el hormigón) en la superficie del hormigón del grupo 1, el aditivo Sikatop 107 Seal se colocó después de 33 días (28 días de fraguado más 5 días que se dejó secar el hormigón) en la superficie del hormigón del grupo 2, el aditivo Sikaguard 63 CL se colocó después de 33 días (28 días de fraguado más 5 días que se dejó secar el hormigón) en la superficie del hormigón del grupo 4.

Una vez realizada la mezcla se procedió al vaciado del hormigón en los moldes de 100 mm x 200 mm estandarizadas, en cada molde se colocó dos capas de hormigón y para los moldes de 150 mm x 300 mm se colocó tres capas de hormigón, cada capa se varilló 25 veces con la varilla compactadora lisa con punta redondeada de 16 mm de espesor de longitud de 50 cm y con el combo de goma se dio 15 golpes por capa alrededor del molde, se dejó las probetas en un lugar fresco protegido del sol por 24 horas, por último pasado el tiempo se procedió a

desmoldar las probetas y se lo transporto a la piscina de curado por 28 días como indica la Norma Boliviana NB 586 Hormigones - Fabricación y Conservación de Probetas.

3.10.3. Sumergencia de Probetas en Agua Residual Doméstica

Para la sumersión de las probetas de hormigón se usaron jaulas de acero corrugado para sumergir las probetas dentro del agua residual doméstica, pasado el tiempo se extrajeron tres probetas por grupo que estaban sumergidas en agua residual doméstica cada 30, 60, 90, 120,180 días, una vez extraído las muestras se procedió a lavarlas con abundante agua potable para su posterior traslado al laboratorio de SOBOCE para realizar el ensayo a compresión.

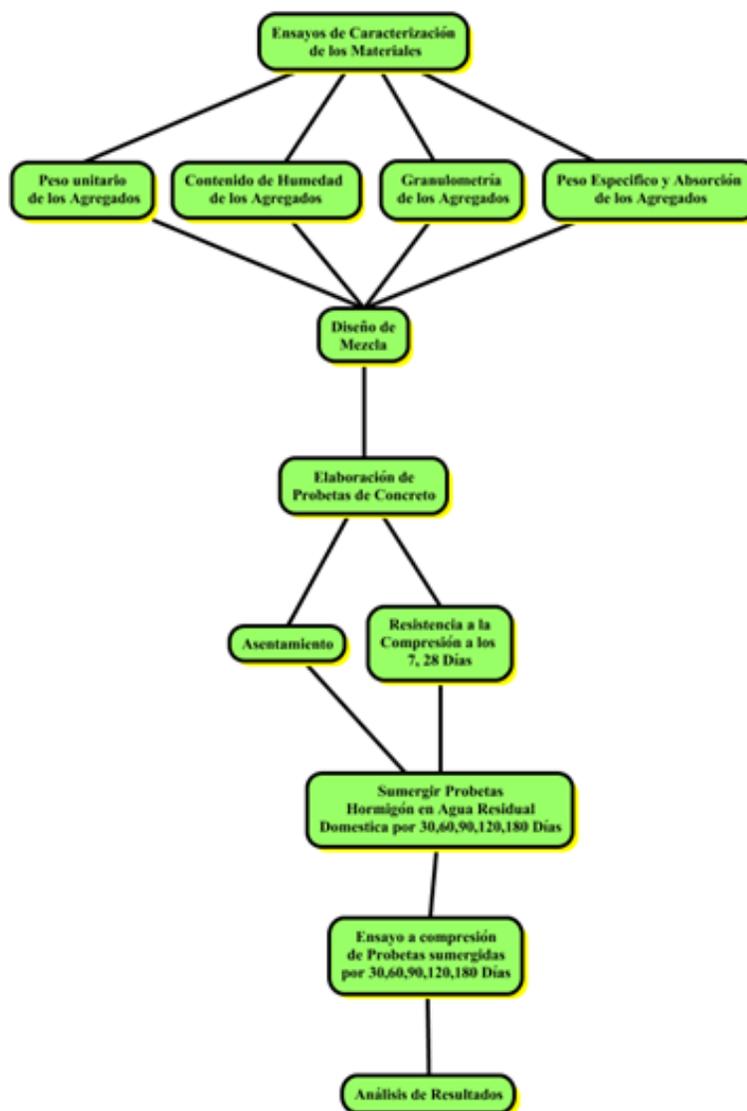


Figura N°9: Mapa Conceptual del Proceso de Obtención de Datos para la Investigación.

Fuente: Elaboración Propia.

3.10.3.1.Descripción de los Procedimientos

3.10.3.1.1. Granulometría de los Agregados

La Granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas que constituyen una masa de agregados (Sánchez de Guzmán, 2001, p. 72).

3.10.3.1.2. Módulo de Finura del Agregado Fino

El módulo de finura es un factor que se obtiene por la suma de los porcentajes retenidos acumulados en una serie de tamices y es un indicador del grosor predominante de las partículas de un agregado para estimar que tan fino o grueso es un material.

$$MF = \frac{\Sigma\% \text{ retenido } \frac{3/8" + N4 + N8 + N16 + N30 + N50 + N100}{100}}{100} \quad \text{Ec.(1)}$$

3.10.3.1.3. Curva Granulométrica

La curva granulométrica es la representación gráfica de curvas de distribución granulométrica en escala semilogarítmico que proporciona una visión objetiva de la distribución de tamaños del agregado, esta gráfica contiene unos límites permisibles de para los agregados gruesos.

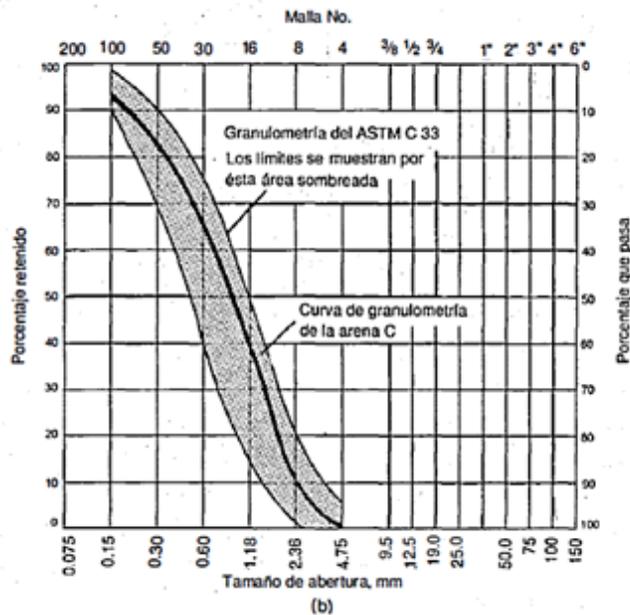


Figura N°10: Curva Granulométrica con los Límites de Granulometría
Fuente: Kumar Mehta y Monteiro, 1985, p. 180.

3.10.3.1.4. *Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso*

El peso específico es usado para el cálculo de volumen ocupado por el agregado en mezclas de hormigón. el ensayo se lo realizó como indica la Norma American Society for Testing and Materials (ASTM C-127).

3.10.3.1.5. *Peso Específico Seco del Agregado Grueso*

$$Pe = \frac{A}{B - C} \quad \text{Ec.(2)}$$

Donde:

Pe = Peso específico del agregado grueso (g/cm^3).

A=Peso de muestra seco (g).

B=Peso de muestra saturado superficialmente seco (g).

C= Peso de muestra saturada dentro del agua (g).

3.10.3.1.6. *El Peso Específico Saturado Superficialmente Seco del Agregado Grueso*

$$Pesss = \frac{B}{B - C} \quad \text{Ec.(3)}$$

Donde:

Pesss= Peso específico saturado superficialmente seca del agregado grueso (g/cm^3).

B= Peso de muestra saturado superficialmente seco (g).

C= Peso de muestra saturada dentro del agua (g).

3.10.3.1.7. *Peso Específico Aparente del Agregado Grueso*

$$Pea = \frac{A}{A - C} \quad \text{Ec.(4)}$$

Donde:

Pea= Peso específico aparente del agregado grueso (g/cm^3).

A= Peso de muestra seco (g).

C= Peso de muestra saturada dentro del agua (g).

3.10.3.1.8. *Absorción del Agregado Grueso*

$$Abs = \frac{B - A}{A} * 100 \quad \text{Ec.(5)}$$

Donde:

Abs=Absorción del agregado grueso en porcentaje.

A= Peso de muestra seco (g).

B= Peso de muestra saturado superficialmente seco (g).

3.10.3.1.9. *Peso Específico y Absorción del Agregado fino.*

El peso específico es usado para el cálculo de volumen ocupado por el agregado en mezcla de hormigón, el ensayo se lo realizó como indica la Norma American Society for Testing and Materials (ASTM C-128).

$$Pef = \frac{A}{B + S - C} \quad \text{Ec.(6)}$$

Donde:

Pef =Peso específico seco del agregado fino ($\frac{g}{cm^3}$).

A=Peso muestra seca (g).

B= Peso de picnómetro + agua (g).

S= Peso de muestra saturado superficialmente seca (g).

C= Peso de picnómetro + Agua + Muestra saturado superficialmente seca (g).

3.10.3.1.10. *Peso Específico Saturado Superficialmente Seca del Agregado Fino.*

$$Pesssf = \frac{S}{B + S - C} \quad \text{Ec.(7)}$$

Donde:

Pesssf =Peso específico de masa saturada superficialmente seca del agregado fino ($\frac{g}{cm^3}$).

B= Peso de picnómetro + Agua (g).

S= Peso de muestra saturado superficialmente seca (g).

C= Peso de picnómetro + Agua + Muestra saturado superficialmente seca (g).

3.10.3.1.11. *Peso Específico Aparente del Agregado Fino*

Donde:

$$Peaf = \frac{A}{S + B - C - (S - A)}$$

Ec.(8)

Peaf=Peso específico aparente del agregado fino (g/cm^3).

A=Peso muestra seco (g).

B= Peso de picnómetro + Agua (g).

S= Peso de muestra saturado superficialmente seca (g).

C= Peso de picnómetro + Agua + Muestra saturado superficialmente seca (g).

3.10.3.1.12. *Absorción de humedad*

Donde:

$$Abs = \frac{S - A}{A} * 100$$

Ec.(9)

Abs= Absorción de humedad en porcentaje.

A=Peso muestra seco (g).

S= Peso de muestra saturado superficialmente seca (g).

3.10.3.1.13. *Contenido de Humedad de los Agregados*

El contenido de humedad de la muestra se medirá mediante ensayo de secado en horno con el cual se medirá el peso de la muestra en estado natural y el peso de la muestra en seco por 24 h una vez obtenidos los datos se empleará la fórmula.

$$w = \frac{Ww - Ws}{Ws} * 100$$

Ec.(10)

Donde:

w=porcentaje de humedad de la muestra en porcentaje.

Ww=peso de la muestra en estado natural (g).

Ws=peso de la muestra seco (g).

3.10.3.1.14. *Peso Unitario Compactado y Suelto de los Agregados Fino y Grueso*

Peso unitario de los agregados como la masa de un volumen unitario de agregado, en la cual el volumen incluye el volumen de las partículas individuales y el volumen de vacíos entre las partículas, este método de ensayo es aplicable a los agregados que no excedan los 125 mm como tamaño nominal máximo.

$$\text{Peso unitario} = \frac{\text{peso total} - \text{peso del recipiente}}{\text{volumen de recipiente}} \quad \text{Ec.(11)}$$

3.10.3.1.15. *Diseño de Mezcla*

Los pasos a seguir que nos recomienda la Norma del Institute American Concrete ACI 211.1 para el diseño de mezclas mediante los datos obtenidos anteriormente son los siguientes:

1. Selección de resistencia a compresión promedio considerando la resistencia a compresión deseada.
2. Selección del asentamiento.
3. Selección del tamaño máximo del agregado.
4. Selección de contenido de agua y aire en la mezcla.
5. Selección de la relación a/c.
6. Estimación del contenido de cemento.
7. Estimación del contenido de agregado grueso.
8. Estimación del contenido de agregado fino.
9. Cálculo del volumen del agregado grueso.
10. Cálculo del volumen del agregado fino.
11. Corrección por humedad y absorción de los agregados.

3.10.3.1.16. Asentamiento

El asentamiento del hormigón fresco se lo determinó mediante el ensayo del cono de Abrams como indica la Norma Boliviana NB 589 Hormigón fresco - Determinación de la consistencia por el método del cono de Abrahams.

3.10.3.1.17. Resistencia a la Compresión (f'_c)

El método consiste en aplicar una carga de compresión axial en las probetas de hormigón hasta el fallo o rotura de la probeta, para el cálculo se divide la fuerza máxima con la que falla el hormigón sobre el área axial de la probeta obteniendo la resistencia a compresión f'_c de cada probeta de hormigón el ensayo se lo realiza siguiendo las recomendaciones de la Norma Boliviana NB 639 Hormigones – Rotura por Compresión.

3.10.3.1.18. Ensayo De Penetración De Agua Bajo Presión

Este método se emplea para determinar la profundidad de penetración de agua bajo presión en hormigones endurecidos que han sido curados en agua. El agua es aplicada bajo presión a la superficie del hormigón endurecido, se divide la probeta por rotura en dos mitades y se mide la profundidad de penetración del agua como establece la Norma UNE-EN 12390-8.

CAPÍTULO IV: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Granulometría de los Agregados Gruesos y Finos

4.1.1. Análisis Granulométrico del Agregado Fino

Se realizó el siguiente procedimiento:

- Se secó la muestra en el horno por 24 h antes de realizar el ensayo.
- Se tomó una muestra de 1000 g para realizar el ensayo.
- Se hizo uso de los tamices de los siguientes tamaños: 3/8", N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100 y fondo, encajándolos en orden decreciente.
- Se procedió el tamizado separando la muestra en fracciones y cuidando desperdiciar material.
- Se pesó la masa retenida en cada tamiz.



Figura N°11: Ilustración de Juego de Tamices.

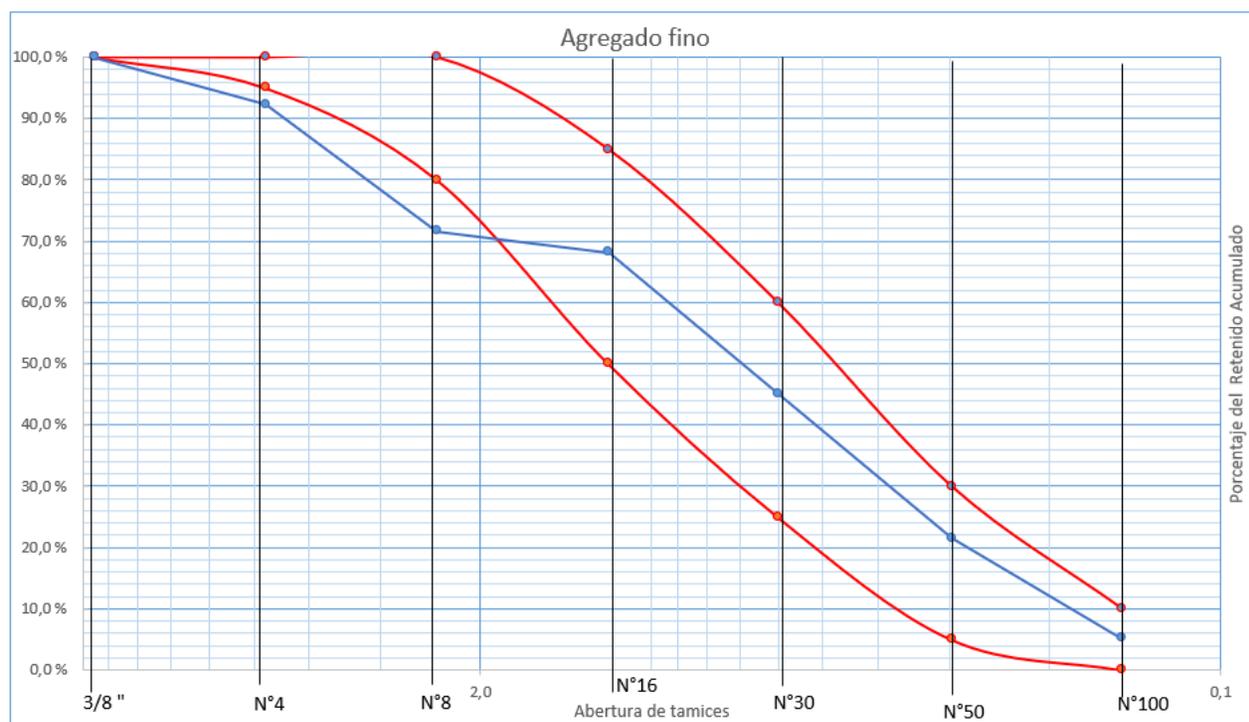
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°5: Análisis Granulométrico de Agregado Fino.

Peso del Agregado (g)		1000				Límites de Granulometría ASTM C 33	
Tamiz estándar	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	Peso Retenido Acumulado (g)	Porcentaje Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa	MIN	MAX
3/8	9,51	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
N°4	4,76	76,60	76,60	7,66	92,34	95,00	100,00
N°8	2,38	207,00	283,60	28,36	71,64	80,00	100,00
N°16	1,19	34,60	318,20	31,82	68,18	50,00	85,00
N°30	0,5995	230,40	548,60	54,86	45,14	25,00	60,00
N°50	0,297	235,75	784,35	78,44	21,57	5,00	30,00
N°100	0,149	164,30	948,65	94,87	5,13	0,00	10,00
Base	0	51,35	1000,00	100,00	0,00		
Total		1000,00	100,00				

Fuente: Elaboración Propia.

Figura N°12: Granulometría de Agregado Fino.



Fuente: Elaboración Propia.

Módulo de Finura del Agregado Fino	2,96
------------------------------------	------

4.1.2. Análisis Granulométrico del Agregado Grueso

Se realizó el siguiente procedimiento:

- Se secó la muestra en el horno por 24 h antes de realizar el ensayo.
- Se tomó una muestra de 8000 g para realizar el ensayo.
- Se hizo uso de los tamices de los siguientes tamaños 1'', ¾'', ½'', 3/8'', N° 4, y fondo.
- Se realizó el tamizado separando la muestra en fracciones y cuidando desperdiciar material.
- Se pesó la masa retenida en cada tamiz.



Figura N°13: Tamizado de Agregado Grueso.

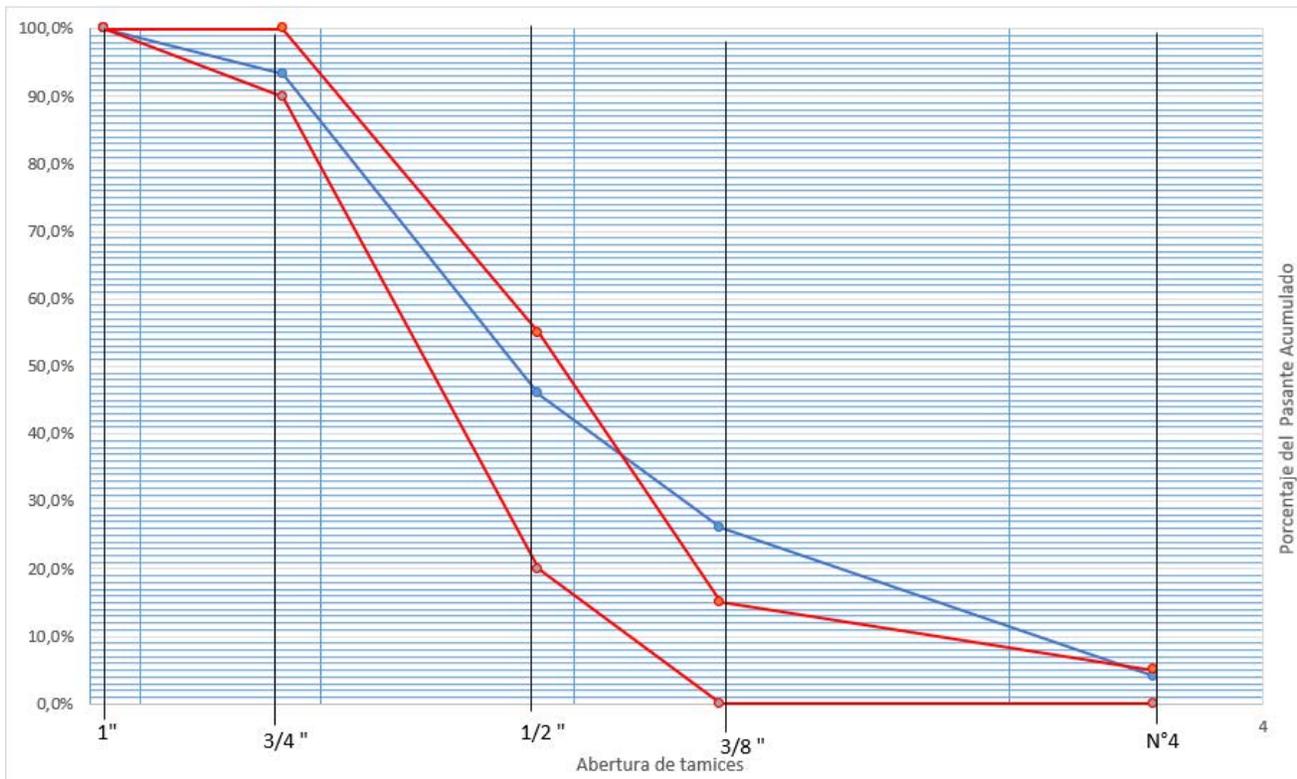
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°6: Análisis Granulométrico del Agregado Grueso.

		Agregado Grueso					
Peso del Agregado (g)		8000				Límites de Granulometría ASTM C 33	
Tamiz estándar	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	Peso Retenido Acumulado (g)	Porcentaje Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa	MAX	MIN
1	25,4			0,00	100,00	100,00	100,00
3/4	19,1	539,20	539,20	6,74	93,26	100,00	90,00
1/2	12,7	3787,20	4326,40	54,08	45,92	55,00	20,00
3/8	9,51	1587,20	5913,60	73,92	26,08	15,00	0,00
N°4	4,76	1760,80	7674,40	95,93	4,07	5,00	0,00
Base		325,60	8000,00	100,00	0,00		
Total		8000,00	100,00				

Fuente: Elaboración Propia.

Figura N°14: Granulometría de Agregado Grueso.



Fuente: Elaboración Propia.

Módulo de Finura Agregado Grueso	7,28
----------------------------------	------

4.1.3. Peso Específico y Absorción del Agregado Fino

- Se lavó y se dejó saturando por 24 h una muestra de 1500 g.
- Se secó el agregado en una hornalla pequeña hasta que esté semi seca la superficie, continuar secando con un ventilador hasta que esté superficialmente seca la muestra, se colocó la muestra en el cono de ensayo en tres capas, cada 1/3 del volumen, compactando con 25 golpes por cada capa si al momento de quitar el cono se debe quedar casi total mente desmoronado como muestra la figura N°12.
- Se tomó una muestra a 500 g y se introdujo en un picnómetro, se llenó el frasco con agua hasta la marca de 500 cm^3 y se agitó el picnómetro para eliminar las burbujas por aproximadamente 20 minutos y se pesó.
- Se llenó el picnómetro con agua hasta la marca de calibración y se pesó.
- El agregado fino del picnómetro y se dejó secando en el horno por aproximadamente por 24 h.
- Se sacó del horno el agregado fino y se determinó el peso.



Figura N°15: Ensayo de Peso Específico Superficialmente Seco del Agregado Fino

Fuente: Elaboración Propia.



Figura N°16: Ensayo de Peso Específico Superficialmente Seco del Agregado Fino

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°7: Prueba 1 (P1) de Peso Específico y Absorción de Agua del Agregado Fino.

Prueba	P1
Peso de material saturado superficialmente seco (g)	500,10
Peso de matraz (g)	394,30
Peso de matraz + agua (g)	1443,80
Peso de matraz +muestra saturada superficialmente seco + agua (g)	1753,6
Peso de material seco en horno (g)	495,20
Absorción (%)	0,99
P. específico seco (kg/m^3)	2602,21
P. específico saturado (kg/m^3)	2627,96
P. específico aparente (kg/m^3)	2670,98

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°8: Prueba 2 (P2) de Peso Específico y Absorción de Agua del Agregado Fino.

Prueba	P2
Peso de material saturado superficialmente seco (g)	499,90
Peso de matraz (g)	394,30
Peso de matraz + agua (g)	1443,80
Peso de matraz +muestra saturada superficialmente seco + agua (g)	1753,70
Peso de material seco en horno (g)	495,10
Absorción (%)	0,97
P. específico seco (kg/m^3)	2605,79
P. específico saturado (kg/m^3)	2631,05
P. específico aparente (kg/m^3)	2673,33

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°9: Prueba 3 (P3) de Peso Específico y Absorción de Agua del Agregado Fino.

Prueba	P3
Peso de material saturado superficialmente seco (g)	500,00
Peso de matraz (g)	394,30
Peso de matraz + agua (g)	1443,80
Peso de matraz+ muestra saturada superficialmente seco + agua (g)	1753,60
Peso de material seco en horno (g)	495,10
Absorción (%)	0,99
P. específico seco (kg/m^3)	2603,05
P. específico saturado (kg/m^3)	2628,81
P. específico aparente (kg/m^3)	2671,88

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°10: Resultados Peso Específico y absorción de agua del Agregado Fino.

Peso Específico y Absorción del Agregado Fino	Prom
Absorción (%)	1,00
P. específico seco (kg/m^3)	2600,00
P. específico saturado (kg/m^3)	2630,00
P. específico aparente (kg/m^3)	2670,00

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.4. Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso

- Se mezcló el agregado y se cuarteo a la cantidad aproximada necesaria para el uso de los procedimientos aplicables según la norma.
- Lavó y se dejó saturando el Agregado por 24 horas.
- Se secó la muestra superficialmente y se pesó 3000 g por ensayo como muestra la figura N°13.
- Se tomó las muestras y se pesó en el canastillo sumergido para tener el peso saturado como se muestra en la figura N°14.
- La muestra saturada se lo llevo al del horno por 24 horas para obtener el peso seco.

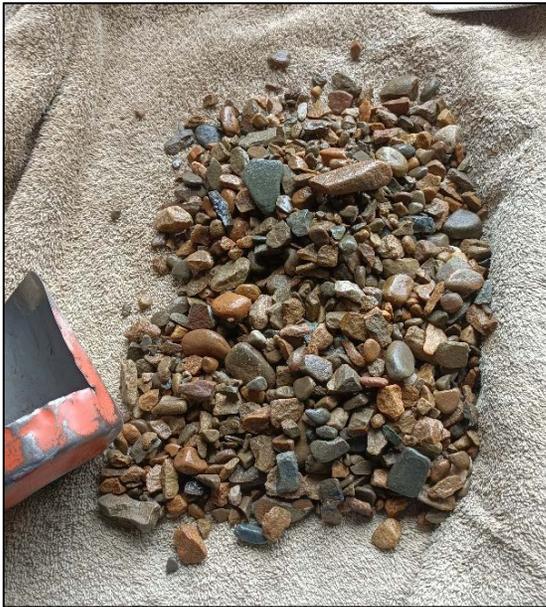


Figura N°17: Agregado Grueso Saturado.
Fuente: Elaboración Propia.



Figura N°18: Pesado del Agregado Saturado
Fuente: Elaboración Propia

Tabla N°11: Prueba 1 (P1) de Peso Específico y Absorción de Agua del Agregado Grueso.

Prueba	P1
Peso de material saturado superficialmente (g)	3006,32
Peso de material saturado superficialmente en el agua (g)	1839,50
Volumen de masa + volumen de vacíos (g)	1166,82
Peso de material seco en el horno (g)	2955,20
Volumen de masa neto	1115,70
Absorción (%)	1,73
P. Específico seco (kg/m^3)	2532,68
P. Específico saturada (kg/m^3)	2576,50
P. Específico Aparente (kg/m^3)	2648,74

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°12: Prueba 2 (P2) de Peso Específico y Absorción de Agua del Agregado Grueso.

Prueba	P2
Peso de material saturado superficialmente (g)	3001,60
Peso de material saturado superficialmente en el agua (g)	1839,10
Volumen de masa + volumen de vacíos (g)	1162,50
Peso de material seco en el horno (g)	2951,60
Volumen de masa neto	1112,50
Absorción (%)	1,69
P. Específico seco (kg/m^3)	2539,01
P. Específico saturada (kg/m^3)	2582,02
P. Específico Aparente (kg/m^3)	2653,12

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°13: Prueba 3 (P3) de Peso Específico y Absorción de Agua del Agregado Grueso.

Prueba	P3
Peso de material saturado superficialmente (g)	3000,95
Peso de material saturado superficialmente en el agua (g)	1838,45
Volumen de masa + volumen de vacíos (g)	1162,50
Peso de material seco en el horno (g)	2950,65
Volumen de masa neto	1112,20
Absorción (%)	1,70
P. Específico seco (kg/m^3)	2538,19
P. Específico saturada (kg/m^3)	2581,46
P. Específico Aparente (kg/m^3)	2652,99

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°14: Resultados de las Pruebas de Peso Específico y Absorción de Agua del Agregado Grueso.

Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso	Prom
Absorción (%)	1,70
P. específico seco (kg/m^3)	2540,00
P. específico saturado (kg/m^3)	2580,00
P. específico aparente (kg/m^3)	2650,00

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.5. Peso Unitario del Agregado Fino

- Se secó la muestra en el horno por un periodo de 24 horas.
- Se llenó el recipiente calibrado con un volumen 2833 cm^3 con un cucharón hasta que rebose el material, se enrazó el Agregado sobrante con una varilla.
- Se pesó el material más el recipiente para obtener así el peso seco suelto del Agregado.
- Para el peso unitario compactado se colocó 3 capas de $1/3$ de la altura del recipiente con un volumen de 2833 cm^3 , cada capa se varilló 25 veces.
- Se enrazó el exceso y se pesó el recipiente con el agregado.



Figura N°19: Pesado de Agregado Fino sin Compactar.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°15: Prueba 1 (P1) de Pesos Unitarios del Agregado Fino.

Prueba	P1
Peso del recipiente (g)	1614,00
Volumen del recipiente (cm ³)	2833,00
Recipiente + Arena sin compactar (g)	6018,80
Recipiente + Arena compactada (g)	6425,30
Peso unitario Suelto (kg/m ³)	1554,82
Peso unitario Compactado (kg/m ³)	1698,31

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°16: Prueba 2 (P2) de Pesos Unitarios del Agregado Fino.

Prueba	P2
Peso del recipiente (g)	1614,00
Volumen del recipiente (cm ³)	2833,00
Recipiente + Arena sin compactar (g)	6018,60
Recipiente + Arena compactada (g)	6393,30
Peso unitario Suelto (kg/m ³)	1554,75
Peso unitario Compactado (kg/m ³)	1687,01

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°17: Prueba 3 (P3) de Pesos Unitarios del Agregado Fino.

Prueba	P3
Peso del recipiente (g)	1614,00
Volumen del recipiente (cm ³)	2833,00
Recipiente + Arena sin compactar (g)	6018,70
Recipiente + Arena compactada (g)	6391,80
Peso unitario Suelto (kg/m ³)	1554,78
Peso unitario Compactado (kg/m ³)	1686,48

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N°18: Resultado de Pesos Unitarios del Agregado Fino.

Peso unitario Suelto y Compactado del Agregado Fino	Prom
Peso volumétrico Suelto (kg/m ³)	1550,00
Peso volumétrico Compactado (kg/m ³)	1690,00

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.6. Peso Unitario del Agregado Grueso

- Se secó la muestra en el horno por un periodo de 24 horas.
- Se llenó el recipiente para el ensayo con agua potable a temperatura ambiente.
- Se llenó el recipiente de volumen 2833 cm^3 con un cucharón hasta que rebose el material y se enrazó el agregado sobrante con una varilla.
- Se pesó el material más el recipiente para obtener así el peso seco suelto del agregado.
- Para el peso unitario compactado se colocó 3 capas de $1/3$ de la altura del recipiente con un volumen de 2833 cm^3 en cada capa se varilló 25 veces.
- Se enrazó el exceso y se pesó el recipiente con el agregado.



Figura N°20: Realización de Ensayo de Peso Unitario del Agregado Grueso.
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°19: Peso Unitario de Prueba 1 (P1) del Agregado Grueso.

Prueba	P1
Peso del recipiente (g)	1614,00
Volumen del recipiente (cm ³)	2833,00
Recipiente + Grava sin compactar (g)	5891,30
Recipiente + Grava compactada (g)	6163,40
Peso unitario Suelto (kg/m ³)	1509,81
Peso unitario Compactado (kg/m ³)	1605,86

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°20: Peso Unitario de Prueba 2 (P2) del Agregado Grueso.

Prueba	P2
Peso del recipiente (g)	1614,00
Volumen del recipiente (cm ³)	2833,00
Recipiente + Grava sin compactar (g)	5805,84
Recipiente + Grava compactada (g)	6076,34
Peso unitario Suelto (kg/m ³)	1479,65
Peso unitario Compactado (kg/m ³)	1575,13

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°21: Peso Unitario de Prueba 3 (P3) del Agregado Grueso.

Prueba	P3
Peso del recipiente (g)	1614,00
Volumen del recipiente (cm ³)	2833,00
Recipiente + Grava sin compactar (g)	5890,80
Recipiente + Grava compactada (g)	6164,00
Peso unitario Suelto (kg/m ³)	1509,64
Peso unitario Compactado (kg/m ³)	1606,07

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°22: Resultados de Peso Unitario del Agregado Grueso.

Peso unitario Suelto y Compactado del Agregado Grueso	Prom
Peso volumétrico Suelto (kg/m ³)	1500,00
Peso volumétrico Compactado (kg/m ³)	1600,00

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.7. Contenido de Humedad de los Agregados

- Se tomó una muestra y se pesó 500 gramos de agregado fino.
- Se secó la muestra en una hornalla.
- Se calculó el contenido de humedad.

Tabla N°23: Resultado de Contenido de Humedad del Agregado Fino.

Porcentaje de Humedad del Agregado Fino			
Fecha	Peso natural (g)	Peso seco (g)	Porcentaje De Humedad
25/10/2021	500	470,67	6,23
26/10/2021	500	469,92	6,40
28/10/2021	500	474,24	5,43
29/10/2021	500	472,36	5,85
01/11/2021	500	481,51	3,84

Fuente: Elaboración Propia.

- Se tomó una muestra y se pesó 900 gramos de Agregado Grueso.
- Se secó la muestra en una hornalla.
- Se calculó el contenido de humedad.

Tabla N°24: Resultado de Contenido de Humedad del Agregado Grueso.

% De Humedad del Agregado Grueso			
Fecha	Peso natural (g)	Peso seco (g)	Porcentaje de Humedad
25/10/2021	900	882,87	1,94
26/10/2021	900	881,74	2,07
28/10/2021	900	883,21	1,90
29/10/2021	900	882,95	1,93
01/11/2021	900	883,3	1,89

Fuente: Elaboración Propia.

4.2. Diseño de Mezcla (NB 1225001-1)

4.2.1. Selección de la Resistencia Promedio Requerida

Para este proyecto de investigación se seleccionó una resistencia a la compresión de 35 MPa debido a que es el valor más usado para el diseño de plantas de tratamiento con una relación a/c de 0,45.

Tabla N°25: Resistencia Promedio Requerida a Compresión.

Resistencia Especificada a la Compresión (MPa)	Resistencia Promedio Requerida a Compresión (MPa)
$f'c < 20$	$f'cr = f'c + 7$
$20 \leq f'c < 35$	$f'cr = f'c + 8.5$
$f'c \geq 35$	$f'cr = 1.1 * f'c + 5$

Fuente: Norma Boliviana NB 1225001-1 del Hormigón Estructural.

$$f'cr = 43,5 \text{ MPa}$$

4.2.2. Selección de Asentamiento

Debido a que la mezcla requiere una relación agua/cemento baja para tener la menor porosidad se asumió un asentamiento de una pulgada.

4.2.3. Selección del Tamaño Máximo del Agregado (TM)

El tamaño máximo nominal utilizado en la investigación análisis es de $\frac{3}{4}$ plg.

$$TM = \frac{3}{4} \text{ plg}$$

4.2.4. Cantidad de Agua para Mezcla de Concreto (kg/m^3)

la cantidad de agua por metro cúbico para el diseño de mezcla se obtuvo de la Tabla N°39.

Tabla N°26: Cantidad Aproximada de Agua para Amasado.

CANTIDAD APROXIMADA DE AGUA PARA AMASADO								
SLUMP (plg)	Tamaño Máximo de Agregado (plg)							
	3/8	1/2	3/4	1	1 1/2	2	3	4
Concreto Sin Aire Incorporado								
1 a 2	207	199	190	179	166	154	130	113
3 a 4	228	216	205	193	181	169	145	124
6 a 7	243	228	216	202	190	178	160	---
Concreto Con Aire Incorporado								
1 a 2	181	175	168	160	150	142	122	107
3 a 4	202	193	184	175	165	157	133	119
6 a 7	216	205	197	184	174	166	154	---

Fuente: Institute American Concrete, 2014.

$$\text{Cantidad de agua} = 190 \text{ kg/m}^3$$

4.2.5. Selección del Contenido de Aire Atrapado en Porcentaje

Contenido de aire en el concreto aproximado del 2 % obtenida de la tabla N°40.

Tabla N°27: Porcentaje de Aire Atrapado.

PORCENTAJE DE AIRE ATRAPADO								
CONCRETO SIN AIRE INCORPORADO								
T.Maximo de A.G. (plg)	3/8	1/2	3/4	1	1 1/2	2	3	4
Aire atrapado (%)	3,00	2,50	2,00	1,50	1,00	0,50	0,30	0,20

Fuente: Institute American Concrete, 2014.

4.2.6. Selección de la Relación agua/cemento (a/c)

Se decidió tomar una relación agua cemento de 0,45 porque es una relación agua/cemento que más se emplea en hormigones de plantas de tratamiento de agua residual, como también es uno de los requisitos para el uso del aditivo Sika WT-200 P.

$$a/c=0,45$$

4.2.7. Cálculo del Contenido de Cemento

$$c = \frac{a}{0,45}$$

$$C = 422.22 \text{ kg/m}^3$$

4.2.8. Contenido de Agregado Grueso

El agregado grueso se obtuvo aplicando la siguiente Tabla N°41.

Tabla N°28: Volumen de Agregado Grueso Compactado.

VOLUMEN DE AGREGADO GRUESO COMPACTADO				
Volumen de AG. Compactado en Seco				
Tamaño Máximo de Agregado (plg)	Módulo de Fineza de la Arena			
	2,40	2,60	2,80	3,00
3/8	0,50	0,48	0,46	0,44
1/2	0,59	0,57	0,55	0,53
3/4	0,66	0,64	0,62	0,60
1	0,71	0,69	0,67	0,65
1 1/2	0,75	0,73	0,71	0,69
2	0,78	0,76	0,74	0,72
3	0,82	0,79	0,78	0,75
6	0,87	0,85	0,83	0,81

Fuente: Institute American Concrete, 2014.

Vol. AG compactado = 0,604

$$V. AG = \frac{\text{vol. de AG compactado} * \text{Peso seco compactado AG}}{\text{Peso Especifico AG}}$$

Ec.(12)

$$V. AG = 0,38 \text{ m}^3$$

4.2.9. Cálculo de Volumen de Agua

$$V_{agua} = \frac{\text{cantidad agua}}{\text{Peso específico del agua}} \quad \text{Ec.(13)}$$

$$V_{agua}=0.19 \text{ m}^3$$

4.2.10. Volumen de Cemento

$$V_{cemento} = \frac{\text{Cantidad de cemento}}{\text{Peso específico del cemento}} \quad \text{Ec.(14)}$$

$$V_{cemento}=0,14\text{m}^3$$

4.2.11. Volumen de Aire

$$V_{aire} = 1 * 0.02$$

$$V_{aire}=0.02 \text{ m}^3$$

4.2.12. Cálculo del Volumen de Agregado Fino

$$V_{AF}=1-V_{cemento}-V_{agua}-V_{AG}-V_{aire} \quad \text{Ec.(15)}$$

$$V_{AF}=0,27 \text{ m}^3$$

4.2.13. Corrección por Humedad

La corrección se la realiza con la siguiente fórmula.

$$V_{natural} = V_{seco} * \left(\frac{100 + W}{100 + abs} \right) \quad \text{Ec.(16)}$$

Donde:

V.natural= Volumen del material en el ambiente (m³).

V.seco= Volumen del material en estado seco (m³).

W=Porcentaje de humedad del Agregado.

abs= Porcentaje de absorción del Agregado.

$$V.\text{agua corregido} = V.\text{agua} - (V.G - V.\text{naturaG}) - (V.AF - V.\text{naturalAF}) \quad \text{Ec.(17)}$$

Donde:

V.agua= volumen de agua (m³).

V.AG= Volumen de Agregado Grueso (m³).

V.naturalAG= volumen del agredo Grueso natural (m³).

V.A.F= Volumen del Agregado fino (m³).

Vnatural AF= Volumen del Agregado fino natural (m³).

Tabla N°29: Volumen y Pesos de Materiales Para Diseño de Mezcla del Grupo 1.

Grupo 1				
Fecha			25/10/2021	
Material			Arena	Grava
Porcentaje de Humedad			6,23	1,94
Material	Dosificación por metro cúbico		Peso para Laboratorio (kg)	
	Volumen (m ³)	Peso (kg)	volumen	0,07 m3
Agua	0,19	135,26	9,56	
Cemento	0,14	420,00	29,69	
Grava	0,29	748,55	52,91	
Arena	0,36	992,80	70,18	

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°30: Volumen y Pesos de Materiales Para Diseño de Mezcla del Grupo 2.

Grupo 2				
Fecha			26/10/2021	
Material			Arena	Grava
Porcentaje de Humedad			6,40	2,07
Material	Dosificación por metro cúbico		Peso para Laboratorio (kg)	
	Volumen (m ³)	Peso (kg)	volumen	0,07 m3
Agua	0,19	132,51	9,37	
Cemento	0,14	420,00	29,69	
Grava	0,29	749,51	52,98	
Arena	0,36	994,39	70,29	

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°31: Volumen y Pesos de Materiales Para Diseño de Mezcla del Grupo 3.

Grupo 3				
Fecha			28/10/2021	
Material			Arena	Grava
Porcentaje de Humedad			5,43	1,90
Material	Dosificación por metro cúbico		Peso para Laboratorio (kg)	
	Volumen (m ³)	Peso (kg)	volumen	0,07 m3
Agua	0,19	143,83	10,17	
Cemento	0,14	420,00	29,69	
Grava	0,29	748,26	52,89	
Arena	0,36	985,33	69,65	

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°32: Volumen y Pesos de Materiales Para Diseño de Mezcla del Grupo 4.

Grupo 4				
Fecha			29/10/2021	
Material			Arena	Grava
Porcentaje de Humedad			5,85	1,93
Material	Dosificación por metro cúbico		Peso para Laboratorio (kg)	
	Volumen (m ³)	Peso (kg)	volumen	0,07 m3
Agua	0,19	139,28	9,84	
Cemento	0,14	420,00	29,69	
Grava	0,29	748,48	52,91	
Arena	0,36	989,25	69,93	

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°33: Volumen y Pesos de Materiales Para Diseño de Mezcla del Grupo 5.

Grupo 5				
Fecha			01/10/2021	
Material			Arena	Grava
Porcentaje de Humedad			3,84	1,89
Material	Dosificación por metro cubico		Peso para Laboratorio (kg)	
	Volumen (m ³)	Peso (kg)	volumen	0,07 m3
Agua	0,19	160,01	11,31	
Cemento	0,14	420,00	29,69	
Grava	0,29	748,19	52,89	
Arena	0,36	970,45	68,60	

Fuente: Elaboración Propia.

4.3. Asentamiento

- El molde se debe fijar firmemente en su lugar plano, se debe pisar las aletas o asegurando las abrazaderas a la placa de base manteniendo limpio el perímetro.
- Se llena el molde vaciando el hormigón en tres capas, de modo que cada capa corresponda a aproximadamente la tercera parte del volumen del molde.
- Cada capa se debe compactar dando 25 golpes con la barra lisa compactadora distribuidos y aplicados uniformemente en toda la sección de la capa.
- Una vez lleno el molde y compactado con la varilla se procede a enrasar rodando la barra compactadora sobre el borde superior del molde. Después, se retira el molde del concreto levantándolo cuidadosamente en dirección vertical; teniendo precaución para evitar los movimientos laterales.
- Se mide inmediatamente el asentamiento determinado por la diferencia entre la altura del molde y la del centro desplazado de la cara superior del cono deformado.



Figura N°21: Realización del Ensayo del Cono de Abrams Para Verificar Asentamiento.
Fuente: Elaboración Propia.

4.4. Resistencia a la Compresión

- Las probetas fueron llevadas según corresponda a la máquina de ensayo de compresión.
- Se verificó que el indicador de carga sea cero y se procedió a aplicar una carga sin golpes bruscos.
- Luego se tomó datos de la resistencia máxima indicada en el indicador de carga para cada una de las probetas.
- Se determinó la resistencia a la compresión de cada una de las probetas, dividiendo la carga máxima entre el área de sección transversal.

$$f'c = \frac{F}{\frac{\pi}{4} * d^2} \quad \text{Ec.(18)}$$

Donde:

$f'c$ =Esfuerzo a compresión (MPa).

F= Carga a compresión (N).

d= Diámetro de la probeta (mm²).



Figura N°22: Ensayo a Compresión de Probetas de Hormigón.
Fuente: Elaboración Propia.

4.5. Análisis De Datos

4.5.1. Análisis de Aceptación de la Resistencia a Compresión Alcanzada en el Hormigón

El ensayo a compresión se realizó con probetas cilíndricas de 100 mm x 200 mm estandarizadas se obtuvo los siguientes resultados a los 7 días.

Tabla N°34: Resultados de Ensayo a Compresión a los 7 días.

f'c (MPa)					
Edad del hormigón (d)	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
7	39,98	39,78	38,48	37,57	38,44
	37,54	38,67	36,90	36,02	37,42

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°35: Resultados de Ensayo a Compresión a los 28 días.

f'c (MPa)					
Edad del hormigón (d)	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
28	45,37	46,93	44,28	44,13	48,43
	43,21	47,89	45,44	43,25	47,61
	46,22	45,98	44,87	43,40	48,61
	45,53	47,00	43,70	44,93	47,05
	44,50	46,10	44,74	46,56	46,59
	45,49	46,55	46,41	45,59	48,00
	47,38	47,20	45,23	46,17	46,74
	46,49	46,47	46,83	45,42	47,35
	48,27	46,84	46,03	45,42	47,95

Fuente: Elaboración Propia.

Al ser probetas de 100 mm x 200 mm estas dan una resistencia a compresión un poco más elevado que las probetas 150 mm x 300 mm por ello se afectó el resultado por 0,97 para obtener la resistencia de una probeta de 150 mm x 300 mm como establece la Norma Boliviana NB 1225001-1 del Hormigón Estructural.

Tabla N°36: Coeficiente de Conversión a Probeta Cilíndrica 150 mm x 300 mm.

Tipo de probeta (supuesta con caras Refrentadas)	Dimensiones (mm)	Coeficiente de conversión a la probeta cilíndrica de 150 mm x 300 mm	
		Límites de variación	Valor medio
Cilindro	100 x 200	0,94 a 1,00	0,97
Cilindro	250 x 500	1,00 a 1,10	1,05
Cubo	100	0,7 a 0,9	0,8
Cubo	150	0,7 a 0,91	0,8
Cubo	200	0,75 a 0,9	0,83
Cubo	300	0,80 a 1,00	0,9
Prisma	150 x 150 x 450	0,90 a 1,20	1,05
Prisma	200 x 200 x 600	0,90 a 1,20	1,05

Fuente: Norma Boliviana NB 1225001-1 del Hormigón Estructural.

Tabla N°37: Resistencia a Compresión a los 7 Días Afectadas por Coeficiente de Conversión.

f'c (MPa)					
Edad del hormigón (d)	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
7	38,78	38,58	37,32	36,45	37,29
	36,41	37,51	35,79	34,94	36,30

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°38: Resistencia a Compresión a los 28 Días Afectadas por Coeficiente de Conversión.

f'c(MPa)					
Edad del hormigón (d)	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
28	44,00	45,52	42,95	42,81	46,98
	41,92	46,45	44,08	41,95	46,18
	44,83	44,60	43,52	42,10	47,15
	44,17	45,59	42,39	43,58	45,63
	43,16	44,72	43,40	45,17	45,19
	44,13	45,15	45,02	44,23	46,56
	45,96	45,78	43,87	44,78	45,34
	45,09	45,08	45,42	44,05	45,93
	46,82	45,44	44,65	44,05	46,51

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°39: Evaluación para Aceptación de la Resistencia a Compresión Alcanzada a los 28 Días de Probetas del Grupo 1 Norma Boliviana NB 1225001-1 del Hormigón Estructural.

Evaluación para Aceptación del Hormigón Nivel de Resistencia NB 1225001-1					
Grupo 1					
f'c (MPa)	f'c promedio de 3 ensayos consecutivos (MPa)	f'c media móvil (MPa)	*f'c (MPa)	f'c > *f'c	f'c promedio de 3 ensayos consecutivos > *f'c - 3,5 MPa
44,00	43,58	-	35,00	-	Cumple
41,92					
44,83					
44,17	43,82	43,70	35,00	Cumple	Cumple
43,16					
44,13					
45,96	45,96	44,89	35,00	Cumple	Cumple
45,09					
46,82					

*f'c resistencia específica

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°40: Evaluación para Aceptación de la Resistencia a Compresión Alcanzada a los 28 Días de Probetas del Grupo 2 bajo Norma Boliviana NB 1225001-1 del Hormigón Estructural.

Evaluación y Aceptación del Hormigón Nivel de Resistencia NB 1225001-1					
Grupo 2					
f'c (MPa)	f'c promedio de 3 ensayos consecutivos (MPa)	f'c media móvil (MPa)	*f'c (MPa)	f'c > *f'c	f'c promedio de 3 ensayos consecutivos > *f'c - 3,5 MPa
45,52	45,52	-	35,00	-	Cumple
46,45					
44,60					
45,59	45,15	45,34	35,00	Cumple	Cumple
44,72					
45,15					
45,78	45,43	45,29	35,00	Cumple	Cumple
45,08					
45,44					

*f'c resistencia específica
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°41: Evaluación para Aceptación de la Resistencia a Compresión Alcanzada a los 28 Días de Probetas del Grupo 3 bajo Norma Boliviana NB 1225001-1 del Hormigón Estructural.

Evaluación y Aceptación del Hormigón Nivel de Resistencia NB 1225001-1					
Grupo 3					
f'c (MPa)	f'c promedio de 3 ensayos consecutivos (MPa)	f'c media móvil (MPa)	*f'c (MPa)	f'c > *f'c	f'c promedio de 3 ensayos consecutivos > *f'c - 3,5 MPa
42,95	43,52	-	35,00	-	Cumple
44,08					
43,52					
42,39	43,60	43,56	36,00	Cumple	Cumple
43,40					
45,02					
43,87	44,65	44,12	37,00	Cumple	Cumple
45,42					
44,65					

*f'c resistencia específica
Fuente elaboración propia.

Tabla N°42: Evaluación para Aceptación de la Resistencia a Compresión Alcanzada a los 28 Días de probetas del Grupo 4 bajo Norma Boliviana NB 1225001-1 del Hormigón Estructural.

Evaluación y Aceptación del Hormigón Nivel de Resistencia NB 1225001-1					
Grupo 4					
f'c (MPa)	f'c promedio de 3 ensayos consecutivos (MPa)	f'c media móvil (MPa)	*f'c (MPa)	f'c > *f'c	f'c promedio de 3 ensayos consecutivos > *f'c - 3,5 MPa
42,81	42,29	-	35,00	-	Cumple
41,95					
42,10					
43,58	44,33	43,31	35,00	Cumple	Cumple
45,17					
44,23					
44,78	44,30	44,31	35,00	Cumple	Cumple
44,05					
44,05					

*f'c resistencia específica

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°43: Evaluación para Aceptación de la Resistencia a Compresión Alcanzada a los 28 Días de Probetas del Grupo 5 bajo Norma Boliviana NB 1225001-1 del Hormigón Estructural.

Evaluación y Aceptación del Hormigón Nivel de Resistencia NB 1225001-1					
Grupo 5					
f'c (MPa)	f'c promedio de 3 ensayos consecutivos (MPa)	f'c media móvil (MPa)	*f'c (MPa)	f'c > *f'c	f'c promedio de 3 ensayos consecutivos > *f'c - 3,5 MPa
46,98	46,77	-	35,00	-	Cumple
46,18					
47,15					
45,63	45,80	46,28	35,00	Cumple	Cumple
45,19					
46,56					
45,34	45,93	45,86	35,00	Cumple	Cumple
45,93					
46,51					

*f'c resistencia específica

Fuente: Elaboración Propia.

Al tener con menos de 30 ensayos para el cálculo de resistencia promedio requerida (f'_{cr}) se empleó la Ec.13 que indica la Norma Boliviana del Hormigón estructural NB 1225001-1.

Si $N \geq 6$

$$f'_{c,est} = 2 * \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{m-1}}{m - 1} - x_m \geq K_N * x_1 \quad \text{Ec.(19)}$$

$$f'_{c,est} \geq f'_c$$

Donde:

K_N = Coeficiente dado por la Tabla N°15 en función de "N" y del tipo de instalaciones en que se fabrica el hormigón.

x_1 = Resistencia de la probeta con menos resistencia (MPa).

N= número de ensayos.

m= N/2 si N es par o (N-1)/2 si N es impar.

$f'_{c,est}$ = Resistencia característica estadística (MPa).

f'_c = Resistencia especificada (MPa).

Tabla N°44: Valor del coeficiente (K_N) en función del Número de Muestras y la Desviación Cuadrática.

Uniformidad del hormigón		Excelente	Bueno	Regular	Mala
Desviación Standard de la resistencia del hormigón (Ss)		0,1	0,15	0,2	0,25
Número de ensayos "N"	1	0,836	0,753	0,671	0,589
	2	0,884	0,82	0,753	0,682
	3	0,91	0,859	0,803	0,741
	4	0,928	0,886	0,838	0,784
	5	0,942	0,907	0,867	0,82
	6	0,953	0,924	0,89	0,85
	7	0,962	0,938	0,91	0,877
	8	0,97	0,951	0,928	0,9
	10	0,983	0,972	0,958	0,942
	12	0,993	0,989	0,984	0,976
	14	1,002	1,004	1,005	1,008
	16	1,009	1,016	1,024	1,035
18	1,016	1,027	1,041	1,059	

Fuente: Norma Boliviana NB 1225001-1 del Hormigón Estructural.

Tabla N°45: Resistencias Ordenas de Menor a Mayor.

Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4		Grupo 5	
N°	f'c (MPa)								
1	41,92	1	44,60	1	42,39	1	41,95	1	45,19
2	43,16	2	44,72	2	42,95	2	42,10	2	45,34
3	44,00	3	45,08	3	43,40	3	42,81	3	45,63
4	44,13	4	45,15	4	43,52	4	43,58	4	45,93
5	44,17	5	45,44	5	43,87	5	44,05	5	46,18
6	44,83	6	45,52	6	44,08	6	44,05	6	46,51
7	45,09	7	45,59	7	44,65	7	44,23	7	46,56
8	45,96	8	45,78	8	45,02	8	44,78	8	46,98
9	46,82	9	46,45	9	45,42	9	45,17	9	47,15

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°46: Resistencia Característica Estadística para Cada Grupo.

Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4		Grupo 5	
N°	9,00								
x_1 (MPa)	41,92	x_1 (MPa)	44,60	x_1 (MPa)	42,39	x_1 (MPa)	41,95	x_1 (MPa)	45,19
m	4,00								
Kn	0,97								
Ss	0,03	Ss	0,01	Ss	0,02	Ss	0,03	Ss	0,02
x_m (MPa)	44,13	x_m (MPa)	45,15	X_m (MPa)	43,52	X_m (MPa)	43,58	X_m (MPa)	45,93
x_{m-1} (MPa)	44,00	x_{m-1} (MPa)	45,08	x_{m-1} (MPa)	43,40	x_{m-1} (MPa)	42,81	x_{m-1} (MPa)	45,63
fc'est(MPa)	41,93	fc'est(MPa)	44,45	fc'est(MPa)	42,30	fc'est(MPa)	40,99	fc'est(MPa)	44,84
$x_1 * Kn$ (MPa)	40,66	$x_1 * Kn$ (MPa)	43,26	$x_1 * Kn$ (MPa)	41,12	$x_1 * Kn$ (MPa)	40,70	$x_1 * Kn$ (MPa)	43,83
f'c(MPa)	35,00								

Fuente: Elaboración Propia.

Como $fc'est > f'c$ se acepta el hormigón.

4.6. Colocado de Aditivos Impermeabilizantes

4.6.1. Aditivo Sika WT-200 P

El aditivo Sika WT-200 P es un aditivo en polvo que se añade dentro de la mezcla, este aditivo se empleó en las probetas del grupo 3 con una dosificación del dos por ciento del peso de cemento.

4.6.2. Aditivo Sikaguard Antiácido

En las probetas realizadas en el grupo 1 se usó el impermeabilizante Sikaguard Antiácido con un rendimiento de 1 kg/m^2 , este aditivo es una mezcla de dos componentes la parte A=77 por ciento y la parte B= 23 por ciento.

Para mezclar los dos componentes se requiere una mezcladora eléctrica debido a que es muy densa la mezcla.

El colocado se lo realizó de forma manual con brochas.

Antes de ser sumergido el aditivo, tiene que tener un tiempo de siete días para que adquiera todas sus propiedades.



Figura N°23: Colocado de Aditivo Impermeabilizante Sikaguard Antiácido.

Fuente: Elaboración Propia.

4.6.3. Aditivo Sikatop 107 Seal

En las probetas realizadas en el grupo 2 se usó el impermeabilizante Sikatop 107 Seal con un rendimiento de 4 kg/m^2 , este aditivo se compone de dos componentes con una proporción de A=1, B=3 en peso, esta relación es la que nos recomienda la ficha técnica para colocado con brocha.

El para este aditivo se emplean dos capas, después de colocar la primera capa se deja endurecer por 4 h para recién colocar la siguiente capa.

La mezcla se lo realizó de forma manual en un balde.

Antes de aplicar la primera capa se debe humedecer la superficie.

El colocado se lo realizó de forma manual con brocha.



Figura N°24: Humectado de Probetas.
Fuente: Elaboración Propia.



Figura N°25: Colocado de Aditivo Sikatop 107 Seal.

Fuente: Elaboración Propia.

4.6.4. Aditivo Sikaguard 63 CL

En las probetas realizadas en el grupo 4 se usó el impermeabilizante Sikaguard 63 CL con un rendimiento de $1,4 \text{ kg/m}^2$, este aditivo se compone de dos componentes con una proporción de A=4,71, B=1 en peso.

Para mezclar los dos componentes se requirió una mezcladora eléctrica debido a que es muy densa la mezcla.

El colocado se lo realizó de manera manual con brochas.

Antes de ser sumergido el aditivo tiene que tener un tiempo de tres horas para que adquiera todas sus propiedades.



Figura N°26: Impermeabilización de Probetas de Hormigón con Aditivo Sikaguard 63 CL.
Fuente: Elaboración Propia.

4.7. Sumersión de Probetas en Agua Residual Doméstica.

Para sumergir las probetas en las lagunas facultativas de la planta de agua residual doméstica de Tarija se realizó el siguiente procedimiento.

En cajas de madera colocar las probetas para ser transportadas hasta la planta de tratamiento de agua residual doméstica.

Una vez en la planta de tratamiento de agua residual doméstica colocar las probetas en jaulas de acero corrugado con una soga para ser sumergidas en las aguas residuales.



Figura N°27: Sumersión de Jaulas con Probetas de Hormigón en Agua Residual Doméstica.

Fuente: Elaboración Propia.

4.8. Lectura y Toma de Muestras de Agua Residual Doméstica

Para la lectura de parámetros que contiene el agua residual doméstica se realizó los siguientes pasos.

Se sumergió tres veces el envase de plástico dentro del agua residual con el fin de evitar contaminación de la muestra.

Con el muestreador y el envase de plástico se procedió a tomar una muestra de agua de una profundidad aproximadamente a 1,5m de la laguna facultativa.

Con la ayuda de la ingeniera Elizabeth Aramayo y Ing. Gamarra Mario se realizó a lecturar los parámetros de pH, Temperatura, Conductividad, sólidos totales disueltos in situ con el multiparamétrico.

Se Tapó los envases de plástico con las muestras y se procedió a desinfectarlos de forma externa y etiquetarlos para transportarlos para hacer un análisis de sulfatos, cloruros, carbonatos en el laboratorio de CEANID.



Figura N°28: Toma de Muestras de Agua Residual doméstica.
Fuente: Elaboración Propia.



Figura N°29: Lectura de Parámetros In Situ Con Equipo Multiparamétrico.
Fuente Elaboración Propia.

4.9. Extracción de Probetas del Agua Residual Doméstica

La extracción de muestras de agua residual doméstica se lo realizó los días programados para la extracción de probetas de hormigón del agua residual (30, 60, 90, 120, 180 días).

Al extraer las probetas se procedió a transportarlas en cajas de madera para después proceder a desinfectar y transportarlas con ayuda de la camioneta de CIAGUA.



Figura N°30: Extracción de Probetas de Hormigón.
Fuente: Elaboración Propia.

4.10. Ensayo de Penetración de Agua Bajo Presión

En el equipo se acomoda la probeta a ensayar de 150 mm x 300 mm, el agua del equipo debe salir a una presión de 500 Kpa por 72 horas, terminado el ensayo se procede a partir la probeta y medir la profundidad de penetración del agua y se verifica si cumple con la normativa UNE-EN 12390-8.



Figura N°31: Ensayo de Penetración de Agua Bajo Presión.
Fuente: Elaboración Propia.



Figura N°32: Profundidad de Penetración de Agua Bajo Presión.
Fuente: Elaboración Propia.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1. Resultados de Prueba de Resistencia a Compresión

Las probetas del grupo 1 fueron revestidas con aditivo Sikaguard Antiácido(véase Anexo 3)

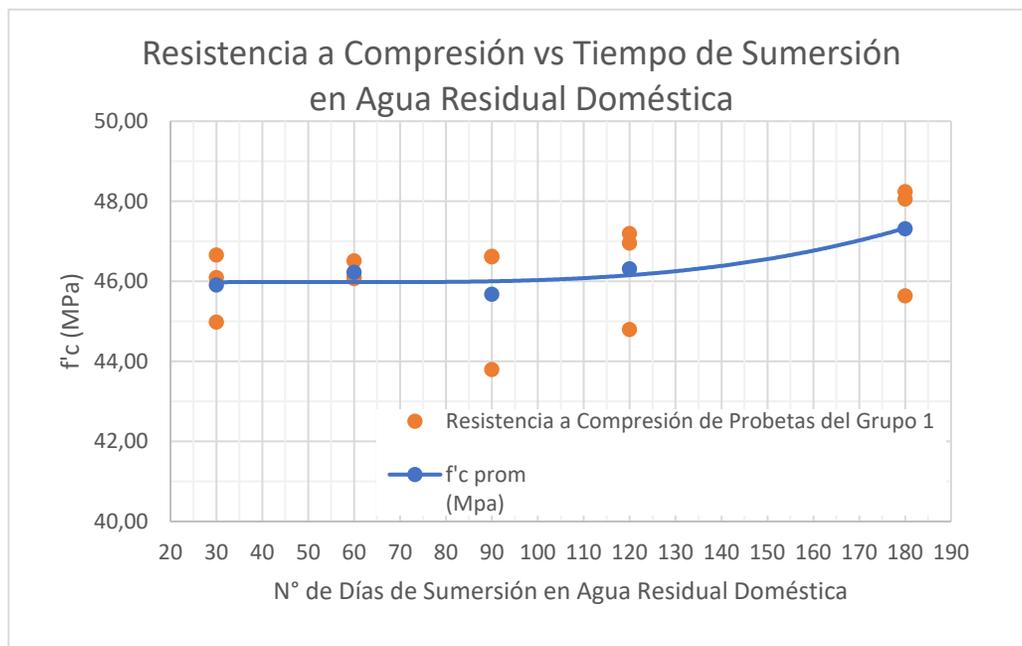


Figura N°33: Gráfica de Dispersión de Muestras del Grupo 1.

Fuente: Elaboración Propia.

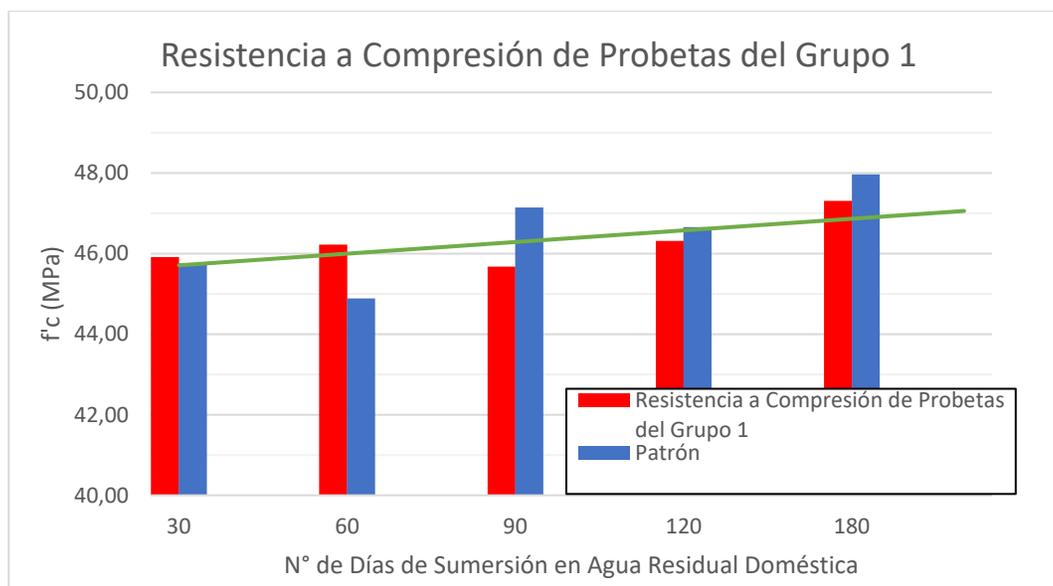


Figura N°34: Gráfica de Barras de Resistencia Media a Compresión del Grupo 1.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°47: Reducción de resistencia a compresión del Hormigón del Grupo 1 Sumergido en Agua Residual Doméstica.

Tabla Resumen						
Grupo	Aditivo	Tiempo de Sumersión en Agua Residual Doméstica (d)	f'c prom (MPa) Sumergido en Agua Residual Doméstica	f'c prom (MPa) Patrón	Variación de Resistencia a Compresión (%)	
Grupo 1	Sikaguard Antiácido	30	45,91	45,75	-0,34	No Existe Reducción
Grupo 1	Sikaguard Antiácido	60	46,22	44,89	-2,98	No Existe Reducción
Grupo 1	Sikaguard Antiácido	90	45,68	47,15	3,12	Reducción
Grupo 1	Sikaguard Antiácido	120	46,31	46,66	0,74	Reducción
Grupo 1	Sikaguard Antiácido	180	47,31	47,96	1,36	Reducción

Fuente: Elaboración Propia.

Según los resultados obtenidos en las probetas del grupo 1 con aditivo Sikaguard Antiácido podemos observar una reducción entre las resistencias a compresión promedio de las probetas sumergidas en agua residual y las probetas patrón a los 90,120, 180 días, la reducción no es creciente durante todo el tiempo de estudio por lo que se descarta que hubiese una reducción en la resistencia a compresión y que estos valores pueden deberse por una falla en alguna probeta.

Las probetas del grupo 2 fueron revestidas con aditivo Sikatop 107 Seal (véase Anexo 3)

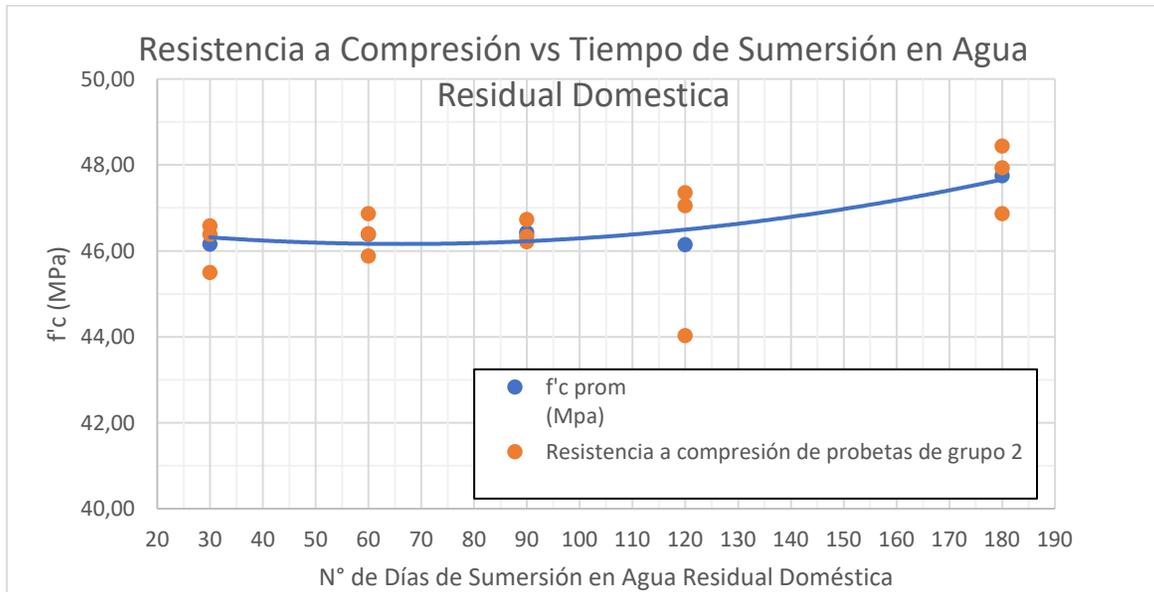


Figura N°35: Gráfica de Dispersión de las Muestras del Grupo 2.
Fuente: Elaboración Propia.

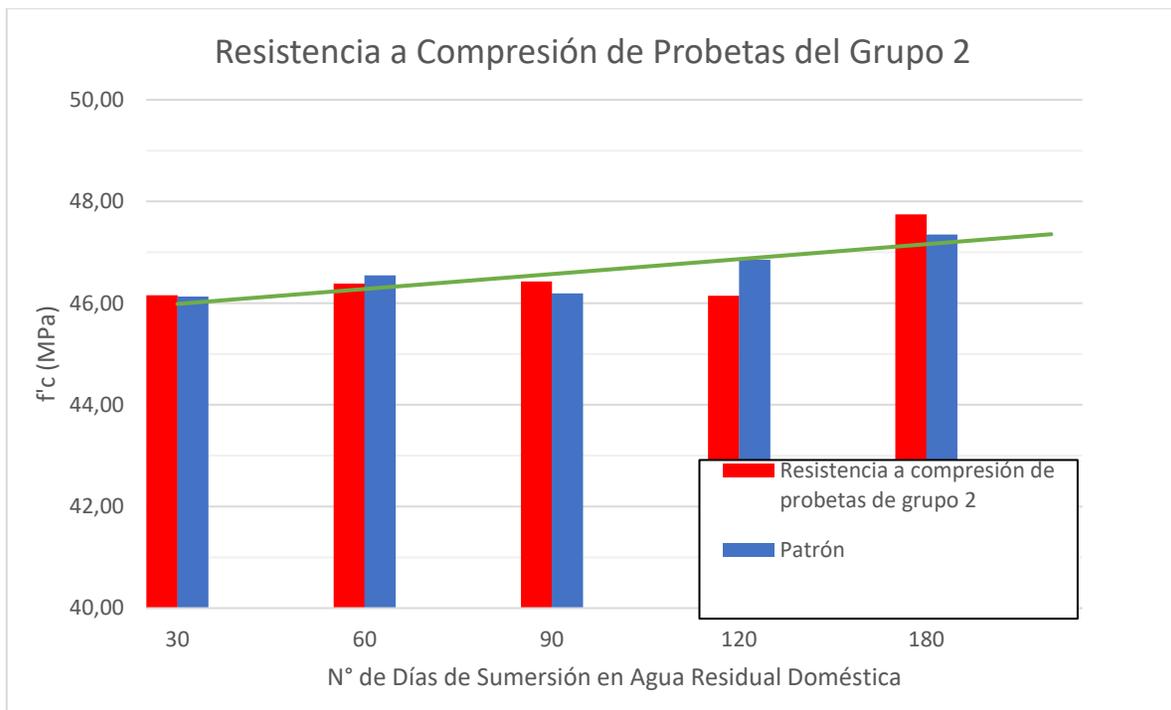


Figura N°36: Gráfica de Barras de la Resistencia Media a Compresión del Grupo 2.
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°48: Reducción de resistencia a compresión del Hormigón del Grupo 2 Sumergido en Agua Residual Doméstica.

Tabla Resumen						
Grupo	Aditivo	Tiempo de Sumersión en Agua Residual Doméstica (d)	f'c prom (MPa) Sumergido en Agua Residual Doméstica	f'c prom (MPa) Patrón	Variación de Resistencia a Compresión (%)	
Grupo 2	Sikatop 107 Seal	30	46,16	46,13	-0,06	No Existe Reducción
Grupo 2	Sikatop 107 Seal	60	46,38	46,55	0,35	Reducción
Grupo 2	Sikatop 107 Seal	90	46,43	46,19	-0,52	No Existe Reducción
Grupo 2	Sikatop 107 Seal	120	46,15	46,85	1,51	Reducción
Grupo 2	Sikatop 107 Seal	180	47,75	47,35	-0,83	No Existe Reducción

Fuente: Elaboración Propia.

Según los resultados obtenidos en las probetas del grupo 2 con aditivo Sikatop 107 Seal podemos observar una reducción entre las resistencias a compresión promedio de las probetas sumergidas en agua residual con las probetas patrón a los 60 y 120 días, al no presentar una reducción en todo el tiempo de estudio, no se podría asegurar o descartar una reducción en la resistencia a compresión.

Las probetas del grupo 3 fueron elaboradas con el aditivo Sika WT-200 P (véase anexo 3)

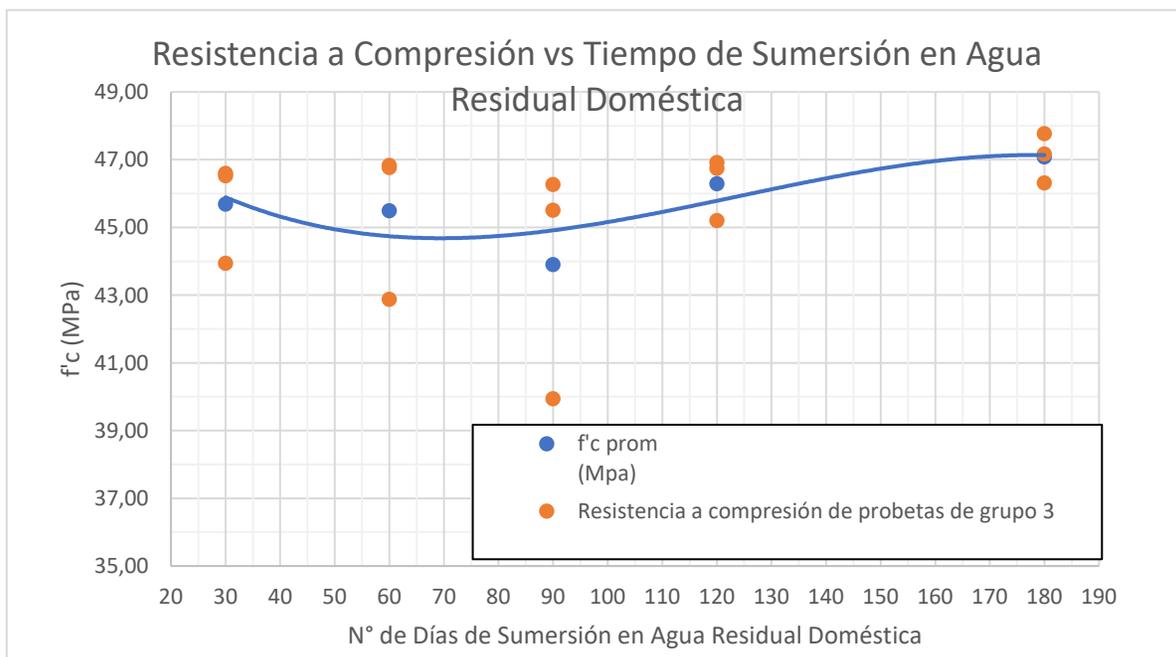


Figura N°37: Gráfica de Dispersión de las Muestras Grupo 3.

Fuente: Elaboración Propia.

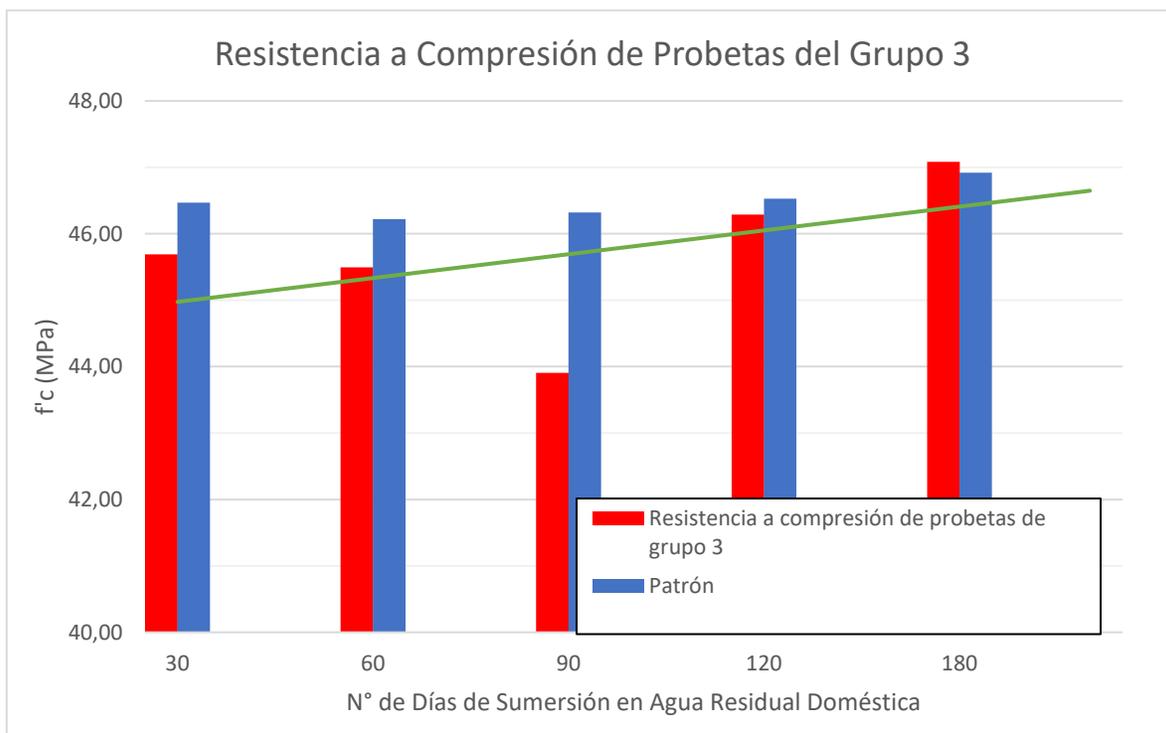


Figura N°38: Gráfica de Barras de la Resistencia Media a Compresión del Grupo 3.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°49: Reducción de resistencia a compresión del Hormigón del Grupo 3 Sumergido en Agua Residual Doméstica.

Tabla Resumen						
Grupo	Aditivo	Tiempo de Sumersión en Agua Residual Doméstica (d)	f'c prom (MPa) Sumergido en Agua Residual Doméstica	f'c prom (MPa) Patrón	Variación de Resistencia a Compresión (%)	
Grupo 3	Sika WT-200 P	30	45,69	46,47	1,68	Reducción
Grupo 3	Sika WT-200 P	60	45,49	46,22	1,57	Reducción
Grupo 3	Sika WT-200 P	90	43,91	46,32	5,22	Reducción
Grupo 3	Sika WT-200 P	120	46,29	46,53	0,51	Reducción
Grupo 3	Sika WT-200 P	180	47,08	46,92	-0,35	No Existe Reducción

Fuente: Elaboración Propia.

Según los resultados obtenidos en las probetas del grupo 3 con aditivo Sika WT-200 P podemos observar una reducción entre las resistencias a compresión promedio de las probetas sumergidas en agua residual con las probetas patrón a los 30, 60, 90, 120 días, al ser pequeña la diferencia entre las resistencias a compresión promedio y al ser una reducción ascendente a lo largo del estudio no se podría asegurar o descartar una reducción en la resistencia a compresión, ya que este valor podría deberse por la variación de resistencias a compresión que existe entre probetas de una misma población.

Las probetas del grupo 4 fueron revestidas con aditivo Sikaguard 63 CL (véase Anexo 3)

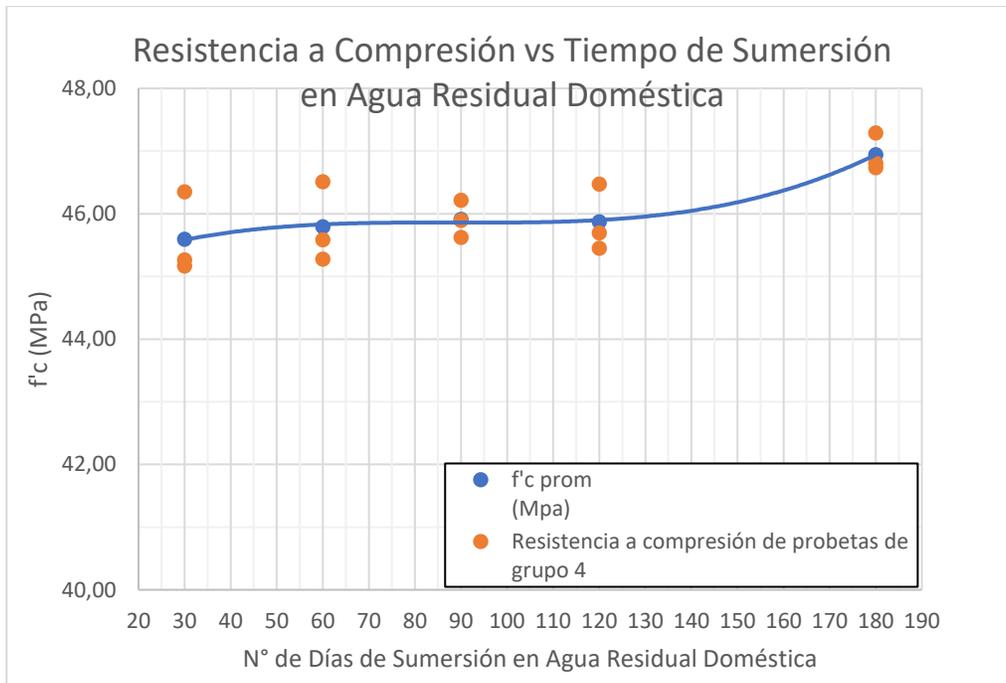


Figura N°39: Gráfica de Dispersión de las Muestras del Grupo 4.
Fuente: Elaboración Propia.

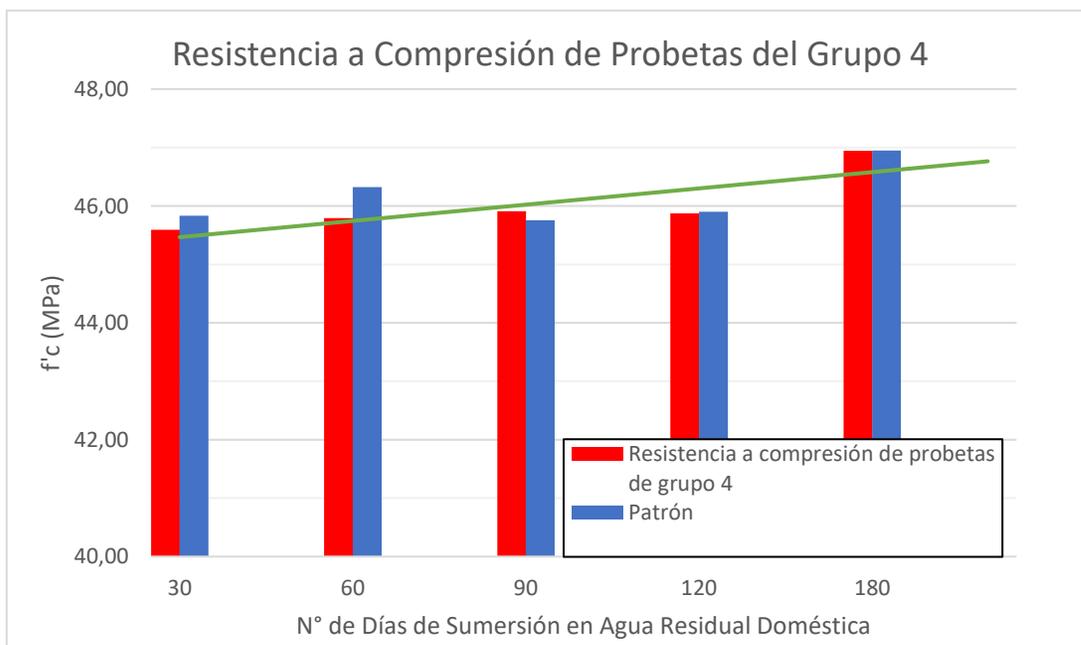


Figura N°40: Gráfica de Barras de la Resistencia Media a Compresión del Grupo 4.
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°50: Reducción de resistencia a compresión del Hormigón del Grupo 4 Sumergido en Agua Residual Doméstica.

Tabla Resumen						
Grupo	Aditivo	Tiempo de Sumersión en Agua Residual Doméstica (d)	f'c prom (MPa) Sumergido en Agua Residual Doméstica	f'c prom (MPa) Patrón	Variación de Resistencia a Compresión (%)	
Grupo 4	Sikaguard 63 CL	30	45,59	45,83	0,52	Reducción
Grupo 4	Sikaguard 63 CL	60	45,79	46,32	1,15	Reducción
Grupo 4	Sikaguard 63 CL	90	45,91	45,75	-0,34	No Existe Reducción
Grupo 4	Sikaguard 63 CL	120	45,87	45,90	0,06	Reducción
Grupo 4	Sikaguard 63 CL	180	46,94	46,95	0,01	Reducción

Según los resultados obtenidos en las probetas del grupo 4 con aditivo Sikaguard 63 CL podemos observar una reducción entre las resistencias a compresión promedio de las probetas sumergidas en agua residual con las probetas patrón a los 30,60,120,180 días, la reducción no es creciente durante el tiempo de estudio por lo que se descarta que hubiese una reducción en la resistencia a compresión y que este valor puede deberse a una falla en alguna probeta.

Las probetas del grupo 5 no contenían ningún aditivo (véase Anexo 3)

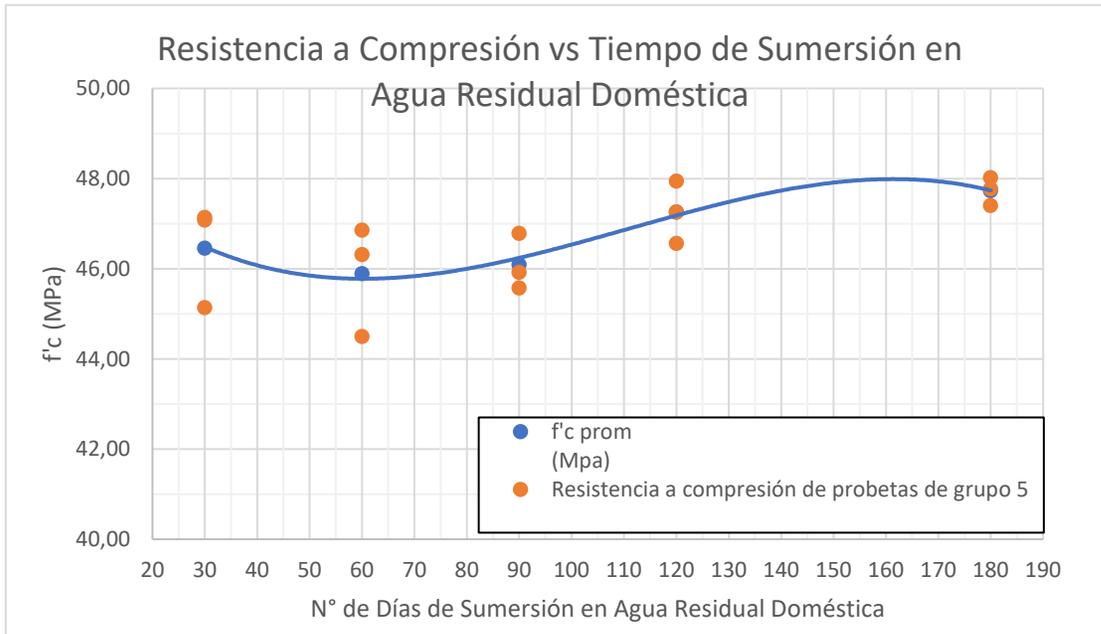


Figura N°41: Gráfica de Dispersión de las Muestras del Grupo 5

Fuente: Elaboración Propia.

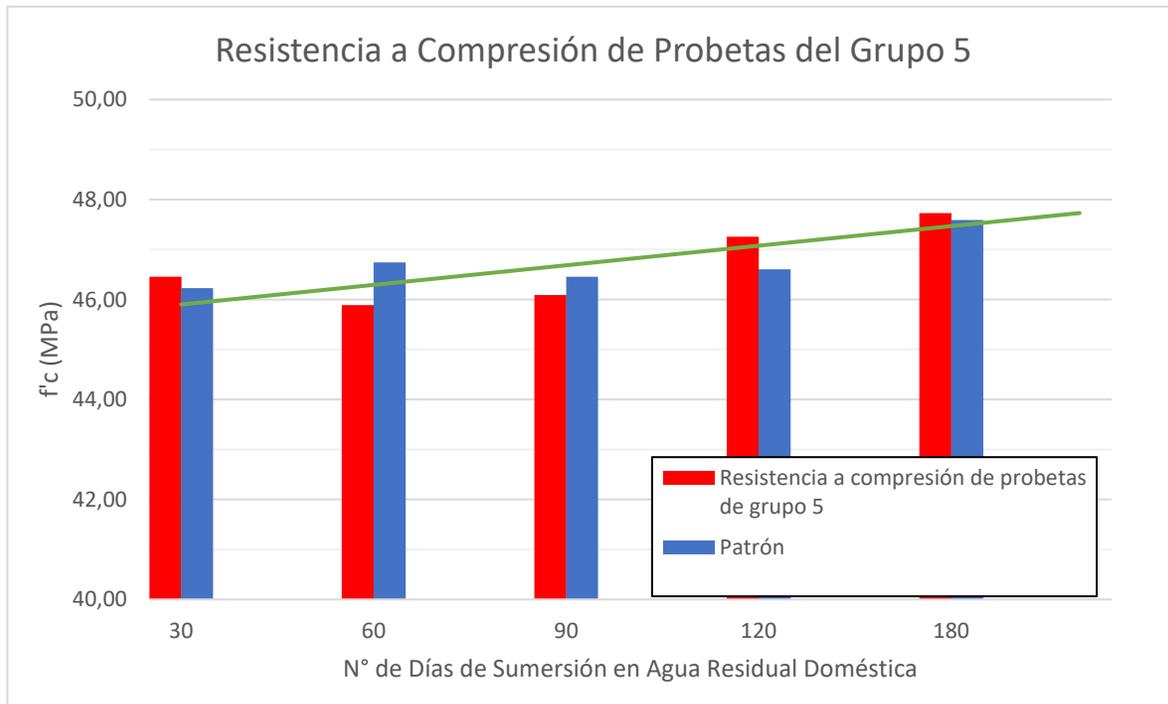


Figura N°42: Gráfica de Barras de la Resistencia Media a Compresión del Grupo 5.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°51: Reducción de resistencia a compresión del Hormigón del Grupo 5 Sumergido en Agua Residual Doméstica.

Tabla Resumen						
Grupo	Aditivo	Tiempo de Sumersión en Agua Residual Doméstica (d)	f'c prom (MPa) Sumergido en Agua Residual Doméstica	f'c prom (MPa) Patrón	Variación de Resistencia a Compresión (%)	
Grupo 5	Sin aditivo	30	46,45	46,23	-0,49	No Existe Reducción
Grupo 5	Sin aditivo	60	45,89	46,74	1,82	Reducción
Grupo 5	Sin aditivo	90	46,09	46,45	0,78	Reducción
Grupo 5	Sin aditivo	120	47,26	46,61	-1,40	No Existe Reducción
Grupo 5	Sin aditivo	180	47,73	47,59	-0,29	No Existe Reducción

Fuente: Elaboración Propia.

Según los resultados obtenidos en las probetas del grupo 5 podemos observar una reducción entre las resistencias a compresión promedio de las probetas sumergidas en agua residual con las probetas patrón a los 60, 90 días, al no ser constante la reducción a lo largo de todo el estudio se descartar que exista una reducción en la resistencia a compresión.

5.2. Resultados y Análisis de Agua Residual Doméstica.

Para ver todos los resultados de las muestras (Véase anexo 5).

Tabla N°52: Resultados de Medición de Parámetros de Agua Residual Doméstica.

PARÁMETROS			LIMITES	PROMEDIO				
Ref.	Descripción	Unidad	Ley Medio Ambiente 1333	03/12/2021	17/01/2022	11/02/2022	14/03/2022	01/04/2022
1	Temperatura	°C	40°C	24,4	25,5	23,3	23,9	-
2	pH	Unidades de pH	6.0 < pH < 9.0	6,6	6,7	6,7	6,6	-
3	Sulfatos	mg/l	75	33,1	-	50,8	42,1	41,714
4	Cloruros	mg/l	100	63,2	-	63,8	84,8	69,522

Fuente: Elaboración Propia.

Nota: En fecha 17/01/2022 Se tomaron muestras de agua de residual para el análisis de Sulfatos y Cloruros, pero por motivos de extravió de la muestra por parte del laboratorio no se obtuvo el análisis.

Con los resultados obtenidos de Temperatura, pH, Sulfato y Cloruro podemos concluir que el agua residual que llega a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales San Luis ubicada ciudad de Tarija se clasifica como agua residual doméstica, cumpliendo con los límites establecidos por la Ley Medio Ambiente 1333.

Tabla N°53: Resultados de Medición de Parámetros de Agua Residual Doméstica.

PARÁMETROS			Composición típica del agua residual doméstica bruta Concentración (Metcalf & Eddy)			PROMEDIO			
Ref.	Descripción	Unidad	DEBÍL	MEDIA	FUERTE	03/12/2021	17/01/2022	11/02/2022	14/03/2022
5	Solidos totales disueltos	mg/l	250,0	500,0	850,0	537,0	518,0	437,0	498,0

Fuente: Elaboración Propia.

Con los resultados obtenidos de Solidos Totales Disueltos podemos concluir que el agua residual que llega a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales San Luis ubicada ciudad de Tarija tiene una composición típica encontrada en aguas residuales domésticas según (Metcalf & Eddy). Clasificando los Solidos Totales Disueltos con una concentración entre Media y Fuerte.

Tabla N°54: Resultados de Medición de Parámetros de Agua Residual Doméstica.

PARÁMETROS			PROMEDIO				
Ref.	Descripción	Unidad	03/12/2021	17/01/2022	11/02/2022	14/03/2022	01/04/2022
6	Conductividad	µcm	1076,0	1033,0	875,0	999,5	
7	Carbonatos	mg/l	-	-	-	nd	nd

Fuente: Elaboración Propia.

En los resultados obtenidos de la tabla N°54 notamos que no se encuentran Carbonatos en las aguas residuales este fenómeno se puede presentar por las algas que se encuentran en las aguas de la laguna facultativa como se puede observar en la figura N°45, estas algas usan el ion de bicarbonato como fuente de carbono requerido para su crecimiento, este proceso hace que el pH tenga variaciones durante el día, cuando el pH aumenta aumentan los carbonatos e hidróxidos, si el agua contiene suficiente calcio este se precipitará como carbonato y la remoción del carbonato en el agua residual impide que el pH continúe aumentado.

Analizando los valores obtenidos del pH en Tabla N°52 podemos ver que este valor oscila entre un pH neutro a uno levemente ácido, este comportamiento propicia el desplazamiento de los carbonatos.

Al iniciar la investigación no existía plantas acuáticas como se puede observar en la Figura N°43 por lo que la laguna se clasificaba como laguna anaerobia, al transcurrir 30 días después se puede observar en la Figura N°44 como estas plantas están empezando a proliferar en la laguna convirtiéndose de una laguna anaerobia a una laguna facultativa.



Figura N°43: Laguna PTAR San Luis en por el Mes de Noviembre del 2021.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura N°44: Laguna PTAR San Luis por el Mes de Enero del 2022.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura N°45: Laguna PTAR San Luis por el Mes de Abril del 2022.
Fuente: Elaboración Propia.

Al analizar resultados obtenidos de los Sulfatos clasifica como una exposición a sulfatos insignificantes según la tabla N°3.

No obstante, esto no indica que el agua residual doméstica sea inofensiva para el hormigón, porque a cualquier perturbación química que se presente en el agua residual puede generar cambios en su composición química del agua pudiendo provocar reacciones adversas para el hormigón.

5.3. Análisis del Rendimiento de los Aditivos Impermeabilizantes

Los aditivos impermeabilizantes de la empresa Sika rindieron satisfactoriamente en proteger al hormigón de forma exitosa el único aditivo que no soporto estar en aguas residuales domésticas es el Sikatop 107 Seal, se vio un desprendimiento parcial a los 30 días de sumersión en agua residual doméstica y hasta los 120 días de sumersión se vio un desprendimiento casi total de aditivo dejando expuesto al hormigón.



Figura N°46: Probeta de Hormigón con Aditivo Sikatop 107 Seal Después de 30 Días de Sumersión.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura N°47: Probeta de Hormigón con Aditivo Sikatop 107 Seal Después de 60 Días de Sumersión.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura N°48: Probeta de Hormigón con Aditivo Sikatop 107 Seal Después de 90 Días de Sumersión.

Fuente: Elaboración Propia.

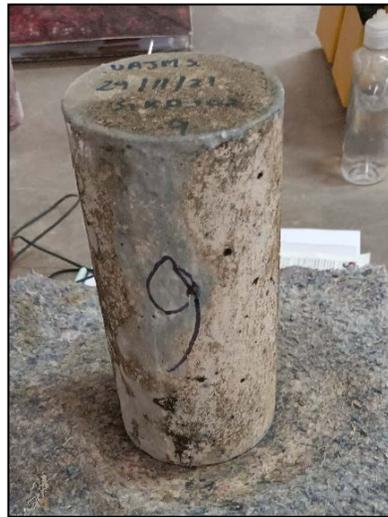


Figura N°49: Probeta de Hormigón con Aditivo Sikatop 107 Seal Después de 120 Días de Sumersión.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura N°50: Probeta de Hormigón con Aditivo Sikaguard Antiácido Después de 30 Días de Sumersión.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura N°51: Probeta de Hormigón con Aditivo Sikaguard Antiácido Después de 60 Días de Sumersión.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura N°52: Probeta de Hormigón con Aditivo Sikaguard Antiácido Después de 90 Días de Sumersión.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura N°53: Probeta de Hormigón con Aditivo Sikaguard Antiácido Después de 120 Días de Sumersión.

Fuente: Elaboración Propia.

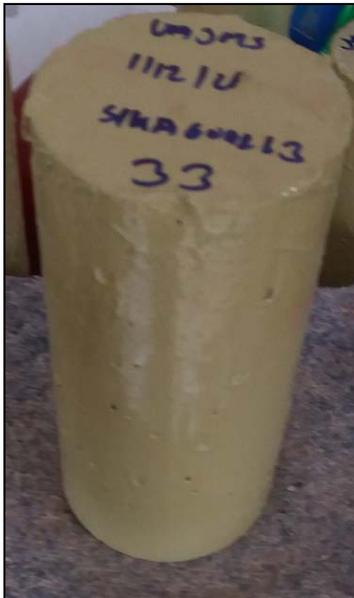


Figura N°54: Probeta de Hormigón con Aditivo Sikaguard 63 CL Después de 30 Días de Sumersión.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura N°55: Probeta de Hormigón con Aditivo Sikaguard 63 CL Después de 60 Días de Sumersión.

Fuente: Elaboración Propia.

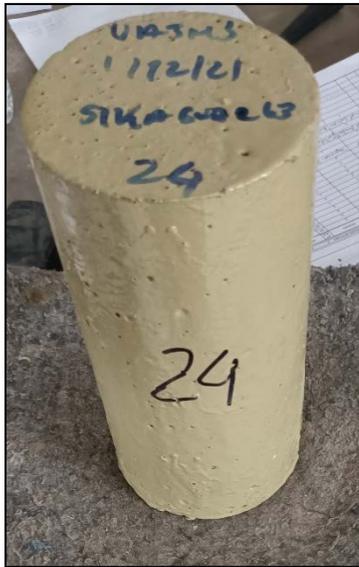


Figura N°56: Probeta de Hormigón con Aditivo Sikaguard 63 CL Después de 90 Días de Sumersión.

Fuente: Elaboración Propia.

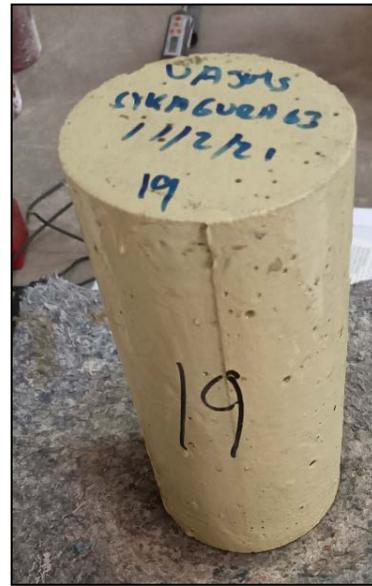


Figura N°57: Probeta de Hormigón con Aditivo Sikaguard 63 CL Después de 120 Días de Sumersión.

Fuente: Elaboración Propia.

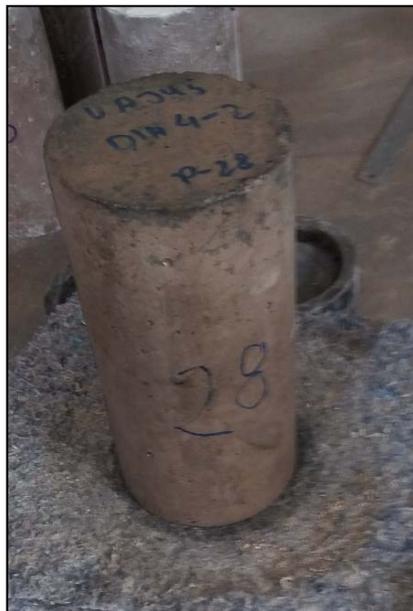


Figura N°58: Probeta de Hormigón con Aditivo Sika WT-200P Después de 30 Días de Sumersión.

Fuente: Elaboración Propia.

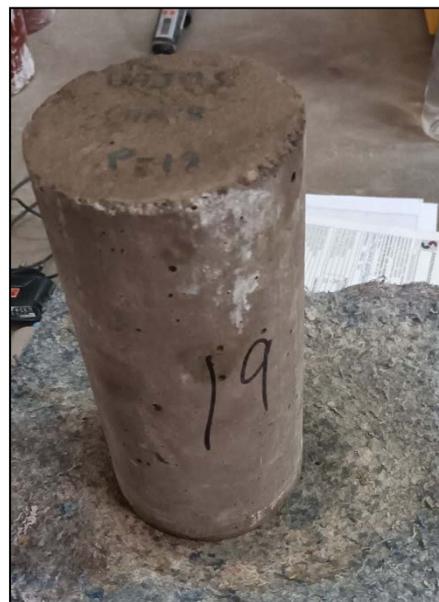


Figura N°59: Probeta de Hormigón con Aditivo Sika WT-200P Después de 60 Días de Sumersión.

Fuente: Elaboración Propia.

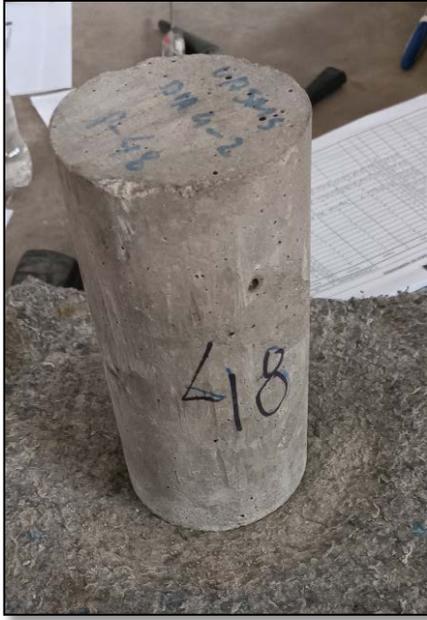


Figura N°60: Probeta de Hormigón con Aditivo Sika WT-200P Después de 90 Días de Sumersión.

Fuente: Elaboración Propia.

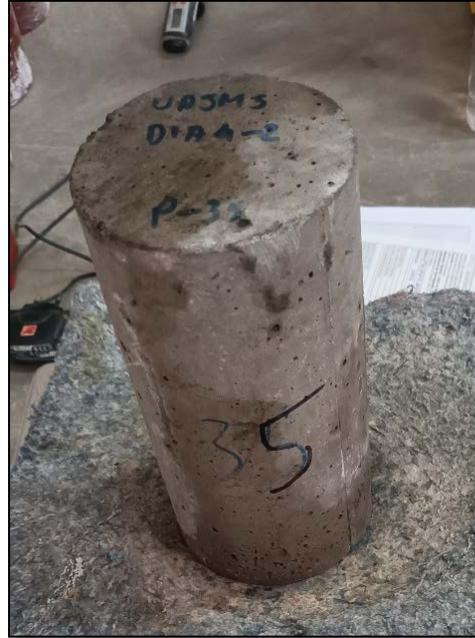


Figura N°61: Probeta de Hormigón con Aditivo Sika WT-200P Después de 120 Días de Sumersión.

Fuente: Elaboración Propia.

5.4. Análisis de Imágenes Microscópicas de Probetas Sumergidos 180 Días En Agua Residual Doméstica

Con ayuda de la Ing. Myrian Barrero se analizó bajo el microscopio la superficie del concreto de las probetas que han estado sumergidos en agua residual doméstica por 180 días como se muestra en la figura N°62.



Figura N°62: Análisis de Probetas de Hormigón en Microscopio

Fuente: Elaboración Propia.

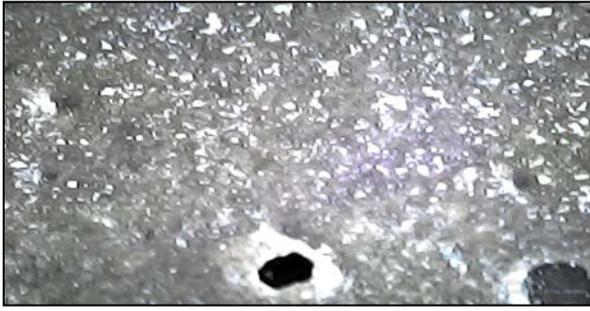


Figura N°63: Imagen de Superficie de Probeta Patrón sin aditivo en Microscopio
Fuente: Elaboración Propia



Figura N°64: Imagen de Superficie de Probeta Patrón sin aditivo en Microscopio

Fuente: Elaboración Propia



Figura N°65: Imagen de Superficie de Probeta Sin Aditivo en Microscopio Después de 180 Días de Sumersión en Agua Residual Doméstica
Fuente: Elaboración Propia



Figura N°66: Imagen de Superficie de Probeta Sin Aditivo en Microscopio Después de 180 Días de Sumersión en Agua Residual Doméstica
Fuente: Elaboración Propia

Al comparar las imágenes podemos notar una leve corrosión en superficie de la probeta que han estado sumergido por 180 días en agua residual doméstica.



Figura N°67: Imagen de Superficie de Probeta Con Aditivo Sika WT 200 P en Microscopio Después de 180 Días de Sumersión en Agua Residual Doméstica

Fuente: Elaboración Propia



Figura N°68: Imagen de Superficie de Probeta Con Aditivo Sika WT 200 P en Microscopio Después de 180 Días de Sumersión en Agua Residual Doméstica

Fuente: Elaboración Propia

En las imágenes N°67 y N°68, podemos observar el mismo patrón que las probetas sin aditivo una leve corrosión superficial, la propiedad del aditivo Sika WT 200 P es actuar como un auto - sellador de microfisuras por cristalización, al ser este un daño externo por corrosión y no un daño interno en los poros del hormigón el aditivo no puede proteger de estos daños superficiales.



Figura N°69: Imagen de Superficie de Probeta Con Aditivo Sikatop 107 Seal en Microscopio Después de 180 Días de Sumersión en Agua Residual Doméstica

Fuente: Elaboración Propia



Figura N°70: Imagen de Superficie de Probeta Con Aditivo Sikatop 107 Seal en Microscopio Después de 180 Días de Sumersión en Agua Residual Doméstica

Fuente: Elaboración Propia

En las imágenes N°69 podemos observar pequeños puntos color rojo el cual podría significar que se está formando pequeños depósitos de sulfuro de mercurio.



Figura N°71: Imagen de Superficie de Probeta Con Aditivo Sikaguard Antiácido en Microscopio Después de 180 Días de Sumersión en Agua Residual Doméstica

Fuente: Elaboración Propia



Figura N°72: Imagen de Superficie de Probeta Con Aditivo Sikaguard Antiácido en Microscopio Después de 180 Días de Sumersión en Agua Residual Doméstica

Fuente: Elaboración Propia

En las figuras N°71 y N°72 podemos observar como el aditivo Sikaguard Antiácido cubre perfectamente toda la superficie de la probeta protegiendo al hormigón de cualquier daño externo y además sellando por completo todos los poros del hormigón.



Figura N°73: Imagen de Superficie de Probeta Con Aditivo Sikaguard 63 cl en Microscopio Después de 180 Días de Sumersión en Agua Residual Doméstica

Fuente: Elaboración Propia



Figura N°74: Imagen de Superficie de Probeta Con Aditivo Sikaguard 63 cl en Microscopio Después de 180 Días de Sumersión en Agua Residual Doméstica

Fuente: Elaboración Propia

En las figuras N°73 y N°72 podemos observar como en los poros del hormigón se han formado pequeños depósitos que parece ser sulfuro ferroso, ya que el aditivo Sikaguard 63 cl a revestido por completo el hormigón este está protegiendo al concreto entre cualquier compuesto dentro los poros del concreto.

5.5. Resultados de Ensayo de Penetración de Agua Bajo Presión

Tabla N°55: Resultados de Ensayo de Penetración de Agua Bajo Presión. (Véase Anexo 4).

Tipo de Hormigón:	H-35 con aditivo Sika top 107 Seal											
	Probeta 1		Clase de exposición ambiental Qa y Qb Norma UNE-EN 12390-8				Probeta 2		Clase de exposición ambiental Qa y Qb Norma UNE-EN 12390-8			
	Limites		Profundidad Máxima "mm"		Profundidad media "mm"		Limites		Profundidad Máxima "mm"		Profundidad media "mm"	
DESCRIPCION	Medición 1	Medición 2	Profundidad Máxima "mm"		Profundidad media "mm"		Medición 1	Medición 2	Profundidad Máxima "mm"		Profundidad media "mm"	
Profundidad de penetración (mm)	0,0	0,0	50,0 cumple		30,0 cumple		0,0	0,0	50,0 cumple		30,0 cumple	
Profundidad máxima de penetración (mm)	0,0						0,0					
Tipo de Hormigón:	H-35 con aditivo Sikaguard Antiácido											
	Probeta 1		Clase de exposición ambiental Qa y Qb Norma UNE-EN 12390-8				Probeta 2		Clase de exposición ambiental Qa y Qb Norma UNE-EN 12390-8			
	Limites		Profundidad Máxima "mm"		Profundidad media "mm"		Limites		Profundidad Máxima "mm"		Profundidad media "mm"	
DESCRIPCION	Medición 1	Medición 2	Profundidad Máxima "mm"		Profundidad media "mm"		Medición 1	Medición 2	Profundidad Máxima "mm"		Profundidad media "mm"	
Profundidad de penetración (mm)	0,0	0,0	50,0 cumple		30,0 cumple		0,0	0,0	50,0 cumple		30,0 cumple	
Profundidad máxima de penetración (mm)	0,0						0,0					
Tipo de Hormigón:	H-35 con aditivo Sikaguard 63 CL											
	Probeta 1		Clase de exposición ambiental Qa y Qb Norma UNE-EN 12390-8				Probeta 2		Clase de exposición ambiental Qa y Qb Norma UNE-EN 12390-8			
	Limites		Profundidad Máxima "mm"		Profundidad media "mm"		Limites		Profundidad Máxima "mm"		Profundidad media "mm"	
DESCRIPCION	Medición 1	Medición 2	Profundidad Máxima "mm"		Profundidad media "mm"		Medición 1	Medición 2	Profundidad Máxima "mm"		Profundidad media "mm"	
Profundidad de penetración (mm)	0,0	0,0	50,0 cumple		30,0 cumple		0,0	0,0	50,0 cumple		30,0 cumple	
Profundidad máxima de penetración (mm)	0,0						0,0					
Tipo de Hormigón:	H-35 sin aditivo											
	Probeta 1		Clase de exposición ambiental Qa y Qb Norma UNE-EN 12390-8				Probeta 2		Clase de exposición ambiental Qa y Qb Norma UNE-EN 12390-8			
	Limites		Profundidad Máxima "mm"		Profundidad media "mm"		Limites		Profundidad Máxima "mm"		Profundidad media "mm"	
DESCRIPCION	Medición 1	Medición 2	Profundidad Máxima "mm"		Profundidad media "mm"		Medición 1	Medición 2	Profundidad Máxima "mm"		Profundidad media "mm"	
Profundidad de penetración (mm)	17,0	16,0	50,0 cumple		30,0 cumple		15,0	15,0	50,0 cumple		30,0 cumple	
Profundidad máxima de penetración (mm)	16,5						15,0					
Tipo de Hormigón:	H-35 con aditivo Sika WT-200P											
	Probeta 1		Clase de exposición ambiental Qa y Qb Norma UNE-EN 12390-8				Probeta 2		Clase de exposición ambiental Qa y Qb Norma UNE-EN 12390-8			
	Limites		Profundidad Máxima "mm"		Profundidad media "mm"		Limites		Profundidad Máxima "mm"		Profundidad media "mm"	
DESCRIPCION	Medición 1	Medición 2	Profundidad Máxima "mm"		Profundidad media "mm"		Medición 1	Medición 2	Profundidad Máxima "mm"		Profundidad media "mm"	
Profundidad de penetración (mm)	13,0	13,0	50,0 cumple		30,0 cumple		0,5	0,5	50,0 cumple		30,0 cumple	
Profundidad máxima de penetración (mm)	13,0						0,5					

Analizando la tabla N°54 podemos concluir que el aditivo que obtuvo una mayor penetración de agua fue el Sika WT-200 P en una probeta se obtuvo una penetración máxima de 13 mm en una probeta y en otra solo 0,5 mm por lo que podría ser que la probeta 1 haya tenido alguna falla, la probeta sin aditivo obtuvo una penetración máxima de 16,5 mm.

5.6. Precios Unitarios Hormigón H-35 con Aditivos Impermeabilizantes

A modo de establecer costo de la elaboración de probetas de hormigón H-35 con los aditivos impermeabilizantes (Sika WT-200 P, Sikaguard 63 CL, Sikatop 107 Seal, Sikaguard Antiácido), a continuación, se presenta los precios unitarios con el fin de tener una visión de cuál podría llegar a ser el costo de elaboración. (Véase Anexo 6).

5.6.1. Análisis de Costo de Hormigón H-35 con Aditivos Impermeabilizantes por m³

Tabla N °56: Costos de Hormigón H-35 con Aditivos Impermeabilizantes por m³.

Resumen de Costo de Hormigón H-35 con Aditivos Impermeabilizantes (Bs)				
Hormigón H-35	Hormigón H-35 con Aditivo Sikaguard Antiácido	Hormigón H-35 con Aditivo Sikatop 107 Seal	Hormigón H-35 con Aditivo Sika WT-200 P	Hormigón H-35 con Aditivo Sikaguard 63 CL
1.009,90	23.689,25	13.814,20	1.686,45	17.357,69

Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla N°56 podemos observar un gran incremento en el costo de un hormigón H-35 sin ningún aditivo impermeabilizante contra una que sí contiene algún aditivo impermeabilizante, siendo el costo del hormigón H-35 con aditivo Sika WT-200 P el de menor costo, por ser un aditivo que se integra dentro la mezcla con una proporción del dos por ciento de la cantidad de cemento en la mezcla, por lo que no requiere grandes cantidades para su dosificación, al contrario de los aditivos Sikatop 107 Seal, Sikaguard Antiácido y Sikaguard 63 CL los cuales son recubrimientos por lo que cantidad requerida está en función de la superficie que se desea impermeabilizar incrementó los costos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Los parámetros de pH, Sulfato, Cloruro, Sólidos Totales, obtenidos de las muestras de agua residual que llegan a la PTAR de San Luis, cumple con las características para ser clasificado como agua residual doméstica con una agresividad por sulfatos insignificante según norma boliviana NB 1225001-1 para el hormigón.
- A través de los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a compresión de las probetas sumergidas en agua residual por 30, 60, 90, 120, 180 días, se llegó a la conclusión que al parecer podría existir una leve reducción en la resistencia a compresión en algunas probetas, pero en ninguno de los grupos se ha visto un deterioro significativo o alguna tendencia decreciente progresiva en la resistencia a compresión en el tiempo de estudio, por lo que no se puede asegurar o negar una reducción en la resistencia a compresión, por lo que se requiere más investigaciones con un mayor tiempo de estudio.
- Por las imágenes obtenidas con el microscopio de la superficie del hormigón de las probetas sumergidas por 180 días, se puede ver una leve corrosión sobre su superficie del hormigón sin ningún aditivo, aunque la corrosión era tan leve que no tenía ningún efecto sobre la resistencia a compresión, en un mayor tiempo podría verse un daño considerable.
- A pesar de que el aditivo Sika WT-200 P tenga una tecnología de auto - sellado de micro fisuras por cristalización, este no puede proteger al hormigón ataques químicos que produzcan corrosión superficial como se pudo observar en las imágenes N°67 y N°68 del microscopio, no obstante nos brinda una buena impermeabilización por lo cual protege al hormigón de daños internos que se podrían producir por reacciones químicas dentro del poro del hormigón.
- Un aditivo impermeabilizante sin resistencia químicos como ser el Sikatop 107 Seal puede brindar una cierta protección en un corto tiempo de aproximadamente 60 días

en agua residual doméstica, por lo cual no es recomendable su uso bajo ninguna circunstancia para estructuras que contengan agua residual doméstica.

- De todos los aditivos impermeabilizantes el aditivo Sikaguard 63 CL es el aditivo que nos brinda la mejor protección al menor costo, observando las figuras N°73 y N°74 que corresponden a probetas con el aditivo Sikaguard 63 CL podemos observar que brinda una protección similar al aditivo Sikaguard Antiácido pero a un menor costo, en la trabajabilidad nos brinda un mayor tiempo de secado a comparación del aditivo Sikaguard Antiácido brindando un mayor tiempo para la correcta distribución del aditivo sobre la superficie deseada.
- Al realizar un análisis de agua residual doméstica para determinar su agresividad no solo se debe analizar el agua, también analizar los gases y los lodos para tener un panorama más claro de los procesos químicos que está pasando, a si intuir lo que podría pasar en un futuro con la estructura a si prever y reducir los riesgos.
- La hipótesis que se planteó inicial fue que el hormigón sin aditivos impermeabilizantes sufriría una disminución del quince por ciento en su resistencia a compresión en 180 días es nula ya que el hormigón sin aditivo tras estar expuesto en agua residual doméstica por 180 días no sufrió una disminución en su resistencia a compresión, posiblemente esto se deba a un corto tiempo de estudio ya que en las imágenes microscópicas se puede observar una leve corrosión pero al ser tan pequeña no incide en la resistencia a compresión.
- Inicialmente se planteó que el hormigón con aditivos impermeabilizantes con resistencia química no sufriría una disminución su resistencia a compresión en 180 días tras culminar la investigación se concluye que la hipótesis es válida, ya que este hormigón no sufrió ningún daño tras estar expuesto en agua residual doméstica por 180 días, esto fue posible gracias a la resistencia química que contiene los aditivos y a su vez a la impermeabilización que evito el ingreso de agentes químicos por los poros del hormigón.
- Finalizada la investigación se puede concluir que 180 días de estudio es un tiempo corto para poder negar o afirmar la existencia de daños considerables en el hormigón.

Recomendaciones

- Antes de elaborar un hormigón que será expuesto en agua residual doméstica, se recomienda realizar un análisis del agua, lodos y gases provenientes del agua residual para tener una visión más clara de que compuestos químicos activos están en el agua residual doméstica y ha sí poder analizar sus posibles reacciones.
- Antes del colocado de los aditivos Sikaguard 63 CL, Sikaguard Antiácido el hormigón debe estar seco internamente, en caso de probetas elaboradas en laboratorio se recomienda mínimo dejar una semana fuera del agua después del fraguado y lejos de cualquier tipo de humedad para emplear los aditivos.
- Para el colocado de los aditivos Sikaguard 63 CL, Sikaguard Antiácido se recomienda realizarlo en horas muy tempranas de la mañana o en las noches para evitar el acelerado endurecimiento del aditivo.
- En caso de querer investigar el comportamiento que tiene el hormigón que está sumergido en agua residual domestica se recomienda estudios mayores a un año para obtener datos más confiables.
- En base a los resultados se sugiere para futuras investigaciones estudios con diferentes relaciones agua/cemento mayores o iguales a 0,45 en estudio de un mínimo de 5 años para poder para complementar está investigación y profundizar sobre el tema.