

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS ADITIVOS EN LA TRABAJABILIDAD DEL HORMIGÓN PARA LA ELABORACIÓN DE LOSAS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS

INTRODUCCIÓN

El pavimento es una estructura vial que tiene como fin principal ofrecer una superficie de tránsito vehicular limpio, cómodo, seguro y durable. Esta estructura se la construye directa y continuamente apoyada sobre el suelo.

El Pavimento Rígido está constituido por un conjunto de losas de hormigón en masa separadas por juntas transversales, o por una losa continua de hormigón armado, el hormigón se pone en obra con una consistencia tal, que requiere en la mayoría de los casos el empleo de componentes adicionales, como ser, la incorporación de aditivos a estas mezclas para mejorar cada una de estas propiedades, el aditivo se incorpora en un porcentaje por debajo del 5% del peso del cemento.

Entre estas propiedades importantes para que el hormigón presente las características adecuadas, se debe partir desde las propiedades del hormigón en estado fresco, y una de estas propiedades es la trabajabilidad para la aplicación del concreto en pavimentos rígidos. La trabajabilidad resulta difícil de evaluar, en esencia, es la facilidad con la cual pueden mezclarse los ingredientes y la mezcla resultante se puede manejar, transportar y colocar con poca pérdida de homogeneidad. Una característica de la trabajabilidad que se trata a menudo de medir es la consistencia y la fluidez.

En Bolivia los aditivos químicos se introducen a finales del año 1994, en un mercado restringido. La primera norma nacional de aditivos corresponde y se basa en la norma ASTM C-494 y 1017. Los requerimientos de estas normas se refieren de acuerdo al desempeño de los concretos con aditivos, especificando su aumento en las características como la trabajabilidad, deformación y resistencia.

Debido a los avances tecnológicos y el incremento demográfico, en nuestro país y en nuestro departamento se ha visto la necesidad de realizar obras viales que requieren concretos con resistencias superiores al concreto normal.

Entre los requerimientos anteriormente citados para el uso de aditivos, el que nos compete en este caso para la elaboración del presente trabajo de investigación es el mejoramiento de la trabajabilidad de la mezcla de hormigón para la elaboración de losas de hormigón en masa como carpeta de rodadura en la construcción de pavimentos rígidos.

La presente investigación se concentrara en establecer la influencia de los aditivos en la trabajabilidad de las mezclas de hormigón a través de los valores de consistencia que presente la mezcla por medio del uso del Cono de Abrams , para la elaboración de losas en la construcción de pavimentos rígidos, debido a la aplicación de tres clases de aditivos en diferentes porcentajes, a fin de obtener valores reales producto del diseño y elaboración de mezclas con agregados que se usan en nuestro medio, y que puedan ser utilizados en los diseños de las construcciones viales de pavimentos rígidos en el Departamento de Tarija y en toda Bolivia, brindando un significativo avance tecnológico en materia de concretos de pavimentos, ya que en la actualidad por el alto costo de la construcción y mantenimiento de vialidades es conveniente la búsqueda de alternativas que no generen grandes inversiones.

1.1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Para determinar experimentalmente la influencia de los aditivos en la trabajabilidad del hormigón utilizado en la elaboración de losas en el diseño de pavimentos de concreto hidráulico, resulta importante el conocimiento de ciertas áreas involucradas en el tema, además es conveniente aplicar algunos términos que requieran una definición previa.

Se abarcan temas relacionados directamente al trabajo de investigación, es decir, conceptos básicos de pavimentos rígidos, generalidades acerca de cada uno de los componentes involucrados en la elaboración del concreto incluyendo así también

conceptos de diferentes tipos de aditivos, el estudio básico del factor principal de investigación que es la trabajabilidad del concreto en pavimentos rígidos.

1.1.1. Revisión bibliográfica relacionada

La elaboración del trabajo de investigación estará concentrada en la revisión bibliográfica en todo lo que conlleva al conocimiento de hormigones de alta resistencia, características de los pavimentos rígidos, características de los aditivos, y así también las características del hormigón en estado fresco.

➤ ***Presentación conocimiento científico***

Se sabe que la cantidad de agua en la mezcla y su consolidación tiene una influencia crítica sobre la durabilidad del hormigón endurecido. La menor cantidad de agua que produzca un hormigón plástico, trabajable y fácilmente consolidable, permitirá obtener una mayor resistencia del hormigón endurecido.

Cuando se necesitan condiciones especiales de durabilidad, se aconseja la incorporación de aditivos, la que además de mejorar la durabilidad del hormigón endurecido, mejora las condiciones del hormigón plástico al:

- a) *Prevenir la segregación de los materiales*
- b) ***Aumentar su trabajabilidad***
- c) *Disminuir la exudación*
- d) *Reducir la cantidad de agua necesaria para obtener una satisfactoria trabajabilidad.*

➤ ***Análisis de investigaciones anteriores***

Para el presente estudio de investigación, se efectuó una revisión de temas relacionados a la influencia de los aditivos en la trabajabilidad del hormigón, entre los que podemos destacar:

Soroka, L. La trabajabilidad del hormigón puede ser definida como “la propiedad que determina el esfuerzo necesario para manipular cierta cantidad de hormigón en estado fresco con una mínima pérdida de homogeneidad”. En este

trabajo de investigación el término *manipular* se refiere a todas las operaciones relacionadas con el manejo del hormigón fresco, tales como el transporte, la colocación, la compactación, el curado y en algunos casos el acabado. En otras palabras, la trabajabilidad es aquella propiedad que hace al hormigón fresco más manejable sin tener el riesgo de segregación.

Díaz, E. “Influencia del aditivo plastificante en la resistencia a la compresión, tiempo de fragua y trabajabilidad del concreto”. Determina la influencia que tienen algunos aditivos integrales en la trabajabilidad de la mezcla y en la resistencia a compresión del concreto a la edad de 3, 7 y 28 días. Para ello se consideraron los contenidos nominales de cemento de 300 y 400 Kg/m³.

Igualmente se varió la dosis de aditivos desde valores nulos hasta duplicar la recomendación de las tres marcas comerciales empleadas: Sikalite, Stearox-L y Ultraseal A.M.

En la investigación se determina mediante ensayos, cual es el aditivo que brinda mayor resistencia a la flexión, mejor trabajabilidad, así como cuáles son las diferentes funciones y ventajas de dichos aditivos.

La investigación sirvió como papel de referencia en este estudio, debido a que dicto las pautas de los diseños de las mezclas que en este trabajo se llegaron a estudiar, estos aditivos corresponden a los aditivos Sika Aer, Sikament 180, Sikament 320.

Palacios, M. “Influencia de aditivos PCE en el comportamiento reológico, mecánico y durable de concretos”. En esta tesis el autor asegura que los aditivos superplastificantes pueden reducir el contenido de agua para una misma trabajabilidad o mejorar la trabajabilidad para una misma relación agua/cemento.

1.1.2. Justificación

La construcción de pavimentos rígidos requiere que todos los componentes del hormigón de pavimentos rígidos garanticen una homogeneidad y resistencia a la flexión que permita tener durabilidad en tiempo para lo cual la utilización de aditivos ha resultado una alternativa eficiente que debe comprobarse con los materiales locales con los que se efectúa un determinado proyecto.

El propósito de nuestro trabajo de investigación “ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS ADITIVOS EN LA TRABAJABILIDAD DEL HORMIGÓN PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS” es valorar el efecto que van a tener los aditivos en el hormigón para pavimentos rígidos de manera que garantice una completa homogeneidad y permita en la ejecución del trabajo tener una condición de trabajabilidad que permita el colocado del hormigón en los tiempos que nos permite el fraguado con la premisa de que este hormigón de pavimento rígido cumplirá satisfactoriamente la resistencia a la flexión en su condición endurecida.

Si bien existe mucha bibliografía sobre procedimientos de elaboración de mezclas, la particularidad se presenta cuando los materiales con los que se elabora un hormigón de pavimento rígido son locales y tienen sus propias propiedades y características en los cuales se debe buscar para un proyecto de pavimentos rígidos garantizar que el hormigón tanto en condición endurecido como para su colocación tenga las mejores condiciones, aspectos que se consiguen con la adición de aditivos especialmente diseñados para mejorar estas condiciones.

Las prácticas en distintos países en la ejecución de pavimentos rígidos ha conducido que la mayoría de las empresas constructoras de pavimentos rígidos óptimo efecto con la adición de aditivos que a pesar de tener un mayor costo está comprobada por las investigaciones realizadas de permitir una mayor colocación (trabajabilidad) y una mayor resistencia.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el trabajo de investigación, se podrá aplicar así también a todas aquellas estructuras donde el hormigón necesite mejorar sus

propiedades en estado fresco y endurecido, en aquellos hormigones autocompactantes donde se busca cumplir la capacidad de paso de manera que ofrezca optima fluidez en el encofrado, la capacidad de llenado garantizando el recubrimiento superficial y de las armaduras y resistencia a la segregación durante el transporte, colocación y fraguado de la mezcla de hormigón.

1.2. DISEÑO TEÓRICO

1.2.1. Determinación del problema

➤ Situación problemática

Una de las situaciones críticas de las carreteras en el país, corresponde a la baja durabilidad de los pavimentos rígidos, situación que con frecuencia se le asocia a la baja calidad de las mezclas de concreto que son utilizadas como carpetas de rodadura.

Uno de los problemas más frecuentes en los pavimentos de hormigón es la aparición de fisuras a temprana edad, al cual contribuye su gran superficie expuesta a los efectos del medio ambiente y del suelo de apoyo. El fenómeno involucra el período más cercano a la transición del hormigón de suspensión líquida a sólido rígido, y es afectado tanto por sus propiedades y las de sus materiales componentes como por los procesos constructivos y las condiciones de obra.

Por tal motivo la reparación o sustitución no son aceptables en función del gran volumen de tránsito de estas obras y las consecuencias socio-económicas negativas que se presentan, para vencer este desafío, es imprescindible el empleo de hormigones de alta resistencia y desempeño a temprana edad.

La necesidad de bombear concreto a diferentes o distancias considerables, presenta un problema, que consiste en la trabazón del concreto en las tuberías de bombeo, limitando su traslado y haciéndolo más costoso, dicho inconveniente es el resultado de la poca trabajabilidad del hormigón que presenta en situaciones donde la cantidad de agua que se añade a la mezcla no proporciona docilidad y compactación necesaria.

Al dosificar hormigones, se deben cumplir condiciones establecidas para las mezclas frescas y endurecidas, existiendo un compromiso entre la facilidad de

colocación y las propiedades posteriores del hormigón endurecido. Para un conjunto determinado de materiales la única manera de conferir a la mezcla una mayor movilidad es agregarle agua, pero lamentablemente esa agua adicional trae como consecuencia un desmejoramiento en la calidad del hormigón endurecido, que se traduce en menor resistencia mecánica, mayor contracción por secado, mayor permeabilidad y por lo tanto menor resistencia a los ataques de agentes agresivos. Generalmente se utilizan relaciones de agua/cemento bajas lo que conduce necesariamente a la utilización de algún tipo de aditivo puede ser plastificante, fluidificante o superfluidificantes.

En este sentido, se observa la necesidad de conocer la influencia que tiene cada uno de los tres tipos de aditivos, sobre las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido, principalmente trabajabilidad y resistencia.

Bajo estas perspectivas el investigador se planteó realizar un estudio de diferentes diseños de mezclas de hormigón para la elaboración de losas en pavimentos rígidos empleando tres tipos de aditivos diferentes, y agregados de la región.

➤ **Formulación del Problema**

¿De qué manera influye la utilización de diferentes tipos de aditivos, en diferentes porcentajes, en una de las propiedades del hormigón en estado fresco, como es el de la trabajabilidad de las mezclas para la elaboración de losas de hormigón como carpeta de rodadura en pavimentos rígidos?

1.2.2. Objetivos de Investigación

➤ **Objetivo general**

El objetivo de este trabajo de investigación es analizar la incidencia de diferentes tipos de aditivos en el comportamiento de las propiedades de distintas mezclas de hormigón con materiales de la región, para la elaboración de losas en pavimentos rígidos de manera que a partir de los resultados obtenidos posteriormente en los proyectos se tomen mejores decisiones del uso de aditivos para el hormigón en pavimentos rígidos de nuestro medio.

➤ **Objetivos específicos**

- ✓ Establecer los aspectos conceptuales y técnicas relacionadas con la investigación.
- ✓ Establecer la caracterización en base a ensayos estándar de los componentes agregado, cemento y aditivos para elaborar concretos de pavimentos rígidos.
- ✓ Establecer diseños de mezclas utilizando diferentes tipos de aditivos dentro del rango determinado por el fabricante, con el cual se obtengan valores de resistencia adecuadas, considerándolos así como concretos de buena trabajabilidad y resistencia.
- ✓ Analizar para cada tipo de aditivo, las propiedades y características, y observar cómo influyen respecto a la trabajabilidad característica inicial del hormigón fresco.
- ✓ Realizar un análisis comparativo de la influencia de cada uno de los tres aditivos a ser empleados en la elaboración del hormigón a partir de los resultados obtenidos en esta investigación, examinando si los resultados son coherentes unos entre otros.
- ✓ Analizar cuál es el efecto de los aditivos en el concreto, como elemento que le otorga trabajabilidad, en cuanto a la resistencia del hormigón cuando este se encuentra en estado fresco y endurecido.
- ✓ Establecer conclusiones y recomendaciones sobre los resultados de la investigación.

1.2.3. Hipótesis argumentación

Como parte del método de este trabajo de investigación aplicada, en base al conocimiento adquirido a través de una infinita bibliografía, se planteara la hipótesis para responder la pregunta de investigación.

➤ **Investigación de correlación explicativa.-**

De acuerdo al problema planteado anteriormente, existe una relación entre variables, es decir, la variable independiente (incorporación de aditivos y relación

agua/cemento baja) predice el comportamiento de la variable dependiente (mayor trabajabilidad de la muestra), por tal razón, la hipótesis de argumentación resulta ser la siguiente.

- ✓ La utilización de material triturado, aditivos plastificantes, superplastificantes reductores de agua (Sikament-180, Sikament-320) y relaciones agua-cemento bajas permite obtener mayor trabajabilidad y resistencia en la elaboración de hormigones de pavimentos rígidos, cuya implicancia sea proporcionar mejor desempeño a largo tiempo.

1.2.4. Definición de variables conceptuales y experimentales

La selección de las variables conceptuales y experimentales, producto de acuerdo al problema y el objetivo planteado realizado en el trabajo de investigación llegando a ser las siguientes.

➤ Variables

- ✓ **Variable Independiente:** Son los diferentes tipos de *ADITIVOS* en las mezclas de hormigón de pavimentos rígidos.
- ✓ **Variable Dependiente.-** Comportamiento de las propiedades del hormigón en estado fresco (*TRABAJABILIDAD*) y en estado endurecido (resistencia) del pavimento rígido a causa del uso de distintos aditivos.

➤ Operacionalización de las variables

Variables conceptuales.-

Aditivos.-

Los aditivos son productos que se adicionan en pequeña proporción al hormigón durante el mezclado en porcentajes entre 0.1% y 5%, de acuerdo al tipo de aditivo o el efecto que se desea obtener de la masa o peso del cemento, con el propósito de producir una modificación en algunas de sus propiedades originales o en el

comportamiento del concreto en su estado fresco o en condiciones de trabajo en una forma susceptible de ser prevista y controlada.

De acuerdo con la función que desempeñan los aditivos en el hormigón la norma ASTM C-494 y 1017 clasifica los aditivos de la siguiente manera:

- ✓ Reductores de agua (TIPO A)
- ✓ Retardadores (TIPO B)
- ✓ Acelerantes (TIPO C)
- ✓ Reductores de agua Retardantes (TIPO D)
- ✓ Reductores de agua Acelerantes (TIPO E)
- ✓ Reductores de agua de alto poder (TIPO F)
- ✓ Reductores de agua de alto poder Retardantes (TIPO G)

Variables experimentales.-

Trabajabilidad.-

Es una de las propiedades del hormigón en estado fresco, se define como la mayor o menor facilidad que tiene el hormigón a ser manipulado, transportado, colocado y compactado, de esta manera, se tendrán tres grados de trabajabilidad como: bueno, regular y malo.

La trabajabilidad influye definitivamente en el hormigón endurecido, de este depende también la compactación y por esta la densidad del hormigón fraguado, es decir, a mayor compactación se tendrá mayor densidad y por consiguiente mayor resistencia del hormigón.

La cantidad de agua es el primer factor que influye en la trabajabilidad del hormigón, y otros factores como las características de los agregados, de sus ingredientes en general.

La trabajabilidad del hormigón no se puede determinar de forma directa, pero la realización del **ensayo de asentamiento o revenimiento** resulta útil debido a que podemos darnos cuenta del grado de trabajabilidad de forma indirecta a través de la

consistencia de la mezcla de acuerdo a los asentamientos determinados en dicho ensayo utilizando el Cono de Abrams (ASTM C-143), pudiendo ser:

Tabla 1.1. Rangos de Fluidéz

TRABAJABILIDAD	RANGO DE CONSISTENCIA	ASENTAMIENTO a (cm)
Muy baja	Seca	$a \leq 2$ (semiseco)
Baja	Semiseca	$2 < a \leq 5$ (duro)
Media	Plástica	$5 < a \leq 10$ (plástico)
Alta	Fluida	$10 < a \leq 15$ (blando)
	Muy fluida	$15 \leq a$ (fluido)

Fuente: Incremento de la trabajabilidad del hormigón.¹

1.2.5. Contenido preliminar

El contenido preliminar del este trabajo de investigación incluirá:

CAPITULO II: TRABAJABILIDAD DEL HORMIGÓN CON INCORPORACIÓN DE ADITIVO EN LOSA DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

- ✓ Información centrada en lo que se refiere al comportamiento de las losas de hormigón para pavimentos rígidos, y además el comportamiento del hormigón en su estado fresco y endurecido.

CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

- ✓ Indicara los ensayos estándar realizados a todos los componentes de la mezcla de hormigón, el diseño de las mezclas y la dosis de aditivo utilizada.

CAPITULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

- ✓ Se realizara un análisis de comportamiento de las diferentes mezclas sin y con inclusión de aditivos, y un análisis entre dosis de aditivo.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

¹ Chávez. H. Hugo, (Incremento en la trabajabilidad del concreto, 2005)

- ✓ Estarán enfocados al cumplimiento o no de los objetivos principales como secundarios.

1.3. DISEÑO METODOLÓGICO

En esta sección se explica la metodología a seguir para desarrollar el trabajo experimental de laboratorio, con este fin, se establecen parámetros fijos y parámetros variables que permitan llevar un procedimiento de manera ordenada y que puedan servir de guía para explicar las posibles variaciones que se presenten en los resultados de las diferentes pruebas a realizar.

1.3.1. Unidad de estudio y decisión muestral

➤ Unidad de estudio.-

La finalidad del trabajo de investigación es el de analizar la influencia de los aditivos en la trabajabilidad de las muestras de hormigón, por tal motivo, el elemento a ser estudiado, es decir, la unidad de estudio corresponde a las *mezclas de hormigón para pavimentos rígidos* en sus propiedades en estado fresco y endurecido.

➤ Población.-

De acuerdo a nuestro problema y objetivo principal en la investigación, la población de estudio que entregara resultados a nuestro trabajo de investigación estará constituida por las *mezclas de hormigón para pavimento rígido con incorporación de aditivos*.

➤ Muestra.-

Debido a que la muestra es un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible, en la realización del trabajo de investigación se considera como muestra las mezclas de hormigón con la incorporación de aditivos *incorporadores de aire, reductores de agua y retardantes* concentrados en la trabajabilidad de dichas mezclas utilizadas en la elaboración de losas para pavimentos rígidos.

➤ **Muestreo**

Muestreo no probabilístico decisional.-

El tipo de muestreo considerado para ser examinado con el objetivo de sacar conclusiones, de acuerdo a la unidad de estudio y las características seleccionadas para la elaboración de las mezclas de hormigón mencionadas en el estudio de investigación será las mezclas de hormigón con incorporación de aditivos Sika Aer, Sikament 180 y el Sikament 320 en cada una de ellas analizando el comportamiento de las mezclas considerado como elementos de interés en este trabajo de investigación.

La unidad de muestreo estará concentrada de acuerdo al siguiente marco muestral:

- ✓ Mezclas de hormigón y aditivo Sika Aer.
- ✓ Mezclas de hormigón y aditivo Sikament 180.
- ✓ Mezclas de hormigón y aditivo Sikament 320.

1.3.2. Métodos, Técnicas y Procedimientos

Se establece el número de probetas y vigas de hormigón a elaborar y se explica detalladamente la metodología a utilizar para el diseño de estas, las resistencias que se espera obtener en cada una, el número de especímenes de prueba que serán elaborados por mezcla, las tasas de dosificación de aditivo y porcentajes de reducción de agua de cada mezcla; también se detallan las pruebas y ensayos a realizar al concreto para establecer diferentes parámetros que nos permitan conocer algunas de las propiedades en estado fresco, endurecido de las mezclas de concreto, por ejemplo: prueba de consistencia, prueba de resistencia a la compresión, prueba de resistencia a flexión, etc.

➤ **Experimentales.-**

De acuerdo al tipo de estudio de investigación que se quiere realizar el método experimental podrá responder a la hipótesis anteriormente planteada a partir de los resultados obtenidos.

Experimento.-

Esta investigación es de tipo experimental debido a que se manipulan variables independientes (aditivos) para ver sus efectos sobre la variable dependiente (trabajabilidad), de igual manera es un experimento puro debido a que existe una manipulación intencional de las variables independientes, y tiene una validez interna ya que se sabe que está ocurriendo realmente con la relación entre las dos variables.

Para conocer la causa-efecto indicado anteriormente es necesario realizar ensayos que permitan arrojar resultados a ser analizados posteriormente, por tal razón, este estudio de investigación partirá desde la elaboración de muestras de hormigón con y sin la incorporación de aditivos, para analizar de una mejor manera la influencia de estos componentes.

- ✓ *Probetas cilíndricas.-* las probetas cilíndricas tendrán las dimensiones de 15 cm de diámetro y 30 cm de alto, serán elaboradas en una cantidad de 30 (treinta) muestras por cada tipo de aditivo (Sika Aer, Sikament 180 y el Sikament 320), agregado grueso triturado regional, además, agregado fino (arena) regional, provenientes de la cantera San Luis provenientes del río Guadalquivir ubicada al sureste de la ciudad de Tarija aproximadamente a 7 km (ver ANEXO 2) por poseer características buscadas, dos clases de cemento Portland IP-30 (clase I), Portland IP-40 (clase I), y en lo referente al agua, ésta procederá del agua potable que se le suministra a los laboratorios de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” lugar donde la encargada del trabajo de investigación realizara sus pruebas.

- ✓ *Vigas rectangulares.-* las vigas tendrán las dimensiones de 15 cm de ancho, 15 cm de alto y 60 de largo, al igual que las probetas cilíndricas serán elaboradas en una cantidad de 30 muestras por cada tipo de aditivo (Sika Aer, Sikament 180 y el Sikament 320), agregado grueso triturado regional, provenientes de la cantera San Luis además, agregado fino (arena) regional,

dos clases de cemento Portland IP-30 (clase I), Portland IP-40 (clase I) y agua potable.

1.3.3. Preparación para la aplicación de instrumentos

➤ Descripción de los equipos.-

La utilización de los siguientes equipos primordiales para determinar características importantes como es el de la trabajabilidad a través de la consistencia y fluidez de las mezclas resultaran ser de gran importancia.

- ✓ *Cono de Abrams.*
- ✓ *Prensa hidráulica (resistencia a compresión).*
- ✓ *Máquina para ensayos a flexión.*

➤ Forma de operar.-

La forma de operar de los equipos a ser utilizados en la elaboración del trabajo de investigación se presenta de acuerdo a las propiedades que se quiera determinar en cada uno de los ensayos a realizar.

Cono de Abrams.- Se determinara la docilidad, es decir, la trabajabilidad de las muestras de hormigón para cada probeta cilíndrica y viga rectangular, tanto en las mezclas sin aditivo como en las mezclas con aditivo, a través del asentamiento, tomando en cuenta que la mezcla debe presentarse seca ya que este tipo de ensayo no se aplica a mezclas muy fluidas.

Se evaluara también la mejoría del hormigón en condiciones de tiempo, para 5 min, 10 min, 15 min, 30 min y 1 hora antes del fraguado inicial del hormigón tanto en mezclas con y sin aditivos.

Prensa hidráulica (resistencia a compresión).- Se determinara la resistencia a compresión de cada probeta cilíndrica a los 28 días de su fraguado, a través de la aplicación de una carga aplicada en el centro del espécimen por medio de una rata de aumento a una velocidad de 1,45 - 3,63 kg por centímetro cuadrado por segundo,

hasta que dicha probeta falle y llegue a romperse, a partir de esta carga máxima se podrá determinar la resistencia a compresión.

Máquina para ensayos de flexión.- Se determinara la resistencia a flexión de todas las vigas, de la misma manera que las probetas cilíndricas, las vigas serán ensayadas a los 28 días, la carga de la máquina de ensayo para flexión aplicara las cargas en los puntos tercios de la longitud de la viga, con una magnitud de 10.89 kg por centímetro cuadrado por minuto, y de acuerdo a la posición y espesor de la de ruptura se podrá calcular la resistencia a flexión de las vigas por medio del módulo de ruptura.

➤ **Ensayos.-**

Para entrar a estudiar los pavimentos rígidos, es importante estudiar primeramente las características en general, es decir a qué tipo de esfuerzos están sometidos este tipo de pavimentos y como contribuye cada una de las capas que la conforman, además de sus características y especificaciones para los materiales que conforma la carpeta de rodadura.

Los ensayos a efectuarse en el laboratorio de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” para determinar la trabajabilidad del hormigón en la elaboración de losas en pavimentos rígidos se detallan a continuación.

- ✓ *Peso específico de las partículas sólidas.-* Se determinara esta característica tanto para los agregados gruesos (gravas) trituradas de la región, agregado fino (arena) de canto regional, y para el cemento Portland IP-30 e IP-40 (clase I), conforme lo cita la norma ASTM C-188, ASTM C-127, ASTM C-128.
- ✓ *Análisis granulométrico mediante.-* El análisis granulométrico se realizara para los agregados gruesos y finos a ser empleados en la elaboración de las mezclas, siguiendo los pasos y restricciones de la norma ASTM C-136.

- ✓ *Ensayo de consistencia para las mezclas de hormigón.-* El ensayo de consistencia para obtener la trabajabilidad según el asentamiento se realizara en las mezclas de hormigón con y sin aditivos, utilizando el Cono de Abrams descrito anteriormente, el ensayo se basara de acuerdo a la norma ASTM C-143, tratando de obtener asentamientos entre 2-5 cm en mezclas sin aditivos y asentamientos entre 2-20 cm para mezclas con aditivos, debido a que estas son las características que debe presentar una mezcla para la construcción de pavimentos rígidos.
- ✓ *Ensayo de compresión para probetas cilíndricas de hormigón.-* Como se trata de mezclas para pavimentos rígidos, las probetas deberán ser desmoldadas pasada las 24 hrs de fraguado, para posteriormente ser almacenadas en un sitio húmedo, donde la superficie de los especímenes estén en contacto con la humedad, a una temperatura de 18° y 24°C, para luego de 28 días ser ensayadas y alcanzar una resistencia alrededor de los 350 kg/cm² para las mezclas sin incorporación de aditivos, y superior a los 350 kg/cm² para mezclas con aditivos, el ensayo se realizara así también siguiendo la norma ASTM C-39.
- ✓ *Ensayo a la flexión para las vigas de hormigón.-* Siguiendo la norma ASTM C-78 las vigas serán ensayadas a los 28 días, previamente se realizara el ensayo de curado de las muestras, al igual que las probetas cilíndricas deben encontrarse en un sitio húmedo luego de ser desmoldadas, la resistencia a flexo tracción para las mezclas con aditivos debe alcanzar un valor por encima de los 35 kg/cm².

1.3.4. Limitación

Una limitante de la investigación surge del hecho de la disponibilidad de equipos existentes en laboratorio para la ejecución de las pruebas necesarias para nuestro propósito en el tiempo y cantidad requerido.

1.3.5. Tratamiento estadístico

Una vez obtenido los resultados, el tratamiento estadístico permitirá definir la situación en la que se ha formulado la hipótesis.

➤ **Validez.-**

La validez de la investigación será determinada de acuerdo a la veracidad de los resultados obtenidos una vez finalizado los ensayos, y en función del grado de validez que tenga el trabajo de investigación mayor fuerza tendrá sus conclusiones.

Por lo tanto, el tipo de validez a considerar para el trabajo de investigación será:

✓ **Validez de la generalización de la inferencia casual.-**

- a) Validez de constructo.- Se identificarán los factores implicados en la relación que existiese entre las variables, y en qué medida estas son representativas de sus respectivos factores de construcción.

Para obtener un grado mayor de validez en el trabajo de investigación, se describirá también cuáles fueron las amenazas que arrojaron dichos resultados.

1.3.6. Alcance

El estudio de los pavimentos rígidos pretende mostrar todo lo referente a este ámbito temático para lo cual necesariamente se empezará a definir los objetivos que se tienen, el alcance de este estudio pretendiendo cumplir con los objetivos propuestos y de que el estudio sirva como un documento de consulta a todos los interesados en esta temática. Asimismo nos plantearemos la metodología de encarar este estudio.

El presente trabajo de investigación comprende el análisis de la influencia de los aditivos que existen en el mercado local para mejorar la trabajabilidad y resistencia del hormigón para pavimentos, con este propósito es que se han elegido materiales locales que cumplen con las exigencias para un hormigón en pavimentos, cementos portland de clases IP 30 e IP 40 de producción nacional, además de los tres tipos de aditivos cuyas características y propiedades tengan la función de mejorar la trabajabilidad e incrementar la resistencia de un hormigón para pavimentos rígidos.

Con los materiales caracterizados se realizó una investigación sobre el comportamiento del hormigón para pavimentos en la propiedad de trabajabilidad de manera que al momento de colocar el hormigón de pavimento tenga mayor facilidad para lograr una homogeneidad en tiempos que permita el fraguado sin la necesidad de ocupar mucho tiempo en el vibrado de la mezcla para conseguir la trabajabilidad deseada.

Los resultados esperados permitirán un análisis de los diferentes tipos de aditivos utilizados, su variación en los resultados facilitara una decisión en los constructores de pavimentos rígidos sobre el aditivo a utilizar al momento de ejecutar una obra de pavimento rígido.

Finalmente expondremos en el estudio nuestras conclusiones y recomendaciones a partir de todo lo estudiado y de la aplicación práctica realizada.

1.4. CRONOGRAMA

La realización o ejecución de las actividades planteadas anteriormente implica considerar el intervalo de tiempo correcto entre actividades, para poder finalizar la propuesta en el lapso deseado.

1.4.1. Planeamiento para el desarrollo.-

Se debe basar en el tiempo de acuerdo al calendario semestral, tomando en cuenta que el semestre normal dura 14 semanas, obviando días feriados y días festivos realizados en la universidad. Como días de trabajo se tendrá los 6 días a la semana y 7 horas diarias, teniendo un total de 42 horas por semana.

➤ *Laboratorio: el cual consistirá en*

- ✓ Caracterización de la materia prima (se realizara en la primera semana)
- ✓ Ensayos estándar para el cemento (se realizara en la primera semana)
- ✓ Ensayos estándar para los agregados (se realizara en la primera semana)
- ✓ Análisis granulométrico (se realizara en la primera semana)
- ✓ Peso específico (se realizara en la primera semana)

1.4.2. Cronograma (Diagrama de Gantt) (Anexo H).-

Tabla 1.2. Lista de actividades

Nº	LISTA DE ACTIVIDADES	DURACIÓN
		DÍAS
1	RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN Y REALIZACIÓN DEL MARCO TEÓRICO	5
2	TOMA DE MUESTRAS	4
3	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	5
4	PROCESOS DE GABINETE	5
5	ELABORACIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS SIN ADITIVOS	3
6	ENSAYOS DE CONSISTENCIA DEL HORMIGÓN	2
7	ELABORACIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS CON ADITIVOS	3
8	ENSAYOS DE CONSISTENCIA DEL HORMIGÓN	2
9	ELABORACIÓN VIGAS DE HORMIGÓN SIN ADITIVOS	3
10	ENSAYOS DE CONSISTENCIA DEL HORMIGÓN	2
11	ELABORACIÓN DE VIGAS DE HORMIGÓN CON ADITIVOS	3
12	ENSAYOS DE CONSISTENCIA DEL HORMIGÓN	2
13	ROTURA DE PROBETAS CILÍNDRICAS	28
14	ROTURA DE VIGAS DE HORMIGÓN	28
15	PROCESAMIENTO DE DATOS Y RESULTADOS DE GABINETE	10
16	ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	5
17	ENTREGA DE BORRADOR FINAL	5

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO II: TRABAJABILIDAD DEL HORMIGÓN CON INCORPORACIÓN DE ADITIVO EN LOSA DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

Hoy en día los aditivos se han convertido en un componente esencial del hormigón, junto con el cemento, los áridos y el agua. Estos aditivos generalmente se adsorben sobre las partículas de cemento, produciendo repulsión electrostática o estérica entre las mismas y liberando el agua atrapada entre los flóculos. De esta manera, se puede reducir el contenido de agua para una misma trabajabilidad o mejorar la trabajabilidad del concreto para una misma relación agua/cemento.

En la mayoría de los casos, esta cantidad de agua resulta insuficiente para conseguir la adecuada trabajabilidad y las consistencias solicitadas en obra, por lo que el fabricante de hormigón se ve obligado a recurrir a aditivos, hoy suficientemente contrastados. En esta situación, se debe llevar la relación agua/cemento de los hormigones a valores tales que permitan un óptimo funcionamiento del aditivo para cada tipo de consistencia. Estos aditivos han sido elementos clave en el desarrollo de hormigones de altas prestaciones para la elaboración de losas en pavimentos rígidos debido a que se utilizan relaciones agua/cemento bajas, permitiendo una adecuada trabajabilidad y compactación del hormigón evitando el fenómeno de segregación de los áridos gruesos.

A través del análisis en el trabajo de investigación se podrá distinguir e identificar los efectos que causa el uso de los aditivos en la elaboración de mezclas de concreto sobre las prestaciones del hormigón en estado fresco, principalmente sobre una de las características iniciales como es la trabajabilidad, y en estado endurecido la resistencia a compresión y flexión, además de los materiales componentes de la muestra.

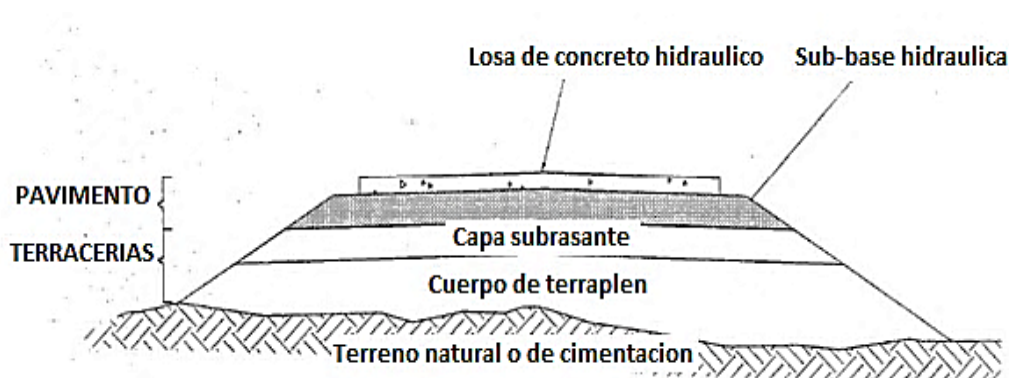
2.1. PAVIMENTOS RÍGIDOS

Los pavimentos rígidos fueron iniciados por George Bartholomew de Bellefontaine, Ohio, hace más de 100 años, con una faja experimental de pavimento de hormigón de ocho pies de ancho, el descubrimiento evolucionó como una vasta red de carreteras y autopistas que su iniciador nunca habría podido imaginar. Bartholomew garantizó su pavimento prototipo por cinco años, pero se ha mantenido por más de cien.

Las fuertes cargas actuales, su velocidad de tránsito, el número de sus repeticiones, etc., hicieron que en la actualidad las técnicas de construcción de pavimentos hayan sufrido una evolución muy rápida, con una definida tendencia a adquirir cada vez mejores bases teóricas que refuercen, justifiquen y permitan aplicar con buen criterio, el ya muy grande conocimiento observacional que a la fecha se va teniendo.

Los pavimentos, tal como se conciben hoy en día, están compuestos de varias capas con calidades y espesores que dependen de sus propiedades mecánicas o estructurales, del apoyo del pavimento mismo y de la intensidad del tránsito. Mientras más cerca esté cada capa de la superficie libre del pavimento, más estricta y más tecnificada debe ser su construcción.

Figura 2.1. Estructura de Pavimento Rígido.



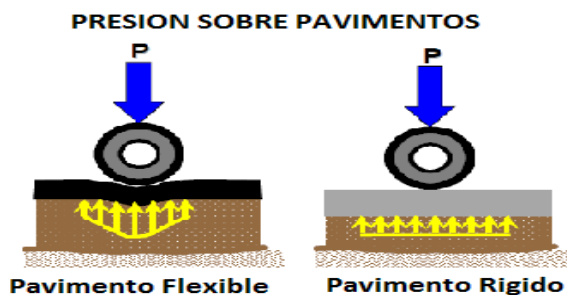
En Bolivia, por mucho tiempo hubo conformismo con numerosos caminos de tierra, algunos de ellos inclusive transitables sólo durante determinados periodos del año, sin embargo la fuerte competencia de los países vecinos hace cada vez más urgente la

necesidad de contar con carreteras pavimentadas para lograr una competitividad en la producción que impulse el desarrollo.

Entre las principales funciones que desempeñan los pavimentos son el aislamiento y la ornamentación, pero al mismo tiempo deben resistir las abrasiones y los punzonamientos (esfuerzos cortantes) producidos por el paso de personas o vehículos, la caída de objetos y la compresión de los elementos que se apoyan. Además, tienen que ser inmunes a la acción de agentes químicos, como agua, aceites, sales o ácidos, a las agresiones de seres vivos e incluso a la propia luz solar.

Los pavimentos rígidos están conformados por una capa de material granular dispuesta sobre la subrasante y una superficie de rodamiento conformada por una losa de concreto de espesor variable. El diseño de los espesores de dicha losa se basa en consideraciones sobre su resistencia a los esfuerzos a flexión. En los pavimentos rígidos la losa estructural de concreto sufre deformaciones muy pequeñas bajo la acción de la carga, y el peso de los vehículos se distribuye en un área bajo la losa mayor que en los puntos de contacto de las ruedas con el pavimento. Debido a que el área de distribución de las cargas equivalentes, es mayor a las de los pavimentos flexibles, las presiones y las deformaciones transmitidas por el concreto a la subrasante son menores. (Ver figura 2.2).

Figura 2.2. Presión y deformaciones sobre la Losa del Pavimento Rígido.



Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto¹

¹ Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto., "Un Mundo de soluciones en Concreto" México., 2007

La superficie de rodamiento de un pavimento rígido es proporcionada por las losas de concreto hidráulico, las cuales distribuyen las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores por medio de toda la superficie de la losa y de las adyacentes, que trabajan en conjunto con la que recibe directamente las cargas. Por su mayor rigidez distribuyen las cargas verticales sobre un área grande y con presiones muy reducidas. Salvo en bordes de losas y juntas sin pasajuntas, las deflexiones o deformaciones elásticas son inseparables.

Este tipo de pavimento no puede plegarse a las deformaciones de las capas inferiores sin que se presente la falla estructural. Este punto de vista es el que influye en los sistemas de cálculo de pavimentos rígidos, sistemas que combinan el espesor y la resistencia del concreto de las losas, para una carga y suelos dados.

2.1.1. Esfuerzos en Pavimentos Rígidos

El pavimento de hormigón como consecuencia de su rigidez y elevado módulo de elasticidad, tiene considerable resistencia a la flexión denominada también de viga y alta capacidad para distribuir las cargas sobre un área de suelo relativamente amplia. Las presiones sobre el suelo o material debajo del pavimento, son muy pequeñas por la distribución de las cargas sobre una amplia superficie. Por ello la resistencia a la flexión es el factor más importante en la determinación del espesor necesario de la losa y se deduce en consecuencia que los pavimentos de hormigón no requieren subrasantes resistentes.

Los pavimentos de concreto hidráulico están sujetos a los esfuerzos siguientes:

- ✓ Esfuerzos abrasivos causados por las llantas de los vehículos.
- ✓ Esfuerzos directos de compresión y acortamiento causados por las cargas de las ruedas.
- ✓ Esfuerzos de compresión y tensión, que resultan de la deflexión de las losas bajo las cargas de las ruedas.
- ✓ Esfuerzos de compresión y tensión causados por la expansión y contracción del concreto.

- ✓ Esfuerzos de compresión y tensión debidos a la combadura del pavimento por efectos de los cambios de temperatura.

Figura 2.3. Presión sobre la Losa del Pavimento Rígido



Fuente: Ingeniería Civil – Índice de Servicialidad²

Las tensiones producidas por el tráfico y por el gradiente de temperatura, son de mayor importancia que las restantes.

La acción de estos esfuerzos ya sea aislada o conjunta es la que origina un estado de tensiones en la losa. Para disminuir las producidas por las variaciones de temperatura, humedad y retracción del fraguado, el pavimento se divide en losas, por juntas debidamente dispuestas para que las tensiones producidas sean admisibles en la práctica.

Cuando no se toman en cuenta los esfuerzos de tensión generados en la base de la losa se puede generar el agrietamiento de las losas como resultado de la resistencia por fricción que se genera en la interface losa-capa de apoyo.

Los esfuerzos en pavimentos rígidos se analizan en la losa de concreto y provienen de varios efectos:

² [http://actualizateenconstruccion.blogspot.com/2011/10/indice de serviciabilidad en pavimentos,](http://actualizateenconstruccion.blogspot.com/2011/10/indice%20de%20serviciabilidad%20en%20pavimentos/)
Ingeniería Civil – Índice de Servicialidad

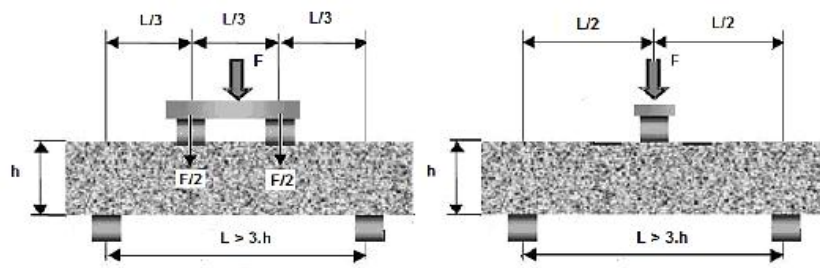
a. Por efecto de las cargas

Estos esfuerzos son, en general, de los más importantes que pueden producirse. Como quiera que la resistencia a la compresión sea importante, los esfuerzos de tensión producidos en la flexión de la losa, son los críticos. Para su cálculo se utilizan fórmulas originalmente obtenidas por Westergaard. Estas fórmulas están sujetas a la hipótesis de que la losa está formada por un material elástico homogéneo e isotrópico; que los esfuerzos de interacción entre ella y el suelo soporte son verticales y proporcionales a las deflexiones de la propia losa y que ésta es horizontal y de espesor constante.

La segunda hipótesis implica continuidad entre losa y apoyo. Westergaard estudió tres condiciones de carga: en esquina, en el borde y en el centro de la losa. Para la carga en esquina, la tensión máxima se produce en el plano bisector y el lecho superior de la losa.

La carga en el borde produce la tensión máxima en el lecho inferior y en la dirección paralela al borde de la losa. Cuando la carga obra en el centro, el esfuerzo máximo actúa en el lecho inferior y es, teóricamente el mismo en cualquier dirección.

Figura 2.4. Ensayo a Flexión a $L/2$ y $L/3$ de una losa de pavimento rígido



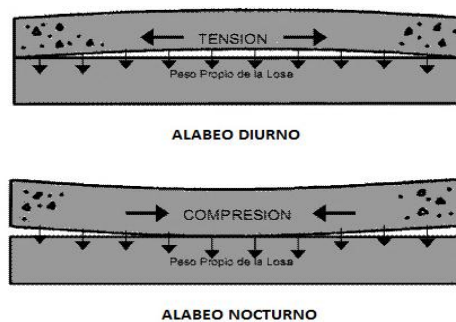
Fuente: Tipos de Ensayo a Flexotraccion.³

³ Noumowe. E., Tipos de Ensayo a Flexotraccion., Alemania., 2006.

b. Esfuerzos por temperatura

Estos esfuerzos pueden llegar a significar en la losa incluso más que los debidos a las cargas. Son principalmente de dos tipos: los de alabeo, que se producen cuando un lecho de la losa y el otro están a temperatura diferente, estableciéndose por ende flujo de calor transversalmente a la losa y los provocados por la restricción impuesta por el suelo de apoyo cuando la losa, calentada o enfriada uniformemente, trata de expandirse o contraerse. Los esfuerzos de alabeo se producen cuando la temperatura ambiente sufre una alteración más o menos brusca, por ejemplo cuando una noche fría sigue a un día cálido.

Figura 2.5. Esfuerzos en losas por efecto de temperatura



Fuente: Esfuerzos en losas.⁴

Además, existen otros esfuerzos posibles en la losa de concreto, tales como los de fraguado inicial, los causados por cambios de humedad en el concreto o los de infiltración, debidos al acunamiento de agregados y materias extrañas en las grietas que puedan formarse en la losa, pero en general estos esfuerzos son de pequeña magnitud y no suelen tomarse en cuenta en los análisis.

Debe notarse que la condición crítica para el diseño de la losa no se obtendrá calculando todos los esfuerzos mencionados y sumándolos. Esto sería, sin duda una condición excesivamente conservadora. Por ejemplo en un día caluroso tras noche

⁴ Esfuerzos en losas de concreto por efecto de temperatura, Index of /img/conceptos/orig

fría habría una combinación de esfuerzos por carga, más esfuerzos por alabeo, pero la losa contraída en la noche, tenderá a expandirse en el día, por lo que la reacción de la restricción en el suelo soporte será de compresión.

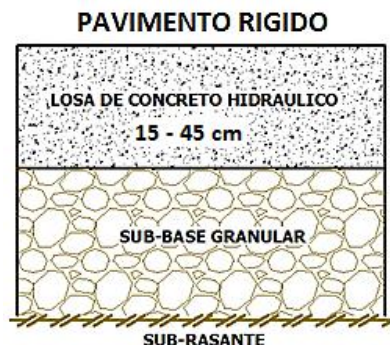
2.1.2. Partes de un Pavimento Rígido

Los pavimentos rígidos están formados por una losa de concreto hidráulico (mezcla de cemento Pórtland y agregado fino y grueso), con recubrimiento bituminoso o sin él, apoyada sobre la subrasante o sobre una capa de sub base de material seleccionado. El espesor del pavimento puede variar de 15 a 45 cm, dependiendo del volumen de tráfico que deba soportar.

Los concretos usados son de resistencia relativamente alta, generalmente comprendida entre 210 kg/cm² y 350 kg /cm² a los 28 días. En general, se usa concreto simple y, ocasionalmente, reforzado. Las losas de concreto simple son de dimensiones pequeñas, del orden de 4 metros a 8 metros; estas dimensiones aumentan al usar algún refuerzo y llegan a los 100 metros en concretos presforzados. Los espesores usados para las losas son del mismo orden usando o no refuerzo.

Cuando este pavimento se construye en forma adecuada y se controlan las exigencias de calidad tienen larga vida y un costo de mantenimiento relativamente bajo.

Figura 2.6. Estructura de un pavimento rígido.



Fuente:⁵

⁵ Rene Segovia., Evaluación de la Influencia de aditivos en la fisuración de los pavimentos rígidos., (Maestría) Universidad Autónoma Juan Misael Saracho., Tarija. Bolivia. 2012.

En general, se puede indicar que el concreto hidráulico distribuye mejor las cargas hacia la estructura de pavimento.

2.1.3. Funciones de las capas de los Pavimentos Rígidos

a. Subrasante

Es la capa de terreno de una carretera que soporta la estructura de pavimento y que se extiende hasta una profundidad que no afecta la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto. Esta capa puede estar formada en corte o relleno y una vez compactada debe tener las secciones transversales y pendientes especificadas en los planos finales de diseño.

El espesor de pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la subrasante, por lo que ésta debe cumplir con los requisitos de resistencia, incompresibilidad e inmunidad a la expansión y contracción por efectos de la humedad, por consiguiente, el diseño de un pavimento es esencialmente el ajuste de la carga de diseño por rueda a la capacidad de la subrasante.

b. Sub-base granular

Es la capa de la estructura de pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicada a la superficie de rodadura del pavimento, de tal manera que la capa subrasante la pueda soportar absorbiendo las variaciones inherentes a dicho suelo que puedan afectar a la subbase.

La subbase debe controlar los cambios de volumen y elasticidad que serían dañinos para el pavimento. Se utiliza además como capa de drenaje y controla la ascensión capilar de agua, protegiendo así la estructura de pavimento, por lo que generalmente se usan granulares. Al haber capilaridad en época de heladas se produce un hinchamiento del agua, causado por el congelamiento, lo que produce fallas en el pavimento, si este no dispone de una subrasante o subbase adecuada.

- ✓ Controlar el fenómeno del bombeo.
- ✓ Servir como transición.

- ✓ Proporcionar apoyo uniforme y estable en el tiempo a la losa de concreto; se controla mediante el análisis de erosión, durante el diseño de la estructura.

c. *Losa de concreto hidráulico*

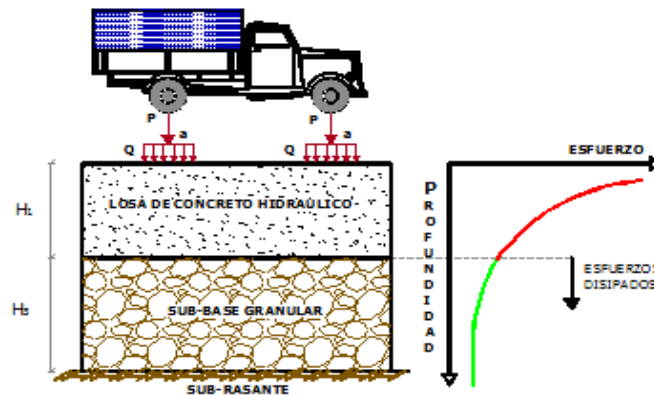
Es la capa superior de la estructura de pavimento, construida con concreto hidráulico, por lo que debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la losa, más que en la capacidad de la subrasante, dado que no usan capa de base.

- ✓ Su principal función es el aporte estructural, ya que del paquete de la estructura, es el único elemento que da resistencia. El parámetro de diseño, es el módulo de rotura.
- ✓ Proporciona una superficie uniforme, estable y segura al tránsito.
- ✓ Impermeabiliza la estructura del pavimento, aunque se debe ser muy estricto en el procedimiento de sellado de juntas.

La transmisión de esfuerzos al terreno de soporte, se produce mediante un mecanismo de distribución de tensiones.

- ✓ La losa, es el elemento encargado de dar el aporte estructural al pavimento.
- ✓ La sub-base granular, debe dar a la losa un apoyo óptimo a lo largo del tiempo de servicio de la estructura, controlando su deformabilidad.
- ✓ La deformación de la sub-base granular de apoyo, produce salida de agua y de su material fino, produciendo la des compactación del apoyo y su erosión.

Figura 2.7. Mecanismo de distribución de esfuerzos en Pavimentos Rígidos.



Las características de resistencia y deformabilidad se satisfacen con una capa de material que se encargue de distribuir los esfuerzos de tal modo que a la subrasante lleguen en niveles tolerables, que no produzcan falla, ni asentamientos u otras deformaciones perjudiciales, la losa de concreto en pavimentos rígidos cumple esta función estructural.

La capacidad de carga de los materiales friccionante es baja en la superficie por falta de confinamiento, razón por la que se requiere que sobre la base exista una capa de material cohesivo y con resistencia a la tensión; en los pavimentos rígidos la misma losa de concreto llena esta necesidad, por sus características de cohesión.

2.1.4. Causas de fisuras en Losas de Pavimentos Rígidos

El hormigón es un material versátil, que debe su popularidad a los múltiples usos que se le pueden dar, porque es fácil de lograr con una calidad mínima y sobretodo porque es durable. Hoy en día su creciente industrialización permite obtenerlo con rapidez y óptima calidad, adecuándolo con aditivos a las aplicaciones más diversas.

En pavimentos, nuestro país lo viene utilizando desde los albores de la tecnología, se tienen aplicaciones masivas en calles y pueblos de todo el territorio, con alta proporción en las carreteras principales. Su funcionamiento ha sido sin duda muy

satisfactorio, proporcionando por largos años un rodaje cómodo y seguro, no obstante los espectaculares aumentos de tránsito que han experimentado dichas vías.

En relación con las prácticas constructivas, es del caso señalar que al hormigón de pavimento no se le ha tratado siempre como es debido. La tecnología, muy avanzada en aplicaciones de edificación, no ha ido a la par en el caso de la construcción de pavimentos, pues se ha procedido a generalizar prácticas que no se ajustan a las particularidades del ambiente en campo abierto, como son las temperaturas altas y las condiciones extremas de evaporación, que tan importante consecuencia tiene sobre el producto terminado y después en funcionamiento.

a. El estado Plástico del concreto en Losas de Pavimento Rígido

Un concreto es una mezcla compuesta por pasta y agregados, cuando está recién mezclado debe ser plástico o semifluido y capaz de ser moldeado a mano. La pasta está formada por agua, cemento y aire atrapado o incluido, y los agregados que forman el concreto son generalmente arena y grava. En términos generales, los requisitos que debe poseer un concreto en estado plástico son los siguientes:

- ✓ Consistencia, que permita compactar el concreto adecuadamente
- ✓ Cohesión, para ser colocado y compactado sin que presente segregación.

Durante el colado del concreto, muchas veces se presentan grietas cuando éste se encuentra en estado plástico, las cuales pueden ser evitadas conociendo las causas, la causa básica del agrietamiento es la retracción.

Si todas las partes del concreto estuvieran libres para moverse cuando el concreto se expande o se contrae, no habría agrietamientos ocasionados por cambio de volumen, dado que estos agrietamientos son producidos por el desarrollo de deformaciones diferenciales que inducen esfuerzos por tensión. Generalmente estas fisuras son de dos tipos:

- *Fisuras por Asentamiento Plástico.*
- *Fisuras por Contracción Plástica.*

Aparte de ser antiestético, el agrietamiento producido en la estructura permite la entrada y difusión de la humedad y del oxígeno, capaces de corroer el acero de refuerzo y, a su vez, promover la degradación estructural y disminuir así la vida útil.

Un elemento importante en la contracción en el concreto es el contenido de agua, cuanto mayor sea el contenido de agua de un concreto, tenderá a contraerse más. Por lo tanto se deberán realizar la dosificación de la mezcla con la menor cantidad de agua posible por metro cúbico de concreto.

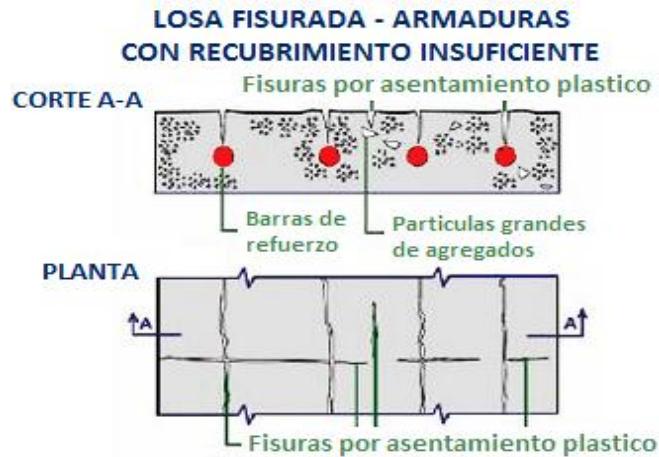
El tamaño del agregado es un factor determinante en la cantidad de agua que se utilizará. Entre mayor es la cantidad de los agregados finos en la mezcla, aumentara la demanda del agua, esto significa evitar la mezcla con demasiada arena y preferir la mezcla con mayor cantidad de grava, siempre y cuando se obtenga una mezcla que no presente problemas en la colocación, consolidación y acabado del mismo. Otros factores que intervienen en la cantidad de agua a utilizar son el revenimiento, la relación agua/cemento, la forma del agregado, el contenido de aire, y las condiciones ambientales.

a.1. Fisuras por asentamiento plástico

Las fisuras por asentamiento plástico o disminución de volumen del concreto se desarrollan por la tendencia del concreto a seguir consolidándose y las restricciones que ofrecen el acero de refuerzo y/o las formaletas, o por asentamientos desiguales debidos a profundidades diferentes del concreto, el cual es colado monolíticamente.

Después de la colocación, vibrado y acabado, el concreto tiene la tendencia a seguir consolidándose. Durante este periodo, el concreto en estado plástico puede restringirse localmente por el acero de refuerzo, un concreto colocado anteriormente, o los encofrados. Estas restricciones locales pueden resultar en vacíos bajo las barras de acero de refuerzo y/o en fisuras adjuntas a los elementos que restringen el movimiento.

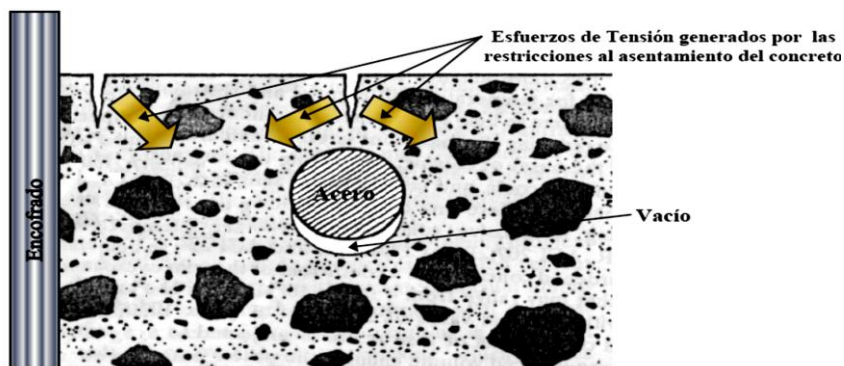
Figura 2.8. Fisura por asentamiento plástico en losas



Fuente: Patologías por Asentamiento Plástico.⁶

Cuando se asocia con el acero de refuerzo, las fisuras por asentamiento aumentan con el incremento del tamaño de las barras, incremento del revenimiento, y disminución del recubrimiento. Al realizar cambios a estos factores es posible reducir o evitar las fisuras por asentamiento plástico. Las fisuras por asentamiento plástico aparecen ubicadas sobre el acero de refuerzo o contiguo a los elementos que restringen el movimiento. (Ver figura 2.9)

Figura 2.9. Esquema grafico de fisuras por asentamiento plástico.



⁶ Ms. Ing. Maximiliano Segerer., Patologías por Asentamiento Plástico., Asociación Argentina del Hormigón elaborado., 2008.
<http://hormigonelaborado.com/default.asp?IDSEC=62&IDCONTPRI=567>

En el concreto la mayor parte de las primeras contracciones se deben a los cambios de temperatura. Como es normal, después de que el calor de hidratación alcanza su valor máximo tiende a reducirse por una menor actividad de hidratación, así como por las temperaturas más bajas en la primera noche de colocada la mezcla. Otro factor importante que se debe tomar en cuenta en las contracciones que experimenta la mezcla es la pérdida de volumen por la disminución contenido de agua del concreto.

Al consolidarse y endurecerse la mezcla, se pierde agua debido al sangrado y a la posterior evaporación del volumen total de este líquido, ver figura 2.8. Este fenómeno es más importante en los pavimentos, ya que en ocasiones se adiciona agua en exceso para lograr la trabajabilidad de la mezcla y facilitar las labores de acabado de la superficie.

Figura 2.10. Fisuras por asentamiento plástico en una losa de pavimento rígido



Fuente: Patologías en Pavimentos de Hormigón.⁷

Cuando no se toman en cuenta los esfuerzos de tensión generados en la base de la losa se puede generar el agrietamiento de las losas como resultado de la resistencia por fricción que se genera en la interface losa-capa de apoyo, pudiendo ser ésta una base o sub-base. Se debe asegurar que el concreto no se adhiera a los encofrados, por lo que éstos deberán poseer textura lisa, estar limpios y cubiertos con una película que evite la adherencia entre ellos.

a.2. Fisuras por contracción plástica

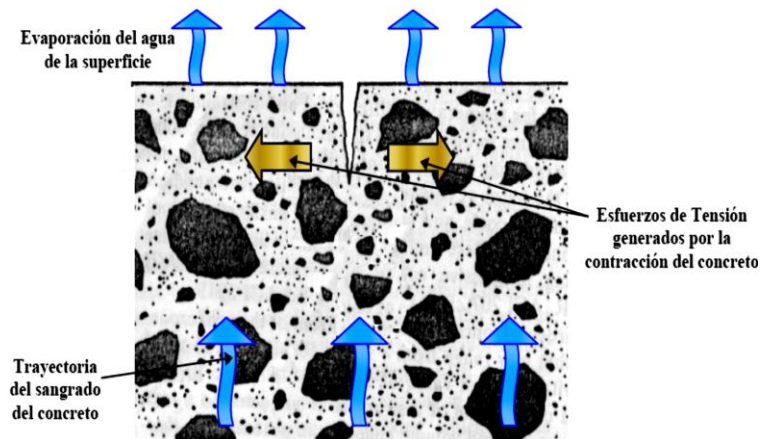
⁷ Daniel V., Mariano P., Patologías en Pavimentos de Hormigón a edad temprana., Cementos Avellaneda., Publicación 006., Buenos Aires, Argentina.

Las fisuras por contracción plástica son grietas que aparecen en ocasiones, en la superficie del concreto fresco, poco después de haber sido colocado y cercano al tiempo en que se realiza el acabado. Estas fisuras se desarrollan por la pérdida de agua por evaporación de la superficie del concreto y generalmente se asocian con los colados en climas cálidos; sin embargo, pueden ocurrir en cualquier ocasión en que las condiciones ambientales produzcan una evaporación rápida del agua en la superficie del concreto.

Las fisuras por contracción plástica ocurren cuando el agua se evapora de la superficie con mayor rapidez que con la que puede aparecer en la superficie durante el proceso de sangrado.

Lo anterior origina una rápida contracción por secado y el desarrollo de esfuerzos de tensión en la capa superficial, que está restringida por el concreto interior no contraído.

Figura 2.11. Esquema grafico de fisuras por contracción plástica.



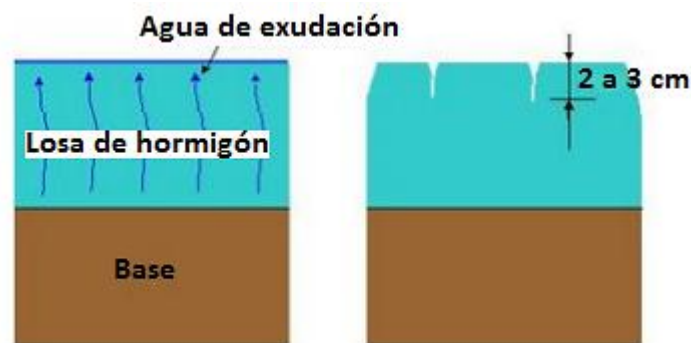
En la figura es posible observar un esquema de la evaporación del agua de la superficie, trayectoria del sangrado del concreto y esfuerzos de tensión generados por la contracción del concreto cuando presenta contracción plástica.

Las grietas aparecen generalmente cuando la evaporación es mayor que el sangrado. Las fisuras por contracción plástica se originan debido a la diferencia del cambio de

volumen en el concreto plástico. Un control adecuado requiere de una reducción en el cambio de volumen relativo entre la masa superficial y otras porciones del concreto.

Temperatura elevada del aire, humedad relativa baja, vientos fuertes y temperatura elevada del concreto, solas o de manera colectiva, incrementan la evaporación del agua en la superficie y aumentan la posibilidad de agrietamiento por retracción plástica. (Ver figura 2.12)

Figura 2.12. Fisura por retracción plástica



Fuente: Retracción en el hormigón.⁸

No hay manera de predecir con certeza cuándo van a ocurrir grietas por contracción plástica. Sin embargo, se plantea que cuando la velocidad de evaporación sobrepasa a $1 \text{ kg/m}^2/\text{hr}$, las medidas preventivas son casi obligatorias. Sin embargo, la literatura técnica indica que es posible que se presenten agrietamientos si la tasa de evaporación excede $0.5 \text{ kg/m}^2/\text{hr}$.

La longitud de las grietas varía de unos cuantos centímetros hasta aproximadamente un metro; éstas grietas pueden ser paralelas entre sí y normalmente se encuentran espaciadas siguiendo un patrón irregular desde 2 centímetros hasta 60 centímetros de distancia.

⁸ Jorge E. Cedeño C., Fisuras por Retracción en el Hormigón, [Tesina de Grado], Escuela Superior Politécnica del Litoral., Guayaquil., Ecuador., 2009.

La formación de las fisuras por contracción plástica empieza en la superficie, generalmente son grietas poco profundas de 2 a 8 cm pero pueden alcanzar todo el espesor del elemento, principalmente en losas, tal cual se aprecia en la figura 2.13.

Figura 2.13. Fisura en una losa por causa de exudación



Fuente: Cesar. A. Ruiz. B.⁹

Los intentos para eliminar el agrietamiento por contracción plástica modificando la composición para afectar las características de la exudación de una mezcla de concreto no resultan ser efectivos.

Para reducir el potencial del agrietamiento por contracción plástica es necesario reconocer a tiempo, antes del vaciado, cuando existirán las condiciones del tiempo que conducen al agrietamiento por contracción plástica. Entonces pueden tomarse precauciones para minimizar su ocurrencia.¹⁰

2.1.5. Comportamiento de las Losas de Pavimentos Rígidos

El comportamiento de las losas de pavimento rígido se lo define en general como la capacidad con la que cuenta para prestar servicio al tránsito presente brindándole al usuario seguridad y confort de marcha. El pavimento alcanza el fin de su vida útil

⁹ Cesar. A. Ruiz. B., “Análisis de los Factores que producen el deterioro en los Pavimentos Rígidos” [Tesis de Grado]. Guayaquil, Ecuador. 2013.

¹⁰ CIP 5, Contracción Plástica del concreto, National Ready mixed Concrete Association, <http://www.nrmca.org/aboutconcrete>.

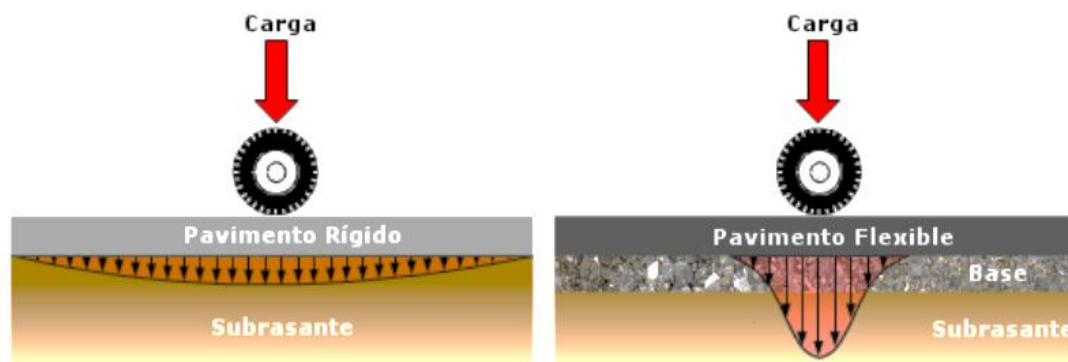
cuando su funcionalidad o su integridad estructural se encuentran afectadas, alcanzando un umbral de deterioros que requiere la ejecución de tareas de rehabilitación.

a. Comportamiento Estructural

El comportamiento estructural de las losas de pavimento de concreto está asociado a la capacidad estructural que tiene que soportar o resistir las solicitaciones de carga al que estará sometido durante su periodo de vida útil; ya que las cargas de los vehículos pesados producen pérdida lenta y progresiva de la capacidad soporte de la estructura del pavimento.

El comportamiento de las losas de concreto depende estrechamente de las condiciones de contorno como son el apoyo sobre la subbase y las restricciones en los bordes que le imponen las losas adyacentes. La forma más común de establecer la capacidad estructural de un pavimento rígido es determinando la deflexión o desplazamiento vertical a lo largo de las juntas y borde del pavimento, bajo una carga normalizada de referencia, ya que deflexiones excesivas producen bombeo de la subbase posteriormente pérdida de soporte de la estructura de pavimento, lo que origina la rotura de la losa de concreto.

Figura 2.14. Comportamiento Estructural del Pavimento Rígido¹¹



¹¹ INSTITUTO DEL CEMENTO PORTLAND ARGENTINO (ICPA), <http://www.actualizarmiweb.com/>

Fuente: Instituto del cemento portland argentino.

En general, el comportamiento estructural de un pavimento se relaciona con su condición física, esto es, con la ocurrencia de agrietamientos, fallas, peladuras, u otras situaciones que podrían afectar exclusivamente la capacidad de soporte de la estructura del pavimento o en todo caso requerir mantenimiento.

Figura 2.15. Fatiga a la Flexión en losas de pavimentos rígidos



Fuente: Deterioro en los pavimentos rígidos.¹²

b. Comportamiento Funcional

El comportamiento funcional de las losas de un pavimento de concreto está asociado a la capacidad funcional que tiene para brindar una superficie segura y cómoda al usuario. En este contexto la regularidad o rugosidad superficial es la característica predominante, entre otras características tenemos:

- ✓ Textura
- ✓ Adecuada fricción superficial
- ✓ Fisuras

La regularidad o rugosidad superficial es la característica mas percibida por el usuario ya que afecta la calidad de la rodadura. La textura de un pavimento es un parámetro crítico en la comodidad y seguridad de los usuarios.

¹² Cesar. A. Ruiz. B., “Análisis de los Factores que producen el deterioro en los Pavimentos Rígidos” [Tesis de Grado]. Guayaquil, Ecuador. 2013.

2.2. USO DE ADITIVOS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS

Según Porrero, J., Aditivos son: los productos químicos que se añaden en pequeña proporción a la mezcla de concreto durante su mezclado, para modificar algunas de las propiedades de la mezcla en estado fresco o endurecido.¹³

El uso de aditivos en hormigones de pavimentos rígidos, permite el mejoramiento en las propiedades ya sea en su estado fresco o endurecido. Puede decirse que el uso de estos aditivos responde a algunos de los siguientes requerimientos:

- a. Aumento de la resistencia y disminución de la porosidad reduciendo el contenido de agua y manteniendo el contenido de cemento, con menor relación agua/cemento (a/c) respecto de la mezcla sin aditivo.
- b. Aumento de la fluidez de la mezcla y de su trabajabilidad, manteniendo el contenido de agua y de cemento, con la misma relación a/c.
- c. Disminución del costo relativo de la mezcla, disminuyendo el contenido de agua y de cemento, con la misma relación a/c.
- d. El caso particular del uso de hormigones en pavimentos de rápida habilitación al tránsito implica la necesidad de la fabricación de un hormigón con altas resistencias tempranas. Una resistencia de 20 MPa a la edad de 24 hrs es aceptable en la mayoría de los pliegos para la liberación de la vía al tránsito.

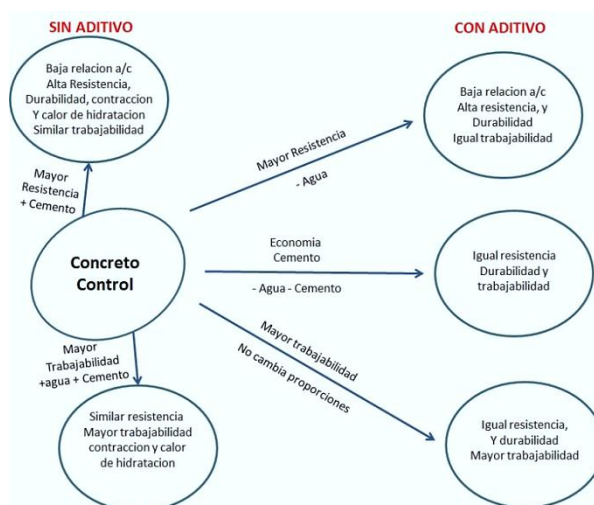
Entre los requerimientos anteriormente citados para el uso de los aditivos, el que nos compete en este caso es el del mejoramiento de la trabajabilidad y resistencia, considerando que el hormigón de alto desempeño se obtiene utilizando un cemento cuya hidratación no es acelerada, sino normal.

¹³ Curiel Fernández, Daniel E.; García Weffer, Juvenal.; Diseño de una mezcla de Pavimento Rígido utilizando diferentes porcentajes de wolastonita. Maracaibo, Venezuela: Universidad Rafael Urdaneta; 2006.

La dosis de aditivo se expresa como la relación en peso del aditivo (su residuo sólido) sometido a secado normalizado con respecto al peso del cemento. Esta determinación es importante porque el comportamiento del sistema depende de la dosis usada. Muchas veces ni siquiera se mantiene superada una dosis mínima, sino que presenta un punto de saturación por debajo o por encima del cual el comportamiento es deficiente. Como punto de saturación se entiende la relación sp/c mínima con la cual se consigue la máxima fluidez del sistema. Para dosis superiores al punto de saturación puede suceder que la fluidez se mantenga o incluso disminuya. Por esto se considera al punto de saturación como la dosis óptima a utilizar, buscando la máxima efectividad del aditivo con el cemento usado y la menor cantidad de aditivo a utilizar en la mezcla.

Aun cuando los fabricantes poseen cartillas con dosis recomendadas, estas no producen el mismo efecto en distintos tipos de cemento. Además existe la posibilidad de que la acción del aditivo no sea efectiva con ciertos ligantes particulares, determinándose una incompatibilidad entre el cemento y el aditivo.

Figura 2.16. Alternativas para modificar la resistencia y trabajabilidad del concreto con aditivos o con modificaciones de diseño de mezclas



Fuente: Ingeniería civil, aditivos.¹⁴

¹⁴ Ingeniería Civil., Aditivos - Aspectos Generales., Julio 2007. <http://ingecivilcusco.blogspot.com>.

Otro factor importante a tener en cuenta es la distribución del esqueleto granulométrico del hormigón (agregados pétreos), pudiéndose lograr una mayor resistencia para curvas granulométricas con mínimo contenido de vacíos. Este factor puede optimizarse independientemente de la pasta, pero afectará la composición y volumen de la misma.

Los aditivos son sustancias que se pueden agregar al concreto con el fin de modificar algunas de sus propiedades, o para inducirle algunas características adicionales: trabajabilidad, reducción del agua de mezclado, incorporación de aire, modificación de los tiempos de fraguado, proporcionar diferentes grados de impermeabilidad.

No obstante que en prácticamente en todos los concretos es posible utilizar aditivos, existen tres criterios básicos que deberán tomarse en cuenta:

- ✓ La adición de aditivo a la mezcla deberá lograr el objetivo buscado sin alterar su proporcionamiento básico.
- ✓ Su empleo estará justificado desde el punto de vista económico.
- ✓ Se investigara que el producto no tenga efectos nocivos en la mezcla, tanto de forma inmediata como a largo plazo.

2.2.1. Clasificación de Aditivos y su campo de aplicación

Debido a que sus efectos son muy variados, una clasificación así es muy extensa, además debido a que un solo aditivo modifica varias características del concreto, en la tabla 2.2 se clasifica la tipología de los aditivos, sus dosificaciones, las propiedades que confieren al concreto, por ultimo sus aplicaciones recomendadas.

Se recomienda seguir indicaciones del fabricante a fin de aprovechar las ventajas de cada aditivo y las dosificaciones de detalle.

Entre los aditivos más comunes existen algunos que combinan dos efectos a la vez, plastificante-retardantes o plastificante-incluser de aire.

Tabla 2.1. Características y dosificaciones de las diferentes clases de aditivos

ADITIVO Y DOSIFICACIÓN	PROPIEDADES LOGRADAS	APLICACIONES RECOMENDADAS	LIMITACIONES
1) Incluidor de aire 0,3 al 0,005% del peso de cemento.	Incorpora micro poros al concreto lo cual: -Aumenta resistencia a ciclos de hielo y deshielo - Mayor Trabajabilidad - Menor permeabilidad -Menor Exudación	- Protección contra cambios bruscos de temperatura. -Pavimentaciones - Protección contra agentes químicos	Menor resistencia Mecánica
2) Plastificantes o reductores de agua 0,1% a 4% del peso del cemento	Mejora la lubricación entre partículas Mejor Trabajabilidad Mayor facilidad de colocación.	Concretos Bombeables y del tipo premezclado Concretos en zonas estrechas Concretos de alta resistencia	
3) Fluidificantes Para aumentar la Trabajabilidad 0,4 a 1,0% Para reducir el agua 1 a 3% del peso de	Aumenta de manera importante la trabajabilidad permitiendo reducir el agua de mezclado para trabajabilidad	Colocación del concreto en zonas estrechas Concretos Bombeados Colocación de	El efecto se disipa relativamente pronto.

cemento	constante.	concreto en climas calurosos Concretos de altas resistencias	
4) Acelerantes de Fraguado En concreto no armado 1:2 a 15 (aditivo: agua) En concreto armado 1:6 máx. (aditivo: agua) Medidas en peso	Aumentan las resistencias iniciales	Colocación de concreto en climas fríos Lo indicado en proyecto Concretos prefabricados Reducción del lapso de descimbrado Reparaciones	Estos productos generalmente contienen productos corrosivos por lo que en concretos armados se extremaran precauciones
5) Retardantes de Fraguado 0,3 a 1.5% del peso del cemento	Retrasan el inicio del fraguado manteniendo la trabajabilidad más tiempo Reducen el riesgo de fisuración al permitir la disipación del calor de hidratación durante más tiempo	Concretos en climas calurosos Concretos premezclados Concretos masivos Transportes a distancias considerables Evitar juntas frías al colocar concreto en capas Concretos bombeados	Una sobredosificación puede originar una demora excesiva
6)	Disminuyen la	Concretos	El empleo de

Impermeabilizantes 0,5 a 4 % del peso del cemento	absorción de la humedad	subterráneos Losas de cubierta Estanques de concreto Pisos impermeables empastados exteriores	impermeabilizantes se debe completar con una buena dosificación compactación y curado de las mezclas
7) Expansores 2 a 3 gramos por saco de cemento	Producen una ligera expansión de la masa del concreto contrarrestando las contracciones de este	Rellenos de cavidades y grietas Anclajes de pernos y estructuras	

Fuente: ¹⁵

a. Aditivos Fluidificantes

Corresponden a una nueva generación de aditivos plastificadores en base a productos melaminicos o naftalinicos, constituyendo una evolución de los aditivos reductores de agua, que en la adsorción y capacidad de dispersión del cemento es mucho más acentuada.

Otorga un enorme aumento de trabajabilidad del hormigón, sin modificar la cantidad de agua, obteniendo como resultado un hormigón muy fluido, de baja tendencia a la segregación.

Los aditivos fluidificantes pueden utilizarse también como aditivos reductores de agua, pudiendo alcanzar un 20 % y un 30% en la disminución de cantidad de agua, incrementando la resistencia, especialmente en las primeras edades, por lo que pueden utilizarse aceleradores de endurecimiento o aditivos para hormigones de alta resistencia.

¹⁵ Rene Segovia., Evaluación de la Influencia de aditivos en la fisuración de los pavimentos rígidos., (Maestría) Universidad Autónoma Juan Misael Saracho., Tarija. Bolivia. 2012.

Los efectos principales que se derivan de la incorporación de algún componente tensoactivo son una parte la ionización de los filamentos del aditivo que produce la separación de los granos de cemento entre sí, conduciendo a una efectiva desfloculización, y, por otra parte, las moléculas de aditivos son absorbidas y se orientan en la superficie de los granos de cemento en un espesor de varias moléculas, de lo que resulta una lubricación de las partículas.

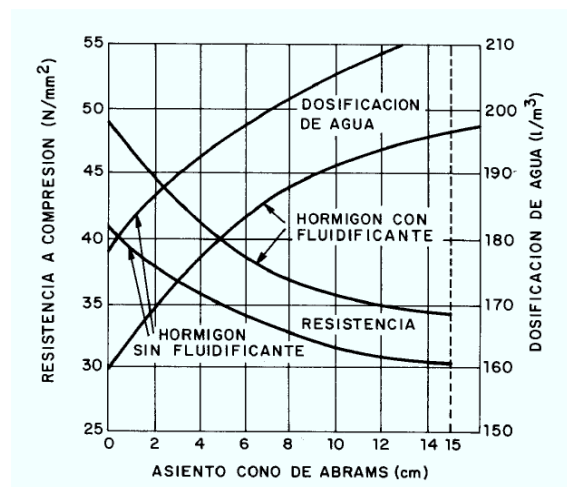
Desde el punto de vista químico existen diversos productos que tienen esta propiedad, pero en la práctica se reconocen tres grupos principales:

- ✓ Productos condensados de un naftaleno formaldehído sulfonado.
- ✓ Productos condensado de resina melamínica y formaldehídos.
- ✓ Algunos tipos de lignosulfonatos.

El efecto sobre la trabajabilidad del hormigón se mantiene entre 30 y 60 minutos según el aditivo, característica que hace conveniente agregarlo inmediatamente antes del término del amasado y obliga a una rápida colocación.

Cuando los aditivos fluidificantes se emplean como reductores de agua se obtiene un incremento de algunas características del hormigón endurecido, especialmente de su resistencia, durabilidad e impermeabilidad.

Figura 2.17. Acción de los Fluidificantes sobre las características de los hormigones.



Por otra parte, debido a que no producen incorporación de aire, el efecto en las resistencias es superior al obtenido con los plastificantes-reductores de agua, especialmente en las primeras edades, lo que resulta muy conveniente para su empleo en hormigones pretensados, prefabricado y obras en que se requiere desarrollo rápido de resistencias.

b. Aditivos Superfluidificantes

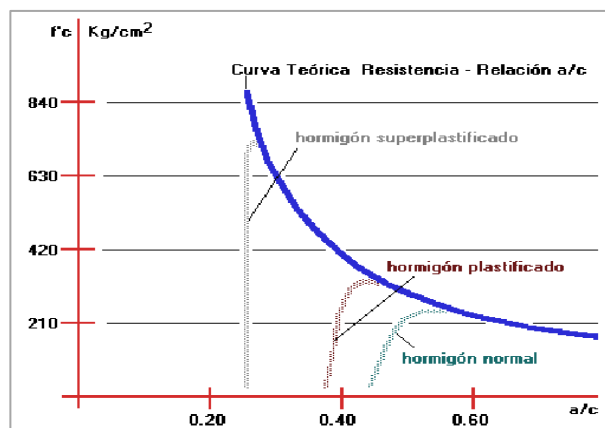
Los aditivos Superfluidificantes tienen básicamente los mismos efectos sobre el concreto que los aditivos fluidificantes, pero en grados mayores. Con la aplicación de superfluidificantes se alcanzan reducciones de hasta en una 60% de agua requerida en la mezcla de concreto. Son ampliamente usados principalmente en la elaboración de concretos de alta resistencia y autocompactantes.

Los aditivos superfluidificantes también conocidos como reductores de agua de alto rango pueden convertir a un hormigón normal en un hormigón fluido, que no requiere de vibración para llenar todos los espacios de las formaletas, inclusive en sitios de difícil acceso para el hormigón.

Así mismo, si se mantiene una trabajabilidad normal, estos aditivos permiten la reducción de la relación agua/cemento hasta valores cercanos a 0.30, consiguiéndose hormigones de mediana resistencia (entre 350 Kg/cm² y 420 Kg/cm²) y hormigones de alta resistencia (mayores a 420 Kg/cm²).¹⁶

¹⁶ A. Neville, *Properties of Concrete*, Pitman Publishing Limited.

Figura 2.18. Comportamiento de la Resistencia del Hormigón según la Relación A/C y la incorporación de aditivos Superplastificantes



Fuente: A. Neville, *Properties of Concrete*.¹⁷

c. Aditivos Incorporadores de Aire

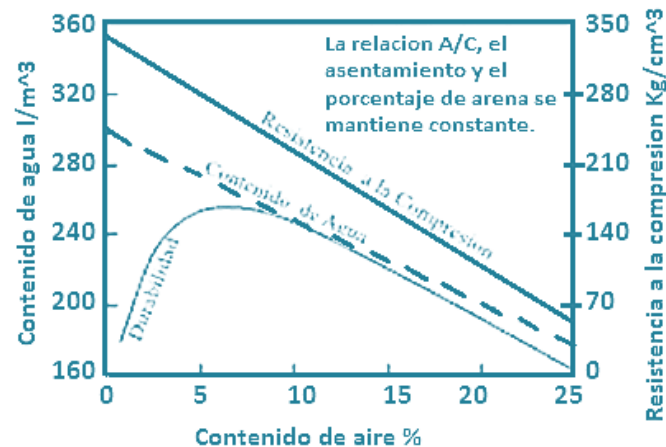
En 1938 se comienzan a emplear aditivos incorporadores de aire en la construcción de carreteras, en 1939 se fabrica un cemento con resina Vinsol como agente incorporador de aire y en 1948 se comienza aplicar el aditivo incorporador de aire a Europa.

El hormigón además de sus componentes sólidos, contiene un porcentaje de vacíos, de formas y dimensiones variadas, provenientes del aire atrapado y de la fracción del agua de amasado que se evapora. Al utilizar un incorporador de aire se producen micro burbujas esféricas cuyos diámetros oscilan entre 25 y 250 μ con una distancia entre ellos de 100 a 200 μ .

La cantidad de burbujas se ha estimado entre 100.000 a 400.000 por cm^3 de hormigón representando una superficie específica aproximada a los 23.6 mm^2/mm^3 .

¹⁷ A. Neville, *Properties of Concrete*, Pitman Publishing Limited.

Figura 2.19. Acción de los Incorporadores de Aire en las características del hormigón.



Los aditivos incorporadores de aire producen burbujas de aire dentro del hormigón, los que se utilizan en estructuras que están sometidas a procesos de congelamiento y descongelamiento periódico. Los incorporadores de aire tienen como efecto colateral la disminución de la resistencia del hormigón aproximadamente en un 5% por cada 1% de burbujas de aire introducidas.

Para otorgar resistencia a las heladas interesa particularmente que las burbujas sean pequeñas. Según norma ASTM C-457 la pasta de cemento está protegida contra los efectos de los ciclos de hielo-deshielo, si el factor de distancia es menor a 0,20 mm.

Estos aditivos también aumentan la cohesión de la mezcla de hormigón, disminuyen la necesidad de agua en la mezcla, para obtener la trabajabilidad similar al hormigón sin aditivo y disminuyen la exudación del hormigón.

Uno de los usos importantes de los aditivos incorporadores de aire, es en el caso del empleo de arenas gruesas y mezclas con dosis de cemento baja, los hormigones fabricados con este tipo de arenas normalmente provoca segregación, poca trabajabilidad y de aspecto poco trabajable. La incorporación de aire produce en estos hormigones mejoras en la trabajabilidad, cohesión y en su aspecto, además de su bajo costo.

Mecanismo de Acción de los aditivos incorporadores de aire

Los incorporadores de aire son productos de naturaleza anionica que, al introducirse en una pasta de cemento, quedan absorbido sobre la superficie de las partículas de cemento formando una delgada capa de filamentos de naturaleza hidrófoba. Además otra parte del aditivo se disuelve en la fase liquida en la etapa de amasado del hormigón, es aquí donde se producen las burbujas de aire, las que quedaban distribuidas en dicha fase sin unirse entre ellas, ya que los filamentos se orientan hacia el interior de las burbujas, con su fase polar en la superficie. Gracias a esto se pueden adherir separadamente a los granos de cemento.

La cantidad y características del aire incorporado dependen de numerosos factores, entre los cuales podemos mencionar:

- ✓ Tipo y cantidad del aditivo: intervienen tanto sobre la cantidad como sobre el tamaño, distribución y estabilidad de las burbujas de aire incorporado.
- ✓ Tipo y dosis de cemento: mientras más fino y mayor sea la dosis de cemento menor será la cantidad de aire incorporado.
- ✓ Docilidad del Hormigón: mientras mayor sea el cono, tanto la cantidad de aire y el tamaño de las burbujas aumentará.
- ✓ Características del hormigón: estas características inciden en la cantidad de aire incorporado, son principalmente la proporción de mortero en el hormigón, tamaño máximo del árido grueso y contenidos de los granos finos entre 0,2 y 0,8 mm.
- ✓ Condiciones de fabricación y puesta en obra: tiempo de amasado (un tiempo muy extenso hace que la cantidad de aire que hay en las burbujas, especialmente las de mayor diámetro salgan a la superficie y se rompan, con lo que disminuirá la cantidad de aire atrapado en el hormigón), condiciones de transporte (perderá aire según sea el traslado que sufra) y condiciones de compactación (no debe someterse a una excesiva compactación ya que esto hará que se pierda el aire incorporado, y más aún si se está trabajando con un cono alto).

Efecto provocado por el aditivo Incorporador de Aire

Esta incorporación de aire en el hormigón produce diversos efectos sobre éste, tanto mientras se mantiene en estado plástico como cuando ya ha endurecido.

El efecto principal buscado con el uso de los incorporadores de aire es el aumento de la resistencia del hormigón frente a los ciclos alternados de hielo – deshielo, que pueden producirse en los periodos en que las temperaturas ambiente descienden bajo 0° C, caso en el cual su empleo debe considerarse imprescindible.

Sin embargo, hacen también efecto sobre otras propiedades del hormigón, entre las cuales pueden mencionarse las siguientes:

- ✓ Efecto frente a los ciclos alternados de hielo – deshielo: Cuando existen bajas temperaturas ambiente, que conducen a procesos de hielo y deshielo alternativos, las burbujas de aire incorporado en el hormigón actúan como cámaras de expansión frente al aumento de volumen que experimenta el agua al transformarse en hielo. Ello permite reducir las presiones hidráulicas y, con ello, las tensiones internas que se originan por este motivo, impidiendo así el deterioro progresivo que se produciría en un hormigón que no contenga aire incorporado.

La experiencia práctica acumulada indica que, para asegurar la protección de hormigones expuestos a ciclos de hielo – deshielo, deberá incorporarse del orden de 3 a 6% de aire según el tamaño máximo del árido.

Tabla 2.2. Contenido de aire recomendado para el hormigón expuesto a ciclos de hielo-deshielo.

Tamaño Máximo Nominal del árido (mm)	Contenido de Aire (%)
10	6.0
12	5.5

20	5.0
25	4.5
40	4.5
50	4.0

Por otra parte, debe tenerse en cuenta que la eficacia de un aditivo incorporador de aire depende tanto de la cantidad total de aire incorporado, como del tamaño y distancia entre burbujas, siendo más efectivo mientras más pequeñas sean y próximas se encuentren.

Efecto sobre la trabajabilidad del hormigón

Las burbujas de aire formadas en el hormigón fresco actúan al mismo tiempo como un fluido, aumentando su docilidad, ya que, por su tamaño, equivalen a partículas de tamaño inferior a 2 mm, con la ventaja de tener un mejor coeficiente de forma, de ser elásticas y deformables, lo que les permite deslizarse sin rozamiento, aumentando la cohesión, con lo cual se reduce la tendencia a la segregación y la exudación, lo que facilita su puesta en obra.

Por otra parte, al disminuirse la exudación se evita la acumulación de agua bajo las barras de acero y los áridos gruesos, mejorando su adherencia, así como también disminuye la formación de lechada en las superficies. Se debe considerar que la incorporación de aire produce disminuciones en las resistencias mecánicas del orden de 3 a 5% por cada 1% de aire incorporado. Esta pérdida de resistencia se compensa en parte al bajar la razón agua-cemento.

2.2.2. Características Técnicas de los Aditivos

a. SIKAMENT®-180

Aditivo reductor de agua de rango medio-plastificante y retardantes de fraguado.

Descripción

Aditivo líquido, reductor de agua de rango medio, plastificante y retardante de fraguado para concreto. **No contiene cloruros.** Cumple con la norma **ASTM C 494 Tipo A y D** (en función de la dosificación) y **ASTM C 1017 Tipo II.**

Usos Sikament®-180

Se utiliza principalmente en la elaboración de concretos para todo tipo de estructuras, especialmente diseñado para emplearse como reductor de agua, plastificante o fluidificante con sólo variar la dosificación. Permite el transporte del concreto a largas distancias o por tiempos prolongados sin pérdida de trabajabilidad.

Ventajas

- ✓ Aumenta las resistencias mecánicas.
- ✓ Permite acabados superficiales de alta calidad.
- ✓ Permite una mayor adherencia al acero de refuerzo.
- ✓ Reduce la permeabilidad.
- ✓ Se puede re dosificar en obra para facilitar la colocación y/o bombeo del concreto sin afectar los tiempos de fraguado.

Modo de Empleo - Aplicación del Producto

✓ Como plastificante

Agregue **Sikament®-180** al concreto ya mezclado, en este caso debe ampliarse el tiempo de mezclado medio minuto por cada metro cúbico de concreto.

✓ Como reductor de agua

Agregue **Sikament®-180** junto con el agua de mezcla durante la preparación del concreto.

Dosificación Como reductor de agua (ASTM C 494 Tipo A)

De 0,4% a 0,6% del peso del cemento (3,0 a 5,0 ml/kg de cemento)

Como reductor de agua y retardante (ASTM C 494 Tipo D)

De 0,6% a 0,8% del peso del cemento (5,0 a 6,5 ml/kg de cemento)

Como plastificante (ASTM C 1017 Tipo II)

De 0,4% a 0,6% del peso del cemento (3,0 a 5,0 ml/kg de cemento)

Datos Técnicos Color: Café oscuro.

Densidad: 1,25 kg/l aprox.

b. SIKAMENT®-320

Es un aditivo líquido, color ámbar, compuesto por resinas sintéticas, Superplastificante, reductor de agua de alto poder y economizador de cemento.

Duplica en cualquier clima el tiempo de manejabilidad de la mezcla. No contiene cloruros.

Sikament-320 tiene tres usos básicos:

Como superplastificante:

Adicionado a una mezcla con consistencia normal se consigue fluidificar el concreto o mortero, facilitando su colocación o haciéndolo apto para el bombeo.

Especialmente indicado para bombeos de concreto o mortero en climas medios y cálidos con largo tiempo de colocación en: Cimientos, muros, pan-tallas, placas, columnas, vigas, elementos esbeltos densamente armados o no de la construcción de estructuras civiles prefabricadas o no.

Como reductor de agua alto poder:

Adicionándolo disuelto en el agua de amasado, permite reducir de acuerdo con la dosis usada hasta un 30% del agua de la mezcla consiguiéndose la misma manejabilidad inicial y obteniéndose un incremento considerable de las resistencias a

todas las edades. La impermeabilidad y durabilidad del concreto se ven incrementadas notablemente.

Como economizador de cemento:

Se puede aprovechar el incremento de resistencias logrado con la reducción del agua, para disminuir el contenido de cemento y hacer más económico el diseño de la mezcla.

El **Sikament-320** puede ser usado como superfluidificante en concretos con adiciones de microsílica (**SikaFume**).

El **Sikament-320** proporciona las siguientes propiedades:

Como superplastificante de efecto prolongado:

- ✓ Otorga una gran manejabilidad y retardo a la mezcla, facilitando el bombeo a mayores alturas y a distancias más largas, independientemente del clima.
- ✓ Permite obtener hasta el doble del tiempo de manejabilidad de la mezcla a cualquier temperatura.
- ✓ Dosificado en planta, permite transportar el concreto a mayores distancias.
- ✓ Permite colocar grandes volúmenes de concreto sin la formación de juntas frías de construcción.
- ✓ Distribuye el desprendimiento de calor de hidratación del cemento, cuando se colocan grandes volúmenes de concreto.
- ✓ Disminuye el riesgo de hormigueros en el concreto en estructuras esbeltas y densamente armadas.
- ✓ Disminuye la segregación y aumenta la cohesividad del concreto fluido.
- ✓ Disminuye los tiempos de vibrado y colocación del concreto. Ideal para la colocación del concreto por el sistema Tremie.

DESCRIPCIÓN - USOS - VENTAJAS

Superplastificante - Retardante reductor de agua de alto poder Sikament-320.

Como reductor de agua de alto poder:

- ✓ Incrementa la resistencia final del concreto en un 40% aproximadamente.

- ✓ Disminuye considerablemente la permeabilidad del concreto, aumentando su durabilidad.
- ✓ Permite densificar la mezcla y mejora su adherencia al acero de refuerzo.
- ✓ Mejora considerablemente el acabado del concreto y reproduce la textura de la formaleta.
- ✓ Gran economía en los diseños por la reducción de cemento alcanzable.

Como superplastificante:

Adicionarlo directamente al concreto o mortero ya listo para colocar y mezclar por lo menos durante 4 minutos, hasta obtener la mezcla fluida. Cuando el concreto es preparado en planta y luego transportado, el Aditivo **Sikament-320** se puede adicionar en obra inmediatamente antes de la descarga del hormigón, previa mezcla de este durante 3 minutos.

Como reductor de agua o de cemento:

Adicionarlo disuelto en la última porción del agua de amasado durante la preparación de la mezcla o directamente al agua de amasado, preferiblemente antes de incorporar el cemento y los áridos.

Dosificación:

Como superplastificante:

Del 0,5 al 1% del peso del cemento de la mezcla.

Como súper-reductor de agua o cemento:

Del 1 al 2% del peso del cemento de la mezcla.

Sikament-320 cumple normas ASTM C-494, ASTM C-1017 e Icontec 1299 como aditivo tipo G.

Densidad: 1,22 kg/l $\pm$ 0,03 kg/l

c. SIKA-AER®

Aditivo inclusor de aire-plastificante para concreto.

Descripción

Aditivo líquido inclusor de aire y plastificante para concreto. Incorpora una cantidad controlada de aire en el concreto a fin de mejorar sus propiedades. Cumple con la norma **ASTM C 260**.

Usos

Sika-Aer se utiliza principalmente en la elaboración de concretos cuando se requiera:

- ✓ Reducir la permeabilidad.
- ✓ Aumentar la durabilidad y resistencia a ambientes agresivos. (agua de mar, aguas o suelos sulfatados, etc.)
- ✓ Impedir la exudación del concreto y la correspondiente formación de capilares.
- ✓ Evitar la segregación del concreto durante el transporte.
- ✓ Mejorar la bombeabilidad de concretos con deficiencia de finos en la arena.
- ✓ Aumentar la manejabilidad de mezclas con agregados de trituración.

Ventajas

- ✓ Controla la exudación de la mezcla.
- ✓ Hace el concreto más durable y resistente al medio ambiente agresivo.
- ✓ Es un excelente auxiliar en el bombeo de concreto.
- ✓ Mejora notablemente la apariencia y consistencia de mezclas ásperas.
- ✓ No afecta el tiempo de fraguado.

Modo de Empleo - Aplicación del Producto

Agregue Sika-Aer en el último 10% del agua de mezcla durante la preparación del concreto.

Dosificación

De 0,2 a 0,4 ml por kilo de cemento. El contenido de aire debe verificarse por medio de una olla para medir contenido de aire y la dosificación debe ajustarse según el resultado.

La dosis óptima se debe determinar mediante ensayos con los materiales y las condiciones de la obra.

El uso de aditivos inclusores de aire en el concreto exige un perfecto control sobre:

- ✓ La granulometría de la mezcla, especialmente en la zona de agregados finos.
- ✓ La dosis de aditivo y el contenido de aire obtenido.
- ✓ El tiempo de mezcla se debe incrementar un 25% aprox. para favorecer la formación de las burbujas de aire.

Datos Técnicos

Tipo: Aditivo líquido a base de resinas sintéticas.

Color: Ámbar.

Densidad: 1,03 kg/l aprox.

2.3. CONCRETO HIDRÁULICO EN LOSAS DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

La historia del cemento es la historia misma del hombre en la búsqueda de un espacio para vivir con la mayor comodidad, seguridad y protección posible. Desde que el ser humano supero la época de las cavernas, ha aplicado sus mayores esfuerzos a delimitar su espacio vital, satisfaciendo primero sus necesidades de vivienda y después levantando construcciones con requerimientos específicos.

Por miles de años el hombre ha explorado la versatilidad de materiales que pueden ser moldeados en un estado plástico y entonces endurecer produciendo productos fuertes y durables.

En los concretos utilizados para aplicarse en pavimentos y vialidades, el diseño de estas mezclas se ajusta para optimizar las propiedades del uso del material al que se elija tanto en estado fresco como en estado endurecido.

Entre sus ventajas se encuentran:

- ✓ Mínima tendencia de exudación, lo que limita la aparición de grietas.
- ✓ Aumento del módulo de rotura a la flexión en estado endurecido.
- ✓ Disminución del desgaste de la superficie de contacto.
- ✓ Bajo coeficiente de contracción en estado endurecido.
- ✓ Elevada impermeabilidad por su baja relación agua-cemento.
- ✓ Buena colocación y compactibilidad del concreto en sitio, disminuyendo la segregación de componentes por el uso de aditivos.
- ✓ Formulaciones especiales para obtener rápida resistencia y apertura rápida al tránsito.

Son muchas las características del concreto donde algunas de ellas hacen crítica en determinadas circunstancias. Sin embargo, desde un punto de vista general son dos las propiedades principales de mayor envergadura. La primera es la relativa a la consistencia o grado de fluidez del material en estado fresco, la cual se conoce como manejabilidad, ductilidad, trabajabilidad, asentamientos, entre otros. La segunda es el grado de endurecimiento o resistencia capaz de adquirir el concreto.¹⁸

El agua cumple la doble misión de dar fluidez a la mezcla y de reaccionar químicamente con el cemento dando lugar al endurecimiento.

2.3.1. Fundamentos sobre el concreto

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregado y pasta. La pasta, compuesta de cemento Portland y agua, une a los agregados (arena y grava o piedra triturada) para formar una masa semejante a una roca pues la pasta endurece debido a la reacción química entre el cemento y el agua.

La composición del hormigón debe establecerse teniendo en cuenta las características de los materiales disponibles y las resistencias a alcanzar, así como los equipos de puesta en obra y las condiciones climáticas.

¹⁸ Porreo, J.; Ramos, C.; Grases, J.; Velazco, G. Manual del Concreto Estructural. (2003)

La calidad de un hormigón para carreteras debe ser, de forma general, superior a la de un hormigón para edificación. Debe, en efecto, responder a las solicitaciones repetidas del tráfico, a los efectos climáticos y su resistencia a flexotracción ha de tenerse en cuenta en el proyecto. El hormigón de pavimentos debe ser por tanto tan homogéneo y compacto como sea posible, así como presentar unas características mecánicas adecuadas a la categoría de la carretera y a las condiciones climáticas.

La calidad del concreto depende en gran medida de la calidad de la pasta. En un concreto elaborado adecuadamente, cada partícula de agregado está completamente cubierta con pasta y también los espacios entre partículas de agregado.

Para cualquier conjunto específico de materiales y de condiciones de curado, la cantidad de concreto endurecido está determinada por la cantidad de agua utilizada en la relación con la cantidad de cemento. A continuación se presenta algunas ventajas que se obtienen al reducir el contenido de agua:

- ✓ Se incrementa la resistencia a compresión y flexión.
- ✓ Se tiene menor permeabilidad, y por ende mayor hermeticidad y menor absorción.
- ✓ Se incrementa la resistencia al intemperismo.
- ✓ Se logra una mejor unión entre capas sucesivas y entre el concreto.
- ✓ Se reducen las tendencias de agrietamientos por contracción.

2.3.2. Diseño del concreto hidráulico

El diseño del concreto hidráulico tiene por objeto la dosificación más económica de cemento, agregado grueso y arena para la mezcla, de esta manera, producir un material con la resistencia, manejabilidad, impermeabilidad y durabilidad requerida en el diseño del pavimento.

No es redundante destacar que el proceso de diseño de una mezcla no es tan simple como la aplicación de un método racional, cualquiera sea éste. En el desarrollo

mismo de cada uno de los métodos hay que considerar la interrelación entre distintos factores que influyen en las propiedades y características de las mezclas.

El proceso de diseño de una mezcla no se reduce al empleo de un determinado método racional, sino que abarca mucho más y debe, inexorablemente, incluir el ajuste de pastones de prueba para verificar las suposiciones efectuadas en el desarrollo analítico del diseño de la mezcla.

El método que se propone es útil para el diseño de mezclas, su empleo permite asegurar la durabilidad bajo las condiciones de exposición del hormigón más comunes, aunque es menester dejar en claro que siempre deben respetarse las reglas del arte en lo que se refiere al mezclado, transporte, colocación, compactación y curado.

Semejante a otros métodos racionales, se deben conocer las propiedades o características de los materiales componentes, así como las condiciones particulares de la obra y el equipamiento disponible.

Después que se hayan elegido las características, se puede proporcionar la mezcla a partir de datos de campo o de laboratorio. Como la mayoría de las propiedades deseadas en el concreto endurecido dependen principalmente de la calidad de la pasta cementante, la primera etapa para el proporcionamiento del concreto es la elección de la relación agua-material cementante apropiada para la resistencia y durabilidad necesarias. Las mezclas de concreto se deben mantener lo más sencillas posible, pues un número excesivo de ingredientes normalmente dificulta el control del concreto. Sin embargo, no se debe descuidar la moderna tecnología del concreto.

2.4. PRINCIPALES PROPIEDADES DEL CONCRETO HIDRÁULICO PARA PAVIMENTOS

El concreto hidráulico presenta muchísimas propiedades que favorecen su comportamiento bajo las demandas a que se ve sometido en la obra. Dentro de estas propiedades podemos mencionar: la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, versatilidad, durabilidad, trabajabilidad, etc.

Las propiedades de mayor interés para la ingeniería de la construcción de este compuesto, son su resistencia a la compresión y su resistencia a la flexión. Estas propiedades dependen en gran medida de la calidad de los materiales que lo componen así como su proporción en la que se encuentran dentro del concreto. Los agregados pétreos son de gran importancia en la ingeniería de la construcción debido a que las propiedades físico-mecánicas, petrográficas y químicas, depende en gran parte la buena adherencia del agregado con la pasta agua-cemento y por ende la resistencia del concreto, así como la estabilidad volumétrica.

2.4.1. Trabajabilidad del Hormigón en Losas de Pavimentos

Según Porrero, J., da el término trabajabilidad, con dos acepciones distintas. Una, general, con la cual designamos el conjunto de propiedades del concreto que permiten manejarlo sin que se produzca segregación, colocarlo en moldes y compactarlo adecuadamente. La otra designación es específica para designar el término asentamiento medido por el procedimiento normalizado del Cono de Abrams. Esta segunda aceptación es discutible porque, en realidad, el ensayo no es representativo del conjunto de propiedades referidas.¹⁹

Trabajabilidad una propiedad del hormigón, asociada al grado de facilidad o dificultad con la que una mezcla de concreto puede ser mezclada, transportada, colocada y terminada. Está condicionada al equipo que se utilice en las actividades en cada etapa, es decir, la trabajabilidad adecuada para el concreto masivo no es siempre

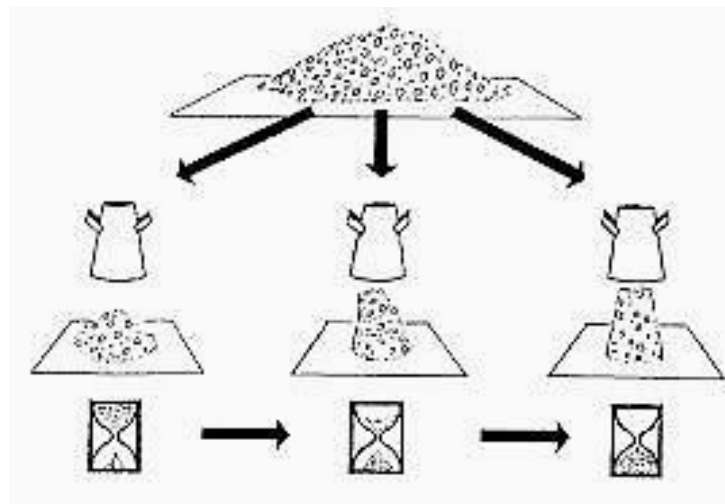
¹⁹ Curiel Fernández, Daniel E.; García Weffer, Juvenal.; Diseño de una mezcla de Pavimento Rígido utilizando diferentes porcentajes de wolastonita. Maracaibo, Venezuela: Universidad Rafael Urdaneta; 2006.

suficiente cuando se trate de secciones delgadas de difícil acceso o con mucho acero de refuerzo.

Un concreto de calidad uniforme y satisfactoria requiere que los materiales se mezclen totalmente hasta que tenga una apariencia uniforme. La mezcla de concreto debe tener una trabajabilidad apropiada para su fácil colocación; una vez endurecido el concreto tendrá que cumplir con el requisito de resistencia para soportar las distintas solicitaciones a las que podrá estar expuesto y además deberá poseer una adecuada durabilidad frente a las condiciones de exposición a las que será sometido.

La trabajabilidad depende de las proporciones y de las características físicas de los materiales, y también del equipo utilizado durante el mezclado, transporte y colocación de la mezcla. Aun así la trabajabilidad es un término relativo, porque un concreto se podrá considerar trabajable bajo ciertas condiciones y no trabajable para otras.

Figura 2.20. Trabajabilidad de hormigón con el tiempo



Fuente: construaprendiendo.blogspot.com

Por ende, la trabajabilidad debería definirse solamente como una propiedad física del concreto fresco, sin hacerse referencia a las circunstancias específicas de un tipo de construcción.²⁰

Un componente muy importante de la trabajabilidad es la consistencia o fluidez de la mezcla de concreto. La consistencia de una mezcla de concreto es un término general que se refiere al carácter de la mezcla con respecto a su grado de fluidez; y abarca todos los grados de fluidez, desde la más seca hasta la más fluida de todas las mezclas posibles.²¹

En general, existen varios tipos de consistencia:

- i. Consistencia seca, aquélla en la cual la cantidad de agua es pequeña y simplemente la suficiente para mantener las partículas de cemento y agregados juntas.
- ii. Consistencia dura o rígida, posee un poco más de agua que la consistencia seca.
 - a. Consistencia húmeda, la cantidad de agua es bastante apreciable y se trata de un concreto fluido.

Las mezclas secas y poco trabajables deberán consolidarse por medio de vibrado, pero en caso de mezclas fluidas puede no ser necesario el vibrado mecánico y solamente requerirse una consolidación por varillado.

Los principales factores que están relacionados con el agregado y que afectan el revenimiento del concreto, son: la cantidad total de agregado grueso/fino, sus respectivas distribuciones granulométricas y las formas de las partículas de los agregados.

El comportamiento reológico de la pasta de cemento del concreto tiene que ver con la relación agua/cemento. Cuanto mayor sea la relación, más diluidas en agua están las partículas finas, de modo que, físicamente, el agua juega un papel clave en la reología

²⁰ Prueba de Revenimiento, Dep. Mecánica Estructural, Univ. Centroamericana “José Simeón Cañas” UCA, San Salvador, El Salvador., América Central, 2001.

²¹ McMillan F.R. y Tuthill, Lewis H., Cartilla del Concreto, IMCYC, México D.F., 1989, p. 48.

de la pasta de cemento hidratada cuando la relación agua/cemento es alta (por ejemplo, 0.50). Con un valor de la relación agua/cemento tan elevado, las partículas cementantes están lejos unas de otras dentro de la pasta que su interacción, no afecta particularmente el revenimiento del concreto. La cantidad de aire incluido también afecta drásticamente el revenimiento de un concreto convencional, cosa que está bien documentada.²²

a. Factores que influyen en la trabajabilidad del hormigón

Los factores más importantes que influyen en la manejabilidad de una mezcla, son las siguientes:

a.1. Gradación del Agregado Fino.-

Una arena mal gradada, con exceso o defecto de partículas de un tamaño dado, puede presentar una gran cantidad de espacios vacíos que deben ser llenados con pasta de cemento y agua para que la mezcla sea manejable y no quede porosa. Las recomendaciones más importantes, relacionadas con la gradación de la arena se pueden resumir en las siguientes:

- ✓ El agregado fino no debe retener más de un 45% entre dos mallas consecutivas, considerando la serie de tamices números 4, 8, 16, 30, 50 y 100.
- ✓ Para que la mezcla sea más manejable, cohesiva, tenga menos agua superficial y presente buena textura para un buen acabado, el agregado fino que se utilice, debe tener de un 15% de partículas que pase por la malla No. 50 y más de un 4% por la malla No. 100.
- ✓ Debe evitarse la utilización de arenas muy finas o muy gruesas; con las primeras se obtendrán mezclas que segregan y con las segundas mezclas ásperas.

²² P-C. AÍTCIN, “Concreto De Alto Desempeño”, Capítulo 13. Sección 13.3.2. Universidad de Sherbrook, Quebec, Canadá.

a.2. Gradación del Agregado Grueso.-

Con respecto a la gradación del agregado grueso puede decirse lo mismo que para el agregado fino. Una grava o un triturado mal gradado, presentara exceso de vacíos que deben ser llenados con mortero para que la mezcla sea manejable.

Un concepto diferente sobre la influencia de la granulometría de los agregados en la manejabilidad, resistencia y contenido de cemento de una mezcla se emplea para dosificar concretos de granulometría discontinua; si se utiliza un agregado grueso de granulometría discontinua (eliminando tamaños intermedios) y un agregado fino en el cual se descartan las partículas más finas, es posible obtener una igual resistencia con un menor contenido de cemento e igual manejabilidad que con unos agregados de granulometría continua.

Tal fenómeno se atribuye al hecho de que las partículas individuales se colocan de tal manera que quedan en contacto unas con otras, los vacíos se llenan con una matriz uniforme y las cargas de compresión son transmitidas especialmente por el contacto directo entre las partículas del agregado grueso y no por el mortero. Este último transmite los esfuerzos de tracción y cizalladura.

a.3. Forma y textura superficial de los agregados.-

Los agregados gruesos son partículas alargadas, aplanadas, ásperas, rugosas y angulosas exigen una mayor cantidad de mortero en una mezcla que los compuestos por partículas redondeadas y lisas, para conservar una trabajabilidad comparable. Para los agregados finos, a su vez, puede hacerse la misma observación, con respecto al contenido de agua o de pasta.

Las principales recomendaciones relacionadas con la forma y textura de los agregados son las siguientes:

- ✓ Debe tratar de utilizarse, en lo posible, las arenas naturales en lugar de las obtenidas durante el proceso de trituración de rocas (arenas manufacturadas o trituradas).

- ✓ Entre los agregados grueso especialmente los triturados, deben preferirse los que tienen forma aproximadamente redondeada o cubica. Puede permitirse un porcentaje moderado de partículas aplanadas o alargadas para que su efecto en la trabajabilidad de la mezcla no sea importante, (máximo 15%).

a.4. Cantidades relativas de pasta agregados.-

La manejabilidad o trabajabilidad del concreto fresco está determinada por el efecto lubricante de la pasta cemento y agua, el cual está influenciado por la cantidad de pasta con respecto a la de los agregados. Si esta relación tiene un valor alto los agregados podrán moverse libremente dentro de la masa de concreto. Si la cantidad de pasta se reduce hasta un punto en que no es suficiente para llenar los espacios vacíos y permitir que los agregados “floten”, la mezcla se volverá granulosa y áspera.

a.5. Fluidéz de la pasta.-

Una pasta con poca agua y mucho cemento será muy rígido, no podrá admitir la adicción de los agregados sin llegar a ser enteramente inmanejable. Por el contrario, si el contenido de agua es alto y del cemento es bajo, la pasta puede llegar a ser tan fluida que no es capaz de impedir la segregación de los agregados (especialmente de los tamaños gruesos); los sólidos más pesados se asentaran y el agua se acumulara en la superficie de la mezcla produciendo el fenómeno conocido como exudación.

La pasta fresca es una suspensión, más no una solución de cemento en agua. Mientras más diluida, mayor será el espacio entre las partículas de cemento y entonces más débil será la estructura de la pasta en cualquier estado de hidratación de la misma. Por lo tanto, en mezclas plásticas la resistencia del concreto variara como una función inversa de la relación agua/cemento, la cual es una manera de expresar el grado de dilución de la pasta.

a.6. Contenido de Aire.-

Durante las operaciones de dosificación y mezcla del concreto es introducido un volumen de aire en cantidad, tamaño y forma de burbujas, denominado generalmente como “aire atrapado”, si estas burbujas permanecen dentro del concreto ocupando un

porcentaje considerable de volumen, se obtiene un descenso importante en la resistencia potencial de la mezcla y en su durabilidad; de allí que no deba ahorrarse esfuerzo para lograr una adecuada compactación del concreto.

Por otro lado, el aire es introducido intencionalmente en el concreto fresco en forma de esferoides uniformemente distribuido y aislados, de diámetros variables entre 0,07 y 1,25 mm produce algunos efectos deseables en el concreto; este aire se denomina “aire incorporado o incluido”. Con respecto al concreto fresco aumenta la plasticidad de la mezcla y reduce la exudación y la segregación; la manejabilidad es mejorada en parte porque las burbujas de aire aumentan el volumen de mortero; además, su forma es flexible y ayudan al movimiento de las partículas de agregado. La inclusión de aire mejora el concreto endurecido la resistencia al congelamiento y al deshielo lo mismo que a la fusión, por lo tanto mejora su durabilidad.

Las consistencia de una mezcla puede conservarse si el volumen de arena se reduce en la misma cantidad que se aumentó el contenido de aire; si se hace esta reducción, es posible disminuir el contenido de agua en un 3% por cada 1% de aire incorporado y de esta forma recuperar parte de la resistencia mecánica que se pierde por la presencia de vacíos dentro del concreto.

El contenido de aire aumentara en una mezcla cuando se presenten las siguientes variaciones:

- ✓ Una mayor cantidad de agentes aireantes.
- ✓ Mezclas más pobres en cemento.
- ✓ Agregados con tamaño máximo menor.
- ✓ Mayor cantidad de arena.
- ✓ Consistencias más húmedas.
- ✓ Operaciones de mezclado más fuertes y prolongadas.

a.7. Tipo de cemento.-

Es lógico pensar que las características del cemento empleado en la fabricación de mezclas para la elaboración de losas en pavimentos rígidos tiene una gran influencia

en las características del hormigón en su estado fresco como en su estado endurecido debido a que el cemento es un material “activo”.

Partiendo desde la finura del cemento se puede entender que esta característica influye en la velocidad de hidratación y en el calor liberado en las mezclas, se entiende que a mayor finura, mayor rapidez de hidratación del cemento provocando menor tiempo de fraguado mayor resistencia temprana, pero el hecho de que la mezcla presente un rápido fraguado el cemento pierde su plasticidad volviéndose difícilmente trabajable.

Es importante conocer la velocidad de reacción entre el cemento el agua y los aditivos porque la velocidad determina el tiempo de fraguado como de endurecimiento. La reacción inicial debe ser suficientemente lenta para que conceda tiempo al transporte y colocación del concreto. Sin embargo, una vez que el concreto ha sido colocado y terminado, es deseable tener un endurecimiento rápido.

Los aditivos empleados en la elaboración de mezclas de hormigón se pueden comportar de manera diferente con distintos tipos de cemento, con ciertas combinaciones pueden ocurrir efectos indeseables que varían desde un efecto retardante excesivo, el paso a una mezcla demasiado fluida, hasta un endurecimiento prematuro, dependiendo de la dosis y el tipo de componente químico del aditivo y de la composición química del mismo cemento.

b. Método de Consistencia del Cono de Abrams

La manejabilidad de las mezclas de hormigón no puede ser medida directamente, el método de consistencia a partir del uso del Cono de Abrams permite correlacionarla con otra característica que es el ensayo de asentamiento.

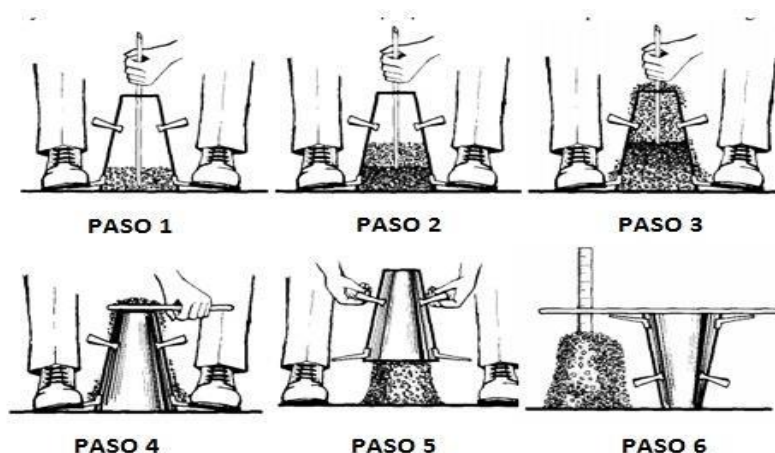
El cono de Abrams es un ensayo muy sencillo de realizar y permite medir la consistencia de un hormigón fresco, no requiriendo equipo costoso ni personal especializado y proporcionando resultados satisfactorios.

En términos generales, podemos decir que cuando menor sea el asentamiento medido, mayor será el trabajo necesario requerido por operarios y maquinarias para manipular el hormigón en la obra.

Si el hormigón desciende de una forma uniforme se tienen conos válidos, pero existen oportunidades que la mitad del cono desliza a lo largo de un plano inclinado obteniéndose un asiento oblicuo provocado por una deformación por corte. En este caso debe repetirse el ensayo, y si se continúa con la obtención de conos similares será necesaria la modificación de la dosificación, debido a que estas deformaciones son sintomáticas de mezclas carentes de cohesión.

Además, el cono de Abrams es un medio de control de calidad en obra muy útil debido a que permite detectar fácilmente cambios entre diferentes masas, sean debidos a variaciones de agua de amasado, en humedad de los áridos e incluso en la granulometría de estos, siendo, por consiguiente, un ensayo que permite verificar la regularidad del material; esto es, comparando comportamientos de diferentes conos entre sí. (Ver Figura 2.21).

Figura 2.21. Ensayo de Asentamiento del Cono de Abrams



Fuente: Consistencia del hormigón.²³

²³ [Aprendiendofisica.bligoo.com.uy/Medida Consistencia HORMIGÓN. Cono ABRAMS](http://Aprendiendofisica.bligoo.com.uy/Medida%20Consistencia%20HORMIGÓN.%20Cono%20ABRAMS).

2.4.2. Pruebas mecánicas realizadas al concreto.

Porrero, J. La calidad del concreto depende de muchas variables, tanto de las características de cada uno de los materiales que lo componen como de las proporciones en que estos son mezclados, así como de las operaciones de mezclado y de los procedimientos de colocación y curado. Esto conlleva a que para un mismo tipo de concreto se puede presentar cierta variabilidad en sus propiedades.²⁴

➤ Factores que influyen en la resistencia

Relación agua-cemento.- En principio la resistencia aumenta si aumenta la cantidad de cemento pero disminuye si la cantidad de agua aumenta y viceversa, de aquí que al controlar la cantidad de agua en el hormigón para asegurar la resistencia que se desea tener.

Forma, tamaño y textura de los agregados.- Esto tiene que ver con la calidad y cantidad de pasta de cemento y agua necesaria para conseguir un revestimiento total de las partículas, una adherencia total entre agregados y pasta y un cierto grado de consistencia y trabajabilidad del hormigón.

Igualmente.- Las variaciones de granulometría de una agregado afecta la resistencia del hormigón en razón del cambio en la cantidad de pasta que se requiere para mantener un grado de resistencia único, con el revestimiento total de las partículas en la cantidad de vacíos que tienen que llenarse.

A medida que disminuye el tamaño nominal máximo del ripio se logra mayores resistencias debido a que se tiene menor cantidad de vacíos.

a. Resistencia a Compresión

Neville, 1999. Algunas propiedades del concreto endurecido están relacionadas con esta resistencia, como son: densidad, impermeabilidad, durabilidad resistencia a la abrasión, resistencia al impacto, resistencia a la tensión, resistencia a los sulfatos.

²⁴ Curiel Fernández, Daniel E.; García Weffer, Juvenal.; Diseño de una mezcla de Pavimento Rígido utilizando diferentes porcentajes de wolastonita. Maracaibo, Venezuela: Universidad Rafael Urdaneta; 2006.

Esto no quiere decir que estas propiedades sean una función simple y única de la resistencia a la compresión, sino que, un concreto de mayor resistencia a la compresión tendrá mejores propiedades.

La resistencia a la compresión del concreto para pavimentos rígidos se incrementa a medida que la relación agua/cemento disminuye al igual que el concreto convencional. Debido a los múltiples factores que afectan la relación entre f'_c y la relación agua/cementante, es imposible establecer todavía una relación general entre la proporción agua/cementante y la resistencia a la compresión que puede alcanzar un concreto de alta resistencia, incluso cuando el agregado grueso es lo suficientemente resistente. La siguiente tabla 2.3 demuestra la resistencia a la compresión que puede alcanzar de acuerdo a su relación A/C.

Tabla 2.3. Resistencia a la compresión del concreto como una función de la relación agua/cemento

A/C	Rangos de la resistencia a la compresión
0.40 – 0.35	50 a 75 Mpa
0.35 – 0.30	75 a 100 MPa

Fuente: “Concreto De Alto Desempeño”.²⁵

El endurecimiento del concreto se ve bastante influenciado por las cantidades utilizadas de retardante y superplastificante, que se han agregado a fin de bajar la relación agua/cementantes hasta un punto necesario donde se asegure que se está alcanzando la resistencia a la compresión requerida, y a la misma vez que conserva la trabajabilidad deseada para hacer más fácil su colocación durante el tiempo necesario. La resistencia a compresión simple de las piedras que se utilizan como revestimientos o como pavimentos, se determinan sobre formas paralelepípedicas, en lugar de formas cilíndricas, que es lo habitual para determinar la resistencia a compresión

²⁵ P-C. AÏTCIN, “Concreto De Alto Desempeño”, Capítulo 16. Sección 16.1 Universidad de Sherbrook, Quebec, Canadá.

simple de cualquier material, como por ejemplo el hormigón. En concreto, se utilizan muestras formadas por 5 probetas cúbicas, que se ensayan después de secarlas en estufa, manteniéndolas durante 48 horas a $60 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Las bases serán paralelas entre si y perpendiculares al eje de la probeta, alisándose por amolado con una máquina rectificadora. Se rechazarán las probetas que presenten defectos evidentes.

- ✓ La planicidad de las bases se comprobará con ayuda de un papel de carbón colocado sobre una superficie perfectamente plana y sobre el cual se colocarán las bases de la probeta.
- ✓ La perpendicularidad del eje de la probeta a las bases se comprobará situándola de pie sobre una superficie perfectamente plana y aplicando una escuadra sobre una generatriz. La holgura entre cualquiera de las generatrices y la rama vertical de la escuadra, no deberá sobrepasar la tolerancia especificada.
- ✓ El paralelismo de las bases se comprobará realizando cuatro medidas de la altura de la probeta, equidistantes. La diferencia entre la medida máxima y la mínima, no deberá exceder a la tolerancia especificada.

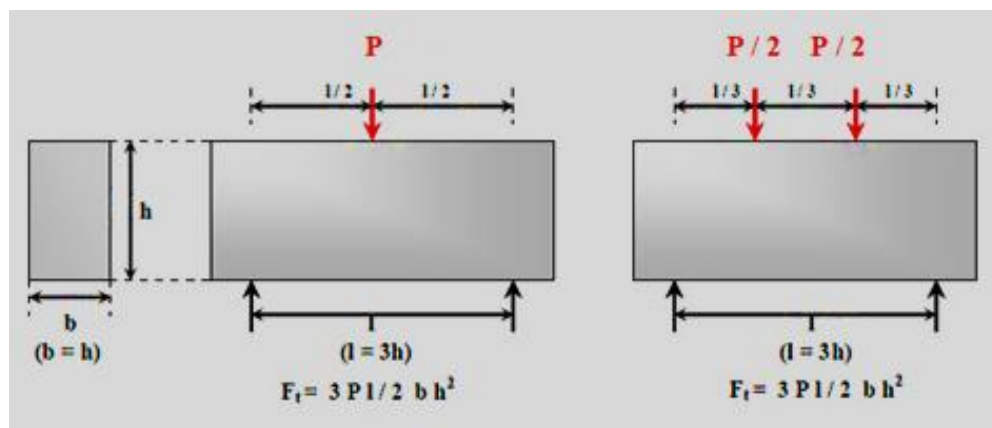
b. Resistencia a Flexión

En el caso de la utilización de hormigón en pavimentos, la resistencia característica especificada por pliegos está dada en función de la resistencia a tracción debida a la flexión.

La resistencia a tracción es la cantidad máxima estrés que una muestra puede soportar al ser tomada antes de que comience a estar permanentemente deformada. Las pruebas directas de tracción se pueden ejecutar en sustancias maleables, como acero o cuerda, pero en muestras de hormigón hace que sea difícil ejecutar esta prueba directa, por lo que, la única prueba más importante indirecta a la tracción es la de la resistencia a la flexión.

Estas pruebas se realizan mediante la determinación de la cantidad de carga que una viga rectangular de hormigón no reforzado o losa puede soportar antes de que empiece a doblarse. Las pruebas se ejecutan en variaciones, con peso aplicado en diferentes puntos a lo largo de la losa. Algunas pruebas son compatibles con el hormigón en cada extremo y se aplican la carga en el centro, otros, apoyaran la carga en el centro y aplican la carga en los extremos.

Figura 2.21. Pruebas opcionales de tensión por flexión



Fuente: construaprendiendo.blogspot.com

La flexión es crítica ya que una parte de la losa al aplicar la carga se encuentra en tensión y la resistencia a la tensión del concreto es apenas una pequeña porción de la resistencia a la compresión, por esta razón, la resistencia a la flexión por tensión del concreto o módulo de ruptura (MR) será la resistencia del concreto a considerar en diseño de espesor de losas soportadas sobre el terreno.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

El conocimiento de las propiedades de los constituyentes del hormigón representa la etapa experimental previa al estudio de la dosificación. Se deben evaluar las características físicas, químicas y mecánicas de los materiales y confrontarlas con las especificadas normativamente. A continuación se indican las características básicas a conocer haciendo, en algunas de ellas, anotaciones sobre su valor de diseño y sobre los cálculos que involucran.

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO FINO

3.1.1. Descripción de la arena

Para el diseño de mezcla de hormigón se empleara arena procedente del río Guadalquivir, ubicado a una distancia de 45 km aproximadamente de la ciudad de Tarija. (Ver ubicación en anexos).

La arena a utilizar fue aquel árido que llevo a pasar por el tamiz de 5 mm de abertura de malla, limpia, en condiciones de buena calidad y sin materiales extraños como materia orgánica y sales naturales, además.

La curva granulométrica de la arena a caracterizar deberá encontrarse entre los siguientes rangos que se presenta a continuación:

Tabla 3.1. Tamaño de los agregados según Norma CBH 87

Tamiz N°	% que pasa Mínimo	% que pasa Máximo
100	3	7
50	5	26
30	30	62
16	55	85
8	75	95
4	95	100

Fuente: Norma CBH 87

3.1.2. Granulometría de la arena

Se entiende por granulometría a la composición del material en cuanto a la distribución del tamaño de los granos que lo integran. Esta característica decide, de manera muy importante, la calidad del material para su uso como componente del hormigón.

La granulometría se puede expresar de varias formas: retenidos parciales en cada malla, expresados en peso o en porcentaje, o retenidos acumulados, principalmente la forma usual y conveniente es la que expresa el pasante total por cada malla de cada tamiz como porcentajes en peso.

El ensayo de granulometría de la arena se realizó siguiendo las indicaciones según la norma vigente ASTM C-136 (ver anexo).

Equipo utilizado:

- ✓ Juego de tamices (1/2", 3/4", 3/8", N°4, N°8, N°10, N°16, N°30, N°50, N°100).
- ✓ Recipientes y bandejas.
- ✓ Brocha, cepillo cerdas de acero.
- ✓ Cuarteador.
- ✓ Balanza

Antes de realizar el ensayo se obtuvo una muestra representativa de arena, para tal caso se utilizó el cuarteador mecánico hasta obtener la cantidad necesaria.

1. Una cantidad de 500 gr de arena fue introducido al juego de tamices ordenados de la siguiente manera (N°4, N°8, N°10, N°16, N°30, N°50, N°100, N°200, base) por tratarse de material fino.



Figura 3.1. Juego de tamices. (Fuente propia).

2. Se realizó el tamizado de la muestra de forma manual, agitando los tamices por un lapso de 15 min, en movimiento horizontal y vertical.



Figura 3.2. Tamizado de la arena por malla N°10. (Fuente Propia).

3. El material retenido en la malla de cada uno de los tamices fue puesto en recipientes pequeños por separado para luego ser pesados, y así de esta manera tener el peso retenido en cada tamiz, además se pesó el material que pasa el tamiz N°200.



Figura 3.3. Peso retenido en cada tamiz. (Fuente propia).

4. Una vez obtenido el peso retenido en cada malla, se realizó los cálculos para determinar el porcentaje que pasa por cada tamiz y así elaborar la curva granulométrica buscada.
5. Posteriormente se determinó el Modulo de Finura para la mezcla realizada mediante la fórmula correspondiente, este módulo será utilizado como dato para realizar el diseño del hormigón.

Resultados Obtenidos

Tabla 3.2. Contenido de Humedad (%) del Agregado Fino (arena)

CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
DATO	gr
Peso Muestra Húmeda	500.00
Peso Muestra seca	490.00
Peso Agua	10.00
% de Humedad	2.04

Fuente: Elaboración propia

Procedencia: Cantera del Rio Guadalquivir

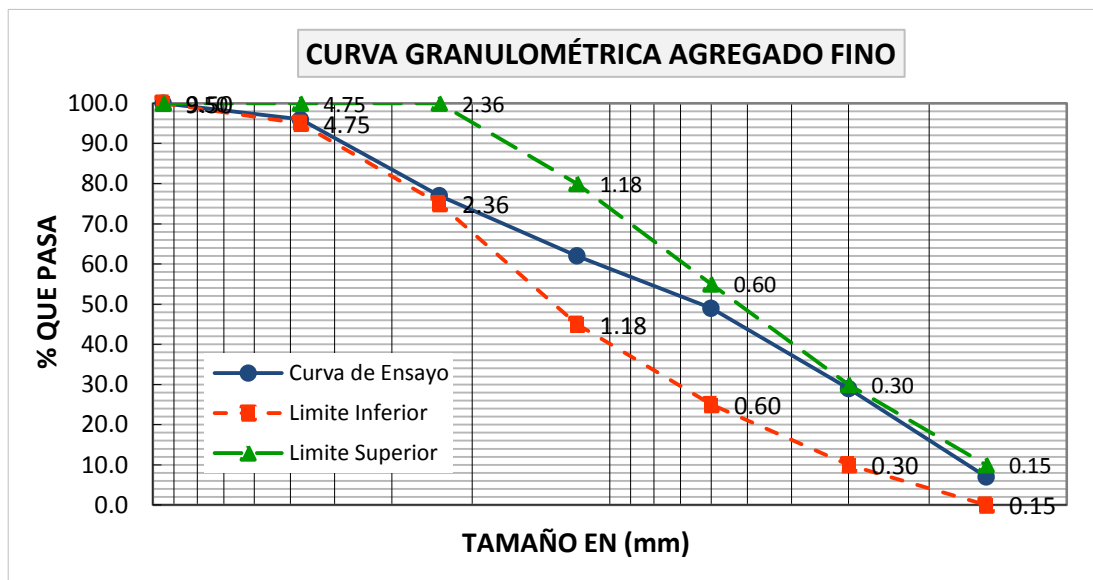
Tabla 3.3. Granulometría del Agregado Fino (arena)

PESO TOTAL (gr.)			500				
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Retenido (gr)	Retenido Acumulado (gr)	% Retenido	% Que pasa del total	Especificación ASTM C-33	
3/8	9.50	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
Nº4	4.75	20.00	20.00	4.00	96.0	95	100
Nº8	2.36	95.00	115.00	23.00	77.0	75	100
Nº16	1.18	75.00	190.00	38.00	62.0	45	80
Nº30	0.60	65.00	255.00	51.00	49.0	25	55
Nº50	0.30	100.00	355.00	71.00	29.0	10	30
Nº100	0.15	110.00	465.00	93.00	7.0	0	10

BASE		34.50	499.50	99.90	0.1	
	SUMA	499.5				
	PÉRDIDAS	0.5				
	MF =	2.80				

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4. Curva granulométrica del Agregado Fino



Fuente: Elaboración propia

3.1.3. Peso específico de la arena

Este ensayo permite determinar el peso específico real y aparente de la arena, como así también la absorción, característica usada para calcular el cambio en la masa de un agregado debido al agua absorbida en los espacios de poro en el interior de las partículas constituyentes considerando que el agregado ha estado en contacto con agua durante un periodo de 24 horas, tiempo suficiente para poder satisfacer la absorción potencial, el ensayo se realizó siguiendo las indicaciones de la norma ASTM C 128 (ver anexos).

Se trabajó con 1 Kg de arena que pasa el Tamiz N°4 como muestra representativa, esta debió estar sumergida en agua durante un periodo de 24 horas para que pueda absorber toda el agua necesaria.

Equipo utilizado:

- ✓ Molde cónico y varilla.
- ✓ Matraz de 500 ml, marca de calibración y precisión de $\pm 0,1$ ml.
- ✓ Balanza de 1 Kg, sensibilidad de 0,1 gr.

1. Se retiró todo el exceso de agua encontrada en la muestra sumergida para luego realizar el secado superficial a través del uso de una secadora.
2. A medida que se iba secando la arena se fue controlando el comportamiento mediante el uso del molde cónico.
3. La arena fue introducida en el cono en un número de 3 capas y 25 golpes cada una, para luego retirar el cono suavemente y verificar si esta ya se encontraba en su condición de saturada superficialmente seca.



Figura 3.5. Control de la superficie de la arena mediante el uso del molde cónico, (Fuente propia).

4. Este procedimiento se repitió hasta que la arena una vez retirado el molde cónico se deslizo suavemente sobre su talud natural.



Figura 3.6. Determinación de la condición saturada superficialmente seca, (Fuente propia).

5. De esta muestra saturada superficialmente seca se separó 500 gr, que luego fue introducida en el matraz de 500 ml, para luego ser llenado con agua hasta la marca de calibración, se debió agitar el matraz con el objetivo de eliminar las burbujas.



Figura 3.7. Determinación de densidad y absorción, (Fuente propia).

6. La muestra se dejó reposar un instante, se obtuvo el peso del matraz y la muestra de arena, luego se vació en un recipiente y se lo llevo al horno para ser secado a una temperatura de 105°C , para luego obtener el peso seco de la muestra.
7. Obtenidos todos estos datos se procedió al cálculo de la siguiente manera.

Resultados obtenidos:

Tabla 3.4. Peso Específico del Agregado Fino (arena)

Muestra N°	Peso Muestra (gr)	Peso de Matraz (gr)	Muestra + Matraz + Agua (gr)	Peso del agua agregado al matraz "W" (gr)	Peso muestra secada "A" (gr)	Volumen del matraz "V" (ml)	Peso Específico a Granel (gr/cm³)	Peso Específico o Saturado con superficie seca (gr/cm³)	Peso Específico o Aparente (gr/cm³)	% DE ABSORCIÓN
1	500	218.4	998.7	280.30	490.00	500.00	2.23	2.28	2.34	2.00
2	500	218.4	990.7	272.30	490.00	500.00	2.15	2.20	2.25	2.00
3	500	218.4	997.8	279.40	490.00	500.00	2.22	2.27	2.33	2.00
PROMEDIO							2.20	2.25	2.30	2.00

Fuente: Elaboración propia

3.1.4. Peso unitario de la arena

El peso unitario consiste en determinar la densidad total como el resultado de dividir la masa de un agregado en estado seco (en un determinado nivel de consolidación o compactación) y el volumen que éste ocupa incluyendo los vacíos de aire entre partículas y los de absorción y se expresa en (kg/m^3). Los resultados obtenidos en este ensayo son necesarios para el proporcionamiento de mezclas de concreto hidráulico y para conversiones masa/volumen en la aceptación de materiales en la obra.

a. Estado suelto

Para la realización del ensayo se utilizaron los siguientes materiales tal cual se especifica en la norma ASTM C 29 (ver anexo).

Equipo utilizado

- ✓ Balanza de capacidad mayor a los 10 Kg y sensibilidad 0.1 g.
- ✓ Recipiente cilíndrico con asas de 1/10 pie cubico.
- ✓ Varilla pisón de 5/8" y 60 cm de longitud.

Antes de realizar el ensayo se debió calibrar el recipiente cilíndrico, y de esta manera determinar la capacidad volumétrica, para esto fue necesario obtener el peso del recipiente con la cantidad de agua necesaria para ser llenado, la capacidad volumétrica del recipiente fue calculado de acuerdo a la relación del peso de la masa de agua contenida en el recipiente sobre la densidad del agua a la temperatura que se encuentra.

La muestra de arena necesaria a ser utilizada se obtuvo mediante cuarteo.

1. Se obtuvo el peso del recipiente vacío, para luego introducir dentro la muestra de arena necesaria excediendo la parte superior del molde.



Figura 3.8. Determinación del peso molde cilíndrico de 1/10 pie cubico, (Fuente propia).

2. Con la varilla de acero se enraso la superficie del molde para desechar el material excedente, por último se debió pesar la muestra de arena suelta necesaria para llenar dicho recipiente.
3. Este procedimiento se realizó 3 veces para obtener un valor promedio.

Tabla 3.5. Peso Unitario Suelto del Agregado Fino (arena)

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	2860.00	2807.72	7370.00	4510.00	1.606
2	2860.00	2807.72	7485.00	4625.00	1.647
3	2860.00	2807.72	7590.00	4730.00	1.685
PROMEDIO					1.646

Fuente: Elaboración propia

b. Estado compacto

De igual manera que en el anterior ensayo peso unitario suelto se utilizó el mismo recipiente, la muestra fue determinada mediante cuarteo.

1. La muestra de arena fue introducida en el molde cilíndrico en una cantidad de tres capas iguales y cada una de ellas apisonadas por la varilla en un número de 25 golpes con el objetivo de eliminar los vacíos.



Figura 3.9. Llenado del molde cilíndrico de 1/10 pie cubico con muestra de arena, (Fuente propia).

2. El material excedente en el cilindro fue enrasado utilizando la varilla, esta muestra de arena compacta conjuntamente con el cilindro fueron pesadas para poder realizar posteriormente los cálculos correspondientes.
3. Este ensayo se realizó en un número de 3 veces para obtener un valor promedio.

Tabla 3.6. Peso Unitario Compacto del Agregado Fino (arena)

MUESTRA Nº	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA COMPACTA (gr)	PESO UNITARIO COMPACTADO (gr/cm3)
1	2860.00	2807.72	7665.00	4805.00	1.711
2	2860.00	2807.72	7780.00	4920.00	1.752

3	2860.00	2807.72	7900.00	5040.00	1.795
PROMEDIO					1.753

Fuente: Elaboración propia

3.2. CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO GRUESO

3.2.1. Descripción de la grava

La grava triturada utilizada para la realización del trabajo de investigación procede de la planta de trituración “Áridos 16 de enero S.R.L” extraídos de la cantera del río Guadalquivir, ubicado a una distancia de 2.5 Km del Colegio La Salle río abajo, (ver ubicación en anexos).

El tamaño de la grava deberá tener buena graduación desde el tamaño máximo especificado, hasta el tamiz N°4 donde deberá quedar retenido el 100 %.

Para garantizar la buena granulometría de la grava esta deberá encontrarse dentro de los siguientes rangos especificados según el Código Boliviano del Hormigón CBH 87.

Tabla 3.7. Especificaciones del agregado grueso según CBH 87

Tamiz N°	% que pasa Mínimo	% que pasa Máximo
2 1/2"	100	100
2"	95	100
1 1/2"	-	-
1"	35	100
3/4"	-	-
1/2"	10	30
3/8"	-	-
N°4	3	5

Fuente: Norma Boliviana del Hormigón CBH-87.¹

¹ Norma Boliviana del Hormigón CBH-87.

El material no deberá contener sustancias que puedan actuar desfavorablemente con los álcalis del cemento en presencia del agua.

3.2.2. Granulometría de la grava

El ensayo de granulometría del agregado grueso se realizó siguiendo las indicaciones que se presentan en la norma ASTM C 136 (ver anexos), con el objetivo de determinar la curva granulométrica y el tamaño máximo.

El tamaño máximo del agregado grueso influye fuertemente en la economía del proyecto; normalmente se precisa mayor cantidad de agua y cemento en agregados gruesos con tamaño máximo menor si es comparado con agregados de tamaño máximo mayor, debido al aumento del área superficial del agregado.

Equipos utilizados

- ✓ Balanza capacidad superior a los 5 Kg y sensibilidad al 0.1 g.
- ✓ Juego de tamices (1", 1/2", 3/4", 3/8", N°4, N°8, N°10, N°16, N°30, N°50, N°100).
- ✓ Brocha, cepillo de cerdas de acero para limpiar los tamices.

La muestra representativa se obtuvo mediante cuarteo, hasta obtener la cantidad necesaria según lo indica la siguiente tabla.

Tabla 3.8. Tamaño de la muestra de ensaye del árido grueso

Tamaño máximo de partículas en pulgadas	Peso mínimo de la muestra en gramos
3/8	1000
1/2	2500
3/4	5000
1	10000
1 ½	15000
2	20000
2 ½	25000
3	30000

3 ½	35000
-----	-------

Fuente: Norma boliviana del Hormigon.²

6. Una cantidad de 5000 gr de grava fue introducido al juego de tamices ordenados de la siguiente manera (1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, base) por tratarse de material grueso.



Figura 3.10. Muestra representativa de Agregado Grueso triturado. (Fuente propia).

7. Se realizó el tamizado de la muestra de forma manual, agitando los tamices por un lapso de 15 min, en movimiento horizontal y vertical.



Figura 3.11. Tamizado de la grava por el juego de tamices. (Fuente Propia).

² Manual Técnico para el Diseño de Carreteras en Bolivia – Hormigones., Volumen 4. Administradora Boliviana de Carreteras., APIA XXI., La Paz, Bolivia.

8. El material retenido en la malla de cada uno de los tamices fue puesto en recipientes pequeños por separado para luego ser pesados, y así de esta manera tener el peso retenido en cada tamiz.

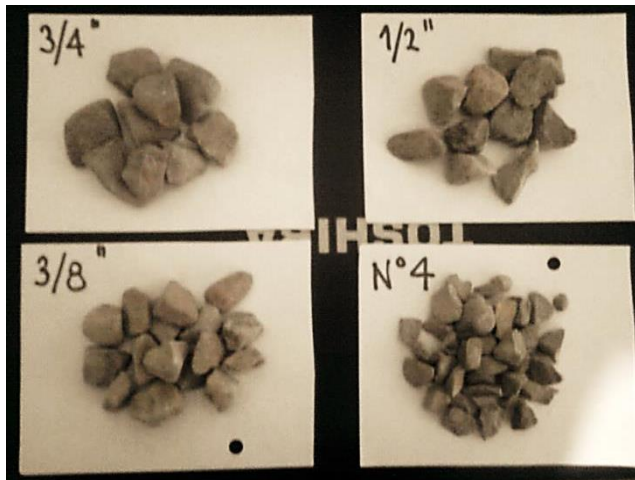


Figura 3.12. Peso retenido en cada tamiz. (Fuente propia).

9. Una vez obtenido el peso retenido en cada malla, se realizó los cálculos para determinar el porcentaje que pasa por cada tamiz y así elaborar la curva granulométrica buscada.
10. Posteriormente se determinó el Tamaño máximo del agregado, este valor será utilizado como dato para realizar el diseño del hormigón.

Resultados obtenidos

Tabla 3.9. Contenido de Humedad (%) del Agregado Grueso (grava)

CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
DATO	gr
Peso Muestra Húmeda	5000.00
Peso Muestra seca	4945.00
Peso Agua	55.00
% de Humedad	1.11

Fuente: Elaboración propia

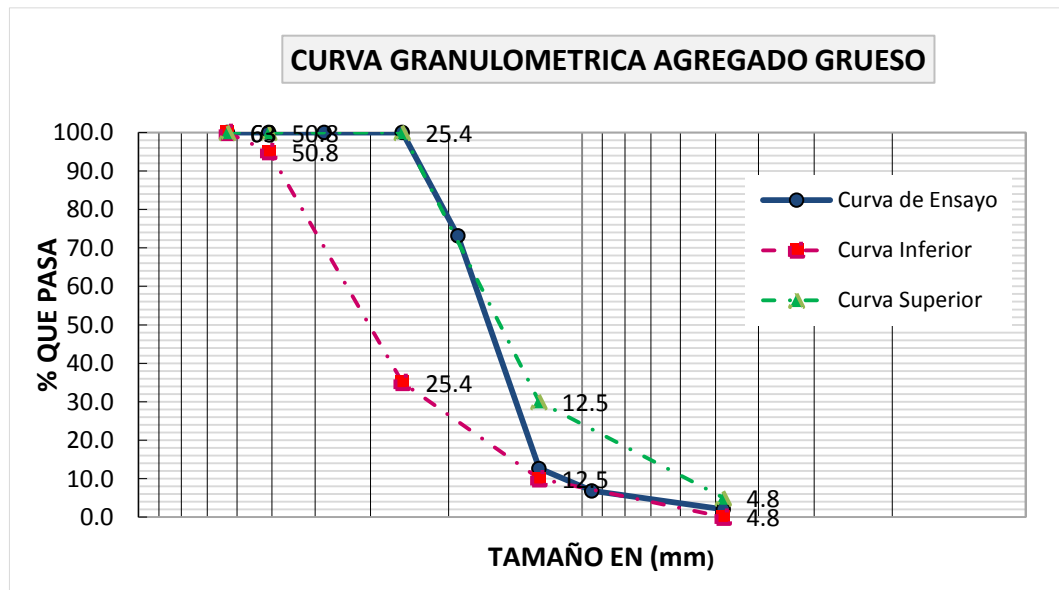
Procedencia: Cantera del rio Guadalquivir., Planta de trituración “Áridos 16 de Enero S.R.L.”

Tabla3.10. Curva Granulométrica del Agregado Grueso (grava)

Peso Total (gr.) =		5000					
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Retenido Acumulado		% Que pasa del total	% Que pasa s/g	
			(gr)	(%)		Especif. ASTM	
2 1/2"	63	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
2	50.8	0.00	0.00	0.00	100.0	95	100
1 1/2	38.10	0.00	0.00	0.00	100.0		
1	25.40	0.00	0.00	0.00	100.0	35	100
3/4	19.05	1345.00	1345.00	26.90	73.1		
1/2	12.50	3022.00	4367.00	87.34	12.7	10	30
3/8	9.50	290.00	4657.00	93.14	6.9		
Nº4	4.80	240.00	4897.00	97.94	2.1	0	5
BASE	0	95.70	4992.70	99.85	0.0		
SUMA =		4992.70					
PÉRDIDAS =		7.30					
MF =		7.18					

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.13. Granulometría del agregado grueso triturado (Grava)



Fuente: Elaboración propia

3.2.3. Peso específico de la grava

El peso específico (densidad relativa) de la grava es la relación de su peso respecto al peso de un volumen absoluto igual de agua (agua desplazada por inmersión), el índice indica cuanto espacio ocuparan las partículas en la mezcla de concreto, y el porcentaje de huecos presentes en el agregado. Además el porcentaje de agua que absorberán las partículas en la mezcla de concreto.

El ensayo se realizó de acuerdo a los pasos indicados en la norma ASTM C 127 (ver anexos).

Equipo utilizado

- ✓ Balanza de capacidad superior a 5 Kg, sensibilidad de 1 g.
- ✓ Horno con temperatura regulable.
- ✓ Canastillo de malla de alambre N°4, diámetro y altura igual a 20 cm, con accesorio de agarre.
- ✓ Recipiente para sumergir la muestra.

1. La muestra de 5 Kg de grava libre de impurezas con la que se realizó el ensayo debió estar sumergida en agua durante 24 hrs.



Figura 3.14. Muestras de grava sumergidas en agua durante 24 hrs. (Fuente propia).

2. La muestra sumergida pasada las 24 hrs fue retirada del recipiente para luego ser secada superficialmente con un paño seco de manera individual, hasta que la película de agua haya desaparecido evitando la evaporación de la muestra. Luego se obtuvo el peso de la muestra saturada superficialmente seca.



Figura 3.15. Muestras de grava saturada superficialmente seca. (Fuente propia).

3. Una vez obtenido el peso de la muestra saturada se lo introdujo en el cesto de malla metálica para luego ser sumergida en el recipiente conectado a la balanza, así de esta manera se pudo obtener el peso de muestra sumergida.



Figura 3.16. Muestra de grava sumergida a una temperatura de 21 °C. (Fuente propia).

4. La muestra sumergida se vació del canastillo y se llevó al horno a una temperatura de 105 °C hasta que la muestra estuvo seca, el material fue pesado y se obtuvo el peso de muestra seca.



Figura 3.17. Muestra de grava secada en horno a una temperatura de 105 °C. (Fuente propia).

5. Este procedimiento se realizó 3 veces para poder obtener u resultado promedio.

Resultados obtenidos

Tabla 3.11. Peso Específico del Agregado Grueso (grava triturada)

Nº	Peso Muestra secada "a" (gr)	Peso Muestra saturada con Sup. seca "b" (gr)	Peso Muestra saturada dentro del agua "c" (gr)	Peso Específico a granel (gr/cm ³)	Peso Específico saturado con Sup. seca (gr/cm ³)	Peso Específico Aparente (gr/cm ³)	% de Absorción
1	4945.00	5015.00	2945.00	2.39	2.42	2.47	1.42
2	4960.00	5025.00	3002.00	2.45	2.48	2.53	1.31
3	4940.00	5010.00	3005.00	2.46	2.50	2.55	1.42
PROMEDIO				2.42	2.45	2.50	1.36

Fuente: Elaboración propia

3.2.4. Peso unitario de la grava

El peso unitario es la relación entre el peso de un material y el volumen ocupado por el mismo, expresado en Kg/m³, hay dos valores para esta relación, dependiendo del sistema de acomodo que se haya dado el material inmediatamente después de la prueba, la denominación que se le da a cada uno de ellos es peso unitario suelto y compacto, el valor del peso unitario compacto se usa para conocer el consumo de agregado por m³ de hormigón.

El ensayo fue realizado según la norma ASTM C 29. (Ver anexos)

Equipo utilizado

- ✓ Balanza de capacidad mayor a los 10 Kg y sensibilidad 0.1 g.
- ✓ Recipiente cilíndrico con asas de 1/2 pie cubico.
- ✓ Varilla pisón de 5/8" y 60 cm de longitud.

➤ Estado suelto

Antes de realizar el ensayo se debió calibrar el recipiente cilíndrico, y de esta manera determinar la capacidad volumétrica, para esto fue necesario obtener el

peso del recipiente con la cantidad de agua necesaria para ser llenado, la capacidad volumétrica del recipiente fue calculado de acuerdo a la relación del peso de la masa de agua contenida en el recipiente sobre la densidad del agua a la temperatura que se encuentra.

La muestra de grava triturada necesaria a ser utilizada se obtuvo mediante cuarteo.

1. Se obtuvo el peso del recipiente vacío, para luego introducir dentro la muestra de grava triturada necesaria excediendo la parte superior del molde.
2. Con la varilla de acero se enraso la superficie del molde para desechar el material excedente, por último se debió pesar la muestra de grava suelta necesaria para llenar dicho recipiente.
3. Este procedimiento se realizó 3 veces para obtener un valor promedio.

Resultados obtenidos

Tabla 3.12. Peso Unitario del Agregado Grueso en estado suelto

MUESTRA Nº	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm ³)
1	8290.00	13346.70	25566.00	17276.00	1.294
2	8290.00	13346.70	25451.00	17161.00	1.286
3	8290.00	13346.70	24798.00	16508.00	1.237
				PROMEDIO	1.272

Fuente: Elaboración propia

➤ Estado compacto

1. De igual manera que en el anterior ensayo peso unitario suelto se utilizó el mismo recipiente, la muestra fue determinada mediante cuarteo.
2. La muestra de grava fue introducida en el molde cilíndrico en una cantidad de tres capas iguales y cada una de ellas apisonadas por la varilla en un número de 25 golpes con el objetivo de eliminar los vacíos.



Figura 3.17. Muestra de grava compactada en molde de $\frac{1}{2}$ pie cubico.

3. El material excedente en el cilindro fue enrasado utilizando la varilla, esta muestra de arena compacta conjuntamente con el cilindro fueron pesadas para poder realizar posteriormente los cálculos correspondientes.
4. Este ensayo se realizó en un número de 3 veces para obtener un valor promedio.

Resultados obtenidos

Tabla 3.12. Peso Unitario del Agregado Grueso en estado compacto

MUESTRA Nº	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm ³)
1	8290.00	13346.70	26640.00	18350.00	1.375
2	8290.00	13346.70	26520.00	18230.00	1.366
3	8290.00	13346.70	25840.00	17550.00	1.315
				PROMEDIO	1.352

Fuente: Elaboración propia

3.3. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

Su función es permitir la hidratación del cemento y hacer manejable la mezcla debe ser limpio y libre de cualquier sustancia perjudicial al pavimento terminado.

En general, se considera adecuada el agua que sea apta para el consumo humano

Características Límite para el agua en hormigón:

- $\text{pH} \geq 5$
- Sustancias disueltas $\leq 15 \text{ g/l}$
- Contenido de sulfatos (SO_4) $\leq 1 \text{ g/l}$
- Sustancias orgánicas solubles en éter $\leq 15 \text{ g/l}$
- Contenido de ion cloro $\leq 6 \text{ g/l}$
- Hidratos de carbono (azúcares) 0

En nuestro caso el agua con la que se trabajó tanto para la preparación del hormigón y para el proceso de curado es agua potable de grifo que cuenta con las siguientes características:

- $\text{PH} \geq 5$
- Material soluble 15 gr/lit.
- Material en suspensión 5gr. /lit.

3.4. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO

3.4.1. Definición del cemento a utilizar

Los cementos portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos hidráulicos de calcio, corresponden a la CLASE I – ASTM.

Debido a cada uno de los compuestos principales del cemento como son el Silicato tricálcico (C_3S), Silicato dicálcico (C_2S), Aluminato tricálcico (C_3A) y el Ferro aluminato tricálcico (C_4AF), y las funciones que desempeñan, en este trabajo de investigación se empleó dos tipos diferentes de cemento, por un lado la elaboración de muestras de ensayo con Cemento Portland “El Puente IP 30” y por otro lado la elaboración de muestras con Cemento Portland “Fancesa IP 40”.

Características específicas de los cementos portland utilizadas.

Cemento Portland IP 30 “El Puente”

- ✓ **Designación:** Cemento Portland con Puzolana.
- ✓ **Tipo IP:** Componentes molienda conjunta de Clinker, yeso y puzolana.
Categoría 30, Resistencia mín. 30 MPa. 28 días en mortero normalizado.

- ✓ **Propiedades:** Sus propiedades principales son: desprende menor calor de hidratación, lo que reduce la retracción térmica debido a la inclusión de puzolana, mayor trabajabilidad.
- ✓ **Usos y Aplicaciones:** Es utilizado en construcciones de hormigón armado y elementos estructurales de resistencia media.
- ✓ **Características:** Resistencia media mecánica, moderado calor de hidratación, menor fisuración y retracción química, mejor trabajabilidad.
- ✓ **Presentación:** Bolsas de 50 kg.



Figura 3.18. Muestra de Cemento Portland IP 30 “El Puente” (Fuente Propia).

Cemento Portland IP 40 “Fancesa”³

- ✓ **Designación:** Cemento Portland con Puzolana.
- ✓ **Tipo IP:** Componentes Portland mínimo 70%, puzolana máximo 30%. Categoría 40, Resistencia mín. 40 MPa. 28 días en mortero normalizado.
- ✓ **Propiedades:** Sus propiedades principales son: resistencia mecánica alta, endurecimiento rápido, baja retracción, moderado calor de hidratación y mayor impermeabilidad.
- ✓ **Usos y Aplicaciones:** Es utilizado en construcciones de hormigón armado y pretensado, prefabricados, elementos estructurales de alta resistencia, hormigones en masa, hormigones en ambientes agresivos, obras hidráulicas y en general todo tipo de construcciones.
- ✓ **Características:** Alta resistencia mecánica, moderado calor de hidratación, menor fisuración y retracción química, mejor trabajabilidad, mayor

³ FANCESA - Fábrica Nacional de Cemento S.A., Disponible en: www.fancesa.com.

resistencia a ataques químicos, mayor impermeabilidad, mayor durabilidad.

✓ **Presentación:** Bolsas de 50 kg.



Figura 3.19. Muestra de Cemento Portland IP 40 “Fancesa” (Fuente Propia).

3.4.2. Peso específico del cemento

El peso específico del cemento es definido como el peso de cemento por unidad de volumen de los sólidos o partículas, excluyéndose el aire entre las partículas. La masa específica se presenta en kilogramos por metro cubico, el peso específico del cemento no es una indicación de la calidad del cemento, su principal uso es en los cálculos de las proporciones de las mezclas.

El ensayo fue realizado según las indicaciones de la norma ASTM C 188.

Equipo utilizado

- ✓ Matraz de vidrio, resistente a la rotura y cambios de temperatura, sensibilidad de 0.1 ml.
- ✓ Muestra de nafta.
- ✓ Termómetro.
- ✓ Balanza con sensibilidad del 1mg.

1. Se llenó el matraz hasta la medida de 300 ml con muestra de nafta, luego se llevó el matraz a baño maría hasta que este se encuentre a temperatura ambiente y constante para luego leer la graduación del matraz.



Figura 3.18. Muestra de nafta en el matraz a temperatura constante. (Fuente propia).

2. La muestra de cemento (IP 30, IP 40) necesaria para realizar el ensayo fue de 64 gr, esta muestra se vertió en el matraz evitando que el cemento salpique en las paredes del mismo.



Figura 3.19. Muestra de cemento “El Puente” IP-30 en el matraz con nafta. (Fuente propia).

3. Se eliminó el aire haciendo rodar el matraz en posición inclinada tapando la parte superior del matraz, para luego colocarlo en la fuente a baño maría a temperatura constante nuevamente, se leyó por último la variación de volumen en el matraz.

Tabla 3.14. Peso específico del cemento IP 30 e IP 40

Ensayo N°	Tipo de cemento	Peso de la muestra (gr)	Vol. inicial (ml)	Temp. inicial (°C)	Vol. final (ml)	Temp final (°C)	Peso Especif. (gr/cm ³)
1	“El Puente” IP 30	64	300	24	320.4	23.5	3.137
2	“Fancesa” IP 40	64	300	25	321.25	24	3.011

Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Finura del cemento

La distribución total del tamaño de las partículas del cemento se llama “finura”. La finura del cemento afecta el calor liberado y la velocidad de hidratación. La mayor finura del cemento (partículas menores) aumenta la velocidad o tasa de hidratación del cemento y, por lo tanto, acelera el desarrollo de la resistencia. Los efectos de la mayor finura sobre la resistencia de las pastas se manifiestan, principalmente, durante los primeros siete días.⁴

La relación que se utiliza para determinar el porcentaje de finura es la siguiente:

- ✓ SI el %F es menor al 5%, significa que este es un cemento Portland de endurecimiento rápido
- ✓ Si el %F es menor que el 10% es que es un cemento Portland para uso ordinario.

Equipo utilizado

- ✓ Tamiz N°200.
 - ✓ Balanza, sensibilidad al 0.05 gr.
 - ✓ Brocha
1. Se trabajó con una muestra de 50 gr de cemento (IP 30, IP 40) la que fue introducida al Tamiz N°40 y N°200 con tapa y base, para luego agitar vertical y horizontalmente durante 15 min aproximadamente.

⁴ Steven H. Kosmatka., Diseño y Control de mezclas de Concreto., Portland Cement Association., Boletín de Ingeniería EB 201., Illinois, EE. UU. 2003.

2. El material retenido en el tamiz N°40 se pesó al igual que el material retenido en el tamiz N°200, con estos valores se procedió a realizar los cálculos.
3. El ensayo se realizó 3 veces para obtener un valor promedio.



Figura 3.20. Muestra de cemento retenido en malla del Tamiz N°200 (Fuente propia)

Tabla 3.15. Módulo de Finura del cemento IP 30 e IP 40

TIPO DE CEMENTO	N°	PESO DE LA MUESTRA (gr)	PESO RET. TAMIZ N°40 (gr)	PESO RET. TAMIZ N°200 (gr)	PESO RET. BASE (gr)	MODULO DE FINURA (%)	PROMEDIO DE LA FINURA DEL CEMENTO (F)
“El Puente” IP 30	1	50	1.1	6.6	42.3	15.4	16.4 %
	2	50	1.6	6.3	42.1	15.8	
	3	50	1.8	7.2	41.0	18.0	
“Fancesa” IP 40	1	50	0.6	8.7	40.8	18.6	18.87 %
	2	50	0.5	9.5	40.0	20.0	
	3	50	0.5	8.5	41.0	18.0	

Fuente: Elaboración propia.

3.5. ADITIVOS EMPLEADOS

Debido a que el objetivo del trabajo de investigación fue el de analizar la influencia de los aditivos en una de las características del hormigón en estado fresco como es la trabajabilidad, y estado endurecido la resistencia a compresión y flexión de las muestras elaboradas, los aditivos utilizados fueron plastificantes, superplastificantes, reductores de agua, e incorporadores de aire, estos aditivos demostraron eficacia a la hora de dispersar las partículas de cemento en mezcla, reducir la cantidad de agua de mezcla y controlar la reología de mezclas con relaciones agua/cementantes muy bajas durante la primera hora posterior al contacto del agua con el cemento.

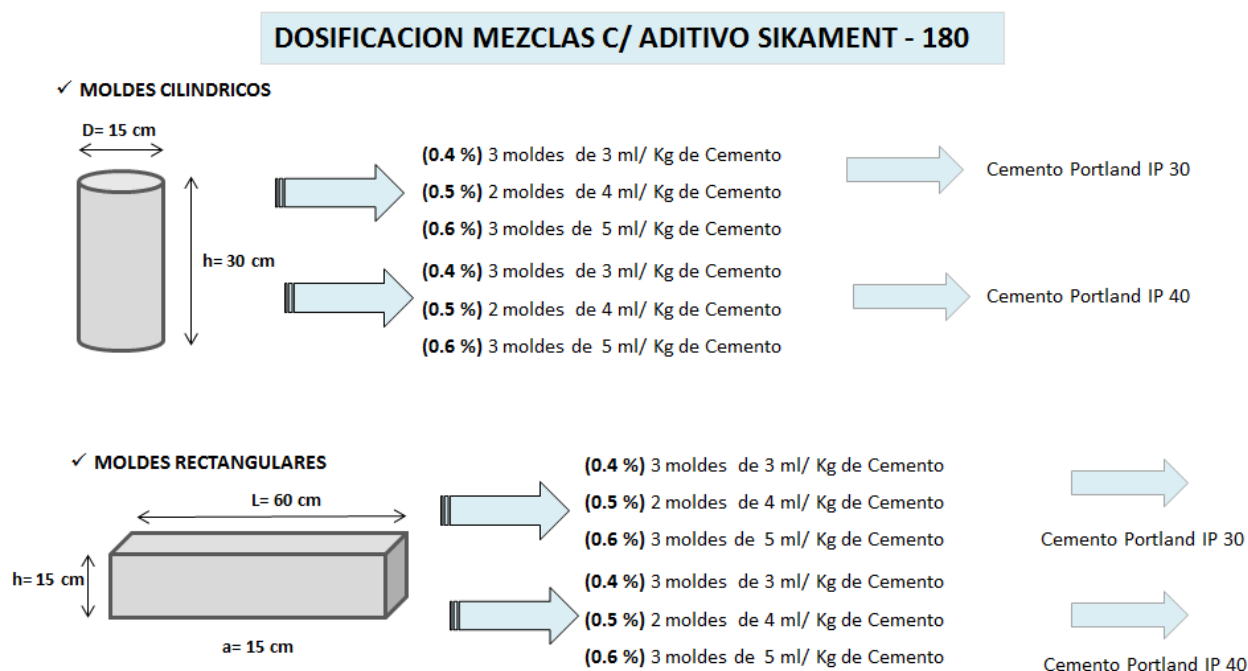
Los aditivos utilizados en la elaboración de los ensayos fueron los siguientes:

- ✓ **Sika Aer:** Aditivo líquido inclusor de aire y plastificante para concreto. Incorpora una cantidad controlada de aire en el concreto a fin de mejorar sus propiedades y ofrece mejor trabajabilidad en las mezclas. Cumple con la norma ASTM C 260.
- ✓ **Sikament – 180:** Aditivo líquido, reductor de agua de rango medio, plastificante y retardante de fraguado para concreto. No contiene cloruros. Cumple con la norma ASTM C 494 Tipo A y D (en función de la dosificación) y ASTM C 1017 Tipo II.
- ✓ **Sikament – 320:** Es un aditivo líquido, color ámbar, compuesto por resinas sintéticas. Superplastificante, reductor de agua de alto poder y economizador de cemento. Duplica en cualquier clima el tiempo de manejabilidad de la mezcla. No contiene cloruros. cumple normas ASTM C-494, ASTM C-1017 e Icontec 1299 como aditivo Tipo G.

3.4.4. Dosificación

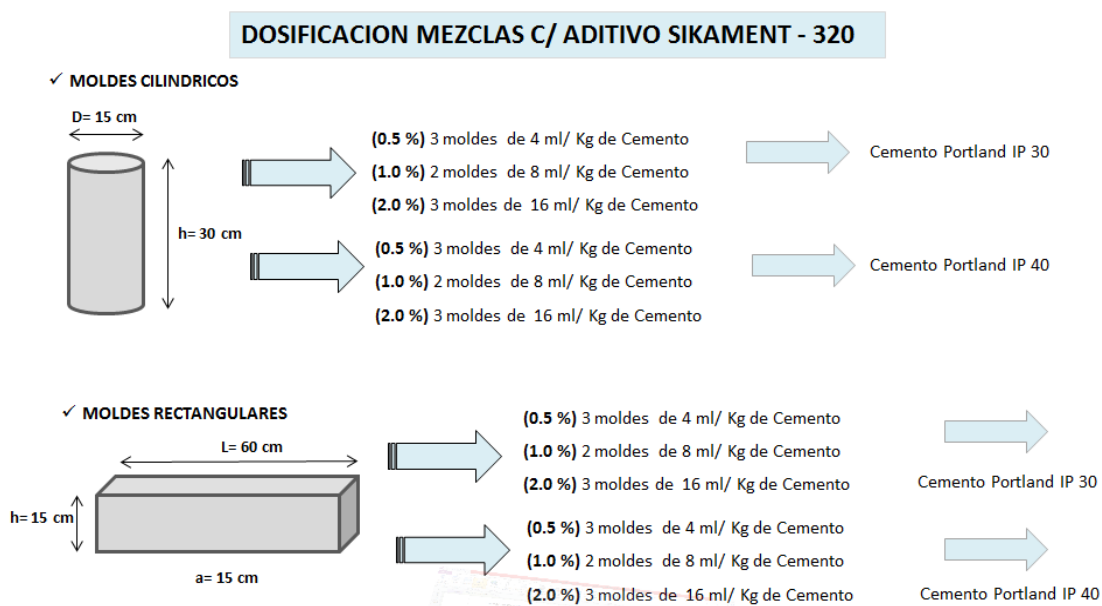
La dosificación de aditivos empleada en la elaboración de muestras de Hormigon se realizó de la siguiente manera:

Figura 3.21. Dosificación de aditivos para las mezclas de hormigón con aditivo Sikament-180



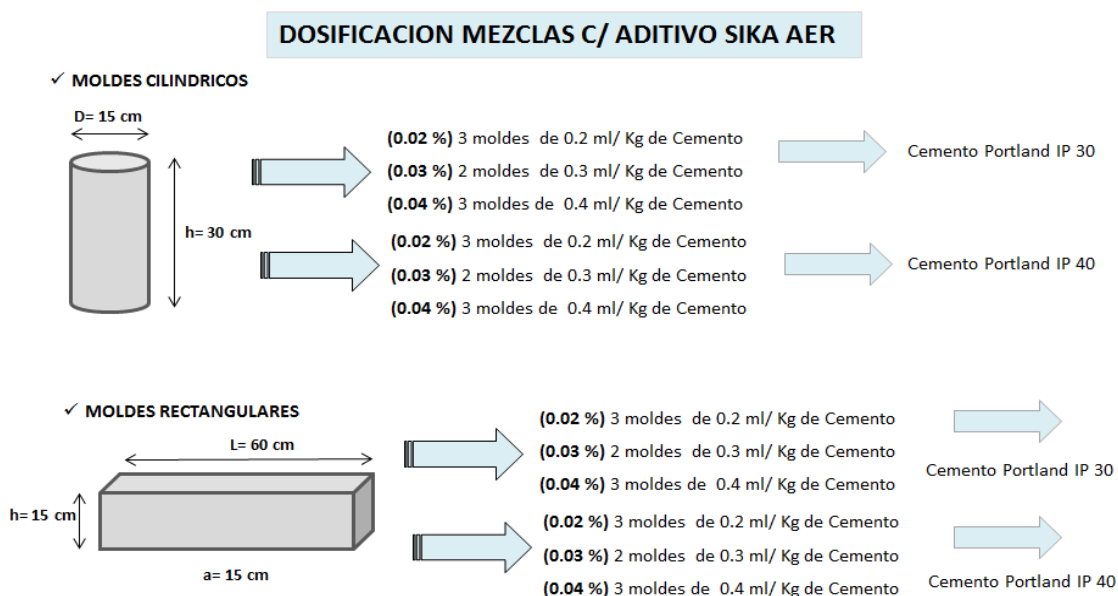
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.22. Dosificación de aditivos para las mezclas de hormigón con aditivo Sikament-320



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.23. Dosificación de aditivos para las mezclas de hormigón con aditivo Sika Aer



Fuente: Elaboración propia

3.5. PREPARACIÓN DEL HORMIGÓN PARA PAVIMENTO

3.5.1. Definición

El mejor enfoque para la selección de las proporciones del hormigón para pavimentos rígidos consiste en la realización de mezclas de pruebas. Para la obtención de alta resistencia, es necesario el uso de baja relación agua/material cementante y alto contenido de cemento, y para una mejor trabajabilidad la adición de aditivos, la resistencia unitaria obtenida por cada unidad de cemento usada en un metro cúbico de hormigón se puede graficar como la eficiencia de la resistencia, para ayudar en el diseño de la mezcla.

Uno de los objetivos de la dosificación es la obtención de un producto que se comportará según algunos requisitos predeterminados, siendo los más importantes, en general, la trabajabilidad del hormigón fresco, la resistencia alcanzada por el hormigón endurecido a una edad determinada y la durabilidad de este hormigón.

3.5.2. Dosificación del hormigón

Se procedió al diseño de la mezcla calculando las cantidades que debe haber de todos y cada uno de los elementos que intervienen en la mezcla de concreto, buscando obtener el comportamiento deseado, tanto durante su estado plástico como después de endurecido en los aspectos de resistencia y durabilidad.

La dosificación del hormigón para la fabricación de mezclas de ensayos fue fundamentada en una dosificación volumétrica, para probetas cilíndricas y probetas rectangulares.

El método utilizado para realizar el cálculo de la dosificación fue en base a las indicaciones del Método ACI 211.1.

Calculo de la dosificación:

El documento ACI 211.1 resume el procedimiento de diseño de mezclas de concreto, en 9 pasos que son:

1. Elección del revenimiento, tal como se identificó en el diseño metodológico del trabajo de investigación la elección del revenimiento o asentamiento estuvo en función de la función que se le iba a dar a la mezcla, por tratarse de mezclas para la elaboración de losas para pavimentos rígidos se buscó trabajar con mezclas secas, buscando un asentamiento no mayor a 2 pulgadas.
2. Elección del tamaño máximo de agregado, la elección del tamaño máximo estuvo en función de la granulometría del agregado grueso y el factor económico resultante para la mezcla, por lo tanto el tamaño máximo considerado para la mezcla fue de 1 pulgada.
3. Cálculo del agua de mezclado, tomando en cuenta que la cantidad de agua requerida para producir el revenimiento buscado es dependiente del tamaño máximo del agregado, forma de las partículas, de su granulometría, de acuerdo a la tabla 11.7 de la norma ACI 211.1 (ver anexo) el volumen estimado fue de 183 lt/m³.

4. Selección de la relación agua- cemento, para el valor de la relación agua/cemento se tomó en cuenta como variable la resistencia a compresión establecida en el estudio, tabla 11.13 (ver anexos).
5. Cálculo del contenido de cemento, el contenido de cemento fue resultado de la división de la cantidad de agua requerida entre la relación agua/cemento.
6. Estimación del contenido de agregado grueso, se utilizó como variables las características del agregado grueso para realizar los cálculos respectivos, ver tabla 3.14.
7. Estimación del contenido de agregado fino, el cálculo se realizó utilizando una hoja de cálculo, tomando en cuenta las variables indicadas en la tabla 3.14.
8. Ajuste por humedad del agregado, se utilizó la hoja de cálculo.
9. Selección de proporciones de la mezcla optima de laboratorio.

Antes de determinar las proporciones de la mezcla, se seleccionaron las características considerando el uso que se propuso dar al concreto, las condiciones de exposición, el tamaño y forma de los elementos y las propiedades físicas del concreto (tales como la resistencia mecánica) requeridas para el tipo de estructura a ser utilizada. Es importante mencionar que los cálculos han sido desarrollados utilizando una hoja de cálculo, (ver anexo diseño de mezcla).

Tabla 3.16. Características de los agregados componentes para la elaboración de la mezcla.

ENSAYO	Unidad	Valor
1.- Modulo de finura de la arena (MF)	s/u	2.80
2.- Peso unitario Compactado de la grava (PUC)	kg/m ³	1352
3.- Peso específico de la arena (γ_f)	gr/cm ³	2.30
4.- Peso específico de la grava (γ_g)	gr/cm ³	2.50
5.- Absorción de la arena (Aa)	%	2.00
6.- Absorción de la Grava (Ag)	%	1.4
7.- Humedad de la Arena (Ha)	%	2.04

8.- Humedad de la Grava (Hg)	%	1.11
9.- Tamaño máximo Nominal (TMN)	plg	1"
10.- Tamaño Máximo (TM)	plg	1"
11.- Peso específico del cemento IP 30	gr/cm ³	3.14
12.- Peso específico del cemento IP 40	gr/cm ³	3.01
13.- Contenido de aire	lts	20.44

Tabla 3.17. Características de diseño para la elaboración de la mezcla

Resistencia de diseño (fck´)	350	kg/cm ²
Resistencia Característica (fck) (Tabla 11.12)*	435	kg/cm ²
Asentamiento (S) (Tabla 11.4)*	2	plg
Relación Agua / Cemento (a/c) (Tabla 11.13)*	0.4	s/u

Fuente: hoja de cálculo Excel. (Ver anexos)

DATOS DE TABLAS

Vol. Agr. Grueso / Vol. unitario concreto (b/bo) (Tabla 11.15)*	0.67	s/u
Requerimiento de Agua (A) (Tabla 11.7) *	183	kg/m ³

* Ver tablas en anexos.

Fuente: hoja de cálculo Excel. (Ver anexos)

Dosificación final con áridos húmedos:

✓ Cemento Portland IP 30

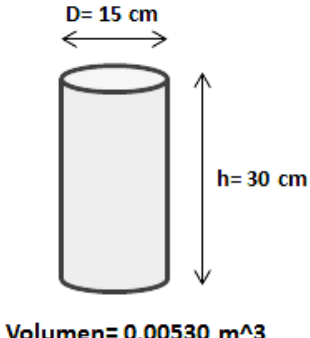
Tabla 3.18. Dosificación por m³ con áridos húmedos

PESOS HUMEDOS DE LOS INGREDIENTES POR (m ³) DE HORMIGON	
Ingrediente	Peso Húmedo kg/m ³
<i>Cemento</i>	457.50
<i>Agua</i>	184.98
<i>Grava</i>	915.84

<i>Arena</i>	727.64
---------------------	--------

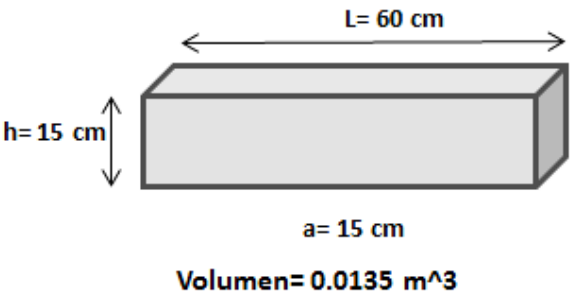
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.19. Dosificación aconsejada para moldes cilindricos

PESOS HUMEDOS DE LOS INGREDIENTES PARA MOLDES CILÍNDRICOS		
 Volumen= 0.00530 m³	Ingrediente	Peso Húmedo
	<i>Cemento (Kg)</i>	2.43
	<i>Agua (Lt)</i>	0.98
	<i>Grava (Kg)</i>	4.86
	<i>Arena (Kg)</i>	3.86

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.20. Dosificación aconsejada para moldes rectangulares

PESOS HUMEDOS DE LOS INGREDIENTES PARA MOLDES RECTANGULARES		
 Volumen= 0.0135 m³	Ingrediente	Peso Húmedo
	<i>Cemento (Kg)</i>	6.18
	<i>Agua (Lt)</i>	2.50
	<i>Grava (Kg)</i>	12.36
	<i>Arena (Kg)</i>	9.82

Fuente: Elaboración propia

✓ **Cemento Portland IP 40**

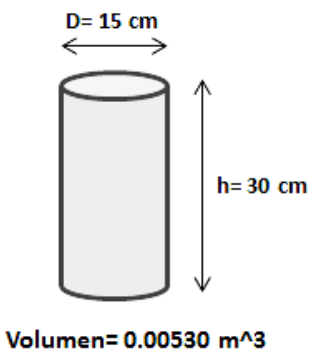
Tabla 3.19. Dosificación por m³ con áridos húmedos

PESOS HUMEDOS DE LOS INGREDIENTES POR (m³) DE HORMIGON	
Ingrediente	Peso Húmedo kg/m³

Cemento	457.50
Agua	184.99
Grava	915.84
Arena	712.84

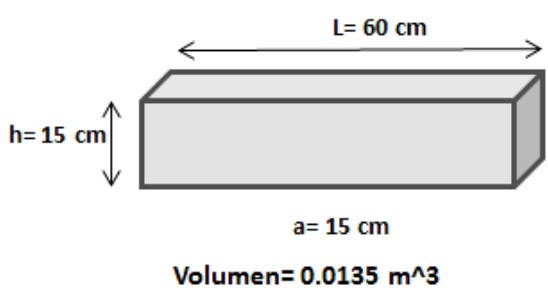
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.20. Dosificación aconsejada para moldes cilíndricos

PESOS HUMEDOS DE LOS INGREDIENTES PARA MOLDES CILÍNDRICOS		
 Volumen= 0.00530 m³	Ingrediente	Peso Húmedo
	Cemento (Kg)	2.43
	Agua (Lt)	0.98
	Grava (Kg)	4.86
	Arena (Kg)	3.78

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.21. Dosificación aconsejada para moldes rectangulares

PESOS HUMEDOS DE LOS INGREDIENTES PARA MOLDES RECTANGULARES		
 Volumen= 0.0135 m³	Ingrediente	Peso Húmedo
	Cemento (Kg)	6.18
	Agua (Lt)	2.50
	Grava (Kg)	12.36
	Arena (Kg)	9.62

Fuente: Elaboración propia

3.5.3. Elaboración de las muestras de hormigón en moldes cilíndricos y prismáticos.

Para la realización del vaciado de los moldes cilíndricos y rectangulares con hormigón se tomó en cuenta las indicaciones presentadas en la norma ASTM 192.

1. La mezcla de los agregados pétreos, cemento y aditivos fue realizado mediante el uso de una mezcladora mecánica.
2. Dentro de la mezcladora se introdujo la arena y luego el cemento, cuando esta tomaba la forma homogénea se agregó la grava, a medida que se iba presentando de manera uniforme se agregó el agua y en la última porción de agua se agregó el aditivo.



Figura 3.21. Incorporación del agregado grueso a la mezcladora mecánica de paletas verticales.
(Fuente propia).

3. Se mezcló durante 3 min todos los agregados y el aditivo hasta que tenía la apariencia de ofrecer el asentamiento que se estaba buscando, se dejó reposar durante 2 min, para luego mezclar nuevamente durante 3 min.



Figura 3.21. Muestra de los tres aditivos utilizados en el diseño de las mezclas. (Fuente propia).

4. Se realiza el vaciado de la mezcla en una superficie lisa para luego realizar el ensayo de consistencia, y finalmente el llenado de los moldes cilindricos y rectangulares. Estos ensayos se detallan a continuación:



Figura 3.22. Vaciado de la mezcla de hormigón en superficie plana. (Fuente propia).

a. Toma de muestras del hormigón fresco

➤ Ensayos de consistencia

Este es uno de los ensayos característicos en la elaboración del trabajo de investigación, se realizó con el objetivo de determinar la docilidad del hormigón en estado fresco influenciado por la adición de diferentes porcentajes de los aditivos Sika Aer, Sikament – 180 y Sikament – 320.

✓ Cono de Abrams.-

El ensayo del cono de Abrams se realizó de acuerdo a las indicaciones planteadas en la norma ASTM C 143.

1. La muestra para la realización del ensayo fue extraída de la mezcla realizada anteriormente, para poder empezar el ensayo el molde troncocónico de Abrams como la plancha de apoyo debieron estar limpios y húmedos.
2. El Cono de Abrams fue ajustado a la plancha para luego ser llenado en un número de tres capas y cada capa apisonada 25 veces utilizando la varilla de metal.



Figura 3.23. Llenado del Cono de Abrams por capas y apisonado de la capa. (Fuente propia).

3. Se enraso la superficie del cono en la última capa apisonada y se limpió los costados que presentaban derrame de mezcla.



Figura 3.24. Enrase de la parte superior del cono y retiro de exceso de mezcla. (Fuente propia).

4. La lectura del asentamiento se realizó desajustando el cono de la plancha y levantándolo de forma vertical lo más rápido posible, posteriormente se invirtió el cono y con el flexometro se midió la disminución de altura desde el centro superior de la mezcla hasta el nivel del cono invertido.



Figura 3.25. Lectura de asentamiento en mezcla con incorporación de aditivo en un 2%. (Fuente propia).

5. El ensayo se realizó 5 veces por porcentaje de adición de cada uno de los aditivos, es decir, se observó y registro el asentamiento en diferentes tiempos, a los 5, 10, 15, 30 y 60 min luego de haber finalizado la mezcla.



Figura 3.26. Variación del asentamiento en función del tiempo en mezcla con aditivo Sikament 320 a un 2%. (Fuente propia).

6. Una vez registrado el asentamiento se procedió al llenado de los moldes tomando en cuenta que la mezcla que se utilizó para el ensayo del cono fue descartada.
7. Para el llenado de los moldes estos estuvieron previamente engrasados, así de esta manera se evitó que la mezcla se adhiriera a las paredes de los moldes.



Figura 3.27. Moldes cilindricos y rectangulares engrasados (Fuente propia).

8. El llenado de los moldes cilindricos se lo realizo en un número de tres capas, y para los moldes rectangulares en un número de 2 capas, tomando en cuenta que la última capa debía contener la cantidad necesaria para llenar el molde.
9. Cada capa introducida en el molde fue compactada mediante el apisonado 25 veces utilizando la varilla de acero, y con el mazo de goma se dieron pequeños golpes a los costados del molde para una mejor distribución de la mezcla.



Figura 3.28. Eliminación de vacíos en las esquinas y acomodo de la mezcla en el molde, uso del mazo de goma. (Fuente propia).

10. Durante el llenado de los moldes se fue procurando que la mezcla no se segregue y por tal motivo se fue mezclando de momento a otro, finalizando el llenado de los moldes se procedió a enrasar hasta el borde del molde dejando la superficie de la mezcla lo más plana y pareja al nivel.



Figura 3.29. Acabado de la superficie de las mezclas en los moldes. (Fuente propia).

✓ Curado de los moldes con mezclas de hormigón

El objetivo principal de la realización de este ensayo es el de conocer posteriormente y verificar la calidad de los materiales componentes y su correcta dosificación. El ensayo fue realizado tomando en cuenta las recomendaciones y las indicaciones establecidas en la norma ASTM 192.

1. Las mezclas de hormigón debieron estar en los moldes por un lapso de 24 horas en un lugar seguro y libre de vibraciones.



Figura 3.30. Almacenamiento de las muestras en lugar seco y seguro. (Fuente propia).

2. Finalizado este tiempo se retiró de los moldes para luego sumergirlas en agua a temperatura ambiente, libre de materiales extraños e impurezas.



Figura 3.31. Curado de las probetas de hormigón. (Fuente propia).

3. Las muestras de acuerdo a lo planteado en el trabajo de investigación debieron estar sumergidas en agua durante un periodo de tiempo de 28 días, para luego realizar la evaluación de resistencia tanto a compresión como a flexión.

3.5.4. Evaluación de las propiedades mecánicas del hormigón endurecido para las probetas cilíndricas y prismáticas.

Es necesario aclarar que debido al estudio del trabajo de investigación el parámetro para evaluar las propiedades mecánicas de las probetas se tratara solamente con la resistencia a compresión para las probetas cilíndricas y la

resistencia a flexión para las probetas prismáticas, cada una realizada de acuerdo a la norma ASTM C 39 para compresión y ASTM c 78 para flexión.

1. Las probetas cilíndricas como prismáticas estuvieron sumergidas en agua durante un periodo de tiempo igual a 28 días.
2. Finalizado el tiempo de curado de las probetas se procedió a retirarlas de la piscina para luego ser ensayadas, cada una respectivamente en su máquina de ensayo, el ensayo fue realizado en el laboratorio de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”, ya que cuenta con la maquina respectiva e indicada para realizar este tipo de ensayos.
3. Para las probetas cilíndricas y prismáticas antes de ser ensayadas se debió extraer datos de altura, diámetro y peso de la probeta, para luego estos valores ser introducidos en la máquina de ensayo.



Figura 3.32. Introducción de datos en máquina de ensayo para vigas. (Fuente propia).

4. En el caso de las probetas prismáticas, se debió marcar las distancias a las que fueron apoyadas las cargas de acuerdo al tipo de peso aplicado en la probeta (en este caso fue P/2 aplicado en el tercio central), también se debió medir el ancho, altura y peso de la muestra prismática.



Figura 3.33. Marcado de distancias en probetas prismáticas. (Fuente propia).

5. Una vez terminada la extracción de datos para cada una de las muestras prismáticas como cilíndricas se procedió a realizar la rotura de cada una de ellas respectivamente, tomando en cuenta que la cara de apoyo de cada uno de los moldes debió estar liso, y ubicado al centro de la placa de la máquina de ensayo, poniendo en situaciones un pequeño disco y por encima de este una lámina de goma para un mejor contacto.



Figura 3.34. Colocación y ruptura de las muestras prismáticas en la máquina de ensayo. (Fuente propia).

6. Al finalizar el ensayo se anotó como resultados la carga (P) que soporta cada muestra, con este dato se pudo calcular el valor de la resistencia utilizando las formulas respectivas para cada tipo de resistencia establecidas en la norma (ver anexo).

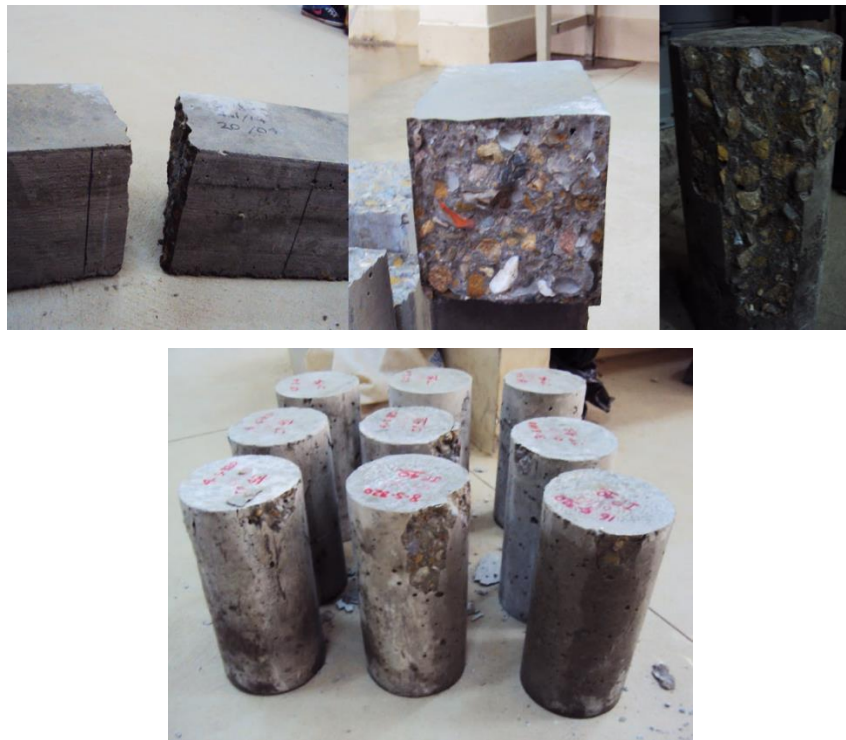


Figura 3.35. Muestra de probeta prismática y cilíndrica fallada por efecto de carga aplicada. (Fuente propia).

CAPITULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente capítulo, contiene los resultados de las pruebas realizadas a las mezclas de hormigón con y sin incorporación de cada uno de los tres aditivos y dos clases de cemento, es decir, resultados de pruebas de hormigón en estado fresco y endurecido.

En estado fresco se definen los resultados de asentamiento o revenimiento en función del tiempo antes de que empiece el fraguado inicial, y peso volumétrico, parámetros que son necesarios para poder determinar el comportamiento del hormigón con y sin incorporación de tres clases de aditivos y dos tipos de cemento en cuanto a la propiedad principal a analizar que es la trabajabilidad y de esta manera revisar el cumplimiento de ciertos requisitos establecidos en el Método ACI 211.1.

En estado endurecido se muestran los resultados de las pruebas de resistencia a compresión realizadas en probetas cilíndricas y resistencia a flexión realizadas en probetas prismáticas a la edad de 28 días, resultados que determinaran el comportamiento del hormigón en cuanto a las propiedades mecánicas hacia las que está orientado el trabajo de investigación.

Por último, en este capítulo se expresa la correlación que se ha obtenido de la investigación, a partir de estas se puede apreciar el efecto que tiene los parámetros fijos sobre los variables, que se muestra a continuación.

4.1. RESULTADOS OBTENIDOS HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO

4.1.1. Trabajabilidad de las mezclas sin aditivo y diferentes tipos de cemento

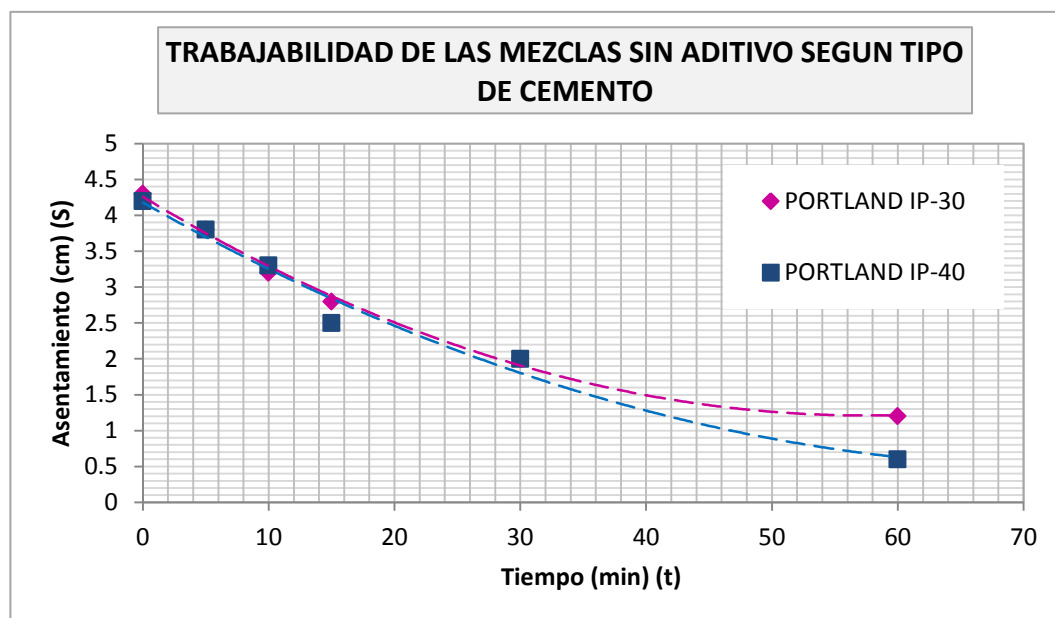
Tabla 4.1. Asentamientos de mezclas de hormigón con Cemento Portland IP 30 e IP 40 sin aditivos.

ASENTAMIENTOS (cm)		
TIEMPO	TIPO DE CEMENTO	
(min)	PORTLAND IP-30	PORTLAND IP-40

0	4.3	4.2
5	3.8	3.8
10	3.2	3.3
15	2.8	2.5
30	2	2
60	1.2	0.6

Fuente: Elaboración propia

Grafica 4.1. Trabajabilidad de las mezclas sin aditivo y dos clases de cemento



CEMENTO PORTLAND IP-30	$S=0.0009(D^2)-0.106(D)+4.2584$ ($R^2=0.9959$)
CEMENTO PORTLAND IP-40	$S=0.0007(D^2)-0.0992(D)+4.1771$ ($R^2=0.9808$)

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos al medir el parámetro de asentamiento a través del uso del Cono de Abrams según la norma ASTM C-143 representados en la tabla 4.1, fueron los esperados, ya que los valores de las mezclas sin aditivo se encuentran dentro del rango (2 – 5 cm) propuesto en el trabajo de investigación tomando en cuenta las condiciones de obra a la que iba a ser destinada el hormigón establecidos de acuerdo

a la tabla 11.4 del método ACI 211.1, mediante estos valores se ha determinado que cada mezcla con cada tipo de cemento posee una consistencia seca, observando que pasado los 45 min aproximadamente las mezclas pierden trabajabilidad, en cuanto q las mezclas elaboradas con cemento portland IP 40 esta trabajabilidad no supera los 45 minutos, pasado este intervalo de tiempo la mezcla se presentaba parcialmente seca en un 50 % en comparación a la mezcla elaborada con cemento portland IP 30, observando así también, que la influencia del módulo de finura y el grado de hidratación del cemento inciden considerablemente en la trabajabilidad de las mezclas.

4.1.2. Trabajabilidad de las mezclas con aditivo y diferentes tipos de cemento

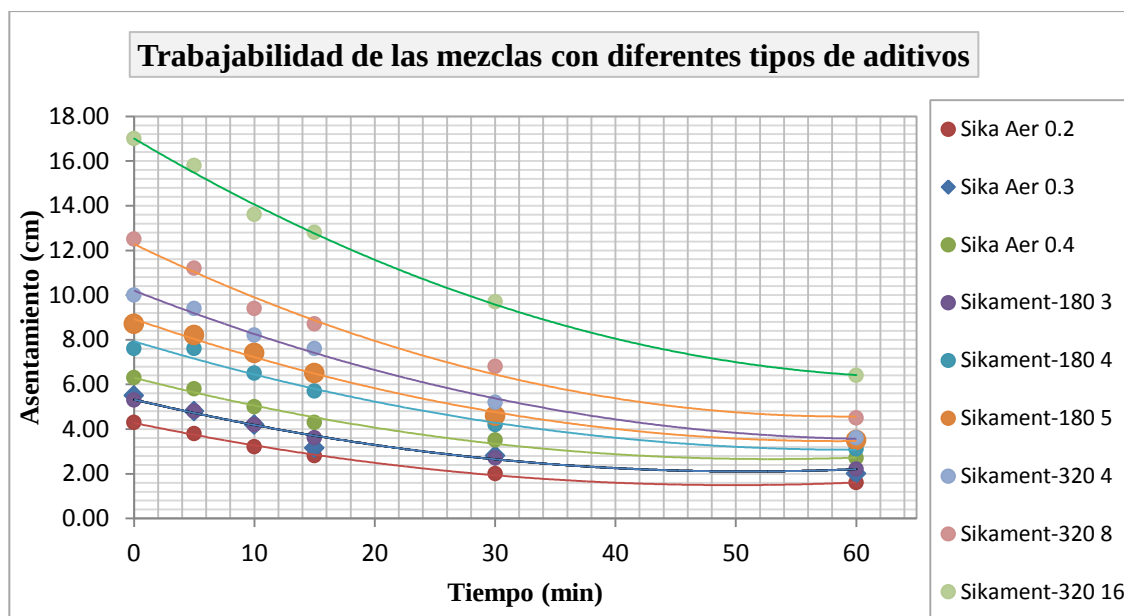
TIPO DE CEMENTO	TIPO DE ADITIVO	DOSIS (ml/Kg)	ASENTAMIENTO (cm)					
			TIEMPO (min)					
			0	5	10	15	30	60
PORTLAND IP 30	SIKA AER	0.20	4.30	3.8	3.2	2.8	2	1.6
		0.30	5.10	4.8	4.2	3.15	2.8	2
		0.40	6.30	5.8	5	4.3	3.5	2.7
	SIKAMENT-180	3	5.30	4.8	4.2	3.6	2.7	2.2
		4	7.6	7.1	6.5	5.7	4.2	3.1
		5	8.7	8.2	7.4	6.5	4.6	3.5
	SIKAMENT-320	4	10.00	9.4	8.2	7.6	5.2	3.6
		8	12.50	11.2	9.4	8.7	6.8	4.5
		16	17.00	15.8	13.6	12.8	9.7	6.4
PORTLAND IP 40	SIKA AER	0.2	4.60	4.1	3.6	2.9	2.1	0.8
		0.3	5.30	4.7	3.8	3	2.3	1.2
		0.4	6.30	5.8	4.6	3.9	2.7	1.6
	SIKAMENT-180	3	5.80	4.6	4.1	3.6	2.3	1.2
		4	8.50	5.9	5.2	4.4	3.5	2.5
		5	9.3	8.6	6.9	5.3	3.8	2.7
	SIKAMENT-320	4	10.6	8.4	7.3	5.9	4.2	3.1
		8	13.4	11.8	10.2	8.6	5.4	2.9
		16	17.50	16.3	13.2	11	9.6	3.6

Fuente: Elaboración propia

La tabla 4.2 nos presenta los resultados de asentamientos obtenidos al realizar mezclas de hormigón en laboratorio, mezclas con dos tipos de cemento y 3 clases de aditivos. En ella apreciamos que las mezclas elaboradas con el aditivo Sikament 320 especialmente con una dosis de 16 ml/Kg de cemento (dosis a 2%) son las que tienen un revenimiento mayor, 17.00 cm para mezclas con cemento portland IP 30 y de 17.5 cm para mezclas con cemento portland IP 40, pasando de una mezcla seca a una mezcla líquida de acuerdo a los asentamientos establecidos en la norma ACI 211.1, también se puede apreciar que los asentamientos son distintos uno de otros, en cuanto a dosis de aditivo y tipo de aditivo utilizado.

La reacción de los aditivos en mezclas de hormigón elaboradas con dos clases de cemento demuestra comportamientos diferentes en cada uno, es decir, las mezclas elaboradas con cemento portland IP 40 arrojan asentamientos que ofrecen mejor trabajabilidad al inicio de vaciado, en cuanto a las mezclas con cemento portland IP 30 ofrecen mayores intervalos de tiempo en cuanto a trabajabilidad, presentando un aumento de duración de tiempo de trabajabilidad del 20 %.

Grafica 4.2. Trabajabilidad de las mezclas con tres clases de aditivo en función del tiempo antes del fraguado inicial y cemento portland IP 30.



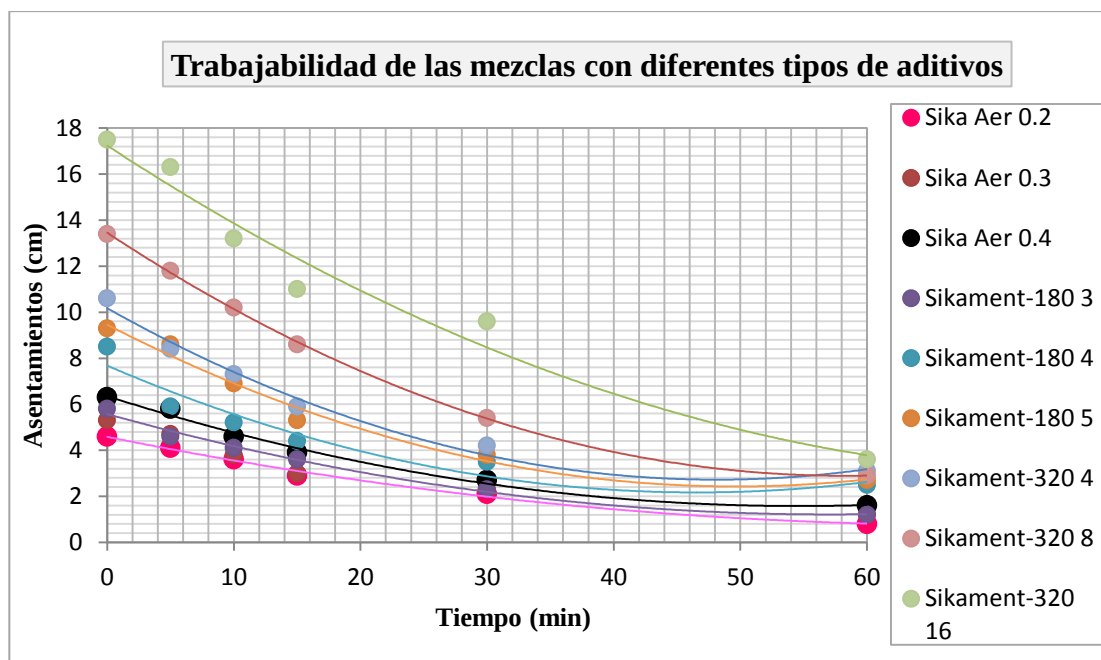
Sika Aer 0.2	$S=0.0011(D^2)-0.112(D)+4.2789$ ($R^2=0.997$)
Sika Aer 0.3	$S=0.0014(D^2)-0.1382(D)+5.3946$ ($R^2=0.9597$)
Sika Aer 0.4	$S=0.0013(D^2)-0.1375(D)+6.3008$ ($R^2=0.9888$)
Sikament-180 3	$S=0.0012(D^2)-0.1264(D)+5.3252$ ($R^2=0.9971$)
Sikament-180 4	$S=0.0019(D^2)-0.2042(D)+8.4665$ ($R^2=0.997$)
Sikament-180 5	$S=0.002(D^2)-0.2151(D)+9.2875$ ($R^2=0.9996$)
Sikament-320 4	$S=0.0017(D^2)-0.2112(D)+10.202$ ($R^2=0.9949$)
Sikament-320 8	$S=0.0022(D^2)-0.2606(D)+12.284$ ($R^2=0.9886$)
Sikament-320 16	$S=0.0024(D^2)-0.3191(D)+17.01$ ($R^2=0.9957$)

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la representación gráfica 4.2, comprendida por los valores de asentamiento en el eje de las abscisas y por el tiempo antes del fraguado inicial en el eje de las ordenadas, para mezclas elaboradas con aditivos Sika Aer, Sikament-180 y Sikament-320, y la utilización de cemento portland IP-30, se puede observar que la secuencia de asentamientos y tiempo para cada dosis de aditivo varia de manera positiva, demostrando el ascenso de asentamiento a medida que aumenta la dosis de aditivo, los valores de asentamiento se encuentran dentro del rango establecido en el trabajo de investigación (2 – 8 plg) para mezclas elaboradas con aditivos, por encima de las 8 plg la mezcla se vuelve demasiada liquida existiendo tendencia a segregación, por tal motivo el rango superior de asentamiento definido es igual a las 8 plg, criterios adoptados según la norma ACI 211.1, por ultimo comparando la trabajabilidad con mezclas elaboradas sin aditivo se concluye diciendo, las mezclas con aditivo plastificante Sika Aer aumentan la trabajabilidad en un 6.5 % (dosis de 0.2 ml/Kg), 15.6 % (dosis de 0.3 ml/Kg), 31.7% (dosis de 0.4 ml/Kg), las mezclas con aditivo plastificante de rango medio y reductor de agua Sikament-180 aumentan

la trabajabilidad en un 19% (dosis de 3 ml/Kg), 43.2% (dosis de 4 ml/Kg), 49.4% (dosis de 5 ml/Kg), y por ultimo las mezclas con aditivo superplastificante y reductor de agua de alto rango Sikament-320 aumentan la trabajabilidad en un 57% (dosis de 4 ml/Kg), 65.6% (dosis de 8 ml/Kg), 74.7% (dosis de 16 ml/Kg) en cuanto a dosis mínimas, medias y máximas de cada aditivo.

Grafica 4.3. Trabajabilidad de las mezclas con tres clases de aditivo en funcion del tiempo antes del fraguado inicial y cemento portland IP 40.



<i>Sika Aer 0.2</i>	$S=0.0008(D^2)-0.1105(D)+4.2838$ ($R^2=0.9939$)
<i>Sika Aer 0.3</i>	$S=0.0012(D^2)-0.1374(D)+5.1197$ ($R^2=0.9802$)
<i>Sika Aer 0.4</i>	$S=0.0016(D^2)-0.1746(D)+6.3514$ ($R^2=0.9896$)
<i>Sikament-180 3</i>	$S=0.0013(D^2)-0.1529(D)+5.5753$ ($R^2=0.9905$)
<i>Sikament-180 4</i>	$S=0.0013(D^2)-0.1426(D)+6.4883$ ($R^2=0.9944$)
<i>Sikament-180 5</i>	$S=0.0017(D^2)-0.1812(D)+7.5265$ ($R^2=0.989$)

Sikament-320 4	$S=0.0011(D^2)-0.1654(D)+7.5806$ ($R^2=0.9983$)
Sikament-320 8	$S=0.002(D^2)-0.2626(D)+10.586$ ($R^2=0.9967$)
Sikament-320 16	$S=0.0023(D^2)-0.3606(D)+17.242$ ($R^2=0.9665$)

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 4.3 se puede apreciar que al igual que las mezclas elaboradas con aditivo y cemento portland IP 30, el ascenso de asentamientos de acuerdo al incremento de dosis de aditivo se presenta también en mezclas con cemento portland IP 40, viendo un aumento de trabajabilidad según el tipo de aditivo en comparación con mezclas comunes, por ejemplo, en mezclas con incorporación de Sika Aer el asentamiento asciende en un 8.7 % (dosis de 0.2 ml/Kg), 20.7% (dosis de 0.3 ml/Kg), 33.33 % (dosis de 0.4 ml/Kg), las mezclas con aditivo plastificante de rango medio y reductor de agua Sikament-180 aumentan la trabajabilidad en un 27.6 % (dosis de 3 ml/Kg), 50.5 % (dosis de 4 ml/Kg), 54.8 % (dosis de 5 ml/Kg), las mezclas con aditivo superplastificante y reductor de agua de alto rango Sikament-320 aumentan la trabajabilidad en un 60.4 % (dosis de 4 ml/Kg), 68.7 % (dosis de 8 ml/Kg), 76.0 % (dosis de 16 ml/Kg), el aumento de asentamiento sin la incorporación de agua excedente garantiza obtener a futuro la resistencia establecida de diseño, se puede observar así también que a medida que transcurre el tiempo la trabajabilidad de las mezclas desciende en un 20 % en comparación a las mezclas elaboradas con aditivo y cemento portland IP-30.

4.1.3. Peso volumétrico de las muestras de hormigón elaboradas con y sin aditivos y dos tipos de cemento.

Tabla 4.3. Pesos volumétricos de mezclas de hormigón con Cemento Portland IP 30 e IP 40 y tres clases de aditivo.

TIPO DE CEMENTO	TIPO DE ADITIVO	DOSIS (ml/Kg)	DIAMETRO (m)	ALTURA (m)	PESO (Kg)	PESO ESPECIFICO (Kg/m3)
PORTLAND IP 30	<i>SIN ADITIVO</i>	-	0.15	0.30	12.59	2375.20
	<i>SIKA AER</i>	0.20	0.15	0.30	12.64	2384.88
		0.30	0.15	0.30	12.47	2352.19
		0.40	0.15	0.30	12.68	2392.43
	<i>SIKAMENT-180</i>	3	0.15	0.30	12.68	2392.43
		4	0.15	0.30	12.63	2382.60
		5	0.15	0.30	12.71	2398.09
	<i>SIKAMENT-320</i>	4	0.15	0.30	12.73	2401.54
		8	0.15	0.30	12.80	2413.49
		16	0.15	0.30	12.83	2420.78
PORTLAND IP 40	<i>SIN ADITIVO</i>	-	0.15	0.30	12.56	2368.94
	<i>SIKA AER</i>	0.2	0.15	0.30	12.62	2381.11
		0.3	0.15	0.30	12.22	2305.03
		0.4	0.15	0.30	12.37	2333.95
	<i>SIKAMENT-180</i>	3	0.15	0.30	12.51	2358.79
		4	0.15	0.30	12.61	2379.07
		5	0.15	0.30	12.73	2400.29
	<i>SIKAMENT-320</i>	4	0.15	0.30	12.63	2382.37
		8	0.15	0.30	12.53	2363.98
		16	0.15	0.30	12.63	2381.42

Fuente: Elaboración propia

El hecho de obtener los pesos volumétricos de las muestras realizadas en laboratorio tal como se aprecia en la tabla 4.3, establece, conforme aumenta el peso volumétrico existe tendencia al incremento de la resistencia, se observa también que el uso de aditivo en las mezclas no influye significativamente en el valor del peso volumétrico.

4.2. RESULTADOS OBTENIDOS HORMIGÓN EN ESTADO ENDURECIDO

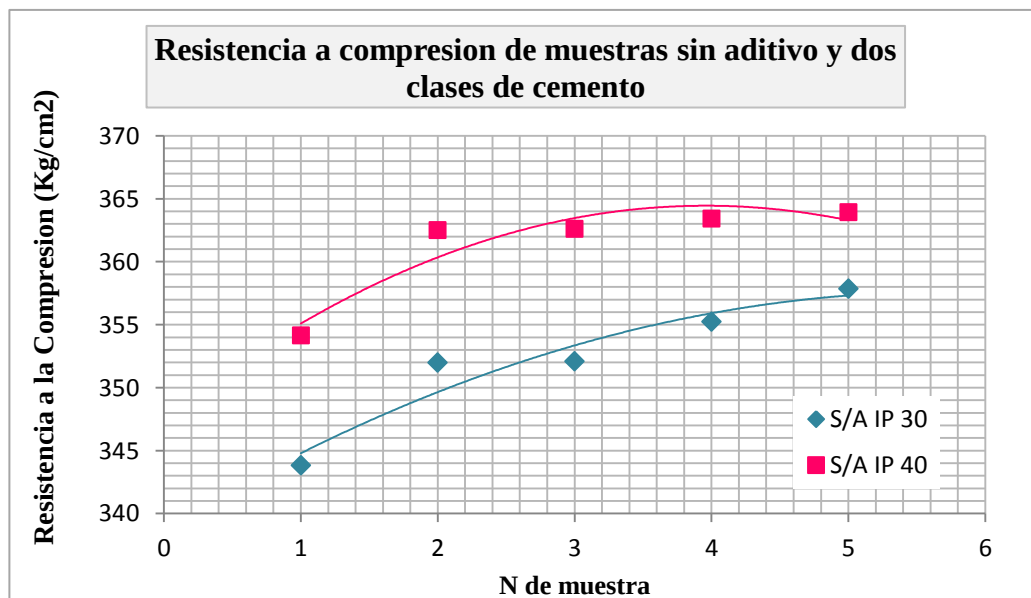
4.2.1. Resultados de prueba de resistencia a la compresión del concreto en mezclas sin aditivo.

Tabla 4.4. Resistencia a Compresión en muestras elaboradas con diferentes tipos de cemento

MEZCLAS SIN ADITIVO				
Cemento portland	Resistencia a Compresión (Kg/cm ²)			
	IP 30	Desviación estándar	IP 40	Desviación estándar
1	355.3	2.46	363.94	0.68
2	357.9		363.43	
3	352.1		362.51	
4	351.99		354.15	
5	353.83		362.61	

Fuente: Elaboración propia

Grafica 4.4. Variación de las resistencias a la compresión en muestras elaboradas con cemento IP 30 e IP 40 sin aditivos.



Fuente: Elaboración propia

Sin aditivo IP 30	$S=0.0008(D^2)-0.1105(D)+4.2838$ ($R^2=0.9939$)
Sin aditivo IP 40	$S=0.0012(D^2)-0.1374(D)+5.1197$ ($R^2=0.9802$)

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.4 se presentan los resultados de resistencia a la compresión del concreto obtenida a los 28 días de edad según la norma ASTM C-39. Los resultados de resistencia a la compresión en cada espécimen sin aditivo demuestran que se superó la resistencia de diseño establecida de 350 Kg/cm², se puede observar también que, las resistencias a la compresión elaboradas con cemento portland IP 40 superan en un 6 % a las muestras elaboradas con cemento IP 30, resultados que proponen valores superiores en mezclas con incorporación de aditivos.

4.2.2. Resultados de prueba de resistencia a la compresión del concreto en mezclas con tres tipos de aditivo y dos clases de cemento.

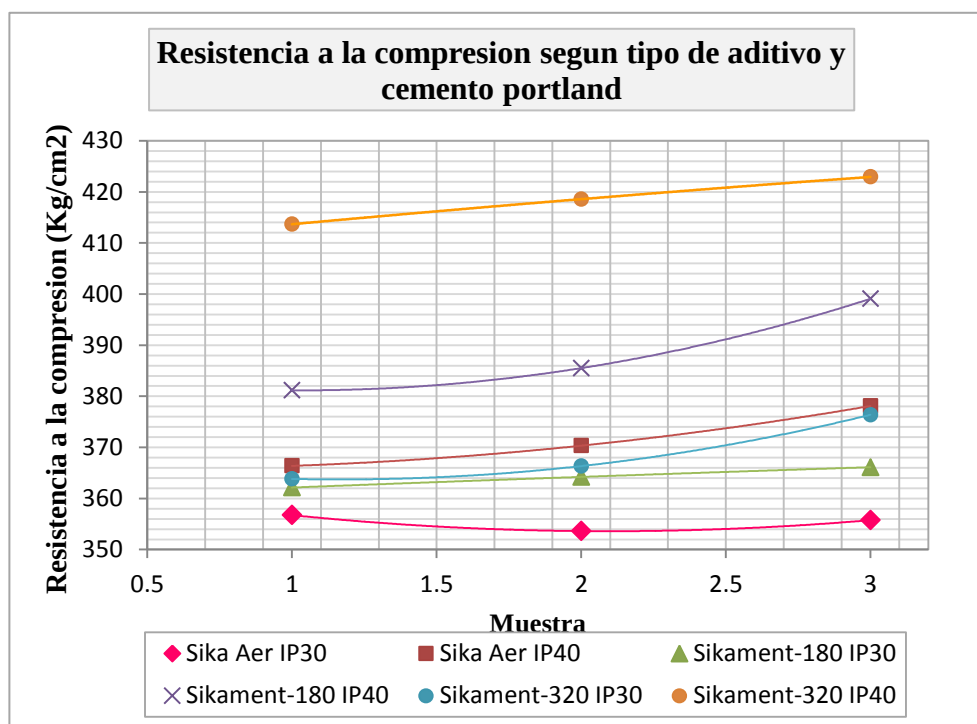
Tabla 4.5. Resistencia a Compresión en muestras elaboradas con diferentes tipos de aditivo y dos clases de cemento.

TIPO DE ADITIVO	TIPO DE CEMENTO:	PORTLAND IP 30	PORTLAND IP 40
	DOSIS (ml/Kg de cemento)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (Kg/cm ²)
SIKA AER	0.2	356.74	366.38
	0.3	353.62	370.33
	0.4	355.73	378.1
SIKAMENT-180	3	362.14	381.16
	4	364.22	385.51
	5	366.12	399.08
SIKAMENT-320	4	363.83	413.67
	8	366.34	418.58

	16	376.37	422.93
--	----	--------	--------

Fuente: Elaboración propia

Grafica 4.5. Variación de las resistencias a la compresión en muestras elaboradas con cemento IP 30 e IP 40 con aditivos Sika Aer, Sikament-180 y Sikament-320.



Fuente: Elaboración propia

Sika Aer IP 30	$S = -0.58(D^2) + 3.88(D) + 350.32$ ($R^2 = 1$)
Sika Aer IP 40	$S = 1.91(D^2) - 17.8(D) + 366.25$ ($R^2 = 1$)
Sikament-180 IP 30	$S = -0.09(D^2) + 2.35(D) + 359.88$ ($R^2 = 1$)
Sikament-180 IP 40	$S = 4.61(D^2) - 9.48(D) + 386.03$ ($R^2 = 1$)
Sikament-320 IP 30	$S = 3.76(D^2) - 8.77(D) + 368.84$ ($R^2 = 1$)
Sikament-320 IP 40	$S = -0.28(D^2) - 5.75(D) + 408.20$ ($R^2 = 1$)

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.5. Se presentan las resistencias a compresión promedio obtenidas a los 28 días, las resistencias a la compresión de cada mezcla con cada tipo de cemento y a diferentes porcentajes de aditivo se presentan en el anexo de este documento.

De acuerdo a los resultados obtenidos presentados en la tabla 4.5 se puede apreciar que las resistencias se encuentran arriba de los 350 Kg/cm², estos resultados se encuentran de acuerdo a lo planteado en el trabajo de investigación el de obtener resistencias por encima de la de diseño (350 Kg/cm²) en mezclas con inclusión de aditivos, se observa así también, la variación de resistencias en función de la dosis de aditivo empleado, por ejemplo, el resultado de resistencias elevadas es el producto de la adición del aditivo Sikament-320 en una dosis de 16 ml/Kg de cemento, aumentado así de esta manera en un 15% la resistencia de mezclas sin aditivo elaborada con cemento portland IP 40.

Los resultados confirman que entre mayor es el porcentaje de aditivo mayor resistencia se obtuvo, además cabe mencionar que en las mezclas con incorporación de aditivo Sika Aer no existe mucha variación debido a que es un aditivo que incorpora aire provocando la disminución de la resistencia, es decir, el producto se utilizó como aditivo plastificante de rango mínimo, por lo que su trabajabilidad y resistencia no demuestran un exceso de variación en comparación con las mezclas elaboradas sin aditivos, demostrando un aumento del 3.6 % con mezclas elaboradas con aditivo Sika Aer y cemento portland IP 30, y un aumento del 6.5 % con mezclas elaboradas con aditivo Sika Aer y cemento portland IP 40.

El aumento de resistencia de cada aditivo en comparación a mezclas sin aditivo y cemento portland IP-30 se indica de la siguiente manera: las mezclas con aditivo Sika Aer presentan un aumento de resistencia de 354.22 - 346.74 Kg/cm² (2.2%), las mezclas con aditivo Sikament-180 presentan un aumento de resistencia de 354.22 – 366.12 Kg/cm² (3.2%), las mezclas con aditivo Sikament-320 presentan un aumento de resistencia de 354.22 – 376.37 Kg/cm² (6.0%).

En cuanto a mezclas elaboradas con cemento portland IP-40 y con aditivos, comparando con mezclas sin aditivo, se presenta un aumento ascendente según el tipo de aditivo aplicado, las mezclas con aditivo Sika Aer presentan un aumento de resistencia de 361.33 – 378.10 Kg/cm² (4.5%), las mezclas con aditivo Sikament-180 presentan un aumento de resistencia de 361.33 – 399.08 Kg/cm² (10.0%), las mezclas con aditivo Sikament-320 presentan un aumento de resistencia de 361.33 – 422.93 Kg/cm² (15.00%).

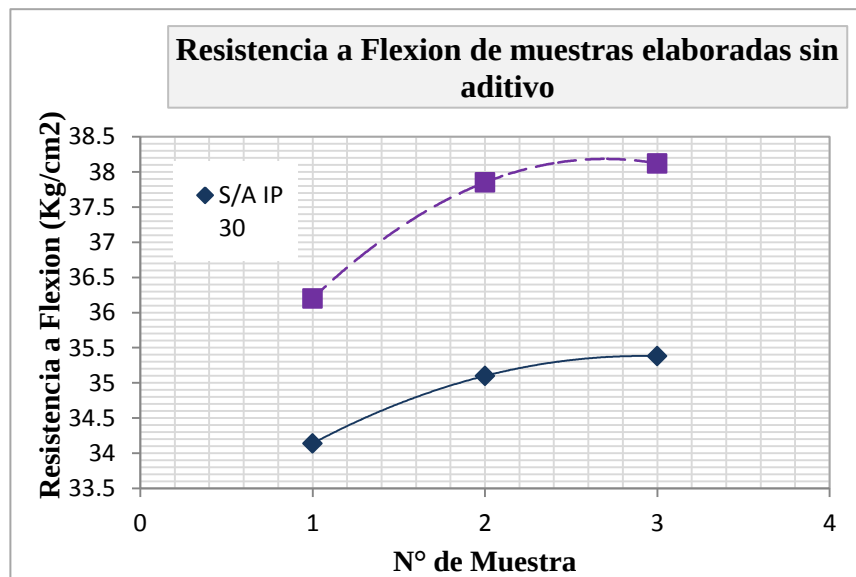
4.2.3. Resultados de prueba de resistencia a la compresión del concreto en mezclas con tres tipos de aditivo y dos clases de cemento.

Tabla 4.6. Resistencia a Flexión en muestras elaboradas con diferentes tipos de cemento sin aditivo

MEZCLAS SIN ADITIVO				
Cemento portland	Resistencia a Flexión (Kg/cm ²)			
	IP 30	Desviación estándar	IP 40	Desviación estándar
1	34.14	0.65	38.12	1.04
2	35.10		36.20	
3	35.38		37.85	

Fuente: Elaboración propia.

Grafica 4.6. Resistencias a Flexión para mezclas con cemento portland IP 30, IP 40 sin aditivos



Fuente: Elaboración propia

Sin aditivo IP 30	$S = -0.34(D^2) + 1.98(D) + 32.50$ ($R^2 = 1$)
Sin aditivo IP 40	$S = -0.69(D^2) + 3.72(D) + 33.17$ ($R^2 = 1$)

Fuente: Elaboración propia

La tabla 4.6 y la gráfica 4.6 son el resultado de la resistencia a flexión según la norma ASTM C 78 de probetas prismáticas de concreto elaboradas sin aditivo y dos clases de cemento portland IP-30 e IP-40, representaciones que indican la existencia de aumento de resistencia del 7% de 34.87-37.39 Kg/cm² en mezclas elaboradas con cemento portland IP 40 en comparación a la elaborada con IP 30, es decir, son mezclas que ofrecen mayores resistencias debido a la incorporación de este tipo de cemento, pero en cuanto a la trabajabilidad visto anteriormente, estas mezclas ofrecen menor tiempo de trabajabilidad, por lo tanto las mezclas de mayor importancia serán aquellas que ofrezcan mejorar la trabajabilidad en mayores porcentajes en comparación a las mezclas sin aditivos.

4.2.4. Resultados de prueba de resistencia a Flexión del concreto en mezclas con tres tipos de aditivo y dos clases de cemento.

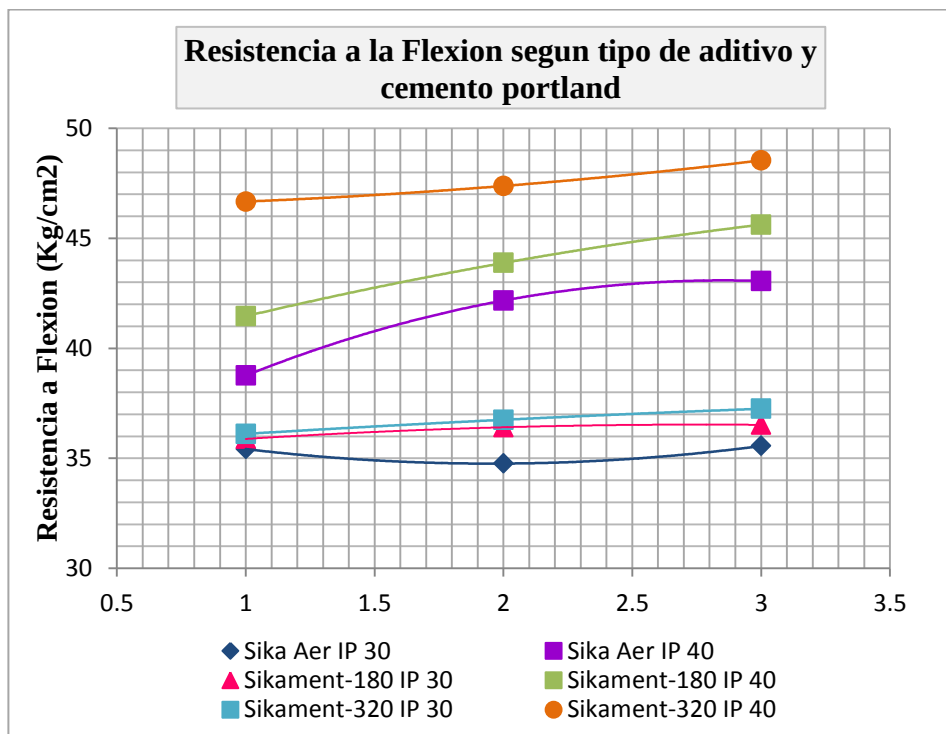
Tabla 4.7. Resistencia a Flexión en muestras elaboradas con diferentes tipos de aditivo y dos clases de cemento

TIPO DE ADITIVO	TIPO DE CEMENTO:	PORTLAND IP 30	PORTLAND IP 40
	DOSIS (ml/Kg de cemento)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (Kg/cm ²)
<i>SIKA AER</i>	0.2	35.42	38.76
	0.3	34.76	42.17
	0.4	35.56	43.06
<i>SIKAMENT-180</i>	3	35.88	41.46
	4	36.41	43.88
	5	36.52	45.62
<i>SIKAMENT-320</i>	4	36.11	46.67
	8	36.75	47.38
	16	37.25	48.54

Fuente: Elaboración propia

Grafica 4.7. Variación de las resistencias a flexión en muestras elaboradas con cemento IP 30 e IP 40 y con aditivos Sika Aer, Sikament-180 y Sikament-320

<i>Sika Aer IP 30</i>	$S = -0.26(D^2) + 1.44(D) + 33.58$ ($R^2=1$)
<i>Sika Aer IP 40</i>	$S = -1.26(D^2) + 7.19(D) + 32.83$ ($R^2=1$)
<i>Sikament-180 IP 30</i>	$S = -0.21(D^2) + .16(D) + 34.93$ ($R^2=1$)
<i>Sikament-180 IP 40</i>	$S = -0.34(D^2) + 3.44(D) + 38.36$ ($R^2=1$)
<i>Sikament-320 IP 30</i>	$S = -0.07(D^2) + 0.85(D) + 35.33$ ($R^2=1$)
<i>Sikament-320 IP 40</i>	$S = 0.225(D^2) + 0.035(D) + 46.41$ ($R^2=1$)



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la tabla 4.7 y grafica 4.7 resultados promedios del ensayo de ruptura de vigas obteniendo la resistencia a flexión, los valores de resistencia de cada espécimen elaborado con cada tipo de aditivo a diferentes porcentajes y tipo de cemento se presenta en anexos.

Los resultados reflejan que los valores obtenidos en mezclas elaboradas con una dosis máxima de aditivo y tipo de cemento IP 40 presentan un aumento de resistencia a flexión significativo del 26 % en comparación a las demás mezclas, el aumento de resistencia entre dosis de aditivo resulta de la siguiente manera, para mezclas con aditivo Sika Aer el aumento de resistencia entre dosis de 0.2, 0.3, y 0.4 ml/Kg es del 2.1%, para mezclas con aditivo Sikament-180 el aumento de resistencia entre dosis de 3, 4 y 5 ml/Kg es del 9.1%, para mezclas con aditivo Sikament-320 el aumento de resistencia entre dosis de 4, 8 y 16 ml/Kg es del 4%.

Se obtuvo un resultado superior entre todas las mezclas igual a 48.54 Kg/cm², resultado que se encuentra por encima de la resistencia establecida en el trabajo de

investigación (35 kg/cm²), valor que según el Código Boliviano del Hormigón CBH-87 (punto 3.6, pág. 34) la resistencia a flexión para hormigones que se destinan a obras expuestas a variación de climas, cargas y demás, tal cual se comporta el pavimento rígido la resistencia adecuada se encuentra por encima de los 35 kg/cm². La variación de resistencias y trabajabilidad es notoria en los rangos mínimo y máximo, presentando resultados de resistencia similares entre el rango medio y máximo del (2.1, 9.1, y 3.8%), pero significativos en cuanto a la trabajabilidad del 26.5 %.

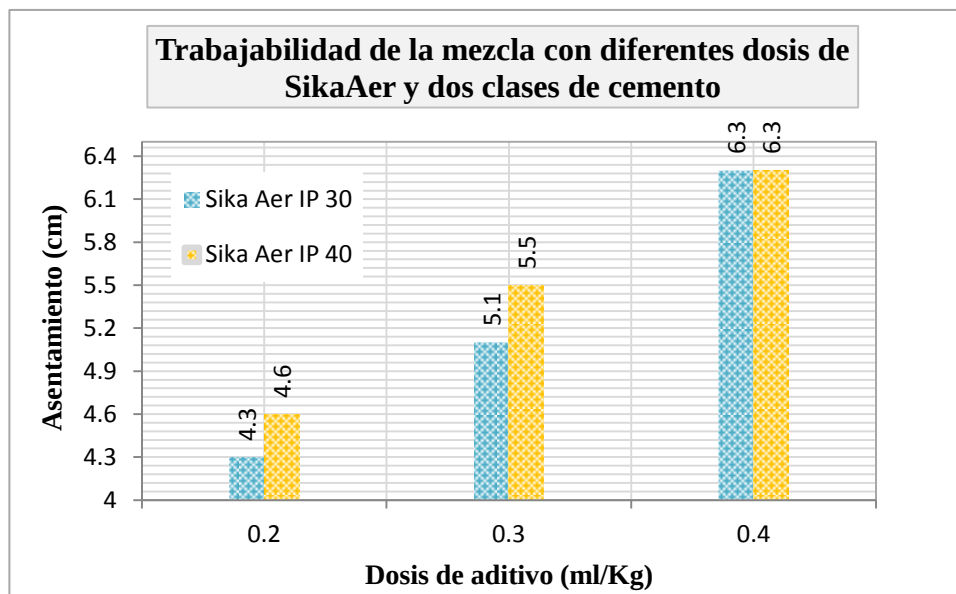
4.3. CORRELACIÓN DE LOS RESULTADOS

Las correlaciones estudiadas en este trabajo de investigación están definidas según el objetivo planteado, según el alcance establecido, a continuación se detallan cada una de ellas.

4.3.1. Correlación entre trabajabilidad de las tres clases de aditivo y la dosis de incorporación de cada una de ellas en comparación con mezclas sin aditivo y diferentes clases de cemento.

La correlación entre la trabajabilidad de cada aditivo y la dosis incorporada en cada una de ellas, comparada con mezclas sin aditivo, se obtuvo graficando la tasa de aditivo, es decir, la dosis empleada en el eje de las abscisas, contra el asentamiento producido en el eje de las ordenadas; a través de la correlación se puede observar el efecto que genera la incorporación de cada aditivo en la mezcla sobre lo que es la trabajabilidad.

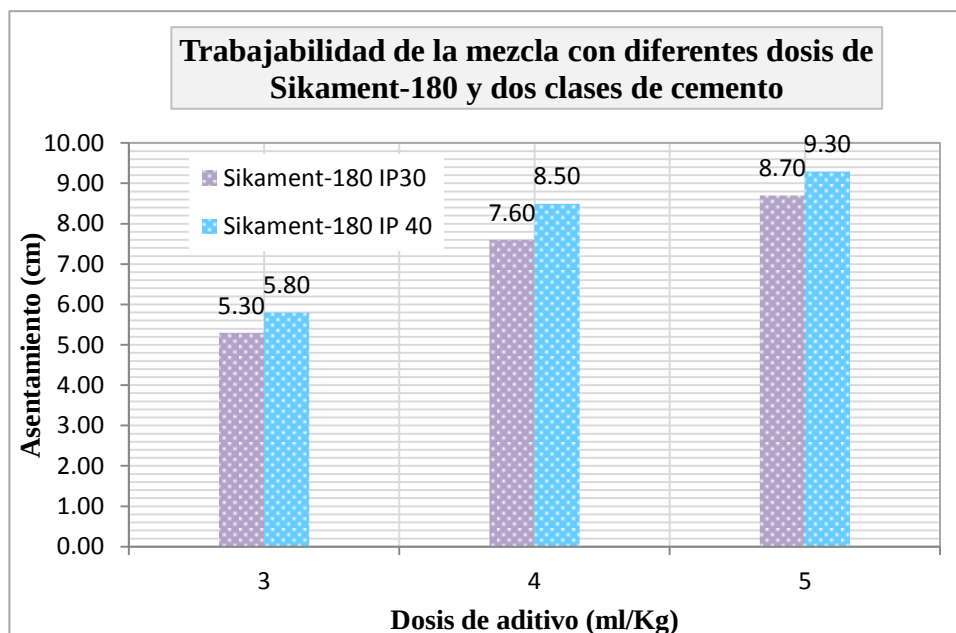
Grafica 4.8. Variación del asentamiento debido a la incorporación de aditivo a diferentes dosis



Fuente: Elaboración propia

De la figura 4.8 podemos observar que a medida que se aumenta la dosis de aditivo el asentamiento asciende, no existe una gran diferencia entre las mezclas sin aditivo y aquellas con una dosis de 0.2 ml/Kg de aditivo Sika Aer por el motivo que la dosis es aproximadamente del 0.026% porcentaje mínimo empleado, pero se puede apreciar que existe diferente reacción en cada mezcla para aquellas elaboradas con cemento portland IP 40 y dosis de 0.3 ml/Kg de cemento la trabajabilidad varia en un 7.3% en comparación a la mezcla elaborada con cemento IP 30, en cambio para una dosis de 0.2 existe un aumento del 6.5%, este caso se puede dar debido a que el cemento IP 40 posee una finura superior a la del IP 30 ejerciendo así de esta manera un efecto físico en la mezcla al reaccionar con el aditivo.

Grafica 4.9. Variación del asentamiento debido a la incorporación de aditivo a diferentes dosis



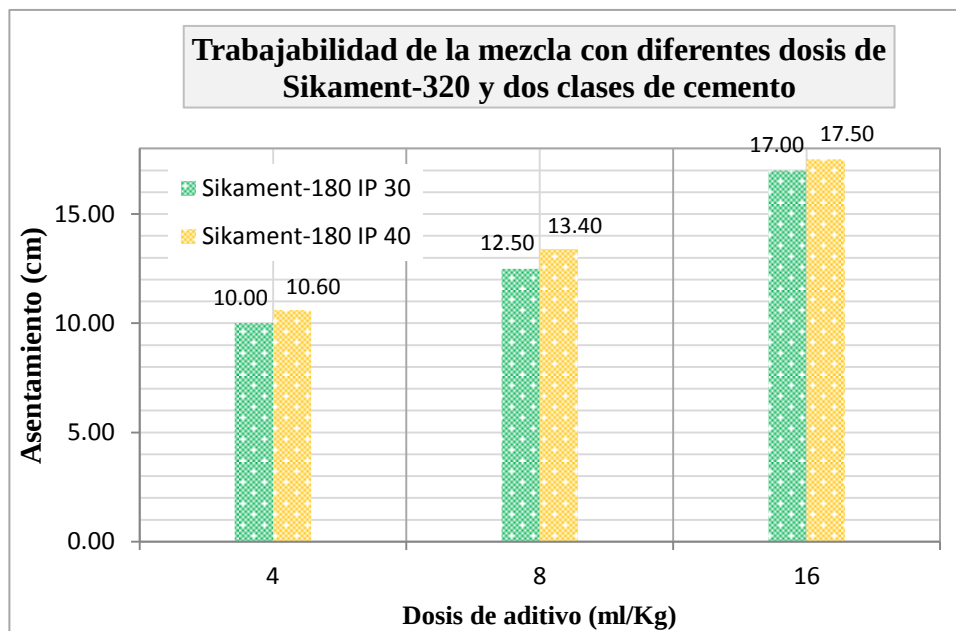
Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo que la figura 4.8, la trabajabilidad de las mezclas representadas en la gráfica 4.9 incrementa debido a la elevación de dosis de aditivo en cada mezcla, se aprecia así también que estos resultados son superiores a las mezclas sin aditivo en un (20.7, 44.7 y 51.7%).

En cuanto a la comparación entre mezclas con aditivo y la clase de cemento, se observa la variación de asentamientos de la siguiente manera: para mezclas con una dosis de 3 ml/kg el aumento de asentamiento varía de 5.3-5.8 cm (8.6%), en una dosis de 4 ml/kg de 7.5-8.5 cm (11.8%), y para una dosis de 5 ml/kg de 8.7-9.3 cm (6.5%), analizando la variación de asentamientos entre dosis de aditivo se aprecia que entre valores máximos y mínimos el aumento es del (37.6%), y entre dosis mínimas y medias es del (31.7%) lo que indica que a una dosis media que no indica la hoja técnica del producto existe una diferencia del 5.9%.

El efecto que produce el cemento portland IP 40 al reaccionar con cada tipo de aditivo ofrece mayor trabajabilidad al inicio de vaciado, y debido al aumento en la velocidad de hidratación del cemento provoca por lo tanto la aceleración en el fraguado de las mismas mezclas.

Grafica 4.10. Variación del asentamiento debido a la incorporación de aditivo a diferentes dosis



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 4.10 se puede observar el comportamiento óptimo de las mezclas en cuanto a asentamiento demostrando buena trabajabilidad al ser incorporadas las diferentes dosis del aditivo superplastificante y reductor de agua de alto rango Sikament-320, variando de manera ascendente en un 5.7% para una dosis de 4 ml/kg, en un 6.7% para una dosis de 8 ml/kg y por último en una 3 % para una dosis de 16 ml/kg entre mezclas con cemento portland IP 30 e IP 40.

El aumento de asentamiento entre dosis mínima, media y máxima dan como resultado el poder escoger que dosis es la indicada en cuanto a mejorar la trabajabilidad y el factor económico, en este caso el aumento de trabajabilidad partiendo de una dosis

mínima a media es 10-12.5 cm (20%), y de una dosis media a máxima 12.5-17 cm (26.5%), una diferencia del 6.5%, en estos caso se puede optar por utilizar una dosis media y así de esta manera reducir el valor económico de la mezcla. El aditivo Sikament-320 y su dosis máxima de 16 ml/kg de cemento arroja un asentamiento de 17.5 cm, aumentando la trabajabilidad en un 75% en comparación a las mezclas sin aditivo, además de reducir el porcentaje de agua incrementa la resistencia a la compresión y flexión posteriormente demostradas.

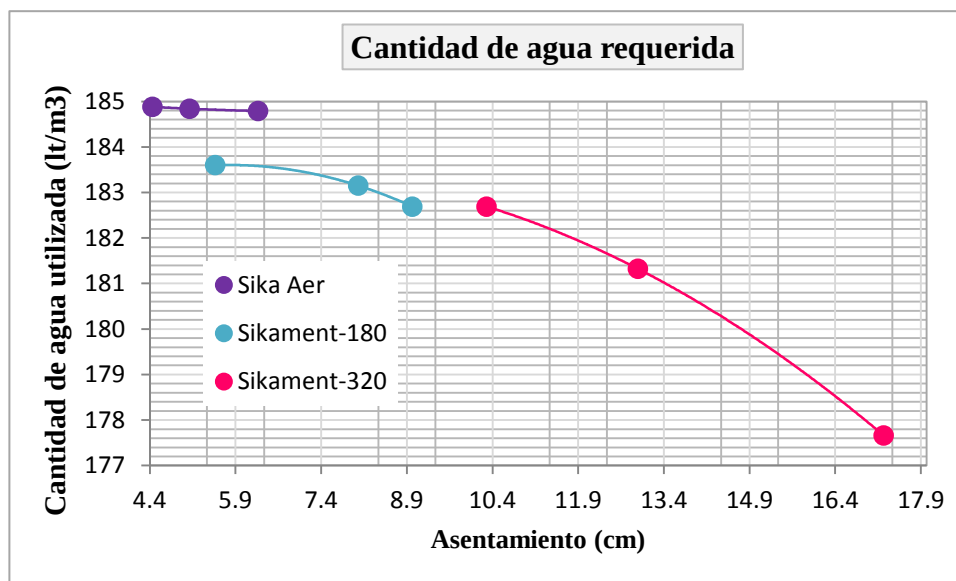
4.3.2. Correlación entre el asentamiento producido de acuerdo a la dosis de aditivo utilizado en funcion a la cantidad de agua requerida.

Tabla 4.8. Cantidad de agua necesaria en funcion del asentamiento obtenido, valores promedios de cada aditivo

Tipo de aditivo	Dosis (ml/kg)	Asentamiento (cm)	Cantidad de agua necesaria (lt/m3)
<i>Sika Aer</i>	0.2	4.45	184.88
	0.3	5.1	184.84
	0.4	6.3	184.79
<i>Sikament-180</i>	3	5.55	183.6
	4	8.05	183.15
	5	9.0	182.69
<i>Sikament-320</i>	4	10.3	182.69
	8	12.95	181.32
	16	17.25	177.66

Fuente: Elaboración propia

Grafica 4.11. Cantidad de agua utilizada para obtener el asentamiento a cada dosis de diferentes tipos de aditivo



Fuente: Elaboración propia

La grafica 4.11 resultado de la correlación entre la cantidad de agua utilizada para obtener el asentamiento indicado en funcion de la dosis de aditivo representa de cierta manera cuanto de agua se reduce al utilizar aditivos a través del asentamiento obtenido, según lo que indica la tabla 11.7 del Método ACI 211.1 (ver anexo G) las cantidades de agua requeridas en funcion del asentamiento indica lo siguiente:

Para las mezclas elaboradas con aditivo Sika Aer y de acuerdo a los asentamiento obtenidos no se demuestra un exceso de reducción de agua debido a que el aditivo Sika Aer no es un aditivo reductor de agua, pero para las mezclas elaboradas con aditivo Sikament-180 aditivo reductor de agua de rango medio, tal cual lo dice su nombre se llegó a reducir el contenido de agua de 185.5-183.6 lt/m³ un 1.5% para un asentamiento de 5.8 cm y dosis de 3 ml/Kg, de 190-183.15 lt/m³ un 3.7% para un asentamiento de 8.5 cm y dosis de 4 ml/Kg, de 192.0-182.69 lt/m³ un 4.9% para un asentamiento de 9.3 cm y dosis de 5 ml/Kg.

Para las mezclas elaboradas con aditivo Sikament-320 aditivo reductor de agua de alto rango, tal cual lo dice su nombre se llegó a reducir el contenido de agua de

194.0-182.69 lt/m³ un 5.8 % para un asentamiento de 10.6 cm y dosis de 4 ml/Kg, de 199.2-181.34 lt/m³ un 8.9% para un asentamiento de 13.4 cm y dosis de 8 ml/Kg, y por ultimo de 205.0-177.66 lt/m³ un 13.4 % para un asentamiento de 17.5 cm y dosis de 16 ml/Kg.

Además de reducir el contenido de agua, incrementa las condiciones de mezcla de seca a mezclas plásticas y líquidas que garantizan el óptimo transporte, compactado y colocado en la obra.

La acción de los aditivos así como se demuestran en la gráfica 4.11, es la de ofrecer manejabilidad a medida que se reduce el agua para sustituirla por aditivo, esta reducción de agua también favorece posteriormente a obtener grandes resistencias.

4.3.3. Correlación entre trabajabilidad y la resistencia a compresión para cada una de las mezclas con incorporación de aditivo y tipo de cemento.

A través de esta correlación se podrá apreciar el aumento o disminución de resistencia a diferentes asentamientos provocados por la incorporación de diferentes tipos de aditivos plastificantes reductores de agua a variadas dosis en cada mezcla, comparando así también el efecto que tiene las dos clases de cemento empleado.

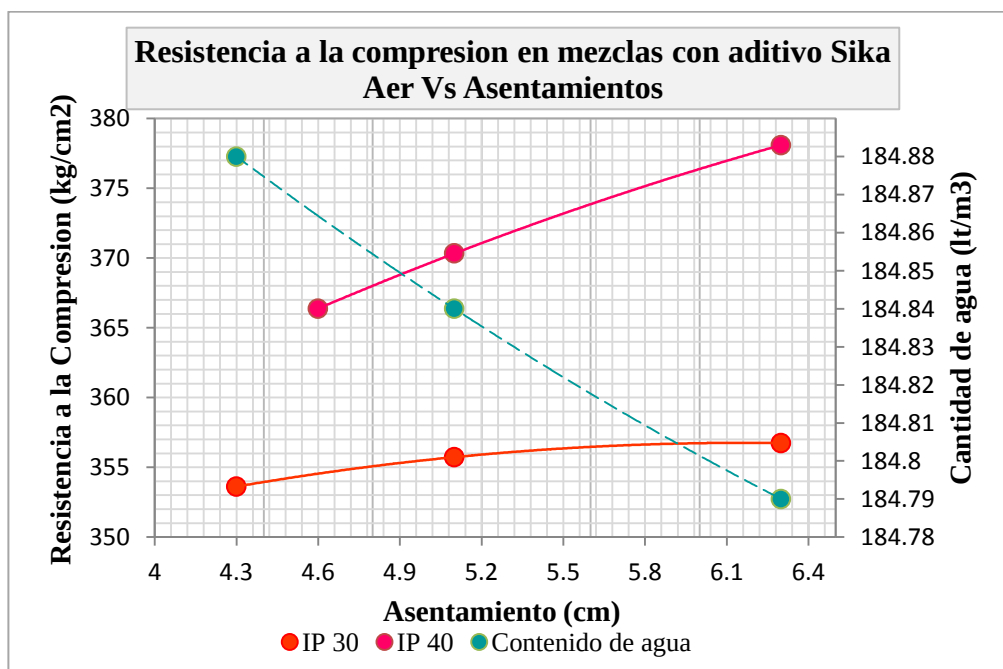
Tabla 4.9. Resistencia a la Compresión en muestras elaboradas con diferentes tipos de aditivo y dos clases de cemento en función a la trabajabilidad

TIPO DE ADITIVO	TIPO DE CEMENTO PORTLAND	TRABAJABILIDAD (cm)	RESISTENCIA (Kg/cm ²)	CANTIDAD DE AGUA (lt/m ³)
SIKA AER	IP 30	4.3	356.74	184.88
		5.1	353.62	184.84
		6.3	355.73	184.79
	IP 40	4.6	366.38	184.88
		5.5	370.33	184.89
		6.3	378.1	184.79
SIKAMENT-	IP 30	5.3	362.14	183.60

180		7.6	364.22	183.15
		8.7	366.12	182.69
	IP 40	5.8	381.16	183.60
		8.5	385.51	183.15
		9.3	399.08	182.69
SIKAMENT-320	IP 30	10	363.83	182.69
		12.5	366.34	181.32
		17	376.37	177.69
	IP 40	10.6	413.67	182.69
		13.4	418.58	181.32
		17.5	422.93	177.69

Fuente: Elaboración propia.

Grafica 4.12. Variación de la resistencia en función del asentamiento, cantidad de agua requerida para cada asentamiento en mezclas con aditivo Sika Aer



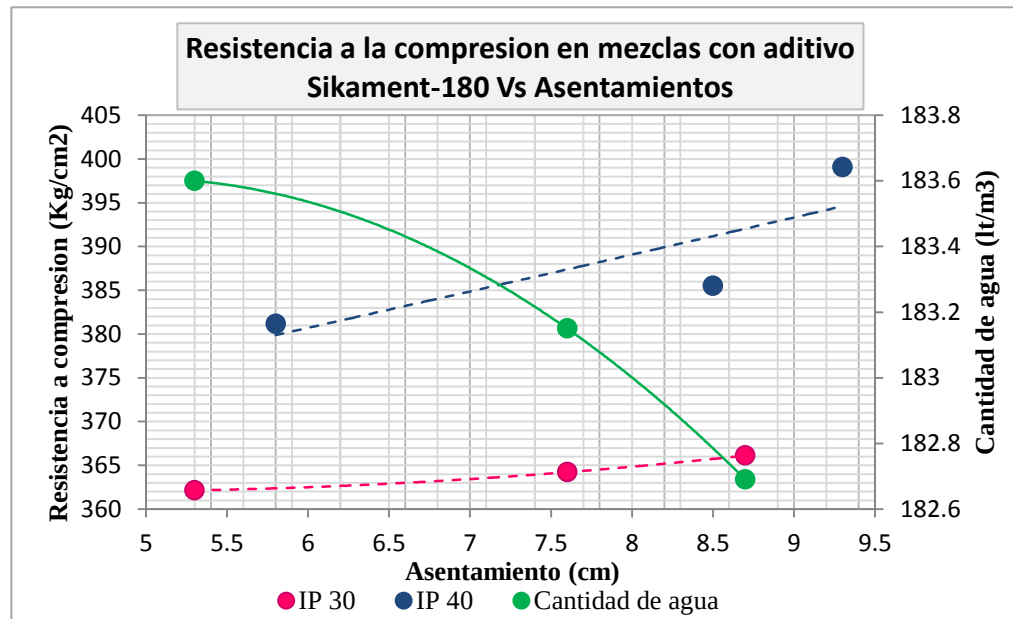
Fuente: Elaboración propia

La grafica 4.11 es el resultado de una correlación entre la resistencia que llega a alcanzar la mezcla a una dosis de aditivo, además se puede apreciar la cantidad de agua necesaria para obtener ese asentamiento debió a la inclusión del aditivo Sika Aer. Para obtener un asentamiento de 4.3 cm es necesario utilizar una dosis de 0.2

ml/Kg y 184.88 lt/m³, es decir se reduce en un porcentaje mínimo la cantidad de agua de diseño que es de 184.98 lt/m³, obteniendo una resistencia de 356.74 Kg/cm² y de 366.38 Kg/cm², se nota así también el ascenso de resistencia a medida que aumenta el asentamiento, mayores resistencia obtenidas al utilizar cemento portland IP. El incremento de resistencia a compresión entre mezclas con cemento portland IP 40 es del 6%.

La representación gráfica tiene un comportamiento distinto al habitual, donde las condiciones habituales indican que a medida que aumenta el asentamiento aumenta la cantidad de agua, y debido a este aumento de agua la resistencia disminuye, pero este comportamiento obtenido en el trabajo de investigación es el esperado debido a que demuestra el comportamiento real de los aditivos frente a estos valores, como es el asentamiento, resistencia y cantidad de agua.

Grafica 4.13. Variación de la resistencia en funcion del asentamiento, cantidad de agua requerida para cada asentamiento en mezclas con aditivo Sikament-180



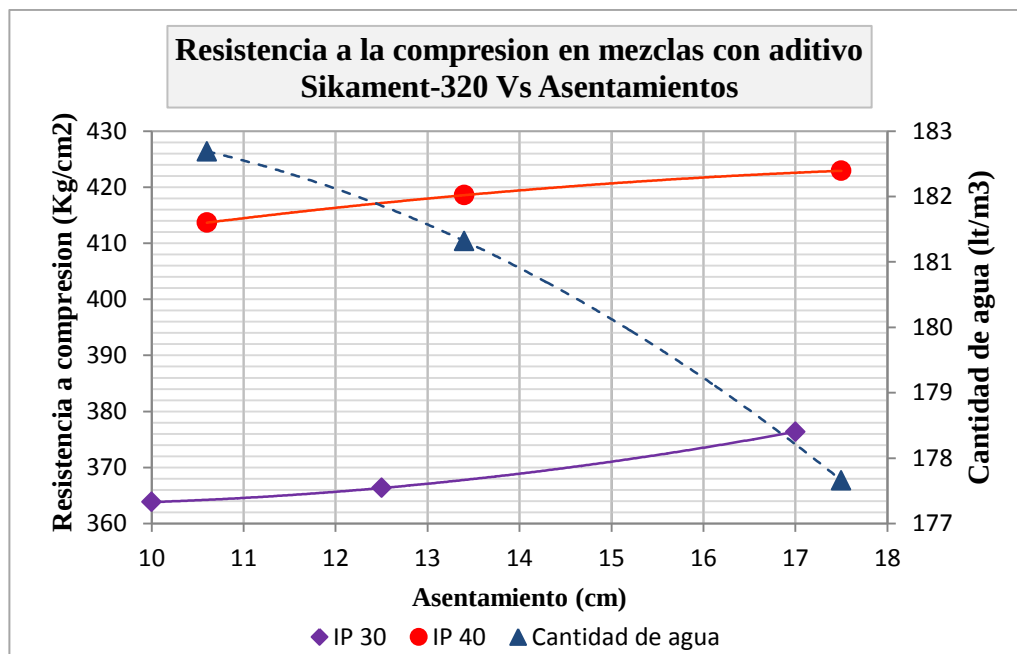
La incorporación del aditivo Sikament-180 a una dosis de 0.4, 0.5 y 0.6 % ofrece a las mezclas de hormigón ya sea elaboradas con cemento portland IP 30 o IP 40 la ventaja de volverla plastifica y de reducir una cierta cantidad de agua, es así tal cual

se muestra en la gráfica 4.12, las resistencias aumentan a medida que aumenta la dosis de aditivo, así también la mezcla se vuelve mucho más trabajable ya que ofrece asentamientos cada vez más altos, asentamientos altos sin la necesidad de incorporar en exceso cantidades de agua.

Para las mezclas con una dosis de 3 ml/Kg de cemento se utilizó 183.60 lt/m³ de agua reduciendo en una 1% la cantidad original de agua, ofreciendo una resistencia de 381.16 Kg/cm² para mezclas elaboradas con cemento portland IP 40, con un aumento de 6.7 % en comparación con las mezclas elaboradas con cemento IP 30, de la misma manera se comporta la trabajabilidad de 5.3 a 5.8 cm respectivamente, para una mejor visualización del comportamiento de la resistencia, asentamiento y cantidad de agua necesaria, para las demás dosis consultar la tabla 4.8.

El comportamiento de los aditivos en las propiedades reológicas y mecánicas del hormigón es totalmente inverso al de las mezclas elaboradas sin aditivo, en estas mezclas especiales, el disminuir el contenido de agua reemplazado por aditivo indica un aumento de trabajabilidad representados en valores altos de asentamiento, que no tienden a reducir la resistencia al contrario además de ser mezclas trabajables son mezclas que otorgan resistencia a diferentes edades, que de acuerdo a los resultados obtenidos son superiores a 350 kg/cm², que según el Código Boliviano del Hormigon CBH-87 estas resistencias son adecuadas para la elaboración de losas en pavimentos rígidos.

Grafica 4.14. Variación de la resistencia en funcion del asentamiento, cantidad de agua requerida para cada asentamiento en mezclas con aditivo Sikament-320



Fuente: Elaboración propia

Observando la figura 4.13 podemos decir que los hormigones elaborados con aditivo Sikament-320 aditivo reductor de agua-plastificante de alto rango presentan mayores resistencias a la compresión, menores cantidades de agua necesaria para obtener resultados óptimos de trabajabilidad, resistencias que superan las establecidas en el trabajo de investigación, trabajabilidad que se encuentran dentro del rango establecido no más de las 8 pulgadas. Comparado con las demás mezclas estas ofrecen un aumento de trabajabilidad del 75 % a una dosis de 16 ml/kg de cemento, un aumento de resistencia del 15 %, una cantidad de agua de 177.69 lt/m³, estos valores comparados a mezclas elaboradas sin aditivo.

En resumen se observa que para alcanzar una resistencia por encima de los 400 kg/cm² para mezclas con una relación a/c baja igual a 0.4 es más conveniente utilizar aditivos reductores de agua-plastificantes de alto rango con una tasa de dosificación del 2 % igual a 16 ml/Kg de cemento.

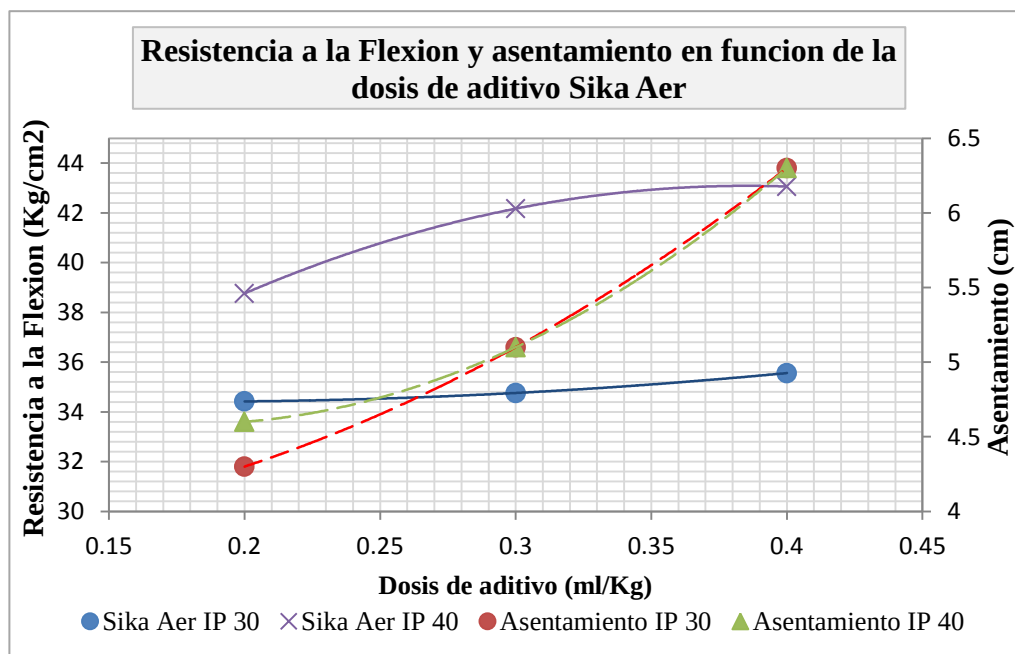
4.3.4. Correlación entre trabajabilidad y la resistencia a flexión para cada una de las mezclas con incorporación de aditivo, tipo de cemento y cantidad necesaria.

Tabla 4.10. Resistencia a la Flexión en muestras elaboradas con diferentes tipos de aditivo y dos clases de cemento en funcion a la trabajabilidad

TIPO DE ADITIVO	TIPO DE CEMENTO PORTLAND	TRABAJABILIDAD (cm)	RESISTENCIA A FLEXIÓN (Kg/cm ²)	CANTIDAD DE AGUA (lt/m ³)
SIKA AER	IP 30	4.3	34.42	184.88
		5.1	34.76	184.84
		6.3	35.56	184.79
	IP 40	4.6	38.76	184.88
		5.1	42.17	184.84
		6.3	43.06	184.79
SIKAMENT-180	IP 30	5.3	35.88	183.60
		7.6	36.41	183.15
		8.7	36.52	182.69
	IP 40	5.8	41.46	183.60
		8.5	43.88	183.15
		9.3	45.62	182.69
SIKAMENT-320	IP 30	10	36.11	182.69
		12.5	36.75	181.32
		17	37.25	177.69
	IP 40	10.6	46.67	182.69
		13.4	47.38	181.32
		17.5	48.54	177.69

Fuente: Elaboración propia

Grafica 4.15. Variación de la resistencia a flexión y asentamiento en funcion de la dosis de aditivo Sika Aer empleado



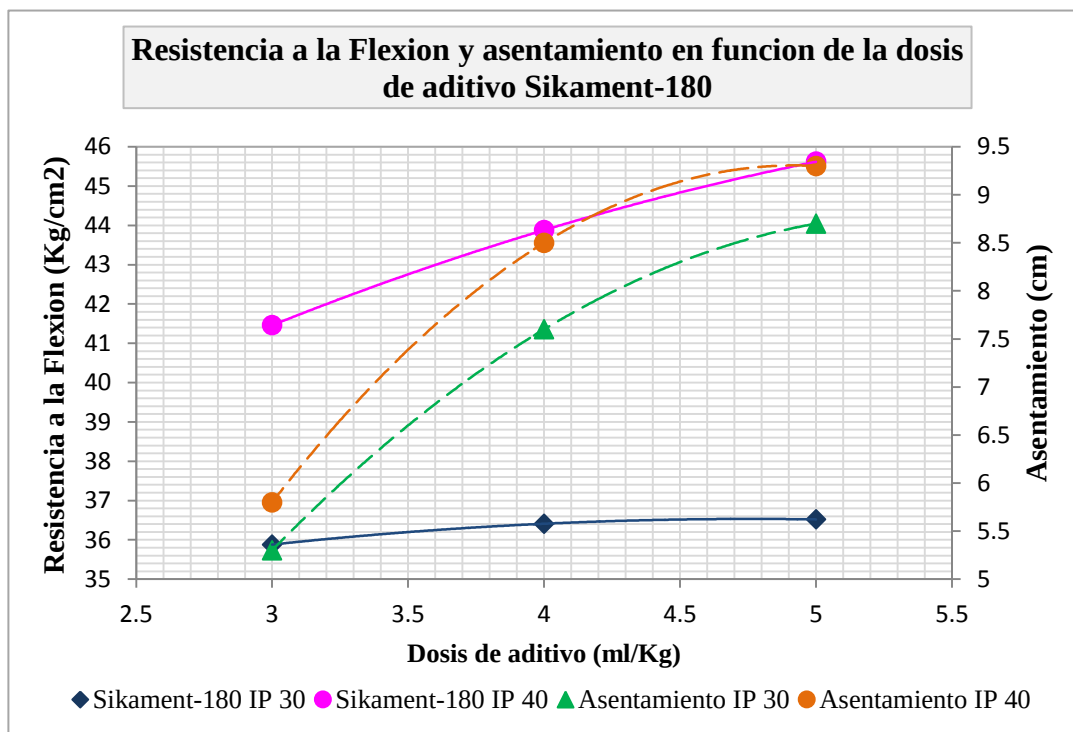
Fuente: Elaboración propia

Evalutando la gráfica 4.15 resultado de la correlación entre la resistencia a la flexión soportadas por las vigas elaboradas a tres dosis de aditivo Sika Aer (0.2, 0.3, y 0.4 ml/Kg), comportándose de diferente manera con cada clase de cemento portland agregado, se puede observar que solo en la dosis del 0.2 ml/Kg el asentamiento asciende de 4.3 a 4.6 cm aumentando un 6.5% la trabajabilidad de las mezclas, pero lo que sí se puede observar es la variación de las resistencias, comparando aquellas donde se utilizaron cemento portland IP 30 con las elaboradas con cemento portland IP 40, cambios para una dosis de 0.2 ml/Kg de 34.42 a 38.76 Kg/cm², para una dosis de 0.3 ml/Kg de 34.76 a 42.17Kg/cm², del mismo modo sucede en la dosis de 0.4 ml/Kg de 35.56 a 43.06 Kg/cm², produciendo un aumento del 11, 17.5 % respectivamente.

La variación de asentamiento en dosis de 0.3 y 0.4 ml/Kg para mezclas elaboradas con cemento IP 30 en comparación con mezclas IP 40 no muestra la necesidad de utilizar una clase de cemento en específico, siempre y cuando se trate de mejorar la

trabajabilidad, porque en cuanto a la resistencia resulta optimo trabajar con cementos de alta resistencia como lo es el cemento portland IP 40.

Grafica 4.16. Variación de la resistencia a flexión y asentamiento en funcion de la dosis de aditivo Sikament-180 empleado

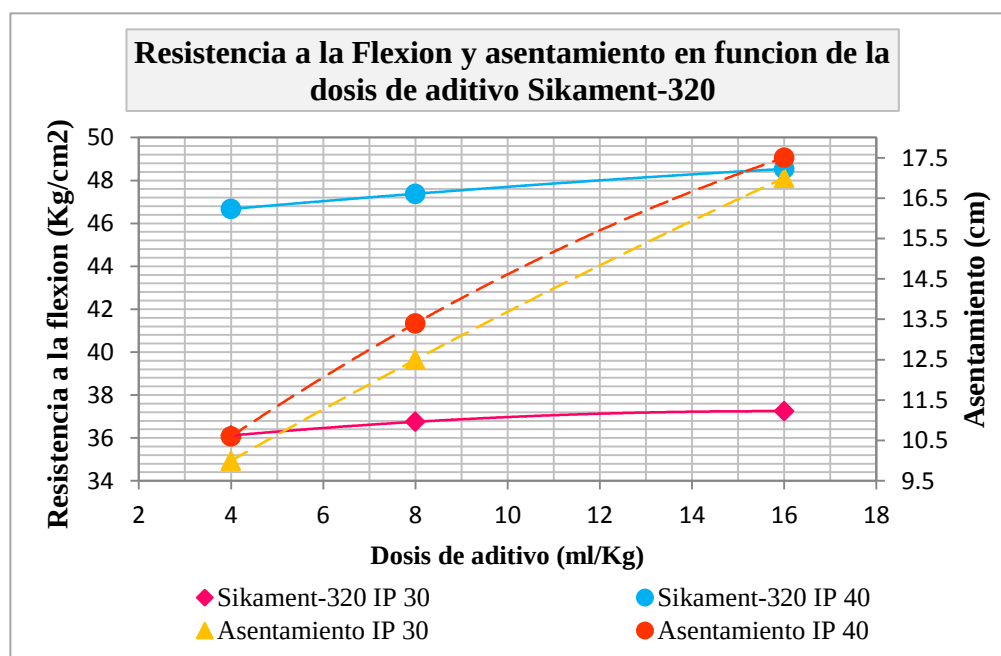


Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la resistencia a la flexión, característica y valor importante en la elaboración del hormigón para la construcción de pavimentos rígidos se puede observar e interpretar en la figura 4.16 que el aditivo Sikament 180 aditivo plastificante reductor de agua, mencionado anteriormente, ofrece asentamientos hasta 9.3 cm en una dosis máxima de 5 ml/Kg de cemento, existiendo una variación del 39 % entre dosis mínima de 3 ml/Kg y dosis máxima de 5 ml/Kg, en cuanto a resistencias una variación del 9.5 % entre dosis mínima y máxima. Los valores de la resistencia a la flexión se encuentran dentro de lo establecido en la propuesta, el superar una resistencia de los 35 Kg/cm² en mezclas con incorporación de aditivos.

Mejores resultados de resistencia y trabajabilidad inicial ofrecen los cementos especiales de alta resistencia como lo es el cemento portland IP 40, pero no debemos olvidar que por el motivo de que este cemento desprende mayor calor de hidratación la mezcla tiende a fraguar más rápido, lo que proporciona trabajabilidad por menos tiempo, característica defectuosa en comparación a las mezclas elaboradas con cemento IP 30.

Grafica 4.17. Variación de la resistencia a flexión y asentamiento en funcion de la dosis de aditivo Sikament-320 empleado



La grafica 4.17 presenta resultados superiores en comparación a las demás mezclas, partiendo desde las elaboradas con aditivo Sika Aer aditivo plastificante incorporador de aire de rango mínimo, Sikament-180 aditivo reductor de agua y plastificante rango medio, en comparación a las mezclas elaboradas con aditivo Sikament-320 aditivo reductor de agua de alto rango y superplastificante, las resistencias y asentamiento se expresan por si solas, la adición de este aditivo en porcentajes del 0.5 1 y 2% reaccionan óptimamente ya se con cemento portland IP 30 o con cemento IP 40, tomando por una lado que si se quiere obtener trabajabilidad prolongada es mejor

trabajar con cemento IP 30 pero si se quiere obtener mejores resistencias es conveniente trabajar con cemento IP 40.

La grafica 4.16 indica que en mezclas tipo IP 30 a una dosis de 0.5 % de aditivo se obtiene un asentamiento de 10 cm y resistencia de 36.11 Kg/cm², para una dosis del 1% se obtiene un asentamiento de 12.5 cm y resistencia de 36.75 Kg/cm², para una dosis del 2% se obtiene un asentamiento de 17.0 cm y resistencia de 37.25 Kg/cm², aumentando en un 30 % sus características en mezclas donde se utilizan cemento IP 40, y aumentando en un 75 % la trabajabilidad en comparación a mezclas elaboradas sin aditivo.

4.4. ANÁLISIS COMPARACIÓN DE PRECIOS

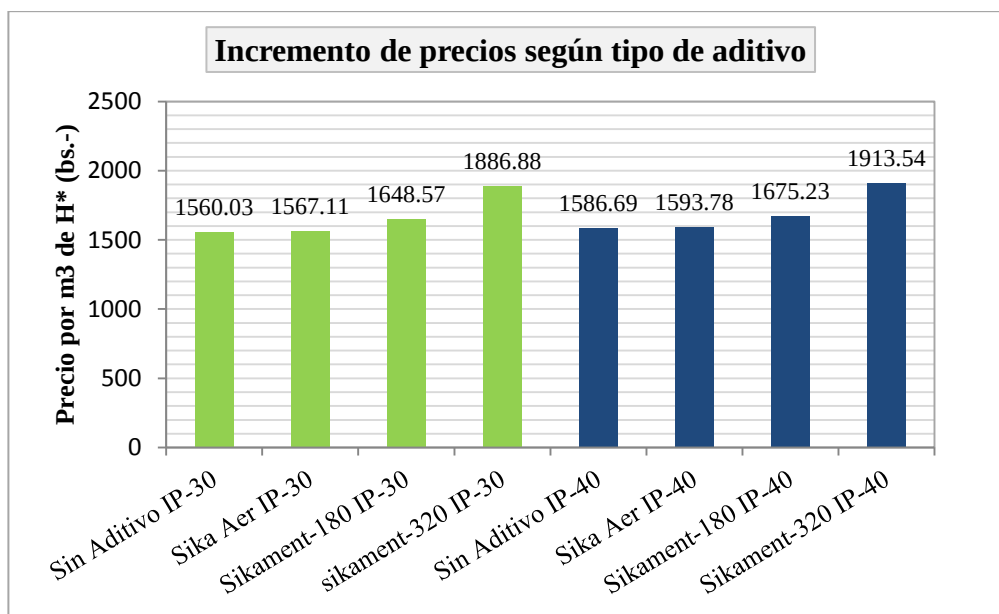
4.4.1. Mezclas elaboradas con y sin incorporación de aditivos

Tabla 4.11. Resumen de precios para mezclas elaboradas con y sin aditivos

<i>TIPO DE CEMENTO PORTLAND</i>	<i>TIPO DE HORMIGÓN</i>	<i>PRECIO UNITARIO(Bs.-) m3/de hormigón</i>
"El Puente" IP-30	Sin Aditivo	1560.03
	Sika Aer	1567.11
	Sikament-180	1648.57
	Sikament-320	1886.88
"Fancesa" IP-40	Sin Aditivo	1586.69
	Sika Aer	1593.78
	Sikament-180	1675.23
	Sikament-320	1913.54

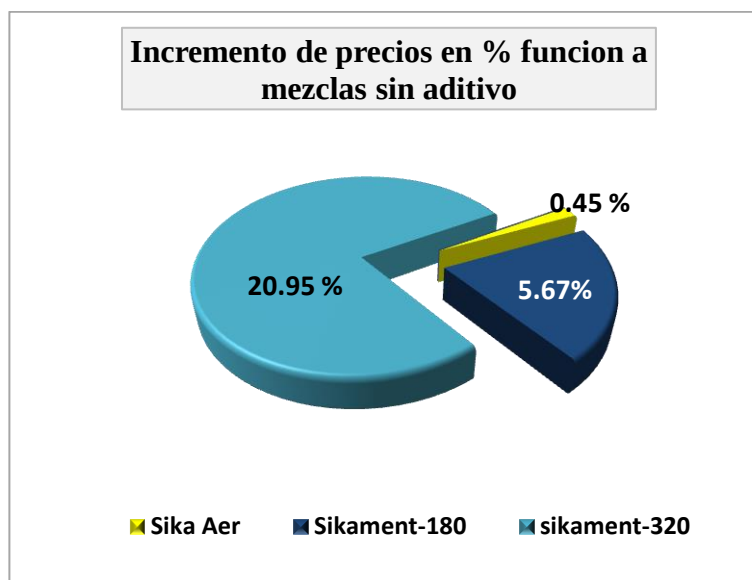
Fuente: Elaboración propia.

Grafica 4.18. Incremento de precio en mezclas elaboradas con y sin aditivos y dos tipos de cemento.



Fuente: Elaboración propia

Grafica 4.19. Incremento de precios en % en mezclas elaboradas con y sin aditivo



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la tabla 4.11 y grafica 4.19 se puede apreciar el costo para la elaboración de mezclas con y sin incorporación de aditivos, los valores detallados se encuentran en anexos, a simple vista se puede apreciar que resulta conveniente trabajar con mezclas que no contengan la incorporación de aditivos, debido a que existe un aumento de precios de 7.08 bs.- igual al 0.45 % para mezclas con aditivo Sika Aer, de 88.54 bs.- igual al 5.67 % para mezclas con aditivo Sikament-180, y un aumento de 326.85 bs por m³ de hormigón igual al 20.95 % para mezclas elaboradas con aditivo Sikament-320, este incremento resultaría desfavorable si es que en las dos mezclas las características tanto en su estado fresco como endurecido fuesen las mismas.

Las características que presenta el hormigón con incorporación de aditivos ofrece mayor tiempo de manipuleo con menor pérdida de compactibilidad y resistencia, es decir, el mejorar estas propiedades justifica el incremento de precios.

El aumentar cantidades adicionales de agua no indica que a medida que aumenta la cantidad de agua ira aumentando la resistencia y trabajabilidad conjuntamente, al contrario, para que la mezcla sin incorporación de aditivo mantenga la resistencia establecida como de diseño deberá aumentarse cierta cantidad de cemento, lo que también indica un aumento de precio.

4.4.2. Mezclas elaboradas con aditivos y cemento portland IP-30 “El Puente”

Tabla 4.12. Precios por m³ de Hormigón

TIPO DE CEMENTO PORTLAND “El Puente IP-30”		
TIPO DE ADITIVO	DOSIS	Precio (Bs.-)
SIKA AER	0.2 ml/Kg	1563.15
	0.3 ml/Kg	1565.34
	0.4 ml/Kg	1567.11
SIKAMENT-180	3 ml/Kg	1613.05
	4 ml/Kg	1630.85
	5 ml/Kg	1648.57

SIKAMENT-320	4 ml/Kg	1641.74
	8 ml/Kg	1723.45
	16 ml/Kg	1886.88

Fuente: Elaboración propia¹

De acuerdo a la tabla 4.11 podemos observar el precio en boliviano por metro cubico de hormigón para mezclas elaboradas con dosis máximas de cada aditivo, considerando las dosis máximas debido a que es en estas dosis donde se requiere mayor cantidad del producto, la variación de precios entre aditivos se encuentra alrededor del 0.14-0.22 % para mezclas con aditivo Sika Aer, del 1.10-2.20 % para mezclas con aditivo Sikament-180, y de 4.98-14.9 % para mezclas con incorporación de aditivo Sikament-320.

4.4.3. Mezclas elaboradas con aditivos y cemento portland IP-40 “Fancesa”

Tabla 4.13. Precios por m³ de Hormigon.

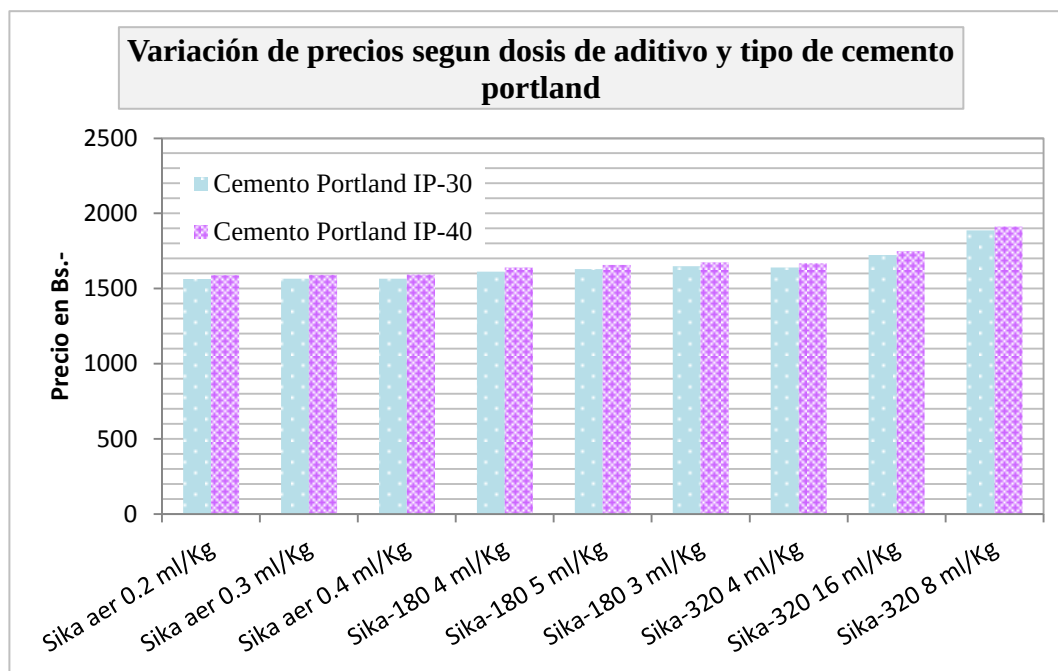
TIPO DE CEMENTO PORTLAND “Fancesa IP-40”		
TIPO DE ADITIVO	DOSIS	Precio (Bs.-)
SIKA AER	0.2 ml/Kg	1590.23
	0.3 ml/Kg	1592.00
	0.4 ml/Kg	1593.78
SIKAMENT-180	3 ml/Kg	1639.79
	4 ml/Kg	1657.51
	5 ml/Kg	1675.23
SIKAMENT-320	4 ml/Kg	1668.4
	8 ml/Kg	1750.12
	16 ml/Kg	1913.54

Fuente: Elaboración propia.

¹¹ Precios extraídos de www.revistapyc.com.

Precios de aditivos extraídos de: www.coval.com.co/pdfs/listasprecios/ult_sika.pdf

Grafica 4.20. Precio de mezclas de hormigón con incorporación de aditivo a diferentes dosis y tipo de cemento



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la variación de precios de mezclas elaboradas con aditivo y dos clases de cemento portland IP 30 e IP 40, se puede observar que la diferencia de precio en bolivianos se encuentra en un 1.41% igual a 26.66 bs.-, esta diferencia se hace mucho más grandes cuando se trata de grandes cantidades de hormigón, de acuerdo a este análisis se debe considerar seriamente que aditivo utilizar y con qué cemento combinarlo, tomando en cuenta los resultados anteriormente analizados.

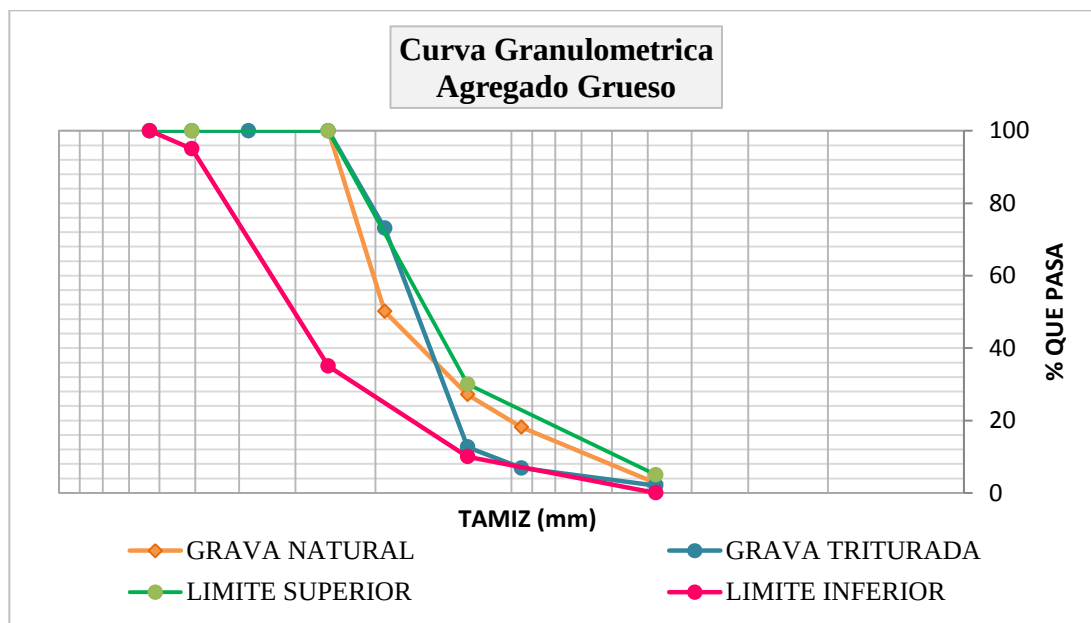
4.5. ANÁLISIS DE LA GRANULOMETRÍA DE AGREGADO GRUESO DE CANTO RODADO Y TRITURADO EN LA TRABAJABILIDAD DEL HORMIGÓN.-

Considerando que en la elaboración de mezclas de concreto elaboradas en nuestro medio ocupan para su fabricación agregados que pueden ser obtenidos de dos fuentes: unos de depósitos de origen natural (ríos) y otros resultantes del producto de trituración, el hacer un análisis de la influencia tanto de su granulometría, tamaño

máximo de los agregados, y de algunas otras propiedades nos da una idea clara de que manera llegan a actuar en el comportamiento del hormigón en su estado fresco como es la trabajabilidad.

Una buena consistencia y manejabilidad de la mezcla se obtiene con la combinación de índices bajos de absorción y donde las partículas son aproximadamente redondas, de acuerdo a los resultados obtenidos del ensayo de granulometría, peso específico y grado de absorción de la grava triturada utilizada para la elaboración de mezclas en el trabajo de investigación se analizara en comparación con resultados de agregados gruesos extraídos de la misma cantera sin sufrir modificaciones, es decir, agregados de canto rodado², se analizara la influencia que estos valores tendrían en la trabajabilidad del hormigón fresco.

Grafica 4.21. Curva granulométrica del agregado grueso (canto rodado, triturado)



Fuente: Elaboración propia.

² Resultados extraídos de: Alberto, Benítez R., Dosificación y Resistencias de hormigones con materiales regionales., Imprenta OFFSET., Tarija. Bolivia, Julio 1998.

Tabla 4.14. Propiedades del agregado grueso

PROPIEDADES					
TIPO DE AGREGADO	MF	PUC	PESSS	PEA	% ABS
	<i>Módulo de finura</i>	<i>Peso unitario compactado</i>	<i>Peso específico superficie seca saturada</i>	<i>Peso específico aparente</i>	<i>Porcentaje de absorción</i>
	-	gr/cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	%
<i>CANTO RODADO</i> ³	8.04	1.657	2.61	2.668	1.35
<i>TRITURADO</i>	7.18	1.352	2.45	2.5	1.36

Fuente: Elaboración propia

La forma de los agregados incide sobre la trabajabilidad del hormigón fresco, los agregados triturados provocan disminución de trabajabilidad debido a que orientan a que se acumule debajo de una sola cara la cantidad de poros y agua, además, este tipo de grava ocasionan el requerimiento de mayor cantidad de arena lo que provoca el posterior incremento en el volumen de agua para compensar la pérdida de docilidad producida por el rozamiento que se produce entre las partículas consecuencia de su forma angulosa y aristas vivas, y que además dificulta el acomodo y la compactación del hormigón, manifestándose adecuado el uso de agregados gruesos naturales, debido a su forma redondeada, obteniéndose menor cantidad de vacíos y facilitando la compactación del mismo.

Por otro lado, el tamaño máximo del agregado grueso influye en las características del hormigón en estado fresco, es decir, cuando los agregados son muy gruesos pueden producir mezclas rígidas, por lo que se busca agregados que no presenten granulometrías donde exista grandes acumulaciones en un determinado tamiz, de acuerdo a la gráfica 4.18 la curva granulométrica de la grava natural presenta una curva suave, de acuerdo a esta característica el agregado natural producirá resultados más satisfactorios en las propiedades del concreto fresco permitiendo menos energía de compactación, pero no son ideales para lograr una buena adherencia con la pasta

³ Resultados extraídos de: Alberto, Benítez R., Dosificación y Resistencias de hormigones con materiales regionales., Imprenta OFFSET., Tarija. Bolivia, Julio 1998.

de cemento, y en este sentido las gravas trituradas adhieren de manera favorable la pasta de cemento.

El porcentaje de absorción de los agregados influye en la cantidad que llegan a absorber del agua de mezclado, lo que ocasiona la perdida de asentamiento, de acuerdo a la tabla 4.13 las gravas de origen triturado tenderán a absorber y perder el asentamiento de modo más rápido que las gravas de origen natural.

De acuerdo a la siguiente tabla se puede corroborar el óptimo comportamiento de los agregados de canto rodado en cuanto a la trabajabilidad de las mezclas con y sin incorporación de aditivos.

Tabla 4.15. Variación de Asentamiento según tipo de agregado grueso

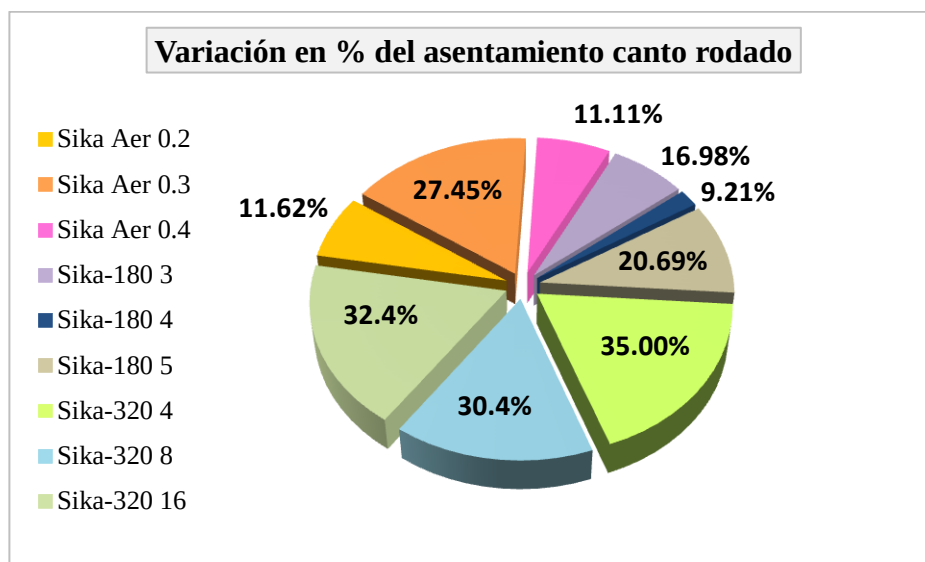
Tipo de agregado grueso		C. Rodado	C. Triturado
Tipo de aditivo	Dosis (ml/kg)	Asentamiento (cm)	Asentamiento (cm)
<i>Sika Aer</i>	0.2	4.8	4.3
	0.3	6.5	5.1
	0.4	7.0	6.3
<i>Sikament-180</i>	3	6.2	5.55
	4	8.3	8.05
	5	10.5	9
<i>Sikament-320</i>	4	13.5	10.3
	8	16.3	12.95
	16	22.5	17.0

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la gráfica 4.22 se puede observar la variación de asentamiento en porcentaje en comparación a mezclas elaboradas con aditivo y agregado triturado, dando como resultado en mezclas con incorporación de aditivo Sikament-320 a una dosis de 4 ml/Kg el aumento del 35 % cambio considerable en trabajabilidad utilizando agregado grueso de canto rodado para la elaboración de mezclas de hormigón, se observa así también que existe un aumento del 32% en mezclas con incorporación de aditivo Sikament-320 a una dosis de 16 ml/Kg existiendo el incremento de asentamiento de 17.00 cm a 22.5 cm. De acuerdo a los resultados

obtenidos se considera que el trabajar con agregados de canto rodado entrega mejores resultados en cuanto a consistencia, manejabilidad y trabajabilidad de la mezcla de hormigón.

Grafica 4.22. Variación en % del asentamiento en comparación con mezclas elaboradas con agregado grueso triturado



Fuente: Elaboración propia.

4.6. ANÁLISIS DEL INCREMENTO DE AGUA Y CEMENTO PARA MEJORAR LA TRABAJABILIDAD DEL HORMIGÓN SIN ADITIVOS.-

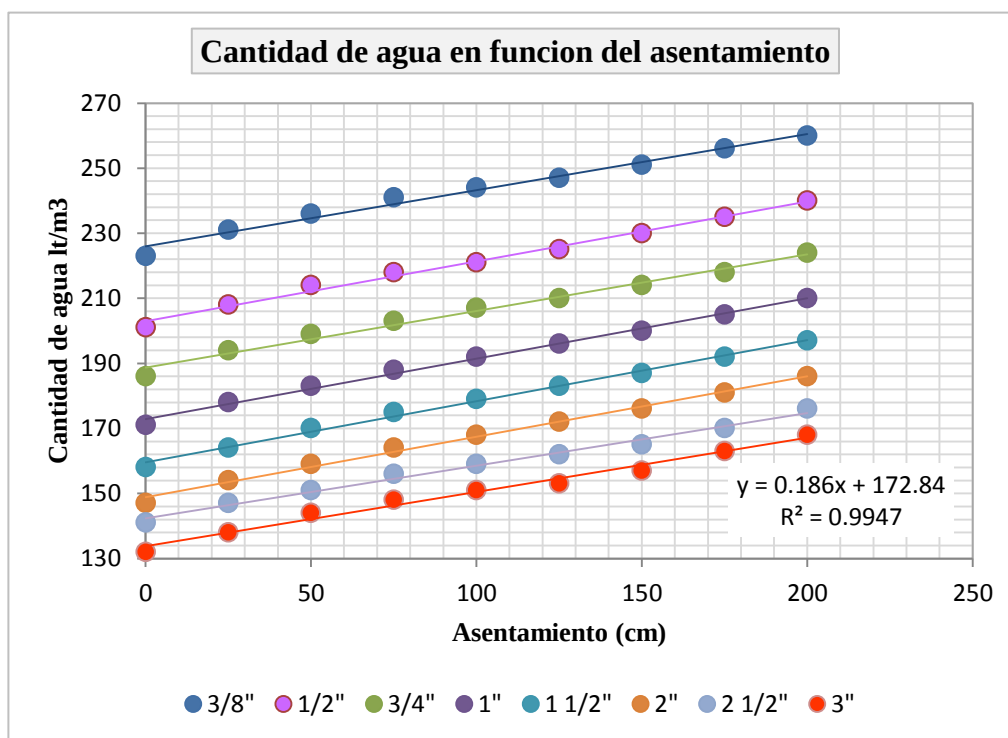
El incremento de agua para alcanzar mayores asentamientos y ofrecer mejor trabajabilidad resultan ser menos durables debido a la formación de conductos capilares, por la exudación, se convierten en vías de acceso para los agentes agresivos.

Del mismo modo el incremento de agua, el mantener la misma la relación agua-cemento implica el aumento de cemento, y a mayor cantidad de cemento las reacciones químicas serán más intensas aumentando la temperatura del hormigón y con ello la evaporación y las contracciones de fraguado, además genera un mayor

número de vacíos, provocando posteriormente la baja durabilidad y resistencia cuando el hormigón se encuentre en su estado endurecido.

Se deduce así también, las mezclas elaboradas con incremento de agua manteniendo la misma relación a/c, dan como resultado la disminución del agregado fino que es compensado por el incremento de cemento, provocando una buena manejabilidad debido a las partículas finas que presenta el cemento, se debe tener en cuenta, que el aumentar cantidades de agua y cantidades de cemento no implica el aumento de resistencia, esta acción solo mejora las características del hormigón en su estado fresco, permaneciendo constantes las características en cuanto a la resistencia.

Gráfica 4.23. Cantidad de agua requerida en funcion del asentamiento



Fuente: Elaboración propia.

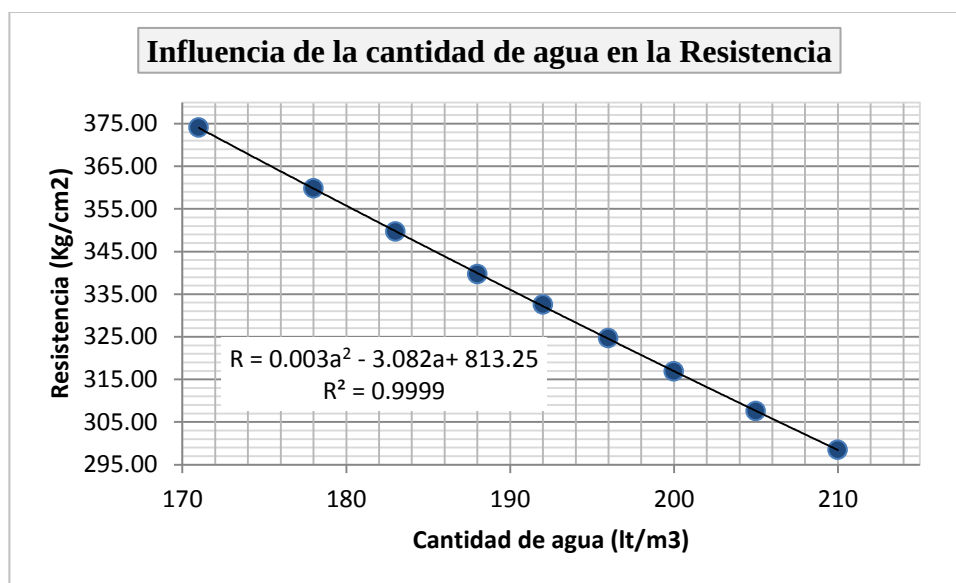
El efecto de variar la dosificación del agua en la mezcla, pasando por ejemplo de un revenimiento de 5 cm a uno de 17, se traduce en un notable incremento de dinero por metro cubico de hormigón, suponiendo que la resistencia se mantenga, es decir, la cantidad de agua necesaria para obtener un hormigón de asentamiento igual a 5cm es

de 184.98 lt/m³ y para obtener un asentamiento de 17.5 cm es de 205 lt/m³, existiendo un exceso de agua igual a 20.02 lt/m³.

Para mantener la relación agua/cemento se necesita 457.5 kg/m³ de cemento para obtener 5 cm de asentamiento, y 512.50 kg/m³ para obtener un asentamiento de 17.5 cm, arrojando un incremento de cemento de 55 kg/m³, el costo del incremento del agua de mezclado, no debe ser desestimado.

Se debe tomar en cuenta, que las condiciones de trabajabilidad deben ser alcanzadas utilizando la menor cantidad de agua posible.

Grafica 4.24. Comportamiento de la resistencia en funcion del incremento de la cantidad de agua



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la gráfica 4.23 el incremento de agua de acuerdo al asentamiento requerido indica la variación proporcional, es decir, a medida que aumenta la cantidad de agua aumenta así también el asentamiento, observando este comportamiento, la cantidad de agua necesaria para obtener los asentamientos entregados por incorporación de aditivos en la mezcla y la disminución de la

resistencia de acuerdo a éste aumento de agua manteniendo la relación A/C, manteniendo la cantidad de cemento se plasma en la siguiente tabla.

Tabla 4.16. Aumento de la cantidad de agua y disminución de la resistencia según asentamiento obtenido en mezclas con aditivo

Tipo de aditivo	Dosis	Asentamiento	Cantidad de agua (lt/m³)		Aumento cantidad de agua	Resistencia (Kg/cm²)		Disminución de la Resistencia
	(ml/Kg)	(cm)	Utilizada	Necesaria	%	Teórica	Practica	%
<i>Sika Aer</i>	0.2	4.3	184.88	184.88	0.00	345.99	356.74	3.11
	0.3	5.1	184.84	184.84	0.00	346.07	353.62	2.18
	0.4	6.3	184.79	184.79	0.00	346.17	355.73	2.76
<i>Sikament-180</i>	3	5.3	184.88	184.88	0.00	345.99	366.38	5.89
	4	7.6	184.84	186.976	1.16	341.87	370.33	8.32
	5	8.7	184.79	189.022	2.29	337.87	378.1	11.91
<i>Sikament-320</i>	4	10	183.6	191.44	4.27	333.18	362.14	8.69
	8	12.5	183.15	196.09	7.07	324.25	364.22	12.33
	16	17	182.69	204.46	11.92	308.52	366.12	18.67
<i>Sika Aer</i>	0.2	4.6	183.6	183.6	0.00	348.52	381.16	9.36
	0.3	5.3	183.15	183.15	0.00	349.41	385.51	10.33
	0.4	6.3	182.69	184.558	1.02	346.63	399.08	15.13
<i>Sikament-180</i>	3	5.8	182.69	183.628	0.51	348.47	363.83	4.41
	4	8.5	181.32	188.65	4.04	338.60	366.34	8.19
	5	9.3	177.69	190.138	7.01	335.70	376.37	12.11
<i>Sikament-320</i>	4	10.6	182.69	192.556	5.40	331.03	413.67	24.97
	8	13.4	181.32	197.764	9.07	321.07	418.58	30.37
	16	17.5	177.69	205.39	15.59	306.79	422.93	37.86

Fuente: Elaboración propia.

Según se indica en la tabla 4.16, la cantidad de agua que debió utilizarse para obtener los mismos asentamientos obtenidos en mezclas con incorporación de aditivos arroja resistencias mínimas a la resistencia de diseño, el aumento de la cantidad de agua indica el porcentaje de agua que se debió aumentar para obtener esos asentamientos, y este aumento de agua demuestra el porcentaje de disminución de la resistencia, tal cual se observa en la tabla, la incorporación de aditivos cumple dos funciones

correlativamente, disminuye la cantidad de agua, otorga trabajabilidad y aumento de resistencia.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se detallan las conclusiones y recomendaciones que surgen a partir del análisis de resultados obtenidos en el desarrollo del presente trabajo de investigación, tomando en cuenta el análisis de todos los aspectos fundamentales, desde la selección de los materiales y el diseño de las mezclas, hasta el análisis de los resultados a pruebas hechas al concreto fresco y endurecido.

5.1. CONCLUSIONES

En primer lugar se concluye de acuerdo a todo lo recopilado en pruebas realizadas al hormigón con aditivos en su estado fresco, en nuestro caso fue la utilización del Cono de Abrams para poder determinar la consistencia del hormigón

- ✓ El hecho de obtener mezclas trabajables con asentamientos óptimos indica que los componentes del hormigón, es decir la grava triturada, la arena y el cemento se encuentran cumpliendo las características de estudio.
- ✓ La granulometría de la grava triturada se encuentra dentro del rango establecido según el Código Boliviano del Hormigon CBH-87 las partículas no tienen tamaños superiores a las 1 plg, debido a este tamaño máximo nominal la mezcla no requiere grandes cantidades de agua.
- ✓ El valor del módulo de finura de las dos clases de cemento influyeron de diferente manera, las mezclas elaboradas con cemento portland IP 40 igual a 18.87% ofrecen mezclas con mejores asentamientos en comparación a las mezclas elaboradas con cemento IP 30, la desventaja es que debido a este porcentaje de finura el agua de mezclado es rápidamente absorbido por la cantidad superior de partículas de cemento y de arena, llevando a la mezcla a perder trabajabilidad mucho antes que el otro tipo de mezcla.

- ✓ Podemos decir que las mezclas con incorporación de aditivo a dosis medias no especificadas en la hoja técnica de los productos generan trabajabilidad óptimas al igual que las mezclas máximas, debido a que el aumento entre dosis medias y máximas se encuentra en un 25% en cuanto a trabajabilidad y del 3% en resistencia, por lo tanto, el uso de este valor medio de dosis significaría un ahorro considerable en cuanto al factor económico.
- ✓ El aditivo Sika Aer utilizado como aditivo plastificante incorporador de aire de rango mínimo, si cumple su función de aumentar la trabajabilidad de las mezclas en comparación con aquellas sin introducir aditivo, además según la dosis de aditivo la mezcla se vuelve más trabajable dando un aumento del 19 % en dosis de 0.3 y 0.4 ml/Kg de cemento, dando asentamientos de 4.6 hasta 5.3 cm respectivamente. En cuanto a la reducción de agua, no se vio ningún cambio debido a que las proporciones establecidas en la hoja técnica del aditivo la dosis máxima es de 0.4 ml/kg de cemento y porque no es un aditivo reductor de agua, el aumento de trabajabilidad en comparación a mezclas sin aditivo es del 16%.
- ✓ El aditivo Sikament-180 utilizado como la segunda opción de aditivo plastificante y reductor de agua, reacciona de mejor manera con el contacto de las partículas del cemento portland IP 30, demostrando una buena trabajabilidad durante más tiempo en comparación con las mezclas elaboradas con cemento IP 40, brindaron valores de asentamiento de 5.3 cm en una dosis mínima de 3 ml/Kg y de 9.3 cm en una dosis máxima de 5 ml/Kg, además se llegó a reducir la cantidad de agua establecida en el diseño de la mezcla en un 5%. Los asentamientos estuvieron dentro de lo establecido no sobrepasaron las 8 plg y tampoco fueron menores a los 2 cm, concluyendo que a medida que aumenta la dosis de aditivo aumenta la trabajabilidad y se reduce el contenido de agua.

- ✓ El aditivo Sikament-320 fue el que ofreció mayor trabajabilidad, en comparación con los demás aditivos, ya que, se obtuvo asentamientos de 17.5 cm a una dosis de 16 ml/Kg para mezclas tipo IP 40, y de 17 cm para mezclas de tipo IP 30 una diferencia de 0.5 cm, revenimiento que no superan las 8 plg, dato establecido en el trabajo de investigación. La reducción de agua en comparación a las establecidas por el ACI se reduce en un 14 %, comparando con mezclas sin aditivo la trabajabilidad aumenta en un 75 %, porcentaje obtenido utilizando la dosis de aditivo máxima de 16 ml/Kg de cemento, por lo tanto, decir que a medida que aumenta la dosis de aditivo la mezcla se vuelve más trabajable y se reduce la cantidad de agua de manera significativa.
- ✓ Las mezclas elaboradas en el trabajo de investigación con aditivos Sikament-320 a una dosis de 16 ml/kg de cemento arrojaron valores de asentamientos superiores entre las demás mezclas, por lo que su trabajabilidad y cohesividad adecuada permitió que la mezcla no presentara el fenómeno de segregación.
- ✓ Los resultados obtenidos por cada clase de los aditivos plastificantes y superplastificantes ofrecen mayores asentamientos, mayores resistencias, que las mezclas con aditivos y cemento portland IP 30, es mucho más manejable, y fácilmente colocable, ofrecen mayor tiempo de trabajabilidad, la velocidad de hidratación del cemento es menor al de las mezclas con cemento portland IP 40 lo que impide que la mezcla inicie rápidamente su fraguado.

Las siguientes conclusiones están basadas según los resultados del hormigón cuando se encuentra en su estado endurecido, sometidos a pruebas de ensayo mecánicas.

- ✓ Las mezclas fueron elaboradas con agregados triturados por lo que esta característica incidió en la obtención de resistencias que se encuentran por encima de la resistencia de diseño igual a 350 Kg/cm², tanto en mezclas con

y sin aditivos, debido a que presenta mejor adherencia entre partículas componentes del hormigón.

- ✓ En cuanto a la resistencia el aditivo Sika Aer ofrece un aumento del 3.5 % en comparación con mezclas elaboradas sin aditivo, debido a que el aditivo Sika Aer incorpora aire, el porcentaje no es muy elevada debido a que este tipo de aditivo ofrece manejabilidad a través de la incorporación de pequeñas burbujas de aire, pero no aumentando la resistencia, en la mayoría de los casos a porcentajes superiores a los utilizados la resistencia tiende a disminuir.
- ✓ Las resistencias obtenidas mediante el uso del aditivo Sikament-180 se encuentran alrededor de 363.12 Kg/cm² (IP 30) a 381.16 Kg/cm² (IP 40) para una dosis de 3 ml/Kg aumentando en un 5%, de 364.22 Kg/cm² (IP 30) a 385.51 Kg/cm² (IP 40) para una dosis de 4 ml/Kg aumentando en un 5.5 %, y de 366.12 Kg/cm² (IP 30) a 399.08 Kg/cm² (IP 40) para una dosis de 5 ml/Kg aumentando en un 8.3 %, el aumento de resistencia entre dosis máxima y mínima de aditivo es del 1.58 % es decir que si se trata de mejorar la resistencia y economizar en aditivo conviene utilizar dosis medias.
- ✓ La resistencia a la compresión en mezclas con incorporación de aditivos Sikament-320 indican que a medida que se aumenta la dosis de aditivo aumenta la trabajabilidad y resistencia, debido a la reducción de agua en un 13 %, esta reducción es reemplazada por la incorporación del aditivo superplastificante y reductor de agua de alto rango , demostrando y cumpliendo con lo establecido, resistencias que llegan a los 400 Kg/cm² con cemento clase IP 40 y por encima de los 350 Kg/cm² con cementos clase IP 30. La diferencia de resistencia en comparación a las mezclas elaboradas sin aditivo es considerable, aumenta de 352.20 a 376.37 kg/cm² en un porcentaje del 7%.

- ✓ Del mismo modo que en las resistencias a la compresión, las probetas prismáticas elaboradas con y sin aditivo arrojaron resistencias variadas, partiendo desde las mezclas elaboradas cemento tipo IP 30 y aditivo Sika Aer se obtuvieron resistencias que aumentan en un 3 % la resistencia de mezclas sin aditivo, este mínimo aumento se debe a que este tipo de aditivo a través de la incorporación de burbujas de aire mejora la manejabilidad de las mezclas y actúa como refuerzo para los cambios de temperaturas frías, pero no es un aditivo que aumenta la resistencia de manera notoria, quizás por el hecho de que se compacte bien la mezcla la resistencia aumenta de manera mínima.
- ✓ Para mezclas elaboradas con aditivo Sikament-180 la resistencia en comparación a las mezclas sin aditivo varía según la dosis, conociendo la resistencia muestra sin aditivo igual a 34.88 kg/cm², podemos conocer cuánto asciende de acuerdo a la dosis empleada de aditivo, para aquellas a 3 ml/kg se encuentra entre 35.93 a 41.46 kg/cm² a dos clases de cemento respectivamente, produciendo un aumento del 3% y 16%, para una dosis de 4 ml/Kg aumento de resistencia de 4% y 20.5%, para una dosis de 5 ml/kg dosis máxima de 5% y 35.5%, resultados de una disminución de agua y sustitución por esta clase de aditivo.
- ✓ En la realización del ensayo a flexión todas las vigas llegaron a fisurarse dentro del tercio central de luz de la viga, las resistencias a flexión soportadas por las vigas elaboradas con aditivo Sikament-320 fueron elevadas en comparación con las mezclas a diferentes clases de cemento y aditivos, el hecho ocurre porque las condiciones desde su estado fresco fueron mejoradas en gran proporción, debido a que el aditivo además de otorgar trabajabilidad, otorga el aumento de resistencia de hasta un 30% de lo indicado, distribuye de manera uniforme el calor que desprende el cemento especialmente en

aquellos de alto módulo de finura, la variación de mezcla con aditivo Sikament-320 y sin aditivo fue del 25 %.

- ✓ Al elaborar este concreto se siguió un determinado procedimiento el cual puede emplearse en la elaboración de un concreto que demande ser más fluido debido a la incorporación de aditivos Sika. Esto nos permite tener ya referencias del empleo de estos tipos de aditivos a variadas dosis que las indicadas en la ficha técnica, además poder realizar más estudios respecto a esto, para ir perfeccionando el uso de estos aditivos.
- ✓ Las correlaciones entre ensayos mecánicos nos dan una idea muy precisa de que ellos están perfectamente ligados entre sí, y que muchas de sus propiedades son influidas por los mismos factores como, la manera de cura, la forma de compactación de las mezclas tanto en probetas cilíndricas como prismáticas.
- ✓ El costo de este tipo de hormigón es mucho mayor a un hormigón tradicional, debido a la presencia de aditivos y el aumento en la cantidad de cemento; pero el beneficio en el aumento de asentamientos sin la necesidad de incrementar cantidades extras de agua, el alcanzar resistencias altas, la durabilidad que tiene, lo hace también una buena opción a tomar en cuenta.
- ✓ De acuerdo al análisis del comportamiento reológico del hormigón en su estado fresco y el análisis de precios realizado resulta conveniente trabajar con mezclas de cemento portland IP 30, por que la trabajabilidad se mantiene durante más tiempo que las otras mezclas y porque se llegaría a reducir el costo en un 2 % por m³ de hormigón.

5.2. RECOMENDACIONES

Como recomendaciones generales de la investigación se presenta las siguientes:

- ✓ Se recomienda que al retomar este tema como fin de investigación, se profundice en la parte de inicio de fraguado y final de fraguado, a través del ensayo Método del aparato de Vicat, ya que debido a la limitación de estos equipos y disponibilidad no se ha podido obtener resultados sobre los que se puede concluir adecuadamente.`
- ✓ Es recomendable que si se desea continuar con la investigación, se evalúe la parte económica de la misma, para poder concluir sobre lo que tan conveniente resulta el uso de aditivos para disminuir costos en la elaboración de concretos resistentes para la construcción de carreteras.
- ✓ Al elaborar las mezclas con y sin aditivos es recomendable utilizar un sobre diseño en el rango del 10-20 % para evitar un sobre diseño escaso o excesivo.
- ✓ En caso de no elaborar las mezclas con los aditivos utilizados en este trabajo de investigación, es necesario que se establezcan nuevamente la capacidad de reducción de agua de mezclado que generan las diferentes dosificaciones de aditivo.
- ✓ Se debe tener en cuenta que el procedimiento de diseño de las mezclas expuesto por el comité ACI 211.1 sirve como guía de diseño de mezclas de hormigón para pavimentos rígidos con una relación A/C igual a 0.4, por ello se recomienda realizar pruebas previas a las mezclas diseñadas con él, a fin de verificar y ajustar estos diseños para que estén de acuerdo a las necesidades propias de cada uno, evitando resultados no deseados.
- ✓ Para obtener resistencias similares a las alcanzadas en este trabajo de investigación, es necesario utilizar los mismos materiales, y la dosificación

indicada en este trabajo, usar aditivos plastificantes y superplastificantes que permitan reducir la cantidad de agua sin afectar la hidratación del cemento.

- ✓ Se recomienda que las probetas cilíndricas como prismáticas deben ser elaboradas siguiendo las normas ASTM, el curado debe ser el mismo para todas las muestras, los especímenes no deben presentar daños externos, en ese caso los resultados no llegan a ser precisos.
- ✓ Por otra parte, realizar mayor número de probetas tanto cilíndricas como prismáticas para garantizar resultados más confiables y una mejor aproximación de resultados de las muestras.
- ✓ La decisión de trabajar con cemento portland IP 30 o IP 40 y determinado tipo de aditivo implica realizar un análisis de costo, por lo que se recomienda consultar con la revista de precios actualizada, y decidir que mezcla resulta más económica, debido que la diferencia mínima de precio en grandes escalas resulta un valor considerable de dinero a ahorrar o invertir.