

CAPITULO I

ANTEDECENTES

Generalidades

El departamento de Tarija presenta una diversidad de climas las temperaturas extremas en zonas alto andinas del departamento, con temperaturas muy bajas que llegan hasta 12.5 °C bajo cero en las estaciones de otoño e invierno prolongándose por varias horas del día, haciendo que las obras civiles (puentes, canales, pavimento rígido, etc.) se vean afectadas. La exposición del hormigón a constantes ciclos de hielo y deshielo, son causas frecuentes en el deterioro prematuro de las estructuras expuestas, como por ejemplo puede causar fisuras o descascaramiento del mismo, también afecta en su fase de endurecimiento (no llega a su resistencia de diseño), y las estructuras no cumplen con su vida útil para los que fueron diseñadas y construidas. Donde estos daños causan pérdidas económicas debido a reparaciones o demoliciones (por no llegar a su resistencia), y esto desequilibra el análisis costo beneficio de todo proyecto, etc. Para lograr esta condición y garantizar que las estructuras mantengan sus prestaciones básicas de servicio (funcionalidad, estética y seguridad) es necesario enfocar el diseño de hormigón no solo desde el punto de vista resistente, sino también desde el punto de vista durable frente a los agentes medioambientales y agresivos a los que puedan estar sometidas. La durabilidad de las estructuras de hormigón es un tema complejo en el que interviene un número elevado de variables, asociadas a orígenes distintos: tipo de proyecto, ejecución, materiales, uso, mantenimiento, curado, materiales de protección y medio en el que se encuentra la estructura, entre otras cosas. Existen varias investigaciones referidas sobre los efectos negativos que tiene el hormigón expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo, donde dan soluciones referentes a su estructura del hormigón como es la incorporación de aire, uso de aditivos, fibras de polipropileno, etc. Pero hay pocas investigaciones referentes a la protección que se le da al hormigón en su fase de endurecimiento en climas fríos, se hace necesario la búsqueda de nuevas metodologías que nos ayuden a mitigar los efectos que

causan estos cambios de temperatura. Así también como su correcto uso en obra; el perfeccionamiento del hormigón no se ha detenido, ya que al mismo tiempo se han creado aditivos que se utilizan para mejorar o cambiar una o varias propiedades del hormigón.

1.1 El problema

Disminución de las características mecánicas del hormigón expuesto a ciclos de congelamiento. Según Becker el problema principal es causado debido a los constantes ciclos de hielo y deshielo ya que un solo ciclo no causaría mayores daños en la estructura; y el principal daño que presenta es la superficie del hormigón en forma de grietas y/o fisuras, y es debido a que los poros capilares contienen agua y por el efecto de los ciclos de hielo y deshielo provocan tensiones de tracción internas.

1.1.1 Planteamiento

En la actualidad existe una demanda cada vez más creciente de infraestructura capaz de garantizar seguridad, comodidad, economía y además ser amigable con el medio ambiente, es por eso que el uso de una nueva metodología en el proceso de curado y protección del hormigón que sea capaz de resolver el problema que ocasiona el clima frío se hace cada vez más necesario; con la finalidad de estudiar la pérdida de las características mecánicas del hormigón por inadecuada protección y curado se elaboraron en laboratorio probetas de hormigón que fueron ensayadas a los 28 días, se plantean los siguientes estudios:

- 1) Someter al hormigón a procesos de congelamiento y deshielo.
- 2) Proteger al hormigón con papel y polietileno.
- 3) Utilizar un aditivo incorporador de aire en la elaboración del hormigón. .

1.1.2 Formulación

En esta investigación se protegerá al hormigón para que pueda mejorar su resistencia a la compresión cuando este expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo; también se utilizara un aditivo incorporador de aire en la elaboración del hormigón

La palabra durabilidad, ha venido ganando cada vez más importancia por el hecho de que se ha descubierto que entre mayor sea la capacidad del material de resistir los ataques de carbonatación, cloruros, sulfatos, y en especial al congelamiento y deshielo, mayor será el tiempo de servicio del mismo. Esto tiene gran importancia en la economía ya que se invierte mucho dinero en mantenimiento y rehabilitación de obras civiles.

1.1.3 Sistematización

En esta investigación se diseñara una dosificación de un hormigón patrón el cual no será sometido a ciclos de congelamiento y deshielo, luego se elaborara diferentes grupos de probetas: se fabricara hormigón sin y con aire incorporado, se protegerá al hormigón con papel y polietileno; en la noche serán sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo, durante el día donde será curado sumergido en agua a temperatura ambiente; las probetas serán ensayadas solo a resistencia a la compresión a los 28 días de edad.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar, determinar y verificar experimentalmente (a través de ensayos en laboratorio) el proceso de protección, curado y su influencia en la resistencia a la compresión del hormigón expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar la resistencia a la compresión del hormigón patrón.
- Determinar la resistencia a la compresión del hormigón sometido a ciclos de congelamiento y deshielo, protegido con polietileno con papel.
- Determinar la resistencia a la compresión del hormigón con la adición de un aditivo incorporador de aire.
- Determinar la resistencia a la compresión del hormigón sometido a ciclos de congelamiento y deshielo con la adición de un aditivo incorporador de aire.
- Analizar la importancia de proteger al hormigón, a diferentes edades de elaborado, durante el proceso de congelamiento y deshielo en la resistencia del hormigón.

1.3 Justificación

Establecer la importancia de la protección en el proceso de curado del hormigón, expuestos a ciclos de congelamiento y deshielo, para que la resistencia a la compresión no sea afectada; y analizar la importancia de adicionar un aditivo incorporador de aire al hormigón cuando está sometido a bajas temperaturas.

1.3.1 Académica

Profundizar y aplicar los conocimientos adquiridos sobre las características mecánicas de los agregados como determinar cada una de ellas, diseñar la dosificación de acuerdo a normas establecidas y determinar las propiedades del hormigón fresco y endurecido.

Analizar la importancia de proteger al hormigón en climas fríos para que la resistencia a compresión no sea vea afectada, cuando este expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo, y analizar la adición de un aditivo incorporar aire al hormigón.

1.3.2 Técnica

Se realizara y se analizará de forma experimental a las probetas de hormigón con y sin aire incorporado; sin protección y protegidas con polietileno y papel cuando están sometidas a ciclos de congelamiento y deshielo.

1.3.3 Social

Hacer un aporte técnico a los profesionales del área, empresas y sociedad vinculadas en la construcción en diferentes obras civiles, en regiones de nuestro departamento con temperaturas bajas que son inferiores a bajo cero grados, poner en conocimiento que hay técnicas de curado, y como proteger el hormigón de las bajas temperaturas, que existen materiales de protección, y aditivos incorporadores de aire que mejoran la resistencia a la compresión del hormigón sometido a ciclos de congelamiento y deshielo, así evitar modificaciones de la resistencia del hormigón.

Si se protege bien al hormigón de las bajas temperaturas este tendrá una mayor vida útil.

1.4 Alcance del proyecto

En la presente investigación se utilizara materiales que protejan al hormigón en su fase de endurecimiento con el objetivo de disipar el impacto que ocasiona los ciclos de congelamiento y deshielo en la resistencia del hormigón. En esta investigación, se desea proveer información técnica de las afectaciones a las características mecánicas en el hormigón expuesto a bajas temperaturas. Para el diseño de dosificación de mezclas de hormigón, se realizaran diferentes pruebas de laboratorio a los agregados bajo las normas de ASTM que exige el procedimiento de dosificación de mezclas de hormigón ACI - 211 se determinará la resistencia a la compresión del hormigón

1.5 Hipótesis de la investigación

Qué el hormigón sometido a ciclos de congelamiento y deshielo, durante el proceso de curado reduce su resistencia a compresión y efectividad de la estructura.

El hormigón protegido con polietileno y papel mejora su resistencia a compresión cuando está sometido a ciclos de congelamiento y deshielo.

El hormigón elaborado con un aditivo incorporador de aire mejora su resistencia a compresión cuando está sometido a ciclos de congelamiento y deshielo.

Las variables de las hipótesis son las siguientes:

a) Las variables independientes a manipular son:

- ✓ Temperatura: serán por ciclos de congelamiento y deshielo.
- ✓ Tipo de curado y protección del hormigón: será con los siguientes materiales, polietileno con papel.
- ✓ Adición de un aditivo incorporador de aire.
- ✓ Tiempo de protección y curado del hormigón.
- ✓ Tiempo de rotura de las probetas.

b) La variable dependiente es:

- ✓ Resistencia a la compresión.

1.6. Tipo de investigación

Los tipos de investigación son las maneras en las que un estudio se puede abordar en concordancia con los aspectos que lo definen, tales como el título, la profundidad, objetivos, tratamiento de las muestras y los datos, tipo de inferencia, manipulación de las variables. En este sentido la escogencia de un tipo de investigación permitirá mejorar la comprensión del tema Para Cerda (2005) el método cuantitativo se refiere a los proyectos de investigación que se van a trabajar con aspectos medibles en cantidades, como cifras, datos y muy posiblemente con estadísticas. Por su finalidad de estudio, el tipo de investigación de acuerdo a las variables propuestas, el objetivo general y objetivos específicos la investigación es de tipo correlacional, aplicada y experimental.

Investigación Correlacional: Es, debido a que la misma tiene como objetivo evaluar la relación existente entre la resistencia a la compresión del hormigón (diseño patrón) con el tipo de curado y protección de las probetas de diseño experimental.

Una investigación correlacional es un método experimental que, básicamente busca determinar cuál es la relación que existe entre variables

Investigación Aplicada: El estudio en cuestión tiene como propósito determinar una característica importante en el hormigón (resistencia a la compresión) sometida a ciclos de congelamiento y deshielo, donde se utilizaron las normas A.C.I y ASTM.

Según Carrasco (2007, p. 125), indica que la investigación aplicada se distingue por tener propósitos prácticos inmediatos bien definidos, es decir, se investiga para actuar, transformar, modificar o producir cambios en un determinado sector de la realidad.

Investigación Experimental: Para realizar esta investigación es necesario recurrir a procedimientos experimentales para demostrarla. Para ello se hizo probetas de hormigón en laboratorio, luego se hizo la rotura de las mismas para determinar la resistencia a la compresión. “La investigación experimental se presenta mediante la manipulación de una variable experimental no comprobada, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de escribir de qué modo o por que causa se produce una situación o acontecimiento particular” (Tamayo, 2004, p. 47).

1.6.1 Nivel de Investigación

Para este caso de nuestro proyecto, se realizó una investigación de nivel exploratorio – descriptivo, ya que luego de dosificar y producir probetas de hormigón es necesario manipularlos en máquinas para determinar la resistencia a la compresión de las diferentes probetas de hormigón, luego se describe y se analizó lo que sucede con los datos y resultados bajo condiciones de las diferentes variables.

La investigación exploratoria se realiza, “cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado, del cual se tienen dudas o no se ha abordado antes.” (Sampieri, Fernández y Baptista, 2010, p.79) De acuerdo a Sánchez y Reyes (2006, p. 57), la investigación descriptiva también conocida como la investigación estadística, consiste en describir los datos y características de la población o fenómeno en estudio.

CAPITULO II

MARCO O FUNDAMENTO TEORICO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 helada

Es un fenómeno meteorológico externo que consiste en un descenso de la temperatura ambiente a niveles inferiores al punto de congelación y hace que el agua o vapor que está en el aire se congele, depositándose en forma de hielo que cubre los campos

2.1.2 Nevada

La nieve es la precipitación de pequeños cristales de hielo que se forman por congelación del agua, y llegan a la tierra en forma de copos blancos. Existen casos en los que, aun a temperaturas bajo cero, los cristales pueden estar rodeados de una delgada capa de agua líquida y cuando chocan unos con otros incrementan su tamaño en forma de grandes copos.

2.1.3 Friaje

El friaje es un fenómeno climático caracterizado por la caída repentina y brusca de la temperatura acompañada de fuertes vientos durante varias semanas alcanzándose temperaturas de varios grados bajo cero durante días enteros. Este fenómeno atmosférico es producido por vientos helados de hasta 40 Km/h.

2.1.4 Definición de clima frío

El clima frío se define como un período donde la temperatura promedio diaria desciende a 4°C en más de tres días sucesivos

El Comité 306 del ACI (American Concrete Institute) define el clima frío como un período donde por más de 3 días consecutivos, las siguientes condiciones existan:

- La temperatura promedio del aire es menor de 4 °C.
- La temperatura del aire no es mayor de 10 °C (50 °F) durante más de la mitad de un período cualquiera de 24 horas.

2.2 Fundamentos sobre el hormigón

El hormigón es el material constituido por la mezcla en ciertas proporciones de cemento, agua, agregados y opcionalmente aditivos. Los agregados son esencialmente inertes y sirven como materiales de relleno, el hormigón inicialmente denota una estructura plástica y moldeable, y que posteriormente adquiere una consistencia rígida con propiedades aislantes y resistentes, lo que lo hace un material ideal para la construcción

2.2.1 Propiedades del hormigón

Según Sánchez (1996), el hormigón posee diferentes propiedades durante el proceso de cambio, (hormigón blando al hormigón endurecido) este se va manifestando cuando hay disminución gradual de la fluidez y manejabilidad, existen tres etapas fundamentales y esenciales; en la primera en donde el hormigón es un material blando y moldeable, la segunda etapa es el tiempo de fraguado o endurecimiento del hormigón, en este se evidencia el incremento progresivo de la rigidez y la tercera etapa corresponde al endurecimiento que lo conduce a la adquisición de propiedades mecánicas y de otra índole, cuyo desarrollo suele representarse mediante la evolución de la resistencia.

2.2.1.1 Propiedades del Hormigón Fresco

Según Niño (2010), las propiedades en estado fresco del hormigón deben permitir que se llene adecuadamente las formaletas, así como también obtener una masa homogénea sin grandes burbujas de aire o agua atrapada.

2.2.1.1.1 Trabajabilidad o Manejabilidad

Está definida por la mayor o menor dificultad para el mezclado, transporte, colocación y compactación del hormigón. Su evaluación es relativa, por cuanto depende realmente de las facilidades manuales o mecánicas de que se disponga durante las etapas del proceso, ya que un hormigón que puede ser trabajable bajo ciertas condiciones de colocación y compactación, no necesariamente resulta tal si dichas condiciones cambian. Está influenciada principalmente por la pasta, el contenido de agua y el equilibrio adecuado entre los agregados gruesos y finos, que produce en el caso óptimo una suerte de continuidad en el desplazamiento natural y/o inducido de la masa.

Por lo general un hormigón es trabajable en la mayoría de circunstancias, cuando durante su desplazamiento mantiene siempre una película de mortero de al menos 1/4" sobre el agregado grueso. El método tradicional de medir la trabajabilidad ha sido desde hace

muchos años el "Slump" o asentamiento con el cono de Abrams, ya que permite una aproximación numérica a esta propiedad del hormigón, sin embargo debe tenerse clara la idea que es más una prueba de uniformidad que de trabajabilidad, pues es fácilmente demostrable que se pueden obtener hormigón con igual slump pero trabajabilidades notablemente diferentes para las mismas condiciones de trabajo.

- ❖ **Ensayo de asentamiento.** Es una medida de la consistencia del hormigón fresco que se refiere al grado de fluidez de la mezcla, esto indica que tan seca o fluida está cuando se encuentra en estado plástico, según Niño (2010), no constituye por sí misma una medida directa de trabajabilidad, cohesividad, facilidad de colocación y terminación. Se realiza por medio del cono de Abrams y el método de ensayo que esta descrito en la Norma ASTM C 143.

Tabla 2.1: Consistencia de los Hormigones Frescos

Consistencia	Asiento en cono de Abrams (cm)	Compactación
Seca	0– 2	Vibrado
Plástica	3 – 5	Vibrado
Blanda	6 – 9	Picado con barra
Fluida	10 – 15	Picado con barra



Figura 2.1: Cono de Abrams

El revenimiento (asentamiento en cono de Abrams) se usa como medida de la consistencia y de la humedad del hormigón. Un hormigón de bajo revenimiento tiene una consistencia rígida o seca. Si la consistencia es muy seca y rígida, la colocación y compactación del hormigón serán difíciles y las partículas más grandes de agregados pueden separarse de la mezcla, sin embargo, no debe suponerse que una mezcla más húmeda y fluida es más trabajable Si la mezcla es muy húmeda, pueden ocurrir segregación y formación de huecos.

2.2.1.1.2 Segregación La tendencia de separación de los materiales que constituyen el hormigón puede presentarse por una mezcla seca y por una mezcla muy húmeda.

2.2.1.1.3 Exudación o sangrado. El agua de mezclado que tiende a elevarse a la superficie de una mezcla de hormigón recién colocado. Es causada por la sedimentación (asentamiento) de las partículas sólidas (cemento y agregados) y simultáneamente la subida del agua hacia la superficie. El sangrado es normal y no debería disminuir la calidad

del hormigón adecuadamente colocado, acabado y curado, un poco de sangrado es útil en el control de la fisuración por contracción (retracción) plástica.

Por otro lado, si es excesiva aumenta la relación agua cemento cerca de la superficie; puede ocurrir una capa superficial débil y con poca durabilidad, particularmente si se hace el acabado cuando el agua de sangrado aún está presente. Los vacíos y bolsas de agua pueden ocurrir, resultantes del acabado prematuro de la superficie del hormigón.

2.2.1.1.4 Masa unitaria. Se define como la cantidad de materia contenida en un metro cúbico de hormigón fresco (kg/m^3); esto depende del tamaño máximo del agregado, granulometría y densidad de los agregados, como también de la cantidad de aire atrapado, el contenido de agua y cemento en la elaboración del hormigón.

2.2.1.1.5 Contenido de aire. Está presente en todos los tipos de hormigón, localizados en los poros no saturables de los agregados y formando burbujas entre los componentes del hormigón, pues es atrapado durante el mezclado.

2.2.1.1.6 Contenido de agua. El principal factor que afecta la manejabilidad es el contenido de agua de la mezcla, el cual se expresa en kilogramo o litro.

2.2.1.1.7 Fraguado del hormigón

El fraguado del hormigón se define como la aparición de rigidez en el hormigón fresco y precede a la ganancia de resistencia del hormigón, que continúa durante largo tiempo si se presentan las condiciones favorables. Por lo tanto, se considera que la etapa de fraguado se inicia en el momento en que el cemento entra en contacto con el agua y termina cuando la pasta se convierte en cuerpo rígido capaz de resistir una presión arbitraria. se refiere a un estado de transición entre la fluidez y la rigidez. Los procesos de fraguado y posterior endurecimiento de la pasta de cemento, tienen lugar a través de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus componentes. Para que estos procesos tengan lugar es imprescindible la presencia de agua, sobre la cual actúan fuerzas físicas de adsorción y capilaridad, y fenómenos químicos de hidrólisis e hidratación, también dependen entre otros factores, de la concentración y de la temperatura.

2.2.1.1.7.1 Tiempos de fraguado del hormigón

Según Niño (2010), las condiciones de tiempo y temperatura durante el proceso de fraguado son factores que afectan la resistencia del hormigón. En climas fríos, el proceso de hidratación del cemento es más lento debido a que el medio ambiente le “roba” parte

del calor de hidratación con el subsiguiente retardo del tiempo de fraguado y, por tanto, la adquisición de resistencia tarda. Por el contrario, cuando la temperatura es elevada, se aumenta la resistencia a muy temprana edad, pero se disminuye aproximadamente después de los 7 días. La razón de este fenómeno, ocurre porque una rápida hidratación inicial de los granos de cemento es superficial y parece formar pasta con una estructura física más pobre o posiblemente más porosa. Los tiempos de fraguado indican si la pasta está o no sufriendo reacciones normales de hidratación, el sulfato (del yeso u otras fuentes) en el cemento regula el tiempo del fraguado del hormigón.

a) Fraguado inicial

Típicamente, el fraguado inicial ocurre entre dos y cuatro horas después del colado, y nos define el límite de manejo, o sea el tiempo por el cual el hormigón fresco ya no puede ser mezclado adecuadamente. El fraguado inicial indica el momento en el que la masa ha adquirido tanta rigidez que no puede ser vibrado sin dañar su estructura interna.

b) Fraguado final

El fraguado final ocurre entre cuatro y ocho horas después del colado, y está definido por el desarrollo de la resistencia que va adquiriendo el hormigón, que se genera con gran velocidad. La Norma ASTM C-403 proporciona el método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado de mezclas de hormigón.

2.2.1.1.7.2 Falso fraguado y fraguado rápido del hormigón

El endurecimiento prematuro es el desarrollo temprano de la rigidez en las características de trabajabilidad o plasticidad de la pasta, mortero u hormigón de cemento. Esto incluye ambos fraguados; el falso y el rápido.

El falso fraguado se evidencia por la pérdida considerable de plasticidad, inmediatamente después del mezclado, sin ninguna evolución de calor. Desde el punto de vista de la colocación y manejo, las tendencias de fraguado falso en el cemento no van a causar problemas, si se mezcla el hormigón por un tiempo más largo que el usual o si el hormigón es remezclado sin añadirle agua adicional antes de su transporte y colocación. El falso fraguado ocurre cuando una gran cantidad de sulfatos se deshidrata en el molino de cemento formando yeso; a causa del endurecimiento prematuro es la rápida cristalización de las estructuras en forma de aguja con el yeso secundario.

El mezclado complementario sin la adición del agua rompe estos cristales y restablece la trabajabilidad del hormigón.

El fraguado rápido se evidencia por una pérdida rápida de trabajabilidad en la pasta, mortero u hormigón a una edad aún temprana, esto es normalmente acompañado de una evolución considerable de calor, resultante principalmente de la rápida reacción de los aluminatos; Si la cantidad o forma adecuadas de sulfato de calcio no están disponibles para controlar la hidratación del aluminato de calcio, el endurecimiento es aparente. El fraguado rápido no se lo puede disipar, ni tampoco se puede recuperar la plasticidad por el mezclado complementario sin la adición de agua; el endurecimiento correcto resulta de un equilibrio cuidadoso de los compuestos de sulfato y aluminato, bien como de temperatura y finura adecuadas de los materiales (las cuales controlan la hidratación y la disolución). La cantidad de sulfato transformado en yeso tiene un efecto significativo.

2.2.1.2 Propiedades del hormigón endurecido

Un hormigón en estado endurecido las propiedades mecánicas son las principales exigencias para un adecuado funcionamiento, aunque no solo la capacidad mecánica para soportar esfuerzos hace a un hormigón adecuado para la construcción, sino que además se debe generar una composición idónea, que lo haga apto para resistir con éxito durante toda la vida útil las acciones detrimentales inherentes a las condiciones en que opera la estructura, que pueden generar deterioro prematuro del hormigón.

2.2.1.2.1 Resistencia a la compresión

Es la capacidad que tiene el hormigón para soportar las cargas que se apliquen sin agrietarse o romperse. La resistencia a la compresión del hormigón a ciclos de congelamiento deshielo depende de la edad a la que se produce el primer ciclo.

La resistencia a la compresión es una de las características más importante del hormigón, desde el momento en que los granos del cemento inician su proceso de hidratación comienzan las reacciones de endurecimiento, que se manifiestan inicialmente con el fraguado y continúan luego con una evidente ganancia de resistencias, al principio de forma rápida y disminuyendo la velocidad a medida que transcurre el tiempo; la velocidad de ganancia de resistencia mecánica del hormigón depende de numerosas variables y resultan muy diferentes entre unos y otros hormigones, de esas variables, la más importante puede ser la composición química del cemento, la misma finura, la relación

agua cemento, que cuanto más baja sea favorece la velocidad, la calidad intrínseca de los agregados, las condiciones de temperatura ambiente y la eficiencia de curado. Esto hace que los índices de crecimiento de la resistencia no pueden ser usados en forma segura o precisa con carácter general para cualquier hormigón. Como el hormigón suele aumentar su resistencia a la compresión, a los 28 días es la medida más común de esta propiedad.

Tabla 2.2: Hormigón Según Resistencia

HORMIGON	RESISTENCIA (MPa)
Hormigón normal	≤ 42
Hormigón de alta resistencia	>42 y ≤ 100
Hormigón de ultra alta resistencia	>100

Fuente: NIÑO HERNANDEZ Jairo

2.2.1.2.2 Resistencia a la tracción. Por su naturaleza, el hormigón es bastante débil a esfuerzos de tracción, esta propiedad conduce generalmente a que no se tenga en cuenta en el diseño de estructuras normales. La tracción tiene que ver con el agrietamiento del hormigón, a causa de la contracción inducida por el fraguado o por los cambios de la temperatura, ya que estos factores generan esfuerzos internos de tracción (Niño 2010).

2.2.1.2.3 Resistencia a la flexión. Los elementos sometidos a flexión tienen una zona sometida a compresión y otra región en que predominan los esfuerzos de tracción. Este factor es importante en estructuras de hormigón simple, como las losas de pavimentos (Sánchez, 1996; Rivva, 2000; Niño 2010).

2.2.1.2.4 Resistencia a cortante. La resistencia del hormigón a esfuerzos cortantes es baja, sin embargo, generalmente es tenida en cuenta para el diseño estructural.

Este tipo de esfuerzos es importante en el diseño de vigas y zapatas, en donde se presentan en valores superiores a la resistencia del hormigón (Rivva, 2000; Niño 2010).

2.2.1.2.5 Durabilidad La norma A.C.I define la durabilidad del hormigón de cemento Portland como su capacidad para resistir la acción de las condiciones ambientales, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro tipo de deterioro, y otras condiciones de servicio, de tal manera que sus características y propiedades mecánicas se mantengan a lo largo de su vida útil.

Las principales causas que produce el deterioro del hormigón son:

- ❖ **Ataques químicos.** Debido a ácidos, sulfatos, reacción álcali-agregado, oxidación y corrosión de las armaduras, formación de sales expansivas y carbonatación de los diferentes elemento de la estructura.
- ❖ **Ataques físicos.** Debido a congelamiento y deshielo, humedecimiento y secado, abrasión, asientos del terreno, erosión, fisuración y fuegos
- ❖ **Ataques biológicos.** Debido a la vegetación, microorganismos, aguas residuales depósitos de polvo y agentes derivados de la descomposición orgánica.

El hormigón debe ser capaz de resistir la intemperie, acción de productos químicos y desgastes, a las cuales estará sometido en el servicio.

2.2.1.2.6 Permeabilidad.- Es la capacidad de permitir el paso de un fluido (líquido o gas) a través del hormigón, la permeabilidad depende de la porosidad de la pasta y de los agregados, del grado de compactación y de los capilares producidos por el agua de exudación, siendo afectado por la diferencia de presiones entre un lado y otro del elemento estructural, el espesor del material, la naturaleza del fluido (líquido o gas) y el tiempo durante el cual se presentan dichas condiciones.

2.2.1.2.7 Cambios de volumen.- El hormigón al ser un material inerte no estable volumétricamente siendo la principal causa de agrietamiento en las estructuras de hormigón, presenta cambios físicos, mecánicos y químicos.

Los químicos se producen como consecuencia de reacciones detrimentales que se generan interna y/o externamente, cuyas manifestaciones ordinarias son expansiones locales que tienden a destruir el hormigón, debido a ello, no se les considera como parte del comportamiento natural del hormigón; los cambios de volumen de origen físico por agentes fenomenológicos se presentan por cambios de temperatura (contracción y dilatación) y por pérdida de agua en el proceso de fraguado (contracción por secado).

Los cambios de volumen de origen físico por carácter mecánico son debidos al aumento de deformación que se presencia bajo esfuerzos constantes, el cual puede ser varias veces mayor que la deformación instantánea causada por la aplicación de carga; afirmaciones realizadas por Niño (2010).

2.3 Fundamentos sobre los componentes del hormigón

2.3.1 Cemento

Cemento es el producto resultante de la molienda final del Clinker proveniente de la calcinación a fusión incipiente de mezclas homogéneas y balanceadas de materiales calcáreos y arcillosos, el cemento está compuesto de materiales artificiales de naturaleza inorgánica y mineral. El cemento, listo para su empleo, es un polvo gris verdoso, que dentro del sector de la construcción, constituye un material de alto valor estructural, porque al ser mezclado con agua adquiere una solidez pétreo, se trata también de un aglomerante hidráulico por excelencia que amasados con el agua fraguan y endurecen tanto expuestos como sumergidos en agua.

2.3.1.1. Composición química del cemento

Como el cemento es una mezcla de muchos compuestos, resulta impráctica su representación con una fórmula química. Las materias primas principales para elaboración del cemento portland son la cal, sílice, alúmina y óxido de hierro actúan entre sí en el horno para formar una serie de productos o composiciones más complejas.

La composición química del cemento se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 2.4: Composición Química del Cemento

Cal combinada	CaO	62.5 %
Sílice	SiO	21.0 %
Alúmina	Al O	6.5 %
Azufre	S O	2.0 %
Magnesia	Mg O	2.0 %
Pérdida al fuego	P F	2.0 %
Residuo Insoluble	R I	1.0 %
Alcalisis	Na₂O+K₂O	0.5 %

Fuente: Norma Boliviana 011

No obstante hay cuatro compuestos que constituyen más del 90% del peso del cemento, cada uno de los cuatro compuestos principales del cemento portland contribuye en el comportamiento del cemento, cuando pasa del estado plástico al endurecido después de la hidratación. Y estos compuestos principales son:

- El silicato tricálcico (C_3S). Es el que produce la alta resistencia inicial del cemento Portland hidratado. La reacción del C_3S con agua desprende gran cantidad de calor (calor de hidratación). La rapidez de endurecimiento de la pasta de cemento es directamente proporcional con el calor de hidratación.
- El silicato bicálcico (C_2S). Es el causante principal de la resistencia posterior de la pasta de cemento, este componente aporta pocas resistencias a edades tempranas.
- El aluminato tricálcico (C_3A). El yeso agregado al cemento Portland durante la trituración o molienda en el proceso de fabricación se combina con el C_3A para controlar el tiempo de fraguado.
- El ferro aluminato tetracálcico (C_4AF). Es semejante al C_3A , porque se hidrata con rapidez y sólo desarrolla baja resistencia. (Abanto Castillo 2009)

2.3.1.2. Tipos de cemento

La Especificación Normalizada para Cemento Portland ASTM C-150 clasifica a los cementos de la siguiente manera:

a) Tipo I Cemento de uso general: Es un cemento apropiado para todos los usos donde las propiedades especiales de otros cementos no sean necesarias. Sus empleos en hormigón incluyen pavimentos, pisos, edificios en hormigón armado, puentes, tanques, embalses, tubería, unidades de mampostería y productos de hormigón prefabricado y precolado, por lo que es recomendable su uso en ambientes no agresivos.

b) Tipo II Moderada resistencia a los sulfatos: El cemento Tipo II se usa donde sean necesarias precauciones contra el ataque por sulfatos y ambientes agresivos.

Se lo puede utilizar en estructuras normales o en elementos expuestos a suelos o agua subterránea, donde la concentración de sulfatos sea más alta que la normal pero no severa. El cemento Tipo II tiene propiedades de moderada resistencia a los sulfatos porque contiene no más del 8% de aluminato tricálcico (C_3A).

c) Tipo III Alta resistencia inicial: El cemento Tipo III ofrece alta resistencia a edades tempranas, normalmente una semana o menos. Este cemento es química y físicamente similar al cemento Tipo I, a excepción de que sus partículas se muelen más finamente. Es usado cuando se necesita remover las cimbras (encofrados) lo más temprano posible o cuando la estructura será puesta en servicio rápidamente. En clima frío, su empleo permite una reducción en el tiempo de curado. A pesar de que se puede usar un alto contenido de

cemento Tipo I para el desarrollo temprano de la resistencia, el cemento Tipo III puede ofrecer esta propiedad más fácilmente y más económicamente.

d) Tipo IV Bajo calor de hidratación: El cemento Tipo IV se usa donde se deban minimizar la tasa y la cantidad de calor generado por la hidratación. Por lo tanto, este cemento desarrolla la resistencia en una tasa más lenta que otros tipos de cemento.

Se puede usar el cemento Tipo IV en estructuras de hormigón masivo, tales como grandes presas por gravedad, donde la subida de temperatura derivada del calor generado durante el endurecimiento deba ser minimizada.

e) Tipo V Alta Resistencia a los sulfatos: El cemento Tipo V se utiliza en hormigones expuestos a la acción severa de sulfatos, principalmente donde el suelo y el agua subterránea tienen alta concentración de sulfatos, su desarrollo de resistencia es más lento que en el cemento tipo I. La alta resistencia a los sulfatos del cemento tipo V se atribuye al bajo contenido de aluminato tricálcico, no excediendo a 5%. El uso de baja relación agua/materiales cementantes y baja permeabilidad son fundamentales para el buen desempeño de cualquier estructura expuesta a los sulfatos.

2.3.1.3 Peso específico del cemento

El peso específico, o gravedad específica, se define como el peso del cemento por unidad de volumen de los sólidos o partículas, excluyéndose el aire entre las partículas; el peso específico del cemento varía muy poco de un tipo de cemento a otro siendo su rango de: 3 - 3.15 gr/cm³. Si bien el peso específico del cemento no indica la calidad del mismo, se emplea en el diseño y control de mezclas de hormigón

2.3.2 Agregados

Los agregados son el mayor constituyente del hormigón, generalmente componen más del 70% del material en un metro cúbico de hormigón y son los que hacen que este sea un material económico de construcción (Sánchez, 1996; Rivva, 2000; Niño 2010).

En combinación con esta proporcionan resistencia mecánica, al hormigón en estado endurecido y controlan los cambios volumétricos que normalmente tienen lugar durante el fraguado del cemento. Los agregados conforman el esqueleto granular del hormigón y son el elemento mayoritario ya que representan el 80-90% del peso total de hormigón.

Según Niño (2010), la calidad de los agregados está determinada por el origen, por su distribución granulométrica, densidad, forma y superficie. Se han clasificado en agregado

grueso y agregado fino, fijando un valor en tamaño de 4,76 mm a 0,075 mm para el fino o arena y de 4,76 mm en adelante para el grueso. Frecuentemente, la fracción de agregado grueso es subdividida dentro de rangos, tales como, 4,76 mm a 19 mm para la gravilla y de 19 mm a 51 mm para la grava.

2.3.2.1 Clasificación según su procedencia

Pueden ser naturales o artificiales. Los agregados naturales se obtienen de arrastres fluviales, glaciares y de canteras de diversas rocas y los agregados artificiales son los que se obtienen a partir de procesos industriales, tales como, arcillas expandidas, escorias de alto horno, Clinker, entre otros (Sánchez, 1993; Niño, 2010).

2.3.2.2 Clasificación según su tamaño

La forma más empleada para clasificar los agregados naturales es según su tamaño (tabla N° 2.4), el cual varía desde fracciones de milímetros hasta varios centímetros en sección transversal. Esta distribución del tamaño de las partículas es lo que se le conoce con el nombre de granulometría de los agregados.

Tabla 2.4: Clasificación Según su Tamaño

Tamaño de las partículas en mm (Tamiz)	Denominación corriente	Clasificación	Clasificación como agregado para hormigón
< 0.002	Arcilla	Fracción muy fina	No recomendable
0.002 – 0.074 (N° 200)	Limo		
0.075 – 4.76 (N° 200) - (N° 4)	Arena	Agregado fino	Material apto para producir hormigón
4.76 – 19.1 (N° 4) – (3/4")	Gravilla	Agregado grueso	
19.1 – 50.8 (3/4") – (2")	Grava		
50.8 – 152.4 (2") – (6")	Piedra		

Fuente: Niño Hernández Jairo

2.3.2.3 Clasificación según su densidad

Según Sánchez (1996), esta depende de la cantidad de masa por unidad de volumen y del volumen de los poros, ya se trate de agregados naturales o artificiales. Esta distinción se hace porque afecta la densidad del hormigón (ligero, normal) que se desea producir.

Se define como el coeficiente del peso de un cuerpo por su volumen. Según como se aprecie este volumen, se obtendrá la densidad aparente cuando se considere el volumen de los poros y densidad real cuando se excluyan los mismos.

2.3.2.4 Propiedades de los agregados

Estas propiedades dependen principalmente de su naturaleza y se pueden conocer por medio de ensayos en el laboratorio, pues es importante conocer sus características para la selección del material, para esto se debe tener en cuenta el carácter de trabajo o a que va ir destinado el material, condiciones climáticas, factores como dureza, forma de partículas y granulometría; y economía.

2.3.2.4.1 Granulometría de los agregados.

El análisis granulométrico consiste en hacer pasar los agregados a través de una serie de tamices, que tienen aberturas cuadradas y cuyas características se ajustara a unos parámetros establecidos por norma. Es la distribución de los tamaños de las partículas que forman una masa de agregados y se determina mediante el análisis granulométrico.

Según Niño (2010), para obtener un buen hormigón, es necesario que la mezcla de arena y grava logre una granulometría que proporcione masa unitaria máxima, puesto que con esta condición el volumen de los espacios entre partículas es mínimo y por consiguiente la cantidad de pasta necesaria para pegarlas y para llenar los espacios entre ellas será mínimo, lo cual dará lugar a una mezcla de mejores condiciones técnicas y además, económicas. Los valores hallados se representan gráficamente en un sistema coordinado semi-logarítmico que permite apreciar la distribución acumulada. Cuando se representa la distribución granulométrica de la mezcla de agregados de pesos específicos que no difieren mucho, la granulometría es prácticamente igual sea la mezcla en peso o en volumen absoluto. La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado. La distribución de las partículas por tamaño tiene un notable efecto en la cantidad de agua necesaria para un hormigón hecho con un determinado agregado y por lo tanto influye en todas las propiedades del hormigón relacionadas con su contenido de

agua. La serie de tamices estándar ASTM para hormigón tiene la particularidad de que empieza por el tamiz de abertura cuadrada 4" y el siguiente tiene una abertura igual a la mitad de la anterior. A partir de la malla 3/8" se mantiene la misma secuencia, pero el nombre de las mallas se establece en función del número de aberturas por pulgada cuadrada. En la **Tabla 2.5**. Se consignan los tamices estándar de la norma ASTM.

Tabla 2.5: Tamaños nominales de abertura

AGREGADO	mm	ASTM
GRUESO	75	(3")
	50	(2")
	37,5	(1 1/2")
	25,0	(1")
	19	(3/4")
	12,5	(1/2")
	9,5	(3/8")
	6,3	(1/4")
FINO	4,75	(No 4)
	2.36	(No 8)
	2,0	(No 10)
	1,18	(No 16)
	0,6	(No 30)
	0,3	(No 50)
	0,15	(No 100)
0.075	(No 200)	

Fuente: Norma ASTM C 136

2.3.2.4.2 Forma de las partículas

La forma del agregado depende mucho del tipo de roca que lo origino y del sistema de trituración. La forma juega un papel muy importante en la fabricación del hormigón, debido a que la aptitud de compactación de la mezcla no solo depende de la granulometría del agregado sino también del grado de acomodamiento de las partículas, Niño (2010), afirma que la clasificación de las partículas pueden ser redondeadas, irregulares, angulares, escamosas, elongadas y escamosa-elongada.

2.3.2.4.3 Textura

Influye en la adherencia entre los agregados y la pasta de cemento fraguado, así como también, por su efecto sobre las propiedades del hormigón tales como, densidad,

resistencia a la compresión y a la flexión, cantidad requerida de agua, etc. Niño (2010), afirma que la textura de la partícula puede ser vítrea, lisa, granular, áspera, y aplanada.

2.3.2.4.4 Densidad

Esta depende directamente de la roca original de donde proviene y está definida como la relación entre la masa y el volumen de una masa determinada del agregado.

2.3.2.4.5 Porosidad

Se establece por medio del ensayo indirecto de la absorción de agua, entre más poroso, menos resistencia mecánica tiene. Se denomina absorción a la humedad del agregado cuando tiene todos sus poros saturados con agua pero la superficie del mismo está seca.

2.3.2.4.6 Propiedades mecánicas de los agregados

Las propiedades que estudian para la elección de un agregado son la dureza, resistencia, tenacidad y adherencia.

- a) **Dureza:** Depende de la constitución mineralógica, la estructura y la procedencia del agregado, esta propiedad se obtiene por medio de un ensayo denominado desgaste en la máquina de los ángeles.
- b) **Resistencia:** La resistencia del hormigón depende en gran parte de la resistencia del agregado, es por esto que se busca un agregado que en su proceso de explotación y trituración haya sido adecuada, cumpliendo con la norma.
- c) **Tenacidad:** Siendo la resistencia a la falla por impacto, esta depende netamente de la roca de origen.
- d) **Adherencia:** La interacción que existe en la zona de contacto del agregado-pasta, la cual es producida por fuerzas de origen físico-químico, ayuda a la resistencia del hormigón, pues a mayor adherencia mayor va a hacer los esfuerzos que puede resistir el hormigón.

2.3.2.5 Agregado grueso

Los agregados gruesos consisten en una grava o una combinación de gravas o agregado triturado cuyas partículas sean predominantemente mayores que 5 mm o sea retenidas en el tamiz N° 4, y generalmente entre 9.5 mm y 50 mm.

El agregado grueso es proveniente de la desintegración natural o mecánicas de las rocas y que cumple con los límites o requisitos establecidos en la norma ASTM C33.

Los agregados gruesos deben cumplir ciertas reglas para darles un uso ingenieril óptimo: deben consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y de otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento. Las partículas del agregado que sean desmenuzables o susceptibles de resquebrajarse son indeseables para la elaboración del hormigón. El agregado grueso puede ser grava, piedra chancada, etc.

Gravas.- Es el conjunto de fragmentos pequeños de piedra, provenientes de la disgregación natural de las rocas, por acción del congelamiento y deshielo y otros agentes atmosféricos, encontrándoseles corrientemente en canteras y lechos de ríos depositados en forma natural.

Piedra chancada.- Se le denomina así, al agregado grueso obtenido por trituración artificial de rocas o gravas. Como agregado grueso se puede usar cualquier clase de piedra partida que sea limpia, dura y resistente. (Abanto Castillo, 2009)



Figura 2.2: Agregado grueso

2.3.2.5.1 Granulometría de la grava

Granulometría es la distribución de los distintos tamaños de los granos que componen un árido tiene una importancia decisiva en las características del hormigón; el estudio de dicha distribución suele efectuarse mediante la curva granulométrica, que se determina cribando el árido a través de una serie normalizada de cribas y de tamices. Es en ese sentido, para determinar las características físicas de los agregados, se tienen varios métodos, estos son el análisis mecánico y el análisis químico.

Ya se menciono ampliamente que a mayor tamaño de las partículas del agregado sera menor el área de superficie que se va humedecer por unidad de masa.

Entonces concluimos que la granulometría es de vital importancia, porque, origina un óptimo contenido de agua y de pasta de cemento en la proporción del diseño de hormigón. El análisis mecánico es el que nos determina la distribución de los tamaños de partículas existentes tanto en el agregado grueso y fino, empleando tamices de abertura cuadrada, los datos obtenidos son de gran importancia, más que todo en la dosificación de la mezcla de hormigón.

Tabla 2.6: Requisitos Granulométricos de la ASTM C33 para Agregado Grueso

Número De Tamaño	Tamaño Nominal (Tamices con abertura cuadrada)	Cantidades más finas que Cada Tamiz de Laboratorio (Abertura Cuadrada), Porcentaje Masa											
		100mm (4")	90 mm (3½")	75 mm (3")	63 mm (2½")	50 mm (2")	37.5 mm (1½")	25 mm (1")	19 mm (¾")	12.5 mm (½")	9.5 mm (3/8")	4.75m m (No. 4)	2.36 mm (No. 8)
1	90 a 37.5 mm	100	90 a 100	...	25 a 60	...	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...
2	63 a 37.5 mm	...	...	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...
3	50 a 25 mm	...	...	...	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...
357	50 a 4.75 mm	...	...	...	100	95 a 100	...	35 a 70	...	10 a 30	...	0 a 5	...
4	37.5 a 19 mm	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	...	0 a 5	...	...
467	37.5 a 4.75 mm	...	...	...	...	100	95 a 100	...	35 a 70	...	10 a 30	0 a 5	...
5	25 a 12.5 mm	...	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	...	...
56	25 a 9.5 mm	...	...	...	...	...	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	...
57	25 a 4.75 mm	...	...	...	...	...	100	95 a 100	...	25 a 60	...	0 a 10	0 a 5
6	19 a 9.5 mm	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	...
67	19 a 4.75 mm	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	...	20 a 55	0 a 10	0 a 5
7	12.5 a 4.745 mm	...	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5
8	9.5 a 2.36 mm	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 a 100	10 a 30	0 a 5

Fuente: ASTM C33

➤ **Tamaño Máximo (T.M)**

Tamaño Máximo del agregado grueso está definido como la abertura que corresponde al menor tamiz por el que pasa toda la muestra de agregado grueso.

Granulometrías muy distintas pueden dar el mismo valor del tamaño máximo del agregado grueso. Ello debe tenerse en presente en la selección del agregado, de su granulometría y de las proporciones de la mezcla.

➤ **Tamaño Máximo Nominal (T.M.N)**

Tamaño Máximo Nominal del agregado grueso está definido como la abertura del tamiz inmediatamente superior a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado sea de 15% o más. Según la norma ACI, el Tamaño Máximo Nominal de agregado grueso no debe ser superior a ninguna de los siguientes parámetros:

- a) 1/5 de la menor separación entre los lados del encofrado.
- b) 1/3 de la altura de la losa, de ser el caso.
- c) 3/4 del espaciamiento mínimo libre entre las barras o alambres individuales de refuerzo, paquetes de barras, tendones individuales, paquetes de tendones o ductos.

Estas limitaciones se pueden omitir si se demuestra que la trabajabilidad y los métodos de compactación son tales que el hormigón no tenga la formación de cangrejas.

2.3.2.5.2 Peso unitario de la grava

Peso unitario.- Es frecuente citar el término densidad al referirse a los agregados, pero aplicado más bien en sentido conceptual, por definición, la densidad de un sólido es la masa por unidad de volumen de su porción impermeable, a una temperatura especificada, y la densidad aparente es el mismo concepto, pero utilizando el peso en el aire en vez de la masa. Ambas determinaciones suelen expresarse en gramos entre centímetro cúbico (gr/cm^3) y no son rigurosamente aplicadas en las pruebas que normalmente se utilizan en la tecnología del hormigón, salvo en el caso del cemento y otros materiales finamente divididos, cuando el agregado manifiesta un peso específico que es menor de 2.4, aproximadamente, esto suele ser motivo suficiente para dudar de su aptitud de producir hormigón con peso normal, y por consiguiente para poner en duda su calidad e indagar la causa. Si el bajo peso específico de la roca es una condición natural de acuerdo con su origen, y si el correspondiente peso unitario reducido en el hormigón no es una limitación objetable, existe la factibilidad de emplear el agregado si demuestra ser capaz de producir

hormigón con las propiedades requeridas. Si por otra parte, el bajo peso específico de los agregados es atribuible a un evidente estado de alteración de la roca, en principio lo pertinente es considerarlos inaceptables, a menos que por ser opción única se justifique hacer una investigación más amplia de sus posibilidades de uso.

Es relativamente frecuente que en el seno de un conjunto de agregados gruesos existan partículas sanas y partículas alteradas, de modo que la aceptabilidad del conjunto depende de la proporción en que estas últimas se encuentran.

Existe la posibilidad de beneficiar el agregado en estas condiciones, sometiéndolo a una trituración “selectiva” con el uso de ciertos equipos que actúan por impacto, los cuales trituran preferentemente las partículas alteradas por ser más suaves, y las reducen a fragmentos menores que se eliminan por tamizado; finalmente, el criterio para aceptar el agregado, se apoya en los resultados de otras pruebas. Para el peso unitario debemos conocer los conceptos de peso unitario suelto y compactado.

Peso unitario suelto (P.U.S)

Se usa invariablemente para la conversión de peso a volumen: es decir, para conocer el consumo de áridos por metro cúbico de hormigón.

$$P. U. S = \frac{\text{Peso del material suelto } (kg)}{\text{volumen del molde } (m^3)}$$

Peso unitario compactado (P.U.C).- Este valor se usará para el conocimiento de volúmenes de materiales apilados y que estén sujetos a acomodamientos o asentamientos provocados por el tránsito sobre ellos o por la acción del tiempo. También es de una utilidad extraordinaria para el cálculo del porcentaje de vacíos de los materiales.

$$P. U. C = \frac{\text{Peso del material compactada } (kg)}{\text{volumen del molde } (m^3)}$$

2.3.2.5.3 Peso específico y absorción de la grava

Peso específico.- El peso específico se define en la dosificación de hormigones, como la relación del peso de la muestra de un material en el aire, al peso del agua desplazado por el mismo, incluyendo sus poros permeables. Según sea que el peso en el aire se considere seco o en las condiciones de saturado y superficie seca, el peso específico se refiere a una de esas condiciones debiendo al expresarlo señalar lo que corresponde.

La Norma ASTM C 127, establece el método de ensayo para determinar el peso específico (densidad); peso específico saturado con superficie seca, el peso específico aparente y la absorción después de 24 horas en agua del agregado grueso.

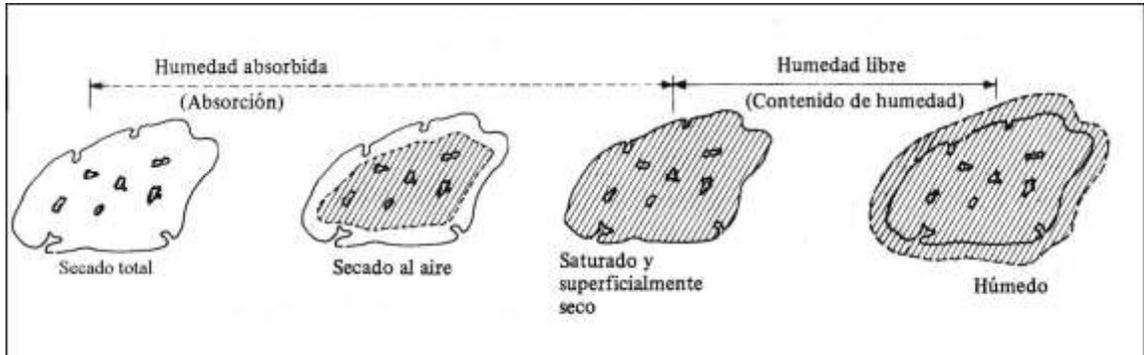


Figura 2.3: Contenido de Humedad del Agregado

- ❖ **Peso específico de la masa seca:** También llamado peso específico a granel, Es la relación, a una temperatura estable de la masa y el volumen unitario de material (incluyendo los poros permeables e impermeables naturales del material).

$$\text{Peso Especifico de la masa} = \frac{A}{B - C} \frac{(g)}{(cm^3)}$$

Donde:

- A: Peso de la muestra secada en el horno, en gr.
- B: Peso de la muestra saturada pero con superficie seca, en gr.
- C: Peso de la muestra saturada dentro del agua, en gr.

- **Peso específico de la masa saturado superficialmente seco:** Se define como la relación al peso de una muestra saturada superficial seca (S.S.S) dividida entre el volumen de la misma contemplando sus poros.

$$\text{Peso específico en condicion SSS} = \frac{B}{B - C} \frac{(g)}{(cm^3)}$$

Donde:

- B: Peso de la muestra saturada pero con superficie seca, en gr.
- C: Peso de la muestra saturada dentro del agua, en gr.

- **Peso específico aparente:** Si se considera que el volumen del agregado debe incluir los poros impermeables, la palabra aparente califica el peso específico resultante,

entonces este resulta: peso seco dividido entre volumen del agregado (peso seco/volumen del agregado) incluyendo los poros impermeables.

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{A - C} \frac{(g)}{(cm^3)}$$

Donde:

A: Peso de la muestra secada en el horno, en gr.

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

Absorción.- Se trata de una medida indirecta de su índice de permeabilidad, y por tanto se trata de un parámetro íntimamente ligado con gran cantidad de propiedades del hormigón (resistencia, estabilidad de volumen, durabilidad por su potencialidad de transporte de agentes agresivos desde el exterior disuelto en agua, etc.). De modo general se puede considerar que al aumentar la capacidad de absorción disminuye la resistencia mecánica y a la acción de penetración de agentes externos agresivos. Además influye en la demanda de agua de la mezcla, lo que redonda de modo decisivo en la obtención de hormigones compactos impermeables y resistentes.

Porosidad.- La porosidad está relacionada con la capacidad de absorción de agua u otro líquido dentro de los agregados según el tamaño de los poros, su continuidad (permeabilidad) y su volumen total. En la práctica, lo que se mide para cuantificar la influencia de la porosidad dentro del agregado, es su capacidad de absorción, ya que las partículas del agregado pueden pasar por cuatro etapas:

La porosidad, es muy importante porque una partícula porosa es mucho menos dura que una partícula compacta o maciza, lo cual afecta no sólo las propiedades mecánicas como la adherencia, la resistencia a compresión y flexión sino también propiedades de durabilidad como la resistencia al congelamiento y deshielo, y resistencia a la abrasión.

Se expresa en porcentaje referido a la masa de áridos seco, según norma ASTM C 128

$$\% \text{de Absorción} = \frac{B - A}{A} \times 100$$

Donde:

A: Peso en el aire de la muestra secada en el horno, en gr.

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

2.3.2.6 Agregado fino

El tamiz que separa un agregado grueso de uno fino es el de 4,75 mm. Es decir, todo agregado menor a 4,75 mm es un agregado fino (arena).

La arena o árido fino es el material que resulta de la desintegración natural de las rocas o se obtiene de la trituración de las mismas, y cuyo tamaño es inferior a los 5mm.

Para su uso se clasifican las arenas por su tamaño. A tal fin se les hace pasar por unos tamices que van reteniendo los granos más gruesos y dejan pasar los más finos.

- ❖ Arena fina: es la que sus granos pasan por un tamiz de mallas de 1mm de diámetro y son retenidos por otro de 0.25mm.
- ❖ Arena media: es aquella cuyos granos pasan por un tamiz de 2.5mm de diámetro y son retenidos por otro de 1mm.
- ❖ Arena gruesa: es la que sus granos pasan por un tamiz de 5mm de diámetro y son retenidos por otro de 2.5mm.

Las arenas de granos gruesos dan, por lo general, morteros más resistentes que las finas, si bien tienen el inconveniente de necesitar mucha pasta de conglomerante para rellenar sus huecos y será adherente; en contra partida, el mortero sea plástico, resultando éste muy poroso y poco adherente. Se acepta habitualmente, que el agregado fino causa un efecto mayor en las proporciones de la mezcla que el agregado grueso. Los primeros tienen una mayor superficie específica y como la pasta tiene que recubrir todas las superficies de los agregados, el requerimiento de pasta en la mezcla se verá afectado por la proporción en que se incluyan éstos.

La experiencia indica que las arenas con un módulo de finura inferior a 2.5 dan hormigones con consistencia pegajosa, haciéndolo difícil de compactar. Arenas con un módulo de finura de 3.0 han dado los mejores resultados en cuanto a trabajabilidad y resistencia a la compresión en los diferentes tipos de hormigones.

2.3.2.6.1 Granulometría de la arena

Los requisitos de la norma ASTM C 33, permiten un rango relativamente amplio en la granulometría del agregado fino. La granulometría más conveniente para el agregado fino, depende del tipo de trabajo, de la riqueza de la mezcla, y del tamaño máximo del agregado grueso. En mezclas más pobres, o cuando se emplean agregados gruesos de tamaño pequeño, la granulometría que más se aproxime al porcentaje máximo que pasa por cada

criba resulta lo más conveniente para lograr una buena trabajabilidad. En general, si la relación agua-cemento se mantiene constante y la relación de agregado fino a grueso se elige correctamente, se puede hacer uso de un amplio rango en la granulometría sin tener un efecto apreciable en la resistencia. En ocasiones se obtendrá una economía máxima, ajustando la mezcla del hormigón para que encaje con la granulometría de los agregados locales. Entre más uniforme sea la granulometría, mayor será la economía. La granulometría del agregado fino dentro de los límites de la norma ASTM C33, generalmente es satisfactoria para la mayoría de los hormigones.

En la Tabla 2.7, se presenta en tres grupos de límites que permiten clasificar al agregado fino, el grupo C corresponde a arenas gruesas, el grupo M corresponde a arenas intermedias y el grupo F corresponde a arenas finas, según la norma ASTM C-33.

Tabla 2.7: Graduación del Agregado Fino

TAMIZ	GRUPO C	GRUPO M	GRUPO F
3/8"	100	100	100
Nº 4	95 a 100	85 a 100	89 a 100
Nº 8	80 a 100	65 a 100	80 a 100
Nº 16	50 a 85	45 a 100	70 a 100
Nº 30	25 a 60	25 a 80	55 a 100
Nº 50	10 a 30	5 a 48	5 a 70
Nº 100	2 a 10	0 a 12	0 a 12

Fuente: ASTM C-33

Otros requisitos de la norma ASTM son:

1. Que el agregado fino no tenga más del 45% retenido entre dos mallas consecutivas.
2. Que el módulo de finura no sea inferior a 2.3 ni superior a 3.1, ni que varíe en más de 0.2 del valor típico de la fuente del abastecimiento del agregado; en el caso de que sobrepase este valor, el agregado fino se deberá rechazar a menos que se hagan los ajustes adecuados en las proporciones del agregado fino y grueso.

Las cantidades de agregado fino que pasan las mallas de 0.30 mm (No.50) y de 0.15 mm (No.100), afectan la trabajabilidad, la textura superficial y el sangrado del hormigón. La mayoría de las especificaciones permiten que del 10% al 30% pase por la malla de 0.30 mm (No. 50). El límite inferior puede bastar en condiciones de colado fáciles o cuando el hormigón tiene un acabado mecánico, como ocurre en el caso de los pavimentos. Sin

embargo, en los pisos de hormigón acabados a mano o donde se requiera una textura superficial tersa, se deberá usar un agregado fino que tenga al menos un 15% que pase la malla de 0.30 mm (No.50) y al menos un 3% que pase la malla de 0.15 mm (No.100).

2.3.2.6.2 Modulo de finura

El módulo de finura (MF) del agregado grueso o del agregado fino se obtiene, conforme a la norma ASTM C 125, sumando los porcentajes acumulados en peso de los agregados retenidos en una serie especificada de mallas y dividiendo la suma entre 100.

El módulo de finura es un índice de la finura del agregado, entre mayor sea el módulo de finura, más grueso será el agregado, diferentes granulometrías de agregados pueden tener igual módulo de finura. El módulo de finura del agregado fino es útil para estimar las proporciones de los agregados en las mezclas de hormigón (ASTM C 125).

Ecuación para calcular el módulo de finura del agregado fino.

$$MF = \frac{\sum \% \text{ Ret. Acum. (3/8" + N}^\circ\text{4 + N}^\circ\text{8 + N}^\circ\text{16 + N}^\circ\text{30 + N}^\circ\text{50 + N}^\circ\text{100)}}{100}$$

2.3.2.6.3 Peso unitario de la arena

El peso unitario es el producto del peso de la muestra seca por el inverso del volumen del recipiente, se expresa en (kg/m³.) El peso unitario varía de acuerdo a las condiciones intrínsecas del agregado, tales como su forma, granulometría y tamaño máximo asimismo depende de factores externos como la relación del tamaño máximo con el recipiente, la consolidación, la forma de colocación, etc.

Existen 2 tipos de pesos unitarios de los agregados que son los siguientes:

- **Peso Unitario Suelto: (P.U.S.):** Viene a ser el peso del material en forma natural por unidad de volumen conocido. Este peso se utiliza para convertir cantidades en peso a cantidades en volumen.

$$P. U. S = \frac{\text{Peso del material suelto (kg)}}{\text{volumen del molde (m}^3\text{)}}$$

- **Peso Unitario Compactado: (P.U.C.):** Viene a ser el peso del material por unidad de volumen conocido después de un proceso de apisonado. Este ensayo nos puede determinar el grado de compactación que pueden presentar los materiales en su estado natural.

$$P. U. C = \frac{\text{Peso del material compactada (kg)}}{\text{volumen del molde (m}^3\text{)}}$$

2.3.2.6.4 Peso específico y absorción de la arena

El peso específico (densidad relativa) de un agregado es la relación de su peso respecto al peso de un volumen absoluto igual de agua (agua desplazada por inmersión). Se usa en ciertos cálculos para proporcionamientos de mezclas y control, por ejemplo en la determinación del volumen absoluto ocupado por el agregado. Generalmente no se le emplea como índice de calidad del agregado, ciertos agregados porosos que exhiben deterioro acelerado a la congelación-deshielo tengan pesos específicos bajos. La mayoría de los agregados naturales tienen densidades relativas entre 2.4 - 2.9 (ASTM C 128).

❖ **Peso específico de la masa seca:** También llamado peso específico a granel, Es la relación, del peso de la masa entre el volumen del material (incluyendo los poros permeables e impermeables naturales del material).

$$\text{Peso Especifico de la masa} = \frac{A}{V - W} \frac{(g)}{(cm^3)}$$

Donde:

A: Peso en el aire de la muestra secada en el horno, en gr.

V: Volumen del frasco, en ml

W: Peso en gramos o volumen en ml del agua agregado al frasco

➤ **Peso específico de la masa saturado superficialmente seco:** Se define como la relación al peso de una muestra saturada superficial seca (S.S.S) dividida entre el volumen de la misma contemplando sus poros.

$$\text{Peso específico en condicion SSS} = \frac{500}{V - W} \frac{(g)}{(cm^3)}$$

Donde:

V: Volumen del frasco, en ml

W: Peso en gramos o volumen en ml del agua agregado al frasco

➤ **Peso específico aparente:** Si se considera que el volumen del agregado debe incluir los poros impermeables, la palabra aparente califica el peso específico resultante, entonces este resulta: peso seco dividido entre volumen del agregado (peso seco/volumen del agregado) incluyendo los poros impermeables.

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{(V - W) - (500 - A)} \frac{(g)}{(cm^3)}$$

Donde:

A: Peso en el aire de la muestra secada en el horno, en gr.

V: Volumen del frasco, en ml

W: Peso en gramos o volumen en ml del agua agregado al frasco

- **Absorción:** Según la Norma ASTM C 128 y AASHTO T84, la absorción es la masa de agua necesaria para llevar un material árido del estado seco al estado saturado superficialmente seco. Se expresa como porcentaje referido a la masa de áridos seco. Si la roca o arena tienen una humedad inferior a la absorción, se debe agregar más agua al hormigón para compensar la que absorberán los agregados. Por el contrario, si la humedad está por encima de la absorción, el agua a agregar al concreto será menor, ya que los agregados aportarán agua.

$$\% \text{de Absorción} = \frac{500 - A}{A} \times 100$$

Donde:

A: Peso en el aire de la muestra secada en el horno, en gr.

Requisitos de uso:

- El agregado fino será arena natural. Sus partículas serán limpias, de perfil preferentemente angular, duro, compacto y resistente.
- El agregado fino deberá estar libre de cantidades perjudiciales de polvo, terrones, partículas escamosas o blandas, esquistos, pizarras, álcalis, materia orgánica, sales, u otras sustancias perjudiciales.
- Debe cumplir las normas sobre su granulometría.
- Se recomienda que las sustancias dañinas, no excederán los porcentajes máximos siguientes: Partículas deleznales igual a 3%, Material más fino que la malla N°200 igual a 5%. (Abanto Castillo, 2009)

2.3.3 Agua

Tiene como objetivo la hidratación del cemento, así como aumentar la trabajabilidad del hormigón para una correcta puesta en obra. La cantidad debe ser la estrictamente necesaria (importante el control de la relación A/C) ya que un exceso de agua incrementa como

consecuencia de la evaporación, los huecos y capilares que disminuyen la resistencia del hormigón). Por el contrario, un defecto de agua da lugar a una incorrecta hidratación del cemento, hormigones duros difíciles de poner en obra.

2.3.3.1 Calidad del agua.

Las exigencias de calidad, varían en algunos países en función de las características propias del cemento, pero en general existe uniformidad de criterios fruto de los resultados de investigaciones desarrolladas en U.S.A., España, Inglaterra, etc.

Existe la creencia que si el agua es apta para beber, es óptima para hacer el hormigón, sin embargo, esto no es del todo cierto, pues algunos acueductos o plantas de tratamiento de agua, utilizan o adicionan para el consumo sustancias que pueden interferir con el fraguado del cemento, o pueden promover la corrosión del refuerzo o manchar el hormigón, tales como, sulfatos de aluminio, cloro sabores artificiales, flúor, azúcares, etc. así mismo, un agua apta para mezclar o curar el hormigón puede no ser necesariamente buena para tomar; cuando el agua para una obra proviene de un pozo, es necesario analizarla para comprobar que el pH no varía a través del tiempo, las impurezas pueden interferir con el fraguado del cemento, afectar la resistencia del hormigón o causar manchas en su superficie y provocar además la corrosión de los aceros de refuerzo. Hay que tener cuidado con agua ácidas ($\text{pH} < 5$) y con aguas con un alto contenido orgánico (grasas, aceites, etc.) así como con aguas con finos en suspensión pues disminuyen la adherencia pasta-árido.

2.4. Aditivos

Los aditivos son productos orgánicos e inorgánicos que se añaden a la mezcla durante o luego de formada la pasta de cemento y que modifican en forma dirigida algunas características del proceso de hidratación, el endurecimiento e incluso la estructura interna del hormigón. Se presentan en forma de polvo, líquido o pasta y la dosis varía según el producto y el efecto deseado, respetando las indicaciones del fabricante, las dosis varían entre un 0.02 % y 5% del peso del cemento.

Generalmente se emplean diluidos en el agua de amasado, aunque en el caso de algunos productos en polvo, se prefiere que sean agregados directamente al cemento. Su empleo se ha ido generalizando hasta el punto de constituir actualmente un componente habitual del hormigón. Sin embargo su uso debe ser considerado cuidadosamente, siendo

importante verificar cuáles son sus influencias en otras características distintas de las que se desea modificar, ya que se debe tener consideración que ellos no sólo influyen sobre las propiedades que se desea modificar, sino sobre otras, produciendo efectos que pueden ser indeseables o nocivos para el comportamiento que se espera del hormigón.

En primera aproximación, su proporción de empleo debe establecerse de acuerdo a las especificaciones del fabricante, debiendo posteriormente verificarse según los resultados obtenidos en obra o, preferentemente, mediante mezclas de prueba.

Los aditivos se pueden clasificar según sus funciones:

1. Aditivos incorporadores de aire (inclusores de aire)
2. Aditivos reductores de agua
3. Plastificantes (fluidificantes)
4. Aditivos aceleradores (acelerantes)
5. Aditivos retardadores (retardantes)
6. Aditivos de control de la hidratación
7. Inhibidores de corrosión
8. Reductores de retracción
9. Inhibidores de reacción álcali-agregado
10. Aditivos colorantes
- 11.-Aditivos curadores del hormigón
12. Aditivos diversos, tales como aditivos para mejorar la trabajabilidad (manejabilidad), para mejorar la adherencia, a prueba de humedad, impermeabilizantes, para lechadas, formadores de gas, anti-deslave, espumante y auxiliares de bombeo.

El comportamiento de los diversos tipos de cemento Portland está definido dentro de un esquema relativamente rígido, ya que pese a sus diferentes propiedades, no pueden satisfacer todos los requerimientos de los procesos constructivos. Existen consecuentemente varios casos, en que la única alternativa de solución técnica y eficiente es el uso de aditivos. Para zonas donde se producen ciclos de congelamiento y deshielo, así como alternancias de temperatura que inducen fases de clima cálido y frío en un tiempo corto, es necesario el empleo de aditivos incorporadores de aire y acelerantes de fraguado para atenuar estos efectos.

2.4.1 Aditivos incorporadores de aire para el hormigón

En 1932, en ciertos tramos de las carreteras en EE.UU. se observó y constató que resistían más que otras carreteras a las heladas. Mediante un estudio microscópico se obtuvo como causal de este fenómeno, la presencia en el hormigón de un gran número de minúsculas burbujas de aire. Estas derivaban de cementos fabricados con aditivos a base de aceite vegetal o a base de jabón.

El aditivo incorporador de aire es aquel que permite generar durante el mezclado del hormigón un sistema de pequeñas burbujas de 0.025 a 0.1 mm espaciadas uniformemente en toda la masa del hormigón. La cantidad de burbujas que se ha estimado es de 100.000 a 400.000 por cm^3 , la que representa una superficie específica de $23,6 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$. El sistema de burbujas provee al hormigón de una resistencia especial contra el intemperismo, en particular protege al hormigón del deterioro producido por las heladas o los ciclos de congelamiento y deshielo, por esta razón se dice que el aire introducido mejora la durabilidad del hormigón. Las principales funciones del aire incorporado consisten en proporcionar mayor impermeabilidad brindando mayor resistencia del hormigón a los ciclos de congelación y deshielo; además, permite un aumento de la docilidad, hace a las mezclas más cohesivas contribuyendo a disminuir la segregación, a reducir la exudación y la permeabilidad. En tiempo de heladas desempeñan el papel de cámara de expansión para el agua impulsada por el hielo y para el propio hielo formado en los hormigones endurecidos, reducen las presiones hidráulicas y permiten un mejor reparto de los esfuerzos. La protección contra las heladas queda asegurada no solamente si el contenido total de aire (en volumen) es suficiente sino, sobre todo, si las burbujas son suficientemente pequeñas y están bien repartidas en la masa y próximas unas a otras. Las burbujas de aire permiten, por otra parte, reducir la cantidad de arena y también pueden suplir la cantidad de granos finos de algunas arenas. No obstante las múltiples ventajas que proporciona, debe tenerse en cuenta que, cuando el contenido de aire incorporado supera el 3% provocan una disminución de la resistencia mecánica que se estima en 3% por cada 1% extra de aire.

2.4.1.1 Métodos de medición del contenido de aire para hormigón en estado fresco.

Existen numerosos métodos para medir el contenido de aire en el hormigón fresco, se destacan los siguientes:

➤ **Método gravimétrico (por pesadas).**

Es el método más antiguo, normalizado en los EE.UU. (ASTM C138). Se supone el conocimiento preciso de las masas volumétricas de los constituyentes, del tanto por ciento de humedad de los áridos y de la dosificación en volumen en los constituyentes. En base a estos datos, se calcula el peso teórico, sin huecos, de un cierto volumen de hormigón y se compara con el peso real del mismo volumen, relleno con el hormigón ensayado, de donde se deduce el tanto por ciento de huecos:

$$\text{Aire incorporado (\%)} = \frac{(\text{P. teor.} - \text{Pmed.}) \times 100}{\text{P. teor}}$$

Dónde:

P. teor.= masa volumétrica teórica del hormigón macizo sin huecos.

P. med.= masa volumétrica del hormigón ensayado.

➤ **Método volumétrico (o por evacuación forzada de aire).**

Este método está normalizado en los EE.UU. (ASTM C173) consiste en colocar en un recipiente normalizado, cierto volumen de hormigón fresco, un volumen conocido, aproximadamente igual de agua, se le añade y luego se agita el recipiente, el aire es expulsado por el agua y después de dejarlo reposar y de la eliminación de la espuma eventualmente formado, el nuevo nivel de agua da el tanto por ciento de aire ocluido.

➤ **Método de presión.**

El método de presión, se basa en la medición del cambio de volumen del hormigón sometido a un cambio de presión. El equipo que se especifica para este ensayo es el tipo B de la norma ASTM C231-82, el que está equipado con un dial que registra directamente el contenido de aire, en porcentaje, con respecto al volumen del hormigón.

El procedimiento se encuentra limitado a hormigones fabricados con áridos de densidad normal y tamaño máximo no superior a 50 mm.

2.4.2 Aditivos acelerantes

Sustancias que reducen el tiempo normal de endurecimiento de la pasta de cemento y/o aceleran el tiempo normal de desarrollo de la resistencia. Proveen una serie de ventajas:

- Desencofrado en menor tiempo del usual.
- Reducción del tiempo de espera necesario para dar acabado superficial.
- Reducción del tiempo de curado.
- Adelanto en la puesta en servicio de las estructuras.
- Posibilidad de combatir rápidamente las fugas de agua en estructuras hidráulicas.
- Reducción de presiones sobre los encofrados de los elementos estructurales posibilitando mayores alturas de vaciado del hormigón.
- Contrarrestar el efecto de las bajas temperaturas en clima frío desarrollando con mayor velocidad el calor de hidratación, incrementando la temperatura del hormigón y consecuentemente la resistencia.

En general los acelerantes reducen los tiempos de fraguado inicial y final del hormigón medidos con métodos estándar como las agujas proctor definidas en ASTM-C-403 que permiten cuantificar el endurecimiento en función de la resistencia a la penetración.

Las razones principales para el uso de aditivos son:

- Reducción del costo de la construcción de hormigón.
- Obtención de ciertas propiedades en el hormigón de manera más efectiva.
- Manutención de la calidad del hormigón durante las etapas de mezclado, transporte, colado (colocación) y curado en condiciones de clima adverso.
- Superación de ciertas emergencias durante las operaciones de mezclado, transporte, colocación y curado del hormigón.
- Resistencia, impermeabilidad y durabilidad en estado endurecido.

La eficiencia de un aditivo depende de factores tales como: tipo, marca y cantidad del material cementante; contenido de agua; forma, granulometría y proporción de los agregados; tiempo de mezclado y temperatura hormigón.

2.5 Diseño de mezcla de hormigón

Diseñar una mezcla de hormigón consiste en determinar las cantidades de material aglutinante, material de relleno, agua y eventualmente aditivos, con el fin de producir un hormigón con ciertas características de trabajabilidad, consistencia, durabilidad, permeabilidad y resistencia principalmente, a un costo económico y razonable.

Existen en la actualidad una serie de métodos de diseño de mezclas que con mayor o menor refinamiento establecen tablas y/o gráficos para estimar cantidades de agua de

amasado en función del tamaño máximo, geometría del agregado y el asentamiento; relaciones Agua/cemento (A/C) a usar referidas a diferentes resistencias a compresión determinadas experimentalmente; las proporciones en que deben intervenir la piedra y la arena en base a gradaciones y consideraciones teóricas y/o prácticas etc.

Ante este panorama, hay que tener muy claro que no existe ningún método perfecto, ni que nos proporcione una receta infalible para solucionar todos los casos prácticos, por lo que las bondades de un método sobre otro residen finalmente en el criterio personal de quien los aplique, y los resultados que cada profesional con su conocimiento técnico y experiencia obtenga en obra. Antes de dosificar una mezcla de hormigón además de conocer los datos de la obra o estructura que se va a construir (vigas, columnas, zapatas, etc.) y de las condiciones de transporte (bomba, carretilla, etc.) y colocación, también se deben conocer las propiedades de los materiales con los que se va a preparar la mezcla.

2.5.1 Diseño de mezclas de hormigón por el método A.C.I 211

El comité 211 del ACI (American Concrete Institute) ha desarrollado un procedimiento de diseño bastante simple, el cual, basándose en las tablas definidas permite obtener valores de los diferentes materiales (cemento, agua, grava y arena) que integran la unidad cúbica de hormigón en peso y volumen, y se diseña tanto para una mezcla en estado fresco como endurecido. Las propiedades del hormigón se comprueban prácticamente y pueden hacerse después los ajustes necesarios para obtener las mezclas de proporciones adecuadas y la calidad deseada.

El procedimiento propuesto por el comité ACI 211, está basado en el empleo de tablas confeccionadas por el comité ACI 211; la secuencia de diseño es la siguiente:

- Selección de la resistencia requerida (f'_{cr}).
- Selección del TMN del agregado grueso.
- Selección del asentamiento según tabla.
- Seleccionar el contenido del aire atrapado de acuerdo a tabla.
- Seleccionar el contenido de agua según tabla.
- Selección de la relación agua cemento (A/C) sea por resistencia a compresión o por durabilidad de acuerdo a tabla.
- Calculo del contenido de cemento.

- Seleccionar el peso del agregado grueso según tabla, proporciona el valor de (b/bo), donde: bo y b son los pesos unitarios secos con y sin compactar.
- Calcular la suma de los volúmenes absolutos de todos los materiales sin considerar el agregado fino.
- Calculo del volumen del agregado fino.
- Calculo del peso en estado seco del agregado fino.
- Presentación del diseño en estado seco
- Corrección del diseño por aporte de humedad de los agregados.
- Presentación del diseño en estado húmedo.

2.6 Deterioro del hormigón

2.6.1 Fenómenos que afectan la durabilidad del hormigón

El hormigón al estar expuesto a ambientes agresivos puede presentar procesos de deterioro. Estos pueden ser clasificados como: **físicos**, causados por la exposición a cambios ambientales extremos tales como ciclos de hielo/deshielo o cambios artificiales como la exposición al fuego; **químicos**, causados por ataques por ácidos y/o sulfatos, agua, o reacción álcali-árido; **biológicas y estructurales** (presencia de bacterias, sobrecargas, ciclos de cargas, etc.). La corrosión del acero de refuerzo está ligada con los procesos de deterioro del hormigón, debido a que conduce al agrietamiento y delaminación del material y además reduce su adhesión al refuerzo.

Un hormigón durable conservara su forma, calidad y condiciones de servicio originales al estar expuesto a su ambiente. La durabilidad de las estructuras de hormigón es un tema complejo en el que interviene un número elevado de variables, asociada a orígenes distintos: proyecto, ejecución, materiales, uso, mantenimiento y medio en el que se encuentra la estructura entre otras. Las fisuras pueden afectar únicamente a la apariencia de una estructura, pero también pueden indicar fallos estructurales significativos o falta de durabilidad. Las fisuras pueden representar la totalidad del daño, pero también pueden señalar problemas de mayor magnitud. Su importancia depende del tipo de estructura, como también de la naturaleza de la fisuración.

2.6.2 Factores que afectan al hormigón por congelamiento y deshielo

Los principales factores que afectan al hormigón por ciclos de hielo-deshielo son:

2.6.2.1 Grado de saturación

El daño en el hormigón solo se produce a partir de un grado de saturación crítico, y es la diferencia entre este grado de saturación crítico y el que existe en el momento de la helada en el hormigón el que determina la resistencia a la helada. El valor de este coeficiente depende fundamentalmente de los siguientes factores:

- La edad del hormigón (que determina el grado de hidratación y las estructuras de los poros). Al aumentar la edad del hormigón, la resistencia a las heladas crece como resultado del incremento de resistencia del hormigón y el cambio de su estructura porosa. El hormigón a edades muy tempranas tiene un alto contenido de humedad.
- Las condiciones ambientales (posibilidad de evaporación del agua).
- La velocidad de enfriamiento y frecuencia de los ciclos de congelamiento y deshielo.

2.6.2.2 Relación agua/ cemento (a/c)

La característica más importante de cualquier mezcla cementicia es la relación (a/c) agua/cemento, que regula la propiedad de los materiales que contribuyen a la durabilidad como la resistencia y la permeabilidad. En particular la reducción de la relación a/c causa menos exudación y aumenta la resistencia. Conviene emplear la mínima relación a/c posible, ya que cuanto mayor sea esta, mayor será el volumen de grado de poros presente en la pasta de cemento hidratada, que es donde reside el agua más fácilmente congelable y también es mayor la permeabilidad.

2.6.2.3 Efecto del reductor de agua o superplastificante

Como se ha mencionado anteriormente, al usar una relación a/c más baja hay que utilizar unos aditivos conocidos como superplastificantes o reductores de agua, para conseguir una mezcla homogénea o disponer medios de compactación muy energéticos. Varios estudios han explorado el efecto del superplastificante sobre la durabilidad del hormigón sometido a los ciclos de congelamiento y deshielo. Observaron que la mayoría de las mezclas de hormigón con baja relación a/c, se comportaba bien al efecto del hielo-deshielo. Concluyeron también que el hormigón con aire incorporado, baja relación a/c y con reductores de agua, puede ser resistente a la helada.

2.6.2.4 Influencia de los áridos

El árido constituye el 70 por ciento del volumen del hormigón, por lo que las características del árido son importantes en el proceso de congelamiento y deshielo.

Los áridos que no son resistentes al hielo por regla general, absorben el agua que se expande durante la congelación y destruye la pasta de cemento. Los síntomas típicos de tales procesos son los desprendimientos locales a partir de los áridos de mayor tamaño (estallidos). La absorción del árido tiene una gran influencia en la durabilidad al hielo-deshielo en el hormigón.

2.7 Daños por los ciclos de congelamiento y deshielo en el hormigón.

Los ciclos repetidos de hielo y deshielo en climas fríos provocan graves daños sobre las estructuras y los elementos de hormigón, en particular sobre aquellos que tiene una gran superficie expuesta, tales como pavimentos, revestimientos de canales o tableros de puentes, etc. En esos casos, se ve comprometida además su funcionalidad, acelerándose la velocidad de deterioro y por ende tiene una menor vida útil. Los daños provocados por los ciclos de congelamiento y deshielo representan el deterioro físico más habitual relacionado con las condiciones meteorológicas, tanto la congelación del agua en la pasta como en los áridos, o ambos fenómenos pueden dañar el hormigón.

En su estado plástico, el hormigón se congelará si la temperatura cae por debajo de los -4°C si el hormigón en estado plástico se congela, su resistencia potencial puede ser reducida en más de un 50% y su durabilidad será afectada en forma adversa; el hormigón estará protegido de la congelación cuando alcance una resistencia a compresión mínima de 3.5Mpa. El daño por hielo y deshielo se manifiesta con el descascaramiento exterior o daño micro-estructural interior, ambos pueden producirse tanto en las superficies horizontales como en las verticales.

2.8 Mecanismo de congelamiento y deshielo en el hormigón.

Son varios los mecanismos que pueden afectar al hormigón durante los ciclos de hielo-deshielo, pero ninguno de ellos puede explicar totalmente el daño por este fenómeno en los hormigones. La hipótesis principal para explicar los daños de la congelación del hormigón se basa principalmente, en que el agua al congelarse experimenta un incremento de volumen en un 9%, y al no existir espacio libre para absorber la expansión, genera tensiones de tracción las paredes de la red capilar que pueden llegar a fisurar y romper el

material, según esto, únicamente el hormigón con un grado de saturación superior al 91.7% sufrirá el efecto de la helada, aunque puede verse afectado el hormigón con un grado de saturación por encima del 80%.

No toda el agua de un hormigón es congelable, cuanto más baja sea la temperatura, mayor será la proporción de agua que está congelada, pero, dentro de un intervalo práctico de temperaturas siempre existe parte del agua del hormigón que está en estado líquido; cuando la temperatura disminuye: primero se congelan los poros de mayor diámetro y posteriormente los poros de diámetros más pequeños.

Cuanto menor sea el diámetro del poro más unida esta la molécula a la fase sólida y resultara más difícil congelarla ya que se requieren temperaturas más bajas.

2.8.1 Presión hidráulica

El agua en los poros capilares del hormigón está sometida a una presión que es tanto mayor cuanto menor es el diámetro de estos y por tanto también se reduce el punto de congelación. Como consecuencia, el agua de los poros de mayor diámetro se hiela antes que la de los poros más finos, con lo cual los cristales de hielo que se han formado en los primeros impiden la expansión del agua al helarse en los más finos, dando lugar a la creación de una presión hidráulica sobre paredes de los poros que pueden llegar a fisurar el hormigón. La magnitud de esta presión depende del tiempo de la congelación, el grado de congelación, el coeficiente de permeabilidad de la pasta y la longitud de la red capilar de la región saturada a una región no saturada, si esta presión supera la resistencia del hormigón en un punto, la acción de congelación produce las fisuras. Sin embargo, si el agua fuera capaz de emigrar a un hueco de aire, el hielo se formaría en aquel hueco y la presión hidráulica desaparecería; los problemas en este caso provienen de la congelación del hormigón fresco. Si se permite que el hormigón que no ha fraguado se congele, el agua de la mezcla se convertirá en hielo y aumentará el volumen total del hormigón. Puesto que ahora no queda agua disponible para las reacciones químicas, el fraguado y endurecimiento del hormigón se retrasa y queda poca pasta de cemento que pueda ser alterada por la formación de hielo.

Cuando en una etapa posterior tiene lugar el deshielo, el hormigón fraguará y endurecerá en su estado expandido, que contiene un gran volumen de poros y, en consecuencia, tiene una resistencia baja. Si el congelamiento ocurre después de que el hormigón ha fraguado,

pero antes de que desarrolle una resistencia considerable, la expansión asociada con la formación de hielo causa una ruptura y pérdida irreparable de la resistencia. Sin embargo, si el hormigón ha adquirido suficiente resistencia antes de congelarse, puede soportar la presión interna generada por la formación de hielo a partir del agua remanente de la mezcla. Tal cantidad es pequeña porque, en esta etapa, una parte del agua de la mezcla ya se habrá combinado con el cemento en el proceso de hidratación, y otra parte estará localizada en los pequeños poros de gel, y por tanto, no podrá congelarse, lamentablemente, no es fácil establecer la edad en que el hormigón es lo bastante fuerte para resistir el congelamiento.

Presión osmótica: al ocurrir el congelamiento en los poros capilares existe una diferencia de concentración entre el hielo y el agua remanente, generando el flujo del agua desde los espacios interlaminares del gel hacia los poros capilares, incrementando así la presión interna; y por último sobrepresión del hielo, desde poros pequeños el agua se transporta hacia poros ya congelados, generando un incremento del volumen de hielo y consecuentemente la presión.

Powers y Helmuth señalaron que en los poros, el agua está presente en forma de una solución alcalina débil. Cuando la temperatura del hormigón cae por debajo del punto de congelamiento hay un período inicial de superenfriamiento, luego del cual se forman cristales de hielo en los capilares de mayor tamaño. Esto provoca un aumento del contenido de álcalis en la porción no congelada de la solución dentro de estos capilares, creando un potencial osmótico que impulsa al agua presente en los poros cercanos a comenzar a difundirse hacia la solución que se encuentra en las cavidades congeladas (figura 2.23). La dilución resultante de la solución en contacto con el hielo permite un mayor crecimiento del cuerpo de hielo (acreción). Cuando la cavidad se llena de hielo y solución, cualquier acreción de hielo adicional produce una presión de dilatación, la cual puede provocar la falla de la pasta. Al ser extraída el agua de los capilares no congelados, la pasta tiende a encogerse. (ACI 201.2R, 2001). El hormigón puede revibrarse y recompactarse cuando se deshiela pero tal procedimiento en general no es recomendable, pues resulta difícil saber exactamente cuándo ha empezado a fraguar.

2.9 Recomendaciones para el vaciado del hormigón en climas fríos

La fabricación de hormigones en condiciones climáticas extremas de baja temperaturas, influye de manera directa en las características del hormigón en cualquier etapa del mismo: amasado, transporte, puesta en obra, curado, así como en las propiedades físicas y mecánicas. Esto constituye una preocupación tanto para los fabricantes y usuarios de dichos hormigones por las evidentes consecuencias negativas que esto tiene sobre los aspectos técnicos y económicos ya sea por demoliciones y repaciones de las estructuras.

Se prohíbe verter el hormigón sobre elementos estructurales, moldes, etc. cuya temperatura sea inferior a 0°C. En general se suspenderá el hormigonado siempre que se prevee que, dentro de las 48 horas siguientes, pueda descender la temperatura ambiente por debajo los 0°C. En los casos en que, por absoluta necesidad, se hormigone en tiempo de heladas, se adoptara las medidas necesarias para garantizar que, durante el fraguado y primer endurecimiento del hormigón, no se producirán deterioros locales en los elementos estructurales correspondientes, ni mermas de las características resistentes.

Las bajas temperaturas disminuyen el calor del proceso de hidratación y retrasan significativamente el tiempo de fraguado del hormigón y como consecuencia de esto se reduce la resistencia a compresión a edades tempranas y se produce un incremento en la resistencia a edades mayores. Las temperaturas recomendadas en el momento del vaciado se muestran en la tabla. El proveedor de hormigón premezclado puede controlar la temperatura de la mezcla mediante calentamiento del agua y/o de los agregados y debe suministrar el hormigón de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM C 94

Tabla 2.8: Temperatura de Acuerdo a la Sección

Dimensiones de la sección, o dimensión mínima (mm)	Temperatura del hormigón para el vaciado
Menos de 12 (300)	55° F (13°C)
12 a 36 (300 – 900)	50°F (10°C)
36 a 72 (900 – 1800)	45°F (7°C)

Las operaciones de hormigonado en clima frío tienen como finalidad lograr un procedimiento de trabajo que garantice que el hormigón, independientemente de la

temperatura de congelación, será lo suficientemente resistente y durable como para cumplir con los requisitos de servicio que se le han asignado.

Los trabajos de hormigonado bajo condiciones de clima frío darán como resultado una estructura lo suficientemente resistente y durable para satisfacer los requisitos de servicio si es hecho, colocado, curado y protegido de manera adecuada. El grado necesario de protección aumenta, a medida que disminuye la temperatura ambiental.

Como hemos visto los daños que pueden causar los ciclos de hielo y deshielo tenemos que tomar medidas antes durante y después del vaciado del hormigón como son:

- Utilice hormigón con aire incorporado.
- Proteger al hormigón.
- La temperatura del ambiente al momento del vaciado no deberá ser menor de 10°C.
- Calentar el agua para el vaciado.
- Calentar los agregados.
- Crear un ambiente artificial adecuado alrededor de la obra.
- Retrasar el desencofrado de las piezas, cuando el encofrado actué como aislante.
- Cuanto mayor contenido de agua tenga la mezcla mayor será la probabilidad de congelamiento por lo tanto se recomienda usar hormigón, con bajo contenido de relación agua cemento (A/C).

2.10 Curado del hormigón

El curado es un proceso que consiste en mantener húmedo al hormigón por varios días después de su colocación, con el fin de permitir la reacción química entre el cemento y el agua (hidratación del cemento). Dichos procedimientos de curado son el control de la temperatura y los movimientos de la humedad desde y hacia el hormigón. Estos últimos afectan no solo a la resistencia, sino también a la durabilidad.

Por lo tanto el **curado** es un proceso que tiene por finalidad mantener en el hormigón el contenido de agua adecuado para alcanzar la máxima hidratación de las partículas de cemento. El hormigón que ha sido correctamente curado es superior en muchos aspectos. No sólo es más resistente y más durable bajo ataques químicos, sino que también es más resistente al desgaste y más impermeable y es menos probable que lo dañen las heladas y los golpes accidentales que reciba. El proceso de hidratación del cemento en una mezcla de hormigón es función de la temperatura del medio ambiente. Se sabe que a temperatura

muy bajas: 5°C o menos, el desarrollo de las resistencias se ve retrasada seriamente. Las temperaturas altas incrementan notablemente la velocidad de hidratación del cemento, dándose el caso de que es posible obtener la resistencia esperada a 28 días, luego de unas cuantas horas de inmersión del hormigón en agua en ebullición, sin embargo, es también conocido que someter el hormigón a temperaturas muy altas durante el endurecimiento inicial, trae como consecuencia resistencias a edades tardías menores que las obtenidas durante el hormigón a 21°C; si el hormigón se seca muy rápidamente se producen rajaduras superficiales y además se le impide alcanzar la resistencia especificada, los agentes más perjudiciales son el sol y el viento, debe evitarse que estos lleguen al hormigón fresco.

El hormigón alcanza el 72% de su resistencia especificada a los 7 días del vaciado.

La resistencia final del hormigón depende en gran manera de las condiciones de humedad y temperatura durante este periodo inicial. El 30% o más de la resistencia, puede perderse por un secado prematuro del hormigón o si la temperatura baja a 5 °C o menos durante los primeros días, a menos que se mantenga el hormigón continuamente húmedo durante un largo tiempo después del descenso de temperatura.

La congelación del hormigón fresco puede reducir su resistencia hasta en un 50%; para evitar estos peligros, el hormigón debe protegerse de las pérdidas de humedad al menos durante siete días y, en trabajos más delicados hasta catorce días, cuando se utilizan cementos de alta resistencia inicial, los periodos de curado pueden reducirse a la mitad.

2.10.1 Periodos de curado.

El proceso debe iniciarse tan pronto como sea posible sin causar maltrato a la superficie del hormigón. Se puede utilizar el siguiente cuadro como referencia.

Tabla 2.9: Curado después del Vaciado según el Clima

Clima	Tiempo después del vaciado
Calurosos y secos	1 a 3 hrs.
Templados	2 ½ a 5 hrs.
Fríos	4 ½ a 7 hrs.

Fuente: Abanto Castillo 2009

Un curado prolongado del hormigón conduce normalmente a la obtención de resistencias mecánicas mayores que las que se obtienen con periodos más cortos de curado. Desde el punto de vista práctico, siete días es el tiempo de curado recomendable para la generalidad de las estructuras. Sin embargo, ante condiciones climáticas adversas puede ser necesario prolongar el curado por encima de los siete días, condición, además, deseable cuando se fabrican hormigones de alta resistencia.

2.11 Métodos de curado del hormigón

Existen diversos materiales, métodos y procedimientos para el curado del hormigón, pero el objetivo es el mismo: garantizar el mantenimiento de un contenido satisfactorio de humedad y temperatura para que desarrolle las propiedades deseadas.

Los sistemas para mantener un contenido satisfactorio de humedad son los siguientes:

- La continua o frecuente aplicación de agua por anegamiento, aspersión, vapor o materiales de cubrimiento saturados, como carpetas de yute o algodón, alfombras, tierra, arena, aserrín, paja o heno.
- Evitar la pérdida excesiva de agua en la superficie del hormigón, mediante el empleo de materiales tales como hojas de plástico o de papel impermeable, o bien mediante la aplicación de compuestos de curado formadores de membrana sobre el hormigón.

2.11.1 Curado con agua

Cuando se elige este sistema se debe considerar la economía del método particular que se utilizará en cada obra, pues la disponibilidad de agua, mano de obra, materiales de curado, influirán en el costo. El método elegido debe proporcionar una cubierta de agua continua y completa libre de cantidades perjudiciales de materias que ataquen, manche, o decoloren el hormigón y evitar el impacto térmico debido al empleo de agua fría.

A continuación se describen varios métodos de curado con agua:

2.11.1.1 Anegamiento o inmersión

Se emplea cuando se trata de losas como pisos de puentes, pavimentos, techos planos, es decir en cualquier lugar donde sea posible crear un charco de agua mediante un bordo o dique de tierra u otro material en el borde de una losa. Debe evitarse los daños provocados por la liberación prematura o súbita del agua encharcada.

El agua de curado no debe ser de 11° C más fría que el hormigón, ya que el posible desarrollo de esfuerzos de temperatura en la superficie puede causar agrietamiento.

2.11.1.2 Rociado de niebla o aspersión.

El rociado de niebla o aspersión mediante boquillas o aspersores proporciona un curado excelente, cuando la temperatura es bastante superior a la de congelación.

Los aspersores de jardín son efectivos cuando no hay que preocuparse por el consumo de agua, la aspersión o rociado intermitentes no son recomendables si permiten que se seque la superficie del hormigón. El uso de mangueras es útil, para empapar superficies verticales, se debe tener mucho cuidado de no provocar la erosión de dicha superficie.

2.11.1.3 Costales, carpetas de algodón y alfombras

Los costales, carpetas de algodón, alfombras y otras cubiertas de material absorbente retendrán agua sobre la superficie del hormigón, sea ésta horizontal o vertical.

Estos materiales deben estar libres de cantidades dañinas de azúcar o fertilizantes, para lo cual se lavarán con anticipación y después de cada uso. Mientras más pesado sea el costal, más agua retendrá y será necesario mojarlo con menos frecuencia; es ventajoso colocarlo doble, trasladando las tiras hasta la mitad de su ancho, lo cual proporcionará una mejor retención de humedad y ayudará a que no se levante cuando sople viento fuerte o cuando llueva. Poner en contacto las frazadas o alfombras con la superficie del hormigón y luego humedecer con agua, estos materiales se deben colocar inmediatamente en el hormigón cuando tenga una dureza superficial aceptable, para que de este modo se pueda evitar daños en el acabado del hormigón. Las carpetas de algodón y las alfombras retienen el agua más tiempo que el costal y su empleo es similar.

2.11.1.4 Curado con tierra y agua

Se recubre la estructura con tierra y está a la vez se está humectando constantemente, el curado con tierra mojada se emplea con éxito en losas y pisos pequeños; lo principal es que la tierra esté libre de partículas mayores de 1" (25 mm) y que no contenga cantidades peligrosas de materia orgánica que reaccione al contacto del hormigón.

2.11.1.5 Arena y aserrín

La arena limpia y el aserrín mojados se emplean para el curado de la misma forma que la tierra. El aserrín no debe contener cantidades excesivas de ácido tánico.

2.11.1.6 Paja o heno

Pueden emplearse la paja o el heno mojados, pero se corre el riesgo de que el viento lo levante a menos que se cubran con tela de alambre, también existe el peligro de incendio

si se dejan secar. La paja y el heno suelen causar, una decoloración en la superficie del hormigón que se aprecia hasta varios meses después de haber sido retirados; cuando se empleen estos materiales, la capa que se aplica debe tener mínimo 15 cm. de espesor.

2.11.2 Curado con materiales selladores

Los materiales selladores son hojas o membranas que se colocan sobre el hormigón para reducir la pérdida de agua por evaporación, el empleo de materiales selladores para el curado representa ventajas que hacen preferible su empleo en muchos casos; por ejemplo, cuando se impide la pérdida de humedad mediante el sellado, existen menos posibilidades de que el hormigón se seque antes de tiempo debido a un error en el mantenimiento de la cubierta húmeda: Asimismo, los materiales selladores son más fáciles de manejar y pueden aplicarse, a veces sin necesidad de curado inicial.

2.11.2.1 Película Plástica

La película plástica es de peso ligero y está disponible en hojas transparentes, blancas o negras. La película debe cumplir con los requisitos de la norma ASTM C 171 que especifica un espesor mínimo de 0.10 mm. Las blancas para climas cálidos y las de color negro o azul para climas fríos. Las láminas de color claro tienen muy pequeña influencia en la absorción de calor. Estas láminas son muy livianas, constituyen una barrera efectiva contra la humedad y son fácilmente aplicables tanto sobre superficies simples como complejas. Como en el caso de este último, el curado con láminas de polietileno puede causar manchas por decoloración si las láminas no se mantienen bien extendidas sobre la superficie. Cuando la apariencia es de gran importancia, el hormigón debe ser curado por otros medios, ya que el empleo de película plástica lisa generalmente da como resultado una superficie moteada. La película plástica debe colocarse sobre la superficie mojada del hormigón fresco lo más pronto posible, sin dañarla y cubriendo todas las partes expuestas. Sobre superficies planas, tales como pavimentos, la película debe extenderse más allá de los bordes de la losa, hasta el doble del espesor de ésta.

2.11.2.2 Papel impermeable

El papel impermeable debe cumplir con los requisitos de la norma ASTM C 171 está compuesto de dos hojas de papel Kraft unidas entre sí mediante un adhesivo bituminoso, e impermeabilizadas con fibras y debidamente tratados para reducir su grado de expansión y contracción tiene que mojarse y secarse. Las hojas pueden unirse entre sí mediante

material bituminoso. La aplicación del papel impermeable se hace de la misma manera que la de la película plástica. Este material es un eficiente medio de curado para superficies horizontales o estructuras de formas relativamente simples. Una importante ventaja de este método es que no son necesarios riegos periódicos de agua. El curado con papel impermeable asegura una adecuada hidratación del cemento, impidiendo pérdidas de humedad del hormigón

2.11.2.3 Compuestos líquidos para formar membrana

Estos compuestos consisten esencialmente en ceras, resinas naturales o sintéticas, así como solventes de volatilidad elevada a la temperatura atmosférica y deben cumplir con los requisitos de la norma ASTM C 309. Deben formar una película que retenga la humedad poco después de haber sido aplicados. Se sugiere que, cuando sea posible, se hagan dos aplicaciones, perpendiculares una con respecto a la otra, para lograr un cubrimiento completo.

2.12 Protección del hormigón

En obra, las condiciones ambientales y especialmente las temperaturas extremas en días fríos son factores que afectan directamente el desarrollo de resistencias y el comportamiento del hormigón. De igual manera, los materiales y equipos (lonas de aislamiento, lámparas, cubiertas entre otros), necesarios para proteger el hormigón se deben utilizar desde los primeros momentos de la colocación del hormigón y así generar las condiciones necesarias para el adecuado desarrollo de resistencias.



Figura 2.4: Protección del Hormigón en Obra.

2.13 Materiales para la protección del hormigón

2.13.1 Fibra de celulosa

La fibra celulosa es un tipo de aislamiento térmico y acústico, fundamentalmente dirigido a la construcción, que consiste en papel de periódico reciclado tratado con ácido bórico para darle propiedades ignífugas, fungicidas e insecticidas. Es un aislamiento cuyo uso está aumentando debido a que se le considera un producto ecológico. Es un potente aislante invernal, posiblemente el mejor aislante estival debido a su capacidad de almacenamiento de calor y además debido a su elevada porosidad se utiliza también como aislante acústico.

2.13.2 Lana mineral

Las Lanos Minerales Aislantes son productos aislantes constituidos por un entrelazado de filamentos de materiales pétreos que forman un fieltro que mantiene entre ellos aire en estado inmóvil. Están reconocidas internacionalmente como aislantes acústicos, por sus estructuras flexibles y térmicas. Por el entrelazado que mantiene el aire inmóvil, siendo además, incombustibles, dado su origen inorgánico.

Son productos naturales (arena silíceo para la lana de vidrio, roca basáltica para la lana de roca) transformados mediante el proceso de producción.

2.13.3 Paja

La paja es un elemento que corre el riesgo de ser llevado por el aire por lo que se tiene que asegurar con otro material. Además se recomienda tener un espesor mínimo de 15cm para que asegure una protección adecuada al hormigón.

2.13.4 Polietileno con arena

Se utiliza la arena como protección para elementos masivos o áreas extensas y planas como son: losas, veredas y pavimentación de carreteras. Así como también se puede utilizar tierra si son elementos más pequeños.

1.13.5 Frazadas de lana mineral

Frazada o manta de lana de alta densidad, recubierta con una malla hexagonal en una o dos caras, cosida con alambre galvanizado se utiliza para tener aislaciones térmicas de ductos, estanques circulares y superficies irregulares, adaptándose a cualquier forma.

2.13.6 Mantas aislantes

El uso de mantas térmicas será en clima extremos de frio dejando un espacio entre la superficie y el hormigón para suministrar calor. Las mantas aislantes adecuadas se producen con fibras de vidrio, hule, esponja, fibras de celulosa, lana mineral, espuma de vinilo y espuma de poliuretano de celdas abiertas.

2.13.7 Espuma de poliuretano

La espuma de poliuretano es un excelente aislante térmico debido a que las celdas que forman la espuma están dispersas en la masa polimérica y son independientes y completamente cerradas a diferencia de otros materiales aislantes.

La espuma de poliuretano es el material aislante más eficiente, ya que requiere un mínimo espesor para aislar lo mismo que cualquier otro material. Esto supone además un beneficio económico puesto que para un mismo grado de aislamiento, la Espuma de Poliuretano necesita un menor espesor, lo que implica una mayor superficie habitable.



Figura 2.5: Espuma de Poliuretano

2.13.8 Mantas de espuma de vinilo

Este material consiste en mantas flexibles de espuma de vinilo con un lado recubierto con vinilo extruido. Es factible que para obtener calor adicional se pueda también colocar alambres eléctricos incorporados en la espuma. Las mantas no eléctricas se pueden conseguir en rollos de ancho estándar. En el caso de utilizarse mantas eléctricas deben de mandarse hacer por pedido.

Las espumas de vinilo están hechas de mezclas de acetato de polivinilo, cloruro de polivinilo y plastificantes. Esta mezcla es colocada en un container cerrado y se somete a una presión comprendida entre los 7 y 56 kg/cm² de dióxido de carbono o de un hidrocarburo de cloro o fluor. La mezcla de resina absorbe gas, siendo ayudado este proceso de absorción por un determinado número de placas separadoras en el interior del recipiente. La espuma se produce cuando la mezcla comprimida gas/resina se libera; el material luego se vulcaniza en moldes cerrados a una densidad final muy baja.

Debido a su considerable resistencia a la compresión y de la naturaleza no desmenuzable de su superficie, se pueden obtener mantas, las cuales como hemos mencionado utilizaremos con el propósito de proteger al hormigón contra el clima frío, aunque su utilización de este material se aprovecha de muchas maneras en la industria de la construcción civil, no es propósito de esta tesis mencionarlas. La característica de la espuma de vinilo que conforman a las mantas tiene límites de temperatura para su trabajo, por debajo de -25°C, las espumas sufren un envejecimiento acelerado y su límite superior se sitúa en los 70°C.

2.13.9 Aserrín

El aserrín es el conjunto de partículas o polvillo que se desprende de la madera cuando ésta es aserrada; también contiene minúsculas partículas de madera producidas durante el proceso y manejo de la misma, paneles contrachapados y/o aglomerados. Además del polvo, en el proceso de aserrado se genera la viruta, que es un fragmento de material residual con forma de lámina curvada o espiral.



Figura 2.6: Aserrín

2.13.10 Lámina de poliestireno expandido

La materia prima, el poliestireno expandible, se obtiene por polimerización del estireno con introducción de un agente de expansión: el pentano. Este polímero se presenta en perlas esféricas de diámetros entre 0,3 y 2 mm. El Poliestireno Expandido - EPS se obtiene a partir del poliestireno expandible después de tres fases de fabricación: Pre-expansión (el vapor de agua dilata el pentano y expande las perlas hasta 50 veces su volumen inicial), Maduración de las perlas pre-expandidas (permite su estabilización física) y Moldeo (las perlas pre-expandidas se introducen en un molde cerrado, sometido a una inyección de vapor de agua, las perlas se vuelven a expandir ocupando todo el espacio del molde, soldándose entre ellas para formar un bloque).

Propiedades como el aislamiento térmico, el 98% de su contenido es aire en reposo recluso en una estructura celular cerrada; resistencia a la humedad, por su carácter hidrófobo; durabilidad, por su resistencia al envejecimiento; resistencia mecánica, adaptable a la necesidad requerida debido a su sencillo proceso de fabricación; versatilidad, libertad para obtener dimensiones y formas; compatibilidad con los materiales empleados en la construcción; facilidad de manejo y transporte, por su ligereza, le proporcionan al Poliestireno Expandido - EPS múltiples aplicaciones como aislamiento en cualquiera de sus variedades. El Poliestireno Expandido - EPS es un material inerte e inocuo que no ataca al medio ambiente ni a la salud de las personas, ni es valor nutricional para hongos, bacterias u otros organismos vivos, por lo que no facilita su aparición. Y, por supuesto, es 100% reciclable.

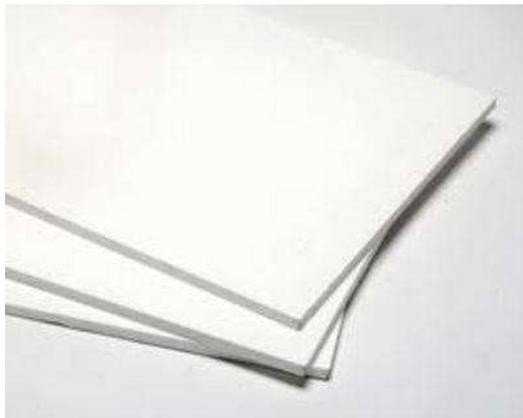


Figura 2.7: Lámina de Poliestireno Expandido

2.13.11 Lámina de Polietileno con Burbuja

Este tipo de film es un material transparente y flexible, compuesto por láminas de plástico de polietileno unidas entre sí por métodos mecánico-térmicos, lo que permite la formación de las burbujas de aire, estas burbujas le aportan excelentes propiedades de amortiguación y de aislación.



Figura 2.8: Lámina de Polietileno con Burbuja.

2.14 Materiales utilizados en la investigación

2.14.1 Polietileno (naylor)

Laminas plásticas, ya sean claras, blancas reflectivas o pigmentadas. Los plásticos deben estar conforme al ASTM C171, tener como mínimo 4 milésimas de pulgada (0.1mm).

El polietileno es generalmente una mezcla de compuestos orgánicos similares que difieren en el valor de n. La película de polietileno también se puede colocar sobre otros materiales de cobertura, para retener el calor en el material de la cubierta.



Figura 2.9: Polietileno (naylor).

2.14.2 Papel (envase de cemento)

El papel impermeable es utilizado como las láminas plásticas, este papel consiste generalmente en dos capas de papel kraft juntas. El papel deberá estar conforme a la norma ASTM C171, el papel impermeable para el curado del hormigón consiste en dos hojas de papel kraft (o pulpa sulfítica), unidas entre sí por un adhesivo bituminoso con refuerzo de fibras. Esta protección de papel, es un método para las protecciones de superficies horizontales en el hormigón estructural de formas relativamente sencillas. Cuando se requiera proteger al hormigón con este tipo de material deberá colocar el papel con el mayor ancho disponible. Los bordes de hojas adyacentes se deben traslapar cerca de 150mm (6 pul.) y estar sellados con arena, tablón de madera, cinta adhesiva sensitiva presión, mastique o pegamento (cola). Las hojas se deben anclar con pesos para que mantengan en contacto con la superficie del hormigón durante todo el periodo de protección. Son absolutamente correctas en términos ambientales, siendo 100% naturales, biodegradables y reciclables.

El papel funciona como aislante térmico natural o ecológico. El aislamiento térmico natural a base de papel tiene un beneficio ecológico en el reciclaje de este material. Su capacidad aislante es similar a la de la madera con igual eficacia ante el frío como ante el calor.



Figura 2.10: Bolsa de Papel de Cemento.

2.14.3 Aditivo incorporador de aire

Sika Aer es un aditivo líquido incorporador de aire formulado a base de resinas naturales. No es tóxico, ni inflamable y no contiene cloruros. Su gran eficacia se basa en la incorporación de aire, que se distribuye uniformemente en forma de micro-burbujas (10 a 200 μ de diámetro); estas micro-burbujas desempeñan el papel de vasos de expansión y limitan la presión hidrostática (el hormigón se disgrega bajo el efecto de tensiones provocadas por la presión hidráulica debidas al congelamiento del agua). La cantidad de micro-burbuja incorporado oscila entre 100.000 a 400.000 por cm^3 .

Usos: Tiene muchos usos en las diferentes obras de construcción.

- ❖ Estructuras hidráulicas en general (diques, canales, represas, ductos, etc.)
- ❖ Estructuras de fundación.
- ❖ Hormigón en pavimentos, carreteras, aeropuertos, etc.
- ❖ Hormigón sometido a amplitudes térmicas elevadas.
- ❖ Hormigón sometido a temperatura de congelamiento y deshielo.
- ❖ Hormigones sometidos a agresiones químicas de aguas, agua de mar y suelos.
- ❖ En casos que se desee mejorar la trabajabilidad de las mezclas, especialmente cuando se utilizan agregados defectuosos (arenas de trituración, granulometrías discontinuas, etc.) y bajo contenido de cemento.

Consumo: La cantidad de aditivo incorporador de aire a utilizar varía entre 0,02% y el 0.10% del peso del cemento (20 a 100 g por cada 100 kg de cemento).

Método de aplicación

El aditivo incorporador de aire se entrega listo para usar y se agrega simultáneamente con el agua de amasado al principio de la mezcla. La dosificación exacta debe ser determinada en base a las características de las mezclas que se utilizará en la obra.

El consumo de aditivo inductor de aire depende fundamentalmente de:

- La cantidad de aire que se desea incorporar.
- Los agregados finos (granulometría y forma de los mismos; la arena gruesa facilita la incorporación de aire).
- La relación A/C a mayor cantidad de agua, mayor incorporación de aire).
- La cantidad de cemento utilizada por m^3 de hormigón (a menor cantidad de cemento es mayor la incorporación de aire).

- La naturaleza y finura del cemento: a mayor finura, menor incorporación de aire.
- Temperatura del hormigón a menor temperatura, mayor la incorporación de aire.

Para dosificaciones de cemento mayores a 250 kg/m^3 de hormigón, hay que tener en cuenta una caída de la resistencia a compresión alrededor del 3% por cada 1% de aire incorporado, o sea que para una caída del 10% será una incorporación de aire del 4%.

Ventajas en hormigón fresco:

- Posibilidad de regular la incorporación de aire, variando la dosificación.
- Permite el aumento en la trabajabilidad y/o una disminución de agua de amasado.
- Reduce la exudación del hormigón.
- Permite reducir el tiempo de vibración y colocación.
- Mejora el aspecto superficial del hormigón.
- Tiempo de fraguado normal, independientemente de la dosificación.

Ventajas en hormigón endurecido:

- Incremento de la impermeabilidad al agua.
- Incremento de las resistencias a ciclos de hielo y deshielo.
- Aumento de las resistencias a la acción de aguas y suelos agresivos.



Figura 2.11: Aditivo Sika Aer

2.15 Control y aceptación del hormigón

2.15.1 Introducción

Las dudas sobre la resistencia de un hormigón conllevan a consecuencias poco deseadas, ya que las investigaciones que se tienen que realizar introducen demoras y en ocasiones reparaciones, cuyos costos finalmente deben ser asumidos por una de las partes interesadas. Para asegurar que el hormigón suministrado en un proyecto cumpla con los parámetros especificados, debe conducirse un programa de calidad fundamentado en normas y procedimientos estadísticos.

2.15.2 Concepto básico de calidad

Calidad es un proceso para alcanzar una característica que satisface el requerimiento deseado. Esta característica puede ser cualitativa o cuantitativa. En tiempos actuales, donde las relaciones humanas han perfeccionado los criterios para la oferta de productos y servicios, el concepto de calidad también ha sido perfeccionado.

En el caso del hormigón se puede alcanzar los requisitos de calidad, siempre que se cumpla rigurosamente con la calidad requerida en una de las etapas; es decir: **(a)** Componentes individuales o sea los agregados, **(b)** Procedimientos de diseño de acuerdo a norma, **(c)** Técnicas de producción, **(d)** Transporte, colocación y proceso de curado y **(e)** Muestreo y pruebas de laboratorio.

2.15.3 Control de calidad

De acuerdo a la sección 5.6.3.3 del ACI-318S-08, considera que la resistencia a la compresión del hormigón es satisfactorio si cumple con los dos requisitos siguientes:

- ✓ Cada promedio aritmético de tres ensayos de resistencia consecutivos es igual o superior a la resistencia especificada ($f'c$), o de diseño ensayada a los 28 días.
- ✓ Ninguna prueba de ensayo individual puede tener resistencia menor en más de 3.5 MPa que la resistencia especificada, si la resistencia especificada es de 35 MPa o menor, o por más de $0.10f'c$ cuando $f'c$ es mayor a 35 MPa.

Nota: Según norma un ensayo consiste un promedio de dos o tres probetas ensayadas a los 28 días.

Los especímenes se deben curar bajo las condiciones de laboratorio para una determinada clase de hormigón. Algunas especificaciones permiten rangos alternativos.

La resistencia de diseño de una mezcla de hormigón debe ser igual a la resistencia especificada más una tolerancia que lleva en consideración las variaciones de los

materiales, de los métodos de mezclado, del transporte y colocación del hormigón y variaciones en la producción, curado y ensayo de probetas cilíndricas de hormigón.

Por otra parte, de acuerdo a los criterios del Comité ACI 214R, las variaciones en la resistencia a la compresión pueden ser evaluadas mediante un análisis estadístico, tomando en cuenta la desviación estándar y el coeficiente de variación, los cuales se pueden asociar al grado de control del hormigón en el proyecto. En este caso, la desviación estándar y coeficiente de variación para una resistencia especificada o de diseño $f'c <$ de 360kg/cm^2 .

Tabla 2.10: Normas para el Control del Hormigón

CLASE DE OPERACIÓN	DESVIACION ESTANDAR PARA DIFERENTES NORMAS DE CONTROL (Kg/cm ²)				
	EXCELENTE	MUY BUENA	BUENA	ACEPTABLE	POBRE
hormigón en obra	< a 28,1	28,1 a 35,2	35,2 a 42,2	42,2 a 49,2	> a 49,2
hormigón en laboratorio	< a 14,1	14,1 a 17,6	17,6 a 21,1	21,1 a 24,6	> a 24,6
CLASE DE OPERACIÓN	COEFICIENTE DE VARIACION PARA DIFERENTES NORMAS DE CONTROL (%)				
	EXCELENTE	MUY BUENA	BUENA	ACEPTABLE	POBRE
hormigón en obra	< a 7	7 a 9	9 a 11	11 a 14	> a 14
hormigón en laboratorio	< a 3,5	3,5 a 4,5	4,5 a 5,5	5,5 a 7	> a 7

Fuente: Norma para el Control del Hormigón (ACI 214)

2.15.4 Principales fuentes de variabilidad

En la etapa de producción del hormigón se introducen variaciones, que pueden influir en la resistencia u otro requerimiento. Una fuente es la variación en las propiedades, tales como el cambio en la relación A/C, requerimientos de agua, características de los agregados, transporte y colocación, temperatura y curado. La otra es la variación en los métodos de prueba, entre los cuales se puede señalar el procedimiento incorrecto de muestreo, la técnica de fabricación de cilindros, moldes de calidad deficiente, cambios durante curado (T, %H) y el procedimiento de pruebas (cabeceo, ensayos). La variabilidad del hormigón, debe ser considerada en un programa para el control de calidad, ya que por tratarse de un material estructural tiene fuerte impacto en la seguridad pública.

CAPITULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA INVESTIGACION

3.1 Clima en el departamento de Tarija

3.1.1 Generalidades

El departamento de Tarija se encuentra al sur de Bolivia con un área de 37.623 km², limita al sur con la república Argentina, al norte con el departamento de Chuquisaca, al este con la república del Paraguay, y al oeste con el departamento de Potosí.

El departamento está dividido en 6 provincias y 11 municipios. En general, la temperatura del aire, empieza a disminuir paulatinamente desde el mes de abril, acentuándose el descenso en la estación de invierno para luego empezar su incremento hacia los meses de verano. La temporada de las bajas temperaturas, se caracteriza por la presencia de heladas, mayor frecuencia e incremento en su intensidad, algunas veces con la presencia de nevadas; la temporada de bajas temperaturas incrementa potencialmente la ocurrencia de días con olas de frío, durante periodos se registran heladas meteorológicas (temperaturas iguales o inferiores a 0°C) en gran parte de las zonas alto andinas y altiplánicas que se encuentran por encima de los 2300 m.s.n.m. El departamento de Tarija presenta 3 zonas geográficas.

Zona Valle.-Esta zona abarca los municipios de Padcaya, San Lorenzo, Cercado y Uriondo se caracteriza por tener un clima templado, con temperaturas muy agradables tiene una altitud que va desde los 1200 y 2000 m.s.n.m.

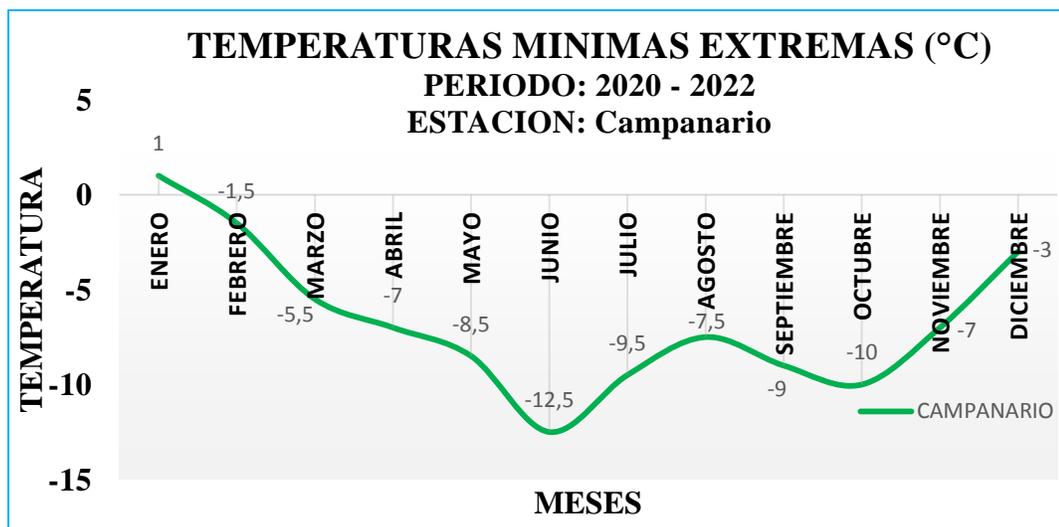
Zona llanura.-Está zona comprende municipios de Villa Montes, Yacuiba, Caraparí, Entre Ríos, y Bermejo esta región se caracteriza por tener temperatura muy altas. Se registran temperaturas máximas que llegan hasta los 45°C en la época de verano y temperaturas bajo cero en invierno, son periodos fríos que tienen una corta duración producto de frentes fríos del sur.

Zona Andina.-Esta región abarca los municipios de Yunchará y El Puente ubicado entre medio de montañas y serranías; esta zona se caracteriza por tener clima frío y árido registra bajas temperatura llegando a temperaturas de 12.5°C bajo cero con heladas y nevadas.

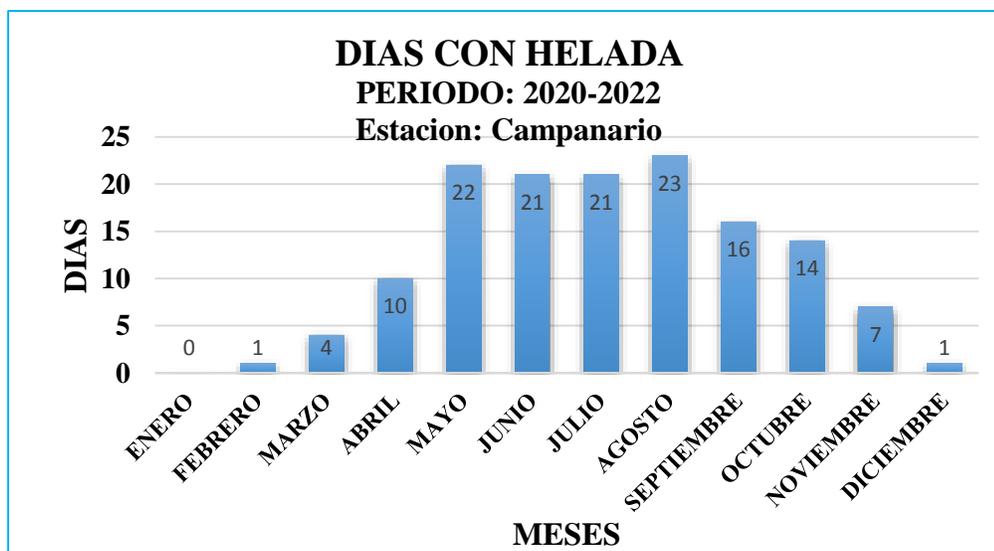
Esta zona se encuentra a una altitud de entre 2300 y 4600 m.s.n.m. Esta situación del cambio climático está afectando de manera significativa la vida y salud de las personas; así como, sus bienes, medios de vida y procesos como este caso constructivos de los diferentes elementos estructurales de hormigón.

3.1.2 Registro de temperaturas (zona andina)

El SENAMHI nos facilitó el registro de temperaturas mínimas y días con helada en la zona, de Iscayachi, Pueblo Nuevo, Molino en el periodo 2020–2022 que muestran un comportamiento muy variado tal como se aprecia en las gráficas.



Gráfica 3.1: Temperaturas Mínimas Extremas (SENAMHI)



Gráfica 3.2: Días con heladas (SENAMHI)

3.2 Desarrollo de la investigación

La presente investigación consistió en realizar un estudio de la resistencia a la compresión del hormigón cuando este, es sometido a ciclos de congelamiento y deshielo. En nuestro estudio se planteó la utilización de técnicas combinada de curado, protección y adición de aditivo incorporador de aire, para poder enfrentar las consecuencias que se producen en el hormigón cuando no se toman las medidas preventivas bajo condiciones climáticas de frío.

El hormigón utilizado en losas de pavimentos, revestimiento de canales, superestructuras de puentes e infraestructuras en las zonas alto andinas del departamento de Tarija; se espera que tenga una larga vida útil y un mantenimiento bajo. Debe tener buena durabilidad para resistir condiciones de exposición anticipadas. El proceso de deterioro en el hormigón debido a ciclos de congelamiento y deshielo es un proceso complejo que se debe fundamentalmente al aumento de volumen de agua en los poros al congelarse por el descenso de la temperatura. El agua al congelarse y al no tener espacio suficiente para su nuevo estado, genera tensiones internas que se van acumulando por la repetición de los ciclos de congelamiento y deshielo y que provocan el deterioro del hormigón.

La investigación experimental del proyecto fue desarrollado en las instalaciones del laboratorio de Hormigones de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología de la “Universidad Autónoma Juan Misael Saracho”, así como el análisis estadístico generado con el propósito de establecer relaciones entre los datos de los grupos de control con los grupos experimentales y de conocer el comportamiento del hormigón en climas de congelamiento y deshielo como también describir los materiales empleados y sus características particulares de las protecciones utilizadas en la investigación. Con respecto a los ensayos realizados, se utilizó como marco metodológico las normas: ACI, Norma Boliviana y ASTM: (American Society of Testing Materials). Y ficha técnica Sika Aer.

3.2.1 Metodología experimental

La metodología para el desarrollo de la investigación fue de acuerdo a lo siguiente:

- a)** Análisis de las propiedades físicas de los elementos empleados para el hormigón.
 - Cemento
 - Agregados
 - Agua
- b)** Diseño de dosificación de mezclas de hormigón (método ACI - 211)
- c)** Elaboración de probetas de hormigón
 - Probetas de hormigón patrón
 - Probetas de hormigón experimental
 - Ensayo al hormigón fresco
 - Mezclado y colocado del hormigón a los moldes cilíndricos
- d)** Curado de las probetas de hormigón endurecido
 - Probetas de hormigón patrón
 - Probetas de hormigón experimental
- e)** Protección de las probetas de hormigón endurecido
 - Probetas de hormigón experimental
- f)** Sometimiento de las probetas a ciclos de congelamiento
 - Probetas de hormigón experimental
 - Resumen diario de registro de temperatura en el Freezer
- g)** Ensayos de rotura al hormigón endurecido
 - Probetas de hormigón patrón
 - Probetas de hormigón experimental
- h)** Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión
 - Resultado de los ensayos de resistencia a la compresión (G.C)
 - Resultado de los ensayos de resistencia a la compresión (G.Exp1)
 - Resultado de los ensayos de resistencia a la compresión (G.Exp2)
 - Resultado de los ensayos de resistencia a la compresión (GC.A)
 - Resultado de los ensayos de resistencia a la compresión (G.Exp1A)
 - Resultado de los ensayos de resistencia a la compresión (G.Exp2A)

3.3 Análisis de las propiedades físicas de los elementos empleados para el hormigón.

3.3.1 Cemento

Para la realización de la investigación se utilizó cemento EL PUENTE existente en el mercado de la ciudad de Tarija el cual fue Cemento Tipo IP30. La composición química y mineralógica así como algunas propiedades y resistencias mecánicas se muestran a continuación. Estos datos se han obtenido directamente de la ficha técnica del cemento “El Puente”, facilitados por las oficinas que se encuentra en nuestra ciudad.



Figura 3.1: Bolsa de Cemento El Puente

Tabla 3.1: Composición Química y Propiedades Físicas del Cemento IP-30

CARACTERISTICAS DEL CEMENTO “EL PUENTE” IP-30			
REQUERIMIENTO QUIMICO		CEMENTO EL PUENTE	NORMA BOLIVIANA
Perdida al fuego (P.F)	%	3.89	< 7
Magnesia (MgO)	%	3.21	< 6
Azufre (SO ₃)	%	1.70	< 4
REQUERIMIENTO FISICO			
Blaine	Cm ² /g	4710	>2600
Tiempo de fraguado inicial	Min.	151	>45
Tiempo de fraguado final	Min.	231	<420
Peso especifico	g/l	3030	
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN			
3 días	Mpa	23.2	>10
7 días	Mpa	28.9	>17
28 días	Mpa	34.1	>30

3.3.2 Agregados.

Los agregados empleados proceden de la Seleccionadora de Áridos “San Blas”, ubicada en la ciudad de Tarija en la zona de San Blas. Siendo estos agregados provenientes del río Guadalquivir, son materiales naturales de buenas características mecánicas y de mucha demanda en la región para su empleo en la fabricación de hormigón.

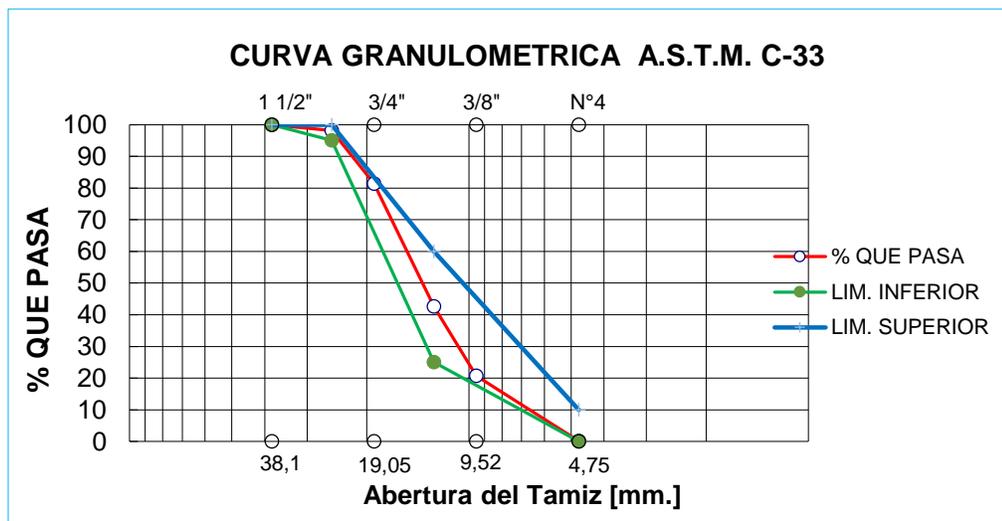
Es un agregado de matriz oscura, con granos de forma redondeada, presenta una buena gradación y continuidad de tamaños. El agregado fino proveniente de esta seleccionadora está constituido por partículas limpias, compactas y resistentes, contiene poca materia orgánica y sustancias perjudiciales, ofreciendo buenas características físicas y mecánicas; así de esta manera obtener un hormigón de buena calidad.

Y para la obtención de información sobre las propiedades del material se deberá seguir con los procedimientos previos como son:

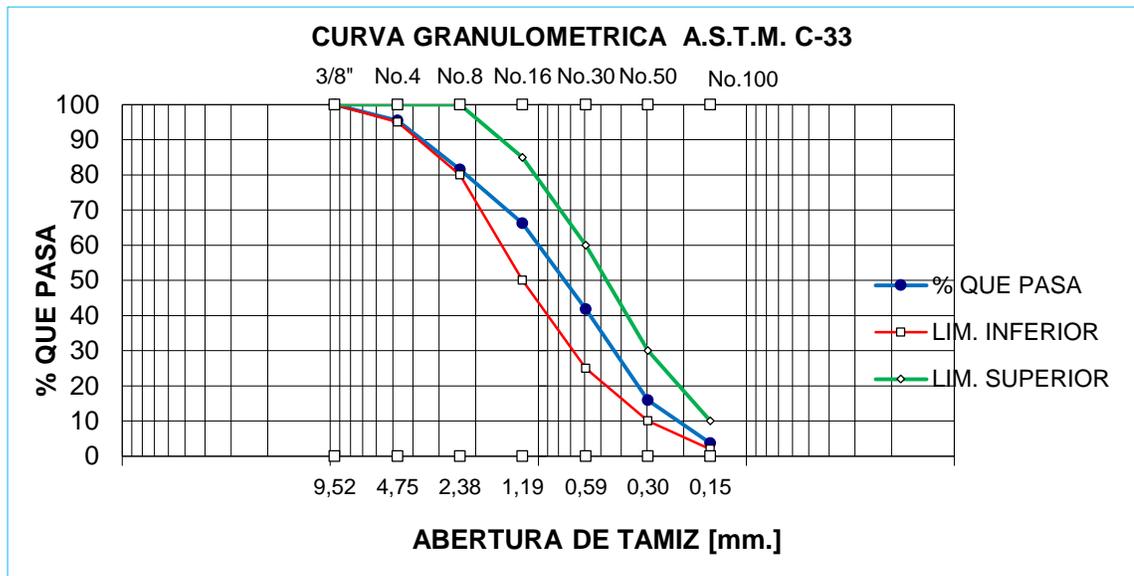
- Método para muestrear agregado. ASTM C 75.
- Reducción de las muestras de agregado al tamaño de prueba. ASTM C-702.
- Análisis granulométrico del agregado fino y grueso. ASTM C 136.

3.3.2.1 Análisis granulométrico.

Los resultados del análisis granulométrico se muestran en los anexos A-2.5, A-2.6 donde se puede observar que la granulometría del agregado fino y agregado grueso está dentro de los límites establecidos por la norma ASTM C 33, como se observa en las gráficas.



Gráfica 3.3: Curva Granulométrica del Agregado Grueso



Grafica 3.4: Curva Granulométrica del Agregado Fino

3.3.2.2 Propiedades físicas de los agregados

Los ensayos normalizados utilizados para la caracterización de los agregados utilizados en el hormigón se mencionan a continuación:

- Método de ensayo normalizado para peso específico y absorción del Agregado grueso. ASTM-C127.
- Método de ensayo normalizado para peso específico y absorción del Agregado fino. ASTM-C128.
- Método de ensayo Normalizado para determinar la masa por unidad de volumen o densidad (“Peso Unitario Suelto y Compactado”) y los vacíos en los agregados. ASTM C29 ASTM E 30.
- Contenido de humedad del agregado fino y grueso. ASTM-C566
- Método de ensayo normalizado para determinar materiales más finos que pasan por el tamiz normalizado 75um (N°200) por lavado en agregados., ASTM-C117.

Requisitos de uso de los agregados

Los agregados cumplen con los requisitos de la norma ASTM, las curvas granulométricas están dentro de los límites establecidos por norma, los agregados están conformado por partículas limpias libres de polvo, materia orgánica.

3.3.3 Agua

Se utilizó agua potable de consumo humano tomada directamente de las instalaciones de laboratorio de hormigón y resistencia de materiales de la U.A.J.M.S.

Tabla 3.2: Propiedades Físicas de los Agregados y el Cemento

Propiedades físicas	Agregado fino	Agregado grueso
Peso específico SSS (gr/cm ³)	2.40	2.64
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1555	1533.94
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1718.07	1612.05
% de adsorción (%)	1.29	1.04
Contenido de humedad (%)	0	0
Módulo de finura	2.95	
Tamaño máximo (pulg.)		1 ½"
Tamaño máximo nominal (pulg.)		1"
Peso específico del cemento (gr/cm ³)	3.03	

3.4 Diseño de dosificación de mezclas de hormigón (método ACI-211)

A partir de las propiedades físicas descritas anteriormente y requerimientos de diseño, el diseño de mezclas de hormigón requiere de una secuencia de pasos para ajustar las características de los materiales disponibles para una mezcla adecuada para determinado trabajo. El cual las proporciones han sido diseñadas de acuerdo a la metodología de diseño de mezcla de acuerdo a la norma ACI 211.

Las características utilizadas para la elaboración del diseño de mezclas de hormigón se consideró lo siguiente

- Se utilizó cemento El Puente IP30
- La resistencia de diseño es 21 MPa
- Tamaño máximo nominal del agregado es 1 pulgada
- El asentamiento es 6.5 cm para una consistencia blanda

Para el diseño de la dosificación del hormigón se realizó de acuerdo a lo siguiente:

- a) Selección de la resistencia promedio requerida (f'_{cr}).
- b) Selección del tamaño máximo nominal del agregado grueso.
- c) Selección del asentamiento según (tabla)
- d) Selección el contenido de agua (tablas).
- e) Selección de Contenido de aire (tablas).
- f) Selección de la relación agua /cemento sea por resistencia a compresión o por durabilidad de acuerdo a tablas.
- g) Cálculo del contenido de cemento.
- h) Seleccionar el peso del agregado grueso según tabla, proporciona el valor de b/b_0 , donde b_0 y b son los pesos unitarios secos con y sin compactar.
- i) Calcular la suma de los volúmenes absolutos de todos los materiales sin considerar el agregado fino (en estado seco)
- j) Calculo del volumen del agregado fino.
- k) Determinación del peso seco del agregado fino.
- l) Presentación del diseño de la dosificación en estado seco
- m) Corrección del diseño por aporte de humedad de los agregados.
- n) presentación del diseño de la dosificación en estado húmedo.

3.5 Pesos de los materiales por (m^3) de hormigón

3.5.1 Hormigón sin aire incorporado

Materiales	Peso kg
Cemento	344,64
Agua	212,63
Grava	1055,90
Arena	667,91

3.5.2 Hormigón con aire incorporado

Materiales	Peso kg
Cemento	372,34
Agua	193,98
Grava	1055,90
Arena	617,17
aditivo	0.224

3.5.3 Peso para 3 probetas de hormigón con pérdida del 20% ($V= 0.0159m^3$)

Tabla 3.5: Peso para 3 probetas

Materiales	Sin aire incorporado	Con aire incorporado
	Kg	Kg
Cemento	6,58	7,11
Agua	4,06	3,70
Grava	20,15	20,15
Arena	12,75	11,78
Aditivo Sika Aer (0,06% peso del cemento)		4,26 gr

3.6 Equipos utilizados para la investigación

3.6.1 Congeladora

El refrigerador utilizado para simular los climas con presencia de ciclos de congelamiento y deshielo tratando de que se asemeje a la realidad, la variación de las temperaturas se realizaron manualmente. Para ello se sometió a las probetas de hormigón a la acción del frío por medio de la congeladora de 200 litros de capacidad de marca General lux.



Figura 3.2: Refrigerador Para Simulación del Clima

3.6.2 Termómetro

Termómetro manual utilizado para controlar las temperaturas dentro del congelador durante los ciclos de congelamiento y deshielo. Y así asemejar el clima frío lo más posible a lo que ocurre en la realidad de nuestra región. Para ello se controló la temperatura utilizando un termómetro manual.



Figura 3.3: Termómetro Para Medir la Temperatura dentro del Refrigerador

3.6.3 Moldes utilizados

Para la elaboración de las probetas de hormigón se utilizaron moldes cilindros metálicos que tienen las siguientes dimensiones 15 cm de diámetro y 30 cm de altura.



Figura 3.4: Moldes Metálicos

3.6.4 Máquina de compresión

La máquina de compresión en el cual se ensayan las probetas de hormigón endurecido para saber la resistencia mecánica a la compresión que adquiere dichas probetas.



Figura 3.5: Máquina de Compresión

3.6.5 Máquina mezcladora

La mezcladora sirve para preparar hormigón para la elaboración de las probetas, dicha mezcladora tenía la capacidad para elaborar 3 muestras por cada preparada.



Figura 3.6: Máquina Mezcladora

3.7 Elaboración de las probetas de hormigón

A continuación se presenta la matriz de ensayos que sirvió como control para cada una de las variables independientes a manipular (La forma de curado, tipo de protección), aplicadas a las probetas de hormigón que fueron ensayadas a los 7, 14 y 28 días.

Tabla 3.6 Matriz de Control de Probetas

CONTROL DE PROBETAS DE HORMIGON						
Grupos	Protección	Días de protección	Tipo de curado	Numero de probetas a ensayar a los:		
				7 días	14 días	28 días
G.C	Condiciones normales		sumergido	5	5	5
G.Exp1	Sin protección		sumergido	3	3	3
G.Exp2	Polietileno con papel	7	sumergido	5	3	3
		14	sumergido		5	3
		28	sumergido			5
PROBETAS CON AIRE INCORPORADO (Sika Aer)						
GC. A	Condiciones normales		sumergido	–	–	5
G.Exp1A	Sin protección		sumergido	–	–	5
G. Exp2A	Polietileno con papel	28	sumergido	–	–	5
sub total				13	16	34
Total				63		

Fuente: Propia

- **(G.C) hormigón patrón:** estas probetas no tendrán protección y no serán sometidas a ciclos de congelamiento y deshielo.
- **(G.Exp1) sin protección:** estas probetas no tendrá protección y serán sometidas a ciclos de congelamiento y deshielo.
- **G.Exp2 (polietileno con papel):** estas probetas tendrán protección y serán sometidas a ciclos de congelamiento y deshielo
- **GC. A (hormigón patrón):** estas probetas son con aire incorporado, no tendrán protección y no serán sometidas a ciclos de congelamiento.
- **G.Exp1A (sin protección):** estas probetas tendrán aire incorporado, no tendrán protección y serán sometidas a ciclos de congelamiento y deshielo.
- **G. Exp2A (polietileno con papel):** estas probetas tendrán aire incorporado, tendrán protección y serán sometidas a ciclos de congelamiento y deshielo.

Para la elaboración de las probetas de hormigón se realizará en diferentes grupos de acuerdo a las variables requeridas como son: tipo de protección y curado, tiempo de curado, tiempo de protección y tiempo de rotura de las probetas, se confeccionaron un total de 63 probetas cilíndricas. Donde estos especímenes se elaboraran progresivamente según la capacidad de la congeladora. El cual detallaremos a continuación.

- **Para el G.C (hormigón patrón):** Estas probetas no tendrán protección y no serán sometidas a ciclos de congelamiento y deshielo, el tipo de curado será sumergido. Para este grupo de probetas patrón se realizaron 15 probetas cilíndricas de hormigón, en 3 grupos de 5 probetas respectivamente para ser ensayadas a los 7, 14 y 28 días.
- **Para el G.Exp1 (sin protección):** Estas probetas no tendrán protección y si serán sometidas a ciclos de congelamiento y deshielo, el tipo de curado será sumergido. Para este grupo se realizaron 9 probetas cilíndricas de hormigón en 3 grupos de 3 probetas respectivamente para ser ensayadas a los 7, 14 y 28 días.
- **Los de G.Exp.2 (Polietileno con Papel):** Estas probetas tendrán protección y serán sometidas a ciclos de congelamiento y deshielo, el tipo de curado será sumergido. Para este grupo se realizaron 24 probetas cilíndricas. Para 7 días de protección, se realizaron 11 muestras de hormigón para ser ensayadas a los 7, 14 y 28 días. Para 14 días de protección se elaboraron 8 probetas para ser ensayadas a los 14 y 28 días. Para 28 días de protección se elaboraron 5 probetas, para ser ensayadas a los 28 días.

Hormigón con aire incorporado

- **G.C. A (hormigón patrón):** Estas probetas tienen aire incorporado, no tendrán protección y no serán sometidas a ciclos de congelamiento, el tipo de curado será sumergido. Para este grupo se realizaron 5 probetas para ser ensayadas a los 28 días.
- **G.Exp1A (sin protección):** Estas probetas tendrán aire incorporado, no tendrán protección y serán sometidas a ciclos de congelamiento y deshielo, y curado será sumergido. Para este grupo se realizaron 5 probetas para ser ensayadas a los 28 días.
- **G. Exp2A (polietileno con papel):** estas probetas tendrán aire incorporado, tendrán protección y serán sometidas a ciclos de congelamiento y deshielo, y curado sumergido. Para este grupo se realizaron 5 probetas para ser ensayadas a los 28 días.

La elaboración de las probetas de hormigón se realizó de acuerdo a la norma ASTM C192.

3.7.1. Dosificación de los materiales.

En la dosificación de los materiales componentes del hormigón; para su proporción se pesaron antes de iniciar cada tanda de mezclado, estas tandas se dosificaron en peso para evitar errores por cambios volumétricos debido a variaciones propias.

3.7.2 Ensayo al hormigón fresco

Una vez elaborado el hormigón y previamente vaciado a los moldes cilíndricos, se realizó el ensayo al hormigón fresco. Es una medida de la consistencia del hormigón que se refiere al grado de fluidez de la mezcla, esto indica que tan seca o fluida está cuando se encuentra en estado plástico. Según norma ASTM C-143, el ensayo consiste en determinar la docilidad a una muestra de hormigón fresco con la ayuda del equipo denominado Cono de Abrams que es un molde tronco-cónico.

Procedimiento para determinar la consistencia del hormigón fresco

- ❖ Antes del ensayo humedecer con agua, el molde como sus accesorios.
- ❖ Colocar el molde sobre la plancha de apoyo horizontal.
- ❖ Pararse sobre las pisaderas, afirmando el molde firmemente contra la pancha de apoyo, para evitar cualquier movimiento durante el llenado.
- ❖ Llenar el molde en tres capas de aproximadamente de igual volumen, apisonar cada capa con 25 golpes con la varilla distribuidos uniformemente en toda la sección
- ❖ Terminada la compactación de la última capa, se enrasa la superficie con un movimiento de aserrado y rotación de la varilla metálica apoyándole al borde superior del molde troco cónico.
- ❖ Después del llenado se retira el molde con un movimiento vertical en forma suave, sin originar desplazamientos laterales ni movimientos de torsión.
- ❖ Una vez levantado el cono, coloque en forma invertida a un costado del hormigón moldeado, inmediatamente medir la disminución de altura con una regla o flexo.
- ❖ Si el hormigón moldeado se inclina decididamente hacia un lado o sufre desprendimientos parciales de su masa, repita el ensayo utilizando otra porción de hormigón de la misma muestra.

Los asentamientos obtenidos en dichos ensayos son de 6.5 cm que están dentro del rango de 6 a 9 cm que corresponde a una consistencia blanda y compactación manual con una barra metálica de 5/8 pulgadas.



Figura 3.7: Determinación del Asentamiento del Hormigón

3.7.3. Mezclado y colocado del hormigón a los moldes cilíndricos.

Previamente a la carga de los materiales, se humedeció el interior de la mezcladora y todas las herramientas que se usen para manipular el hormigón, deben de humedecerse previamente con agua, con la finalidad de evitar una posible pérdida de humedad de la mezcla. El proceso de carga de los materiales a la mezcladora siguió siempre la misma secuencia para cada mezclado.

Elaboración de las probetas de hormigón de acuerdo a los siguientes pasos:

- Se debe elaborar las probetas de hormigón lo más cerca posible del lugar donde se va guardar para su fraguado en las siguientes 24 horas.
- Colocar los moldes cilíndricos en una superficie rígida plana, y libre de vibraciones.
- Se limpió y engrasó con aceite de movilidad la pared y la base interior de los moldes.
- Se llenó el molde en tres capas iguales con la cuchara, llenando la primera capa, se compactó apisonando, con 25 golpes con una varilla de 5/8" uniformemente distribuida en toda la sección transversal. Y se golpeó los lados del molde con martillo de goma para asegurarse que no queden aprisionadas burbujas de aire en su superficie, después se coloca la segunda y tercera capa de hormigón y de la misma forma se procede las acciones mencionadas en la primera capa conforme a la norma ASTM 192.

- Luego se llevó las probetas de hormigón con los moldes al laboratorio para su fraguado.
- Se enrazó la parte superior del molde con la plancha de albañil para obtener una superficie lisa y nivelada.
- Al finalizar el proceso de fraguado se desmoldaron las probetas, estas se proceden a curar según sea el tipo de curado que les corresponda.
- Antes del curado se procede a la identificación de las probetas de hormigón.



Figura 3.8: Agregados para elaboración del hormigón



Figura 3.9: Probetas con aceite



Figura 3.10: Elaboración de probetas



Figura 3.11: Enrase de probetas



Figura 3.12: Desmoldado e Identificación de Probetas

3.8 Curado de las probetas de hormigón endurecido

3.8.1 Curado de las probetas de hormigón patrón (G.C, GC.A)

El curado inicial de las probetas será después de su fabricación, las probetas cilíndricas de hormigón utilizadas para los ensayos de caracterización, se mantuvieron en sus respectivos moldes durante las primeras 24 horas. Una vez que las probetas son desmoldadas e identificadas, se introdujeron en una cámara con agua para el curado sumergido y serán ensayadas a 7, 14 y 28 días respectivamente.



Figura 3.12: Curado Sumergido de las Probetas.

3.8.2 Curado de las probetas de hormigón (G.Exp1, G.Exp2, G.Exp1A, G. Exp2A)

Se mantuvieron en sus respectivos moldes durante las primeras 24 horas. Una vez que las probetas son desmoldadas e identificadas, se introdujeron en un turril con agua para el curado sumergido en el día y en la congeladora durante la noche, esto se hizo para los diferentes grupos de probetas que serán ensayadas a 7, 14 y 28 días respectivamente.

Las probetas sometidas a ciclos de congelamiento y deshielo, fueron sumergidas en agua en un turril en su totalidad, por un periodo de 8 horas, iniciando la descongelación superficial del hormigón a las 08:00 de la mañana e iniciando el proceso de curado después de una hora (09:00) hasta las 17:00 horas, donde se dejara un periodo de escurrimiento del agua por una hora (18:00). Para luego dar inicio a un nuevo ciclo de congelamiento y deshielo.

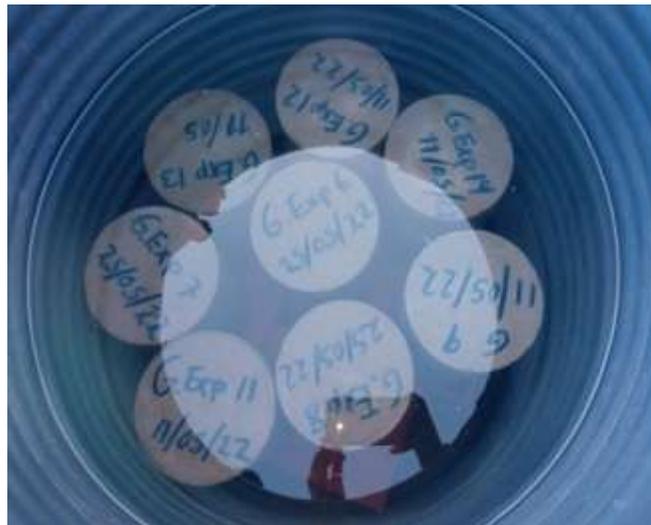


Figura 3.13: Curado Sumergido de las Probetas experimentales

3.9 Protección de las probetas de hormigón endurecido (G.Exp2, G. Exp2A)

Una vez escurrido el agua debido al curado sumergido teniendo un lapso de tiempo de 1 hora, se procede a la protección de las probetas de hormigón, cubriéndoles con dos capas de papel y por encima de este recubrimiento una capa de plástico, para lo cual se hizo moldes de polietileno y moldes de papel de embace de cemento y de esta manera disminuir los daños ocasionados al hormigón cuando sean introducidos al congelador y sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo gracias a la protección del mismo. Se protegerá a las probetas con y sin aire incorporado.



Figura 3.14: Protección de las Probetas con Papel y Polietileno

3.10 Sometimiento de las probetas a ciclos de congelamiento y deshielo (G.Exp1, G.Exp2, G.Exp1A, G. Exp2A)

Culminando el proceso de protección se procede a colocar las probetas de hormigón tanto protegidas como sin proteger al freezer con el fin de simular el clima frío con la variación de temperatura durante la noche representando los ciclos de congelamiento, y deshielo durante el día, después de un número de ciclos se determinó la resistencia a la compresión del hormigón.

El proceso de variación de la temperatura con respecto al tiempo dentro del freezer se menciona a continuación:

- ❖ Una vez desmoldadas las probetas se los sumergió al agua.
- ❖ De 17:00 a 18:00 se saca las probetas y se hace escurrir el agua para comenzar un nuevo ciclo
- ❖ El inicio del ciclo de congelamiento y deshielo iniciara a las 18:00 y comenzara con una temperatura de 0°C y -4°C durante 2 horas.
- ❖ Las siguientes 2 horas descenderemos la temperatura entre -4°C y -7°C y permanecerá así durante 2 horas.
- ❖ A las 22:00 estará en un margen entre -7°C a -11°C por lapso de dos horas.
- ❖ A las 24:00 horas hasta las 04:00 horas estará entre -11°C y -13°C.
- ❖ A las 04:00 horas comenzará a incrementarse la temperatura de -13°C hasta -1°C durante las próximas 4 horas.

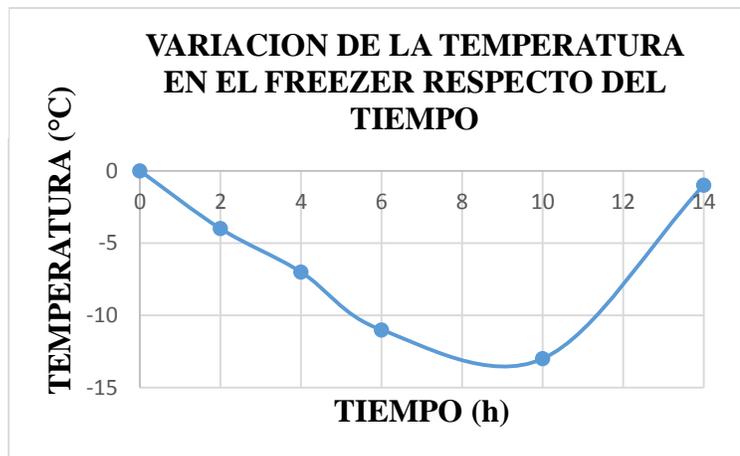
- ❖ Luego a las 08:00 horas descongelamiento al aire durante 1 hora.
- ❖ De las 09:00 a 17:00 se procede a sumergir las probetas al agua.



Figura 3.15: Probetas de hormigón sometidas a congelamiento

Tabla 3.7: Resumen diario de registro de temperatura en el Freezer

HORAS	T (°C)
18:00	0
20:00	-4
22:00	-7
0:00	-11
4:00	-13
8:00	-1



Grafica 3.5: Variación de la temperatura en el freezer

3.11 Ensayos al hormigón endurecido (G.C, GC.A, G.Exp1, G.Exp2, G.Exp1A, G.Exp2A)

Se realizó el ensayo a compresión de acuerdo a la norma ASTM C39. Método normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del hormigón, en probetas cilíndricas. Las probetas sin aditivo incorporador de aire serán ensayadas a los 7, 14 y 28 días, y las probetas con aire incorporado serán ensayadas a los 28 días.

Los ensayos a compresión del hormigón fueron realizados en el laboratorio de Hormigón y Resistencia de Materiales de la carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

El ensayo se realizó de acuerdo al siguiente procedimiento:

- La noche anterior al día del ensayo, las probetas serán retirados de la poza o turril de curado y secados al aire libre y no fueron sometidos al ciclo de congelación y deshielo, para luego someterlas al ensayo de compresión respectivo.
- Se mide dos diámetros perpendiculares entre sí, el promedio de los dos diámetros será el usado para calcular el área de la sección de cada una de las probetas.
- Medir la altura de la probeta en dos generatrices opuestas.
- Pesar la probeta



Figura 3.17: Midiendo el diámetro



Figura 3.18: Midiendo altura



Figura 3.19: Pesando la probeta

- La superficie superior e inferior de los especímenes, deberán estar limpias, para dicho fin se utilizó gomas de neopreno, esta se colocara dentro del dispositivo de sujeción de la probeta para su ensayo en la máquina de compresión.

- Colocar las probetas en la plataforma de la máquina de ensayo, introducir datos (diámetro, altura, peso, edad) y aplicar la carga sobre la probeta con una velocidad constante hasta terminar el ensayo.



Figura 3.20: Ensayo de Rotura a Compresión



a) Con aire

b) Sin aire

Figura 3.21: Probetas con y sin Aire Incorporado

3.11.1 Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión (G.C)

Este de grupo de control (Hormigón Patrón) el cual se mantuvo en curado sumergido constante y no tuvo ciclos de congelamiento y deshielo. En la siguiente **Tabla 3.8** se muestra los resultados de la resistencia a la compresión para las probetas de hormigón ensayadas a los 7, 14 y 28 días.

Tabla 3.8: Ensayo de Resistencia a la Compresión Grupo de Control G.C

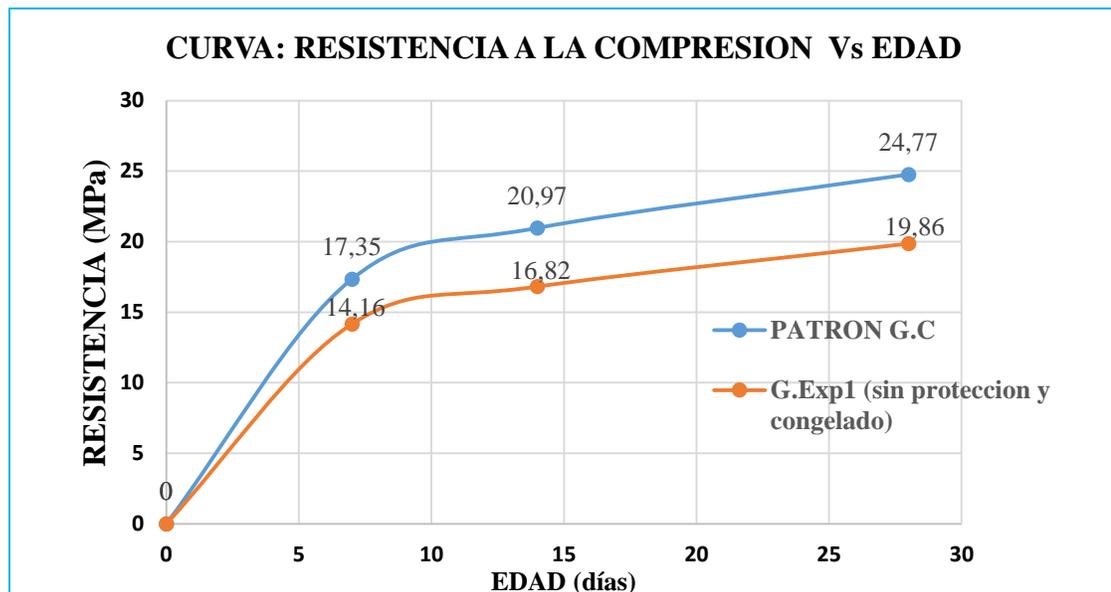
Probeta	Tipo de curado	Edad (días)	Peso (Kg)	Altura h (mm)	Diámetro D (mm)	Área A (mm ²)	Carga F (N)	Esfuerzo σ (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa)
GC1	SUMERGIDO	7	13,150	304	152	18145,84	304700	16,79	17,35
GC2		7	13,070	304	152	18145,84	300400	16,55	
GC3		7	13,110	304	152	18145,84	313200	17,26	
GC4		7	13,035	304	152	18145,84	341200	18,80	
GC5		7	13,090	304	152	18145,84	314500	17,33	
GC6	SUMERGIDO	14	13,115	304	152	18145,84	386200	21,28	20,97
GC7		14	13,045	304	152	18145,84	378400	20,85	
GC8		14	13,075	304	152	18145,84	372200	20,51	
GC9		14	13,080	304	152	18145,84	381500	21,02	
GC10		14	13,085	304	152	18145,84	384300	21,18	
GC11	SUMERGIDO	28	13,150	304	152	18145,84	445400	24,55	24,77
GC12		28	13,185	304	152	18145,84	450800	24,84	
GC13		28	13,140	304	152	18145,84	443500	24,44	
GC14		28	13,175	304	152	18145,84	453000	24,96	
GC15		28	13,210	304	152	18145,84	454300	25,04	

3.11.2 Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión (G.Exp.1)

Este de grupo de control (condiciones desfavorables) o sea sometidas a ciclos de congelamiento y deshielo sin protección. Se muestra los resultados de la resistencia a la compresión en la siguiente tabla para probetas ensayadas a los 7, 14 y 28 días.

Tabla 3.9: Ensayo de Resistencia a la Compresión Grupo (G.Exp1)

Probeta	Tipo de curado	Edad (días)	Peso (Kg)	Altura h (mm)	Diámetro D (mm)	Área A (mm ²)	Carga F (N)	Esfuerzo σ (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa)
GExp1	SUMERGIDO	7	13,025	303	152	18145,84	265300	14,62	14,16
GExp2		7	13,020	303	152	18145,84	249200	13,73	
GExp3		7	13,022	303	152	18145,84	256400	14,13	
GExp4	SUMERGIDO	14	13,115	304	152	18145,84	303300	16,71	16,82
GExp5		14	13,090	304	152	18145,84	309900	17,08	
GExp6		14	13,103	304	152	18145,84	302236	16,66	
GExp7	SUMERGIDO	28	13,160	304	152	18145,84	356800	19,66	19,86
GExp8		28	13,145	304	152	18145,84	364100	20,07	
GExp9		28	13,155	304	152	18145,84	360100	19,84	



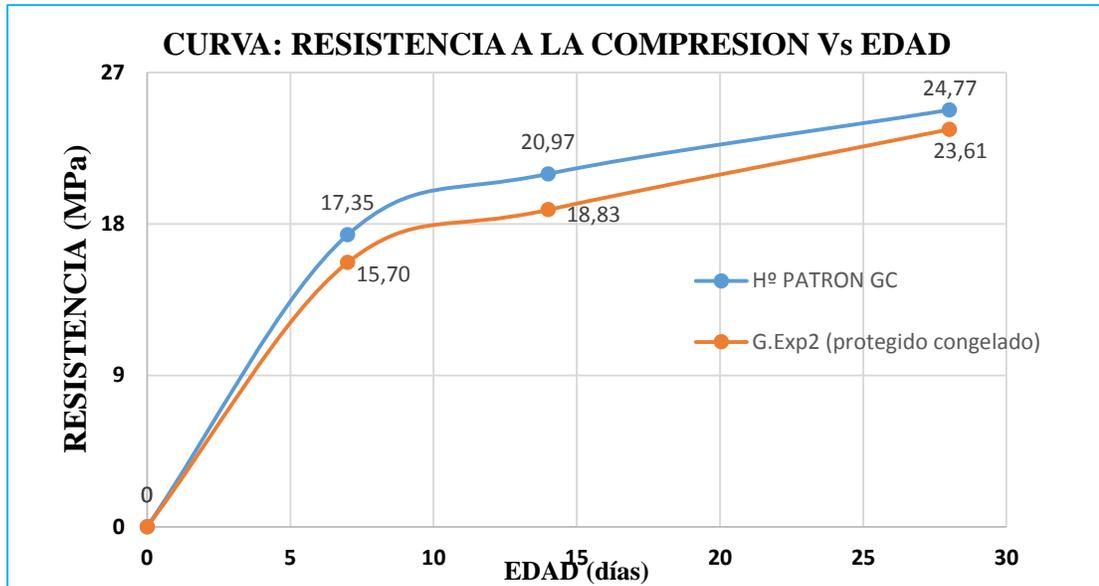
Grafica 3.6: Comparación H° G.C vs H° G.Exp1

3.11.3 Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión (G.Exp2)

Este grupo experimental es protegido con polietileno y papel es sometido a ciclos de congelamiento y deshielo. En el día curado sumergido y en la noche congelado. En la siguiente tabla 3.10 se muestran los resultados de resistencia a la compresión para las probetas de hormigón protegidas a los 7 días y 28 días y ensayadas a los 7, 14 y 28 días.

Tabla 3.10: Ensayo de Resistencia a la Compresión Grupo Experimental G.Exp2

Probeta	Días protegidos	Tipo de curado	Edad (días)	Peso (Kg)	Altura h (mm)	Diámetro D (mm)	Área A (mm ²)	Carga F (N)	Esfuerzo σ (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa)		
G.EXP 1	7	SUMERGIDO	7	13,120	304	152	18145,84	291700	16,08	15,70		
G.EXP 2			7	13,090	304	152	18145,84	262700	14,48			
G.EXP 3			7	13,070	304	152	18145,84	289500	15,95			
G.EXP 4			7	13,095	304	152	18145,84	289600	15,96			
G.EXP 5			7	13,100	304	152	18145,84	290800	16,03			
G.EXP 6			14	13,110	304	152	18145,84	325700	17,95	18,04		
G.EXP 7			14	13,115	304	152	18145,84	326300	17,98			
G.EXP 8			14	13,120	304	152	18145,84	330100	18,19			
G.EXP 9			14	SUMERGIDO	28	13,145	304	152	18145,84	405800	22,36	22,34
G.EXP 10					28	13,150	304	152	18145,84	403900	22,26	
G.EXP 11					28	13,155	304	152	18145,84	406200	22,39	
G.EXP 12	14	13,120			304	152	18145,84	334200	18,42	18,83		
G.EXP 13	14	13,100			304	152	18145,84	333900	18,40			
G.EXP 14	14	13,100	304	152	18145,84	373800	20,60					
G.EXP 15	14	13,130	304	152	18145,84	334100	18,41					
G.EXP 16	14	SUMERGIDO	14	13,140	304	152	18145,84	332800	18,34	23,10		
G.EXP 17			28	13,165	304	152	18145,84	420300	23,16			
G.EXP 18			28	13,155	304	152	18145,84	421300	23,22			
G.EXP 19			28	13,140	304	152	18145,84	415700	22,91			
G.EXP 20	28	SUMERGIDO	28	13,185	304	152	18145,84	438200	24,15	23,61		
G.EXP 21			28	13,175	304	152	18145,84	418700	23,07			
G.EXP 22			28	13,145	304	152	18145,84	439300	24,21			
G.EXP 23			28	13,140	304	152	18145,84	425600	23,45			
G.EXP 24			28	13,135	304	152	18145,84	420200	23,16			

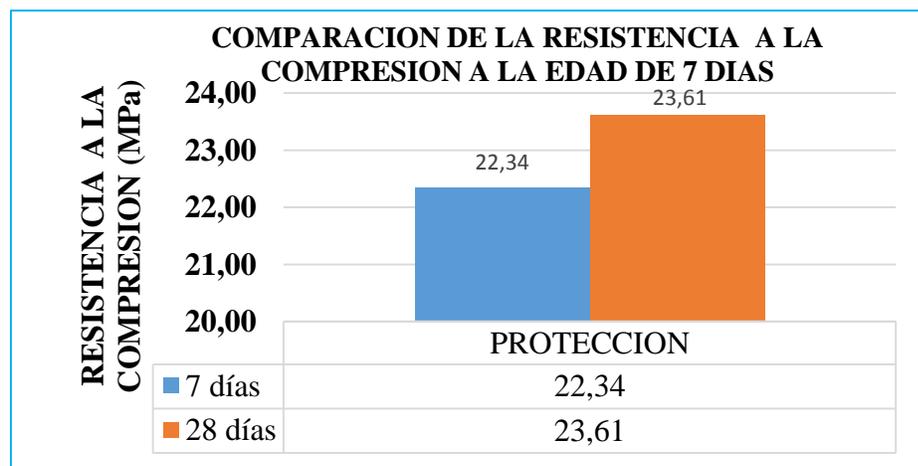


Grafica 3.7: Comparación Hº patrón Vs Hº protegido con papel y polietileno

3.11.4 Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión (días de protección)

Tabla 3.11: Ensayo de Resistencia a la Compresión (días de protección)

protección	ensayo a: (días)	días de protección	
		7	28
papel + naylo GExp1	0	0	0
	7,00	15,70	15,70
	14,00	18,04	18,83
	28,00	22,34	23,61



Gráfica 3.8: Comparación de las Resistencias (7 días vs 28 días) de Protección

3.11.5 Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión (G.CA)

Este grupo de control (hormigón patrón) tiene aire incorporado, el cual se mantuvo en curado sumergido constante y no tuvo ciclos de congelamiento y deshielo. Los resultados de la resistencia a la compresión para las probetas de hormigón se muestran en la siguiente tabla, ensayadas a los 28 días.

Tabla 3.12: Ensayo de Resistencia a la Compresión Grupo (G.CA)

Probeta	Tipo de curado	Edad (días)	Peso (Kg)	Altura h (mm)	Diámetro D (mm)	Área A (mm ²)	Carga F (N)	Esfuerzo σ (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa)
GC. 1A	SUMERGIDO	28	12,995	303	152	18145,84	406500	22,40	22,40
GC. 2A		28	12,994	303	152	18145,84	406600	22,41	
GC. 3A		28	12,985	303	152	18145,84	406400	22,40	
GC. 4A		28	12,998	303	152	18145,84	406700	22,41	
GC. 5A		28	12,993	303	152	18145,84	406300	22,39	

3.11.6 Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión (G.Exp1A)

Este grupo de tiene aire incorporado, el cual se mantuvo en curado sumergido en el día y en la noche sometido a ciclos de congelamiento y deshielo, las probetas no tuvieron protección. Los resultados de la resistencia a la compresión, se muestran en la siguiente tabla, ensayadas a los 28 días.

Tabla 3.13: Ensayo de Resistencia a la Compresión Grupo (G.Exp1A)

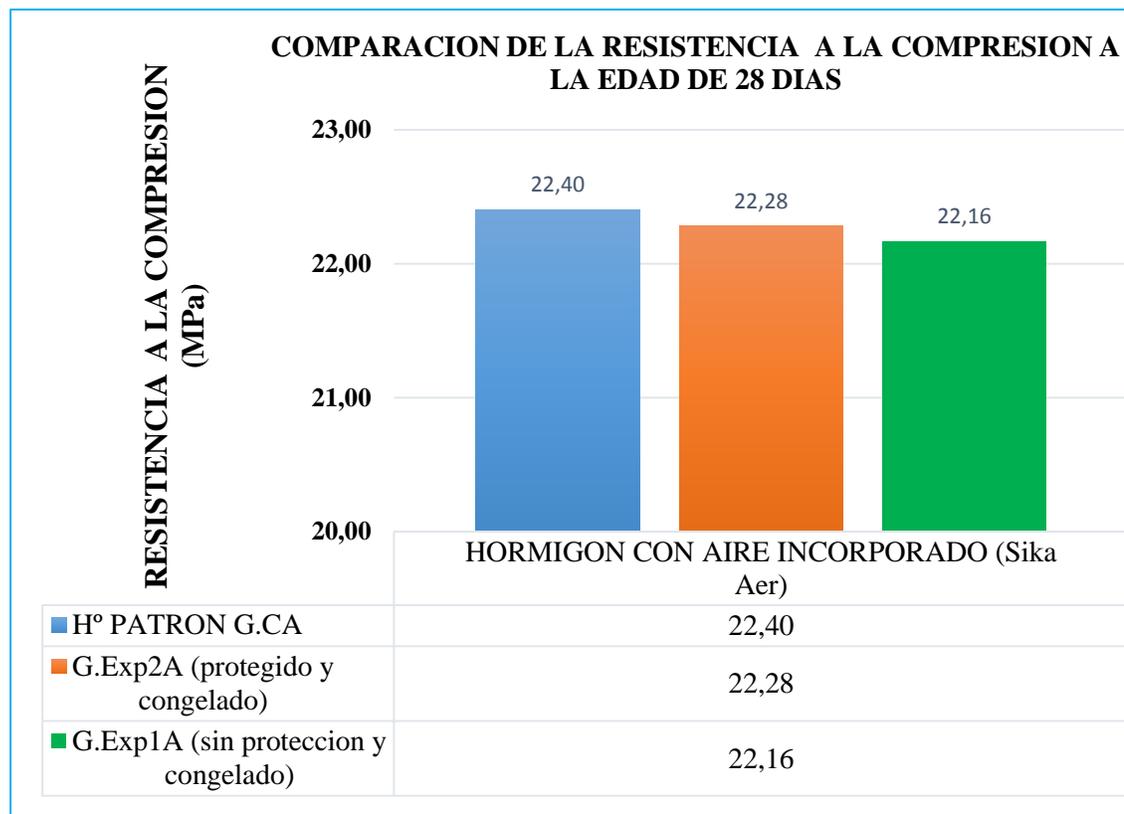
Probeta	Tipo de curado	Edad (días)	Peso (Kg)	Altura h (mm)	Diámetro D (mm)	Área A (mm ²)	Carga F (N)	Esfuerzo σ (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa)
G.Exp1A	SUMERGIDO	28	12,995	303	152	18145,84	402200	22,16	22,16
G.Exp2A		28	12,965	303	152	18145,84	402200	22,16	
G.Exp3A		28	12,989	303	152	18145,84	402100	22,16	
G.Exp4A		28	12,975	303	152	18145,84	402300	22,17	
G.Exp5A		28	12,985	303	152	18145,84	402100	22,16	

3.11.7 Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión (G.Exp2A)

Este grupo de tiene aire incorporado, el cual se mantuvo en curado sumergido en el día y en la noche sometido ciclos de congelamiento y deshielo, y las probetas fueron protegidas con papel y polietileno. Los resultados de la resistencia a la compresión, se muestran en la siguiente tabla, ensayadas a los 28 días.

Tabla 3.14: Ensayo de Resistencia a la Compresión Grupo (G.Exp2A)

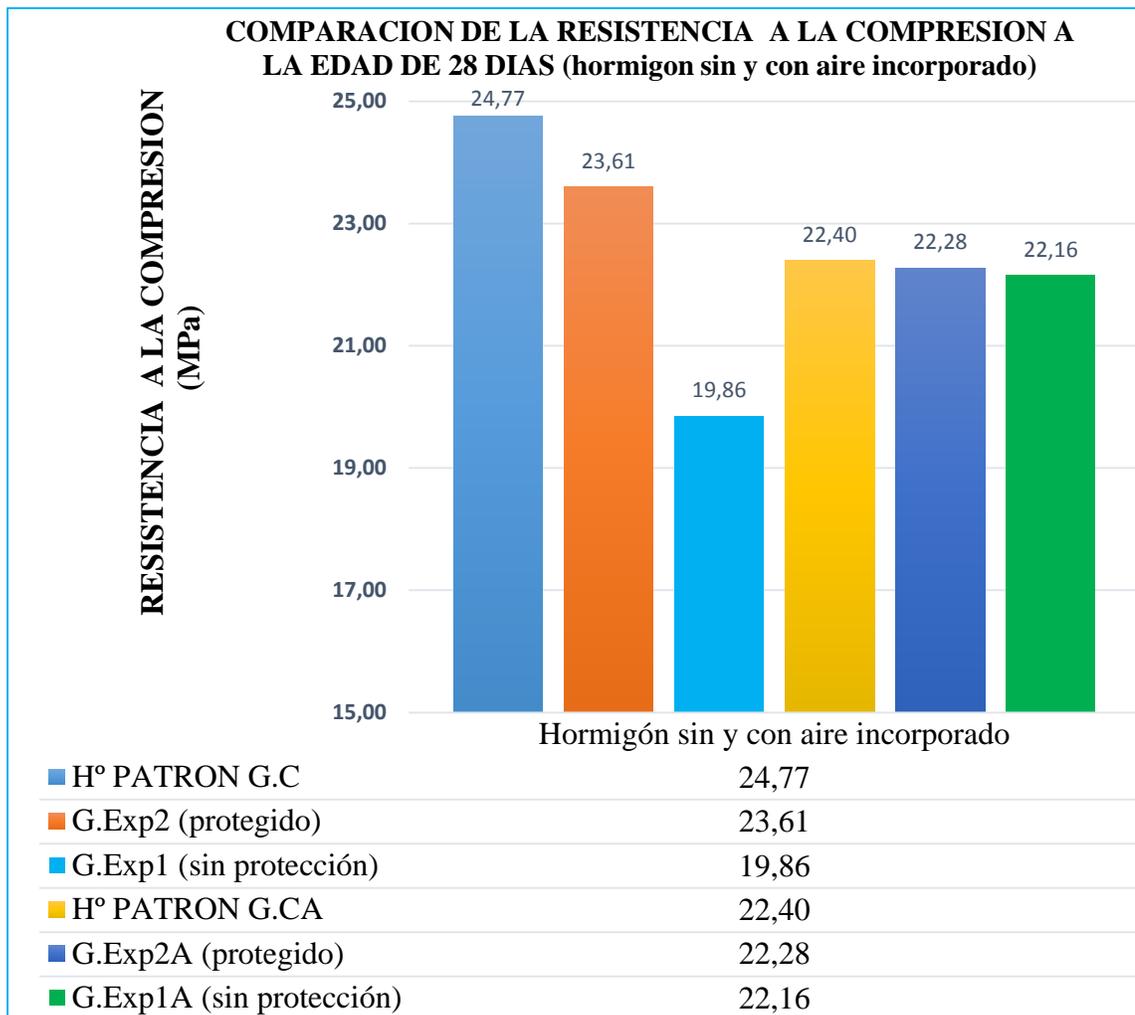
Probeta	Tipo de curado	Edad (días)	Peso (Kg)	Altura h (mm)	Diámetro D (mm)	Área A (mm ²)	Carga F (N)	Esfuerzo σ (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa)
G.Exp1A	SUMERGIDO	28	12,988	303	152	18145,84	404100	22,27	22,28
G.Exp2A		28	12,991	303	152	18145,84	404200	22,28	
G.Exp3A		28	12,958	303	152	18145,84	404300	22,28	
G.Exp4A		28	12,976	303	152	18145,84	404300	22,28	
G.Exp5A		28	12,980	303	152	18145,84	404400	22,29	



Gráfica 3.9: Comparación de la Resistencia del Hormigón con aire incorporado

Tabla 3.15: Resultados de la Resistencia a la Compresión

RESISTENCIA A LA COMPRESION DEL HORMIGON (MPa)						
	HORMIGON SIN AIRE INCORPORADO			HORMIGON CON AIRE INCORPORADO		
EDAD (días)	H° PATRON GC	SIN PROTECCION G.Exp1	P+NAYLO G.Exp2	H° PATRON G.CA	SIN PROTECCION G.EXP1A	P+NAYLO G.Exp2A
0	0	0	0	–	–	–
7	17,35	14,16	15,70	–	–	–
14	20,97	16,82	18,83	–	–	–
28	24,77	19,86	23,61	22,40	22,16	22,28



Gráfica 3.10: Comparación de las Resistencias a Compresión de los Ensayos

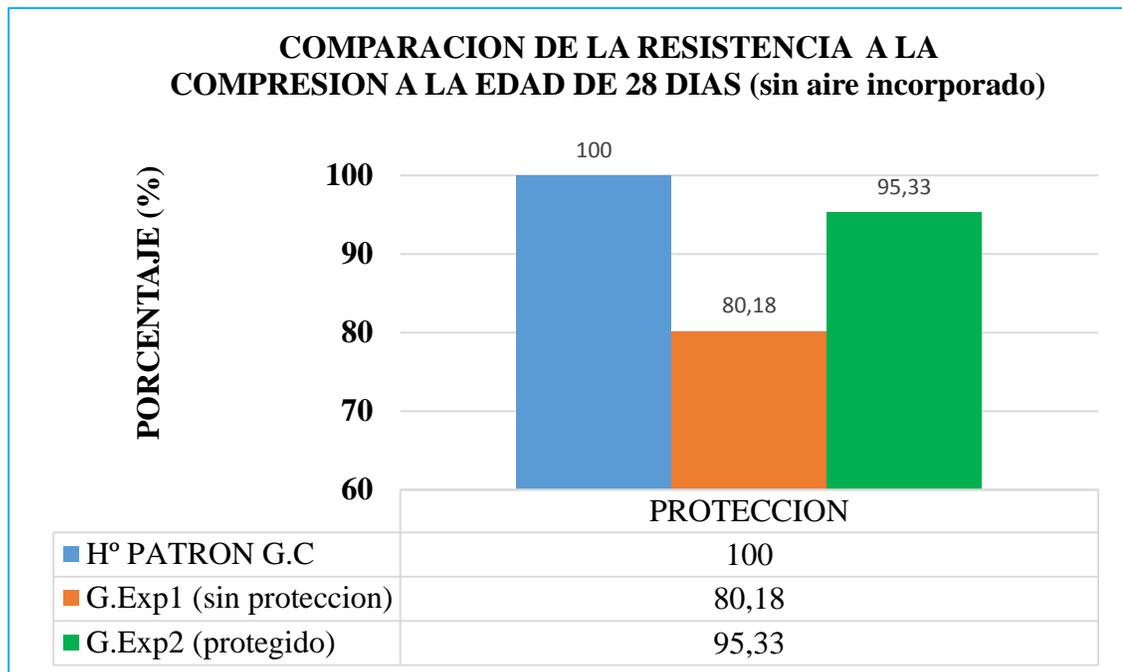
CAPITULO IV

ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Generalidades

En este capítulo de la investigación se compararan y se analizaran los resultados obtenidos del hormigón con y sin la incorporación de un aditivo (Sika Aer) incorporador de aire, acerca del comportamiento del hormigón sometido a ciclos de congelamiento y deshielo, algunas probetas fueron protegidas y otras no tuvieron protección.

4.2 Hormigón sin aire incorporado: Análisis comparativo de la resistencia a la compresión del hormigón protegido y sin protección

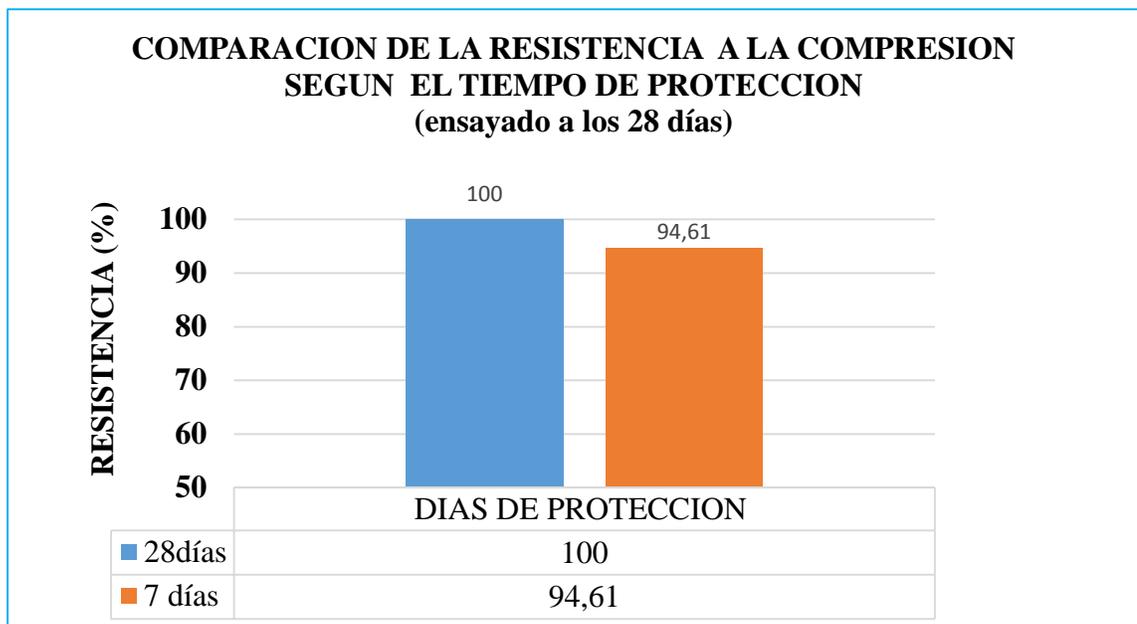


Grafica 4.1: Comparación de la Resistencia a la Compresión según la Protección

En la gráfica se observan la comparación de la resistencia a la compresión de las diferentes probetas de hormigón, considerando la resistencia a la edad de 28 días.

En donde se consideró el hormigón patrón (G.C), al hormigón curado en condiciones óptimas sumergido en agua, y ensayado a la resistencia a la compresión a los 28 días, considerando este como el 100%, como se muestra en la gráfica 4.1.

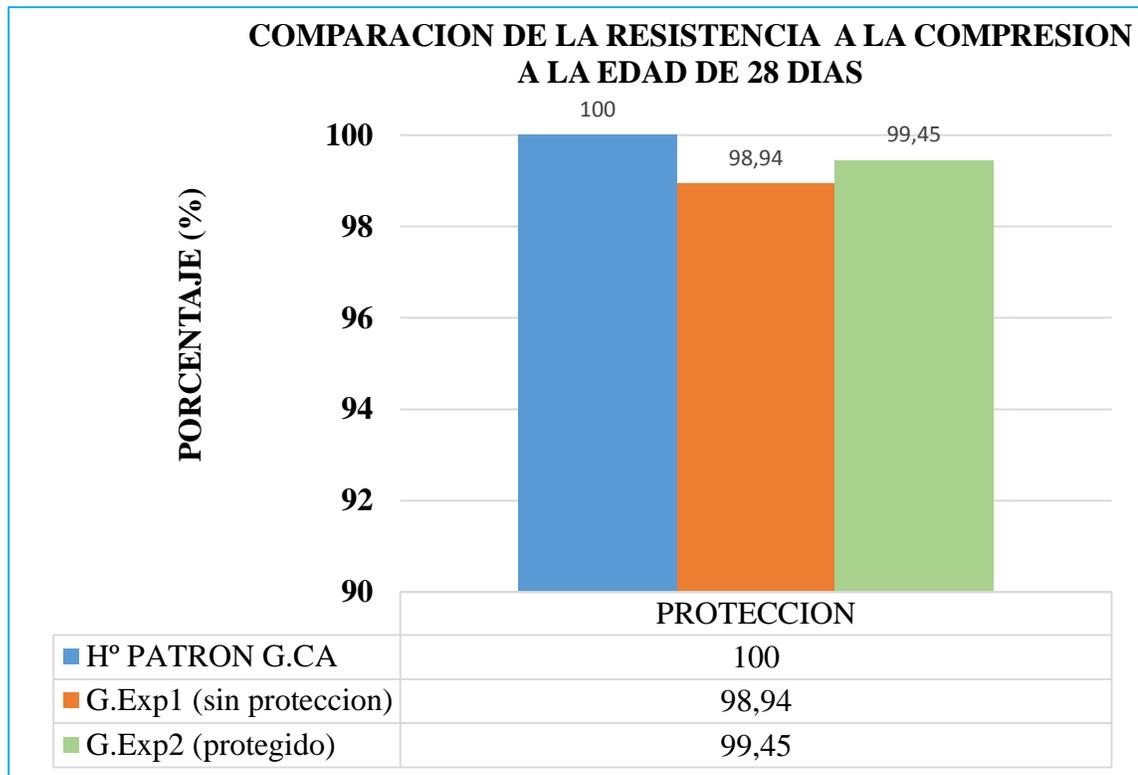
- El hormigón patrón (G.C) curado por 28 días sumergido es más resistente en: 19.82% que el hormigón no protegido (G.Exp1) sometido a ciclos de congelamiento y deshielo).
- Para el hormigón protegido con polietileno con papel (G.Exp2) sometido a ciclos de congelamiento. La diferencia con el hormigón patrón (G.C) es: 4.67%.



Grafica 4.2: Resistencia a la Compresión según Tiempo de Protección

- Según la gráfica 4.2 se observa que el hormigón (G.Exp2) protegido con papel y polietileno durante 28 días es más resistente en; 5.39% que el hormigón protegido durante 7 días.

4.3 Hormigón con aire incorporado: Análisis comparativo de la resistencia a la compresión del hormigón protegido y sin protección

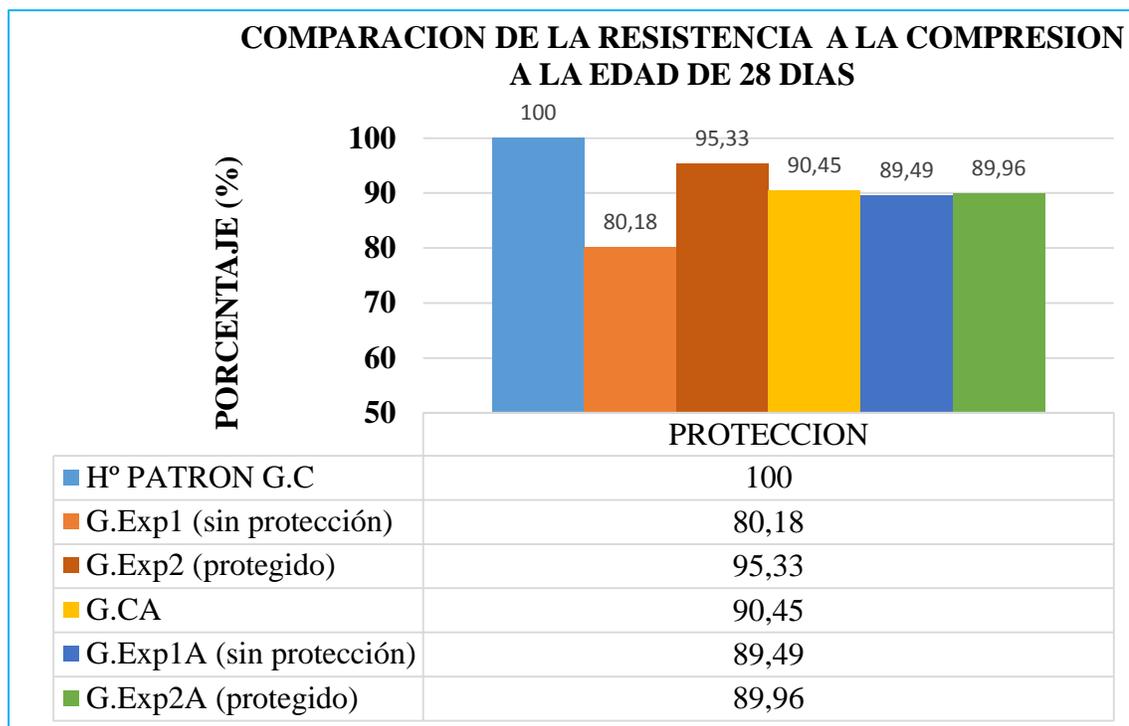


Grafica 4.3: Resistencia a la Compresión según la Protección

En donde se consideró el hormigón patrón (G.CA) con aditivo incorporador de aire, curado sumergido constante en agua, y ensayado a la resistencia a la compresión a los 28 días, considerando este como el 100%, como se muestra en la gráfica 4.3.

- El hormigón patrón (G.CA) con aire incorporado curado por 28 días sumergido constante en agua es más resistente en: 1.06% que el hormigón con aire incorporado no protegido (G.Exp1A) sometido a ciclos de congelamiento y deshielo.
- Para el hormigón con aire incorporado protegido con polietileno con papel (G.Exp2A) sometido a ciclos de congelamiento. La diferencia con el hormigón patrón (G.CA) con aire incorporado es: 0.55%.

4.4 Hormigón con y sin aire incorporado: Análisis comparativo de la resistencia a la compresión del hormigón protegido y sin protección a los 28 días



Grafica 4.4: Resistencia a la Compresión según Tiempo de Protección

En donde se consideró el hormigón patrón (G.C) sin aire incorporado, curado en condiciones óptimas sumergido en agua, y ensayado a la resistencia a la compresión a los 28 días, considerando este como el 100%, como se muestra en la gráfica 4.4.

- El hormigón patrón (G.C) sin aire incorporado curado por 28 días sumergido constante es más resistente en: 9.55% que el hormigón patrón (G.CA) con aire incorporado curado sumergido constante en agua.
- El hormigón patrón (G.C) sin aire incorporado curado por 28 días sumergido constante es más resistente en: 10.51% que el hormigón (G.Exp1A) con aire incorporado, no protegido y sometido a ciclos de congelamiento y deshielo.
- El hormigón patrón (G.C) sin aire incorporado curado por 28 días sumergido constante es más resistente en: 10.04% que el hormigón (G.Exp2A) con aire incorporado, protegido con papel y polietileno y sometido a ciclos de hielo deshielo.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- ❖ Según los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión se tiene que las probetas protegidas con papel y polietileno presenta una resistencia menor en un 4.67% comparado con los resultados del hormigón patrón y las probetas sin protección presentan una disminución mayor en la resistencia del 19.82%; lo que evidencia que el proceso de congelamiento y deshielo afecta de forma desfavorable a la resistencia a compresión del hormigón, así mismo se deduce la importancia de proteger el hormigón ante estos procesos de variación de temperatura para reducir su incidencia negativa en la resistencia del hormigón.
- ❖ De acuerdo a los ensayos de compresión realizados en proteger al hormigón del congelamiento y deshielo a diferentes edades, se tiene una resistencia de 22.34MPa protegido en los primeros 7 días y de 23.61 MPa protegido hasta los 28 días; se obtuvo una diferencia de 5.39%. por lo que concluimos que solo se tiene que proteger durante los 7 primeros días, por el costo económico que generaría realizar esta actividad
- ❖ De las probetas con aire incorporado los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión se tiene que el hormigón patrón, es menor en 9.55% de la resistencia a compresión del hormigón patrón normal; esto indica que se reduce la resistencia a la compresión cuando se usa aditivo incorporador de aire en la elaboración del hormigón como indica la ficha técnica del producto.
- ❖ Según los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión se tiene que el hormigón con aire incorporado y protegido con papel y polietileno tienen una resistencia menor en un 10.04% comparado con los resultados del hormigón patrón y el hormigón con aire incorporado sin protección se tiene una disminución en la resistencia de 10.51% respecto de la resistencia a compresión del hormigón patrón;

debido a que la diferencia es muy pequeña , concluimos que no es necesario proteger al hormigón de las bajas temperaturas cuando se utiliza aditivo incorporador de aire en la elaboración de hormigones.

5.2 Recomendaciones

- ❖ Se recomienda el uso de papel con polietileno para la protección del hormigón expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo; porque de acuerdo a los ensayos obtenidos se tiene que la resistencia mejora, respecto al hormigón sin protección.
- ❖ Se recomienda el uso de papel con polietileno para la protección de elementos de hormigón como las columnas, vigas, losas, muros de contención, etc. por ser materiales que toman fácilmente cualquier forma y son de fácil manipulación.
- ❖ Se recomienda la utilización del aditivo incorporador de aire para la elaboración de hormigones cuando el mismo este expuesto a bajas temperaturas o cuando se tenga ciclos de congelamiento y deshielo; por que la resistencia a la compresión es mayor respecto al hormigón sin aditivo incorporador de aire
- ❖ Se recomienda no proteger al hormigón de las bajas temperaturas cuando se utiliza aditivo incorporador de aire; debido a que la diferencia de la resistencia a compresión no es mucho
- ❖ Se recomienda realizar una investigación con otros materiales de protección del hormigón expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo como son polietileno con aserrín, mantas térmicas, lana mineral, lamina de poliestireno expandido, etc.
- ❖ Realizar investigación con otros tipos de aditivos (acelerantes)