

# **CAPITULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1. INTRODUCCIÓN**

Actualmente, los avances de la tecnología tanto en el concreto como en muchos otros materiales, ya son parte de la vida integral de las sociedades desarrolladas y no desarrolladas; por tal razón, la investigación se vuelve un medio innegable para el desarrollo de los pueblos, que sin lugar a dudas ya sea con mayor o menor grado de investigación se enriquecen cada vez más.

Los concretos son una combinación de agregados tanto grueso como fino, agua y cemento. Es el componente de más amplio uso en la construcción de pavimentos rígidos, teniendo como función brindar una capa de rodadura cómoda y segura para los usuarios de la vía donde se construye. Los pavimentos rígidos se constituyen en una gran alternativa a la hora de realizar obras de infraestructura vial. Sin embargo, a pesar de esta consideración, estas obras han sufrido inconvenientes y fallas que ha generado una disminución considerable en su efectividad y durabilidad, generando como consecuencia una incomodidad en los usuarios ya que el mantenimiento de estas vías restringe su uso. Tal afirmación, ha llevado a buscar nuevas alternativas en lo que se refiere a los materiales que componen el concreto con el fin de mejorar sus propiedades. Esto implica que las exigencias respecto al concreto, sean cada vez mayores volviéndose común encontrar dentro de la literatura, términos como hormigones de alta durabilidad, alto rendimiento, aditivos, adiciones, etc. Por lo que muchos autores ya no conciben el concepto actual de concreto hidráulico sin el termino aditivos y/o adiciones.

En la ciudad de Tarija en los últimos años se ha podido observar un gran crecimiento y énfasis en la construcción de carreteras la cual representa la base fundamental de integración del departamento, es por eso que el presente trabajo de investigación pretende lograr una alternativa que contribuya de manera directa a los pavimentos viales rígidos mejorando sus propiedades mecánicas y beneficiando de manera directa a los usuarios. Sin embargo, también es importante mencionar que el costo del concreto con aditivos y/o adiciones difiere del concreto convencional, es por eso que la presente investigación

pretende realizar un análisis del concreto adicionados con materiales accesibles y costos relativamente bajos como lo es el grafito y las limaduras de hierro fundido.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

En nuestro diario vivir es común encontrarnos con varios problemas que se presentan en todo lo largo y ancho de nuestras calles y carreteras como ser baches y todo tipo de deformaciones que afectan bastante al tránsito de moviidades provocando que los usuarios y la sociedad en general sean los perjudicados al no hacer uso de estas estas vías de comunicación. Es necesario la realización de vías de comunicación en todo nuestro departamento que nos garanticen la seguridad y comodidad de transitarlas, siendo la población en general la beneficiaria de este tipo de proyectos debido a que se podrán trasladar de un lugar a otro sin problema alguno.

Así mismo el constante avance tecnológico que existe nos obliga a experimentar con nuevos productos, métodos y formas de aplicación del concreto en pavimentos viales, siendo este uno de los motivos por lo cual este último tiempo se realizaron varias investigaciones a los problemas que sufren los pavimentos por distintos efectos producidos ya sea por el medio ambiente, como lo son las variaciones de temperatura, la humedad y otros factores, o por las acciones del hombre, como las cargas de tránsito.

Al saber de estas necesidades se pretende realizar una investigación que satisfaga en cierta forma las necesidades antes mencionadas a través de un análisis de concretos adicionados con micro y nano materiales. Con la incorporación del grafito y limaduras de hierro fundido como aditivos en la mezcla de concreto se apunta a contribuir con las propiedades mecánicas del hormigón y así brindar una mayor seguridad y confort a la sociedad beneficiando al comercio entre ciudades de manera más rápida y eficiente, es decir un incremento e impacto en el comercio y la producción al tener vías en buen estado. De igual manera con el presente trabajo de investigación se pretende brindar un aporte al diseño de pavimentos rígidos al conocer la influencia que tiene estos materiales sobre las propiedades del concreto y el gran aporte a la descontaminación ambiental, en el caso de las limaduras de hierro que en su estado normal son considerados como desechos y no tienen uso alguno.

### **1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.3.1. Situación problemática**

Las estructuras viales son prioridad fundamental de la sociedad y de la economía de un territorio, son el medio principal de comunicación entre dos o más puntos. Un mal estado de estas recaería fuertemente como problemática para una comunidad y su desarrollo. 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. Dentro de la ciudad de Tarija no se realiza un buen control y monitoreo de las propiedades mecánicas de los pavimentos, siendo una de las causas por las que el pavimento tiende a fallar o deteriorarse a corto tiempo una vez ya empezado y puesto al servicio del usuario. 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.

Por lo anterior, y por muchas otras causas, la cantidad de vías y calles en buen estado dentro del territorio boliviano son muy pocas, debido a que los pavimentos muchas veces trabajan en condiciones extremas de diseño para las cuales no fueron diseñadas, y terminan lógicamente dañados antes del periodo para el cual se diseñó. Por consiguiente, para tratar de solucionar estos problemas se han realizado diversas investigaciones que buscan mejorar las capacidades mecánicas del concreto y por ende de los pavimentos rígidos adicionando a su composición diversos materiales que aumenten la resistencia y durabilidad y sean amigables con el medio ambiente.

En este sentido, nace la inquietud del investigador, de conocer la influencia que tiene cada uno de los dos materiales que serán adicionados al concreto, sobre las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido, trabajabilidad y resistencia.

#### **1.3.2. Problema**

Uno de los problemas más frecuentes en los pavimentos de hormigón es la aparición de fisuras a temprana edad, la durabilidad de estos pavimentos es fundamental los mismos que en muchos casos no llegan a cumplir su vida útil debido a distintos factores como ser:

falta de mantenimiento, las corrientes de agua, la temperatura entre otros provocando así distintos tipos de fallas como ser: fisuras, grietas, deterioro superficial, baches, etc.

Bajo estas perspectivas es imprescindible que el investigador se plante la siguiente cuestionaste. ¿Al adicionar grafito y limaduras de hierro fundido a la mezcla de hormigón, de qué manera influye en el comportamiento de las propiedades (flexión, compresión y trabajabilidad) del mismo?

Referente los equipos que se utilizaron, son instrumentos y equipos que se utilizan para el diseño de concretos por lo que se encuentran en el laboratorio de hormigones, de la Universidad Autonoma Juan Misael Saracho.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo general**

Analizar el comportamiento del concreto adicionado con diferentes porcentajes de grafito y limaduras de hierro fundido, comparando las principales propiedades mecanicas respecto a las de un concreto patron sin aditivo, de tal manera se pueda definir una aplicación potencial en pavimentos viales.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Seleccionar y caracterizar los componentes de la mezcla y aditivos (cemento, grava, arena, limaduras de hierro fundido y grafito).
- Realizar el diseño de una mezcla de concreto en el cual no se añada grafito ni limaduras de hierro fundido el cual será el patrón de comparación con las mezclas adicionadas.
- Realizar el diseño de la mezcla de concreto adicionada con diferentes porcentajes (0.5 %, 1 %, 1.5 %, 2 % y 4 %) de limaduras de hierro fundido y grafito.
- Analizar las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión, flexión y trabajabilidad) de la mezcla de concreto adicionada con grafito y limaduras de hierro fundido como así también de la mezcla sin adición.
- Comparar las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión, flexión y trabajabilidad) de la mezcla de concreto patrón sin aditivos con las propiedades de la mezcla de concreto adicionada.

## **1.5. HIPÓTESIS**

Si se realiza la adición de las limaduras de hierro fundido y grafito, dentro de una mezcla de concreto y estableciendo ciertos porcentajes de adición, entonces se obtendrá posibles mejoras en las distintas propiedades mecánicas (flexión, compresión y trabajabilidad) de concreto que podrá ser evaluada en busca de los criterios necesarios para su aplicación en obras viales.

## **1.6. DEFINICIÓN DE VARIABLES**

### **1.6.1. Variable independiente**

Limaduras de hierro fundido y grafito expresado en porcentajes de adición.

### **1.6.2. Variable dependiente**

Propiedades mecánicas del concreto: la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y trabajabilidad.

## **1.7. UNIDADES DE ESTUDIO**

### **1.7.1. Unidad de estudio**

La finalidad del trabajo de investigación fue la de analizar la influencia de las limaduras de hierro fundido y grafito en los concretos, por tal motivo, el elemento estudiado, es decir, la unidad de estudio corresponde a las a las mezclas de hormigón para pavimentos rígidos.

### **1.7.2. Población**

De acuerdo a nuestro problema y objetivo principal en la investigación, la población de estudio que proporciona resultados a nuestro trabajo de investigación está constituida por las mezclas de hormigón para pavimentos rígido con grafito y limaduras de hierro fundido.

### **1.7.3. Muestra**

Debido a que la muestra es un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible, en la realización del presente trabajo de investigación se consideró como muestra los componentes de la mezcla de hormigón para pavimentos de concreto los cuales son extraídos de la ciudad de Tarija en el caso del cemento y agregados (charajas, Tarija).

#### **1.7.4. Muestreo**

El muestro está enmarcado en los diferentes ensayos realizados a las mezclas de concreto, contemplando los distintos porcentajes de limaduras de hierro fundido y grafito correspondientemente añadidos a la mezcla, contemplando las metodologías de acuerdo a la normativa AASHTO y ASTM las cuales se encuentran dentro del manual correspondiente a la Administradora Boliviana de Carreteras ABC. Con los cuales posteriormente se realizó una comparación con la mezcla de concreto patrón.

### **1.8. MÉTODO Y TÉCNICA EMPLEADA**

#### **1.8.1. Método**

Deductivo, como es de conocimiento este método es uno de los más usados dentro del ámbito investigativo y se basa principalmente en partir de una idea general deductiva hacia una concertación específica de resultados. Bajo este criterio se tomó el método deductivo como el modelo referencia en la presente investigación, el mismo que dio inicio a partir de una deducción de los posibles beneficios en proporción a la utilización de los aditivos. Dentro de los beneficios contemplados que involucra principalmente las propiedades mecánicas del hormigón mencionadas anteriormente, se estableció el porcentaje de grafito y limaduras de hierro fundido de mayor conveniencia que se va añadir a la mezcla, obteniendo también las propiedades mecánicas en cada una de ellas. Bajo esta situación general deductiva se encaminó hacia el lado específico logrando concretar la influencia de los aditivos usados en la mezcla de hormigón.

#### **1.8.2. Técnica**

Técnica experimental, el tipo de estudio de investigación realizado se encuentra relacionado de cierta manera con el método experimental el mismo que nos permitió responder a la hipótesis anteriormente planteada a partir de los resultados obtenidos. Esta investigación puede considerarse de tipo experimental debido a que se manipulan variables independientes (aditivos) para que sus efectos sobre la variable dependiente (propiedades del hormigón) se comporten de una manera esperada, 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, al aver partido desde la elaboración de muestras de hormigón con y sin la incorporación de aditivos, analizando posteriormente la influencia de estos componentes a través de una comparación de mezclas, el estudio del presente trabajo de investigación se consira parte de una aplicación técnica experimental. También es importante dejar en claro que la revisión de documentos estuvo basada en normas, tablas, manuales y especificaciones, estableciendo así los pasos a seguir y definir el intervalo de resultados aceptables para el material en estudio recogiendo todos aquellos datos que se registraron en el laboratorio.

## **1.9. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

### **1.9.1. Análisis e interpretación de la información**

El análisis y la interpretación de la información se encuentra basada en los diferentes ensayos obtenidos en las tres propiedades estudiadas (resistencia a la flexión, compresión y trabajabilidad) al consolidar una idea clara del comportamiento de estas mezclas adicionadas respecto a la mezcla adicionada y mezcla patrón, esta fue encaminada de acuerdo a la hipótesis planteada en la presente investigación. La validez de la investigación será determinada de acuerdo a la veracidad de los resultados certificados en planillas de laboratorio y avaladas por el responsable de laboratorio de hormigones y resistencia de materiales de la U.A.J.M.S y en base a ello el trabajo de investigación obtendrá mayor fuerza en sus conclusiones.

### **1.10. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

El presente proyecto de grado está enfocado en el análisis de las propiedades mecánicas de concreto con grafito y limaduras de hierro fundido (resistencia compresión, flexión y trabajabilidad), contribuyendo así de cierta manera con información a la universidad autónoma Juan Misael Saracho y por ende a toda comunidad universitaria.

La presente investigación se desarrolló en la ciudad de Tarija, en la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho los agregados utilizados son propios de la región específicamente proporcionados por la planta de áridos del Servicio Departamental de Caminos SEDECA, el cual se encuentra ubicado en la comunidad de Charajas provincia Uriondo y el cemento utilizado para la elaboración de las mezclas de hormigón es “El

Puente IP-30”, todos los ensayos realizados partiendo desde la caracterización hasta la obtención de las resistencias alcanzados a través de los ensayos de compresión y flexión como así también el desarrollo de la trabajabilidad a través del Cono de Abrams fueron realizados en el laboratorio de la mencionada casa superior de estudios.

Haciendo referencia al contexto teórico se tomó en cuenta conceptos fundamentales de los pavimentos rígidos como ser su clasificación, partes, funcionalidades, etc. Como así también las mezclas de hormigón como ser características, propiedades y descripción detallada de todo y cada uno de sus componentes.

Desde el punto de vista práctico se realizó la caracterización de todos los materiales componentes de la mezcla como así también de los materiales aditivos a utilizar para posteriormente centrarse en el diseño de la mezcla que contenga la adición de limaduras de hierro fundido y otra con la adición del grafito haciendo variar los porcentajes de adición definidos, por último una vez realizado lo anterior se pudo enfocar y entrar de lleno al objetivo general, estudiando así las propiedades mecánicas mencionadas y comparando las mismas con una mezcla convencional sin ninguna adición, para finalmente presentar conclusiones generales y algunas recomendaciones resultantes de la presente investigación.

También es importante mencionar, que, de manera global con el presente trabajo investigativo se apuntó a ampliar y consolidar conocimientos respecto al uso de micro y nano materiales como lo son el grafito y las limaduras de hierro fundido con influencia dentro del campo de pavimentos viales ya que estos se han convertido en estructuras viales importantes en los últimos años.

## **CAPITULO II**

### **ASPECTOS GENERALES DEL CONCRETO EN LOS PAVIMENTOS**

El pavimento rígido es una estructura construida por el hombre para que la circulación de los vehículos sea fácil, cómoda y segura, con el interés de mejorar la calidad de vida de los habitantes considerando que es fácil de construir y muy durable; consta básicamente de una losa de concreto colocada sobre una capa de material seleccionado llamado sub-base. El concreto de la losa es el material que soporta el peso de los vehículos, la acción del sol y la acción de la lluvia, por tanto, debe ser resistente y durable; si bien las losas son estructuras rígidas, una vez fisuradas tienden a deteriorarse con facilidad reduciendo de esta manera la serviciabilidad y vida útil del pavimento. El concreto posee una serie de características que lo mantienen como el material estructural más utilizado en el mundo; sin embargo, presenta algunas limitaciones, como ser la baja capacidad de deformación antes de la rotura y la baja resistencia a fuerzas de flexión.

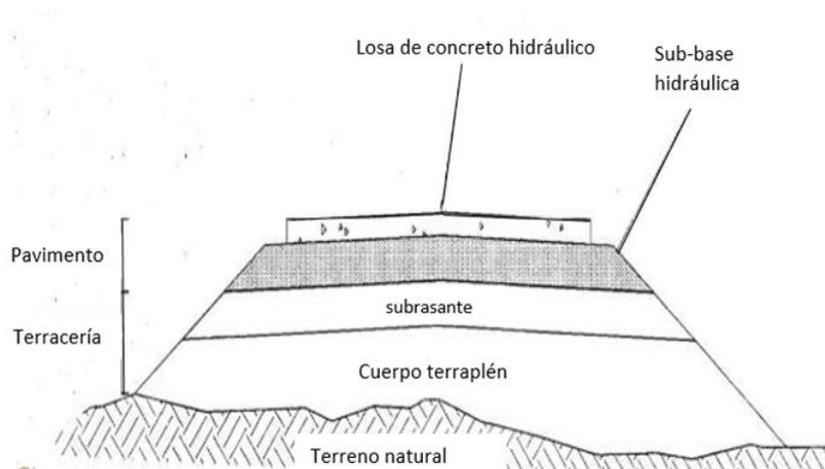
#### **2.1. PAVIMENTOS RÍGIDOS**

Un pavimento rígido consiste básicamente en una losa de concreto simple o armado, apoyada directamente sobre una base o sub-base. La losa, debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, absorbe gran parte de los esfuerzos que se ejercen sobre el pavimento lo que produce una buena distribución de las cargas de rueda, dando como resultado tensiones muy bajas en la sub-rasante. Se compone de losas de concreto hidráulico que en algunas ocasiones presenta un armado de acero, tiene un costo inicial más elevado que el flexible, su periodo de vida varía entre 20 y 40 años; el mantenimiento que requiere es mínimo y solo se efectúa (comúnmente) en las juntas de las losas y por eventos emergentes.

Los pavimentos rígidos o hidráulicos como se les conoce también, difieren de los pavimentos de asfalto o flexibles, en que poseen una resistencia considerable a la flexión, además de que se ven considerablemente afectados por los cambios de temperatura. Los pavimentos rígidos están conformados por una capa de material granular dispuesta sobre la sub-rasante y una superficie de rodamiento conformada por una losa de concreto de espesor variable. En los pavimentos rígidos la losa estructural de concreto sufre deformaciones muy pequeñas bajo la acción de 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. Las fuertes cargas actuales 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 va teniendo.

Figura 2.1. Estructura de un pavimento rígido



Fuente: Componentes de un pavimento rígido<sup>1</sup>

### 2.1.1. Componentes de los pavimentos rígidos

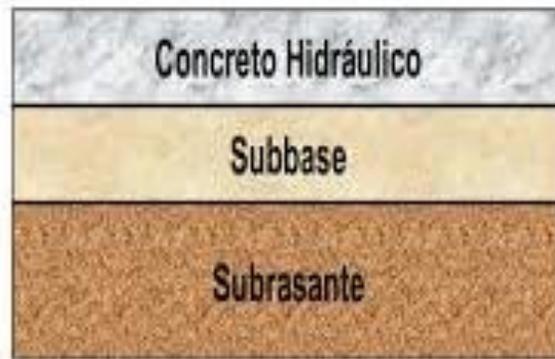
**Sub-rasante:** Es la superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte y relleno), sobre la cual se coloca la estructura del pavimento. Las principales funciones de la capa sub-rasante es la de recibir y resistir las cargas del tránsito que le son transmitidas por el pavimento como así también transmitir y distribuir de modo adecuado las cargas del tránsito al cuerpo del terraplén.

**Sub-base:** Es la capa de la estructura de pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura de pavimento, de tal manera que la capa de sub-rasante las pueda soportar. Se utiliza además como capa de drenaje y contralor de ascensión capilar de agua, protegiendo así a la estructura de pavimento, por lo que generalmente se usan materiales granulares.

<sup>1</sup> <https://www.ingenieria.xyz/civil/componentes-de-la-estructura-rigida/>

Superficie de rodadura: es el plano superior del pavimento, que soporta directamente las cargas del tráfico. En particular, debe soportar los esfuerzos tangenciales. Es la capa superior de la estructura de pavimento, construida con concreto 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 sub-rasante dado que no usan capa base.

Figura 2.2. Componentes del pavimento rígido



Fuente: Instituto mexicano del cemento y del concreto

### **2.1.2. Esfuerzos en pavimentos rígidos**

El pavimento de hormigón posee una 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 la amplia superficie lo que origina que los pavimentos de hormigón no requieren de sub-rasantes resistentes.

Los pavimentos de concretos de manera general se encuentran sujetos a esfuerzos debido a las cargas, esfuerzos por temperaturas y otros.

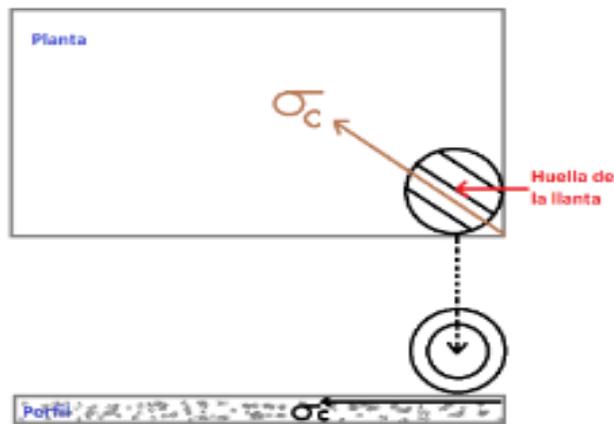
#### **2.1.2.1. Por efectos de las cargas**

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 formulas originalmente obtenidas por Westergaard. Estas fórmulas están sujetas a la hipótesis de que la losa está formada por un material elástico homogéneo e isótropo; que los esfuerzos

de interacción entre ella y el suelo soporte son verticales y proporcionales a las deflexiones de la propia losa y que esta es horizontal y de espesor constante.

La segunda hipótesis implica continuidad entre losa y apoyo. Westergaard estudio 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 en 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 orden 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 2.3. Situación de carga en un punto extremo



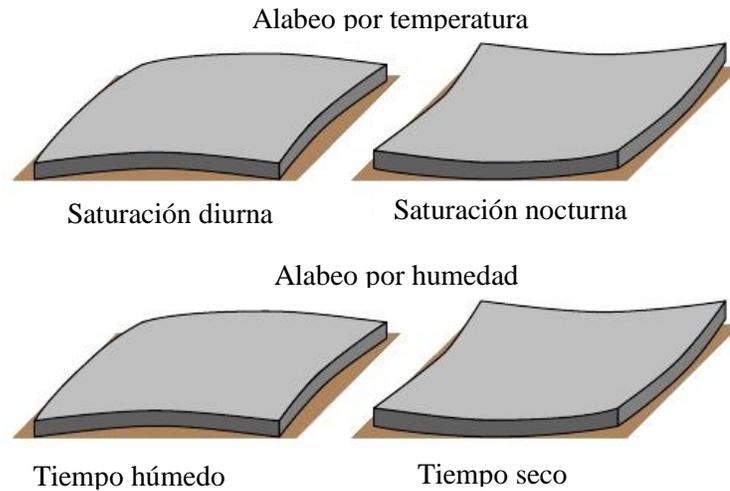
Fuente: Esfuerzos en pavimentos rígidos<sup>2</sup>

#### 2.1.2.2. Por efectos de temperatura

Son principalmente de dos tipos: los de alabeo, que se producen cuando la superficie superior e inferior de la losa están a diferentes temperaturas tratando así 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. Estos cambios bruscos provocan los diferentes esfuerzos en los pavimentos rígidos, si bien no son de gran magnitud y por tal motivo llegan a ser de menor importancia es importante tomarlos en cuenta o tener una idea general de los problemas que pueden llegar a causar la temperatura en nuestro pavimento rígido. En la figura 2.4 se muestra este fenómeno producido por efecto de la temperatura.

<sup>2</sup> <https://prezi.com/esfuerzos-y-deformaciones-en-pavimentos-rigidos/>

Figura 2.4. Esfuerzo por temperatura



Fuente: Esfuerzos en pavimentos rígidos<sup>3</sup>

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

## 2.2. EL CONCRETO

El concreto es una masa heterogénea constituida básicamente por agregados pétreos, cemento portland, agua y algunas veces aditivos y/o adiciones, que una vez endurecida tiene la característica de resistir esfuerzos mecánicos en especial los de compresión. Los agregados o áridos, constituyen el material llenante; están compuestos por una parte fina y por otra gruesa. El agregado fino comúnmente se lo conoce como arena y al agregado grueso como una grava o piedra triturada. La diferencia entre arena y grava se ha

<sup>3</sup> <https://prezi.com/esfuerzos-y-deformaciones-en-pavimentos-rigidos/>

establecido en forma conveniente y arbitraria tomando como base su tamaño. En general la arena, es aquella cuyo diámetro es inferior a 5 mm. El cemento portland es el pegante o ligante hidráulico, es decir, el material que en determinadas condiciones es capaz de endurecer con el transcurso del tiempo.

### **2.2.1. Funciones de los componentes**

#### **2.2.1.1. Funciones de la pasta**

Dentro de las funciones que cumple la pasta dentro del concreto se tiene:

En estado plástico sirve como lubricante dándole fluidez a la mezcla haciendo que sea más o menos trabajable.

Desarrolla la resistencia con el tiempo durante periodos de fraguado y de endurecimiento que permite el transporte, y moldeo del concreto en la obra.

En estado sólido obtura los espacios dejados por los agregados disminuyendo de esta forma la permeabilidad.

Presenta durabilidad ante factores agresivos como aguas y suelos sulfatados, etc.

Es el aglomerante o pegante encargado de ligar los agregados formando una piedra artificial con gran resistencia a la compresión.

#### **2.2.1.2. Funciones de los agregados**

En general los agregados desempeñan las siguientes funciones dentro de la masa de concreto: Se utilizan como material de relleno para hacer más económica la mezcla, evitan que se forme agrietas durante el proceso de fraguado de la pasta, junto con la pasta endurecida permiten altas resistencias a los esfuerzos de compresión, en un concreto correctamente elaborado, cada partícula de agregado, sin importar su tamaño, debe de estar rodeada de pasta, y todos los espacios completamente llenos de ella.

### **2.2.2. Ventajas del concreto**

Se utilizan como material de relleno para hacer más económica la mezcla.

Los materiales que se emplean en su fabricación son muy fáciles de encontrar y existen en todas las partes del mundo.

Mejora su resistencia con el pasar del tiempo.

Resiste diversas condiciones ambientales y tiene buena durabilidad (resistente al desgaste por roce de neumáticos en las carreteras, a los cambios de temperatura, etc.)

Es resistente al fuego (por lo menos hasta 400°C) y al envejecimiento. Se puede utilizar en cualquier tipo de obra de construcción, desde obras de arte (esculturas), pasando por estructuras para resistir cargas (pavimentos, presa, edificios, etc.) y no estructurales (adornos arquitectónicos y otros). Por su plasticidad inicial permite obtener una buena superficie de acabado.

### **2.2.3. Principales propiedades del concreto hidráulico para pavimentos rígidos**

El hormigón presenta dos estados fundamentales desde el punto de vista práctico. El estado fresco o plástico en el que admite ser manipulado para su adaptación a los encofrados previstos y el estado endurecido en el que ha adquirido una rigidez tal que impide su manipulación. Estos estados son sinónimos de las fases de colocación en obra y de uso. Dentro de estos dos estados el concreto hidráulico presenta muchísimas propiedades como la trabajabilidad, homogeneidad, resistencia, densidad, durabilidad etc. Sin embargo, las propiedades de mayor interés para la ingeniería de la construcción de este compuesto, son su resistencia a la compresión, trabajabilidad y su resistencia a la flexión siendo este último una de las principales propiedades en los pavimentos rígidos.

#### **2.2.3.1. Trabajabilidad del hormigón en los pavimentos**

La trabajabilidad es 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 satisfactoriamente. Principalmente se mide mediante el descenso en centímetros en el ensayo del cono de Abrams.

Según porrero, J., describe el termino trabajabilidad bajo dos conceptos. Uno, general, con la cual designamos como el conjunto de factores que permiten al concreto manejarlo, colocarlo en moldes y compactarlo adecuadamente. El otro concepto es específico para relacionarlo directamente con el termino asentamiento medido por el procedimiento normalizado del cono de Abrams.<sup>4</sup>

Una buena trabajabilidad facilita el transporte y el uso del hormigón, o sea la colocación en los encofrados y la compactación. Además, esta influye favorablemente en el costo de estas operaciones. En cuanto al hormigón endurecido, su resistencia y sobre todo su

---

<sup>4</sup> Curiel Fernández, Daniel E; García weffer, Juvenal; Diseño de una mezcla de Pavimento Maracaibo, Venezuela: Universidad Rafael Urdaneta 2006.

durabilidad, dependen directamente de una buena preparación, de un desencofrado perfecto y de una compactación adecuada, operaciones que pueden llevarse a cabo de modo correcto solo si la trabajabilidad es adecuada. Un componente muy importante de la trabajabilidad es la consistencia, siendo esta la oposición que presenta la masa en estado fresco a experimentar deformaciones. La consistencia es en sí un indicador de la trabajabilidad. Es muy sensible a las variaciones de agua en la masa, pudiendo considerarse que, para una composición dada, la consistencia de un hormigón es función de la cantidad de agua de amasado. En su puesta en obra, el hormigón además de tener la consistencia adecuada, debe rellenar perfectamente todos los huecos de un molde y adaptarse a las armaduras envolviéndolas para tener una buena adherencia.<sup>5</sup>

#### **2.2.3.1.1. Método del Cono de Abrams**

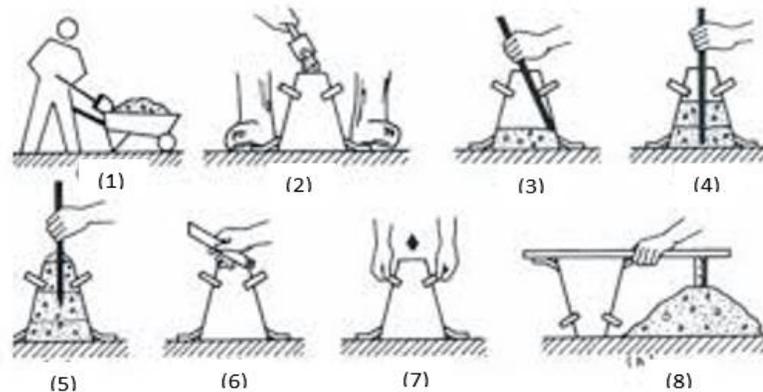
La manejabilidad de las mezclas de hormigón no puede ser medida directamente, el método de consistencia a partir del uso del cono de Abrams permite correlacionarla con otra característica que muy importante en el hormigón, el ensayo de asentamiento de la mezcla. El cono de Abrams es un ensayo muy sencillo de realizar y permite medir el revenimiento o asentamiento de un hormigón fresco, no requiere de un equipo complejo, costoso ni personal especializado para poder llevarlo a cabo y proporciona resultados satisfactorios. El método del cono de Abrams consiste simplemente en el llenado de un molde cónico mediante tres capas de igual espesor aproximado, varillando cada una de estas con 25 golpes de manera bien distribuida en toda la superficie de contacto, al realizarse el compactado de la última capa esta debe enrasarse de manera que totalmente plana la superficie superior del cono, por último se debe luego retirar el molde cuidadosamente en forma vertical e invertir rápidamente el cono a un costado de la mezcla para a raíz de ella poder medir el asentamiento del hormigón respecto a la parte superior del molde volcado (norma ASTM C143; AASHTO T119). En términos generales, podemos decir que cuando menor sea el asentamiento medido, mayor será el trabajo necesario por operarios y maquinarias para manipular el hormigón en la obra y viceversa, habiendo casos en los que se requiere obtener asentamientos bajos de acuerdo a las

---

<sup>5</sup> McMillan F.R. y Tuthill, Lewis H., Cartilla del concreto, IMCY, México D.F., 1989, p.48

exigencias propuestas. En la gráfica 2.5 se muestra secuencialmente las etapas para desarrollar el respectivo ensayo.

Figura 2.5. Pasos a seguir para el ensayo del cono de Abrams



Fuente: consistencia del hormigón<sup>6</sup>

#### 2.2.3.1.2. Método de la esfera de Kelly

Otra prueba que se utiliza para medir la trabajabilidad de una mezcla es la prueba de “la esfera de Kelly”, fundamentalmente norteamericana y se incluye en la norma ASTM C360-63. Consiste en determinar la profundidad a que un hemisferio de metal de 152 mm de diámetro y una masa de 13.6 kg se hundirá bajo su propia masa en concreto fresco. Es uno de los métodos usados como alternativa del cono de abrams ya que este es de origen antiguo el cual fue desarrollado en los años 50 en los Estados Unidos.

El uso de esta prueba se asemeja a la de asentamiento, es decir consiste en una verificación rutinaria de la consistencia del concreto para fines de control. En particular, la prueba de la esfera es más sencilla y es rápida de hacer y lo que es más importante, puede aplicarse al concreto en una carretilla o en formalete. A fin de evitar efectos límites, la profundidad del concreto que se prueba no debe ser menor de 200 mm, ni la menor dimensión lateral de 460 mm. En la siguiente tabla se muestra la correlación aproximada entre las pruebas de asentamiento con el cono o slump y la esfera de Kelly.

<sup>6</sup> <https://www.medida.consistencia del Hormigón. Cono de Abrams.>

Figura 2.6. Esfera de Kelly



Fuente: Trabajabilidad del concreto, Ing. Gerardo rivera

### **2.2.3.1.3. Factores que influyen en la trabajabilidad del concreto**

Factores que influyen la trabajabilidad del hormigón:

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 provocando que el hormigón en conjunto sea muy seco. Debe evitarse la utilización de arenas muy finas o muy gruesas; con las primeras se obtendrán mezclas que segregan y con las segundas existe la posibilidad de obtener mezclas ásperas

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 (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 (que es más débil). Este último transmite los esfuerzos de tracción y cizalladura.

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. La cantidad de pasta se reduce hasta un punto que no es suficiente para llenar los espacios vacíos y permitir que los agregados floten, la mezcla se volverá granulosa y áspera.

fluidez de la pasta

Una pasta con poca agua y mucho cemento será muy rígida, no podrá admitir la adición de los agregados sin llegar a ser enteramente inmanejable. Por lo 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 asentarán y el agua se acumulará en la superficie de la mezcla produciendo el fenómeno conocido como exudación.

La pasta fresca es una suspensión, mas 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 tanto, en mezclas plásticas la resistencia del concreto variará como una función inversa de la relación agua/cemento, la cual es una manera de expresar el grado de dilución.

#### **2.2.3.1.4. Asentamientos según el tipo de obra**

La metodología ACI 211 clasifica distintos tipos de trabajabilidad mediante los asentamientos y en función de las diferentes tipas de obras y tipos de colocación.

Tabla 2.1. Asentamientos sugeridos.

Asentamiento recomendados para diversos tipos de construcción y sistemas de colocación y compactación				
Consistencia	Asentamiento (mm)	Ejemplo de tipo de construcción	Sistema de colocación	Sistema de compactación
Muy Seca	0 - 20	Prefabricación de alta resistencia, revestimiento, de pantallas de cimentación.	Con vibradores de formaleta; hormigones de proyección neumática.	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión.
Seca	20 - 35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibración intensa.
Semi - seca	35 - 50	Pavimentos, fundaciones en hormigón simple.	Colocación con maquinas operadoras manualmente.	Secciones simplemente reforzadas.
Media	50 - 100	Elementos compactados a mano, losas, muros y vigas	Colocación manual	Secciones medianamente reforzadas, sin vibración.
Húmeda	100 - 150	Elementos estructurales esbeltos	Bombeo.	Secciones bastante reforzadas, sin vibración.
Muy húmeda	150 o más	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos "in situ"	Tubo - embudo tremie	Secciones altamente reforzadas, sin vibración.

Fuente: Elaboración propia

### 2.2.3.2. Resistencia a compresión

Neville, 1999. Algunas propiedades el concreto endurecido están relacionadas con esta resistencia, como son la densidad, durabilidad, etc. Pero 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 se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área y se expresa en términos de esfuerzo, generalmente en  $\text{kg/cm}^2$ , Mpa y con alguna frecuencia en libras por pulgada cuadrada (psi).

### 2.2.3.2.1. Rotura de probetas cilíndricas a compresión

La resistencia a compresión se mide mediante la rotura de probetas cilíndricas de concreto en una máquina de ensayos de compresión como se muestra en la figura 2.7, la resistencia a compresión se calcula a partir de la carga de ruptura dividida entre el área de la sección que resiste a la carga y reporta en  $\text{kg}/\text{cm}^2$ .

Figura 2.7. Ruptura de probetas cilíndricas a compresión



Fuente: Ensayos a compresión<sup>7</sup>

Este ensayo permite la determinación de la resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos de concretos moldeados en laboratorio o en campo u obtenidos por medio de la extracción de núcleos. Los especímenes de ensayo estándar son cilíndricos de concreto de 130 mm de diámetro y con una longitud de 300 mm o 100 mm de diámetro por una longitud de 200 mm. Pueden utilizarse cilindros de otras dimensiones, siempre y cuando cumplan con la relación (longitud / diámetro = 2). La diferencia de diámetro de un espécimen individual con respecto a los demás no debe ser mayor que 2 %. El número mínimo de especímenes es de 2 para especímenes de 150 mm de diámetro y 3 para especímenes de 100 mm de diámetro.

---

<sup>7</sup> [http://www.eis.unl.edu.ar/Laboratorio/Probetas\\_de\\_hormigon.pdf](http://www.eis.unl.edu.ar/Laboratorio/Probetas_de_hormigon.pdf)

Este método de ensayo consiste en la aplicación de una carga de compresión uniaxial a los cilindros moldeados o núcleos a una velocidad de carga especificada ( $0.25 \pm 0.05$  MPa/s). Como se mencionaba anteriormente la resistencia a la compresión del espécimen se calcula dividiendo la carga máxima obtenida durante el ensayo entre el área de la sección transversal del espécimen. La preparación de los especímenes debe ser desarrollado siguiendo la metodología de la ASTM C39 el cual se encuentra enmarcado dentro del manual de diseño de la Administradora Boliviana de Carreteras ABC. En resumen, la preparación de especímenes trata simplemente del llenado de moldes cilíndricos metálicos en diferentes capas y con la compactación adecuada, este procedimiento se debe realizar de manera precisa y los materiales deben ser proporcionados bajo normativas por el respectivo laboratorio donde se vaya a realizar.

Figura 2.8. Elaboración de probetas cilíndricas de hormigón ASTM C39



Fuente: Elaboración y terminado de probetas<sup>8</sup>

#### 2.2.3.2.2. Clasificación del concreto según su resistencia a compresión

Desde el punto de vista de la resistencia a la compresión a los 28 días el concreto puede clasificarse en función a sus diferentes tipos o clases de concreto a elaborar, existen diferentes normativas que sin duda alguna colaboran con esta clasificación tal es el caso de la Norma Boliviana NB-011 o como así también normativas planteadas por el Servicio Nacional de Caminos S.N.C. Esta clasificación es muy importante y a la vez extensa pues existen gran variedad de artículos y normativas que establecen una clasificación de la

<sup>8</sup> [http://www.eis.unl.edu.ar/Laboratorio/Probetas\\_de\\_hormigon.pdf](http://www.eis.unl.edu.ar/Laboratorio/Probetas_de_hormigon.pdf)

resistencia del concreto sin embargo a continuación se presenta un conjunto de tablas las cuales se podría decir que se encuentran dentro de las más sobresalientes en nuestro medio.

Tabla 2.2. Clasificación del concreto por su resistencia a compresión NB-011

Clase de concreto simple	Resistencia a compresión a los 28 días
PP	$\geq 40$ Mpa ( 400 Kg/cm <sup>2</sup> )
PI	$\geq 35$ Mpa ( 350 Kg/cm <sup>2</sup> )
P	$\geq 30$ Mpa (300 Kg/cm <sup>2</sup> )
AA	$\geq 28$ Mpa ( 280 Kg/cm <sup>2</sup> )
A	$\geq 21$ Mpa ( 210 Kg/cm <sup>2</sup> )
B	$\geq 18$ Mpa ( 180 Kg/cm <sup>2</sup> )
C	$\geq 16$ Mpa ( 160 Kg/cm <sup>2</sup> )
D	$\geq 13$ Mpa ( 130 Kg/cm <sup>2</sup> )
E	$\geq 11$ Mpa ( 110 Kg/cm <sup>2</sup> )

Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras A.B.C.

Tabla 2.3. Clasificación por su resistencia a compresión “general o internacional”

Clase de concreto simple	Resistencia a compresión a los 28 días
Normal	140 a 350 ( kgf/cm <sup>2</sup> )
De alta Resistencia	350 a 1000 ( kgf/cm <sup>2</sup> )
De ultra alta resistencia	> 1000 ( kgf/cm <sup>2</sup> )

Fuente: Tecnología del hormigón Ing. Civil Viterbo O'Reilly

Tabla 2.4. Clasificación por su resistencia a compresión “S.N.C”

Clase de concreto simple.	Resistencia a compresión a los 28 días
H° 400	400 ( Kg/cm <sup>2</sup> )
H° 350	350 ( Kg/cm <sup>2</sup> )
Tipo A	210 ( Kg/cm <sup>2</sup> )
Tipo B	180 ( Kg/cm <sup>2</sup> )
Tipo C	160 ( Kg/cm <sup>2</sup> )
Tipo D	130 ( Kg/cm <sup>2</sup> )
Tipo E	110 ( Kg/cm <sup>2</sup> )

Fuente: Servicio Nacional de Caminos S.N.C.

Tabla 2.5. Clasificación “Ordenanza de urbanismo y construcción NCH 170”

Clase de concreto simple	Resistencia a compresión a los 28 días
H 5	50 ( Kgf/cm <sup>2</sup> )
H 10	100 ( Kgf/cm <sup>2</sup> )
H 15	150 ( Kgf/cm <sup>2</sup> )
H 20	200 ( Kgf/cm <sup>2</sup> )
H 25	250 ( Kgf/cm <sup>2</sup> )
H 30	300 ( Kgf/cm <sup>2</sup> )
H 35	350 ( Kg/cm <sup>2</sup> )
H 40	400 ( Kg/cm <sup>2</sup> )
H 45	450 (Kg/cm <sup>2</sup> )
H 50	500 ( Kg/cm <sup>2</sup> )

Fuente: Ordenanza municipal de urbanismo y construcción INN-NCH 170.

Tabla 2.6. Clasificación “Ordenanza de urbanismo y construcción NCH 170”

Clase de concreto simple.	Resistencia a compresión a los 28 días
H 3	50 ( Kgf/cm <sup>2</sup> )
H 3.5	100 ( Kgf/cm <sup>2</sup> )
H 4	150 ( Kgf/cm <sup>2</sup> )
H 4.5	200 ( Kgf/cm <sup>2</sup> )
H 5	250 ( Kgf/cm <sup>2</sup> )
H 5.5	300 ( Kgf/cm <sup>2</sup> )
H 6	350 ( Kg/cm <sup>2</sup> )

Fuente: Ordenanza municipal de urbanismo y construcción INN-NCH 170

### 2.2.3.2.3. Factores que influyen en la resistencia a compresión

Contenido de cemento

El cemento es el material más activo de la mezcla de concreto, por tanto, sus características y sobre todo su contenido (proporción) dentro de la mezcla tienen una gran influencia en la resistencia y a menor contenido la resistencia de concreto va a ser menor.

Relación agua-cemento y contenido de aire

En el año de 1918 Duff Abrams formulo la conocida “Ley de Abrams”, según la cual, para los mismos materiales y condiciones de ensayo, la resistencia del concreto completamente compactado, a una edad dada, es inversamente proporcional a la relación agua – cemento. Este es el factor más importante en la resistencia del concreto:

$$\text{Relación agua – cemento} = A/C$$

Donde:

A = Contenido de agua en la mezcla en kg.

C = Contenido de cemento en la mezcla.

De acuerdo con la expresión anterior, existen dos formas de que la relación agua-cemento y por tanto la resistencia del concreto disminuya aumentando la cantidad de agua de la mezcla o disminuyendo la cantidad de cemento. Esto es muy importante tenerlo en cuenta, ya que en la práctica se puede alterar la relación agua-cemento por adiciones de agua después de mezclado el concreto con el fin de restablecer asentamiento o aumentar el tiempo de manejabilidad, lo cual va en detrimento de la resistencia del concreto y por tanto esta práctica debe evitarse para garantizar la resistencia para la cual el concreto fue diseñado.

Influencia de los agregados

La distribución granulométrica juega un papel importante en la resistencia del concreto, ya que si esta es continua permita la máxima capacidad del concreto en estado fresco y una mayor densidad en estado endurecido, lo que se traduce en una mayor resistencia. La forma y textura de los agregados también influyen. Agregados de forma cúbica y rugosa permiten mayor adherencia de la interface matriz-agregado respecto de los agregados redondeados y lisos, aumentando la resistencia del concreto. Sin embargo, este efecto se compensa debido a que los primeros requirieren mayor contenido de agua que los segundos para obtener la misma manejabilidad.

Tamaño máximo del agregado

Recientes investigaciones sobre la influencia del tamaño máximo del agregado en la resistencia del concreto concluyen lo siguiente:

Para concretos de alta resistencia, mientras mayor sea la resistencia requerida, menor debe ser el tamaño del tamaño del agregado para que la eficiencia del cemento sea mayor. Para concretos de resistencia intermedia y baja, mientras mayor sea el tamaño del agregado, mayor es la eficiencia del cemento. En términos de relación agua-cemento, cuando esta es más baja, la diferencia en resistencia del concreto con tamaño máximo, menores o mayores es más pronunciada.

#### Fraguado del concreto

Otro factor que afecta la resistencia del concreto es la velocidad de endurecimiento que presenta la mezcla al pasar del estado plástico al estado endurecido, es decir el tiempo de fraguado. Por tanto, es muy importante su determinación, esto es logrado para el caso de especímenes de prueba mediante la inmersión de probetas a una piscina con agua de forma que cubra la totalidad de las probetas las mismas que deben permanecer allí según el periodo previsto para la rotura.

#### Edad del concreto

En general, se puede decir que a partir del momento en que se presenta el fraguado final del concreto, comienza realmente el proceso de adquisición de resistencia, el cual va aumentando con el tiempo. Con el fin que la resistencia del concreto sea un parámetro que caracterice sus propiedades mecánicas, se ha escogido arbitrariamente la edad de 28 días como la edad en la que se debe especificar el valor de la resistencia del concreto, también se debe tener en cuenta que las mezclas de concreto con menor relación de agua – cemento aumentan de resistencia más rápidamente que las mezclas de concreto con mayor relación de agua – cemento.

#### Temperatura

La temperatura es otro de los factores externos que afecta la resistencia del concreto y su incidencia es la siguiente:

Durante el proceso de curado, temperaturas más altas aceleran las reacciones químicas de la hidratación aumentando la resistencia del concreto a edades tempranas, sin producir efectos negativos en la resistencia posterior. Temperaturas muy altas durante los procesos de colocación y fraguado del concreto incrementan la resistencia a muy temprana edad,

pero afectan negativamente la resistencia a edades posteriores, especialmente después de los 7 días, debido a que se da una hidratación superficial de los granos de cemento que producen una estructura físicamente más pobre y porosa.<sup>9</sup>

La resistencia a la compresión del concreto para pavimento rígidos se incrementa a medida que la relación agua/cemento disminuye. Debido a los múltiples factores que afectan la relación de la resistencia a compresión y la relación agua cementante, es imposible establecer todavía una relación general y específica que permita alcanzar un concreto de alta resistencia incluso cuando el agregado grueso lo suficientemente resistente.

### **2.2.3.3. Resistencia a flexión**

La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tracción del concreto (hormigón). Es una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto no reforzada. Se mide mediante la aplicación de cargas a vigas de concreto de seis pulgadas de sección (150 x 150 mm.) de sección transversal y con luz de como mínimo tres veces el espesor. La resistencia a la flexión se expresa como el Modulo de Rotura (MR.) y es determinada mediante los métodos de ensayo ASTM C78 (cargada en los puntos tercios) o ASTM C293 (cargada en el punto medio).

El módulo de rotura es cerca del 10% al 20% de la resistencia a compresión, en dependencia del tipo, dimensiones y volumen del agregado grueso utilizado, sin embargo, la mejor correlación para los materiales específicos es obtenida mediante ensayos de laboratorio para los materiales dados y el diseño de la mezcla. El Modulo de rotura (MR) determinado por la viga cargada en los puntos tercios es más bajo que el módulo de rotura determinado por la viga cargada en el punto medio, en algunas ocasiones tanto como en un 15%.

#### **2.2.3.3.1. Rotura de probetas prismáticas a flexión**

En este resumen se presentan los lineamientos sobre la determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios conforme a la

---

<sup>9</sup> <https://www.enconcreto.com/blog/detalle/resistencia-mecanica-del-concreto-y-compresion>

normativa ASTM C78. Es importante volver a recalcar que la presente sección presenta de manera resumida la metodología de ensayo de la norma mencionada.

Módulo de rotura: Es el valor obtenido mediante el procedimiento indirecto para determinar la resistencia a la tensión del concreto por el ensayo a la flexión de una viga.

Equipo y dispositivo de aplicación de carga: Se debe utilizar un dispositivo capaz de aplicar cargas en los tercios del claro de prueba de tal modo que las fuerzas sean perpendiculares a las caras horizontales de la viga y se distribuyan y apliquen uniformemente en todo lo ancho. Este dispositivo debe ser capaz de mantener fija la distancia entre los puntos de carga y los puntos de apoyo del espécimen con una tolerancia mínima; además, las reacciones deben ser paralelas a la distancia del punto de aplicación de cada una de las cargas a la reacción más cercana dividida entre la altura de la viga, no debe ser menor de uno. Los bloques para la aplicación de la carga y de apoyo de la viga deben ser de acero del mismo ancho o mayor que el de la viga con una altura que no exceda de 65 mm, medida a partir del centro de giro.

Figura 2.9. Dispositivo de resistencia a flexión



Fuente: Ensayos a flexión

Preparación del espécimen: Los especímenes deben cumplir con el procedimiento específico de la normativa mencionada, la longitud del espécimen debe ser la distancia entre apoyos más 50 mm como mínimo, es decir 25 mm por cada lado de longitud sobrante

fuera de los apoyos en el dispositivo. Por lo general se recomienda que la distancia entre apoyos sea tres veces el peralte de la viga con una tolerancia de 2 %. Esta distancia debe ser marcada en las paredes de la viga antes del ensaye. Cabe recalcar que las caras laterales del espécimen deben estar en Angulo recto con las caras horizontales. Todas las superficies deben ser lisas y libres de bordes, hendiduras, etc.

Procedimiento: Se debe voltear el espécimen sobre un lado con respecto a la posición del moldeado. Se centra en los bloques de apoyo; estos a su vez deben estar centrados respecto a la fuerza aplicada. Los bloques de aplicación de carga se ponen en contacto con la superficie del espécimen en los puntos tercios entre los apoyos. Se debe tener contacto total entre la aplicación de la carga y los bloques de apoyo con la superficie del espécimen. Se debe lijar la superficie del espécimen o bien usarse tiras de cuero si la separación de la línea de contacto entre ellas y los bloques es mayor de 0.1 mm. Se recomienda que el lijado de las superficies laterales de los especímenes sea mínimo, ya que puede cambiar las características físicas de las mismas y por lo tanto afectar los resultados.

Aplicación de la carga: La carga se debe aplicar a una velocidad uniforme, tal que el aumento de esfuerzo de las fibras extremas no exceda de 980 kpa/min (10kgf/cm<sup>2</sup> por min), permitiéndose velocidades mayores antes del 50 % de la carga estima de ruptura.

Calculo y expresión de los resultados: Si la fractura se presenta en el tercio medio del claro el módulo de ruptura se calcula como sigue:

$$R = \frac{(P*L)}{(b*d^2)}$$

Donde:

R = Modulo de ruptura (MPa)

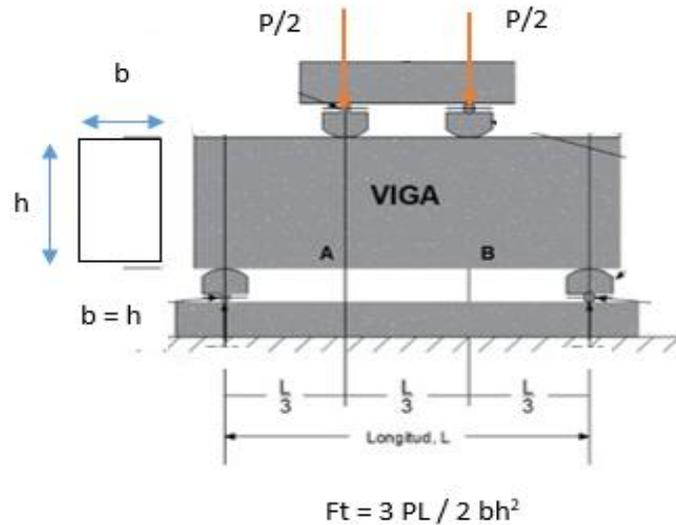
P = Carga maxima aplicada (KN)

L = Distancia entre apoyos (mm)

b = Ancho del espécimen (mm)

d = Altura del espécimen (mm)

Figura 2.10. Resistencia a la flexión de vigas cargada en los puntos tercios



Fuente: Ensayos a flexión de vigas<sup>10</sup>

#### 2.2.3.3.2. Importancia de la resistencia a flexión

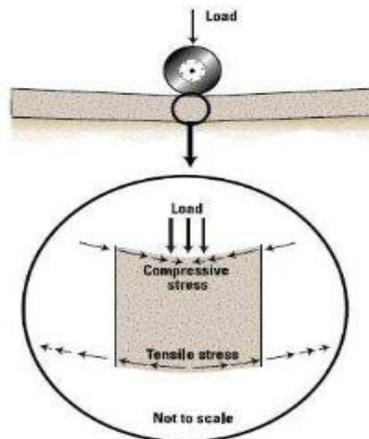
Los diseñadores de pavimentos utilizan una teoría basada en la resistencia a la flexión, por lo tanto, puede ser requerido el diseño de la mezcla en el laboratorio, basado en los ensayos de resistencia a la flexión, o puede ser seleccionado un contenido de material cementante, basado en una experiencia pasada para obtener el Modulo de ruptura de diseño (MR) de diseño. Se utiliza también el Modulo de Rotura para el control de campo y de aceptación de los pavimentos. Se utilizan muy poco el ensayo a flexión para el concreto estructural de edificaciones. Las agencias y empresas que no utilizan la resistencia a la flexión para el control de campo, generalmente hallaron conveniente y confiable el uso de la resistencia a compresión para juzgar la calidad del concreto entregado.

Las vigas probetas deben ser fabricadas adecuadamente en el campo. Las mezclas para pavimentos de concretos son secas o semi secas, con asentamientos de  $\frac{1}{2}$  a  $2 \frac{1}{2}$  pulgadas

<sup>10</sup> [http://www.construaprendiendo.blogspot.com/Laboratorio/Probetas\\_de\\_hormigon.pdf](http://www.construaprendiendo.blogspot.com/Laboratorio/Probetas_de_hormigon.pdf)

(1.25 a 6.25 cm), se consolidan por vibración de acuerdo a normativa y se golpean los laterales para liberar las burbujas de aire. Para asentamientos más altos, después de aplicarles golpes con varilla, se golpean los moldes para liberar las burbujas de aire y se agita o pincha a lo largo de los laterales para garantizar su consolidación. Nunca permita que se sequen las superficies de la viga en ningún momento, manténgalas inmersa en agua saturada mínimamente antes de ensayarla.

Figura 2.11. Resistencia a la flexión en pavimentos



Fuente: ACPA 1994

### 2.2.3.3.3. Problemas que afectan la resistencia a flexión

Los ensayos de flexión son extremadamente sensibles a la preparación, manipulación y procedimientos de curado de las probetas. Las vigas suelen adquirir grandes pesos llegando a sufrir grandes daños a la hora de ser transportadas de un lugar a otro si no se tienen los recaudos convenientes. Permitir que una viga se seque dará como resultado más bajas resistencias. Las vigas deben ser curadas de forma normativa y bajo un control estricto, no se deben colocar otras muestras encima de ellas durante el curado ni tampoco se deben realizar cualquier tipo de golpes contra el espécimen durante su desmolde, curado o durante el desarrollo del ensayo.

Al tratarse en este caso de volúmenes de hormigón dentro de probetas prismáticas de mayor peso como se mencionaba anteriormente, ocasiona que se generen mayores probabilidades de desarrollar el procedimiento preciso, por ejemplo, a la hora de desarrollar el varillado de la mezcla, esta será de mayor dificultad necesitando así de un

auxiliar en laboratorio o de algún personal de ayuda. Por tanto, el cumplimiento de todos estos requerimientos en el lugar de trabajo es extremadamente difícil lo que da frecuentemente como resultado valores de Modulo de Rotura no confiables y generalmente bajos. Un periodo corto de secado puede producir la caída brusca de la resistencia a flexión. En resumen, se podría decir que los mayores problemas que puedan generar resistencias a la flexión mayormente son ocasionados por errores en laboratorio a la hora de desarrollar el procedimiento riguroso y al no tener el cuidado respectivo.

#### 2.2.3.4. Otras propiedades

##### Densidad

La densidad en este caso del hormigón constituye también una característica importante en el concreto, siendo algunas veces indispensable para la estabilidad de la estructura. Tal es el caso de puentes elevadizos, presas de gravedad, etc. Es la cantidad de peso por unidad de volumen variará con la clase de áridos y forma de colocación en obra. El hormigón o concreto convencional, normalmente usado en pavimentos, edificios y otras estructuras, tiene un peso específico (densidad, peso volumétrico, masa unitaria) que varía de 2200 hasta 2400 kg/m<sup>3</sup>. La densidad de los hormigones ligeros oscilara entre 200 a 1500 kg/m<sup>3</sup>; los hormigones apisonados de 2000 a 2200 kg/m<sup>3</sup>; vibrados 2300 a 2400 kg/m<sup>3</sup>; centrifugados 2400 a 2500 kg/m<sup>3</sup> proyectados 2500 a 2600 kg/m<sup>3</sup> estos valores son plasmados en la siguiente tabla.

Tabla 2.7. Clasificación del concreto por su peso unitario

Clase de concreto	Peso unitario
De peso liviano	< 2000 ( kgf/cm <sup>2</sup> )
De peso normal	2000 a 2600 ( kgf/cm <sup>2</sup> )
De peso pesado	> 2600 ( kgf/cm <sup>2</sup> )

Fuente: Tecnología del hormigón Ing. Civil Viterbo O'Reilly

##### Durabilidad

La durabilidad es la propiedad del concreto de soportar aquellas exposiciones que pueden privarlo de su capacidad de servicio tales como ciclos de congelamiento y deshielo, sustancias químicas, ciclos de humedecimiento y secado, ciclos de calentamiento y enfriamiento, y otras semejantes como expansiones producidas por agregados que

reaccionan químicamente con el cemento, suelos y aguas agresivas, etc. La resistencia a algunas de ellas puede fomentarse con el uso de aditivos inclusores de aire, cementos portland con puzolana, cementos resistentes a los sulfatos y otras adiciones solidas especiales, normalmente el uso de productos sika es de gran importancia dentro de la durabilidad ya que nos proporciona ventajas a muy corto plazo y en diferentes variedades. Entonces como se puede observar la durabilidad es muy importante en todo y cada una de las etapas del hormigón en pavimentos rígidos, una buena durabilidad del hormigón garantizaría mayor tiempo de vida útil y por lo tanto cumpliría totalmente con las expectativas planteadas de diseño del pavimento y no necesitaría de un mantenimiento o de mantenimientos continuos lo cual representaría grandes gastos en la obra y no sería factible para el contratista.

#### **2.2.4. Especificaciones de resistencias en los pavimentos rígidos**

##### **2.2.4.1. Resistencia a compresión en los pavimentos**

La resistencia a compresión a compresión es uno de los parámetros específicos dentro del diseño de los pavimentos rígidos que ha tomado gran protagonismo en estos últimos tiempos, esto realizado por los diferentes laboratorios de ensayos investigativos que estudian las resistencias del concreto. Esta propiedad mecánica de resistencia del concreto no es la principal para el diseño de pavimentos, debido a que los esfuerzos de compresión que resultan en la superficie de contacto entre las llantas de un vehículo y el pavimento son aproximadamente iguales a la presión de inflado de las mismas, la cual en el peor de los casos puede llegar a ser de 5 o 6 kg/cm<sup>2</sup>; dejando en claro que los pavimentos rígidos son estructuras que no trabajan a compresión directa. A pesar de esta consideración la resistencia a compresión es una de las especificaciones que sin duda alguna se mantienen vigentes en los pavimentos rígidos .<sup>11</sup>

En base a estudios realizados por la empresa boliviana “S.A. Concretec” dedicada al análisis, producción y comercialización de materiales de construcción tales como el concreto y otros se realiza la clasificación de resistencias a compresión de acuerdo al tipo de obra la cual incluye a los pavimentos rígidos.

---

<sup>11</sup> [http://www.20Resistencia.delconcreto.en.pavimentos.rigidos\(2\).pdf](http://www.20Resistencia.delconcreto.en.pavimentos.rigidos(2).pdf)

Tabla 2.8. Resistencia a compresión del concreto

Tipo de hormigón	Usos recomendados
100 kg/cm <sup>2</sup> (H-10)	Hormigón pobre y nivelación de terrenos
150 kg/cm <sup>2</sup> (H-15)	Hormigón pobre y nivelación de terrenos, piso y contra piso
180 kg/cm <sup>2</sup> (H-18)	Elementos estructurales, muro de contención, pisos, losas, vigas y columnas
210 kg/cm <sup>2</sup> (H-21)	Vigas, losas, zapatas, pavimentos rígidos, canales y muros de contención
230 kg/cm <sup>2</sup> (H-23)	Pavimentos con armaduras, estacionamiento, columnas.
250 kg/cm <sup>2</sup> (H-25)	Puentes, columnas, estructuras y fundaciones especiales
280 kg/cm <sup>2</sup> (H-28)	Puentes, columnas, estructuras y fundaciones especiales
300 kg/cm <sup>2</sup> (H-30)	Puentes, columnas, estructuras y fundaciones especiales
350 kg/cm <sup>2</sup> (H-35)	Puentes, columnas, estructuras y fundaciones especiales
400 kg/cm <sup>2</sup> (H-40)	Puentes, columnas, estructuras y fundaciones especiales

Fuente: NB/ISO 9001 IBNORCA

Como se puede observar la resistencia mínima recomendada para pavimentos rígidos es de 210 kg/cm<sup>2</sup>, cabe recalcar que la tabla 2.8 se encuentra abalada por Norma Boliviana NB/ISO9001 IBNORCA (sistema de gestión de calidad certificado N° EC-039105).

Por otro lado, el Sistema de Contrataciones Estatales Bolivia “SICOES” dentro de su gran variedad de licitaciones para pavimentos rígidos especifica resistencias a compresión de diseño a partir de los 210 kg/cm<sup>2</sup> para adelante, variando en función de la transcurtibilidad de tráfico que se tenga en dicho proyecto y el tipo de carretera (principal, secundaria, local, rural, etc.)

Tabla 2.9. Especificaciones de resistencia a compresión

Tipo de obra	Entidad	Especificación de resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Posibilidad de uso de aditivo
Ampliación de pavimento rígido calle Mariscal Sucre	Gobierno Autónomo Municipal de Revelo - Potosí	37	si
Construcción de pavimento rígido calle Ayacucho - Villarroel	Gobierno Autónomo Municipal de Viacha.	37	si
Construcción pavimento rígido, av. Pisagua entre puente kala chaca y Paraguay z/Santa Barabra	Gobierno Autónomo Municipal de Viacha.	45	si

Fuente: Sistema Contrataciones Estatales “SICOES”

### 2.2.4.2. Resistencia a flexión en los pavimentos

La flexión es la propiedad más importante en el diseño de los pavimentos rígidos. Como bien se sabe, en los pavimentos rígidos es la propia losa de hormigón la que asume el papel de elemento estructural, cuando una carga actúa sobre el centro de la losa se produce una flexión de la misma, de forma que en el caso ideal los máximos esfuerzos se localizan en la cara inferior de la misma. De ahí que la propiedad que suele especificarse para los hormigones de pavimentos sea su resistencia a la flexión.

Tabla 2.10. Resistencia mínima flexión para pavimentos rígidos

Tipo de hormigón	Resistencia a flexión (MPa)
HF-5.0	5.0
HF-4.5	4.5
HF-4.0	4.0
HF-3.5	3.5

Fuente: Especificaciones de diseño para obras de carreteras y puentes Norma UNE-EM 12390-5

Tabla 2.11. Resistencias a flexión mínimas para pavimentos

Clase	Tipo de hormigón	Resistencia especificada a compresión Mpa	Resistencia especificada a flexión MR. Mpa	Relación agua cemento	Uso general
A	Estructura especial	> 28	N/A	0.44	Obras de gran envergadura: Puentes, losa superior de alcantarillas de tráfico directo, elementos prefabricados y reservorios
B	Estructural	Entre 21 y 28	N/A	0.58	Losas, vigas, viguetas, columnas, nervaduras de acero, alcantarillas de cajos, estribos, muros zapatas.
C	Para elementos trabajando a flexión	N/A	> 3.5	0.46	Pavimentos rígidos, tanques y reservorios cilíndricos o cónicos.
D	Para compartaste con rodillo o con pavimentadora	N/A	> 3.5	0.36	Pavimentos, presas de gravedad, etc.
E	No es estructural	Entre 14 y 18	N/A	0.65	Zapatas sin armar replantillos, bordillos, contrapisos
F	ciclópeo	> 12	N/A	0.7	Muros estribos y plintos no estructurales
G	Relleno fluido	Entre 0.5 y 8	N/A	-	Rellenos para nivelación, bases de pavimentos, rellenos de zanjas y excavaciones

Fuente: Especificaciones para la construcción de caminos y puentes (MOP – 001-F-2002)

El manual de especificaciones técnicas para el diseño de pavimentos rígidos de la Administradora Boliviana de Carreteras nos especifica resistencias de 4.5 MPa, sin embargo este valor no es de orden estricto ya que se encuentra bajo diferentes criterios de consenso que puedan llegar a tener entre el contratista y la entidad contratada, dejando abierto también la utilización de aditivos en caso de llegar a las resistencias que requiera la entidad contratante, a continuación se pone como ejemplo las diferentes especificaciones de resistencia a flexión en de pavimentos rígidos.

Tabla 2.12. Especificaciones de resistencias en pavimentos rígidos

Tipo de obra	Entidad	Especificación de resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Posibilidad de uso de aditivo
Ampliación de pavimento rígido calle Mariscal Sucre	Gobierno Autónomo Municipal de Revelo - Potosí	37	si
Construcción de pavimento rígido calle Ayacucho - Villaruel	Gobierno Autónomo Municipal de Viacha.	37	si
Construcción pavimento rígido, av. Pisagua entre puente kala chaca y Paraguay z/Santa Barabra	Gobierno Autónomo Municipal de Viacha.	45	si

Fuente: Sistema de Contrataciones Estatales Bolivia “SICOES”

### 2.3. CEMENTO PORTLAND

En términos generales, un cemento se define como un material con propiedades adhesivas y cohesivas que le dan la capacidad de unir fragmentos sólidos para formar una mezcla resistente y durable.

Sin embargo, esta definición incluye gran cantidad de materiales cementantes y los que realmente importan desde el punto de vista de la construcción son los cementos hidráulicos; llamados así porque tienen la peculiaridad de desarrollar sus propiedades (fraguado y endurecimiento) cuando se encuentran en presencia del agua, en virtud a que experimentan una reacción química con ella. El cemento constituye el 7 y el 15% de volumen total del concreto; es el componente activo de la mezcla y por lo tanto influye en todas sus características.

De los componentes del concreto, el cemento hidráulico es el más costoso por unidad de peso. Sin embargo, comparado con otros materiales manufacturados, es poco costoso si

se tiene en cuenta la alta tecnología utilizada en el elevado grado de control que requiere su elaboración.

### **2.3.1. Materias primas y fabricación**

El cemento está compuesto por dos materias primas principales: Materiales calizos y materiales arcillosos. Los primeros suministran cal y los segundos sílice y alúmina; además de estos materiales, el cemento contiene pequeñas cantidades de óxido de hierro, óxido de magnesio, álcalis y anhídrido sulfúrico. El cemento se obtiene a partir de materias primas abundantes en la naturaleza, pero como es difícil encontrar las calizas con la cantidad precisa de arcilla la industria recurre a la dosificación artificial de estos insumos en proporciones determinadas, utilizando para ello dos procesos, por vía seca y por vía húmeda.

El proceso de producción del cemento se inicia con la extracción de la piedra caliza y la arcilla de depósitos o canteras naturales. El proceso de fabricación propiamente dicho se inicia con la trituración, la materia prima que viene de las canteras en trozos con tamaños que alcanzan los cincuenta centímetros y a un metro, es reducida en su trituración en dos o tres etapas. La mezcla efectuada en los depósitos de materia prima triturada se lleva, generalmente por transportadores de banda, a los molinos de crudo que son grandes cilindros giratorios donde por medio de bolas metálicas. Se continúa la reducción de tamaño, iniciada en las trituradoras, hasta diámetros del orden de  $\frac{1}{2}$  milímetro. La trituración y la molienda de la materia prima pueden efectuarse, también en una sola etapa, empleando molinos verticales que por medio de grandes rodillos realizan la reducción del tamaño en una sola operación. Esta es la etapa donde se establece la primera gran diferencia entre los principales sistemas de producción de cemento: el proceso húmedo y el proceso seco.

En el proceso húmedo la molienda de las materias primas ya dosificadas se efectúa con adición de agua al molino, por lo que el material resultante de los molinos es un lodo, lo que recibe el nombre de pasta, y que debe ser manejado por tubería y homogenizado (como etapa posterior del proceso) en grandes tanques llamados balsas, en los cuales mediante agitación mecánica se impide la sedimentación.

La vía seca la dosificación va antecedida del secado de los materiales y la molienda se efectúa sin adición de agua, con lo cual el material que sale de los molinos es un polvo que se denomina harina, y que se deposita en los silos especiales en los cuales se homogeniza por medio de agitación con aire.

La mezcla de las materias primas procede de los silos de homogenización en el proceso seco o de balsas; en el húmedo esta lista para pasar a la etapa de calcinación. Esta es la fase más importante del proceso seco pues es allí donde ocurren las transformaciones fundamentales que dan origen al cemento y a las propiedades de conglomerante hidráulico. La calcinación se efectúa en hornos rotatorios inclinados. En estos hornos la pasta (o harina) se deposita, pasando sucesivamente por zonas de mayor temperatura, y donde alcanza la máxima temperatura, unos 1450°C, que se logra quemando algún combustible. En los hornos de proceso seco, (ya que no es necesario eliminar el agua en exceso que se tiene en el proceso húmedo), se emplea el aire caliente que sale del horno para iniciar el calentamiento de las materias primas. Esto se realiza en grandes torres llamadas pre calentadores, lo cual se reduce notablemente el consumo energético que constituye uno de los mayores costos en la producción del cemento.

En la parte final del horno se produce la fusión de varios de los componentes y se forman gránulos de 1 a 3 centímetros de diámetro, que constituyen lo que se conoce como Clinker. Ya en los últimos metros del horno, detrás de la llama, el Clinker empieza a perder temperatura, iniciándose la etapa de enfriamiento.

Para poder utilizar el cemento en todo su poder conglomerante es necesario que se encuentre en forma de polvo fino, pues solo así puede efectuarse de forma eficiente la hidratación de sus partículas. Esta finura se obtiene por la molienda de Clinker. En esta etapa se efectúa la adición de pequeños porcentajes de yeso, con el fin de controlar el tiempo de fraguado (endurecimiento) del cemento resultante. En los cementos portland con puzolana se adiciona en esta etapa la puzolana.

Se tiene entonces, que, según el tipo de cantidad de materiales adicionados, puede recibir diferentes denominaciones y ofrecer una amplia gama de propiedades para distintos usos en la construcción.

### 2.3.2. Composición química del cemento

Las materias primas usadas en la manufactura del cemento portland (cal, sílice, alúmina y óxido de hierro), interaccionan en el horno hasta alcanzar un estado de equilibrio químico para formar una serie de productos más complejos. Dichos productos se mencionan en la tabla 2.9.

Tabla 2.13. Compuesto del cemento portland

Compuesto	Formula química	Abreviatura usada
Silicato Tricálcico	$3\text{CaOSiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato Dicálcico	$2\text{CaOSi}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato Tricálcico	$2\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Ferro Aluminato Tetracálcico	$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CA}_4\text{F}$

Fuente: Tecnología del hormigón Ing. Civil Viterbo O'Reilly

Generalmente la formula química de estos constituyentes se usa en la forma abreviada con el único fin de facilitar su expresión y no utilizar un término complicado.

### 2.3.3. Tipos de cementos

Debido a la notable evolución de la industria del cemento se puede contar con diversos tipos. Generalmente el cemento portland se clasifica de acuerdo a la normalización del país (en Bolivia se usa la norma NB – 011). Las normas ASTM (American Society for Testing and Materials) de los estados unidos, clasifica 5 tipos de cementos enumerándolos del I al V, dentro de esta enumeración también podemos encontrar diversas clasificaciones internas que se tiene, haciendo mucho más amplio su estudio y contemplación.

La norma también se refiere a los cementos tipo I-A, II-A y III-A, que son exactamente los tipos I, II y III, excepto que durante el proceso de pulverización de Clinker se le adiciona un material incorporador de aire. Estos cementos le dan al concreto una mayor durabilidad en especial a la acción del congelamiento y deshielo, así como una mejor manejabilidad en estado plástico. También existe en cemento I-M que es el mismo tipo, pero con resistencia superior.

## 2.3.4. Propiedades del cemento portland

### 2.3.4.1. Hidratación y calor de hidratación

En presencia de agua, los compuestos del cemento ( $C_2S$ ,  $C_3S$ ,  $C_3A$  y  $C_4AF$ ) se hidratan produciendo la pasta que con el paso del tiempo forman una masa y más tarde endurece dando origen a propiedades mecánicas útiles en aplicaciones estructurales.

Cuando el agua y el cemento reaccionan, se genera calor de hidratación durante los procesos de fraguado y endurecimiento haciéndose importante en estructuras de considerable masa, debido a que, si no se disipan rápidamente, puede ocurrir un incremento en la temperatura del concreto, produciéndose una rápida evaporación del agua y cambios volumétricos que llevan a la contracción del material y su eventual agrietamiento. Las secciones estructurales delgadas disipan el calor de hidratación difundándolo al ambiente; intercambio que se hace más difícil a medida que se engrosa la sección. La cantidad de calor generado durante los primeros 7 días para los diferentes tipos de cementos, expresados como porcentajes del total para el tipo I, se muestran en la tabla 2.10, donde claramente nos muestra una forma general de las características y porcentajes de calor (calor de hidratación) que pueden llegar a generar cambios notables en la fabricación del cemento por eso de su importancia. Como se puede observar el calor de hidratación juega un papel muy importante en todo sentido dentro de la formación de hormigones por lo que se debe tener mucho cuidado con este fenómeno el cual está directamente relacionado con el agua de mezclado involucrando de igual manera a los demás componentes de la mezcla.

Tabla 2.14. Cantidades aproximadas de calor generado en los primeros 7 días

Tipo de cemento	Características	% de calor generado
I	Uso general	100
II	Moderada resistencia a los sulfatos	80 - 85
III	Desarrolla altas fuerzas iniciales	40 - 60
IV	Desarrolla bajo calor de hidratación	60 - 75
V	Desarrolla alta resistencia a los sulfatos	

Fuente: Tecnología del hormigón Ing. Civil Viterbo O'Reilly

#### 2.3.4.2.- Peso específico

El peso específico o densidad del cemento es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto que ocupa en esa masa. En el cemento portland puro, su valor varía entre 3,10 y 3,15 gr/cm<sup>3</sup>; en el cemento portland con adiciones suele estar entre 2,90 y 3,15 gr/cm<sup>3</sup>. El valor del peso específico, en realidad no indica la calidad de este, su valor es usado principalmente para el diseño de mezclas.

#### 2.3.4.3. Superficie específica o finura

Esta es una de las propiedades más importantes del cemento, y se obtiene en la etapa de molienda. Como la hidratación comienza sobre la superficie de las partículas de cemento, el área superficial total del cemento representa el material susceptible de hidratación. De esta manera, la velocidad de hidratación, y por tanto la resistencia, dependerá del grado de finura de los granos. Una gran finura de los granos de cemento implica un mayor costo; además de hidratarse con mayor rapidez por la exposición a la atmosfera.

La medida de la finura se expresa como el área superficial de las partículas contenidas en un grano de material y se mide en (cm<sup>2</sup>/gr). Existen varios métodos para medirla que pueden ser directos o indirectos como se aprecia en la tabla 2.11.

Tabla 2.15. Métodos para medir la finura del cemento

Tipo del método	Nombre del método	Norma ASTM
Directos	Tamizado	C-266
	Tamizado	C-294
Indirectos	Turbidímetro de Wagner	C-597
	Permeabilímetro de Blaine	C-33

Fuente: Tecnología del hormigón Ing. Civil Viterbo O'Reilly

#### 2.3.4.4. Consistencia normal

El cemento al amasarse con agua, forma una pasta suave y plástica que posteriormente se torna rígida y endurece presentando aspecto pétreo, debido a las reacciones químicas que se verifican entre el cemento y el agua.

La consistencia normal no es un parámetro directo que indique la calidad del cemento y por eso las normas no nos dan valores máximos ni mínimos. Sin embargo, se considera como un parámetro complementario de otros ensayos que, si tienen relación directa con

la calidad del cemento como en el caso de los tiempos de fraguado y estabilidad de volumen, que se estudiaran más adelante.

La consistencia de una pasta de cemento se mide por medio del aparato de vicat, cuyo procedimiento esta descrito en la norma. Dicho ensayo consiste en preparar la pasta de 500 gr de cemento y una cantidad desconocida de agua. La pasta se coloca en un molde, se pone el embolo en contacto con la superficie superior de la pasta y se suelta. Dependiendo de la consistencia de la pasta, la varilla penetra y si esta penetración es de 10 mm.  $\pm$  1 mm después de 30 segundos de haber soltado el embolo, se considera que la pasta tiene consistencia normal.

#### **2.3.4.5. Tiempo de fraguado**

El tiempo de fraguado indica si la pasta está o no sufriendo reacciones de hidratación normales, se considera en dos etapas elegidas en forma arbitraria: fraguado inicial y fraguado final. Fraguado inicial, se mide por el lapso entre el amasado y la pérdida parcial de plasticidad de la pasta, encontrándose el cemento parcialmente hidratado. Fraguado final, se caracteriza por que deja de ser deformable ante cargas relativamente pequeñas, con el cemento aún más hidratado. A partir de este momento comienza el endurecimiento de la pasta, proceso que se considera indefinido, aunque para fines prácticos efectos de construcción se estima a los 28 días. El tiempo de fraguado se mide mediante la aguja de vicat instrumento de medición de fraguado a través de la penetración de su aguja.

#### **2.3.4.6. Resistencia**

Las pruebas de resistencia que existen son las de compresión, tracción y flexión, siendo la primera la más importante puesto que las otras tienen un valor muy pequeño relativo al de compresión. La resistencia a la compresión se mide por cubos de mortero estándar, de 5 cm de lado, curados de una manera estricta y usando arena normalizada. El procedimiento para medir la resistencia de la tensión del cemento consiste en briquetas de mortero moldeadas de forma estándar y curada durante 24 hrs. A estas briquetas se les aplica tensión directa a través de mordazas especiales colocadas en los extremos.

El ensayo a flexión se hace sobre una vigueta prismática de sección cuadrada de 4cm de lado y 16 cm de longitud, estas son curadas hasta el momento del ensayo que se lleva a cabo

colocando la vigueta sobre cilindros de apoyo aplicando carga en el punto medio de la longitud de la muestra.

### **2.3.5. Almacenamiento en obra**

El cemento no debe ser guardado sin usarse mucho tiempo, pues conforme avanza el tiempo va perdiendo resistencia; esto es válido para todos los tipos de cemento ya que si no es almacenado de manera correcta este perderá su resistencia. Para el caso de cementos en sacos, la pérdida de resistencia probable es de 3 meses 15%. Y en 6 meses 25% y así aumenta sucesivamente conforme pase el tiempo. En general, un límite apropiado de utilidad para el cemento en sacos es de 3 meses para cuando está en silos herméticos. Después del tiempo indicado es importante hacer pruebas antes de usarlo. Una prueba práctica y palpable de poder reconocer si el cemento a sufrido algunos daños debido a su mal almacenamiento es la humedad, esta se manifiesta formando gránulos dentro de la bolsa de cemento indicando así que el material a sufrido contaminación por la humedad y el cual puede llegar a afectar el hormigón a futuro. Para subsanar la pérdida de resistencia por almacenaje deberá incrementarse la dosificación en peso del cemento lo cual conduce a mayor costo en la mezcla y en lo posible se deberá mantener la dosificación de los otros componentes del hormigón.

### **2.3.6. Calidad del cemento**

Una vez descritas las principales propiedades que brindan un desempeño favorable del cemento es necesario que sus características numéricas principales se encuentren dentro de ciertos límites de las diferentes normas de nuestro medio con el fin de asegurar un adecuado desempeño dentro de la masa de concreto. De acuerdo a la Norma Boliviana NB 011-05 (IBNORCA) se tiene la siguiente especificación para la clasificación y composición de los cementos

Tabla 2.16. Calidad del cemento

Tipos de cemento		Proporción de mas %				
		Tipo	Componentes principales			Componentes adicionales
Denominación	Designación		Clinker	Puzolana natural	Filler calizo	
Cementos portland	Cemento portland	I	95 a 100			0 a 5
	Cemento portland con puzolana	IP	70 a 94	6 a 30		0 a 5
	Cemento portland con filler calizo	IF	80 a 94		6 a 15	0 a 5
Cemento puzolanico		P	60	40		0 a 50

Fuente: Norma Boliviana de calidad IBNORCA

La N.B. también clasifica a los cementos de acuerdo a su resistencia a compresión en:

Tabla 2.17. Resistencias del cemento NB-470

Categoría de resistencias	Resistencia a la compresión (MPa) (NB-470)		
	Mínima a 3 días	Mínima a 7 días	Mínima a 14 días
Alta	17	25	40
Media	---	17	30
Baja	---	15	25

Fuente: Norma Boliviana de calidad IBNORCA

## 2.4. EL AGUA

Dentro de los procesos de mezclado y curado, el agua reviste vital importancia para obtener las mejores propiedades en el concreto ya que si hablamos de un buen curado estaremos evitando bastantes problemas a futuro que pueden ser perjudiciales para el concreto. En primer lugar, se presenta las generalidades sobre las diferentes formas como el agua participa en el concreto. Luego, separadamente para el agua de mezclado y de curado se analiza su función y las características más resaltantes que deben tener para que no alteren las propiedades del concreto al momento de ser mezcladas, especialmente su resistencia y el tiempo de fraguado. Por último, se resumen algunos valores que se recomiendan como máximos para que las sustancias dañinas que pueden presentarse en el

agua no afecten de manera directa al concreto o de cierta manera se pueda prevenir estas malas condiciones desfavorables para el hormigón.

#### **2.4.1. El agua en el concreto**

El agua se usa en la elaboración del concreto para propósitos diferentes: como agua de mezclado, como agua de curado y como agua de lavado de los agregados. El agua de mezclado forma aproximadamente el 15 % del volumen total del concreto, un 5 % sirve para hidratar el cemento y el 10 % del volumen total del concreto, un 5 % sirve para hidratar el cemento y el 10 % restante lubrica al concreto y luego se evapora durante el proceso de fraguado.

#### **2.4.2. Función característica del agua de mezclado**

EL agua de mezclado es aquella que se le agrega al cemento para formar la pasta. Tiene como funciones hidratar al cemento y proporcionar una fluidez a la mezcla tal que, con una lubricación adecuada de los agregados, se obtenga la manejabilidad del concreto deseada cuando este se encuentre en el estado fresco. La fluidez de la pasta depende de la cantidad de agua de mezclado. Si aumente esta cantidad sin modificar el contenido del cemento, la parte de agua de hidratación del cemento permanece constante, incrementándose así la parte evaporable, cierta porción de esta queda atrapada en el concreto y al producirse la evaporación se forma una serie de conductos capilares que se llenan de aire, generando un concreto endurecido poroso, menos resistente y más permeable. Por esto la dosificación del agua de mezclado debe tener un control muy estricto. En general, se puede afirmar que cualquier agua natural que sea para el consumo humano y no tenga sabor u olor fuertemente considerable, pueden ser usadas para la elaboración del concreto, sin que esto implique que el agua adecuada para la elaboración del concreto sea precisamente potable. Si el agua no recibe el cuidado respectivo esta llegara a ocasionar daños irreparables, el uso de agua con ciertos porcentajes de impurezas que pueden llegar a pasar desapercibidas por mas imprescindibles que parezcan, en su proyección futura a la hora de obtener las diferentes resistencias o a la hora de realizar los controles en hora pueden causar serios problemas, por esto y muchos más motivos se debe tener mucho cuidado con la obtención de agua para ello los valores que se muestran en la tabla 2.18 pueden llegar a generar o mejor dicho solucionar varios problemas.

Tabla 2.18. Impurezas dentro del agua

Tipo de impureza	Valor máximo recomendado
Cloruros	300 ppm
Sulfatos	300 ppm
Sales de magnesio	150 ppm
Sales solubles	1500 ppm
P.H.	6-8
Solidos en suspension	1500 ppm
Materia organica	10 ppm

Fuente: Tecnología del hormigón Ing. Civil Viterbo O'Reilly.

### 2.4.3. Función y característica del agua de curado

En el proceso de hidratación la partícula de cemento no se hidrata totalmente, sino que a medida que entra en contacto con el agua, se va formando una partícula superficial quedando en el interior una porción sin reaccionar y por tanto inerte. Para que este núcleo reaccione es necesario lograr un abastecimiento adicional de agua durante las etapas tempranas de endurecimiento después del proceso de fraguado y lograr así que el cemento desarrolle todo su potencial aglutinante. A dicho suministro de agua se llama proceso de curado del concreto, y a la utilización para tal fin, agua de curado.

Los requerimientos para el agua de curado son menos exigentes que aquellos usualmente utilizados para el agua de mezclado, principalmente porque el agua de curado está en contacto con el concreto por un periodo de tiempo relativamente corto. Por lo general el agua que se considera buena para el mezclado también lo es para el curado, pero deben tener cuidado con aquellas aguas que fluyen lentamente sobre el concreto y se evaporan rápidamente y además contienen materia orgánica o ferrosa por que pueden causar manchas en la superficie del concreto.

## 2.5. AGREGADOS

Los agregados son una masa de materiales casi siempre pétreos, que se consideran originalmente inertes y que unidos por medio de la pasta de cemento conforman la masa del concreto. Sin embargo, los agregados no son realmente inertes y sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y térmicas influyen sobre el comportamiento del concreto.

Las propiedades como una buena distribución de tamaños de las partículas, forma y textura superficial apropiada y por lo tanto favorable para el hormigón; granos poco porosos, resistentes y duros, que no contengan sustancias químicas que reaccionen con la pasta de cemento, libres de limo, arcilla, materia orgánica, partículas débiles, etc., son indispensables para que puedan ser utilizados en el concreto, y de allí la importancia de su control de calidad. La importancia de los agregados también radica en que constituyen alrededor del 60 a 80% del volumen total del concreto. Los agregados naturales se clasifican en:

Agregados finos (arena fina, media y gruesa).

Agregados gruesos (grava y piedra).

### **2.5.1. Agregado fino**

Se considera como agregado fino a la arena o a la piedra natural finamente triturada, de dimensiones reducidas y que pasan el tamiz 9.5 mm (3/4") y que cumple con los límites establecidos en la Norma ASTM. Las arenas, provienen de la desintegración natural de rocas y son arrastradas por corrientes aéreas o fluviales llegándose a acumular en lugares determinados.

#### **2.5.1.1. Requisitos de uso**

El agregado fino será arena natural. Sus partículas serán limpias, de perfil preferentemente angular, duro, compacto y resistente.

El agregado fino deberá estar libre cantidades perjudiciales de polvo, terrones, partículas escamosas o blandas, esquistos pizarras, álcalis, materia orgánica u otras sustancias perjudiciales, Se recomienda que las sustancias perjudiciales no excedan los porcentajes máximos mostrados en la tabla 2.19. Los excesivos porcentajes de material fino principalmente si se tiene arcillas limos o alguna clase de impurezas entre mezcladas con el material de ensayo es mejor realizar un lavado que beneficie directamente la resistencia futura de los hormigones y de esta manera evitar grandes pérdidas o resultados imprevistos. El material grueso es menos vulnerable a esto pero de igual manera por seguridad es mejor realizar un lavado superficial ya que en muchos casos quedan en prendidas en estos materiales por lo que el lavado superficial solucionaría de manera exacta estos problemas.

Tabla 2.19. Cantidad de sustancias perjudiciales permisibles en el agregado fino

Características	Clase A % en peso	Clase B % en peso	Norma ASTM
Partículas desmenuzables y terrones de arcilla	≤ 3.0%	≤ 3.0%	C 142-78
Carbón y lignito	≤ 0.25%	≤ 3.0%	C 142-78
Finos que pasan la malla N° 200			
En concreto sujeto a abrasión.	≤ 2.0%	≤ 4.0%	C 117-90
En otras clases de concreto.	≤ 3.0%	≤ 5.0%	C 117-90
Sustancias perjudiciales	≤ 1.0%	≤ 1.0%	

Fuente: Manual Centroamericano para la construcción de carreteras y puente regionales.

### 2.5.1.2. Granulometría (límites según la norma ASTM C33)

La granulometría es la distribución por tamaños de las partículas de los agregados en este caso de la arena, la cual se determina mediante una separación con una serie de mallas normalizadas (tamices). Las mallas utilizadas para el agregado fino son: N°4, N°8, N°16, N°50 y N°100. Los requerimientos que debe cumplir la arena de acuerdo a la norma ASTM C33 se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2.20. Porcentajes para granulometría aconsejados ASTM C33

Malla N°		% Pasa
3/8"	9.5 mm	100
N°4	4.75mm	95 - 100
N°8	2.36 mm	80 - 100
N°16	1.18 mm	50 - 85
N°30	600 μ	25 - 60
N°50	300 μ	10 - 30
N°100	150 μ	2 - 10

Fuente: Tecnología del hormigón Ing. Civil Viterbo O'Reilly

La norma ASTM, exceptúa los concretos preparados con más de 300 kg/m<sup>3</sup> de cemento los porcentajes requeridos para el material que pasa las mallas N°50 y N°100 que en este caso pueden reducirse a 5% y 0% respectivamente. Esta excepción se explica por qué el mayor contenido de cemento contribuye a la plasticidad del concreto y la compacidad de la pasta, función que cumple el agregado más fino.

Además, la norma prescribe que la diferencia entre el contenido que pasa una malla y el retenido en la siguiente, no debe ser mayor al 45% del total de la muestra. De esta manera se tiene una granulometría más regular.

### **2.5.2. Agregado grueso**

Se define como agregado grueso al material retenido en el tamiz 4.75 mm (N°4) proveniente de la desintegración natural o mecánica de las rocas, y que cumple con los límites establecidos en la Norma ASTM. El agregado grueso puede ser grava o piedra chancada.

#### **2.5.2.1. Clasificación**

Gravas, comúnmente llamadas canto rodado:

Es el conjunto de fragmentos pequeños de piedra, provenientes de la desintegración natural causada en las rocas, por acción del hielo y otros agentes atmosféricos de fuerte influencia que causen esta desintegración de la piedra, comúnmente se encuentran en las diferentes canteras de lechos de ríos, depósitos de forma natural y de igual manera son producidas de forma artificial mediante las diferentes procesadoras de agregados.

Piedra partida o chancada:

Se denomina así, al agregado grueso obtenido por trituración artificial de rocas o gravas. Como agregado grueso se puede usar cualquier clase de piedra partida siempre que sea limpia, dura y resistente.

#### **2.5.2.2. Requisito de uso**

El agregado grueso deberá estar conformado por partículas limpias de perfil perfectamente angular o semi-angular, duras o compactas, resistentes y de textura preferentemente rugosa. Las partículas deben de estar libres de tierra, polvo, limo, humos, escamas, materia orgánica e inorgánica dañinas dentro del material, sales u otras sustancias dañinas. Se recomienda que las sustancias perjudiciales que puedan encontrarse en el agregado no excedan los porcentajes máximos que se mostraran a continuación en la respectiva tabla a observa 2.21.

Tabla 2.21. Cantidad de sustancias perjudiciales permisibles en el agregado grueso

Clase	Partículas desmenuzables y terrones de arcilla	Carbon y lignitos	Finos que pasan la malla N°200	Desgaste de los Ángeles
A	2.00%	0.50%	1.0%	50.00%
B	3.00%	0.5%	1.0%	50.0%
C	5.0%	0.5%	1.0%	50.0%
D	5.0%	0.5%	1.0%	50.0%
E	10.0%	1.0%	1.0%	50.0%

Fuente: Manual centroamericano para la construcción de carreteras y puentes regionales

### 2.5.2.3. Granulometría (límites según la norma ASTM C33)

El agregado grueso deberá estar graduado dentro de los límites establecidos en la norma ASTM C-33, los cuales están indicados en la tabla 2.19 y se basa en parámetros como el tamaño nominal del agregado grueso el cual se obtiene mediante granulometría y el porcentaje que pasa por los tamices. Estos límites de granulometría nos brindan una idea de una buena calidad de agregado para poder así no tener inconvenientes en el diseño de la mezcla de hormigón en cuanto a propiedades fundamentales como lo son la resistencia a compresión y resistencia a flexión y muchas otras propiedades fundamentales a controlar dentro de los concretos para pavimentos rígidos.

Figura 2.12. Serie de tamices para granulometría



Fuente: Granulometría de suelos y hormigones

Tabla 2.22. Granulometría del agregado grueso ASTM C33

A S T M	Tamaño nominal	% Pasa por los tamices normalizados												
		100 mm. 4"	90 mm 3 1/2"	75 mm. 3"	63 mm. 2 1/2"	50 mm. 2"	37.5 mm. 1 1/2"	25 mm. 1"	19 mm. 3/4"	12.5 mm. 1/2"	9.5 mm. 3/8"	4.75 mm. N°4	2.36 mm. N°8	1.18 mm. N°16
1	90 mm a 37.5 mm. 3 1/2" a 1 1/2"	100	90-100		25-60		0-15		0-5					
2	63 mm a 37.5 mm. 2 1/2" a 1 1/2"			100	90-100	35-70	0-15		0-5					
3	50 mm. a 25 mm. 2" a 1"				100	90-100	35-70	0-15		0-5				
357	50 mm a 4.75 mm. 2" a N°4				100	95-100		35-70		10-30		0-5		
4	37.5 mm a 19 mm. 1 1/2" a 3/4"					100	90-100	20-55	0-15		0-5			
467	37.5 mm a 4.75 mm. 1 1/2" a N°4"					100	95-100		35-70		10-30	0-5		
5	25 mm a 12.5 mm. 1" a 1/2"						100	90-100	20-55	0-10	0-5			
56	25 mm a 9.5 mm. 1" a 3/8"						100	90-100	40-85	10-40	0-15	0-5		
57	25 mm a 4.75 mm. 1" a N°4"						100	95-100		25-60		0-10	0-5	
6	19 mm a 9.5 mm. 3/4" a 3/8"							100	90-100	20-55	0-15	0-5		
67	19 mm a 4.75 mm. 3/4" a N°4"							100	90-100		20-55	0-10	0-5	
7	12.5 mm a 4.75 mm. 1/2" a N°4"								100	90-100	40-70	0-15	0-5	
8	9.5 mm a 2.36 mm. 3/8" a N°8"									100	85-100	10-30	0-10	0-5

Fuente: Tecnología del hormigón Ing. Civil Viterbo O'Reilly.

## 2.6. CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS

### 2.6.1. Módulo de Finura (M.F.)

El módulo de finura es un parámetro que se obtiene de la suma de los porcentajes retenidos acumulados de la serie de tamices especificados que cumplan con la relación 1:2 desde el tamiz 149 $\mu$  (N°100) en adelante hasta el tamaño máximo presente y divididos por 100.

En América es más frecuente el uso del M.F. de la arena para evaluar que tan fina o gruesa es una arena, pero también es muy empleado como parámetro para el diseño de mezclas. Se considera que el M.F. de una arena adecuada para producir concreto debe de estar entre

2.30 y 3.10, donde un valor menor que 2 indica una arena fina, 2.5 una arena de finura media y más de 3.0 una arena gruesa.

### **2.6.2. Tamaño Máximo (T.M.) y Tamaño Máximo Nominal (T.M.N.)**

El T.M. se define como la abertura del menor tamiz por el cual pasa el 100% de la muestra. Como su nombre lo indica. Es el tamaño de las partículas más grandes que hay dentro de la masa de agregados y que en algunos casos puede ser único. El T.M.N. es otro parámetro que se deriva del análisis granulométrico y está definido como el siguiente tamiz que le sigue a la abertura (mayor) a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado es del 15% o más.

### **2.6.3. Densidad**

La densidad es una propiedad física de los agregados y está definida como la relación entre peso y volumen de una masa determinada lo que significa que depende directamente de las características del grano del agregado. Como generalmente las partículas de agregado tienen poros tanto saturables como no saturables, que dependiendo de su permeabilidad interna pueden estar vacío, parcialmente saturados o totalmente llenos de agua, se genera una serie de estados de humedad a los que corresponde diferentes tipos de densidad, descritos en la Norma; la que más interesa en el diseño de mezclas es la densidad aparente que se define como la relación que existe entre el peso del material y el volumen que ocupan las partículas de ese material incluidos todos los poros (saturables y no saturables). Este factor es importante para el diseño de mezclas porque con él se determina la cantidad de agregado requerido para un volumen unitario de concreto, debido a que los poros interiores de las partículas de agregado van a ocupar un volumen dentro de la masa de concreto y además porque el agua se aloja dentro de los poros saturables. El valor de la densidad varía normalmente entre 2.48 y 2.80 gr/cm<sup>3</sup>.

### **2.6.4. Porosidad**

La porosidad es otra de las propiedades físicas de los agregados, muy importante dentro de la masa de concreto porque una partícula porosa es mucho menos dura que una partícula compacta con lo que se afectan desfavorablemente propiedades con adherencia, resistencia a la compresión y flexión, y además la durabilidad en todos sus aspectos (congelamiento, deshielo, humedecimiento y secado, etc.) así como la resistencia al desgaste o abrasión.

### **2.6.5. Absorción y humedad de la superficie**

Las partículas de los agregados pueden pasar por cuatro estados de humedad:

Totalmente seco, se logra mediante un secado al horno a 110°C hasta que los agregados tengan un peso constante (generalmente a las 24 horas)

Parcialmente húmedo, se logra mediante exposición al aire libre.

Saturado o superficialmente seco, es un estado en que los agregados tienen en sus poros agua, pero superficialmente se encuentran secos, logrando esto en laboratorio.

Totalmente húmedo, todos los poros del agregado están llenos de agua y además existe agua libre superficial.

La capacidad de absorción se determina por medio de los procedimientos descritos en la norma de la A.B.C, básicamente consiste en sumergir la muestra durante 24 horas luego de lo cual se saca y se lleva a la condición saturada superficialmente seca; obtenida esta condición, se pesa e inmediatamente se seca en un horno y la diferencia de peso, expresado en porcentaje de peso de la muestra seca, es la capacidad de absorción.

### **2.6.6. Peso Unitario (P.U.)**

Si el peso de una muestra de agregado, compuesta de varias partículas, se divide por el volumen que ocupan esas partículas agrupadas dentro de un recipiente unitario, se obtiene lo que se denomina como peso unitario del agregado o peso volumétrico, es decir:

$$PU = \frac{P}{V}$$

Donde:

P = Peso seco del material (kg)

V= volumen del recipiente (m<sup>3</sup>)

Existen dos tipos de pesos unitarios que dependen del grado de compactación del agregado.

Peso Unitario Suelto (P.U.S.): Se denomina P.U.S. cuando para determinarla se coloca el material seco suavemente en el recipiente hasta el punto de derrame y a continuación se

nivela a ras pasando una regla metálica. El concepto de PUS es importante cuando se trata de manejo, transporte y almacenamiento de los agregados debido a que estos se hacen en estado suelto.

Peso Unitario Compactado (P.U.C.): Se denomina P.U.C. cuando los granos han sido sometidos a compactación incrementando así el grado de acomodamiento de las partículas de agregado y por lo tanto el valor de la masa unitaria. El P.U.C. es importante desde el punto de vista de diseño de la mezcla ya que con él se determina el volumen absoluto de los agregados por cuanto estos van a estar sometidos a una compactación durante el proceso de colocación del concreto.

### 2.6.7. Resistencia a la abrasión

La resistencia a la abrasión, desgaste, o dureza de un agregado grueso, es una propiedad que depende principalmente de las características de la roca madre. Esta propiedad se determina mediante el ensayo de la máquina de los ángeles, consisten en un cilindro hueco de acero, con sus extremos cerrados y una abertura central que sirve para introducir la muestra, y puede girar en posición horizontal.

Tabla 2.23. Tabla de ensayo para la resistencia a la abrasión

Método		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear			
Pasa el tamiz	Retenido en tamiz				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
Peso total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
N°de esferas		12	11	8	6
N° de revoluciones		500	500	500	500

fuelle: Manual de ensayo de laboratorio de hormigón U.A.J.M.S.

EL ensayo consiste en introducir en el cilindro unas bolas de acero que funcionan como la carga abrasiva y se hace girar un determinado número de vueltas. Luego se separa la

parte de la muestra que pasa por el tamiz 1.70 mm. Se determina el coeficiente de desgaste de los ángeles mediante la diferencia del peso original de la muestra y el peso después del ensayo expresado en porcentaje del peso inicial. Si el desgaste es mayor de 50% corresponden a agregados de muy mala calidad, no aptos para construcción de capas de firme. Por el contrario, desgastes inferiores a 20% corresponden a áridos excelentes, con resistencia al desgaste suficiente para cualquier posible aplicación y, en particular, para capas de rodadura de concreto que hayan de soportar tráfico pesado.

#### **2.6.8. Equivalente de arena**

Es la propiedad que permite evaluar la limpieza y plasticidad de los agregados finos. Para determinar el equivalente de arena se utiliza un ensayo que consiste en introducir una muestra de agregado en una proeza que contiene una solución floculante, se mezcla el agregado con la solución y se añade agua, dejando reposar el conjunto durante 20 minutos. Después de este tiempo se puede observar el agregado limpio en la parte inferior, en la zona intermedia las partículas contaminantes en suspensión y en la superficie se determina el equivalente limpio. Con la relación de alturas de estas zonas se determina el equivalente de arena. Se define como agregado muy contaminado el que tiene un equivalente de arena menor de 20 y como agregado limpio el que contiene un equivalente de arena mayor que 50. En el caso de concretos para pavimentos rígidos se recomienda usar equivalentes de arena mayores a 75%.

### **2.7. MICRO Y NANO MATERIALES**

En los últimos años el diseño y empleo de nuevos materiales han cobrado gran interés, tanto desde un punto de vista científico como tecnológico. En este sentido, el desarrollo de estructuras de dimensiones muy pequeñas propiamente los micro y nanos materiales los cuales supone una gran novedad, no solo en cuanto a su tamaño, sino o además porque estos materiales poseen características fisicoquímicas diferentes. Los micro y nano materiales son materiales cuyos diámetros o estructura se encuentran dentro de la micro y nano escala esto a través de diferentes procesos como moliendas, trituración, metalurgia o simplemente de forma natural como las cenizas volcánicas. Las propiedades de los micro y nano son distintas de las propiedades de los materiales de tamaños usuales. Para entender que las propiedades se ven tan drásticamente modificadas debemos analizar los tamaños

implicados. Pongamos el caso del cobre, la distancia entre planos atómicos en un cristal de Cu es 0.25 nm. Esto indica que, si el material bajo estudio tiene, a lo largo de una dimensión, algunos nm o decenas de nm, este material tendrá un número muy reducido de planos cristalinos o átomos. Este hecho automáticamente genera un material donde una gran proporción de los átomos estará en la superficie. En un sólido, los átomos superficiales tienen propiedades diferentes a los del interior, lo que se conoce como bulk. Esto indica que la proporción de átomos con propiedades diferentes para el caso de los

### **2.7.1. Características**

Son materiales capaces de mostrar propiedades muy diferentes a las que exhiben en una escala normal, posibilitando aplicaciones únicas. Por ejemplo, sustancias opacas se vuelven transparentes (cobre); materiales inertes se transforman en catalizadores (platino); materiales estables se transforman en combustibles (aluminio); sólidos se vuelven líquidos a temperatura ambiente (oro); aislantes se vuelven conductores (silicona). Materiales como el oro, que es químicamente inerte en escalas normales, pueden servir como catalizadores a nano escalas. Mucha de la fascinación que produce la nanotecnología proviene de estos peculiares fenómenos cuánticos y de superficie que la materia exhibe la micro y nano escala. Los micro y nano-materiales se pueden presentar de forma natural, por ejemplo, las cenizas generadas por un volcán, o como subproducto no intencionado de un proceso industrial, por ejemplo, los humos de soldadura o los productos de combustión, denominándose en estos casos nano-materiales incidentales o accidentales ya que son generados de forma involuntaria o con poca eficacia, tradicionalmente conocidos como partículas ultra finas.

### **2.7.2. Micro y nano materiales en el concreto**

La creciente necesidad de mejorar las propiedades de desempeño del concreto a lo largo de la vida útil del mismo, es importante en la industria constructiva y por ende para la construcción de las carreteras. Los micro y nano materiales son aquellos materiales cuyo tamaño es relativamente pequeño permitiéndoles entrar a la micro y nano escala adquiriendo así diferentes propiedades positivas diferentes a su estado sólido. Esta nueva tecnología de materiales ha tomado gran importancia científica-industrial debido a sus diferentes propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, etc., las cuales no dejan de llamar la atención

a la hora de satisfacer las necesidades de los materiales de construcción como el concreto. Según estudios realizados la nanotecnología aplicada a la construcción permitirá la fabricación de nuevos materiales de construcción, más resistentes y dúctiles que el acero actual que se emplea en la construcción, manteniendo sus propiedades resistentes a temperaturas más altas y con una mayor resistencia a la corrosión, entre otras propiedades.<sup>12</sup>

## 2.8. EL GRAFITO

El grafito es un mineral de color negro con brillo metálico y es una de las formas polimórficas en las que se puede presentar el carbono en la naturaleza otras formas son el diamante, la chaoita y la lonsdaleita. A presión atmosférica y temperatura ambiente el polimorfo más estable es el grafito. Fue nombrado por Abraham Gottlob Werner en el año 1789. El termino grafito deriva del griego (graphein) que significa escribir, ya que se usa principalmente para crear la punta de los lápices entre una de sus principales funciones.<sup>13</sup> El grafito como tal es un mineral que básicamente fue llevado a consideración al ser la materia prima del grafeno, el grafeno son las diferentes capas que componen el grafito, estas capas son sumamente pequeñas de tamaños nanometricos y poseen grandes cualidades que lo hacen valer como el material de futuro. Sin embargo, no podemos obtener grafeno sin grafito y viceversa por lo cual ambos son indispensables uno del otro. En la siguiente figura se muestra el grafito en su estado natural y semi procesado.

Figura 2.13. Grafito extraído de la mina y procesado



Fuente: El grafito y su impacto minero en Bolivia

<sup>12</sup> <https://www.ucentral.edu.co/cluster-investigacion/investigacion-produccion-uso-micro-nanomateriales>

<sup>13</sup> <https://es.wikipedia.org/wiki/Grafito>

Dentro del grafito se puede encontrar dos variedades las cuales una va ser natural, es decir que se puede encontrar en la naturaleza sin intervención de la mano del hombre y otra realizada artificialmente o de manera sintética.

#### Grafito Natural

El grafito de origen natural es relativamente abundante en la naturaleza, este procede de las rocas carbonosas que han sufrido metamorfismo, se extrae de estas formas de las minas, más predominante en Asia. El grafito natural está constituido mayoritariamente por carbono en un 80% - 90% presentando así algunas impurezas inorgánicas de distinta naturaleza (sílice, alúmina, óxido férrico, etc.), que se eliminan mediante procesos de flotación en disolventes. De todos modos si se requiere un mayor grado de pureza, deben utilizarse tratamientos químicos.<sup>14</sup>

#### Grafito Sintético o artificial

El grafito sintético o es esencialmente carbono producido a partir de coque de petróleo calcinado y es llega alcanzar un 98% de carbono.<sup>15</sup>

El grafito sintético fue preparado por primera vez a principios del siglo XX. Para obtenerlo, un precursor orgánico (derivado del carbón o del petróleo) se trata a temperaturas en orden de los 1000 °C, en atmósfera inerte (proceso conocido como carbonización), generando el coque de petróleo que posteriormente se grafitiza a temperaturas superiores a los 2.500°C.<sup>16</sup>

### **2.8.1. Características y usos**

Es de color negro con brillo metálico. Otras de las características del grafito es que consta de capas de anillo hexagonales de seis átomos, en los cuales cada átomo de carbono puede considerarse como ligado por fuertes enlaces covalentes a sus tres vecinos más próximos en la misma capa. A cada una de estas capas se las se las conoce como grafeno (el denominado el material del futuro) del cual se hablará más adelante. Este material puede convertirse en diamante realizando un trabajo de laboratorio muy específico y delicado esto puede lograrse aumentando la temperatura y la presión y utilizando un catalizador

---

<sup>14</sup> <http://bateriasdegrafenopara.com/grafito-propiedades-aplicaciones/>

<sup>15</sup> <http://www.carbonesdc.com/productos/grafito-sintetico/>

<sup>16</sup> <http://bateriasdegrafenopara.com/grafito-propiedades-aplicaciones/>

para aumentar la velocidad de la reacción el personal encargado de realizar este proceso debe ser capacitado y tener las condiciones y estudios de acuerdo al tema.

#### Usos

El grafito tiene una multitud de usos en nuestra vida diaria, siendo posiblemente las minas de los lápices el más conocido o utilizado. Sin embargo, otro de los usos del grafito es la metalúrgica, la cual utiliza el grafito en polvo como refractario, ya que consigue que la resistencia a la corrosión y a la temperatura sea mayor, algo muy importante en este campo, debido a que se trabaja siempre con temperaturas muy elevadas. En los ladrillos cerámicos también se consigue utilizar, entrando en la mezcla con el acero y el hierro obteniendo así mayores resistencias. Siendo un gran conductor de electricidad es utilizado en baterías de ion-litio como también en las alcalinas y por último en pilas de combustible ayudando a conducir mucho mejor la energía de un lado para otro de igual manera en la fabricación de juntas, pistones, pastillas de freno, etc.<sup>17</sup>

#### **2.8.2. El grafito en Bolivia**

En Bolivia contamos con el mineral grafito el cual no se explota ni se exporta por la falta de información y motivación tecnológica si lográramos llevar a la exportación dicho mineral Bolivia estaría percibiendo ingresos significativos en el producto interno bruto minero como también en los ingresos del departamento de Santa Cruz ya que este mineral se encuentra en las minas de Santa Cruz, más específicamente en los municipios de Concepción, San Ignacio y Buena Vista.

Como se mencionó anteriormente el grafito es la materia prima del grafeno, material que, desde su descubrimiento en 2004 por los científicos rusos, Andrey Geim y Konstantin Novosiolov a incrementado las demandas de producción a nivel mundial debido principalmente a propiedades como su gran resistencia y una mayor conductividad térmica. Se cree que, en pocos años este material, será mundialmente conocido y será una de las bases de la tecnología en los próximos años, si Bolivia toma sus previsiones para exportar el mineral grafito estaremos a la par en el desarrollo a nivel mundial con expectativas favorables para nuestro país.

---

<sup>17</sup> <https://www.mineralesyrocas.com/grafito/>

Las reservas comprobadas de la materia prima “grafito” son de 14.986.642 toneladas, las mismas se encuentran en el departamento de Santa Cruz. Según estimaciones podemos decir que una piedra de grafito pesa 3kg, para una tonelada de grafito se requieren 344 piedras, además, de una piedra se obtiene ½ metro de grafeno, por tanto, de una tonelada de grafito se obtiene 166,6 metros cuadrados de grafeno. Son datos estimados lo cual de manera general nos dan una idea de cuán importante materia prima se tiene.

Según el estudio de mercado la cantidad demandada es de 5.765.689 m<sup>2</sup> lamina anual. La planta de explotación de grafeno tendría una capacidad de procesar 40.000 m<sup>2</sup> al año. Precio de venta en el mercado de grafeno es de 56\$/m<sup>2</sup>. Actualmente el grafito se lo encuentra en el mercado a la venta a un precio que varía entre 15 y 30 bs el kilogramo.<sup>18</sup>

### **2.8.3. El grafito en el concreto**

Decía el historiador Vaclav Smil, el hormigón es el cimiento del enorme crecimiento de las urbes, un factor decisivo en la reducción a la mitad de la pobreza extrema desde 1990. En 1950 el mundo fabricaba más o menos la misma cantidad de cemento (ingrediente clave para hacer hormigón) que de acero. Pero para el año 2010 la producción de acero se había multiplicado por ocho, mientras que la producción de hormigón se había multiplicado por 25. En el porqué de ese alto factor multiplicador tiene mucho que ver los países en desarrollo, las regiones a la carrera de convertirse en potencias y las propias potencias, actualmente países como china consumen en tres años más cemento que todo lo que consumió EE.UU. a lo largo del siglo XX.

Una forma de reducir la cantidad de cemento y por ende de hormigón que se fabrica es buscar nuevas alternativas que mejoren la resistencia y durabilidad del mismo y una forma de duplicar la resistencia, según un estudio de la Universidad de Exeter en Inglaterra, consiste en añadir el grafeno componente del grafito al cemento u mezcla de concreto. Según esta investigación publicada en la revista “Advance Functional Materials” el resultado es un nuevo material compuesto que resulta el doble de fuerte que el cemento convencional y que además es más resistente al desgaste. Según los investigadores todas las muestras de hormigón ensayadas cumplen las normas europeas de construcción.<sup>19</sup>

---

<sup>18</sup> El grafito y su impacto en el desarrollo productivo de la industria minera de Bolivia/UMSA/tesis.grado

<sup>19</sup> <https://serveisankar.com/el-cemento-reforzado-con-grafeno-es-mas-duro-mas-resistente-y-mas-sos/>

De igual manera la Universidad Católica de Murcia UCAM junto a la empresa Graphenano Smart Materials, han presentado la utilidad y eficacia, del que muchos consideran como material del futuro, en el hormigón, confirmando así una mayor resistencia mucho mayor en los diferentes ensayos realizados de compresión y flexión.<sup>20</sup>

## **2.9. LIMADURAS DE HIERRO FUNDIDO**

El hierro fundido es una aleación de hierro con un contenido superior al 2% de carbono y más de 1% de silicio, además de manganeso, fosforo y azufre como impurezas en pequeñas cantidades, pudiendo variar cada uno de los componentes (a excepción del carbono) de acuerdo a la utilidad que se le vaya a dar.<sup>21</sup>

Las limaduras de hierro fundido, es el subproducto de procesos de producción de hierro fundido, son pequeñas partículas las cuales son obtenidas al realizar los diferentes trabajos metalúrgicos y principalmente trabajos de tornería. Es decir, son prácticamente el resultado de la molienda, trituración y acabado de los diferentes materiales compuestos por hierro fundido en sus diferentes clases. Estos materiales suelen también ser generados de manera involuntaria y en pocas cantidades cuando se realiza el pulimento de una rendija o cuando se quiere dar un moldaje manual improvisado a los tubos de hierro.

### **2.9.1. Características y usos**

Las limaduras de hierro poseen por lo general un color gris oscuro brillante debido a su alto contenido de carbono y demás compuestos. Estos poseen un tamaño granular muy pequeño alcanzando a tener el diámetro de una micra aproximadamente.

La limadura al ser un subproducto del hierro fundido se encuentra como residuos de desecho sin importar la gran importancia que adquiere en los diferentes campos de ingeniería. Es por eso que en el presente trabajo lo que se busca es darle un uso significativo a este material en el concreto y poder realizar un reciclamiento de este material.

---

<sup>20</sup> <https://www.ucam.edu/noticias/graphenano-y-la-ucam-demuestran-la-eficacia-del-grafeno-aplicada-aln>

<sup>21</sup> <http://www.ferrotechnikcolombia.com.co/hierro-fundido/>

Sin embargo, es posible darnos alguna idea del gran aporte de este material describiendo los usos del hierro fundido como tal, entre algunos temas: la fabricación de tuberías, válvulas, y piezas automotrices.

### **2.9.2. Limaduras de hierro fundido en Bolivia**

Como se había mencionado anteriormente las limaduras son un subproducto de molienda del hierro fundido, la limadura o la trituración de los productos acabados del mismo, por lo que su historia en gran medida sigue el desarrollo del hierro, pues claro está que al tener la materia prima el “hierro” se obtendrá con total seguridad el hierro fundido. Por esta razón para tener una idea clara del movimiento de este material en Bolivia se debe mencionar su origen el cual es el hierro como mineral.

El cerro mutún en Bolivia es el nombre con el que se denomina a un cerro que contiene uno de los yacimientos de hierro y manganeso más importantes del mundo. Se encuentra localizado en la provincia German Busch del Departamento de Santa Cruz en Bolivia. Se encuentra junto al macizo Urucum de Brasil y está constituido en colinas cuya altura varía entre los 200 y 755 metros.

Según una publicación del ministerio de minería de Bolivia el mutún tiene reservas de aproximadamente 40.000 millones de toneladas de hierro catalogándose como uno de los reservorios más importantes del mundo. Sin embargo, la extracción de este mineral, su industrialización y posterior exportación se convirtió en una odisea. El investigador de la carrera de Metalurgia de la Universidad Mayor de San Andrés, ingeniero Rodny Balanza, explica que entre los factores históricos que impidieron que se consolide la explotación están “el mercado del hierro, que es muy pequeño en Bolivia”; la falta de energía suficiente para poner en marcha una planta en la región, abastecimiento de agua, acceso entre otros.<sup>22</sup>

Sin embargo, el porcentaje de producción de limaduras es bastante elevado ya que el mismo se abastece de los diferentes trabajos de tornerías, y demás metalurgia que se realizan a los diferentes materiales hecho con hierro fundido.

---

<sup>22</sup> [mutun-fortaleza-hierro-lleva-decadas-tratando-consolidarse-98723.html](http://mutun-fortaleza-hierro-lleva-decadas-tratando-consolidarse-98723.html)

En Bolivia se puede encontrar gran cantidad de limaduras de hierro fundido provienen de las diferentes actividades metalúrgicas realizadas en tornerías, talleres de soldadura entre otros.

### **2.9.3. Limaduras de hierro fundido en el concreto**

Para tener una idea generalizada de la importancia que puede llegar a tener este material dentro del concreto es importante mencionar algunos antecedentes de investigación que se dieron con el fin de mejorar la calidad del concreto y así descubrir nuevas alternativas de uso. Investigaciones realizadas en Colombia, dan cuenta del empleo de limalla que son residuos industriales finos producidos del trabajo de maquinado de metales. Realizando pruebas con diferentes tipos de porcentajes de adición de limalla (3 %, 4% y 5% respecto al peso de la mezcla obteniendo el resultado más favorable al emplear el 4 %. (Reyes J. y Rodríguez Y. 2010)

Otra de las investigaciones se desarrolló en la Universidad Nacional de Cajamarca Facultad de ingeniería, tesis de grado elaborada por el estudiante Johnny Eduardo Chávez Ravines quien estudio la resistencia a compresión del hormigón elaborado con limaduras de hierro fundido como aditivo logrando de igual manera resultados favorables.

## **2.10. CONSIDERACIONES EN LOS PORCENTAJES DE ADICIÓN**

Los aditivos productos que se adicionan al concreto durante el mezclado en porcentajes no mayores del 5%, con el propósito de producir una modificación en el comportamiento del concreto en su estado fresco y/o en su desempeño en condiciones de trabajo (resistencias). En la actualidad los aditivos permiten la producción de concretos con características diferentes, han dado un pequeño impulso a la construcción y se consideran como un nuevo ingrediente, con el cemento, el agua y los agregados.<sup>23</sup>

Los aditivos son productos que se adicionan en pequeña proporción al concreto durante el mezclado en porcentajes que normalmente varían entre 0.1 % y 5% (según el producto deseado), con el propósito de producir una modificación en algunas de sus propiedades originales o en el comportamiento del concreto en su estado fresco y endurecido.<sup>24</sup>

---

<sup>23</sup> <https://www.docsity.com/es/adiciones-y-aditivos/>

<sup>24</sup> <http://ingecivilcusco.blogspot.com/2009/07/aditivos-aspectos-generales.html>

Como es evidente, en los párrafos mencionados basados en diferentes páginas de navegación en internet el concepto que más predomina es que los aditivos deben estar o generalmente se manejan en el rango de los 0.1% y 5 % de adición.

Tabla 2.24. Porcentajes de adición en aditivos Sika

Tipo de aditivo	Uso	Porcentaje de adición
Sika Aer	Incorporador de aire para hormigón	La cantidad de sika Aer a utilizar varia entre 0.02% y el 0.10% .
Sikament-180	Reductor de agua de rango medio	La cantidad de sikament-180 a utilizar varia entre 0.4 % y el 0.6 % .
Sikament-320	Plastificante y retardante de fraguado	La cantidad de sikament-320 a utilizar varia entre 1.0 % y el 1.4 % .

Fuente: Ficha técnica de aditivos sika

Bajo los criterios de porcentajes de adición observados en la tabla 2.24 certificados por normativa ASTM como así también de los párrafos descritos al inicio de esta sección se asumieron los porcentajes de 0.5 %, 1 %, 1.5 %, 2 %, 2.5 %, y 4 % en el presente trabajo de investigación (todos menores a 5%)

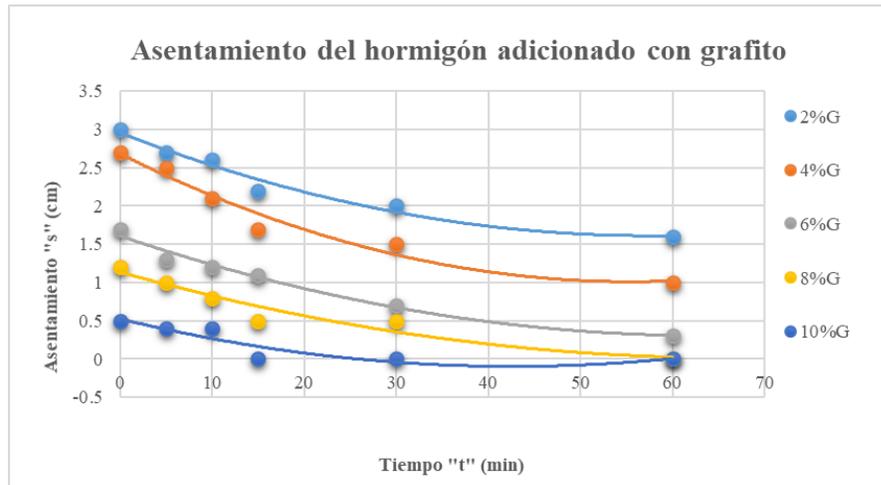
Los porcentajes de adicción en el presente trabajo de investigación 0.5%, 1%, 1.5% 2% y 4%, fueron definidos en función a previas mezclas de prueba, donde se realizó el ensayo de cono de Abrams para obtener un criterio del comportamiento de la mezcla con porcentajes de adición mayores 2 %, 4 %, 6 %, 8 % y 10 %. Es importante mencionar los resultados que se muestran a continuación en el ensayo de Cono de Abrams son considerados como mezclas de prueba.

Tabla 2.25. Mezcla adicionada con grafito

Mezcla de hormigón con aditivo					
Tiempo (min)	Asentamiento (cm)				
	Porcentaje adicionado de grafito				
	2.0%	4.0%	6.0%	8.0%	10.0%
0	3	2.7	1.7	1.2	0.5
5	2.7	2.5	1.3	1	0.4
10	2.6	2.1	1.2	0.8	0.4
15	2.2	1.7	1.1	0.5	0
30	2	1.5	0.7	0.5	0
60	1.6	1	0.3	0	0

Fuente: Elaboración propia

Grafica 2.1. Asentamientos en la mezcla con grafito



Fuente: Elaboración propia

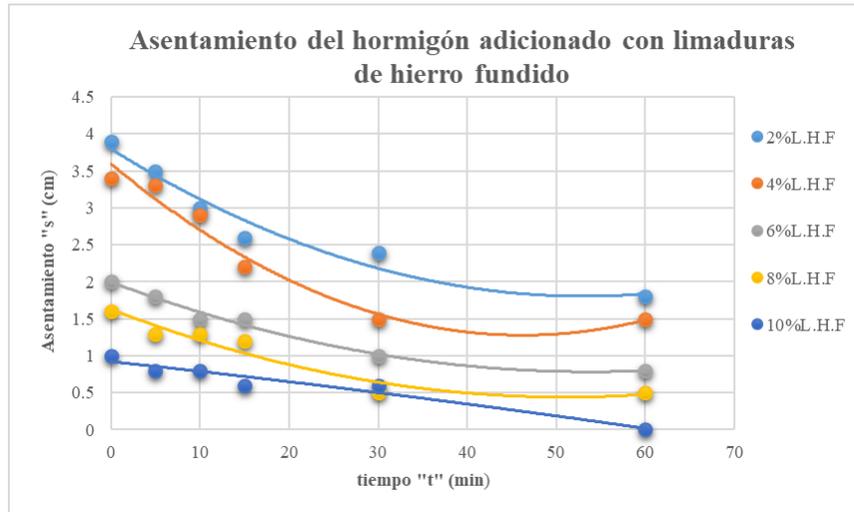
El manual de diseño de concretos ACI-211, en su sección de elección de asentamientos (grafica 2.1) especifica que los asentamientos para el caso de diseño de pavimentos rígidos deben estar por encima de 2 cm, lo cual es cumplido en los porcentajes 2% y 4%, sin embargo, no sucede lo mismo en los posteriores porcentajes de adición 6%, 8% y 10% donde los asentamientos se encuentran por debajo de lo especificado en normativa descartando entonces el uso de estos porcentajes.

Tabla 2.26. Mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido

Mezcla de hormigón con aditivo					
Tiempo (min)	Asentamiento (cm)				
	Porcentaje adicionado con limaduras de hierro fundido				
	2.0%	4.0%	6.0%	8.0%	10.0%
0	3.9	3.4	2	1.6	1
5	3.5	3.3	1.8	1.3	0.8
10	3	2.9	1.5	1.3	0.8
15	2.6	2.2	1.5	1.2	0.6
30	2.4	1.5	1	0.5	0.6
60	1.8	1.5	0.8	0.5	0

Fuente: Elaboración propia

Grafica 2.2. Asentamientos en la mezcla con limaduras



Fuente: Elaboración propia

Si bien el comportamiento de la mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido es mejor respecto a la mezcla con grafito esta no deja de estar fuera de la especificación a considerar según ACI-211, de igual manera se descarta el uso de los porcentajes 4% 6% 8% y 10% al obtener asentamientos inferiores a 2 cm.

Considerando los resultados obtenidos en las mezclas de prueba, se opta por disminuir los porcentajes de adición definiendo los mismos entre 0.5%, 1%, 1.5%, 2% y 4%

## **CAPITULO III**

### **CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES**

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 de los materiales y confrontarlas con las especificadas normativamente.

En base al manual técnico de hormigón para el diseño de carreteras en Bolivia (realizado por la Administradora Boliviana de Carreteras) y las normativas ASTM y AASTHO, se tomaron en cuenta los procedimientos y especificaciones técnicas que ellos recomiendan para llevar a cabo diferentes ensayos de laboratorio que son aplicables a mezclas que se emplean en ensayos de concreto con los propósitos de: verificar la calidad de los materiales componentes y su correcta aplicabilidad en la posterior dosificación,

En el presente proyecto se utilizará solamente el equipo necesario que justifique la caracterización de cada uno de los ensayos destinados a verificar principalmente el cumplimiento exigidos en obras viales (pavimentos rígidos), estos equipos fueron proporcionados por el laboratorio de hormigones y resistencia de materiales de la U.A.J.M.S.

Los ensayos realizados para los agregados pétreos estarán de acuerdo a la normativa proporcionada por la ABC la cual está basada en las diferentes normativas de la ASTM Y AASHTO de igual manera se seguirá estas normativas para la caracterización de los aditivos (grafito y limaduras de hierro fundido) y del cemento.

El procedimiento y los cálculos realizados para cada uno de los ensayos de caracterización se encuentran en forma detallada en anexos, por lo que en este capítulo solamente se presentan resultados finales y un pequeño resumen del ensaye aplicado a los materiales del hormigón con y sin aditivo.

#### **3.1. PROCEDENCIA DE LOS MATERIALES**

##### **3.1.1. Agregados pétreos**

El material pétreo (grava y arena) usado en el presente proyecto de investigación, se encuentra ubicado en la localidad de Charajas, (Tarija, Bolivia) a unos 16.51 km

aproximadamente de la plaza principal de la ciudad del Valle de la Concepción, provincia Uriondo, planta de áridos perteneciente al Servicio Departamental de Caminos (SEDECA)

Figura 3.1. Ubicación de la planta de áridos “Charajas”



Fuente: Google earth

Figura 3.2. Extracción de material-planta de áridos “Charajas”



Fuente: Elaboración propia

### 3.1.2. Limaduras de hierro fundido

Las limaduras de hierro fundido, material utilizado como aditivo en la mezcla de hormigón fueron proporcionados por la tornería “Pinaya” el cual se encuentra ubicado en la ciudad de Tarija, calle Chamas entre avenida Cochabamba y calle Felipe Echazu dentro del centro de la ciudad.

Figura 3.3. Ubicación de la tornería “Pinaya”



Fuente: Google earth

Figura 3.4. Extracción de limaduras de hierro fundido



Fuente: Elaboración propia

## 3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

### 3.2.1. Agregado fino

#### 3.2.1.1. Tamaño Máximo (T.M.)

El T.M. del agregado fino corresponde al material que pasa el 100% de la muestra:

$$T.M. = 3/8''$$

#### 3.2.1.2. Tamaño Máximo Nominal (T.M.N.)

El T.M.N. del agregado fino corresponde al material que pasa el 100% de la muestra:

$$T.M.N = N^{\circ}4$$

#### 3.2.1.3. Porcentaje de finos (ASTM C117, AASHTO T11)

Resumen del método

Este método establece la determinación del porcentaje de partículas finas menor que tamiz N° 200 a través de la metodología del lavado del material a través de dicho tamiz para posteriormente realizar el secado en horno a temperatura constante del material. El porcentaje de finos fue determinado mediante ensayos que cumplen con la norma indicada, el procedimiento del mismo se detalla en anexos.

Tabla 3.1. Resultados obtenidos de porcentaje de finos

% que pasa el tamiz N°200	
Dato	(gr)
Peso muestra seca	1200
Peso muestra seca lavada	1175.3
% pasa tamiz N°200	2.10

Fuente: Elaboración propia

Según especificaciones normativas dentro del manual de ensayos del laboratorio de hormigón de la U.A.J.M.S, el porcentaje de finos no debe exceder el 5%, ya que un porcentaje superior podría ser perjudicial para la resistencia del hormigón, este método es conocido también por el método del lavado ya que debido a las varias sesiones de lavado a la que sometido el material limpiando así toda clase de impurezas posibles pero principalmente brindándonos una idea clara de cuanto de material fino como la arcilla o limo se encuentra en el agregado siendo esto importante para una futura dosificación.

### 3.2.1.4. Contenido de humedad por secado (ASTM C566)

#### Resumen del método

Este método establece la determinación del contenido de humedad del material mediante un secado en horno. El contenido de humedad fue determinado mediante ensayos que cumplen con la normativa indicada, el procedimiento del mismo se detalla en anexos.

Tabla 3.2. Contenido de humedad del agregado fino

Humedad	
Dato	(gr)
Peso muestra húmeda	1200.00
Peso muestra seca	1170.00
Peso agua	30.00
% de humedad	2.56

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.1.5. Granulometría y módulo de fineza (ASTM C136, AASHTO T27)

#### Resumen del método

Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría de los áridos. Es aplicable a los áridos que se emplean en la elaboración de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas. Tiene por objetivo obtener el porcentaje de material que pasa cada tamiz de la serie de tamices estándar (3/8, N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100 y N°200) y graficar su respectiva curva granulométrica para establecer la distribución de tamaños de agregados, los cuales deben estar dentro de las especificaciones establecidas.

De igual manera al realizar la granulometría respectiva del agregado fino uno de los componentes fundamentales dentro de esta es la determinación del módulo de fineza, se calculó una vez realizado el análisis granulométrico, es el resultado de la suma de los porcentajes acumulados retenidos sobre cada uno de los siguientes tamices: 3/8, N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100, dividido entre 100. El módulo de fineza adecuado para producir concreto debe de estar entre 2.30 y 3.10 según especificaciones de la normativa ACI -211 donde un valor menor de 2 indica una arena fina, 2.50 una arena de finura media y más de 3.0 una arena gruesa.

Figura 3.5. Tamizado del agregado fino mediante vibrador mecánico



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.6. Material retenido en los tamices luego de realizar el tamizado



Fuente: elaboración propia

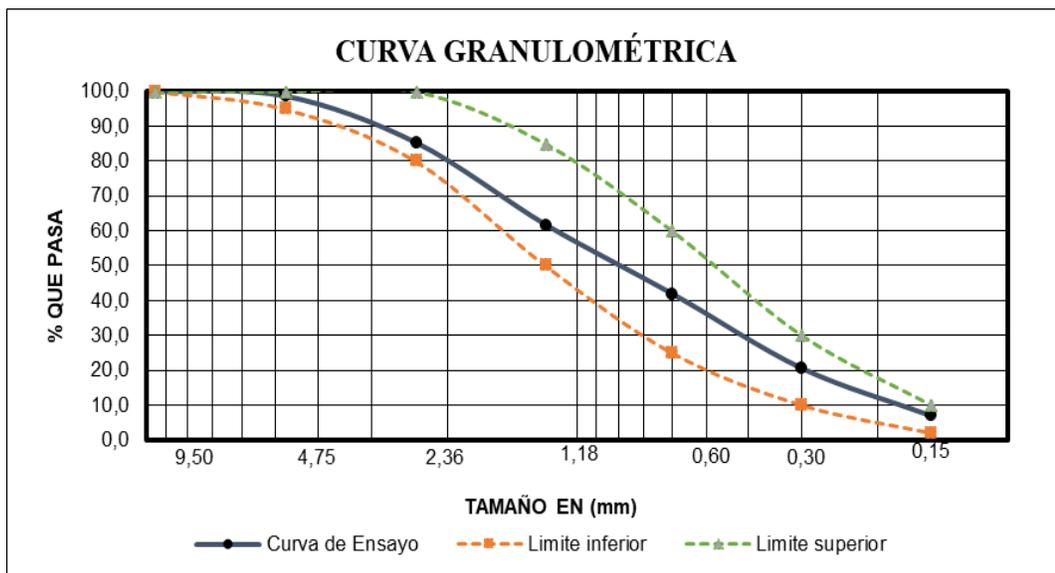
Los resultados obtenidos se reflejan en la tabla 3.3, el procedimiento del ensayo se detalla en anexos.

Tabla 3.3. Resultados de la granulométrica del agregado fino

Peso total (gr.)			2000		Especificación ASTM C-33		
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret.	% que pasa del total		
3/8	9.50	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
N°4	4.75	28.20	28.20	1.41	98.6	95	100
N°8	2.36	373.60	401.80	20.09	85.2	80	100
N°16	1.18	365.00	766.80	38.34	61.7	50	85
N°30	0.60	395.60	1162.40	58.12	41.9	25	60
N°50	0.30	428.00	1590.40	79.52	20.5	10	30
N°100	0.15	272.60	1863.00	93.15	6.8	2	10
BASE		135.60	1998.60	99.93	0.1		
Suma		1998.6					
Pérdidas		1.4					
M.F. =		2.91					

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.1. Curva granulométrica del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

### 3.2.1.6. Peso unitario del agregado fino (ASTM C29, ASTM E30)

Este método de ensayo cubre la determinación del peso unitario suelto y compactado de los agregados finos. Este método de ensayo cubre la determinación del peso unitario suelto y compactado de los agregados finos.

## Resumen del método

En este ensayo se realizaría siguiendo la normativa mencionada, tanto para el estado suelto y compactado del agregado fino, el peso suelto se determina llenando el recipiente cilíndrico con el agregado hasta rebosar, se enrasa el excedente y se pesa. Cabe mencionar que previamente se debe obtener el volumen del recipiente ya sea por medición directa o por la respectiva calibración del molde.

Para el peso compactado se realiza el llenado del agregado fino dentro del molde cilíndrico en tres capas iguales, para ello se llena la tercera parte del recipiente con el agregado, se apisona con una barra metálica, mediante 25 golpes, esto se realiza con las dos capas faltantes, de igual manera al se debe tener el volumen del recipiente previo ensayo.

Finalmente, se llena el recipiente con la última capa hasta rebosar se compacta con 25 golpes y se enrasa el excedente y se procede a pesar tal como se muestra en la figura 3.7 determinado con ello el peso unitario compactado.

Figura 3.7. Peso unitario compactado del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos se reflejan en la tabla 3.4 y 3.5, el procedimiento del ensayo se detalla en anexos.

Tabla 3.4. Peso unitario suelto del agregado fino

Muestra N°	Peso del recipiente (gr)	Volumen del recipiente ( cm <sup>3</sup> )	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso unitario suelto ( gr/cm <sup>3</sup> )
1	2610.10	3013.67	7436.50	4826.40	1.60
2	2610.10	3013.67	7402.20	4792.10	1.59
3	2610.10	3013.67	7432.10	4822.00	1.60
				Promedio	1.60

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5. Peso unitario compactado del agregado fino

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente ( cm <sup>3</sup> )	Peso recip. + muestra compactada (gr)	Peso muestra compactada (gr)	Peso unitario compactado ( gr/cm <sup>3</sup> )
1	2610.10	3013.67	7806.70	5196.60	1.72
2	2610.10	3013.67	7983.40	5373.30	1.78
3	2610.10	3013.67	8097.30	5487.20	1.82
				Promedio	1.78

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.1.7. Peso específico y absorción del agregado fino (ASTM C128)

Este método de ensayo tiene por objeto la determinación del peso específico del agregado fino y el porcentaje de absorción del mismo, basados en la normativa mencionada de la Administradora Boliviana de Carreteras (A.B.C) sección hormigones.

#### Resumen del método

Primeramente, se realizará la preparación de la muestra 1 kg que debe ser obtenida por cuarteo, posteriormente se debe colocar la muestra dentro de un recipiente lleno de agua la cual debe sobrepasar la superficie del material dejando reposar el material sumergido por un lapso de 24 horas logrando así que el material se encuentre totalmente saturado. Posteriormente se realiza el secado superficial de la muestra de manera uniforme a través de hornilla y secadoras eléctricas. El material debe alcanzar un secado superficial verificando a través de un cono y su varilla pistón el cual es usado vertiendo el material

superficialmente seco dentro del cono en tres capas y apisonando con golpes mediante el pisto hasta alcanzar el llenado total. Posteriormente se retira el cono y se verifica si hay un deslizamiento leve del talud, esto indicara que el material si se encuentra superficialmente seco. Si el cono mantiene intacta su forma esto indicará que aún existe gran humedad en el material y por ultimo si el cono pierde totalmente su forma estaríamos hablando de que el material se encuentra totalmente seco en exceso por lo que se deberá humedecer el agregado fino.

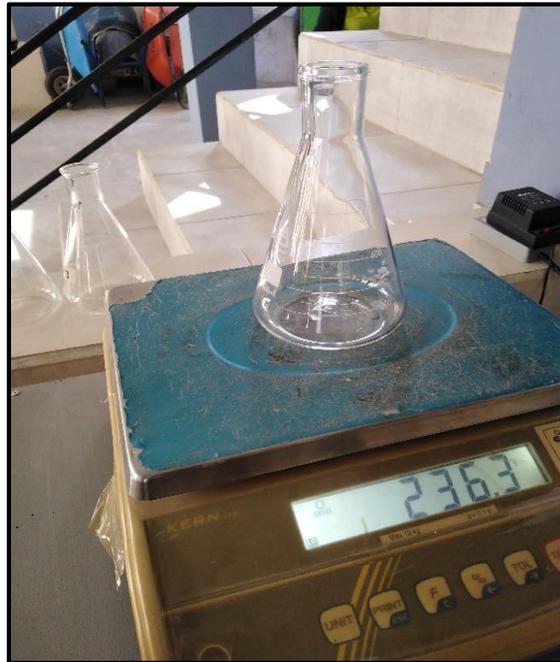
Figura 3.8. Secado superficial del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

Se debe pesar el matraz y obtener este dato (figura 3.9) para luego una vez alcanzado el secado superficial comprobando mediante las pruebas pertinentes establecidas en la norma mencionada para luego seleccionar una muestra de 500 gr del agregado fino y colocar dentro del matraz (se debe tener mucho cuidado evitando perdidas del agregado) para posteriormente llenarlo con agua hasta el nivel de enrase del volumen correspondiente del matraz y pesar. Por último, se debe vertir la muestra que involucra el agua y agregado en un recipiente y secarlo en horno a temperatura constante por un tiempo de aproximadamente 24 horas.

Figura 3 9. Determinación del peso matraz



Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos se reflejan en la tabla 3.6, los cuales fueron obtenidos en laboratorio mediante el desarrollo de la normativa mencionada además del manual guía de laboratorio de hormigones, el procedimiento del ensayo realizado se detalla de manera más precisa y comprensible en la parte de anexos de la presente investigación, en la cual se muestra de igual manera las diferentes fórmulas respectivas para el ensayo de peso específico.

Tabla 3.6. Peso específico del agregado fino

Ens. N°	Peso muestra (gr)	Peso matr�az (gr)	Muestra + matr�az + agua (gr)	Peso agua agregado al matr�az "V" (ml) � (gr)	Peso muestra secada "A" (gr)	Vol. del matr�az "V" (ml)	P. E. Granel ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	P. E. S.S.S ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	P. E. Aparente ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	% de abs.
1	500	172.4	968.7	296.30	488.60	500.00	2.40	2.45	2.54	2.28
2	500	177.5	969.8	292.30	485.60	500.00	2.34	2.41	2.51	2.88
3	500	171.6	968.5	296.90	488.60	500.00	2.41	2.46	2.55	2.28
Promedio							2.38	2.44	2.53	2.48

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.1.8. Equivalente de arena (ASTM D2419, AASHTO T176)

Este método establece un procedimiento rápido para determinar la calidad que tiene el agregado fino; esta calidad es desde el punto de vista de su contenido de finos indeseables de naturaleza plástica.

#### Resumen del método

Se vierte en la probeta de ensayo, la solución química hasta una altura de 4 plg. Luego se vierte en la misma aproximadamente 150 gr. de material preparado, y se deja reposar por 10 min., transcurrido ese tiempo se agita la probeta en forma horizontal durante 30 segundos para alcanzar en ese intervalo de tiempo 90 ciclos.

Figura 3.10. Material para realizar el equivalente de arena



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se coloca el irrigador dentro de a probeta y se procede a llenar con la solución química hasta alcanzar una altura aproximada de 38cm. Se dejará reposar por un tiempo de 20 min, al término de ese tiempo se procederá a leer el nivel superior de la suspensión de arcilla (lectura de arcilla) y el nivel de arena (lectura de arena). Es importante mencionar que la agitación también puede llevarse a cabo de manera mecánica fijando la probeta en el agitador mecánico y agitando por un periodo de 45 a 50 segundos, coloque la probeta sobre la mesa de trabajo, destápela y lava las paredes inferiores

mediante el irrigador; a continuación, introduzca el irrigador hasta el fondo de la probeta con un movimiento lento de penetración y torsión para remover todo el material, retire el irrigador hasta el fondo de la probeta el flujo de la solución de modo de ajustar y deje sedimentar el agregado por un periodo de 20 min aproximadamente y se procede a medir.

Figura 3.11. Agitado manual del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

Los resultados se reflejan en la tabla 3.7 y 3.8, (procedimiento de ensayo ver anexos).

Tabla 3.7. Resultado del ensayo equivalente de arena

N° de muestra	H1	H2	Equivalente de arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	8.60	9.80	87.76
2	8.20	10.10	81.19
3	8.10	9.50	85.26
		Promedio	84.74

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8. Equivalente de arena

Equivalente de arena (%)	Norma
84.74	>50

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2. Agregado grueso

#### 3.2.2.1. Tamaño Máximo (T.M.)

El T.M. del agregado grueso corresponde al material que pasa el 100% de la muestra:

$$\text{T.M.} = 1 \text{ plg.}$$

#### 3.2.2.2. Tamaño Máximo Nominal (T.M.N.)

El T.M.N. del agregado fino corresponde al material que pasa el 100% de la muestra:

$$\text{T.M.N.} = \frac{3}{4} \text{ plg.}$$

#### 3.2.2.3. Contenido de humedad por secado (ASTM C566)

Resumen del método

Este método establece la determinación del contenido de humedad del material mediante un secado en horno. El contenido de humedad fue determinado mediante ensayos que cumplen con la normativa indicada, el procedimiento del mismo se detalla en anexos.

Tabla 3.9. Resultados obtenidos contenido de humedad del agregado grueso

Humedad	
Dato	(gr)
Peso muestra húmeda	5000.00
Peso muestra seca	4936.00
Peso agua	64.00
% de humedad	1.30

Fuente: Elaboración propia

#### 3.2.2.4. Granulometría y módulo de fineza (ASTM C136, AASHTO T27)

Resumen del método

Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría de los agregados gruesos (grava). Es aplicable a los áridos que se emplean en la elaboración de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas. Tiene por objetivo obtener el porcentaje de material que pasa cada tamiz de la serie de tamices estándar (1", ¾", 1/2", 3/8" y N°4) y graficar su respectiva curva granulométrica para establecer la distribución de tamaños de agregados correspondientes al material, los cuales deben estar dentro de las especificaciones establecidas.

Figura 3.12. Tamizado mediante vibrador mecánico



Fuente: Elaboración propia

El módulo de fineza, se calculó una vez realizado el análisis granulométrico, es el resultado de la suma de los porcentajes acumulados retenidos sobre cada uno de los siguientes tamices:  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{3}{8}$ ", N°4, dividido entre 100.

Figura 3.13. Agregado grueso retenido en los tamices



Fuente: Elaboración propia

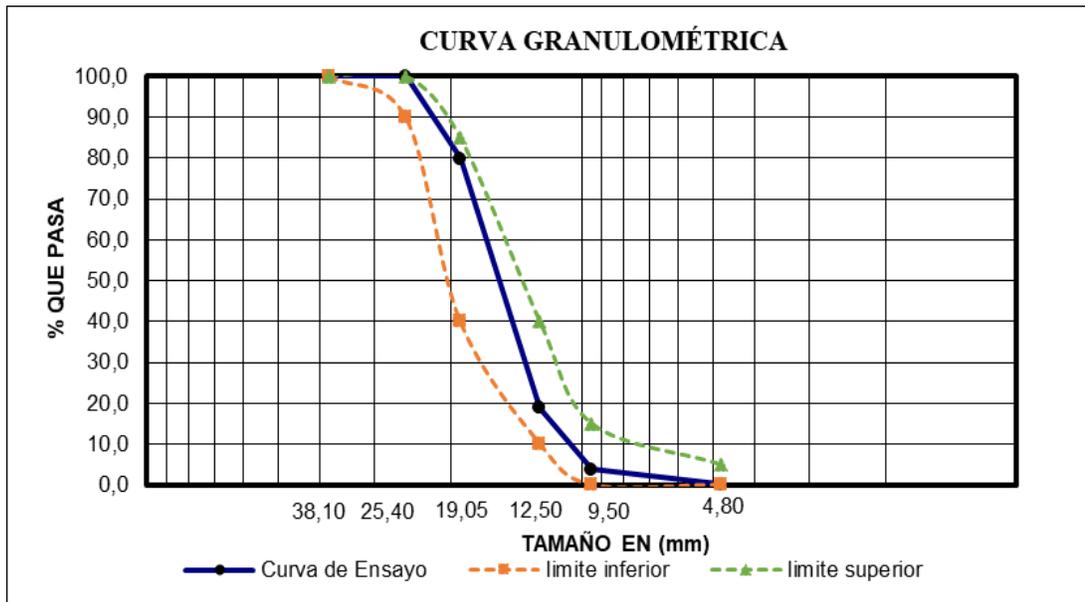
Los resultados obtenidos se reflejan en la tabla 3.10 y 1.11, el procedimiento del ensayo se detalla en anexos de la presente investigación.

Tabla 3.10. Resultados de la granulometría del agregado grueso

Peso total (gr.) =			5000		% Que pasa del total	% Que pasa ASTM C-33	
Tamices	Tamaño (mm)	Peso ret. (gr)	Retenido acumulado (gr)	Retenido acumulado (%)			
2 1/2"	63	0.00	0.00	0.00	100.0	-	-
2	50.8	0.00	0.00	0.00	100.0	-	-
1 1/2	38.10	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
1	25.40	0.00	0.00	0.00	100.0	90	100
3/4	19.05	1002.90	1002.90	20.06	79.9	40	85
1/2	12.50	3052.00	4054.90	81.10	18.9	10	40
3/8	9.50	749.40	4804.30	96.09	3.9	0	15
Nº4	4.80	184.40	4988.70	99.77	0.2	0	5
Base	0	9.20	4997.90	99.96	0.0		
Suma =		4997.90					
Pérdidas =		2.10					
M.F. =		7.16					

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.2. Curva granulométrica del agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2.5. Peso unitario del agregado grueso (ASTM C29, ASTM E30)

Este método de ensayo cubre la determinación del peso unitario suelto y compactado de los agregados gruesos bajo la normativa mencionada en colaboración con el manual de ensayos del laboratorio de hormigón.

## Resumen del método

En este ensayo se realizaría para peso suelto y compactado del agregado grueso, el peso suelto se determina llenando el recipiente cilíndrico el cual está bajo normativa en sus dimensiones para luego con el agregado hasta rebosar, se enrasa el excedente con la varilla y se realiza el pesado respectivo del material más el cilindro, cabe mencionar que previamente se debe tener el volumen del molde cilíndrico ya sea por medición o mediante la calibración del mismo.

Figura 3.14. Vaciado del agregado dentro del molde cilíndrico



Fuente: Elaboración propia

Para el peso unitario compactado se realiza en tres capas sucesivas, para ello se llena la tercera parte del recipiente con el agregado, se apisona con una barra metálica, mediante 25 golpes bien distribuidos y sin forzar la penetración excesiva, esto se realiza con las dos capas faltantes. Finalmente, se llena el recipiente con la última capa hasta rebosar se compacta con 25 golpes y se enrasa el excedente para luego realizar el pesaje de la grava compactada más el recipiente. Es importante mencionar que de igual manera se debe obtener el volumen del recipiente previo al ensayo, ya sea por medio de la medición directa o a través de la respectiva calibración. Los resultados obtenidos se reflejan en la tabla 3.11 y 3.12, el procedimiento del ensayo se detalla en el anexos de la presente investigación donde se muestra con mayor detenimiento el proceso de ensayo y como así también las diferentes fórmulas utilizadas.

Figura 3.15. Compactado del agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.11. Peso unitario suelto del agregado grueso

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente ( cm <sup>3</sup> )	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta ( gr )	Peso unitario suelto ( gr/cm <sup>3</sup> )
1	5845.00	9657.02	20121.00	14276.00	1.478
2	5845.00	9657.02	20153.00	14308.00	1.482
3	5845.00	9657.02	20166.00	14321.00	1.483
Promedio					1.481

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.12. Peso unitario compactado del agregado grueso

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente ( cm <sup>3</sup> )	Peso recip. + muestra compactado (gr)	Peso muestra compactada ( gr )	Peso unitario compactado ( gr/cm <sup>3</sup> )
1	5845.00	9657.02	21112.00	15267.00	1.581
2	5845.00	9657.02	21116.00	15271.00	1.581
3	5845.00	9657.02	21120.00	15275.00	1.582
Promedio					1.581

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2.6. Peso específico y absorción del agregado grueso (ASTM C127)

Este método de ensayo por objeto la determinación del peso específico a “granel” y peso específico aparente del agregado grueso y el porcentaje de absorción del mismo

Resumen del método

Primeramente, se realizará la preparación de la muestra con una masa de aproximadamente 5 kg, esta se obtendrá mediante cuarteo, luego se coloca la muestra dentro de un recipiente y se cubre la misma totalmente con agua y se deja allí por un periodo de 24 hrs.

Pasadas las 24 horas se retira el material del recipiente para poder así proceder a realizar el secado uniforme del agregado de manera superficial con la ayuda de un paño seco, el material se encuentra superficialmente seco cuando simplemente se nota el reflejo de los poros superficiales con pequeñas cantidades de agua, una vez logrado esto se procede a pesar el material.

Por ultimo ara luego, se sumerge la muestra en agua a través de un canastillo y realizar el pesaje bajo el agua y por ultimo realizar el secado a temperatura constante en horno.

Figura 3.16. Peso sumergido del agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.17. Secado superficial del agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos se reflejan en la tabla 3.13, el procedimiento del ensayo se detalla en anexos.

Tabla 3.13. Peso específico y absorción del agregado grueso

Ens. N°	Peso muestra secada "A" (gr)	Peso muestra saturada con sup. seca "B" (gr)	Peso muestra sat. dentro del agua "C" (gr)	Peso específico a granel ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	Peso específico S.S.S. ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	Peso específico aparente ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	% de abs.
1	4980.00	5060.00	3130.00	2.58	2.62	2.69	1.61
2	4985.00	5065.00	3125.00	2.57	2.61	2.68	1.60
3	4983.00	5060.00	3122.00	2.57	2.61	2.68	1.55
			Promedio	2.57	2.62	2.69	1.61

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2.7. Resistencia a la abrasión (ASTM C131, AASHTO T96)

Este ensayo nos permite estimar el efecto perjudicial que origina a los materiales, su grado de alteración, su baja resistencia estructural, plano de debilitamiento, plano de cristalización, forma de las partículas, cuyo objetivo es determinar la dureza de los materiales pétreos que se emplean en mezclas asfálticas y en los hormigones para pavimentos rígidos.

## Resumen del método

Para realizar el ensayo de resistencia a la abrasión por medio de la máquina de los ángeles se debe realizar previamente una selección del método a utilizar tabla 3.14 la cual está basada en la cantidad de material que pasa y retenido, esto se debe comparar con la granulometría obtenida del agregado y respecto a eso realizar la elección del método a utilizar y por consecuente el número de revoluciones y esferas a utilizar en el ensaye.

Se tamizará el material de acuerdo a la tabla 3.15 y 3.14, y se mezclaran las cantidades desacuerdo al método indicado. La muestra preparada se introducirá a la máquina de los ángeles junto a con las esferas de metal de acuerdo al tipo de gradación del material a ser analizado, previamente se debe cerciorar que la máquina de los ángeles se encuentre sin ningún tipo de material en su interior los cuales puede llegar a ser perjudicial para los resultados del ensayo. Posteriormente se asegurará la máquina y se procederá a dar 500 revoluciones. Finalizado el tiempo se procede a retira el material por la parte inferior de la máquina para posteriormente realizar el lavado y se secado del material en el horno a una temperatura constante de 110 °C, para finalmente realizar el pesado del material seco. El procedimiento del ensayo se detalla en anexos.

Figura 3.18. Equipo utilizado para el ensayo de desgaste de los ángeles



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.14. Peso del agregado y número de esferas para el ensayo

Método		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear (gr)			
Pasa	Retenido				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
Peso total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Número de esferas		12	11	8	6
N°de revoluciones		500	500	500	500
Tiempo de rotación		30	15	15	15

Fuente: Norma ASTM C-131

Tabla 3.15. Datos obtenidos en laboratorios de acuerdo al método seleccionado

Método A		Método B		Método C		Método D	
Tamiz	Peso retenido						
1"	1250	1/2"	2500	1/4"	2500	N°8	5000
3/4"	1250	3/8"	2500	N°	2500		
1/2"	1250						
3/8"	1250						

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.16. Resultados obtenidos del ensayo de desgaste de los ángeles

Ens. N°	Material	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	% De desgaste	Especificación ASTM
1	A	5000	4042	19.16	35% max.
2	B	5000	4045	19.10	35% max.
3	C	5000	4043	19.14	35% max.
			Promedio	19.13	35% max.

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.3. Cemento

#### 3.2.3.1. Peso específico (ASTM C188, AASHTO T133)

Para la determinación del peso específico del cemento se siguió la norma mencionada.

## Resumen del método

Este ensayo tiene por objeto determinar el peso específico del cemento, el valor que aquí se determina se usa específicamente para el diseño y control de la producción de mezcla de concreto. Se debe llenar un matraz hasta un nivel de 300 ml. con un líquido ya sea kerosene (sin agua) o nafta para posteriormente introducir 64 gr. de cemento y medir el nuevo volumen a temperaturas constantes y así determinar el peso específico del cemento.

Figura 3.19. Determinación del peso específico del cemento



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.17. Resultados obtenidos del peso específico del cemento

Tipo de cemento	Peso de la muestra (gr)	Vol. inicial (ml)	Temp. inicial (°C)	Vol. final (ml)	Temp. final (°C)	Peso específico ( gr/cm <sup>3</sup> )	Media peso específico ( gr/cm <sup>3</sup> )
El puente IP 30	64	300	21	320.4	20.5	3.14	3.14
El puente IP 30	64	300	21	320.3	21.5	3.15	
El Puente IP 30	64	300	21	320.4	22.5	3.14	

Fuente: elaboración propia

### 3.2.3.2. Finura del cemento

#### Resumen del método

El objeto de este método es la determinación de la finura del cemento, por medio del tamiz de malla N°40 Y N°200. Se realizará el tamizado de una muestra de 50 gr. y se hará el peso correspondiente del material que no pasa la malla N°200 para posteriormente realizar los cálculos.

Figura 3.20. Material para determinar la finura del cemento



Fuente: elaboración propia

Tabla 3.18. Resultados obtenidos de la finura del cemento

Ensayo 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 (%)
1	50	0.1	6.6	43.3	13.4	13.27
2	50	0.3	6.3	43.4	13.2	
3	50	0.1	6.5	43.4	13.2	

Fuente: elaboración propia

### 3.2.4. Grafito

#### 3.2.4.1. Material fino que pasa el tamiz N°200 (ASTM C117, AASHTO T11)

#### Resumen del método

Este método de ensayo describe el procedimiento para determinar la cantidad total de material fino que pasa el tamiz N°200. Se debe sumergir la muestra sobre agua hasta

taparla en su totalidad durante un periodo de 24 hrs. Para posteriormente realizar el lavado a través del tamiz N°200 y el secado del material en horno para obtener su peso en estado seco.

Figura 3.21. Determinación del material grafito que pasa tamiz N°200



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.19. Material fino menor que tamiz N°200 (grafito)

Tipo de material	Ensayo N°	Peso de la muestra (gr)	Peso ret. Tamiz N° 100 (gr)	Peso ret. tamiz N°200 (gr)	Peso ret. base (gr)	% De material que pasa tamiz N°200	Promedio de partículas que pasan tamiz N°200 (%)
Grafito	1	30	0	0.1	29.9	99.67	99.33
	2	30	0	0.3	29.7	99.00	
	3	30	0	0.2	29.8	99.33	

Fuente: elaboración propia

### 3.2.5. Limaduras de hierro fundido

#### 3.2.5.1. Material fino que pasa el tamiz N°200 (ASTM C117, AASHTO T11)

##### Resumen del método

Este método de ensayo describe el procedimiento para determinar la cantidad total de material fino que pasa el tamiz N°200. Se debe sumergir la muestra sobre agua hasta taparla en su totalidad durante un periodo de 24 horas. Para posteriormente realizar el

lavado a través del tamiz N° 200 y el secado del material en horno para obtener su peso en estado seco.

Figura 3.22. Tamizado de las limaduras de hierro fundido



Fuente: elaboración propia

Tabla 3.20. Material fino menor que tamiz N°200 (limaduras de hierro fundido)

Tipo de material	Ensayo N°	Peso de la muestra (gr)	Peso ret. tamiz N°100 (gr)	Peso ret. Tamiz N°200 (gr)	Peso ret. base (gr)	% de material que pasa tamiz N°200	Promedio de partículas que pasan tamiz N°200 (%)
Limaduras de hierro"	1	30	0.1	1.4	28.5	95.00	94.67
	2	30	0.2	1.5	28.3	94.33	
	3	30	0.3	1.3	28.4	94.67	

Fuente: Elaboración propia

## **CAPITULO IV**

### **DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO, ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS**

El presente capítulo estará dividido en dos partes, la primera referida netamente al diseño de la mezcla (dosificación, ensayo del cono de Abrams, vaciado de la mezcla de hormigón a probetas, curado y la rotura de probetas a compresión y flexión.). En la segunda parte se tendrá todo el análisis y la comparación de resultados de las propiedades mecánicas. Es importante recalcar que de acuerdo a lo planteado en la presente investigación el estudio de las propiedades mecánicas de concretos adicionados estará netamente referido a la resistencia a compresión, flexión y trabajabilidad.

El criterio empleado para el diseño de las mezclas de concreto, tanto la mezcla patrón como las mezclas con adición de grafito y limaduras de hierro fundido estará basado en la norma ACI-211.

El tipo de cemento utilizado es el IP-30, las muestras diseñadas serán sometidas a ensayos de compresión y flexo tracción. Los resultados obtenidos, serán analizados y comparados como se mencionó anteriormente. La adición del grafito y limaduras de hierro fundido es calculada como porcentaje de la mezcla (0.5%, 1%, 1.5%, 2% y 4%). El procedimiento detallado de los cálculos de dosificación se detalla en anexos. De igual manera los resultados obtenidos de la rotura de probetas a compresión y flexión se detallan en anexos.

#### **4.1. DISEÑO DE LA MEZCLA DE HORMIGÓN PARA PAVIMENTO**

##### **4.1.1. Dosificación del hormigón ACI-211**

La dosificación es la determinación de las proporciones apropiadas de cada uno de los materiales que componen el hormigón (cemento, grava, arena y agua) a fin de obtener las diferentes propiedades deseadas. Generalmente expresado en gramos por metro cubico. En el presente trabajo de investigación se procedió al diseño de la mezcla de hormigón mediante el método de dosificación ACI 211, el cual permite calcular 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 en su estado fresco como endurecido.

La dosificación del hormigón para la fabricación de mezclas de ensayos fue plasmada en la fabricación probetas cilíndricas y probetas prismáticas (vigas). El Documento ACI-211 resume el procedimiento de diseño de mezclas de concreto en 9 pasos que son:

Tabla 4.1. Procedimiento de diseño ACI 211

Paso	Descripción
1	Selección del asentamiento
2	Selección del T.M. del agregado
3	Calculo del agua de mezclado
4	Selección de la relacion agua cemento
5	Calculo del contenido de cemento
6	Estimación del volumen optimo del agregado grueso
7	Estimación del contenido de agregado fino
8	Ajuste de humedad del agregado
9	Selección de proporciones de la mezcla optima

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.1.1. Selección del asentamiento

El asentamiento es el principal parámetro para medir la consistencia que presenta el concreto en estado fresco, es por esta razón que antes de realizar cualquier dosificación en masa, el revenimiento o asentamiento del hormigón nos brinda un parámetro específico práctico y preciso de en qué estado se encuentra la mezcla ya sea esta en un estado seco, semi seco media, húmeda, etc. Si bien estas características de la mezcla no garantizan condiciones de mayor o menor resistencia del hormigón, pero si nos puede brindar un estimado del cual será su comportamiento a la hora de llevarlo a obra, una mezcla seca es sinónimo de baja trabajabilidad para ello se deben realizar primeramente pruebas de cono de Abrams que sirven para corregir si es necesario la dosificación de la mezcla de hormigón. La tabla 4.2 nos brinda una guía de la consistencia requerida por el concreto para diferentes tipos de construcción, por tratarse de mezcla para la elaboración de losas para pavimentos rígidos se buscó trabajar con una mezcla semi-seca, buscando un asentamiento aproximado de dos pulgadas. Sin embargo, como se ve en la relación para una muestra semi seca esta puede estar dentro de los rangos de 35 a 50 mm, considerando importante este último punto a la hora de realizar el ensayo de asentamiento.

Tabla 4.2. Asentamientos recomendados

Asentamiento recomendados para diversos tipos de construcción y sistemas de colocación y compactación				
Consistencia	Asentamiento (mm)	Ejemplo de tipo de construcción	Sistema de colocación	Sistema de compactación
Muy Seca	0 - 20	Prefabricación de alta resistencia, revestimiento, de pantallas de cimentación.	Con vibradores de formaleta; hormigones de proyección neumática.	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión.
Seca	20 - 35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibración intensa.
Semi - seca	35 - 50	Pavimentos, fundaciones en hormigón simple.	Colocación con maquinas operadoras manualmente.	Secciones simplemente reforzadas.
Media	50 - 100	Elementos compactados a mano, losas, muros y vigas	Colocación manual	Secciones medianamente reforzadas, sin vibración.
Húmeda	100 - 150	Elementos estructurales esbeltos	Bombeo.	Secciones bastante reforzadas, sin vibración.
Muy húmeda	150 o más	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos "in situ"	Tubo - embudo tremie	Secciones altamente reforzadas, sin vibración.

Fuente: Normativa ACI-211

#### 4.1.1.2. Selección del tamaño máximo

La elección del tamaño máximo del agregado estuvo en función de la granulometría del agregado grueso establecido en el capítulo III de la investigación, por lo tanto, el tamaño máximo considerado para la mezcla fue de 1 pulgada. De igual una manera de verificar que la elección del agregado grueso respecto a su tamaño es el correcto para el posterior diseño de la mezcla de hormigón se puede observar en la siguiente tabla la cual está basada en la sección con la que se va a trabajar en nuestro caso vigas y probetas cilíndricas de 15 cm de sección.

Tabla 4.3. Tamaño máximo de los agregados según el tipo de construcción

Tamaños máximos de agregados según el tipo de construcción				
Dimensión mínima de la sección (cm)	Tamaño máximo en pulg. (mm.)			
	Muros reforzados, vigas y columnas	Muros sin refuerzo	Losas muy reforzadas	Losas sin refuerzo o poco reforzadas
6 - 15	1/2"(12) - 3/4"(19)	3/4"(19)	3/4"(19) - 1"(25)	3/4"(19) - 1 3/4"(38)
19 - 29	3/4"(19) - 1 1/2"(38)	1 1/2"(38)	1 1/2"(38)	1 1/2"(38) - 3"(76)
30 - 74	1 1/2"(38) - 3"(76)	3"(76)	1 1/2"(38) - 3"(76)	3"(76)
75 o más	1 1/2"(38) - 3"(76)	6"(152)	1 1/2"(38) - 3"(76)	3"(76) - 6"(152)

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1.3. Estimación del contenido del agua de mezclado

El agua de mezclado cumple dos funciones importantes en una mezcla de concreto: la primera es hidratar las partículas de cemento y la segunda es producir la fluidez necesaria.

La cantidad de agua por unidad de volumen de concreta necesaria para producir el revenimiento deseado, depende principalmente del tamaño máximo, perfil, textura del agregado grueso y del asentamiento. De acuerdo a la tabla 4.4. proporcionada de la ACI 211 el volumen estimado es de 183 lt/m<sup>3</sup> para un revenimiento de 2 pulgadas.

Tabla 4.4. Requerimiento de agua aproximado

Requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, con partículas de forma angular y textura rugosa, en hormigón sin aire incluido									
Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm (plg.)							
		9.51 3/8"	12.70 1/2"	19.00 3/4"	25.40 1"	38.10 1 1/2"	50.80 2"	64.00 2 1/2"	76.10 3"
mm.	plg.	Agua de mezclado, en Kg/m <sup>3</sup> de hormigón							
0	0	223	201	186	171	158	147	141	132
25	1	231	208	194	178	164	154	147	138
50	2	236	214	199	183	170	159	151	144
75	3	241	218	203	188	175	164	156	148
100	4	244	221	207	192	179	168	159	151
125	5	247	225	210	196	183	172	162	153
150	6	251	230	214	200	187	176	165	157
175	7	256	235	218	205	192	181	170	163
200	8	260	240	224	210	197	186	176	168

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.1.4. Selección de la relación agua cemento

Debido a que la resistencia del concreto se rige principalmente por la resistencia e interacción de sus constituyentes como ser pasta-agregado (adherencia), es común que los diferentes agregados y cementos produzcan resistencias con la misma relación agua cemento. Por esta razón es importante conocer la relación agua cemento. Para el valor de la relación agua/cemento se tomó en cuenta como variables la resistencia a compresión establecida en el estudio 350 kg/cm<sup>2</sup> estableciendo una relación agua cemento de 0.4

Tabla 4.5. Relación agua cemento en el hormigón.

Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y la relación agua-cemento para los cementos Colombianos, portland tipo I, en hormigones sin aire incluido.			
Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Relación agua-cemento en peso		
	Limite superior	Linea media	Limite inferior
140	-	0.72	0.65
175	-	0.65	0.58
210	0.7	0.58	0.53
245	0.64	0.53	0.49
280	0.59	0.48	0.45
315	0.54	0.44	0.42
350	0.49	0.40	0.38

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.1.5. Selección del contenido de cemento

El cálculo del contenido de cemento fue resultado de la división de la cantidad de agua requerida entre la relación agua/cemento. El cálculo de manera detallada (ver anexos)

$$\text{Peso cemento (Pc)} = \frac{A}{a/c}$$

Donde:

Pc = Peso de cemento (kg/m<sup>3</sup>)

A = Requerimiento de agua de mezclado (kg/m<sup>3</sup>)

a/c = Relación agua cemento

#### 4.1.1.6. Selección del volumen óptimo de agregado grueso

Por lo general, la estimación de las proporciones de los agregados está basada en su tamaño máximo y gradación, debido a que la combinación granulométrica total de ambos agregados (fino y grueso), El método de dosificación ACI-211 está basado en la expresión  $b/b_o$  que fue introducida por primera vez por Richard y Talbot entre 1921 y 1923 en los Estados Unidos de América. Siendo el significado el siguiente:

$b$  = Volumen absoluto o solido del agregado grueso, por unidad de volumen de concreto.

$b_o$  = Volumen absoluto o solido del agregado grueso, por unidad del volumen compactado de agregado grueso

$b/b_o$  = Volumen compactado del agregado grueso, por unidad de volumen de concreto.

Para la selección del volumen óptimo del agregado grueso se utilizó como variables características del agregado grueso y fina (tamaño máximo nominal y módulo de finura) siendo el resultado de 0,609 de igual manera el cálculo se encuentra en una hoja electrónica (ver anexo).

Tabla 4.6. Relación agua cemento en el hormigón.

Volumen de agregado grueso, seco y compactado con varilla (a), por volumen de hormigón para diferentes módulos de finura de la arena (b).					
Tamaño máximo nominal del agregado grueso.		Módulo de finura de la arena			
mm.	plg.	2.4	2.6	2.8	3
9.51	3/8"	2.5	0.48	0.46	0.44
12.7	1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
19	3/4"	0.66	0.64	0.62	0.6
25.4	1"	0.71	0.69	0.67	0.65
38.1	1 1/2"	0.75	0.73	0.71	0.69
50.8	2"	0.78	0.76	0.74	0.72
76.1	3"	0.82	0.8	0.78	0.76
152	6"	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: Método ACI-211

#### 4.1.1.7. Estimación del contenido de agregado fino

Se realizó utilizando una hoja de cálculo, tomando en cuenta las variables calculadas en los puntos anteriores. (ver anexos).

#### 4.1.1.8. Ajuste por humedad

El ajuste por humedad se realizó en una hoja de cálculo tomando en cuenta las características del agregado fino y grueso (ver anexos).

#### 4.1.2. Proporciones optimas definidas de la mezcla de ensaye

Antes de determinar las proporciones optimas de la mezcla de hormigón como así también antes de llevar acabo de la dosificación, se seleccionaron las diferentes características de los materiales de la mezcla capítulo III las cuales se establecen en la siguiente tabla.

Tabla 4.7. Características de los componentes para la elaboración de la mezcla

Características de los agregados		
Ensayo	Unidad	Valor
1.- Modulo de Finura de la arena (M.F.)	s/u	2.91
2.- Peso Unitario Compactado de la grava ( P.U.C. )	kg/m <sup>3</sup>	1581
3.- Peso específico de la arena ( $\gamma_f$ )	gr/cm <sup>3</sup>	2.53
4.- Peso específico de la grava ( $\gamma_g$ )	gr/cm <sup>3</sup>	2.69
5.- Absorción de la arena ( Aa )	%	2.48
6.- Absorción de la grava ( Ag )	%	1.61
7.- Humedad de la arena ( Ha )	%	2.56
8.- Humedad de la grava ( Hg )	%	1.30
9.- Tamaño Máximo Nominal ( T.M.N. )	pulg	3/8"
10.- Tamaño Máximo ( T.M. )	pulg	1"
11.- Peso específico del cemento	gr/cm <sup>3</sup>	3.14

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.8. Datos obtenidos de tablas metodología ACI-211

Vol. Agr. Grueso / Vol. unitario concreto ( b/bo)	0.609	s/u
Requerimiento de Agua ( A )	183	kg/m <sup>3</sup>
Asentamiento ( S )	2	pulg
Relacion Agua / Cemento ( a/c )	0.4	s/u

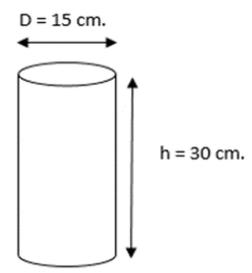
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.9. Dosificación por m<sup>3</sup> de hormigón

Ingrediente	Peso Seco kg/m <sup>3</sup>	Peso Húmedo kg/m <sup>3</sup>
Cemento	457.50	457.50
Agua	183.00	185.35
Grava	962.83	975.35
Arena	792.83	813.12
Total	2396.16	2431.32

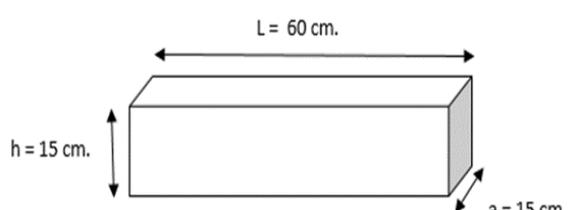
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.10. Dosificación aconsejada para moldes cilíndricos

Pesos de los ingredientes para moldes cilindricos			
 <p>D = 15 cm.</p> <p>h = 30 cm.</p> <p>Volumen = 0,00530 m<sup>3</sup></p>	Ingrediente	Peso seco	Peso húmedo
	Cemento (kg)	2.42	2.42
	Agua (Lt)	0.97	0.98
	Grava (kg)	5.10	5.17
	Arena (Kg)	4.20	4.31

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.11. Dosificación aconsejada para moldes prismáticos (vigas)

Pesos de los ingredientes para moldes prismaticos - vigas			
 <p>L = 60 cm.</p> <p>h = 15 cm.</p> <p>a = 15 cm.</p> <p>Volumen = 0,0135 m<sup>3</sup></p>	Ingrediente	Peso seco	Peso húmedo
	Cemento (kg)	6.18	6.18
	Agua (Lt)	2.47	2.50
	Grava (kg)	13.00	13.17
	Arena (Kg)	10.70	10.98

Fuente: Elaboración propia

### **4.1.3. Elaboración y curado de las muestras de hormigón**

Una vez determinada la dosificación más conveniente, se procede a la fabricación del concreto en masa. Para ello es necesario, almacenar las materias primas y disponer de instalaciones de dosificación adecuadas, así como del correspondiente equipo de mezclado. Documento referencial ASTM 192, AASTHO T126.

#### **4.1.3.1. Elaboración de la mezcla, probetas cilíndricas y vigas de prueba**

Abarca el procedimiento de preparación de la mezcla de hormigón tanto para las probetas cilíndricas y vigas de ensaye, el mismo que se realizó en el laboratorio de hormigones de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, bajo un control riguroso de pesos de materiales y condiciones de ensayo. Para la realización del vaciado de los moldes cilíndricos y vigas con hormigón se tomó en cuenta las indicaciones presentadas en la norma ASTM 192, AASHTO T126.

##### **4.1.3.1.1. Preparación de los materiales**

Se realizó el almacenamiento de los agregados y cemento en el laboratorio de hormigón de la U.A.J.M.S. ya que cuenta con un ambiente que nos brinda buenas condiciones. El cemento adquirido fue “el puente IP-30” de la misma fecha, con el fin de que las muestras sean uniformes durante todos los ensayos, se lo almacenó en un lugar seco y libre de humedad ya que esto llega a ser muy importante dentro de la resistencia que adquirirá la mezcla una vez diseñada y elaborada por lo que es muy importante tener el cuidado necesario del cemento además que este viene a ser el componente esencial de la mezcla.

Posteriormente se realizó el lavado con agua de los agregados por separado (grava y arena) con el fin de eliminar todas aquellas impurezas, material de desecho u otros que podrían causar condiciones desfavorables en las etapas posteriores. para el caso de la arena se utilizó un tamiz numero doscientos para con ayuda de este eliminar el material arcilloso o limoso posible que de igual manera puede llegar a ser perjudicial para el hormigón en las posteriores etapas en especial cuando se realice el análisis de resistencias tanto a compresión como a flexión en probetas cilíndricas y prismáticas Este procedimiento se realizó en laboratorio de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho y se llevó a cabo 24 horas antes de empezar los ensayos de hormigonado.

Figura 4.1. Lavado de los agregados (grava y arena)



Fuente: elaboración propia

Para el caso de los aditivos, las limaduras de hierro fundido fueron sometidas a un tamizado previo realizado con los tamices utilizados para la granulometría de la arena esto con el fin de eliminar toda impureza encontrada en el material ya que el mismo proviene de desechos de tornería. En cuanto al grafito este no fue el caso, ya que el mismo llega totalmente sellado y libre de impurezas.

Figura 4.2. Tamizado de limaduras de hierro fundido



Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.3.1.2. Pesaje de los materiales

Todos los materiales fueron pesados en balanzas precisas y sensibles al gramo, acorde con los requisitos exigidos en cuanto a sensibilidad reciproca y tolerancias según la A.B.C.

Figura 4.3. Pesaje del grafito y grava



Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.3.1.3. Mezclado del concreto

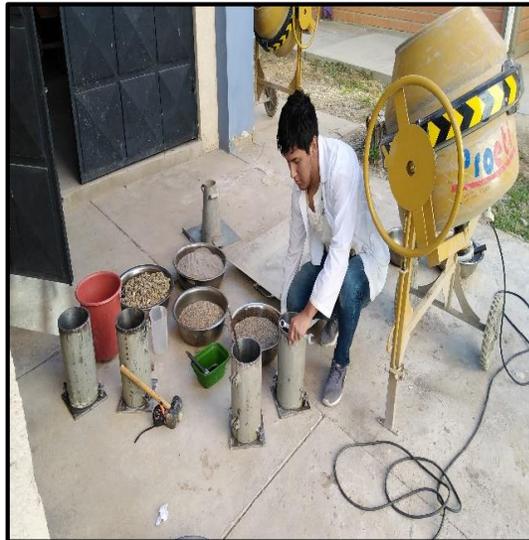
El concreto fue elaborado en una mezcladora mediana, la misma que era adecuada para la cantidad de hormigón que se debía preparar, dicha cantidad debía ser suficiente para realizar la prueba de cono y el moldeo de probetas y vigas de ensayo.

Para tener una idea más clara del proceso de mezclado, a continuación, se indica el orden y manera de introducir los materiales a la mezcladora para obtener una mezcla homogénea y satisfactoria:

1. Se humedece la mezcladora para que esta pueda estar libre de imperfecciones que a la hora de mezclarse con los componentes del hormigón lleguen a ser perjudiciales para la mezcla posteriormente se introduce primeramente la mitad de los agregados, se añade el agregado grueso, el fino, cemento y el agua, para que estos sean mezclados hasta un estado homogéneo esto se realiza por etapas en lo posible contemplando el tiempo de mezclado y logrando una mejor mezcla y combinación adecuada de los componentes del hormigón,

al lograr esto podremos tener rendimientos mucho más favorables tanto en trabajabilidad como en las diferentes resistencias a estudiar.

Figura 4.4. Preparación de materiales del hormigón previo al mezclado



Fuente: Elaboración propia

2. Se añade el cemento, aditivo, agua y agregados sobrantes para que se distribuya uniformemente en toda la mezcla. En lo posible el orden de mezclado se recomienda según el manual de ensayos de laboratorio de la U.A.J.M.S. realizarlo de menor a mayor y en consecuente dividido en dos partes, es decir se debe ir de lo más fino a lo grueso.

Figura 4.5. Materiales del hormigón y aditivo previo al mezclado



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.6. Mezclado de materiales



Fuente: Elaboración propia

3. Se controla el tiempo de mezclado, contado a partir del instante en que todos los materiales han sido colocados en la hormigonera que será de 3 minutos, descritos de la siguiente manera: se controlará los tres minutos descritos para luego dejar reposar otros tres minutos y por ultimo realizar el mezclado durante un tiempo de 2 minutos.

Figura 4.7. Materiales del hormigón y aditivo previo al mezclado



Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.3.1.4. Consistencia de la mezcla de concreto

Este es uno de los ensayos característicos en la elaboración del trabajo de investigación, se realizó con el objetivo de determinar la trabajabilidad del hormigón en estado fresco y a la vez influenciado por los diferentes porcentajes de los aditivos grafito y limaduras de hierro fundido.

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 tanto el molde cónico 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, ambos instrumentos usados para realizar el ensayo se encuentran totalmente normado según especificaciones técnicas y normativa mencionada de la Administradora Boliviana de Carreteras A.B.C.

Figura 4.8. Vaciado de la mezcla de hormigón para realizar el cono de Abrams



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.9. Varillado de la última capa en el cono de Abrams



Fuente: Elaboración propia

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

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 flexómetro se midió la disminución de altura desde el centro superior del cono invertido.

Figura 4.10. Lectura del asentamiento



Fuente: Elaboración propia

5. Este procedimiento se realizó de igual manera para la mezcla adicionada con grafito y limaduras de hierro fundido tal como se muestra en la figura 4.11 don se realiza la prueba de cono para la mezcla con grafito.

Figura 4.11. Ensayo del cono de abrams con mezcla adicionada con grafito



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.12. Ensayo del cono de abrams con mezcla adicionada con limaduras



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.3.1.5. Número de probetas y vigas de prueba

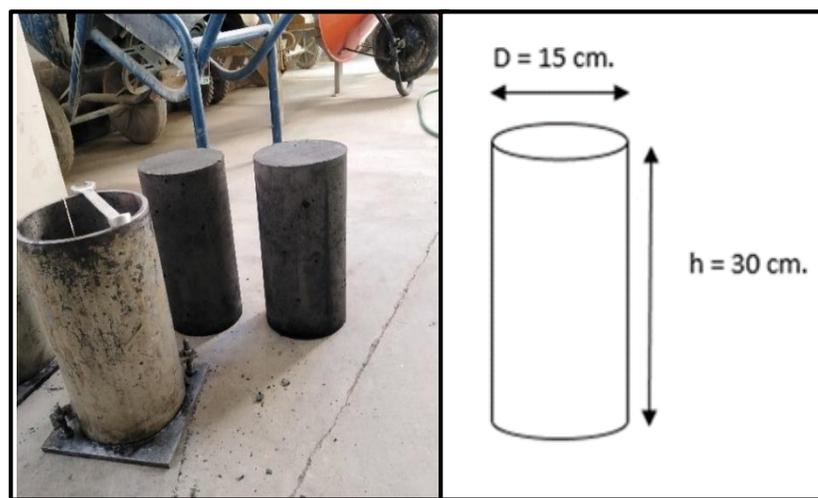
Para cada condición de ensayo se prepararon un número igual de probetas cilíndricas y prismáticas vigas, como base para obtener resultados a compresión y flexo-tracción, para posteriormente realizar el análisis y comparación de resultados. Para cada porcentaje de adición 0,5%, 1%, 1,5%, 2% y 4% (grafito y limaduras de hierro fundido) se realizaron cuatro probetas cilíndricas y cuatro prismáticas vigas. En el caso de la mezcla de hormigón sin adición se realizaron 8 probetas cilíndricas y 8 prismáticas vigas.

#### 4.1.3.1.6. Vaciado de probetas cilíndricas

Forma y dimensiones

Las probetas para el ensayo de compresión son de forma cilíndrica con una longitud igual a dos veces el diámetro (aproximadamente aconsejable por normativa del manual de la ABC). Las probetas cilíndricas Standard según normativa mencionada son de 15cm de diámetro y 30 cm de alto aproximadamente para concreto con agregado grueso de tamaño nominal inferior a 2", en la presente investigación se hizo uso de probetas cilíndricas metálicas cuyo diámetro es de 15 cm y una altura de 30 cm. Se debe tener en cuenta que las mismas estén en buen estado pues caso contrario podría surgir inconvenientes como pérdida de los componentes de la mezcla principalmente perdida del agua la cual es de vital importancia vaciado del hormigón. En la figura 4.13 se observa las probetas.

Figura 4.13. Dimensiones de las vigas



Fuente: Elaboración propia

## Procedimiento de vaciado

Los cilindros de ensayo son preparados colocando el hormigón en el molde en 3 capas de aproximadamente igual al volumen. Al colocar la mezcla en cada capa se debe observar que esta sea lo más homogénea posible. Cada capa se debe varillar 25 veces con una barra metálica de 5/8" de diámetro y 60 cm de largo con punta redondeada.

Figura 4.14. Varillado de la mezcla de hormigón



Fuente: Elaboración propia

Durante la realización del varillado por cada capa, se debe completar golpeando los costados del cilindro con un combo de goma logrando así una muestra homogénea.

Figura 4.15. Vibrado manual de la mezcla adicionada con grafito.



Fuente: Elaboración propia

Cada varillado debe ser distribuido uniformemente sobre la sección y de manera que penetren apenas en la capa de abajo, o en todo su espesor, si es la inferior. Después que la capa superior ha sido varillada, la superficie de la probeta debe ser alisada lo más uniforme posible con la varilla y luego con la plancha.

Figura 4.16. Probetas cilíndricas terminado el vaciado



Fuente: elaboración propia

Los cilindros de ensayo son sacados de los moldes 24 horas después de su preparación y son sumergidos en una piscina para su curado, a una temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 1$  hasta el momento de su rotura.

Figura 4.17. Desmoldado de probetas cilíndricas



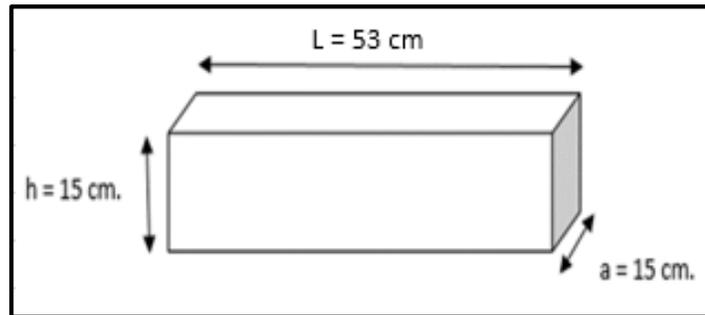
Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.3.1.7. Vaciado de probetas prismáticas (vigas)

##### Forma y dimensiones

las vigas de flexo-tracción tienen una forma prismática de sección 15 cm x15 cm, y una longitud de 53 cm, teniendo una luz de ensaye de 45.5 cm, cumpliendo con la norma ASTM C78, los moldes para las probetas de ensayo al flexo tracción son de metal rígido (plancha), no absorbentes.

Figura 4.18. Dimensiones de las probetas prismáticas



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.19. Probeta prismática de metal



Fuente: Elaboración propia

##### Procedimiento de vaciado y realización

Al igual que en el vaciado de probetas cilíndricas, el hormigón es colocado en capas de aproximadamente 3 pulgadas de espesor y cada capa es compactada de manera homogénea penetrando así la capa correspondiente a través de la varilla de ensayo.

Cada capa es golpeada y penetrada con la varilla de ensayo la cual esta proporcionada por laboratorio y bajo normativa, posteriormente el hormigón es enrasado quitando el hormigón en exceso, todo esto al alcanzar su última capa de vaciado y realizándose a lo largo de los 4 lados guiándose por los bordes del molde.

De igual manera se debe golpear los costados del molde prismático, este procedimiento se realiza por cada capa y mediante un combo de goma con el propósito de cerrar los vacíos existentes y conseguir una mezcla homogénea.

Después de completar las operaciones indicadas anteriormente, se debe realizar el afinado de la capa superior o final se debe nivelar con una regla metálica realizando así el alisado final.

Una vez concluido el vaciado del hormigón en las probetas, las vigas de ensayo se remueven de los moldes 48 horas después de su preparación y para luego entrar a la etapa de curado, siendo estas sumergidas en la piscina de laboratorio, a una temperatura de 23°C+- hasta el momento de su rotura.

Figura 4.20. Desmoldado de probetas y enrazado de probeta prismáticas



Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.3.2. Curado de probetas cilíndricas y vigas de prueba

De las operaciones necesarias para la ejecución de los elementos de hormigón, posiblemente sea el curado lo más importante, por la influencia decisiva que tiene en la

resistencia y demás cualidades del elemento final. El proceso de curado tanto de probetas como de vigas fue realizado en la sala de curado del laboratorio de la U.A.J.M.S y tomando en cuenta las recomendaciones establecidas en la norma ASTM 192, AASTHO T126. Se trata de un proceso simple de sumersión las muestras en la piscina de curado, y se realiza inmediatamente después de remover las probetas de sus respectivos moldes (el desmoldado se realizó 24 horas después del vaciado).

Las muestras de acuerdo a lo planteado en la presente investigación las probetas tanto cilíndricas como prismáticas vigas estuvieron sumergidas totalmente por un tiempo de 28 días, para luego realizar la evaluación de resistencia tanto a compresión como flexión. Se debe tener mucho cuidado de no golpear las probetas al momento de colara dentro de la piscina ya que estas siguen en un estado muy frágil, también se debe evitar en lo posible la colocación de sobre cargas de gran magnitud sobre las muestras ya que todo esto puede llegar a incidir en su futura resistencia y ocasionando alteraciones en los diferentes resultados a obtener. En la figura 4.24 se observa el curado de las probetas adicionales y sin adición alguna.

Figura 4.21. Curado de vigas y probetas cilíndricas



Fuente: Elaboración propia

#### **4.1.4. Ensayos de rotura de probetas a compresión y flexión**

##### **4.1.4.1. Rotura de probetas cilíndricas a compresión**

###### Objeto

Este método abarca el procedimiento para los ensayos de compresión de cilindros de hormigón bajo documento referencial ASTM C39, AASTHO T22

###### Equipo

Este ensayo se realizó en el laboratorio de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, mediante una prensa que tiene la rigidez suficiente para resistir los esfuerzos del ensayo sin alterar las condiciones de distribución y ubicación de la carga y lectura de los resultados. Tiene un sistema de rotula que permite hacer coincidir la resultante de la carga aplicada con el eje de la probeta. Las superficies de aplicación de las cargas son lisas y planas. El diámetro de las placas de carga es igual que el diámetro de las probetas.

###### Procedimiento

Las probetas estuvieron sumergidas en agua durante un periodo de tiempo igual a 28 días. Finalizando el tiempo de curado de las probetas se procedió a retirar de la piscina para luego ser ensayadas, el ensayo fue realizado en el laboratorio de la U.A.J.M.S.

Figura 4.22. Probetas cilíndricas retiradas de la piscina de curado



Fuente: Elaboración propia

Para las probetas antes de ser ensayadas y sometidas a los ensayos de compresión se debió extraer datos fundamentales de las mismas los cuales fueron datos de altura, diámetro y peso de la probeta, estos datos son fundamentales a la hora de hacer uso de la prensa de ensayo a compresión ya que por efecto se debe introducir estos datos a la máquina para poder realizar el ensayo de rotura entonces bajo estas circunstancias se procedió a introducir estos datos a la prensa.

Figura 4.23. Peso de las probetas cilíndricas



Fuente: Elaboración propia

Una vez terminada la extracción de datos para cada una de las muestras se procedió a realizar la rotura de cada una de ellas, 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 o más conocida como prensa de rotura, poniendo en situaciones un pequeño disco y por encima de este una lámina de goma para un mejor contacto. Al momento de introducir las probetas en la prensa se debe realizar una prueba de ensayo ejemplar para cerciorarse de que la maquina esté funcionando correctamente ya que de lo contrario esto podría generar fallas o errores a la hora de realizar la compresión, también se debe verificar que las proveas se encuentren libres de humedad es decir totalmente secas ya que de lo contrario de igual manera podría ser desfavorable a la hora de realizar la compresión de las mismas dando resistencias bajas o desviadas de acuerdo a lo esperado en la presente investigación

Figura 4.24. Ubicación de las probetas dentro de la prensa



Fuente: Elaboración propia

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.

#### Cálculos

Una vez realizada la medida del diámetro (D) y la altura (h) de la probeta, además se la debe pesar antes de colocarla a la prensa para realizar su rotura. Se registra la carga máxima (P), expresada en KN. Finalmente se calcula la resistencia a la compresión como la tensión de rotura según la siguiente formula:

$$R_c = \frac{F}{A}$$

Donde:

$R_c$  = Resistencia a la compresión (Kg/cm<sup>2</sup>).

F = Carga máxima aplicada (kg).

A = Área de la sección de ensayo (cm<sup>2</sup>).

#### **4.1.4.2. Rotura de vigas a flexión**

el ensayo a flexión en vigas rectangulares simplemente apoyadas se realizó siguiendo la norma mencionada ASTM C78, AASTHO T97 y T77.

##### **Objeto**

Este método de ensayo abarca el procedimiento para determinar la resistencia a la flexión del hormigón por el uso de una simple viga de 15 cm x 15 cm de sección y 53 cm como longitud teniendo una longitud efectiva de 45,5 cm cumpliendo con la normativa mencionada, cuando se aplica sobre ella una carga en los puntos tercios de la longitud efectiva.

##### **Equipo**

La prensa para el ensayo de flexión o tracción por flexión cuenta con un dispositivo de colocado manual y forma similar al de una viga de ensayo y regulable a diferentes dimensiones si fuera el caso, de igual manera cuenta con piezas para el apoyo de las vigas y piezas para aplicar la carga, con sus correspondientes accesorios, los que cumplen con los siguientes requisitos:

Los elementos de contacto con la viga tienen la superficie cilíndrica denominadas rotulas (de este modo se logra un contacto rectilíneo), en la parte superior cuenta con superficies planas que permiten el contacto directo con la prensa. También cuenta con accesorios que permiten fiar y mantener la luz de ensayo completamente estable.

Las rotulas que contienen son regulables para adaptarse en cierta medida a las dimensiones de las probetas prismáticas, a fin de evitar excentricidades y dificultades como inestabilidad y una regla graduada el cual permite un mejor acomodo de probetas. Estas rotulas de igual manera favorecen al momento de realizar las diferentes manipulaciones de las probetas prismáticas ya que de haber alguna falla al momento del colocado o al existir algún desajuste estas pueden ser solucionadas de manera inmediata realizando una intervención directa a las rotulas o hasta inclusive logrando cambiar las mismas por otras de mejor calidad también son favorables como se mencionaba anteriormente a la hora de realizar un ajuste de dimensión de las probetas.

Figura 4.25. Ubicación de las probetas dentro de la prensa



Fuente: Elaboración propia

### Procedimiento

Finalizando el tiempo de curado de las vigas se procedió a retirar de la piscina para luego ser ensayadas, el ensayo fue realizado en el laboratorio de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”, ya que cuenta con la maquina respectiva e indicada para el ensayo. Para las vigas antes de ser ensayadas se debió extraer datos de la sección, altura, y peso de la viga, para luego estos valores ser introducidos en la máquina de ensayo

Figura 4.26. Retiro del curado y pesaje de las vigas



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.27. Pesaje de probetas prismáticas



Fuente: Elaboración propia

En este caso se debió marcar las distancias a las que fueron apoyadas las cargas de acuerdo a la normativa ASTM C78 (P/2 aplicado en el tercio central).

Figura 4.28. Medición de los tercios de la viga



Fuente: Elaboración propia

Una vez terminada la extracción de datos para cada una de las muestras 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 superficial lisa y ubicado al centro de la placa

del dispositivo de apoyo para luego someterla a la prensa. Al finalizar se anotó como resultado la carga P que soporta cada muestra, con este dato se pudo calcular el valor de la resistencia utilizando las formulas respectivas.

Figura 4.29. Rotura de vigas



Fuente: Elaboración propia

### Cálculos

Se calcula la resistencia a flexo-tracción según la siguiente formula:

$$R_t = \frac{P * L_{ef}}{b * h^2}$$

Donde:

$R_t$  = Resistencia a la flexión ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ )

P = Carga máxima aplicada con la prensa (Kg)

a = Ancho de la sección de la viga (cm)

$L_{ef}$  = Luz de ensaye efectiva (cm)

h = Altura de la sección de la viga (cm)

## **4.2. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS**

El análisis a realizar en el presente trabajo de investigación adoptara un carácter principalmente de relación y comparación, entre los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a las mezclas de hormigón con y sin la incorporación de cada uno de los dos aditivos, pruebas realizadas tanto en estado fresco como endurecido.

En estado fresco se definen los resultados de asentamiento o revenimiento en función del tiempo, a través de la metodología empleada según normativa (ASTM C-143; AASHTO T119), determinando de esta manera el comportamiento de una de las principales propiedades del hormigón en estado fresco como es la trabajabilidad.

En estado endurecido se muestran los resultados de las pruebas de resistencia a compresión realizadas en probetas cilíndricas (documento referencial ASTM C39, AASHTO T22) y resistencia a flexión (documento referencial ASTM C78, AASHTO T97 y T77) realizadas en probetas prismáticas (vigas) a la edad de 28 días, resultados que determinaran el comportamiento de la mezcla de hormigón con y sin aditivo en cuanto a las propiedades mecánicas hacia las que está orientado el presente trabajo de investigación.

Relacionando estas variables en función de los diferentes porcentajes de adición (0.5 %, 1 %, 1.5 %, 2 % y 4%), se obtendrán gráficos consistentes en curvas ajustadas, que darán una idea real de cuál es el comportamiento de las mezclas con y sin adición de grafito y limaduras de hierro fundido, al tener una idea clara de dicho comportamiento se podrá realizar la comparación respectiva.

### **4.2.1. Resultados obtenidos del asentamiento de las mezclas de hormigón**

#### **4.2.1.1. Asentamiento de la mezcla de hormigón sin aditivo**

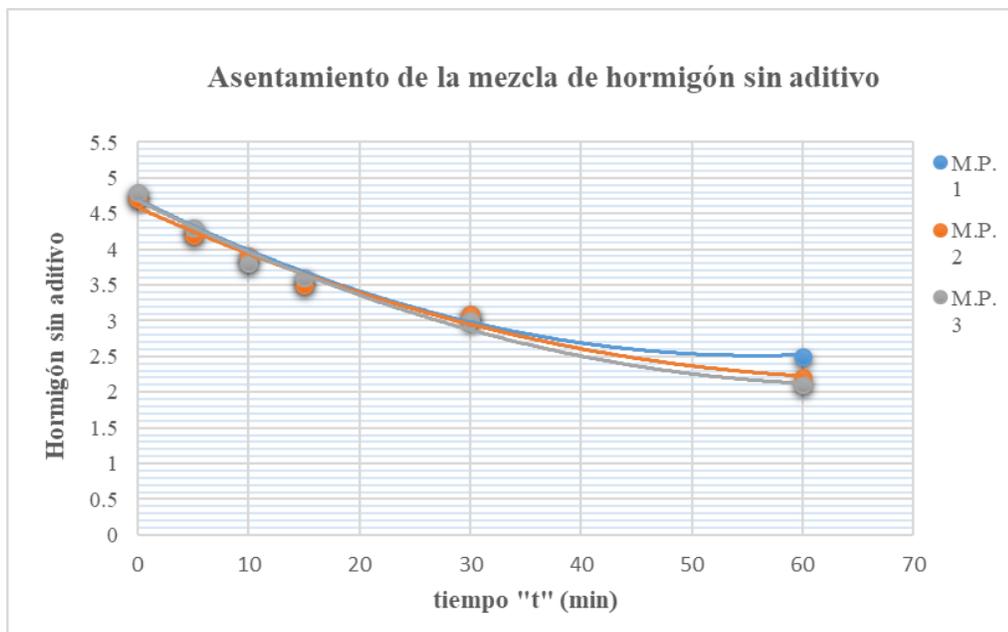
En la tabla 4.12 se muestran los resultados obtenidos del asentamiento a través del ensayo del cono de Abrams (ASTM C143) realizado a la mezcla sin adición. El ensayo se realizó tres veces para poder tener una idea más clara del comportamiento de la mezcla diseñada mediante dosificación ACI-211 y tener así un parámetro comparativo de mayor precisión. El ensayo se realizó en el laboratorio de hormigones y resistencia de materiales de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Tabla 4.12. Asentamiento de la mezcla de hormigón sin aditivos

Hormigón sin aditivo				
Tiempo (min)	Asentamiento (cm)			
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
0	4.8	4.7	4.8	4.8
5	4.3	4.2	4.3	4.3
10	3.9	3.9	3.8	3.9
15	3.6	3.5	3.6	3.6
30	3.1	3.1	3	3.1
60	2.5	2.2	2.1	2.3

Fuente: elaboración propia

Gráfica 4.1. Asentamiento de la mezcla de hormigón sin aditivos



Mezcla Patrón M.P.1	$S = 0.0007*(t)^2 - 0.0783*(t) + 4.7003$ $R^2 = 0.988$
Mezcla Patrón M.P.2	$S = 0.0007*(t)^2 - 0.0741*(t) + 4.5998$ $R^2 = 0.984$
Mezcla Patrón M.P.3	$S = 0.0006*(t)^2 - 0.0796*(t) + 4.6905$ $R^2 = 0.987$

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 4.12, fueron los esperados, ya que los valores de las mezclas sin aditivo se encuentran dentro del rango (35 -50 mm.) establecido en el trabajo de investigación tomando en cuenta las condiciones de obra a la que iba ser destinada el hormigón establecidos de acuerdo a la tabla 4.12 del presente capítulo (ACI 211). Mediante estos valores se ha determinado que evidentemente estamos tratando con un tipo de mezcla semi seca, observando que pasado los 30 a 45 min. aproximadamente la mezcla pierde trabajabilidad.

#### 4.2.1.2. Asentamiento de la mezcla de hormigón con aditivo

##### 4.2.1.2.1. Mezcla adicionada con grafito

La tabla 4.13 representa los resultados de asentamientos obtenidos al realizar las mezclas de hormigón de hormigón en laboratorio adicionadas con los diferentes porcentajes de grafito.

Tabla 4.13. Asentamiento de la mezcla de hormigón adicionada con grafito

Mezcla de hormigón con aditivo					
Tiempo (min)	Asentamiento (cm)				
	Porcentaje adicionado de grafito				
	0.50%	1%	1.50%	2%	4%
0	4.4	3.9	3.6	3.2	2.9
5	4.2	3.8	3.4	2.9	2.5
10	3.8	3.6	3.1	2.6	2.2
15	3.5	3.4	2.8	2.3	1.9
30	3.1	2.8	2.6	2	1.5
60	2.2	2	1.8	1.6	1.1

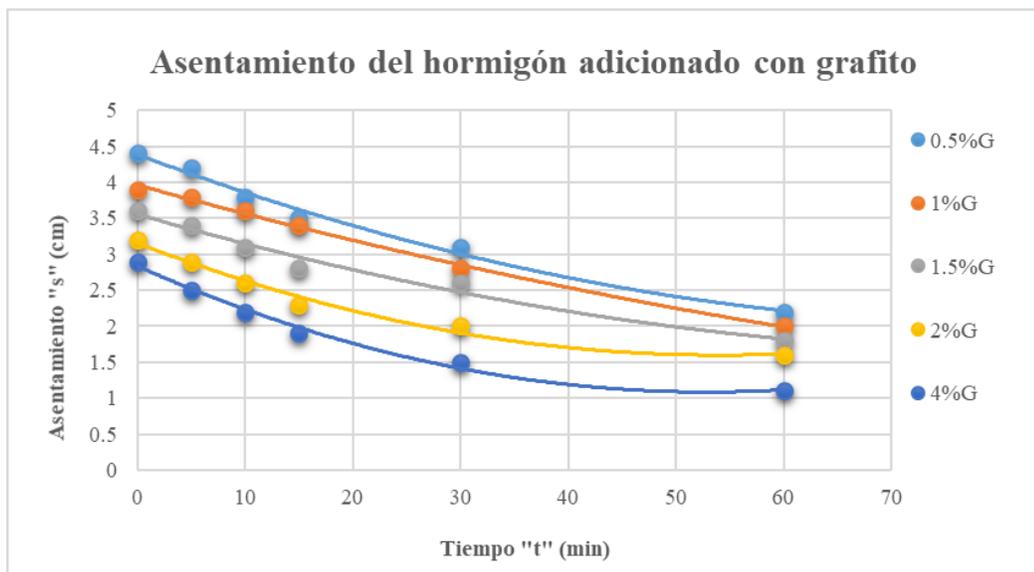
Fuente: elaboración propia

De acuerdo a la tabla 4.13 se aprecia que las mezclas elaboradas con un 0.50 % de grafito mantienen un asentamiento dentro de los parámetros establecidos al momento de realizar el ensayo del cono de abrams, partiendo con un asentamiento de 4.4 cm y variando de acuerdo a tiempo hasta alcanzar los 2.2 cm. Lo propio sucede con la mezcla adicionada al 1 % donde se inicia con un asentamiento de 3.9 cm., variando hasta los 2 cm. La mezcla adicionada al 1.50 % de grafito marca el límite del comportamiento aceptable de

asentamiento de acuerdo a lo establecido en previa dosificación, se inicia con 3.6 cm de revenimiento siendo el límite de variación establecido de 3.5 cm

A partir de los posteriores porcentajes de adición del 2 % y 4% de grafito la mezcla comienza a estar fuera del asentamiento deseado, partiendo de 3.2 y 2.9 cm., hasta los 1.6 cm y 1.1 cm. Sin embargo, cabe rescatar que no se encuentran con una diferencia abismal fuera de lo establecido, pasando simplemente de manera directa a ser una muestra seca.

Gráfica 4.2. Asentamiento en la mezcla con aditivo (grafito)



0.5 % de Grafito	$S = 0.0003*(t)^2 - 0.0561*(t) + 4.387$ $R^2 = 0.989$
1 % de Grafito	$S = 0.0001*(t)^2 - 0.0411*(t) + 3.961$ $R^2 = 0.996$
1.5 % de Grafito	$S = 0.0002*(t)^2 - 0.0434*(t) + 3.5563$ $R^2 = 0.976$
2 % de Grafito	$S = 0.0005*(t)^2 - 0.0577*(t) + 3.1556$ $R^2 = 0.986$
4 % de Grafito	$S = 0.0006*(t)^2 - 0.0662*(t) + 2.834$ $R^2 = 0.990$

Fuente: elaboración propia

De acuerdo a la representación gráfica 4.2, comprendida por los valores de asentamiento en el eje de las ordenadas y por el tiempo antes del fraguado inicial aproximadamente en el eje de las abscisas para mezclas adicionadas con grafito y cemento el puente IP-30, se puede observar que la secuencia de asentamiento varia de manera positiva los tres primeros porcentajes de adición es decir hasta el 1.5 %, definiendo como positiva el estar dentro de los parámetros definidos (3.5 cm - 5 cm). A partir de los porcentajes de 2 % y 4 % la mezcla comienza a estar fuera de rango y por ende la mezcla comienza a mostrar una menor trabajabilidad pasando de ser una mezcla semi seca a seca según criterios adoptados de acuerdo a la norma ACI-211. Por ultimo comparando el asentamiento de mezcla adicionada con grafito respecto a la mezcla sin adición se tiene una disminución del 8.33 % en la mezcla adicionada al 0.5 %; un 18.75 % al adicionar 1 % de grafito, 25 % al 1.5 %, 33.33 % al 2% y un 39.58 % al 4 %, mostrando claramente que a mayor porcentaje de adición se presentan asentamientos menores cambiando de ser una mezcla semi seca a seca a partir del 1.5 % de grafito adicionado. De acuerdo a lo observado en el desarrollo de la practica en laboratorio se cree que este comportamiento se debe principalmente a su pequeño tamaño y elevada capacidad de absorción que tiene el aditivo.

#### 4.2.1.2.2. Mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido

La tabla 4.14 representa los resultados de asentamientos obtenidos al realizar las mezclas de hormigón en laboratorio adicionadas con los diferentes porcentajes limaduras de hierro fundido.

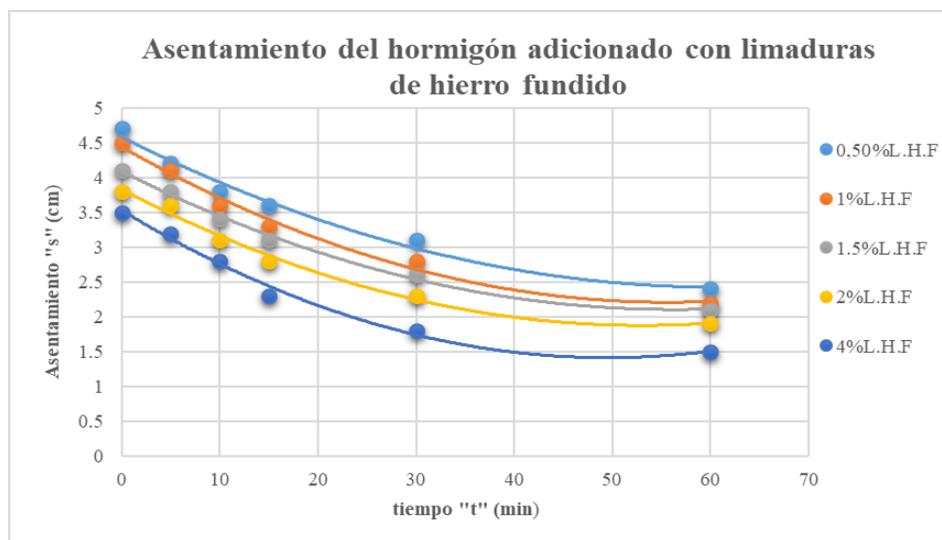
Tabla 4.14. Asentamiento de la mezcla con limaduras de hierro fundido

Mezcla de hormigón con aditivo					
Tiempo (min)	Asentamiento (cm)				
	Porcentaje adicionado con limaduras de hierro fundido				
	0.50%	1%	1.50%	2%	4%
0	4.7	4.5	4.1	3.8	3.5
5	4.2	4.1	3.8	3.6	3.2
10	3.8	3.6	3.4	3.1	2.8
15	3.6	3.3	3.1	2.8	2.3
30	3.1	2.8	2.6	2.3	1.8
60	2.4	2.2	2.1	1.9	1.5

Fuente: Elaboración propia

De manera general se puede observar que el comportamiento de la mezcla adicionada respecto al hormigón sin adición es prácticamente similar, es decir la variación es muy poca y por ende los asentamientos son casi iguales en los cinco valores de porcentajes adicionados. De manera detallada se puede analizar que el asentamiento para un porcentaje de 0.5 % de adición se encuentra dentro de los parámetros definidos, variando de 4.7 a 2.4 cm. Para una adición del 1 % el asentamiento es de 4.5 cm., de igual manera para un porcentaje de adición del 1.50 % el asentamiento se encuentra dentro de los límites con 4.1 cm., variando hasta 2.1 cm. A partir de las posteriores dosis de adición (2 y 4 %) el asentamiento comienza acercarse a los limitantes, obteniendo 3.8 cm al 2 % de limaduras de hierro fundido y 3.5 cm al 4 % de adición respecto a la mezcla, es importante resaltar que el asentamiento establecido por dosificación es de 3.5 - 5 cm (ACI-211).

Gráfica 4.3. Mezcla con limaduras de hierro fundido (asentamiento)



0.5 % Limaduras de hierro fundido	$S = 0.0006*(t)^2 - 0.0707*(t) + 4.5791$ $R^2 = 0.985$
1 % Limaduras de hierro fundido	$S = 0.0007*(t)^2 - 0.0802*(t) + 4.4379$ $R^2 = 0.988$
1.5 % limadurasde hierro fundido	$S = 0.0006*(t)^2 - 0.0704*(t) + 4.0864$ $R^2 = 0.995$
2 % Limaduras de hierro fundido	$S = 0.0007*(t)^2 - 0.0737*(t) + 3.8291$ $R^2 = 0.989$
4 % Limaduras de hierro fundido	$S = 0.0009*(t)^2 - 0.0855*(t) + 3.5287$ $R^2 = 0.989$

Fuente: Elaboración propia

Los valores de asentamiento en el eje de las ordenadas y por el tiempo antes del fraguado inicial aproximadamente en el eje de las abscisas para mezclas adicionadas con limaduras de hierro fundido, se observa que la secuencia de asentamiento disminuye a medida que se incrementa el porcentaje de adición es decir cuanto mayor es la cantidad adicionada la mezcla presenta asentamientos menores. Sin embargo es importante resaltar que a diferencia de la mezcla adicionada con grafito esta se encuentra dentro de los límites establecidos (3.5 cm -5 cm.) de asentamiento en todos y cada uno de sus porcentajes de adición, manteniéndose entonces como una mezcla semi seca durante todo su proceso de elaboración. Este comportamiento es favorable en cuanto a la trabajabilidad ya que nos permite realizar un vaciado mucho más cómodo y definido evitando así algunos problemas comunes como la segregación y la mala adherencia. Realizando una comparación de la mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido respecto a la mezcla sin adición se tiene una disminución de asentamiento del 2.08 % al 0.5 % de adición, del 6.25 % para una adición del 1 %, de igual manera una disminución del 14.58 % al 1.5 %, del 20.83 % al 2 % y del 27.08 % para una adición de limaduras de hierro del 4%.

#### 4.2.2. Peso específico del hormigón

##### 4.2.2.1. Peso específico del hormigón sin aditivo

Tabla 4.15. Peso específico de probetas cilíndricas sin aditivo

N° Probeta	Diámetro "D" (m)	Altura "h" (m)	Peso "w" (kg)	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )
P.P.1	0.15	0.3	12.61	2376.71
P.P.2	0.15	0.3	12.60	2376.71
P.P.3	0.15	0.3	12.62	2376.71
P.P.4	0.15	0.3	12.61	2378.60
P.P.5	0.15	0.3	12.63	2378.60
P.P.6	0.15	0.3	12.60	2378.60
P.P.7	0.15	0.3	12.63	2380.49
P.P.8	0.15	0.3	12.61	2380.49
P.P.9	0.15	0.3	12.60	2382.37
P.P.10	0.15	0.3	12.62	2382.37
			Promedio	2379.17
			Desviación	2.08

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.16. Peso específico de probetas primaticas (vigas) sin aditivo

N° Probeta	Base "a" (m)	Altura "h" (m)	Longitud "L" (m)	Peso "w" (kg)	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )
P.P.1	0.15	0.15	0.55	29.52	2385.45
P.P.2	0.15	0.15	0.55	29.54	2384.23
P.P.3	0.15	0.15	0.55	29.56	2384.40
P.P.4	0.15	0.15	0.55	29.52	2384.26
P.P.5	0.15	0.15	0.55	29.53	2386.26
P.P.6	0.15	0.15	0.55	29.54	2384.12
P.P.7	0.15	0.15	0.55	29.52	2385.45
P.P.8	0.15	0.15	0.55	29.51	2384.65
P.P.9	0.15	0.15	0.55	29.55	2383.98
P.P.10	0.15	0.15	0.55	29.53	2385.12
Promedio					2384.79
Desviación					0.71

Fuente: Elaboración propia

Cabe recalcar que el documento referencial del ensayo se realizó bajo normativa ASTM C138, AASTHO T121. Los resultados se obtuvieron tanto en el desarrollo de probetas cilíndricas sometidas a compresión como así también a probetas prismáticas (vigas) sometidas a flexo-tracción. Los resultados varían entre los 2376.71 kg/m<sup>3</sup> y 2382.37 kg/m<sup>3</sup> con una media de 2379.17 kg/m<sup>3</sup> para el caso de las probetas cilíndricas, en cuanto a los hormigones para vigas los valores oscilan entre los 2383.98 y 2386.26 kg/m<sup>3</sup> con una media de 2384.79 kg/m<sup>3</sup>. Según referencia teórica indicada en el capítulo II, de la presente investigación y según el manual de ensayos de la Administradora Boliviana de Carreteras ABC, los valores de peso específico de los hormigones destinados a la construcción de pavimentos, edificios y otros., varían entre los 2200 y 2400 kg/m<sup>3</sup> aproximadamente, valores que enmarcan de manera positiva los resultados obtenidos en laboratorio de la investigación es decir que los resultados obtenidos en las mezclas de hormigón sin ninguna clase de aditivos se encuentran dentro de los parámetros deseados o estimados previa desarrollo del mismo esto nos muestra que la investigación se encuentra por buen camino, también es importante mencionar que las la variación de peso específico en las probetas cilíndricas y las probetas prismáticas.

#### 4.2.2.2. Peso específico del hormigón con aditivo

##### 4.2.2.2.1. Peso específico del hormigón con grafito

En las siguientes dos tablas se presentan los resultados obtenidos de pesos volumétricos de las mezclas de hormigón adicionadas con grafito en sus diferentes porcentajes adicionados tanto en probetas cilíndricas como en prismáticas. Documento referencial ASTM C138, AASTHO T121.

Tabla 4.17. Peso específico de probetas cilíndricas con grafito

N° Probeta	Porcentaje de adición (%)	Diámetro "D" (m)	Altura "h" (m)	Peso "w" (kg)	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Promedio
P.G.1	0.50	0.15	0.30	12.62	2380.49	2383.32
P.G.2		0.15	0.30	12.64	2384.26	
P.G.3		0.15	0.30	12.63	2382.37	
P.G.4		0.15	0.30	12.65	2386.15	
P.G.5	1.00	0.15	0.30	12.66	2388.03	2386.62
P.G.6		0.15	0.30	12.64	2384.26	
P.G.7		0.15	0.30	12.66	2388.03	
P.G.8		0.15	0.30	12.65	2386.15	
P.G.9	1.50	0.15	0.30	12.68	2391.80	2392.28
P.G.10		0.15	0.30	12.69	2393.69	
P.G.11		0.15	0.30	12.67	2389.92	
P.G.12		0.15	0.30	12.69	2393.69	
P.G.13	2.00	0.15	0.30	12.70	2395.58	2392.75
P.G.14		0.15	0.30	12.68	2391.80	
P.G.15		0.15	0.30	12.67	2389.92	
P.G.16		0.15	0.30	12.69	2393.69	
P.G.17	4.00	0.15	0.30	12.70	2395.58	2393.22
P.G.18		0.15	0.30	12.68	2391.80	
P.G.19		0.15	0.30	12.68	2391.80	
P.G.20		0.15	0.30	12.69	2393.69	

Fuente: Elaboración propia

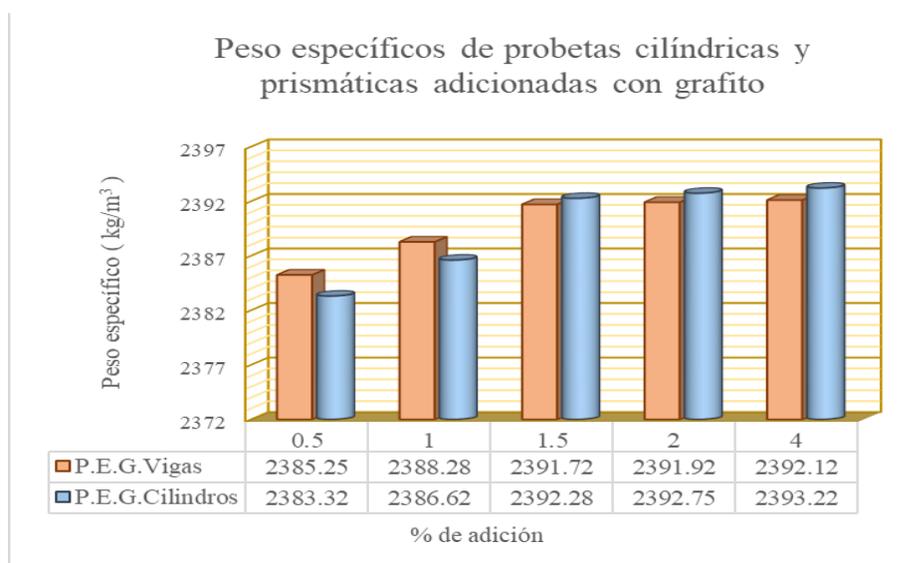
La tabla 4.17 refleja los pesos específicos de la mezcla de hormigón adicionada con grafito dentro de las probetas cilíndricas, resultados que de manera general se podría decir que son favorables o mejor dicho se encuentran por encima de las mezclas sin adición en todo y cada uno de los porcentajes adicionados sin embargo es importante hacer notar que aun con esta diferencia se encuentran dentro de los marcos teóricos referenciados en el capítulo II de la presente investigación.

Tabla 4.18. Peso volumétrico de probetas prismáticas con grafito

N° Probeta	Porcentaje de adición (%)	Base "a" (m)	Altura "h" (m)	Longitud "L" (m)	Peso "w" (kg)	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Promedio
P.G.1	0.50	0.15	0.15	0.55	29.51	2384.65	2385.25
P.G.2		0.15	0.15	0.55	29.50	2383.84	
P.G.3		0.15	0.15	0.55	29.52	2385.45	
P.G.4		0.15	0.15	0.55	29.54	2387.07	
P.G.5	1.00	0.15	0.15	0.55	29.53	2386.26	2388.28
P.G.6		0.15	0.15	0.55	29.56	2388.69	
P.G.7		0.15	0.15	0.55	29.57	2389.49	
P.G.8		0.15	0.15	0.55	29.56	2388.69	
P.G.9	1.50	0.15	0.15	0.55	29.59	2391.11	2391.72
P.G.10		0.15	0.15	0.55	29.61	2392.73	
P.G.11		0.15	0.15	0.55	29.58	2390.30	
P.G.12		0.15	0.15	0.55	29.61	2392.73	
P.G.13	2.00	0.15	0.15	0.55	29.59	2391.11	2391.92
P.G.14		0.15	0.15	0.55	29.63	2394.34	
P.G.15		0.15	0.15	0.55	29.56	2388.69	
P.G.16		0.15	0.15	0.55	29.62	2393.54	
P.G.17	4.00	0.15	0.15	0.55	29.62	2393.54	2392.12
P.G.18		0.15	0.15	0.55	29.63	2394.34	
P.G.19		0.15	0.15	0.55	29.59	2391.11	
P.G.20		0.15	0.15	0.55	29.57	2389.49	

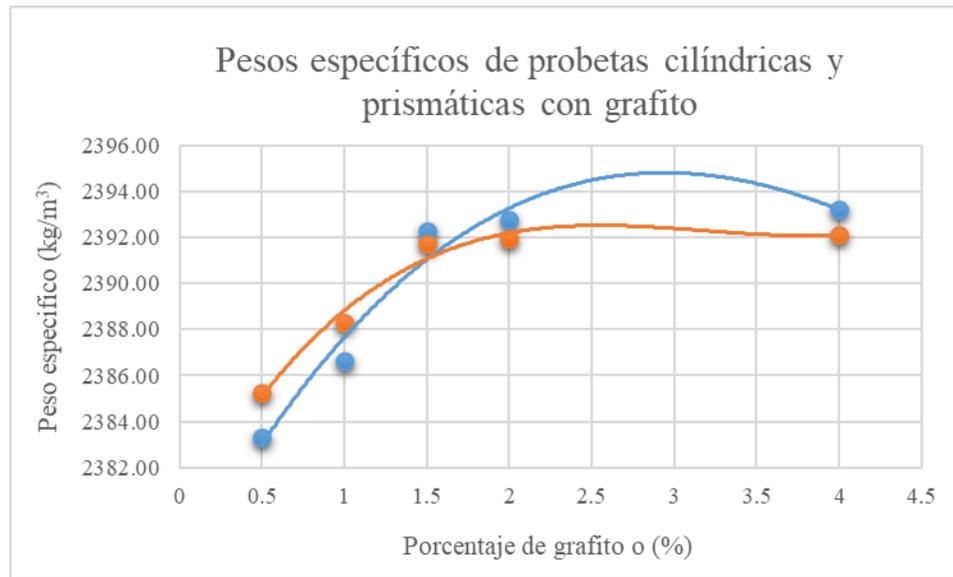
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.4. Peso específico de probetas con grafito (vigas y cilindros)



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.5. Variación del peso específico en vigas y cilindros con grafito



Peso específico en probetas Prismáticas adicionadas con grafito	$\gamma_{pg} = 0.4523 * (\%)^3 - 4.3023 * (\%)^2 + 13.111 * (\%) + 2379.6$
	R = 0.979
Peso específico en probetas cilíndricas adicionadas con grafito	$\gamma_{cg} = 0.1596 * (\%)^3 - 2.9985 * (\%)^2 + 13.489 * (\%) + 2377$
	R = 0.987

Fuente: Elaboración propia

La grafica 4.4 y 4.5 refleja pesos específicos superiores a los del hormigón sin aditivos 2379.17 y 2384.79 kg/m<sup>3</sup> cilindros y vigas respectivamente (tabla 4.15 y 4.16).

Sin embargo, esta diferencia no es de gran magnitud sino de manera proporcional respecto al porcentaje de adición. De igual manera se observa que los pesos específicos de las mezclas de hormigón adicionadas con grafito varían en forma ascendente hasta el 4 % de adición adquiriendo su mayor elevación de incremento al 1.5 % a partir de ahí el peso específico continua en aumento pero de manera moderada , en el caso de las probetas prismáticas iniciando con un valor promedio de 2385.25 kg/m<sup>3</sup> al 0.5 %; 2388.28 kg/m<sup>3</sup> al 1 %; alcanzando un valor al 1.5% de grafito 2391.72 kg/m<sup>3</sup>, a partir de ello los valores comienzan a elevarse de manera considerable 2391.92 kg/m<sup>3</sup> y 2392.12 kg/m<sup>3</sup> al 2 % y 4% respectivamente. Esto se produce de igual manera para probetas cilíndricas iniciando con un peso específico de 2383.32 kg/m<sup>3</sup> al 0.5 % de adición de grafito; 2386.62 kg/m<sup>3</sup> al

1 % y alcanzando un valor de 2392.28 kg/m<sup>3</sup> al 1.5 % para luego tomar valores de 2392.75 kg/m<sup>3</sup> y 2393.22 kg/m<sup>3</sup> al 2 % y 4 %. Es importante mencionar que aun al incrementarse los pesos específicos de las mezclas adicionadas respecto al patrón estos se mantienen en los rangos remarcados en el punto 4.2.2.1 de la presente investigación y capítulo II.

El comportamiento de los pesos específicos en las probetas cilíndricas y prismáticas como se observa principalmente en la gráfica 4.5, no mantienen un criterio fijo, es decir al ser las probetas prismáticas de mayor volumen y al depender de cierta manera el peso específico de ello, no garantiza que se tendrá superioridades en todo y cada uno de los porcentajes adicionados, sino que mantienen una alternatividad en cuanto a pesos bolómetros con las probetas cilíndricas. Esto se cree que es producto de la variación que se hace a la hora de realizar el procedimiento de llenado de hormigón a las probetas y por ende de la compactación que se le vaya a dar, es posible que haya surgido ciertas mezclas adicionadas con grafito cuya compactación dentro del molde prismático no haya sido la misma que en el molde cilíndrico, sin embargo, estos errores son aceptables ya que la variación no dista mucho y como así también se mantienen dentro de los rangos especificados en el marco teórico,

Es importante recalcar que los parámetros de control o comparación que se tienen de acuerdo a lo establecido en el punto 4.2.2.1 y como así también en el marco teórico de la presente investigación nos brinda un pequeño dato comparativo y de fijación considerando si se está yendo por buen camino o en todo caso para tener una idea de los resultados que van surgiendo conforme avanza la investigación estos parámetros también se encuentran de mejor manera remarcados en el manual de la Administradora Boliviana de Carreteras A.B.C.

#### **4.2.2.2.2. Peso específico del hormigón con limaduras de hierro fundido**

Las tablas 4.19 y 4.20 muestran los resultados obtenidos en laboratorio de pesos específicos de probetas cilíndricas y prismáticas adicionadas con limaduras de hierro fundido. Documento referencial ASTM C138, AASTHO T121. De igual manera se tuvo el apoyo como documento referencial la guía de laboratorio de hormigones de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Tabla 4.19. Peso específico de probetas cilíndricas con limaduras de hierro fundido

N° Probeta	Porcentaje de adición (%)	Diametro "D" (m)	Altura "h" (m)	Peso "w" (kg)	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Promedio
P.H.1	0.50	0.15	0.30	12.68	2391.80	2390.86
P.H.2		0.15	0.30	12.67	2389.92	
P.H.3		0.15	0.30	12.67	2389.92	
P.H.4		0.15	0.30	12.68	2391.80	
P.H.5	1.00	0.15	0.30	12.69	2393.69	2393.69
P.H.6		0.15	0.30	12.70	2395.58	
P.H.7		0.15	0.30	12.69	2393.69	
P.H.8		0.15	0.30	12.68	2391.80	
P.H.9	1.50	0.15	0.30	12.70	2395.58	2394.16
P.H.10		0.15	0.30	12.69	2393.69	
P.H.11		0.15	0.30	12.67	2389.92	
P.H.12		0.15	0.30	12.71	2397.46	
P.H.13	2.00	0.15	0.30	12.70	2395.58	2394.63
P.H.14		0.15	0.30	12.69	2393.69	
P.H.15		0.15	0.30	12.69	2393.69	
P.H.16		0.15	0.30	12.70	2395.58	
P.H.17	4.00	0.15	0.30	12.69	2393.69	2395.11
P.H.18		0.15	0.30	12.69	2393.69	
P.H.19		0.15	0.30	12.70	2395.58	
P.H.20		0.15	0.30	12.71	2397.46	

Fuente: Elaboración propia

Los pesos específicos de las probetas cilíndricas adicionadas con limaduras de hierro fundido se tiene valores superiores a las mezclas sin adición, valores que se inician con 2390.86 kg/m<sup>3</sup> al adicionar 0.5 % de limaduras de hierro fundido para luego seguir en ascenso con valores de 2393.69 kg/m<sup>3</sup> al 1 % de adición; al adicionar 1.5 % de limaduras se tiene un peso específico de 2394.16 kg/m<sup>3</sup> y para entrar al tramo final de elevación con 2394.63 kg/m<sup>3</sup> y 2395.11 kg/m<sup>3</sup> al 2 % y 4 % de adición. Como se observa los valores son ascendentes en todos los porcentajes de adición y su vez superiores a las mezclas sin adicionar sin embargo esto no condiciona o anticipa las reacciones que pueda tener en los posteriores ensayos de resistencia tanto a flexión como a compresión. En la siguiente tabla se presentarán los pesos específicos de la misma mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido, pero para el caso de las probetas prismáticas.

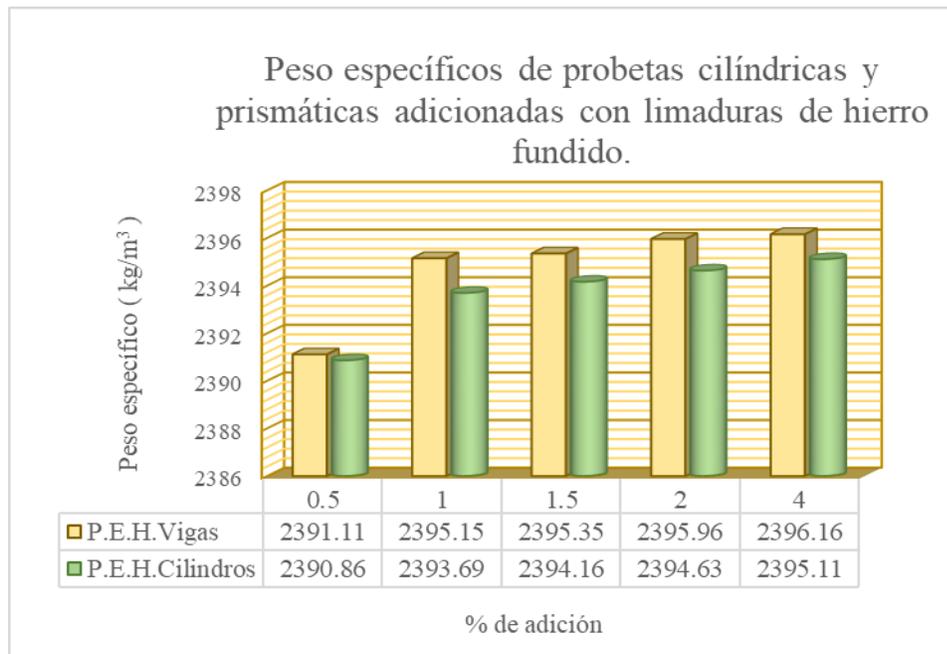
Tabla 4.20. Peso específico de probetas (vigas) con limaduras de hierro fundido

N° Probeta	Porcentaje de adición (%)	Base "a" (m)	Altura "h" (m)	Longitud "L" (m)	Peso "w" (kg)	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Promedio
P.H.1	0.50	0.15	0.15	0.55	29.62	2393.54	2391.11
P.H.2		0.15	0.15	0.55	29.59	2391.11	
P.H.3		0.15	0.15	0.55	29.57	2389.49	
P.H.4		0.15	0.15	0.55	29.58	2390.30	
P.H.5	1.00	0.15	0.15	0.55	29.64	2395.15	2395.15
P.H.6		0.15	0.15	0.55	29.65	2395.96	
P.H.7		0.15	0.15	0.55	29.63	2394.34	
P.H.8		0.15	0.15	0.55	29.64	2395.15	
P.H.9	1.50	0.15	0.15	0.55	29.66	2396.77	2395.35
P.H.10		0.15	0.15	0.55	29.63	2394.34	
P.H.11		0.15	0.15	0.55	29.65	2395.96	
P.H.12		0.15	0.15	0.55	29.63	2394.34	
P.H.13	2.00	0.15	0.15	0.55	29.66	2396.77	2395.96
P.H.14		0.15	0.15	0.55	29.66	2396.77	
P.H.15		0.15	0.15	0.55	29.67	2397.58	
P.H.16		0.15	0.15	0.55	29.61	2392.73	
P.H.17	4.00	0.15	0.15	0.55	29.65	2395.96	2396.16
P.H.18		0.15	0.15	0.55	29.66	2396.77	
P.H.19		0.15	0.15	0.55	29.64	2395.15	
P.H.20		0.15	0.15	0.55	29.66	2396.77	

Fuente: Elaboración propia

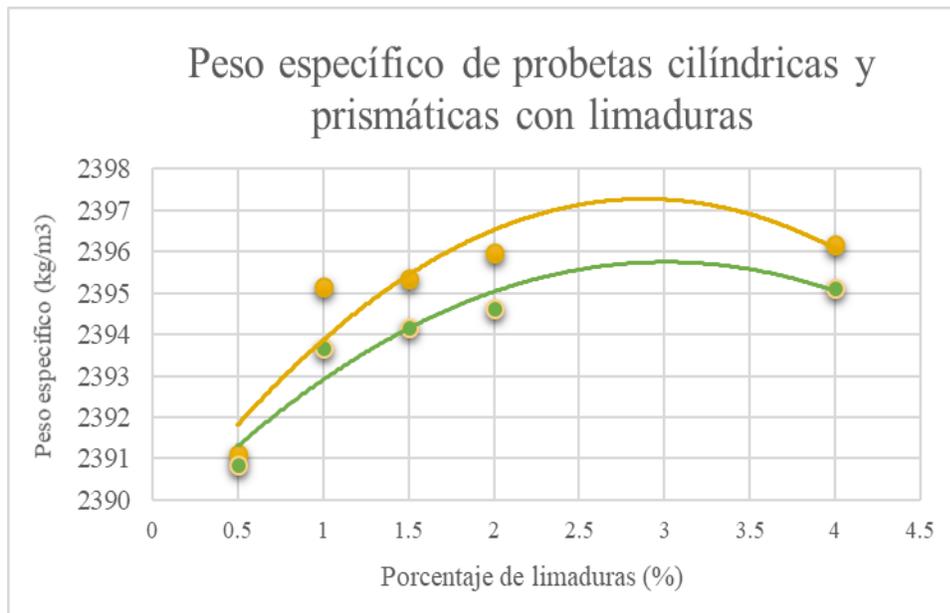
Los resultados obtenidos del peso específico en probetas prismáticas y cilíndricas se encuentran acorde a las expectativas planteadas, al igual que las mezclas adicionadas con grafito estas tienden a elevarse a medida que el porcentaje de el aditivo se incrementa esto se estima que es producido por el acomodo de las partículas adicionadas al hormigón, es decir a medida que la masa de aditivo aumenta se genera un mejor acomodamiento provocando así mayor peso y elevando de esta manera el peso específico del hormigón. Si bien no se tiene un estudio profundo científico de este comportamiento se puede asumir que el comportamiento se da de acuerdo a lo mencionado basado en los diferentes ensayos que se realiza a la mezcla adicionada. Por otro lado, existe una variación entre los pesos específicos de las mezclas en probetas cilíndricas y las probetas prismáticas lo cual es lógico debido a que el peso específico es directamente proporcional al volumen que lo contiene e inversamente proporcional a la masa propia de la probeta

Gráfica 4.6. Peso específico con limaduras de hierro fundido (vigas y cilindros)



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.7. Variación del peso específico con limaduras (vigas y cilindros)



Peso específico en probetas Prismáticas adicionadas con grafito	$\gamma_{pg} = -0.9609 * (\%)^2 + 5.5396*(\%) + 2389.3$
	R = 0.856
Peso específico en probetas cilíndricas adicionadas con grafito	$\gamma_{cg} = -0.7062* (\%)^2 + 4.2471*(\%) + 0.9114$
	R = 0.911

Fuente: Elaboración propia

Los pesos específicos de las mezclas adicionadas con limaduras de hierro establecidas en las tablas 4.19 y 4.20 son superiores a los resultados brindados por las mezclas de hormigón sin aditivo 2379.17 y 2384.79 kg/m<sup>3</sup> cilindros y vigas respectivamente (tabla 4.15 y 4.16) y a su vez superiores a las mezclas adicionadas con grafito tabla 4.17 y 4.18. Si bien la diferencia no es de gran tamaño, es de vital importancia hacer notar para desarrollar su análisis y conclusiones posteriores.

De acuerdo a lo reflejado en la gráfica 4.6 y 4.7 el comportamiento de las probetas cilíndricas y prismáticas son similares, lo que es lógico ya que parten de la misma mezcla y simplemente difieren del volumen que las contiene, estas varían de forma ascendente alcanzando un valor de elevación considerable al 1% de adición de limaduras para luego seguir con el ascenso de peso específico, pero de manera más disimulada. A diferencia de las mezclas con grafito estas si mantienen una secuencia fija de superioridad de las probetas prismáticas respecto a las mezclas en las probetas cilíndricas, sin embargo este comportamiento es totalmente indiferente como se mencionaba anteriormente ya que el peso por unidad de volumen en este caso dependerá del buen compactado o vibrado que se realiza durante el hormigonado de las diferentes probetas, ya que durante la elaboración de las mismas se presentan diversos problemas o errores que si bien son pequeños pueden llegar a influenciar a la hora de la determinación de los pesos, un claro ejemplo se mostró en las mezclas con grafito donde existe un intercambio de superioridad reflejando entonces estos pequeños inconvenientes que sin lugar a duda no son de mucha importancia ya que su variación es mínima.

Para el caso de las probetas prismáticas las cuales serán sometidas a flexo-tracción se tiene un peso específico promedio de 2391.11 kg/m<sup>3</sup> al 0.50 %, 2395.15 kg/m<sup>3</sup> al 1 % (valor de elevación considerable), 2395.35 kg/m<sup>3</sup> al 1.50 %, 2395.96 kg/m<sup>3</sup> al 2 % y 2396.16 kg/m<sup>3</sup>

al 4 % porcentaje final de adición. De igual manera el comportamiento de los pesos específicos para los cilindros adicionados con limaduras de hierro fundido se inicia con un valor de 2390.86 kg/m<sup>3</sup> al 0.50 %, 2393.69 kg/m<sup>3</sup> al 1% (valor de elevación considerable); 2394.16 kg/m<sup>3</sup> al 1.50%; 2394.63 kg/m<sup>3</sup> al 2 % y 2395.11 kg/m<sup>3</sup> al 4 %, como se mencionó en el anterior párrafo las probetas cilíndricas mantienen un similar comportamiento variando solo en ciertos valores los cuales pueden ser observados de forma más detallada en la tabla 4.19 y 4.20. Es importante hacer notar que estos valores de pesos por unidad de volumen se encuentran de igual manera dentro de los parámetros (2200 y 2400 kg/m<sup>3</sup>) establecidos de hormigones para pavimentos, edificios y otros, siendo estos mencionados en el punto 4.2.2.1. de la sección el cual hace referencia a lo indicado en el marco teórico de la investigación capítulo II de la presente investigación.

### 4.2.3. Resultados obtenidos de probetas cilíndricas sometidas a compresión

#### 4.2.3.1. Probetas cilíndricas de hormigón sin aditivo

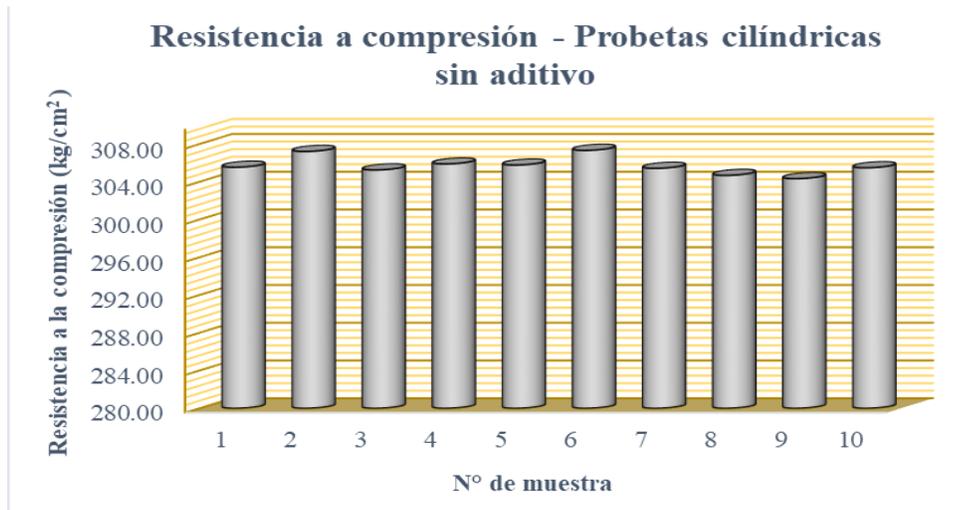
La tabla 4.21 muestran los resultados obtenidos en el ensayo de rotura de probetas cilíndricas de hormigón sin aditivo sometidas a la compresión en el laboratorio de hormigones y resistencia de materiales de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho según norma ASTM C-39 y AASTHO T-22.

Tabla 4.21. Resistencia a compresión en probetas cilíndricas sin aditivo

Mezcla de hormigón sin aditivo			
N° de probeta	Resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	Desviación estándar
1	305.55	305.70	0.91
2	307.23		
3	305.27		
4	305.90		
5	305.79		
6	307.34		
7	305.44		
8	304.69		
9	304.34		
10	305.50		

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.8. Probetas cilíndricas de hormigón sin aditivo sometidas a compresión



Fuente: Elaboración propia

La grafica 4.6. refleja la variación de la resistencia a compresión de las probetas cilíndricas sin ninguna clase de aditivo es decir las probetas patrón, estas se encuentran en un rango de 304.34 kg/cm<sup>2</sup> y 307.34 kg/cm<sup>2</sup>, obteniendo así de acuerdo a tabla 4.21 un promedio de resistencia igual a 305.70 kg/cm<sup>2</sup> y con una desviación de 0.91 valor que se encuentra de manera satisfactoria dentro de lo esperado. Es importante mencionar que los pavimentos rígidos trabajan principalmente a flexión por lo que los resultados obtenidos son considerados aceptables.

#### 4.2.3.2. Probetas cilíndricas de hormigón adicionadas con grafito

En la siguiente tabla 4.22 se muestran las resistencias alcanzadas (kg/cm<sup>2</sup>) a compresión de las probetas cilíndricas de hormigón adicionadas con grafito en sus diferentes porcentajes. La metodología de ensaye se realizó bajo la aplicación de la norma ASTM C-39 el ensayo se realizó en el laboratorio de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho haciendo uso de la prensa especial para rotura de probetas cilíndricas. De igual manera se tuvo como segundo apoyo la guía de laboratorio de hormigones, pero principalmente fue desarrollado tomando en cuenta como principal documento referencial el proporcionado por la Administradora Boliviana de Carreteras A.B.C

Tabla 4.22. Resistencia a compresión adicionadas con grafito

Mezcla de hormigón con grafito					
Porcentaje de adición (%)	N° de probeta	Resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	Desviación estándar	Resistencia máx. alcanzada (kg/cm <sup>2</sup> )
0.50	1	317.38	316.69	1.04	317.90
	2	316.28			
	3	315.19			
	4	317.90			
1.00	5	335.03	334.47	0.82	335.32
	6	334.34			
	7	333.19			
	8	335.32			
1.50	9	353.49	352.62	0.66	352.97
	10	352.97			
	11	351.76			
	12	352.28			
2.00	13	354.01	352.88	0.88	354.01
	14	351.76			
	15	353.43			
	16	352.34			
4.00	17	354.24	353.36	0.84	354.24
	18	353.78			
	19	351.99			
	20	353.43			

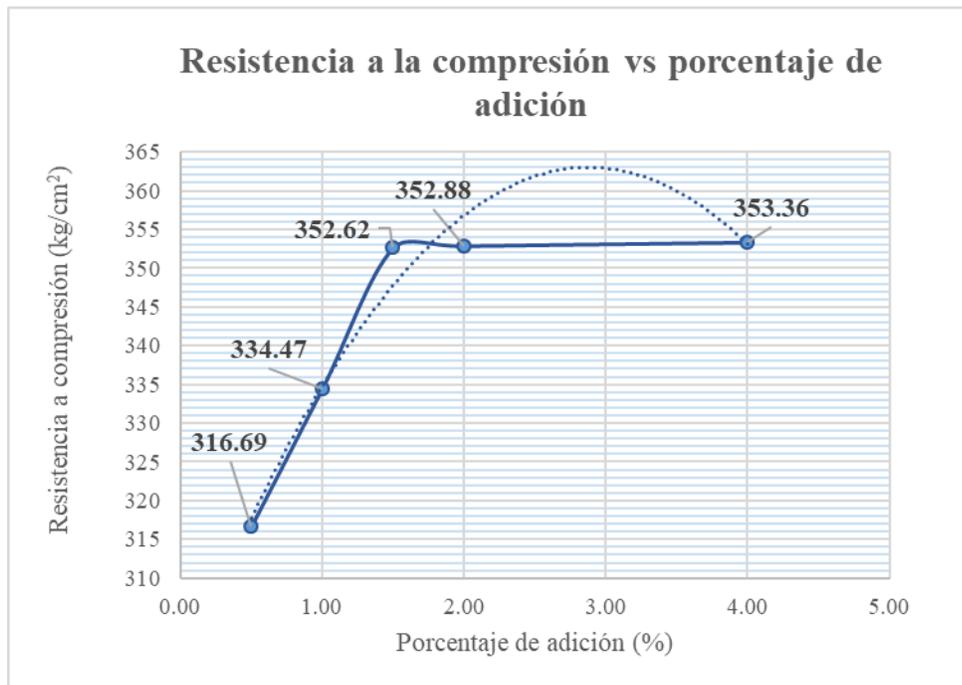
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.9. Probetas cilíndricas con grafito sometidas a compresión



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.10. Variación de la compresión en probetas cilíndricas con grafito



Resistencia a la compresión (Rc)	$R_f = -7.9885 * (\%)^2 + 46.044 * (\%) + 296.67$
	$R = 0.962$

Fuente: Elaboración propia

La grafica 4.10 nos muestra claramente los resultados ascendentes en cada uno de los puntos de adición (0.5 %, 1%, 1.5 %, 2 %, y 4 %), si bien no se tiene una correlación exacta que nos defina el comportamiento de la mezcla adicionada, la curva polinómica de segundo orden plasmada en la gráfica mencionada (línea segmentada) y la unión de los puntos (línea continua) nos muestran una idea clara y definida muy importante a la hora de interpretar estos resultados mediante el posterior análisis comparativo. La interpretación posterior de estos resultados se realizará considerando que se trata de la innovación de nuevos materiales dentro del concreto y por tal motivo una predicción exacta del comportamiento es casi imposible, sin embargo, como se mencionaba anteriormente la curva de ajuste presente en la gráfica cumple con las expectativas planteadas para poder llevar a cabo un análisis comparativo.

De igual manera en la gráfica 4.9 refleja una resistencia a compresión ascendente hasta el 4 % de adición de grafito, sin embargo, la elevación más sobresaliente se produce al 1.5 % de grafito. Luego toma un ascenso en los porcentajes de 2 % y 4 % de adición de manera considerable. Al adicionar el 0.5 % de grafito a la mezcla nos proporciona inmediatamente una resistencia a compresión de 316.69 kg/cm<sup>2</sup>; 334.47 kg/cm<sup>2</sup> al 1 % y alcanzando su elevación considerable resistencia de 352.62 kg/cm<sup>2</sup> al adicionar 1.5 %.; para luego seguir ascendiendo hasta una resistencia de 353.36 kg/cm<sup>2</sup> al 4 %.

#### 4.2.3.3. Probetas cilíndricas adicionadas con limaduras de hierro fundido

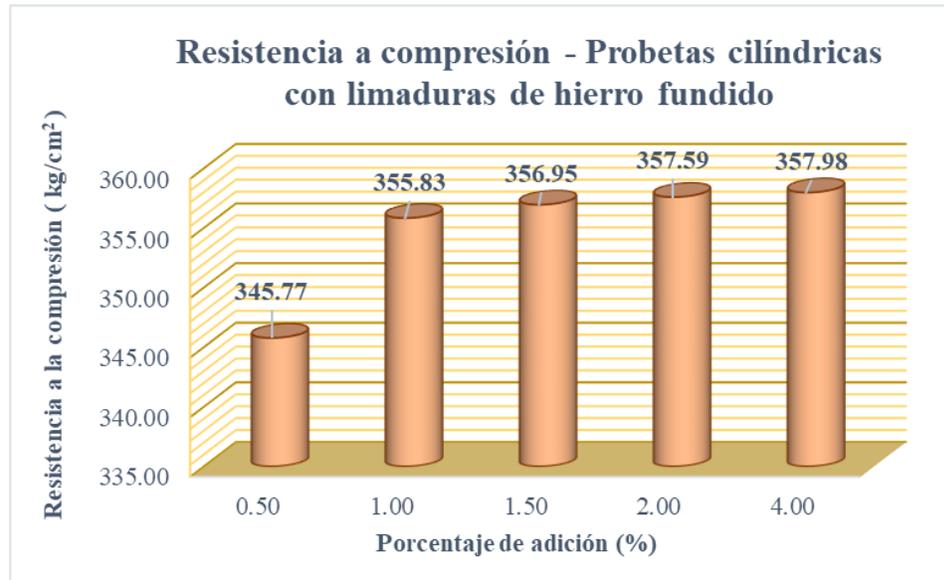
El resultado obtenido en resistencias a compresión realizadas a probetas cilíndricas adicionadas con limaduras de hierro se encuentra en la tabla 4.23 ASTM C39, AASTHO T22.

Tabla 4.23. Resistencia a compresión en probetas con limaduras de hierro fundido.

Mezcla de hormigón con aditivo					
Porcentaje de adición (%)	Nº de probeta	Resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	Desviación estándar	Resistencia máx. alcanzada (kg/cm <sup>2</sup> )
0.50	1	347.14	345.77	0.93	347.14
	2	345.93			
	3	345.47			
	4	344.55			
1.00	5	356.89	355.83	0.75	356.89
	6	355.45			
	7	354.87			
	8	356.09			
1.50	9	357.93	356.95	0.73	357.93
	10	356.37			
	11	357.36			
	12	356.14			
2.00	13	357.94	357.59	0.59	358.28
	14	356.72			
	15	358.28			
	16	357.41			
4.00	17	358.74	357.98	1.06	359.26
	18	357.24			
	19	359.26			
	20	356.66			

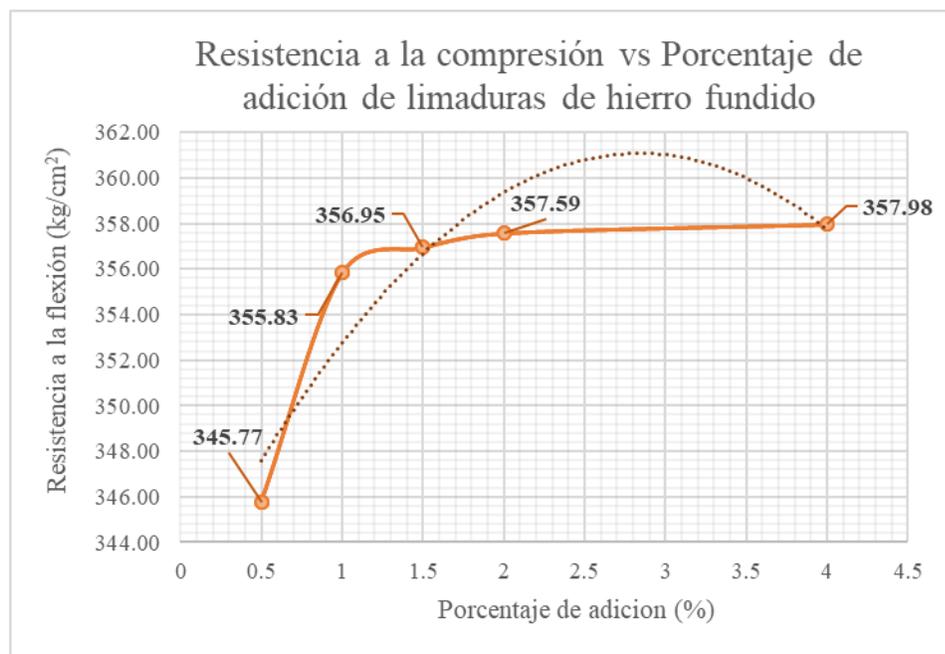
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.11. Compresión en probetas con limaduras de hierro fundido.



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.12. Resistencia a compresión en la mezcla con limaduras.



Fuente: Elaboración propia

Resistencia a la compresión (Rc)	$R_f = -2.4714 * (\%)^2 + 14.018 * (\%) + 341.21$
	R = 0.857

Fuente: Elaboración propia

De igual manera de acuerdo a la gráfica 4.11 la resistencia promedio alcanzada al adicionar diferentes porcentajes de limaduras de hierro fundido varían de forma ascendente hasta un 4 % de adición, se observa también que a diferencia del hormigón adicionado con grafito en las probetas cilíndricas el punto máximo o mejor llamado punto sobresaliente de elevación de resistencia se sitúa al 1 % de adición. Al 0.5 % de adición se produce una resistencia de 345.77 kg/cm<sup>2</sup>, para luego alcanzar su resistencia más resaltante producida al 1 % con 355.83 kg/cm<sup>2</sup>, a partir de ahí comienza un ascenso paulatino que no deja de ser llamativo, pero con una consideración menor alcanzando así su punto mayor con 357.98 kg/cm<sup>2</sup> al 4% de adición de limaduras de hierro fundido.

Este comportamiento creciente en todo y cada uno de los porcentajes adicionados de limaduras de hierro fundido se reflejan con mayor exactitud en la gráfica 4.12, donde se presenta un ajuste de curva polinómica de segundo orden para poder tener una idea aproximada del comportamiento de las resistencias en el concreto adicionado, la línea continua que une cada uno de los puntos también nos muestran específicamente el ascenso brusco de resistencia para luego generar una estabilidad en cuanto a la misma. Se puede observar de manera superficial que estamos frente a mayores resistencias respecto a las alcanzadas por las mezclas adicionadas con grafito mencionadas anteriormente, esto es sin duda favorable para la presente investigación ya que se manejan en ambos casos incrementos favorables respecto a la mezcla convencional sin aditivo.

#### **4.2.4. Resultados obtenidos de probetas prismáticas sometidas a flexión**

##### **4.2.4.1. Probetas prismáticas de hormigón sin aditivo**

En la siguiente tabla 4.24 se presentan las resistencias a la flexión obtenidas en laboratorio en cada una de las probetas prismáticas ensayadas (vigas) como así también la resistencia promedio y máxima alcanzada. El ensayo se realizó bajo procedimiento del manual de hormigones para pavimentos rígidos de la Administradora Boliviana de Carreteras ABC, ASTM C78, 293 Y AASTHO T 97- T77.

Tabla 4.24. Resistencia a flexión en mezcla de hormigón sin aditivo

Mezcla de hormigón sin aditivo			
N° de probeta	Resistencia a flexión (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	Desviación estándar
1	34.91	35.06	0.96
2	35.32		
3	34.08		
4	33.39		
5	35.87		
6	33.67		
7	36.01		
8	35.32		
9	36.14		
10	35.87		

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.13. Mezcla de hormigón sin aditivo sometida a flexión



Fuente: Elaboración propia

Dentro de lo especificado al inicio la resistencia a flexión esperada para la mezcla de hormigón sin aditivos es de 35 kg/cm<sup>2</sup>. El promedio de resistencia a la flexión en la presente investigación de acuerdo a tabla 4.24 es de 35.06 kg/cm<sup>2</sup> lo cual cumple satisfactoriamente con lo planteado. Los resultados que muestran la tabla 4.24 y grafica

4.9 muestran con mayor claridad lo estipulado, sin embargo, los resultados y datos obtenidos detalladamente en laboratorio se pueden observar en anexos. El ensaye de rotura por flexión de probetas prismáticas se desarrolló bajo la norma ASTM C-78 Y 293; AASTHO T 97 Y T 77.

#### 4.2.4.2.- Probetas prismáticas de hormigón adicionadas con grafito

La tabla 4.25 muestra las diferentes resistencias alcanzadas a flexión por las mezclas adicionadas con grafito. Norma ASTM C-78, 293; AASTHO T 97 Y T 77.

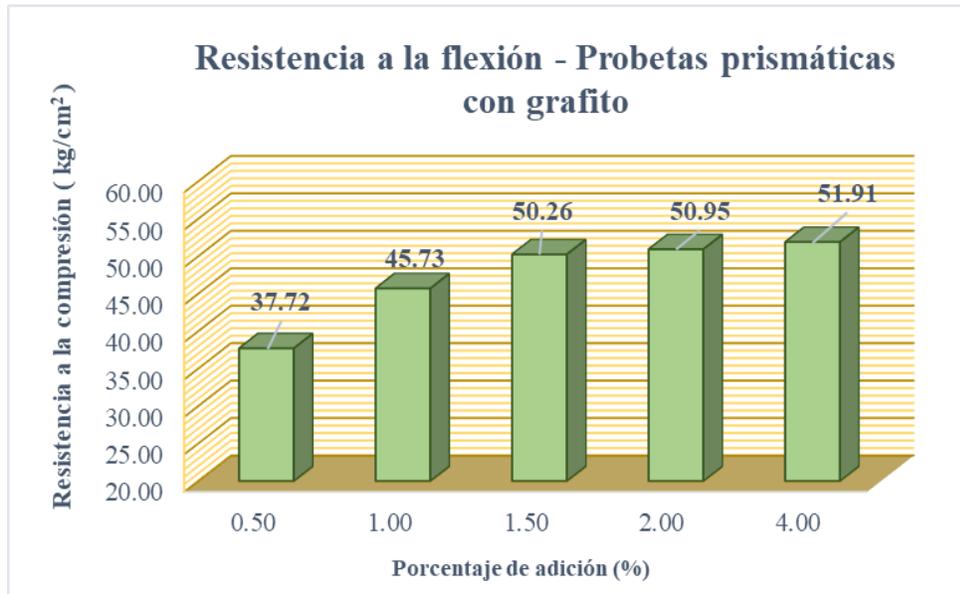
Tabla 4.25. Resistencia a flexión en mezcla de hormigón con grafito

Mezcla de hormigón con aditivo					
Porcentaje de adición (%)	N° de probeta	Resistencia a flexión (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	Desviación estándar	Resistencia máx. alcanzada (kg/cm <sup>2</sup> )
0.50	1	37.79	37.72	0.92	39.03
	2	36.42			
	3	37.65			
	4	39.03			
1.00	5	45.76	45.73	0.78	46.86
	6	44.66			
	7	46.86			
	8	45.63			
1.50	9	50.16	50.26	0.61	50.98
	10	50.98			
	11	50.57			
	12	49.34			
2.00	13	50.44	50.95	1.02	52.50
	14	51.12			
	15	49.75			
	16	52.50			
4.00	17	52.36	51.91	0.83	53.05
	18	50.99			
	19	51.26			
	20	53.05			

Fuente: Elaboración propia

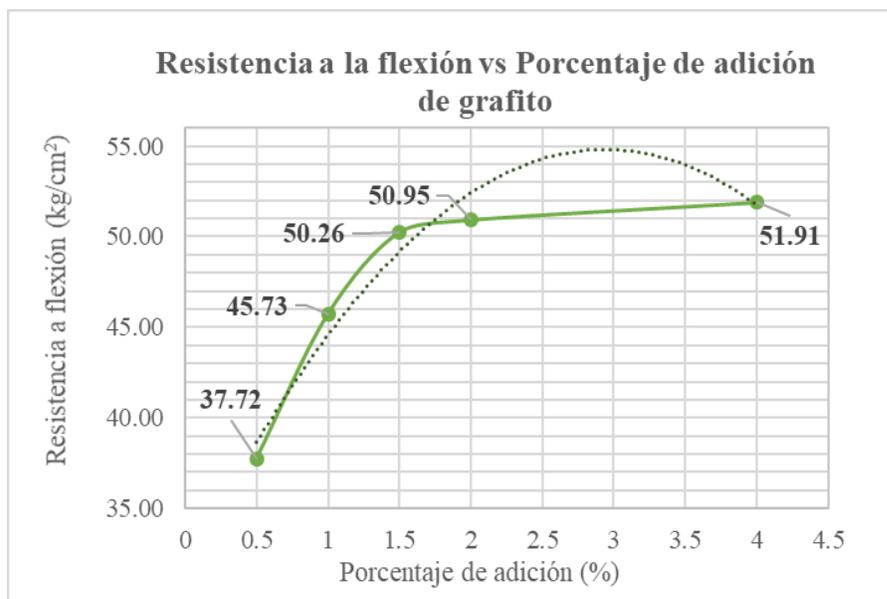
La tabla 4.25 muestra resultados satisfactorios en referencia a lo mencionado al inicio del presente capítulo, ya que el mismo hace una referencia a una resistencia de 35 kg/cm<sup>2</sup> el cual es cumplido y sobrepasado a simple vista en la respectiva tabla de resultados.

Gráfica 4.14. Resistencia a flexión de probetas prismáticas con grafito



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.15. Variación de la resistencia a flexión mezcla con grafito



Fuente: Elaboración propia

Resistencia a la flexión (Rf)	$R_f = -2.7212 * (\%)^2 + 15.995 * (\%) + 31.315$
	R = 0.960

Fuente: Elaboración propia

La variación de las resistencias promedio de flexión de acuerdo al porcentaje adicionado a partir del 0.50 % hasta alcanzar el 4 % tiene ascenso favorable, un ascenso hasta alcanzar un máximo de resistencia al adicionar 1.50 % de grafito a la mezcla, de tal manera que el comportamiento es similar al empleado a probetas cilíndricas donde se obtiene un punto notorio de sobresalto, este punto se presenta de igual manera en las probetas prismáticas el cual se refleja claramente en la gráfica 4.15. Los resultados inician con una resistencia promedio de 37.72 kg/cm<sup>2</sup> al 0.5 %, para luego incrementarse con 45.73 kg/cm<sup>2</sup> al 1 % y alcanzando un valor de 50.26 kg/cm<sup>2</sup> (punto sobresaliente) al adicionar 1.50% de grafito, a partir de este punto los resultados de resistencia a la flexión comienzan a mantenerse casi constantes pero con una tendencia al aumento aun existente esto se nota claramente al 2 % de adición con una resistencia de 50.95 kg/cm<sup>2</sup> y 51.91 kg/cm<sup>2</sup> al 4 % siendo este último superior al valor del porcentaje inicial. Claramente se denotan resultados favorables en cuanto a lo estimado para la presente investigación.

La grafica 4.15 refleja el comportamiento ascendente de la mezcla adicionada con grafito en cuanto a su resistencia a flexión, el mismo que por medio de un ajuste de curvatura polinómica de segundo orden brinda un enfoque bastante aproximado del comportamiento de la flexión en el concreto adicionado. De igual manera la línea continua que une los puntos marcados en el plano aclara y resalta los puntos sobresalientes mencionados en el anterior párrafo. También es importante considerar que las resistencias posteriores no dejan de ser llamativas ya que mantienen aún incrementos al seguir incrementando el porcentaje de adición, si bien no son amplias en relación con el punto de sobresalto estas podrían definir varios criterios en investigaciones futuras. El ajuste de curva si bien no es el esperado con total exactitud de aproximación se encuentra dentro de las expectativas planteadas ya que estamos frente a materiales totalmente nuevos y predecir su reacción dentro de las mezclas de hormigón es parte del objetivo principal a consolidar en el presente trabajo de investigación.

#### 4.2.4.3.- Probetas prismáticas adicionadas con limaduras de hierro fundido

En la tabla 4.26 se presentan los resultados obtenidos en probetas prismáticas adicionadas con limaduras de hierro fundido sometidas a flexión. El ensayo de rotura se realizó bajo la norma ASTM C-78 Y 293: AASTHO T97 Y T77.

Tabla 4.26. Resistencia a la flexión en mezcla con limaduras de hierro fundido

Mezcla de hormigón con aditivo					
Porcentaje de adición (%)	N° de probeta	Resistencia a flexión (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	Desviación estándar	Resistencia máx. alcanzada (kg/cm <sup>2</sup> )
0.50	1	46.45	45.18	1.14	46.45
	2	43.56			
	3	46.04			
	4	44.66			
1.00	5	52.36	51.74	0.87	52.77
	6	51.26			
	7	50.57			
	8	52.77			
1.50	9	52.50	52.12	0.61	52.91
	10	51.40			
	11	51.67			
	12	52.91			
2.00	13	54.42	52.98	0.90	54.42
	14	53.05			
	15	52.08			
	16	52.36			
4.00	17	53.73	53.25	1.11	54.42
	18	53.18			
	19	54.56			
	20	51.53			

Fuente: Elaboración propia

Las resistencias a flexión obtenidas y enmarcadas en la tabla 4.26 corresponden a resultados favorables tanto en las resistencias promedio a flexión obtenidas por porcentajes como así también las máximas generadas en cada situación, todo esto en cuanto a las expectativas planteadas a inicios del capítulo IV donde se estima tener una resistencia mínima en la mezcla de hormigón convencional de 35 kg/cm<sup>2</sup> valor que mediante los resultados obtenidos en laboratorio para el caso de mezclas adicionadas con

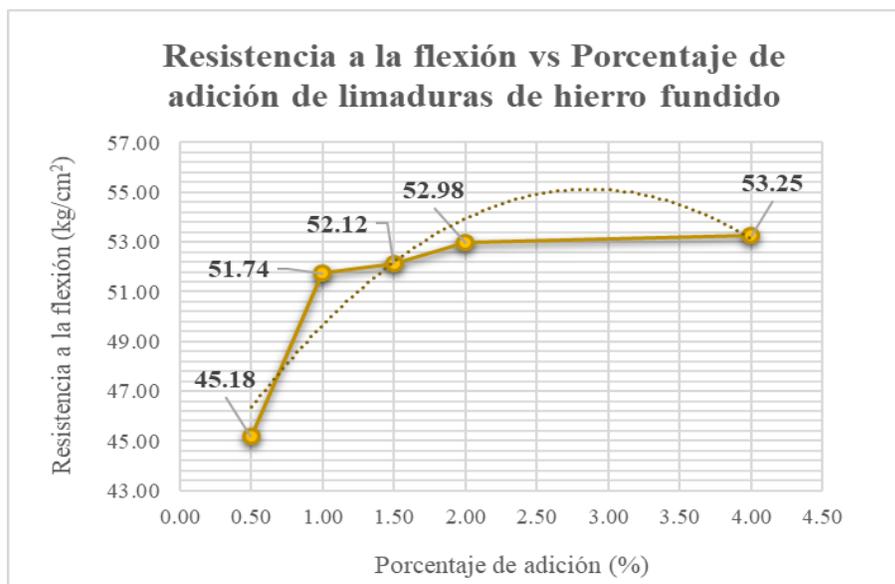
limaduras de hierro fundido es superado. Se observa también en la respectiva tabla un comportamiento ascendente de resistencias en todos los porcentajes de adición, este comportamiento se refleja con mayor detalle en la siguiente grafica 4.16.

Gráfica 4.16. Resistencia a flexión en mezclas con limaduras de hierro fundido



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.17. Probetas prismáticas con limaduras de hierro fundido



Fuente: Elaboración propia

Resistencia a la flexión (Rf)	$Rf = -1.5681 * (\%)^2 + 8.9888 * (\%) + 42.244$
	R = 0.851

Fuente: Elaboración propia

La grafica 4.16 refleja claramente el incremento proporcional de resistencia a la flexión de la mezcla adicionada generando de igual manera un punto de notoriedad a raíz del incremento del 1% de limaduras de hierro fundido a la mezcla, pasando este punto las resistencias continúan su camino en ascenso, pero con una superioridad más diminuta. los valores se inician con 45.18 kg/cm<sup>2</sup> al 0.5 % de adición hasta alcanzar los 53.25 kg/cm<sup>2</sup> al 4 % de adición.

Es evidente que la gráfica 4.17 termina de consolidar los incrementos constantes de resistencia a flexión en cada uno de los puntos de adición, el mismo que por medio de un ajuste de curvatura polinómica de segundo orden brinda un enfoque bastante aproximado del comportamiento de la flexión en el concreto adicionado. De igual manera la línea continua que une los puntos marcados en el plano aclara y resalta los puntos sobresalientes mencionados en el anterior párrafo. También es importante considerar que las resistencias posteriores no dejan de ser llamativas ya que mantienen aún incrementos al seguir el aumento del porcentaje de adición, si bien no son amplias en relación con el punto de sobresalto estas podrían definir varios criterios en investigaciones futuras y así contribuir de diferentes perspectivas a los concretos adicionados.

#### **4.2.5. Análisis comparativo de resistencias a flexión con y sin aditivo**

En el presente punto se presentará un análisis comparativo de los resultados obtenidos durante los ensayos de flexión a los cuales fueron sometidas las mezclas de hormigón con y sin aditivos a través de probetas prismáticas (vigas). Es importante mencionar que la comparación se realiza mediante las resistencias promedio obtenidas producto de cuatro especímenes de ensayo por cada porcentaje, realizándose esto tanto en la mezcla convencional sin aditivo como en la mezcla adicionada en los porcentajes de 0.5 %, 1 %, 1.5 %, 2 %, 2.5 % y 4 % de grafito y limaduras de hierro fundido.

#### 4.2.5.1. Mezcla adicionada con grafito.

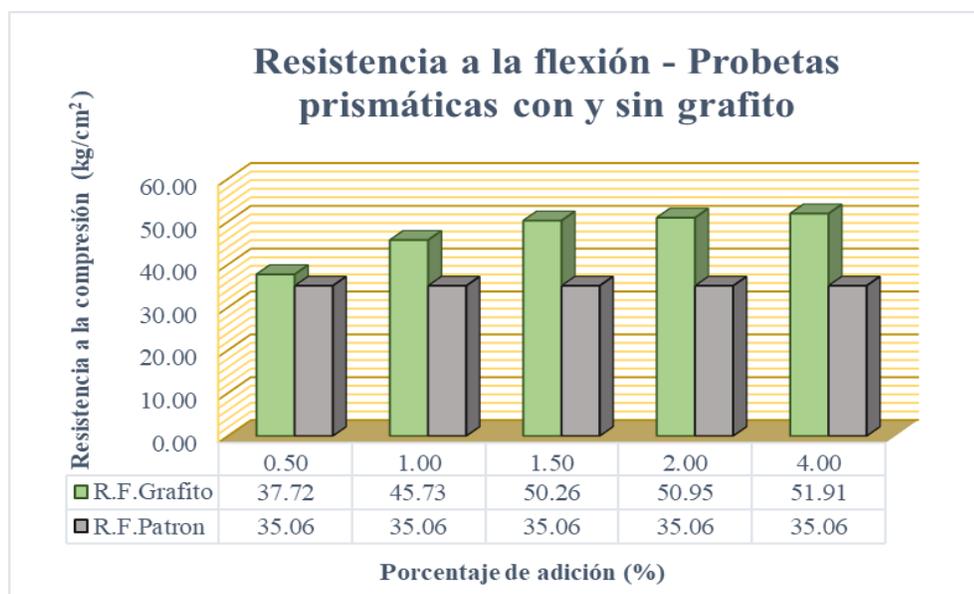
Tabla 4.27. Resultados obtenidos en los ensayos a flexión con y sin grafito

Mezcla adicionada con grafito		Mezcla sin aditivo
Porcentaje de adición (%)	Resistencia a la flexión (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la flexión (kg/cm <sup>2</sup> )
0.50	37.72	35.06
1.00	45.73	
1.50	50.26	
2.00	50.95	
4.00	51.91	

Fuente: Elaboración propia

Las resistencias a la flexión generadas en la mezcla adicionada con grafito son favorables para la presente investigación ya que dichos valores superan la resistencia de la mezcla convencional sin aditivo, es decir, al adicionar grafito a la mezcla la resistencia a flexión aumenta. Este incremento se inicia con una resistencia de 37.72 kg/cm<sup>2</sup> (punto más bajo) al 0.5 %; 45.73 kg/cm<sup>2</sup> al 1 %; para luego llegar a uno de los puntos más elevados con una resistencia de 50.26 kg/cm<sup>2</sup> al 1.5% y comenzar con incrementos con resistencias de 50.95 y 51.91 kg/cm<sup>2</sup> para un porcentaje de adición del 2 % y 4 % respectivamente.

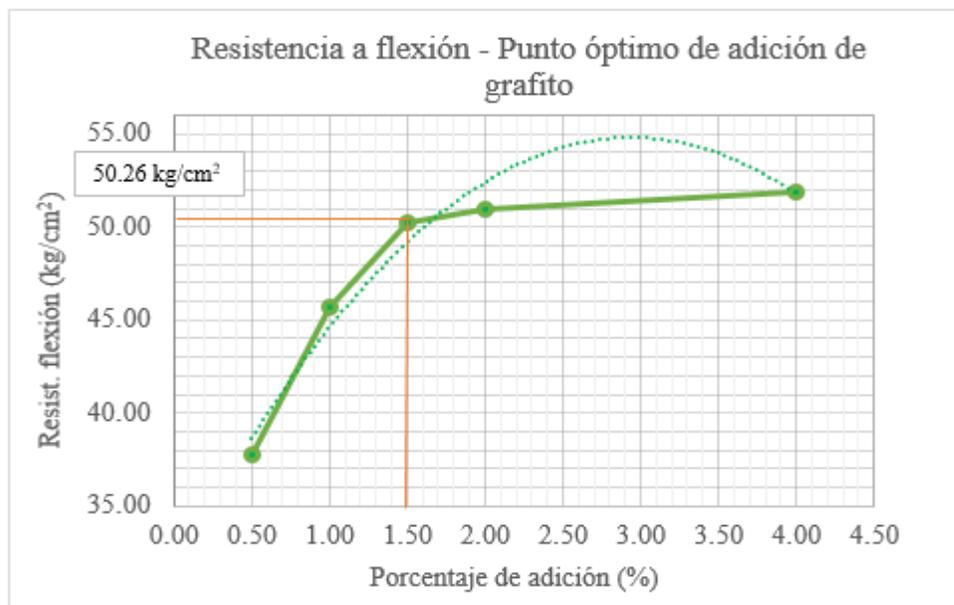
Gráfica 4.18. Resistencia a flexión de la mezcla con y sin grafito



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los datos comparativos reflejados en la gráfica 4.18 el aumento de resistencia a la flexión se inicia con un incremento de resistencia a flexión del 7.59 % (punto más bajo de incremento) respecto a la mezcla patrón al adicionar 0.5 %; al 1 % de grafito se tiene un incremento del 30.43 %; el punto de mayor sobre salto en cuanto a incremento, esto se produce al adicionar 1.5 % de grafito a la mezcla pasando este de 35.05 kg/cm<sup>2</sup> (mezcla patrón) a 50.02 kg/cm<sup>2</sup> con un incremento de resistencia igual a 43.35 %. A partir de este punto comienza a seguir el aumento de las resistencias, pero con una menor prolongación respecto a las anteriores y por lo tanto el incremento también se incrementa de manera paulatina al 45.32 % y 48.06 % respecto a la mezcla patrón al adicionarse 2 % y 4 % respectivamente.

Grafica 4.19. Punto óptimo de adición de grafito - Resistencia a flexión



Fuente: Elaboración propia

Resistencia a la flexión (Rf)	$Rf = -2.7212 * (\%)^2 + 15.995 * (\%) + 31.315$
	R = 0.967

Fuente: Elaboración propia

La grafica 4.19 refleja claramente el punto sobresaliente más importante generado en la resistencia a flexión del concreto adicionado con grafito, este punto óptimo denominado

punto sobresaliente marca la línea divisoria entre una tendencia de crecimiento de resistencia sorpresiva y principalmente positiva, para luego adentrarse a una tendencia casi lineal si se podría decir, con la continuidad de aumento de resistencia a flexión, pero de manera paulatina, moderada.

Si bien los incrementos parecen ser notorios estos pierden protagonismo a la hora de remarcar las resistencias que alcanzan en los últimos tres puntos, es decir evidentemente el incremento existe, pero la diferencia entre resistencias es baja, por esta razón se considera el 1.5 % de adición como el porcentaje de resaltante.

#### 4.2.5.2. Mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido

La tabla 4.28 presenta los resultados obtenidos de los ensayos a flexión realizados a la mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido y a la mezcla patrón.

Tabla 4.28. Ensayo a flexión con y sin limaduras de hierro fundido

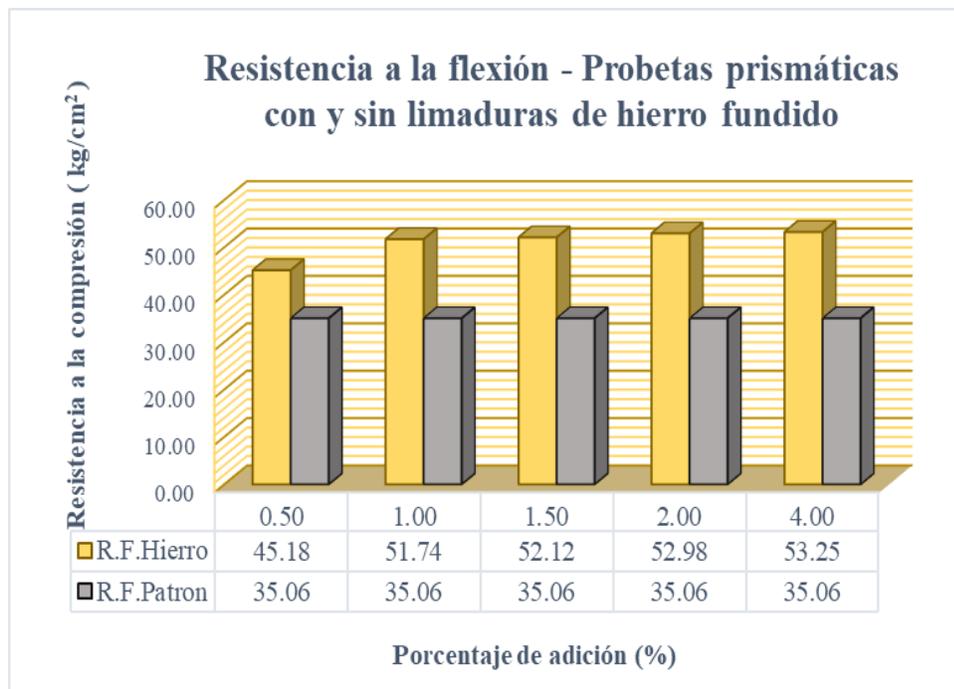
Mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido		Mezcla sin aditivo
Porcentaje de adición (%)	Resistencia a la flexión (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la flexión (kg/cm <sup>2</sup> )
0.50	45.18	35.06
1.00	51.74	
1.50	52.12	
2.00	52.98	
4.00	53.25	

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados brindados se observa un incremento positivo de resistencia a flexión respecto a la mezcla de hormigón patrón sin aditivos al adicionar limaduras de hierro en los diferentes porcentajes definidos para la presente investigación. Este incremento se inicia con una resistencia de 45.18 kg/cm<sup>2</sup> al 0.5 %, llegando al punto de mayor sobresalto que alcanza la resistencia a flexión al adicionar a la mezcla 1 % de limaduras de hierro fundido logrando 51.74 kg/cm<sup>2</sup> en dicho porcentaje. A partir de ahí se sigue manteniendo un incremento de resistencias más regulables logrando 52.12 kg/cm<sup>2</sup>, 52.98 kg/cm<sup>2</sup> y 53.25 kg/cm<sup>2</sup> en los porcentajes de 1.5 %, 2 % y 4% de adición. El punto más bajo se presenta en al adicionar 0.5 % de aditivo a la mezcla (45.18 kg/cm<sup>2</sup>), sin

embargo, es importante hacer notar que este punto a aun proporciona una resistencia superior a la resistencia patrón 35.06 kg/cm<sup>2</sup>. En la gráfica 4.13. se muestra con mayor claridad la variación de resistencias que se producen al incrementar el aditivo de limaduras de hierro fundido.

Gráfica 4.20. Resistencias a flexión-mezcla con y sin limaduras de hierro fundido.

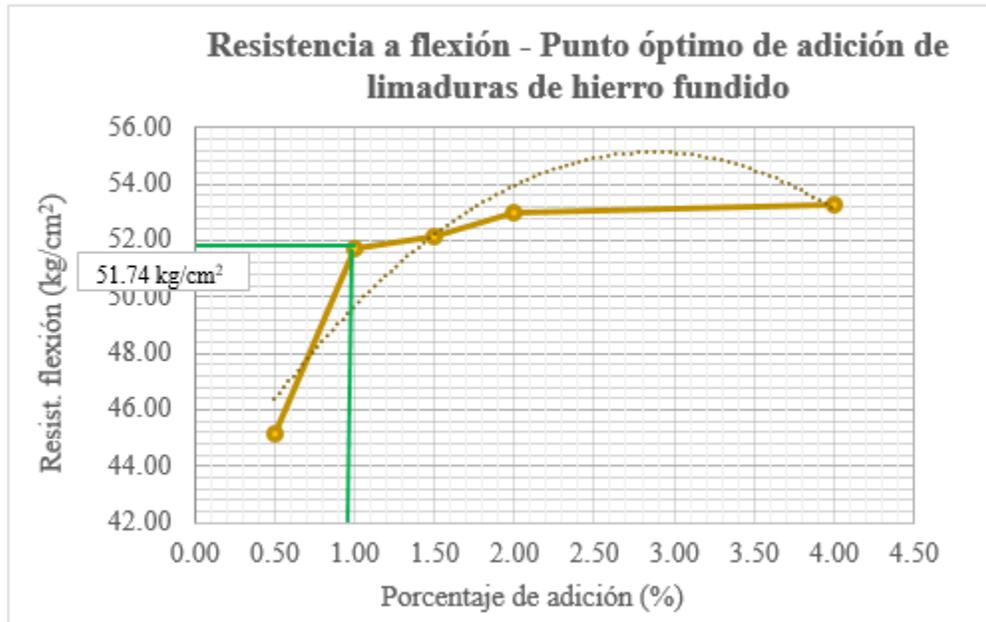


Fuente: Elaboración propia

Al adicionarse un 0.5 % de limaduras de hierro fundido se produce un incremento de resistencia del 28.86 %; el incremento de mayor sobresalto es del 47.57 % al 1 % de adición pasando de 35.06 kg/cm<sup>2</sup> (mezcla patrón) a 51.74 kg/cm<sup>2</sup>; el incremento de resistencia mantiene su camino de ascenso, manteniendo resistencias a la flexión superiores respecto a la mezcla patrón como se indicó anteriormente este aumento continua con un incremento de 48.66% al 1.5 % de adición, 51.11 % al 2 % adicionado y 51.88 % al adicionar 4 % de limaduras y alcanzando el punto más elevado en cuanto a incremento y resistencia se refiere. Los incrementos remarcados anteriormente muestran con total claridad valores muy favorables, sin embargo, se debe considerar también las resistencias que alcanzan al adicionar los diferentes porcentajes, de acuerdo a esto se

define que el punto de mayor relevancia se presenta al adicionar 1 % de limaduras ya que a partir de ahí las resistencias se incrementan, pero de manera más reducida.

Gráfica 4.21. Punto óptimo de adición de limaduras de hierro fundido - Flexión



Fuente: Elaboración propia

Resistencia a la flexión (Rf)	$Rf = -1.5681 * (\%)^2 + 8.9888 * (\%) + 42.244$
	$R = 0.978$

Fuente: Elaboración propia

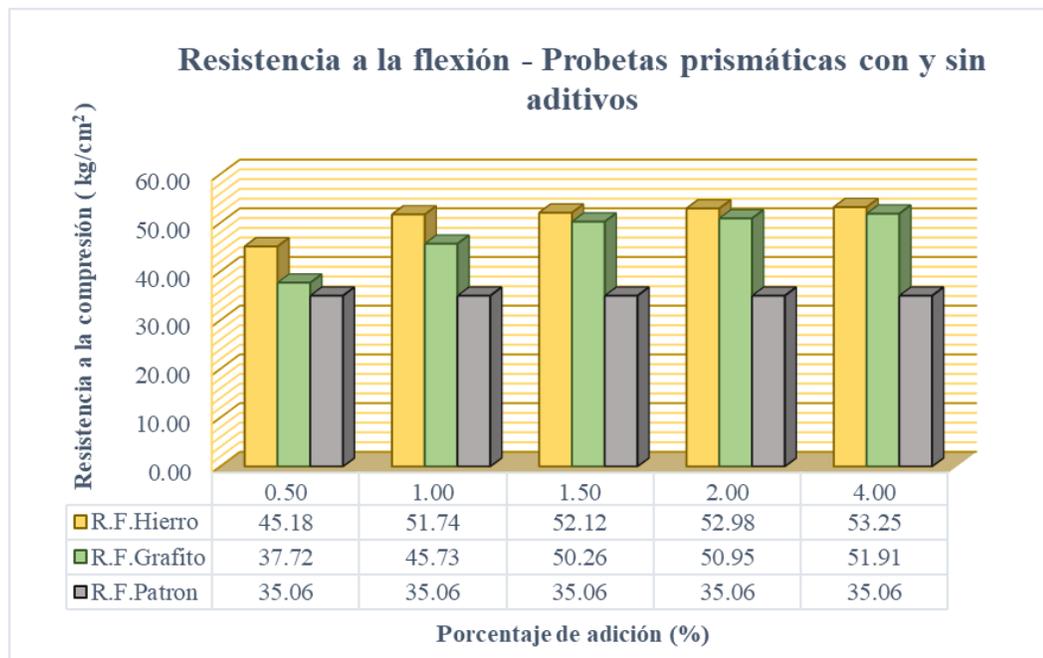
El punto óptimo en la mezcla con limaduras de hierro fundido dentro de la resistencia a flexión se denota claramente en la gráfica 4.21, siendo muy importante dentro de la presente investigación ya que nos permite definir conclusiones exactas en la investigación, como se observa claramente se denota el cambio de tendencia a partir de las resistencias posteriores del 1.5 %, 2 % y 4 % de adición las cuales adquieren un comportamiento de incremento disimulado y poco notorio.

#### 4.2.5.3. Mezcla adicionada con grafito, limaduras y mezcla patrón.

Una vez establecido que, tanto la mezcla adicionada con grafito y la mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido mejoran la resistencia a la flexión es importante

mencionar cuál de los dos aditivos brinda una mayor resistencia al adicionarse a una mezcla convencional sin aditivo.

Gráfica 4.22. Resistencias a flexión en la mezcla con limaduras, grafito y patrón



Fuente: Elaboración propia

La gráfica 4.22 la resistencia a flexión de la mezcla adicionada con hierro es superior a la con grafito cuando se adiciona 0.5 % de aditivo y por el tanto superior al patrón, el incremento de resistencia de la mezcla con hierro respecto a la con grafito es del 19.78 % para este primer porcentaje, se tiene un incremento 13.14 % al 1 % de aditivo. A partir de los posteriores porcentajes la mezcla adicionada con grafito pasa alcanzar similar resistencia manteniéndose entonces incrementos del 3.70 %, 3.98 % y 2.58 % al adicionar porcentajes del 1.5 %, 2 %, y 4 % de limaduras, todo esto respecto a la mezcla adicionada con grafito ya que es la inferior según gráfica 4.22. A pesar de la superioridad de resistencia a flexión de la mezcla adicionada con limaduras, la mezcla con grafito manifiesta en tres de los porcentajes una resistencia inferior, sin embargo, de acuerdo a los ensayos realizados y valores numéricos exactos el aditivo que nos brinda mayor resistencia a la flexión son las limaduras con una resistencia alcanzada de 53.25 kg/cm<sup>2</sup> al 4 % superior al punto más elevado con grafito el cual es de 51.91 kg/cm<sup>2</sup> al 4 %.

#### 4.2.6. Análisis comparativo entre las resistencias a compresión con y sin aditivo

En la presente sección se presenta una relación comparativa de resistencias promedio a compresión entre la mezcla adicionada y la mezcla patrón sin aditivos basadas en los diferentes porcentajes de adición (0.5 %, 1 %, 1.5 %, 2 %, 2.5 % y 4 %) establecidos.

##### 4.2.6.1. Mezcla adicionada con grafito

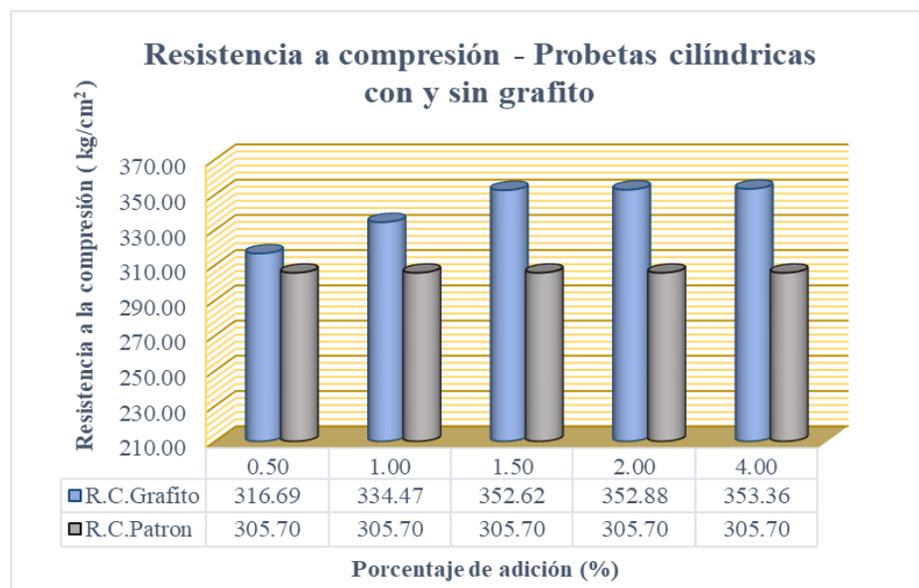
La tabla 4.29 presenta los valores a ser comparados entre la mezcla adicionada con grafito y la mezcla patrón sin aditivo.

Tabla 4.29. Resultados de la resistencia a compresión con y sin grafito

Mezcla adicionada con grafito		Mezcla sin aditivo
Porcentaje de adición (%)	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
0.50	316.69	305.70
1.00	334.47	
1.50	352.62	
2.00	352.88	
4.00	353.36	

Fuente: Elaboración propia

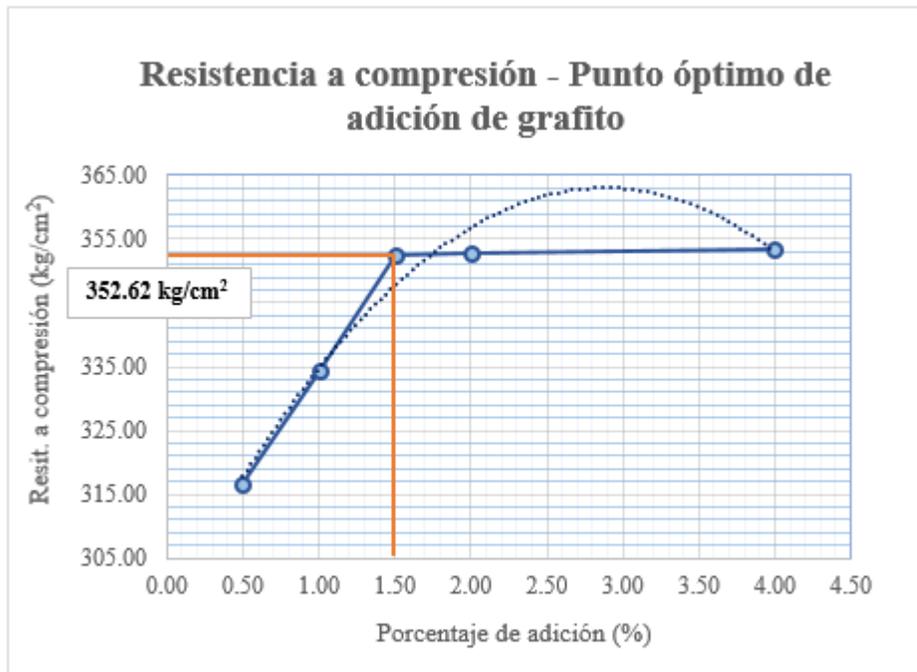
Gráfica 4.23. Análisis comparativo de resistencias a compresión con y sin grafito



Fuente: Elaboración propia

La grafica 4.23 refleja una superioridad de resistencia a compresión de la mezcla adicionada con grafito respecto al patrón en todos sus porcentajes, considerando así positiva la adición de grafito en la mezcla por ende para la presente investigación. Al adicionar un 0.5 % de grafito a la mezcla obtiene una resistencia promedio a compresión es de 316.69 kg/cm<sup>2</sup> mejorando la resistencia promedio patrón de 305.7 kg/cm<sup>2</sup> en un 3.595 %; al adicionar 1% de grafito se obtiene 334.47 kg/cm<sup>2</sup> de resistencia promedio a compresión mejorando en un 9.41%. El punto de mayor ascenso de resistencia alcanzado se genera al 1.5% de adición generando una resistencia de 352.62 kg/cm<sup>2</sup> y un aumento del 15.35 %. A partir de este punto los resultados comienzan a seguir el ascenso, pero de manera menos moderada produciéndose una resistencia de 352.88 kg/cm<sup>2</sup> y 353.36 kg/cm<sup>2</sup> con incrementos del 15.433 % y 15.59 % respecto a la mezcla patrón para porcentajes de adición del 2 % y 4%. Como se puede observar los incrementos continúan respecto a la mezcla convencional pero las resistencias a partir del 1.5% son de menor crecimiento.

Gráfica 4.24. Punto óptimo de adición de grafito - Compresión



Fuente: Elaboración propia

Resistencia a la compresión (Rc)	$R_f = -7.9885 * (\%)^2 + 46.044 * (\%) + 296.670$
	R = 0.967

Fuente: Elaboración propia

La grafica 4.24 refleja claramente el punto óptimo de adición de grafito el cual genera el punto sobresaliente mencionado anteriormente, este punto es muy importante ya que nos muestra claramente la variación y el cambio de aumento de resistencia, para este caso es generado al 1.50 % de adición, a partir de este punto las resistencias a compresión comienzan a crecer de manera más reducida y con una notoriedad menos llamativa, sin embargo no se debe dejar de lado que las resistencias siguen en aumento en los posteriores puntos dejando abierta la posibilidad de lo que ocurra si se quiere continuar con una futura investigación. Es importante hacer notar que el punto óptimo de adición es el mismo tanto para la resistencia a flexión como a compresión lo cual suena lógico ya que ambas parten de una misma mezcla de diseño variando así a la hora del hormigonado de probetas, las cuales son cilíndricas para la compresión y prismáticas para la flexión.

#### 4.2.6.2. Mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido

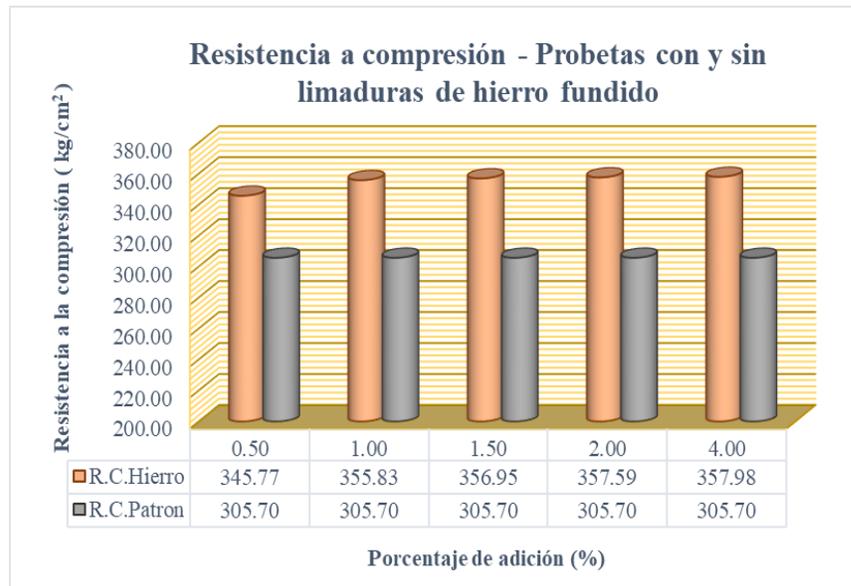
La tabla 4.30. presenta los valores a ser comparados entre la mezcla adicionada con grafito y la mezcla patrón sin aditivo.

Tabla 4.30. Resistencia a compresión con y sin limaduras de hierro fundido

Mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido		Mezcla sin aditivo
Porcentaje de adición (%)	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
0.50	345.77	305.70
1.00	355.83	
1.50	356.95	
2.00	357.59	
4.00	357.98	

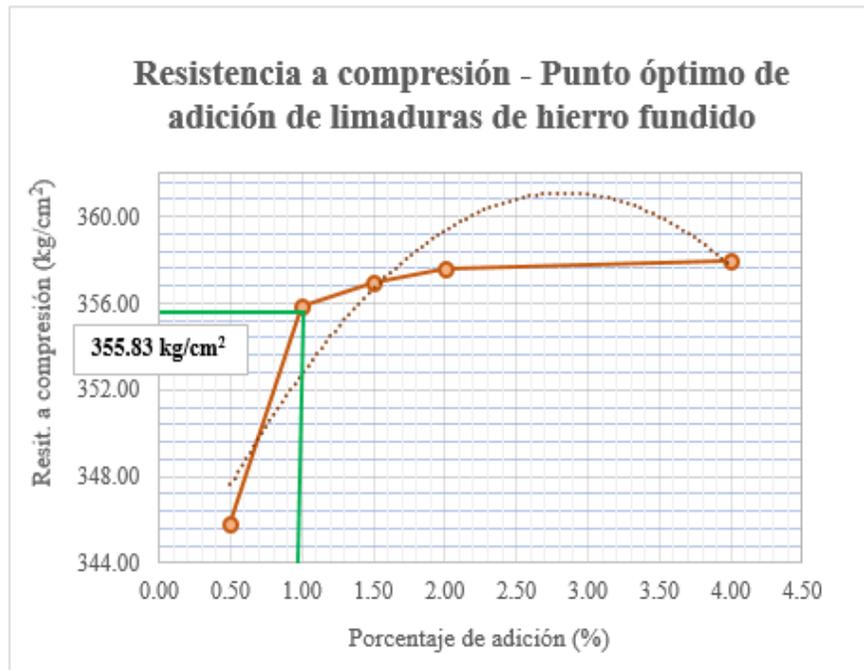
Fuente: Elaboracion propia

Gráfica 4.25. Resistencias a compresión con y sin limaduras de hierro fundido



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.26. Punto óptimo de adición de limaduras - compresión



Fuente: Elaboración propia

Resistencia a la compresión (Rc)	$R_f = -2.4714 * (\%)^2 + 14.018 * (\%) + 341.210$
	R = 0.867

Fuente: Elaboración propia

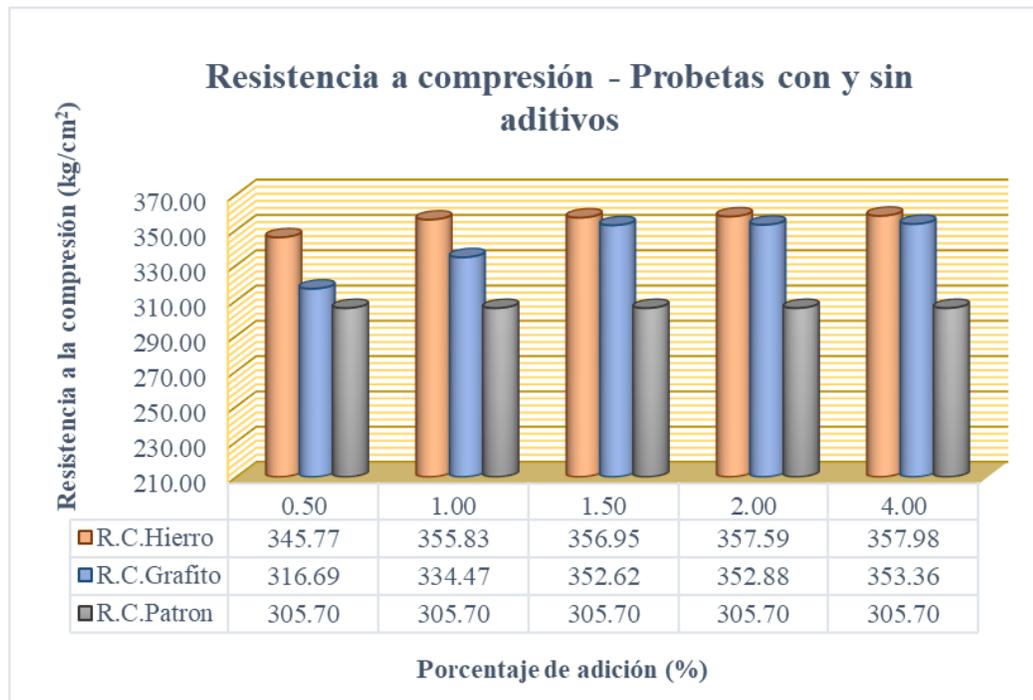
De acuerdo a la gráfica 4.26 se observa lo siguiente, al adicionarse un porcentaje del 0.5 % se tiene una resistencia de 345.77 kg/cm<sup>2</sup> mejorando la misma en un 13.11 % respecto a la mezcla patrón; para un 1 % de adición se presenta una resistencia promedio de 355.83 kg/cm<sup>2</sup> (punto sobresaliente de incremento de resistencia en relación a los demás porcentajes de adición), produciéndose así un aumento del 16.40 % en base a la mezcla patrón. De manera igual a partir de ahí las resistencias comienzan a crecer de manera discreta 356.95 kg/cm<sup>2</sup> al 1.5 %; 357.59 kg/cm<sup>2</sup> y 357.98 kg/cm<sup>2</sup> al 1.5 %, 2 % y 4 % respectivamente. Sin embargo, estos crecimientos son favorables en la investigación al mantenerse una mejoría del 16.764 %, 16.974 % y 17.101 % respecto a la resistencia patrón obtenida de 305.7 kg/cm<sup>2</sup>.

La grafica 26 nos muestra claramente la ubicación de nuestro punto óptimo para el caso de la mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido en su resistencia a compresión la cual al igual que en la mezcla con grafito este punto nos indica claramente el cambio de tendencia que se provoca en ese punto, las resistencias a compresión sin duda alguna comienzan a perder fuerza una vez que se sobrepasa este punto variando distando muy poco entre una y otra resistencia alcanzada. Sin embargo, también es importante no perder de vista los porcentajes inferiores y superiores a este punto ya que podrían brindarnos de igual manera distintas aplicabilidades, ya que en el diseño de pavimentos rigidos las resistencias de diseño dependen del tipo de trafico al que será sometido por lo cual para diseños de calles en lugares poco transitables las resistencias a flexión son bajas.

#### **4.2.6.3 Mezcla adicionada con grafito, limaduras y mezcla patrón.**

De igual manera se produce una variación de resistencia a compresión entre la mezcla adicionada con grafito y la mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido esta variación se puede observar detalladamente en la gráfica 4.27 la cual nos muestra como dichas resistencias van variando en función a los diferentes porcentajes adicionados tanto de grafito como de limaduras de hierro fundido.

Gráfica 4.27. Resistencias a compresión con y sin limaduras y grafito



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 4.27 se ve reflejada la variación de resistencias a compresión que se presentan de acuerdo al porcentaje de aditivo implementado. Las resistencias que mantienen una importancia fundamental al 1% en caso de las limaduras de hierro y 1.5% para la mezcla adicionada con grafito, obteniendo una mayor resistencia al adicionar limaduras de hierro con 357.98 kg/cm<sup>2</sup> superando al grafito 353.36 kg/cm<sup>2</sup> ambos en un porcentaje del 4%. De igual manera en la resistencia a compresión la mezcla adicionada con limaduras de hierro es superior a la con grafito en todos los porcentajes adicionados 0.5 % a 4 %. El incremento de resistencia que se presenta en la mezcla adicionada con hierro fundido respecto a la mezcla con grafito es del 9.182 % y 6.39 % en los dos primeros porcentajes 0.5 % y 1 %, en los posteriores tres porcentajes de adición 1.5 %, 2 %, y 4 % se presentan incrementos del 1.23 %, 1.334 % y 1.31 % respecto a la con grafito.

#### 4.2.7. Variación del asentamiento en relación a las resistencias obtenidas

Es importante tomar en cuenta la variación del asentamiento de acuerdo a los porcentajes de adición establecidos y en relación a las resistencias obtenías tanto a compresión como

a flexión de la probeta de ensaye, ya que al hablar de asentamiento se relaciona directamente con la trabajabilidad de las mezclas.

#### 4.2.7.1.- Resistencia a la flexión y asentamientos

La tabla 4.31 una relación comparativa entre la resistencia promedio a la flexión tanto en la mezcla patrón como adicionadas y su respectivo asentamiento.

Tabla 4.31. Análisis comparativo entre la resistencia a flexión y asentamiento

Resistencia a flexión - Asentamiento						
Porcentaje de adición (%)	Mezcla adicionada con grafito		Mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido.		Mezcla de hormigón sin aditivo	
	Resistencia a la flexión ( kg/cm <sup>2</sup> )	Asentamiento (cm)	Resistencia a la flexión ( kg/cm <sup>2</sup> )	Asentamiento (cm)	Asentamiento (cm)	Resistencia a la flexión ( kg/cm <sup>2</sup> )
0.50	37.72	4.4	45.18	4.7	4.80	35.06
1.00	45.73	3.9	51.74	4.5		
1.50	50.26	3.6	52.12	4.1		
2.00	50.95	3.2	52.98	3.8		
4.00	51.91	2.9	53.25	3.5		

Fuente: Elaboración propia

Como se analizó anteriormente las resistencias a la flexión varían de forma ascendente con porcentajes del 0.5 % a 4 % tanto en la mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido como en la adicionada caso grafito. Totalmente ocurre lo contrario cuando hablamos del asentamiento, debido a que el mismo posee una variación decreciente de asentamiento para un tiempo cero el mismo que se muestra en todos y cada uno de los cinco porcentajes en estudio, ocurriendo esto en las mezclas con grafito y limaduras de hierro fundido. Cabe recalcar que anteriormente se realizó un análisis de resultados de la variación del asentamiento en función del tiempo sin embargo en este caso el análisis comparativo es en relación al tiempo cero, es decir los resultados de la tabla 4.31 son los valores obtenidos inmediatamente después de realizar el ensayo de cono de Abrams.

En la gráfica 4.18 representa más a detalle la variación que existe del asentamiento en relación a las resistencias a flexión obtenidas en probetas prismáticas y su respectiva proporción de aditivo

Gráfica 4.28. Asentamientos y las resistencias a flexión con y sin aditivo



Fuente: Elaboración propia

La grafica 4.28. refleja claramente la variación descendente del asentamiento a medida que el porcentaje de adición aumenta. Los asentamientos adoptados como limites en el diseño de la mezcla (capitulo IV.) fue de 3.5 cm a 5 cm.

De acuerdo a los resultados brindados por la gráfica 4.28. los asentamientos menores se producen al adicionar el grafito a la mezcla partiendo con asentamientos de 4.4 cm., al 0.5 %; seguido por 3.9 cm al adicionar 1 % de grafito; 3.6 cm al 1.50 %; 3.2 y 2.9 centímetros al 2 % y 4% respectivamente. En comparación con la mezcla patrón el asentamiento 4.8 cm sufre una disminución del 8.33% al 0.5% de adición; una disminución del 18.75% al adicionar 1% de grafito; 25% al 1.5%; 33.33 % y 39.58 % al adicionar 2 % y 4% de aditivo. Por encima se encuentran los asentamientos producidos por las limaduras de hierro fundido los cuales varían desde los 4.7 cm hasta alcanzar los 3.5 cm al 4% de adición, los porcentajes de disminución en relación a la mezcla patrón son los siguientes: 2.08 %, 6.25 %, 14.58 %, 20.83 % y 27.08 % al adicionar 0.5 %, 1 %, 1.5 %, 2 % y 4 %

respectivamente de limaduras de hierro fundido a la mezcla. El porcentaje de disminución de asentamiento de la mezcla adicionada con grafito respecto a la mezcla con limaduras de hierro fundido es del 6.38 %, 13.33 %, 12.20 %, 15.79 % y 17.14 % para los porcentajes del 0.5 %, 1 %, 1.5 %, 2 % y 4 % respectivamente de aditivo.

Las resistencias máximas, 53.25 kg/cm<sup>2</sup> en el caso de la mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido al 4% de adición se genera para un asentamiento de 3.5 cm., y para la mezcla adicionada con grafito 51.91 kg/cm<sup>2</sup> resistencia máxima alcanzada al 4 % se genera para un asentamiento de 2.9 centímetros. Se podría decir que el asentamiento producido por la mezcla con limaduras se encuentra dentro del rango límite de diseño establecido en el capítulo IV, mientras que la mezcla con grafito esta fuera del mismo, de igual forma los asentamientos que se producen desde el 0.5% de adición de grafito hasta el 1.5 % se encuentran dentro de los rangos establecidos y a partir de ahí la mezcla pasa a tener un comportamiento seco obteniendo asentamientos del 3.2 cm y 2.9 cm al 2 % y 4% de adición respectivamente. Para el caso de la mezcla adicionada con limaduras de hierro esta se mantiene en todos sus porcentajes de adición dentro de los parámetros establecidos manteniendo una mezcla tipo semi seca con asentamientos desde los 4.7 cm a 3.5 cm, a lo largo de los porcentajes adición. Los aditivos adicionados a la mezcla son totalmente nuevos lo cual hace que su comportamiento sea impredecible, sin embargo, está claro que estamos tratando frente a materiales muy finos, pero de origen mineral, todo material mineral tiene por característica peculiar el no deformarse al entrar en contacto con el agua lo que no sucede con las arcillas limo y demás finos, entonces es por esta razón que el material al entrar en contacto con el agua durante el mezclado de hormigón, mantiene su en gran parte su forma y rigidez logrando así menores rangos de trabajabilidad medidos a traves del asentamiento

#### **4.2.7.2. Resistencia a compresión y asentamientos**

Se muestra a continuación en la tabla 4.32 y grafica 4.29 una relación comparativa entre la resistencia promedio a la compresión tanto en la mezcla patrón sin aditivos como adicionadas y su respectivo asentamiento, esto en base a los diferentes porcentajes de aditivos contemplados en la mezcla.

Los asentamientos producidos en la mezcla adicionada con grafito y mezcla con limaduras de hierro fundido y por ende mezcla patrón, son los mismos que los proporcionados por la tabla 4.31 debido a que provienen de la misma mezcla y simplemente se los separa con fines comparativos en función a la resistencia de ensaye que se le aplica.

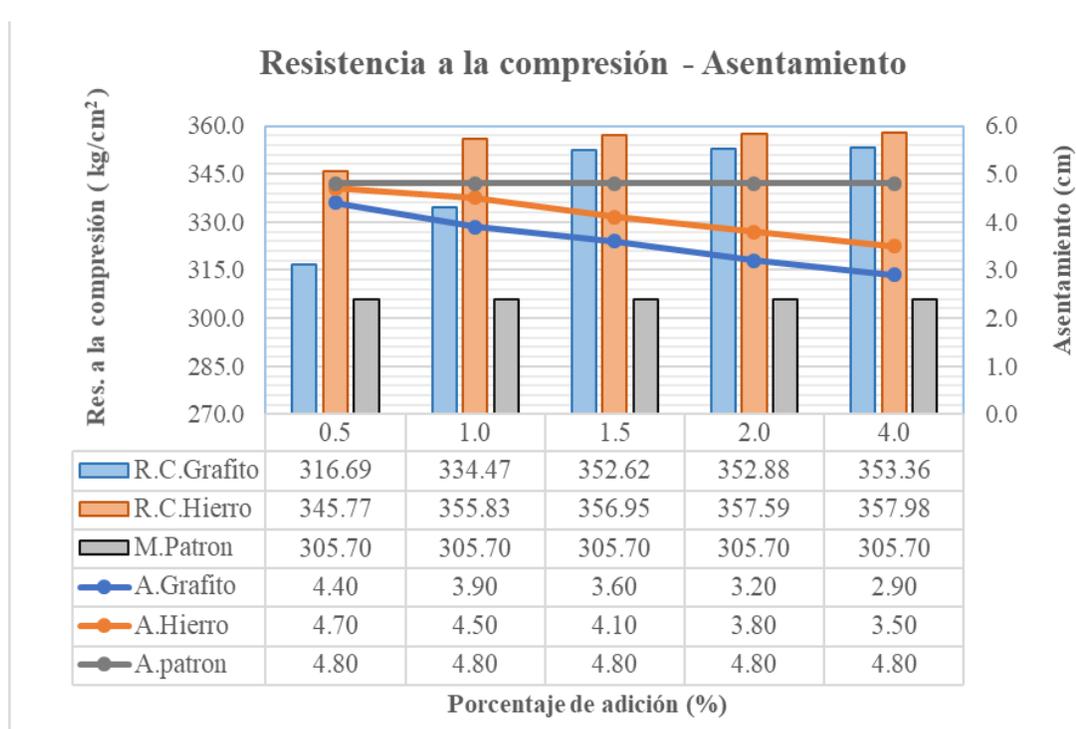
Tabla 4.32. Análisis comparativo entre la resistencia a compresión y asentamiento

Resistencia a compresión - Asentamiento						
Porcentaje de adición (%)	Mezcla adicionada con grafito		Mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido		Mezcla de hormigón sin aditivo	
	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Asentamiento (cm)	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Asentamiento (cm)	Asentamiento (cm)	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
0.50	316.69	4.40	345.77	4.70	4.80	305.70
1.00	334.47	3.90	355.83	4.50		
1.50	352.62	3.60	356.95	4.10		
2.00	352.88	3.20	357.59	3.80		
4.00	353.36	2.90	357.98	3.50		

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos en la tabla 4.32 nos muestra una idea clara de la reducción de asentamiento que se produjo en todos y cada uno de los porcentajes adicionados a la mezcla tanto de grafito como las limaduras de hierro fundido, se podría decir que mientras el asentamiento es menor la resistencia es mayor lo cual suena lógico debido a que para obtener menos asentamiento debe haber una reducción de agua, la misma que se presenta al añadir los aditivos, en otras palabras la cantidad de agua destinada a la mezcla es absorbida también por los aditivos generando menores asentamientos y por ende una trabajabilidad inferior a la proporcionada por la mezcla patrón. También el origen de los aditivos es motivo a considerar dentro de este análisis de disminución de asentamientos ya que este tiene la particularidad de tener poca deformación al estar en contacto con el agua y demás componentes de la mezcla de hormigón, lo que hace que se presente una mezcla aún mucho más seca y con disminuciones de asentamientos sin embargo son las limaduras de hierro quienes pasa de manera más desapercibida en esta reacción lo cual genera que sus asentamientos sean similares a los de la mezcla convencional sin aditivos generando así asentamientos dentro del rango pronosticado.

Gráfica 4 29. Asentamientos y las resistencias a compresión con y sin aditivo



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a lo indicado anteriormente el análisis de variación de asentamiento es el mismo que en el punto 4.2.8.2 variando simplemente la resistencia de ensaye aplicada que en este caso es la resistencia a compresión. Las resistencias máximas de compresión de igual manera son generadas al 4% (limaduras de hierro fundido) y 4% (grafito) 357.98 y 353.36 kg/cm<sup>2</sup> para asentamientos iguales al 4.5 cm y 3.6 cm respectivamente.

#### 4.2.8. Variación del peso específico en relación a las resistencias obtenidas

En la siguiente sección se realizará un análisis de la variación de los pesos específicos promedio de las mezclas adicionadas y convencional sin aditivos para su determinada resistencia promedio obtenida en base a los diferentes porcentajes adicionados.

##### 4.2.8.1. Resistencia a la flexión y pesos específicos

La tabla 4.29 refleja los valores de peso específico promedio y resistencias promedio a la flexión obtenidas en diferentes porcentajes como así también los proporcionados por la mezcla sin adición.

Tabla 4.33. Análisis comparativo entre la resistencia a flexión y peso específico

Porcentaje de adición (%)	Mezcla adicionada con grafito		Mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido		Mezcla sin aditivo	
	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a la flexión (kg/cm <sup>2</sup> )	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a flexión (kg/cm <sup>2</sup> )	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a la flexión (kg/cm <sup>2</sup> )
0.50	2385.25	37.72	2391.11	45.18	2384.79	35.06
1.00	2388.28	45.73	2395.15	51.74		
1.50	2391.72	50.26	2395.35	52.12		
2.00	2391.92	50.95	2395.96	52.98		
4.00	2392.12	51.91	2396.16	53.25		

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la tabla 4.33. los pesos específicos obtenidos en probetas prismáticas (vigas) varían de igual forma que la resistencia a la flexión, es decir tienen un comportamiento ascendente inmediatamente al adicionar 0.50 % de grafito y limaduras de hierro fundido respecto a la muestra patrón, alcanzando el peso específico promedio máximo al adicionar 4 % de aditivo en la mezcla patrón. En la siguiente grafica se muestra esta variación de los pesos específico de acuerdo a su respectiva resistencia alcanza en las mezclas adicionadas.

Gráfica 4.30. Variación del peso específico y la resistencia a flexión con aditivos



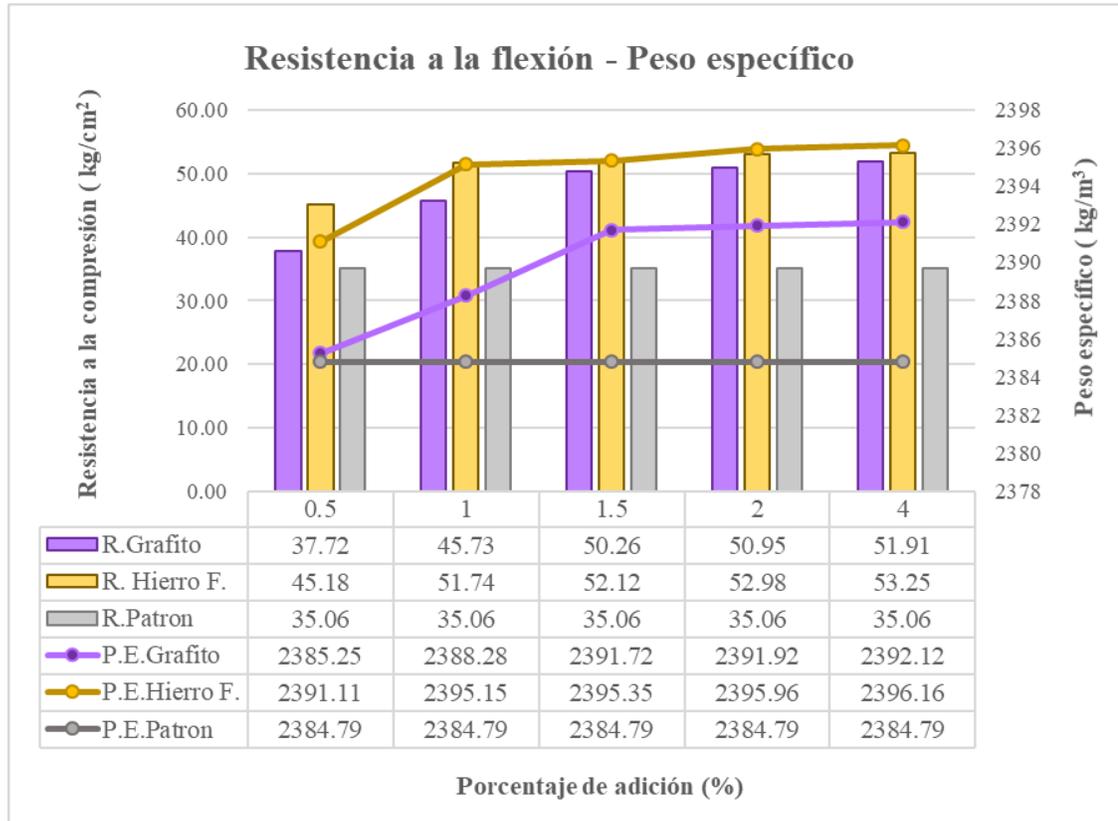
Fuente: Elaboración propia

M.adicionada con grafito	$Rc = - 0.1593*\gamma^2 + 762.95 *\gamma -913519$ $R^2 = 0.99$
M.adicionada con limaduras de hierro fundido	$Rc = - 0.0322*\gamma^2 + 155.89 *\gamma -188439$ $R^2 = 0.99$

Fuente: Elaboracion propia

Como se observa en la gráfica 4.30 de adición las resistencias incrementan de igual manera a medida que el peso específico aumenta en las mezclas adiconas, de igual manera se observa que la mezcla con limaduras de hierro fundido adquiere un mayor peso específicos comparada con la mezcla con grafito.

Gráfica 4.31. Pesos específicos y las resistencias a flexión con y sin aditivo



Fuente: Elaboración propia

Es importante recalcar que los pesos específicos obtenidos en las mezclas adiconas son superiores en todos y cada uno de los porcentajes adicionados respecto a la mezcla convencional sin aditivos. En la gráfica 4.31 se refleja esta variación simultanea de los

pesos específicos con las respectivas resistencias promedio a la flexión ensayadas a probetas prismáticas.

Como se observa en la gráfica 4.31 los pesos específicos varían simultáneamente con la resistencia a flexión produciéndose de igual manera los puntos máximos de peso específico  $2396.16 \text{ kg/m}^3$  al adicionar 4 % de limaduras de hierro fundido para una resistencia de  $53.25 \text{ kg/cm}^2$  y  $2392.12 \text{ kg/m}^3$  al 4% para el caso del grafito para una resistencia a flexión igual a  $51.91 \text{ kg/cm}^2$ , siendo así las limaduras de hierro fundido las que proporcionan mayor peso específico y a su vez una mayor resistencia a la flexión en un mismo punto.

Para el caso de la mezcla adicionada con grafito se tiene un aumento de peso específico igual 0.019 % al adicionar 0.5 % respecto a la mezcla convencional sin aditivo, un incremento del 0.146 % al adicionar 1% de grafito; 0.29 % al adicionar 1.5 % (punto de relevancia); 0.299 % al 2 % y un incremento del 0.307 % al adicionar a la mezcla 4 %, todo esto en base a la mezcla patrón sin aditivo cuyo peso específico es de  $2384.79 \text{ kg/m}^3$ . Por encima se encuentran los pesos específicos de la mezcla adicionada con limaduras de hierro con incrementos que inician con un 0.265 % al adicionar 0.5 %; 0.434 % al adicionar 1 % (punto máximo relevante), para luego comenzar seguir con el incremento con porcentajes de incremento iguales al 0.443 %, 0.468 %, y 0.477 % para los porcentajes de 1.5 %, 2 % y 4 % de adición de limaduras de hierro todo esto respecto a los resultados de peso específico de la mezcla convencional sin aditivo. Por otra parte, también existe una superioridad de pesos específicos de la mezcla adicionada con hierro fundido en comparación con la mezcla adicionada con grafito estos incrementos se producen bajo los siguientes porcentajes: 0.246 % al adicionar un porcentaje de 0.5 %; un incremento del 0.288 % al 1 %; (punto relevante); 0.152 % al 1.5 % de adición; 0.169 % y 0.169 % al 2 % y 4% de adición respectivamente.

#### **4.2.8.2. Resistencia a la compresión y pesos específicos**

La tabla 4.34 refleja los valores de peso específico promedio y resistencias promedio a la flexión obtenidas en diferentes porcentajes como así también los proporcionados por la

mezcla sin adición. Todos los resultados mostrados en la presente tabla fueron obtenidos en laboratorio mediante su respectivo ensayo y normativa de instrucción.

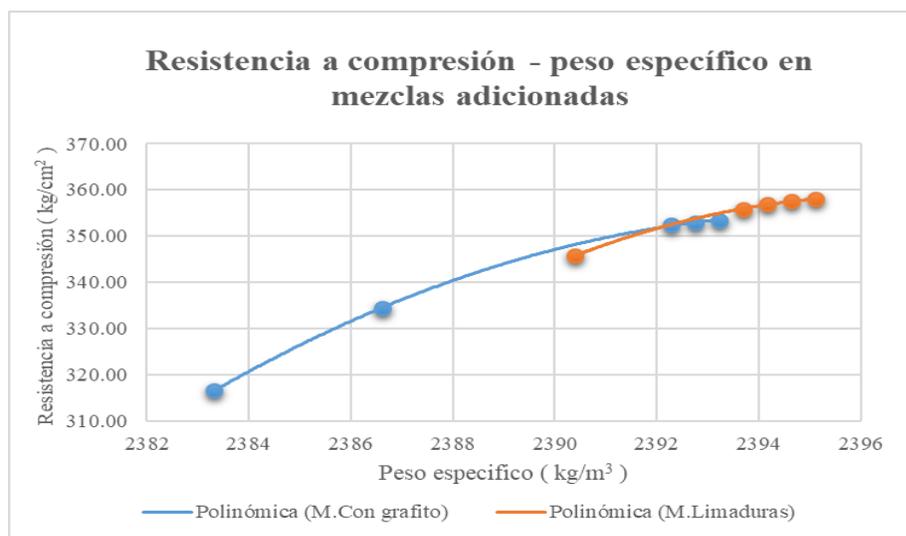
Tabla 4.34. Análisis comparativo en la resistencia a compresión y peso específico

Porcentaje de adición (%)	Mezcla adicionada con grafito		Mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido		Mezcla sin aditivo	
	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
0.5	2383.32	316.69	2390.86	345.77	2379.17	305.70
1	2386.62	334.47	2393.69	355.83		
1.5	2392.28	352.62	2394.16	356.95		
2	2392.75	352.88	2394.63	357.59		
4	2393.22	353.36	2395.11	357.98		

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la tabla 4.34. los pesos específicos obtenidos en probetas cilíndricas varían de manera simultánea a la resistencia a compresión, es decir tienen un comportamiento ascendente inmediatamente al adicionar 0.50 % de grafito y limaduras de hierro fundido respecto a la muestra patrón, alcanzando el peso específico promedio máximo al adicionar 4% de aditivo en la mezcla patrón. En la siguiente grafica se muestra esta variación de los pesos específico de acuerdo a su respectiva resistencia alcanza en las mezclas adicionadas.

Gráfica 4.32. Peso específico y la resistencia a compresión con aditivo

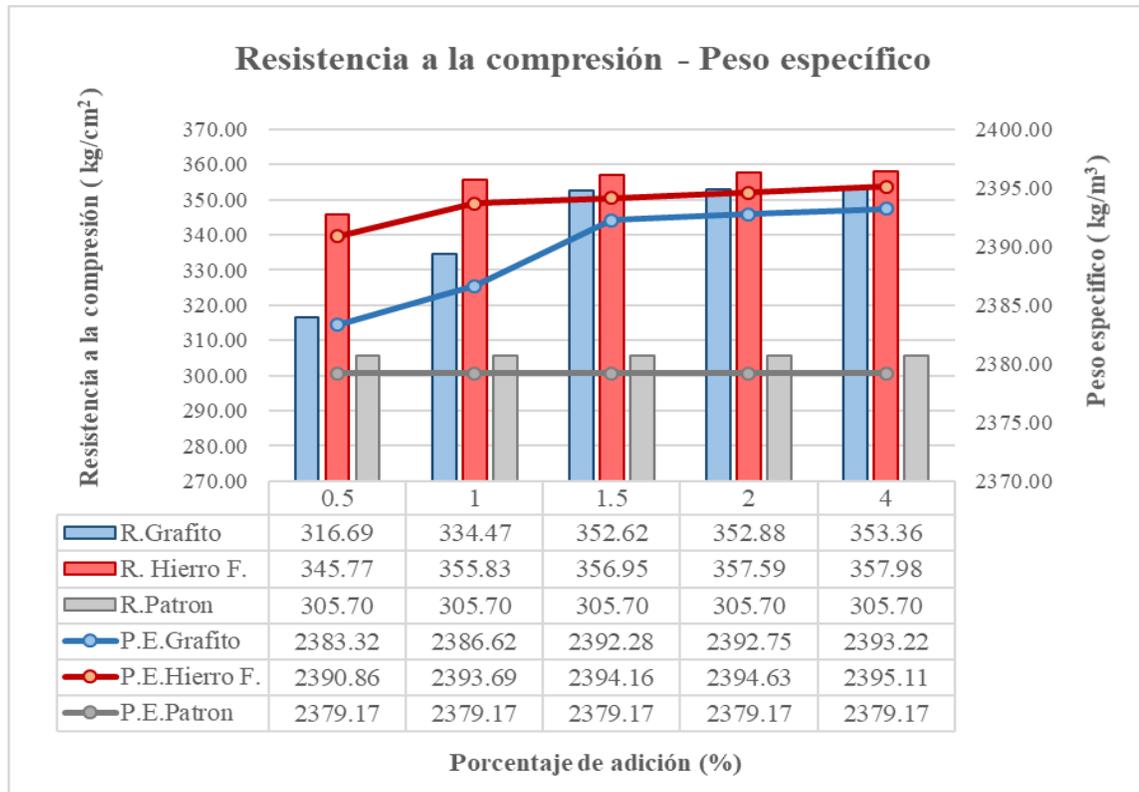


Fuente: elaboración propia

M.adicionada con grafito	$Rc = - 0.2593*\gamma^2 + 1242.4 *\gamma -1E+06$ $R^2 = 0.99$
M.adicionada con limaduras de hierro fundido	$Rc = - 0.3424*\gamma^2 + 1641.1 *\gamma -2E+06$ $R^2 = 0.99$

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.33. Peso específico y las resistencias a compresión con y sin aditivo



Fuente: Elaboración propia

Si bien el comportamiento de los pesos específicos de igual manera mantiene cierta similitud con la resistencia a compresión, variando de forma ascendente en lo completo hasta el porcentaje del 4% para la mezcla adicionada con grafito y limaduras de hierro, los pesos específicos reflejados en la tabla 4.35 son totalmente diferentes a los obtenidos en el punto 4.2.8.1., esto es considerable debido a que el peso específico es función del peso y del volumen que lo contiene y al utilizar en laboratorio diferentes probetas suele generarse cierta variación la cual no es de gran tamaño. En resumen, se observa de acuerdo a la tabla 4.34 pesos específicos superiores en las mezclas adicionadas dentro de cinco

porcentajes estudiados en relación a la mezcla patrón sin aditivo. Las variaciones de pesos específicos relacionados con sus resistencias alcanzadas se reflejan en la gráfica 4.33

La gráfica 4.33 refleja cómo se mencionó anteriormente, un simultaneo comportamiento con la resistencia a flexión. Si analizamos los puntos máximos de resistencia  $357.98 \text{ kg/cm}^2$  para la mezcla con hierro y  $353.36 \text{ kg/cm}^2$  para la adición con grafito al 4% de adición en ambos casos, los pesos específicos de igual manera generan en estos puntos con  $2395.11$  y  $2393.22 \text{ kg/m}^3$ . Los porcentajes de incremento en peso específico de las mezclas adicionadas con grafito respecto a la convencional son las siguientes: 0.174 %, 0.313 %, 0.551 %, 0.571 %, y 0.590 % para los porcentajes de adición igual al 0.5 %, 1 %, 1.5 %, 2 %, y 4 %. En cuanto a la mezcla adicionada con limaduras de hierro contiene pesos específicos superiores a la mezcla patrón incrementándose en un 0.491 %, 0.610 %, 0.630 %, 0.65 % y 0.67 % para la adición correspondiente de 0.5 %, 1 %, 1.5 %, 2 %, y 4 % a la mezcla. De igual manera es importante hacer notar la superioridad en peso específico que se produce en las mezclas adicionadas. En incremento en los dos primeros porcentajes (0.5 % y 1 %) del peso específico de la mezcla con limaduras de hierro fundido respecto a la mezcla con grafito es del 0.297 % y 0.296 % respectivamente, en el siguiente se produce una superioridad por parte de la mezcla adicionada con limaduras respecto a la mezcla con grafito con un incremento de peso específico igual a 0.0785 % para luego retornar a la anterior frecuencia con incrementos del 0.0785 % y 0.0789 % de la mezcla adicionada con limaduras de hierro en comparación con la que contiene grafito. Según el comportamiento evaluado en laboratorio se cree que los pesos específicos en los hormigones adicionados son mayores a los producidos en la mezcla convencional debido al acomodo proporcional de sus partículas, es decir a medida que la masa del aditivo aumenta esta rellena los espacios vacíos que se generan concretando así mayores pesos específicos ya que está directamente relacionada con el peso y el volumen que lo contiene

#### **4.2.9. Aplicabilidad del concreto adicionado en pavimentos rígidos**

En la presente sección se presentará la aplicabilidad que tienen los concretos adicionados tanto con grafito y limaduras de hierro dentro del diseño de espesor de losa en los pavimentos rígidos. Esto se determinará a través de una comparación entre el diseño de altura de losa de un proyecto definido elaborado en la U.A.J.M.S como proyecto de grado,

del cual se asumirá todas las variables respectivas del mismo y a partir de él, poder realizar el diseño de espesor de losa para una mezcla adicionada.

### Ubicación y datos generales del proyecto

La zona del proyecto de estudio el cual lleva por título “Dimensionamiento de pavimento de concreto de bajo tráfico” se encuentra ubicado en el distrito 4 de la ciudad de Villamontes zona urbana, específicamente en la calle Capirenda.

Datos generales: El municipio de villamonetes se encuentra ubicado al sur de Bolivia dentro del departamento de Tarija, entre las coordenadas 21°15'53"S y 63°27'31"O a una altura de 383 m.s.n.m. y con una extensión territorial de 11300 km<sup>2</sup> aproximadamente. Según el censo 2012 cuenta con 39800 habitantes, en cuanto al clima este posee un clima cálido con temperaturas que varían desde los 23°C – 49 °C

### Diseño de espesor de losa AASHTO-93

a) Transito promedio diario

En la tabla 4.35 se presenta el aforo vehicular realizado para el presente proyecto:

Tabla 4.35 Aforo vehicular

Tipo de vehiculo	Volumen de tráfico diario	Peso máximo (Tn)	Peso máximo (kn)	Peso máximo (Kips)
Vehiculos livianos (automóviles y vagonetas)	204	1.5	14.72	3.31
Vehiculos medianos (Camioneta y minibuses)	37	2	19.62	4.41
Vehiculos pesados	3	10	98.1	22.05
Otros vehiculos	35	1	9.81	2.21
Total	279			

Fuente: Dimensionamiento de pavimento de concreto de bajo tráfico

b) Índice y factor de crecimiento

- Índice de crecimiento (i)

Tabla 4.36. Número de vehículos en Bolivia

Clase de vehículo	Número total de vehículos y porcentaje				Índice de crecimiento (%)
	2016	Participación porcentual (%)	2017	Participación porcentual (%)	
Automóvil	303733	17.8	313170	17.4	3.01
Camión	123929	7.2	123619	6.9	0.25
Camioneta	173211	10.1	179842	10	3.69
Furgón	11360	0.7	12612	0.7	9.93
Jeep	60871	3.6	61322	3.4	0.74
Microbús	19584	1.1	19663	1.1	0.4
Motocicleta	94358	5.5	103381	5.7	8.73
Ómnibus	391219	22.9	428560	23.8	8.71
Cuadra Track	10863	0.6	11079	0.6	1.95
Torpedo	4239	0.2	4683	0.3	9.48
Tracto-Camión	98	0	130	0	24.62
Trimovil-Camion	22756	1.3	24195	1.3	5.95
Trimovil-Camion	18	0	18	0	0
Vagoneta	494766	28.9	508080	28.2	2.62
Total	1711005	100	1800354	100	4.96

Fuente: Registro Único para la Administración Tribunal Municipal (RUAT)

El índice de crecimiento (i) se realizó mediante el promedio de valores de índice de crecimiento (la tabla D2), para cada tipo de vehículo. A continuación, se plantea el ejemplo para los vehículos livianos (automóviles y vagonetas).

$$i = \frac{i_1 + i_2}{2}$$

Donde:

i = Índice de crecimiento para vehículos livianos

$i_1$  = Índice de crecimiento automóvil

$i_2$  = Índice de crecimiento vagonetas

$$i = \frac{3.01 + 2.62}{2} = 2.80$$

- Factor de crecimiento (FC)

El factor de crecimiento se encuentra determinado a través de la siguiente fórmula:

$$FC = \frac{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^n - 1}{\frac{i}{100}}$$

donde:

i = índice de crecimiento para vehículos livianos (2.80)

n = Periodo de diseño (15 años)

$$FC = \frac{\left(1 + \frac{2.80}{100}\right)^{15} - 1}{\frac{2.80}{100}} = 16.695$$

Tabla 4.37. Resultados del índice y factor de crecimiento

Tipo de vehículo	Índice de crecimiento (i)	Factor de crecimiento (FC)
Vehículos livianos (automóviles y vagonetas)	0.02	16.695
Vehículos medianos (camioneta y minibuses)	0.02	16.812
Vehículos pesados	0.0025	15.266
Otros vehículos	0.09	28.707

Fuente: Dimensionamiento de pavimento de concreto de bajo tráfico

### c) Transito de diseño

El tránsito de diseño se calculó con el factor de diseño determinado en el inciso b y el volumen diario obtenido mediante el respectivo aforo realizado.

$$\text{Tránsito de diseño} = \text{TPD} * \text{FC} * 365$$

Donde:

TPD = Trafico Promedio Diario según el tipo de vehículo (tabla de aforacion vehicular)

FC = Factor de crecimiento (tabla 4.38)

Ejemplo para vehículos livianos

$$\text{Tránsito de diseño} = 204 * 16.695 * 365$$

$$\text{Tránsito de diseño} = 1243142.1$$

Tabla 4.38. Resultados del tránsito de diseño

Tipo de vehiculo	Volumen de trafico	Transito de diseño (TPD)
Vehículos livianos (automóviles y vagonetas)	204	1243142.1
Vehículos medianos (camioneta y minibuses)	37	227047
Vehículos pesados	3	16716.5
Otros vehículos	35	366736
Total	279	1853641.6

Fuente: Dimensionamiento de pavimento de concreto de bajo tráfico

d) Factor equivalente de carga (LEF)

La determinación del factor equivalente LEF se determinará a través de la tabla 4.40 para un espesor de capa base de 8 pulgadas y según el tipo de carga por eje para cada vehículo.

Tabla 4.39. Determinación del factor equivalente de carga

Carga por eje		D plg (mm)								
		6	7	8	9	10	11	12	13	14
(Kips)	KN	152.4	177.8	203.2	228.6	254	279.4	304.8	330.2	355.5
2	8.9	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
4	17.8	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
6	26.7	0.011	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
8	35.6	0.035	0.033	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
10	44.5	0.087	0.084	0.082	0.081	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
12	53.4	0.186	0.18	0.176	0.175	0.174	0.174	0.173	0.173	0.173
14	62.3	0.353	0.346	0.341	0.338	0.337	0.336	0.336	0.336	0.336
16	71.2	0.614	0.609	0.604	0.601	0.599	0.599	0.598	0.598	0.598
18	80	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20	89	1.55	1.56	1.58	1.58	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59
22	97.9	2.32	2.32	2.35	2.38	2.4	2.41	2.41	2.41	2.42
24	106.8	3.37	3.34	3.4	3.47	3.51	3.53	3.54	3.55	3.55
26	115.7	4.46	4.69	4.77	4.88	4.97	5.02	5.04	5.06	5.06
28	124.6	6.58	6.44	6.52	6.7	6.85	6.94	7	7.02	7.04
30	133.5	8.92	8.68	8.74	8.98	9.23	9.39	9.48	9.54	9.56
32	142.6	11.9	11.5	11.5	11.8	12.2	12.4	12.6	12.7	12.7
34	151.3	15.3	15	14.9	15.3	15.8	16.2	16.4	16.6	16.7
36	160	20.1	19.3	19.2	19.5	20.1	20.7	21.1	21.4	21.5
38	169.1	25.6	24.5	24.3	24.6	25.4	26.1	26.7	27.1	27.4
40	178	32.2	30.8	30.4	30.7	31.6	32.6	33.4	34	34.4
42	186.9	1.42	1.43	1.44	1.45	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46
44	195.8	40.1	38.4	37.7	38	38.9	40.1	41.3	42.1	42.7

Fuente: Diseño de pavimento AASHTO-93

Tabla 4.40. Resultados de factor equivalente

Tipo de vehículo	Transito de diseño (TPD)	Peso máximo (KN)	Tipo de eje	LEFs
Vehículos livianos (automóviles y vagonetas)	1243142.1	14.72	simple	0.0013
Vehículos medianos (camioneta y minibuses)	227047	19.62	simple	0.0035
Vehículos pesados	16716.5	86.33	simple	2.32
Otros vehículos	366736	9.81	simple	0.0004

Fuente: Dimensionamiento de pavimento de concreto de bajo tráfico

d) Determinación de unidades ESAL de 18 kips (W18)

El número equivalente de ejes de 80 KN (ESALS) para una vida útil de 15 años se determinó a través de la siguiente formula.

$$W18 = N^{\circ} \text{ ESAL} * F_c * F_d$$

Donde:

$N^{\circ} \text{ ESAL}$  = Numero de Esal

$F_c$  = Factor de carril

$F_d$  = Factor de distribución direccional

- Factor de distribución direccional ( $F_d$ )

El factor direccional de carril se determina mediante la siguiente tabla:

Tabla 4.41. Factor direccional

Número de carriles en cada dirección	% ESAL de 18 kips en el carril de diseño
1	100
2	80 - 100
3	60 - 80
4	50 - 75

Fuente: Diseño de pavimento rígido AASHTO-93

$$F_d = 0.80 \text{ el } 80 \%$$

- Factor de carril (Fc)

Según el manual AASTHO-93 el valor del factor de carril para el caso de pavimentos rígidos es de 0.50 % el 50%.

$$F_c = 0.50 \text{ el } 50 \%$$

- Numero de Esal

Para el cálculo del número de Esal, se multiplico el 50% del total del TPD calculado por su respectivo LEFs con el fin de separar los vehículos pesados para posteriormente realizar la misma operación, pero para vehículos livianos, siendo el resultado final la sumatoria de ambas.

$$N^{\circ}ESAL = \sum TPD * 0.5 * LEFs'' + \sum TPD * 0.5 * LEFs$$

Donde:

TPD = Trafico promedio diario o tráfico de diseño

LEFs = Factor equivalente de carga

$$N^{\circ}ESAL = 1853641.6 * 0.5 * 2.32 + 1883641.6 * 0.5 * 0.0052$$

$$N^{\circ}ESAL = 2155121.724$$

$$W18 = 2155121.724 * 0.5 * 0.8 = 947071.56$$

d) Perdida de serviciabilidad ( $\Delta PSI$ )

$$\Delta PSI = P_o + P_f$$

Donde:

$P_o$  = Perdida de serviciabilidad inicial (por normativa IBCH y AASHTO93 para pavimentos rígidos igual a 4.5)

$P_f$  = Perdida de serviciabilidad final (tabla 4.41)

Tabla 4.42. Nivel de serviciabilidad final

Nivel de srviabilidad final	Porcentaje de personas que lo consideran inaceptable
3	12 %
2.5	55 %
2	85 %

Fuente: Diseño de pavimento rígido AASHTO-93

según la metodología AASHTO para pavimentos rígidos se adopta al 85% es decir

$$P_f = 2$$

$$\Delta PSI = 4.5 + 2 = 2.5$$

d) Desviación estándar total ( $S_o$ )

El valor de la desviación estándar total  $S_o$  se encuentra comprendido entre  $0.30 < R_o < 0.40$  según el manual de diseño AASTHO 93 para pavimentos rígidos recomienda 0.35.

$$S_o = 0.35$$

e) Determinación del nivel de confiabilidad (R) y desviación estándar normal ( $Z_r$ )

El nivel de confiabilidad se encuentra en función de la clasificación funcional de la vía, en este caso urbano local, por lo tanto, se tiene:

Tabla 4.43. Niveles de confiabilidad

Clasificación funcional	Nivel de confiabilidad recomendado	
	Urbano	Rural
Interestatal y otras vías libres	85 - 99.99	80 - 99.9
Arterias principales	80 - 90	75 - 95
Colectoras	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

Fuente: Elaboración propia

$$R = 80 \%$$

El valor de la desviación estándar para una confiabilidad 80% se tiene:

$$Z_r = 0.841 \text{ (según normativa AASHTO)}$$

f) coeficiente de drenaje (Cd) y coeficiente de transferencia de carga (J)

- Coeficiente de drenaje “Cd”

Para la selección del coeficiente de drenaje, AASHTO provee el siguiente cuadro donde la clasificación dada al drenaje se relaciona con el tiempo en el que el pavimento está expuesto a niveles próximos a la saturación.

Tabla 4.44. Niveles de confiabilidad

Calidad de drenaje	% del tiempo en que el pavimento esta expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación			
	< 1 %	1 a 5%	5 a 25%	>25%
Excelente	1.25 - 1.20	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10
Bueno	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00
Regular	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90
Pobre	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80
Muy pobre	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.70

Fuente: Diseño de pavimento rígido AASHTO-93

Las condiciones morfológicas de la zona las obras de drenaje indican entre regular y bueno, las características y precipitación de la zona nos llevan a deducir que entre el 5 – 25 % del tiempo el pavimento estará en niveles cercanos a la saturación, por lo tanto, el coeficiente de drenaje adoptado es:

$$Cd = 1.0$$

- Coeficiente de transferencia de carga “J”

Tabla 4.45. Coeficientes de drenaje

Tipo de pavimento	Berma de asfalto		Berma de H° vinculada	
	Dispositivos de transferencia		Dispositivos de transferencia	
	Si	No	Si	No
Junta sencilla y junta reforzada	3.2	3.8 - 4.4	2.5 - 3.1	3.6 - 4.2
Continuamente reforzada	2.9 - 3.2	N/D	2.3 - 3.9	N/D

Fuente: Diseño de pavimento rígido AASHTO-93

De acuerdo al método AASHTO-93 considera una berma de asfalto y se adoptara con junta sencilla.

$$J = 3.2$$

f) Modulo de Elasticidad del concreto ( $E_c$ )

El módulo de elasticidad se determinó a través de la resistencia a compresión del hormigón usando la siguiente formula:

$$E_c = 57000 * (f_c)^{0.5}$$

Donde:

$E_c$  = Modulo de elasticidad del concreto (psi)

$f_c$  = Resistencia a la compresión del concreto (psi)

De acuerdo a los resultados de laboratorio se tiene:

Tabla 4.46. Resistencia a compresión en porcentajes óptimos

Resistencia a compresión " $f_c$ "			
Mezcla adicionada con grafito al 1.5 %		Mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido al 1 %	
kg/cm <sup>2</sup>	psi	kg/cm <sup>2</sup>	psi
352.62	5015.44	356.95	5077.02

Fuente: Elaboración propia

$$E_c = 57000 * (5015.44)^{0.5} = 4036726.96 \text{ psi (grafito)}$$

$$E_c = 57000 * (5077.02)^{0.5} = 4061433 \text{ psi (limaduras)}$$

g) Modulo de ruptura del hormigón ( $S_c$ )

Tabla 4.47. Resistencia a flexión en porcentajes óptimos

Modulo de ruptura " $S_c$ "			
Mezcla adicionada con grafito al 1.5 %		Mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido al 1 %	
kg/cm <sup>2</sup>	psi	kg/cm <sup>2</sup>	psi
50.26	714.87	51.74	735.92

Fuente: Elaboración propia

h) Modulo resiliente de la subrasante (Mr)

De acuerdo al estudio de suelo realizado en laboratorio se tiene que el CBR de la subrasante es del 4%. De acuerdo a la normativa AASHTO para un C.B.R < 10% se tiene la siguiente formula

$$Mr = 1500 * CBR$$

$$Mr = 1500 * 7.4 = 11100 \text{ psi}$$

h) Modulo de elasticidad de la sub base (MEb) y Perdida de soporte (LS)

El módulo de elasticidad de la capa base se determinó de acuerdo al tipo de suelo a usar en la presente capa, al tratarse de un suelo granular adoptamos lo siguiente:

Tabla 4.48. Módulo de elasticidad y perdida de soporte

Tipo de material	Perdida de soporte (LS)
Base Granular Tratada con Cemento (E= 1 000 000 a 2 000 000 lb/pulg <sup>2</sup> )	0.0 a 1.0
Mezcla de Agregado y Cemento (E= 500 000 a 1 000 000 lb/pulg <sup>2</sup> )	0.0 a 1.0
Base Tratada con Asfalto (E= 350 000 a 1 000 000 lb/pulg <sup>2</sup> )	0.0 a 1.0
Mezclas Estabilizadas con Materiales Bituminosos (E= 40 000 a 300 000 lb/pulg <sup>2</sup> )	0.0 a 1.0
Mezcla Estabilizada con Cal (E= 20 000 a 70 000 lb/pulg <sup>2</sup> )	1.0 a 3.0
Materiales Granulares No Aglomerados (E= 15 000 a 45 000 lb/pulg <sup>2</sup> )	1.0 a 3.0
Materiales de Grano Fino o Subrasante Natural (E= 3 000 a 40 000 lb/pulg <sup>2</sup> )	2.0 a 3.0

Fuente: Fuente: Diseño de pavimento rígido AASHTO-93

$$MEb = 30000 \text{ psi}$$

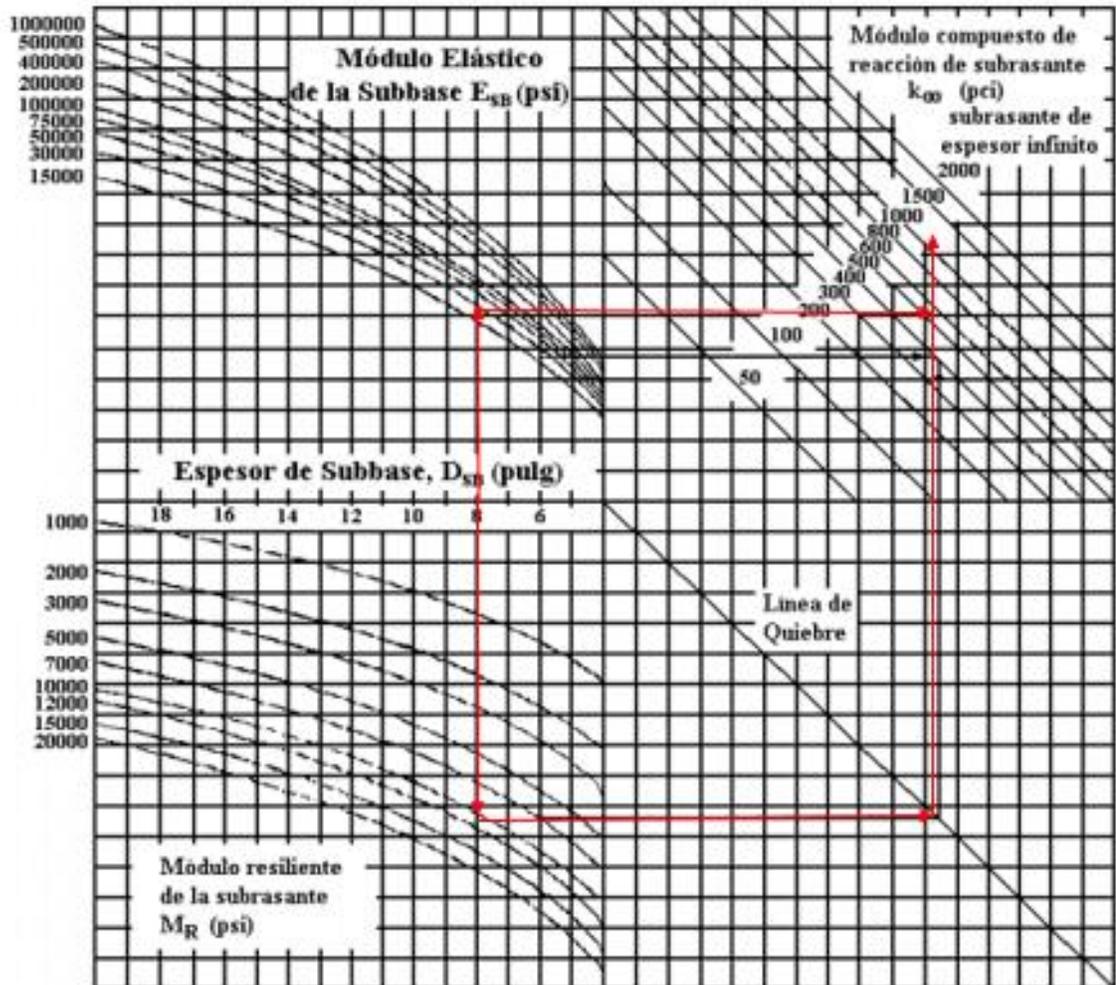
$$LS = 2$$

h) Modulo de reacción de la subrasante (K)

El cálculo del módulo de reacción (K) se realizó mediante el siguiente ábaco proporcionado por la guía AASTHO 93, en función del módulo de elasticidad de la base

(MEb), el módulo resiliente de la subrasante ( $M_r$ ) y asumiendo un espesor de base de 20 cm (8plg) según recomendación de la normativa mencionada.

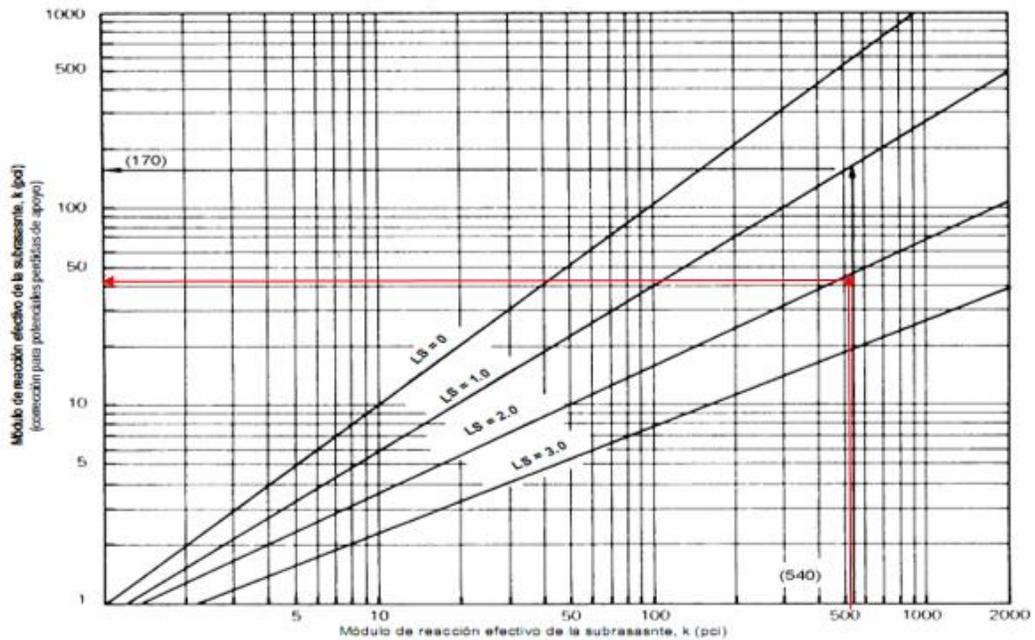
Abaco 4.1. Módulo de reacción de la subrasante (K)



Fuente: Guía AASTHO 93

Módulo de reacción  $K = 550$  pci

Abaco 4.2. Corrección del módulo de reacción de la subrasante considerando efectos de la fundación



Fuente: Guía AASTHO 93

Módulo de reacción corregido  $K_c = 42$  pci

h) Tabla resumen de los parámetros de diseño

Tabla 4.49. Parámetros de diseño

Patametros de diseño	Mezcla adicionada con grafito al 1.5 %	Mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido al 1%	Mezcla convencional
W18	947071.56	947071.56	947071.56
Po	4.5	4.5	4.5
Pf	2	2	2
So	0.39	0.39	0.39
Cd	1	1	1
R (%)	80	80	80
Zr	-0.841	-0.841	-0.841
J	3.2	3.2	3.2
Kc (psi)	42	42	42
Ec (psi)	4036726.96	4061433	3561491.6
Sc (psi)	714.87	735.92	579.17

Fuente: elaboración propia

h) Determinación del espesor de losa

Cuadro 4.1. Espesor de losa convencional

Fuente: software AASHTO-93

$D = 7.50 \text{ plg} = 18.75 \text{ cm}$  adoptamos 19 cm

Cuadro 4.2. Espesor de losa con grafito

Fuente: software AASHTO-93

$D = 6.50 \text{ plg} = 16.25 \text{ cm}$  adoptamos 17 cm

Cuadro 4.3. Espesor de losa con limaduras de hierro fundido

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993) por Luis R. Vásquez

**Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993)**  
 Desarrollado por: Luis Ricardo Vásquez Varela. Ingeniero Civil. Manizales, 2006.

Tipo de pavimento:  Flexible  Rígido

Confiabledad (R) y desviación estándar (So): 80% Zr = -0.841 So = 0.39

Serviciabilidades inicial y final: PSI inicial = 4.5 PSI final = 2

Tránsito de diseño: W18 = 947071.56

Pavimento rígido

Módulo de reacción de la subrasante - k (psi/in): 42

Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi): 3561491.6

Módulo de rotura del concreto - Sc (psi): 735.92

Coeficiente de transmisión de carga - J: 3.2

Coeficiente de drenaje - Cd: 1

Ver Guía AASHTO para su obtención

¿Ec/Sc?

J

Cd

Espesor de losa D (plg): 6.28

D redondeado (plg): 6.50

W18 real: 1.17E+00E

Diseñar

Ver informe

Cálculo de W18 para un D (plg)

D: [ ] W18: [ ]

Quitar el control de variables

Salir

$D = 6.5 \text{ plg} = 16.25 \text{ cm}$  adoptamos 17 cm.

#### 4.2.10. Análisis de precios por m<sup>3</sup> de hormigón y km de carretera

Se presentan en el presente punto, una comparación de los precios por metro cubico de hormigón entre las mezclas adicionadas y convencionales sin aditivo, en la siguiente tabla 4.50 se presentan los resultados obtenidos, cabe mencionar que dichos valores fueron calculados mediante una hoja de cálculo (análisis de precios unitarios). Ver anexo

Las limaduras de hierro fundido es el aditivo más favorable por así decirlo, esto se debe a que estamos hablando de un material de desecho por parte de los talleres de metalurgia y tornerías, este posee un incremento del 4.098% al adicionar 0.5 % de limaduras, un incremento del 4.205 % al adicionar 1%; 4.312 % al adicionar a la mezcla convencional 1.5% y 4.417 %, 5.165 % al adicionar 2 % y 4% de aditivo respectivamente.

Tabla 4.50. Precios por metro cubico de hormigón con y sin aditivo

Porcentaje de adición (%)	Costo por metro cubico de hormigón (Bs)		
	Mezcla adicionada con grafito	Mezcla adicionada con limaduras de hierro	Mecla de concreto sin aditivo
0.50	1580.85	1487.75	1429.17
1.00	1732.41	1489.27	
1.50	1884.09	1490.79	
2.00	2035.65	1492.30	
4.00	2642.26	1502.99	

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de la mezcla adicionada con grafito esta mantiene costos más elevados lo cual es comprensible debido a que este si tiene un costo por kg, debido a este precio el incremento es mayor adquiriendo así porcentajes del 10.613 %, al adicionar 0.5% de grafito, 21.218 % al adicionar 1% de grafito 31.831 % al adicionar 1.5 % y 42.436 %, 84.881 % al 2 % y 4% de adición de grafito. Sin embargo, es importante mencionar que los porcentajes donde mayor resistencia se obtiene es al 1.5 % de grafito y 1 % de limaduras de hierro fundido.

Para el precio por kilómetro de carretera se tiene:

Tabla 4.51. Parámetros de las losas de hormigón

Longitud de pavimento	1000 m
Longitud de losa (asumido)	4 m
Ancho de losa (asumido)	3 m
Espesor de losa convencional	0.19 m
Espesor de losa adicionada (calculado)	0.17 m
Vol. total de H° para 1km (mezcla convencional)	1140 m <sup>3</sup>
Vol. total de H° para 1km (mezcla adicionada)	1020 m <sup>3</sup>
Vol. Por losa =	2.28 m <sup>3</sup>
N° de losas por 1 km	500

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.52. Precios por metro kilómetro de carretera

Porcentaje de adición (%)	Costo por kilometro de pavimento (Bs)		
	Mezcla adicionada con grafito	Mezcla adicionada con limaduras de hierro	Mecla de concreto sin aditivo
0.50	1612469.14	1517509.56	1629253.34
1.00	1767058.06	1519055.45	
1.50	1921771.80	1520602.61	
2.00	2076363.13	1522148.50	
4.00	2695100.51	1533052.42	

Fuente: Elaboración propia

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

- ✓ La etapa inicial de caracterización de cada uno de los componentes de la mezcla como así también los ensayos de resistencia a flexión y compresión se desarrollaron satisfactoriamente cumpliendo todas las especificaciones proporcionadas por el manual de diseño de la Administradora Boliviana de Carreteras ABC.
- ✓ La trabajabilidad en las mezclas adicionadas tanto con grafito y limaduras de hierro fundido presentan asentamientos menores en relación a la mezcla patrón sin aditivos, siendo la mezcla con grafito la que presenta los porcentajes de reducción más elevados. A mayor porcentaje de adición, la mezcla adquiere un comportamiento cada vez más desfavorable dentro del punto de vista de la trabajabilidad, comenzando a disminuir los asentamientos.
- ✓ En base a los ensayos realizados en laboratorio se concluye que la disminución de los asentamientos en las mezclas adicionadas está ligado al origen de los aditivos, es decir al ser estos de origen mineral no tienen una capacidad deformativa considerable al entrar en contacto con el agua de mezclado, como sucede en el caso de las arcillas, limos o demás material fino, sino que mantienen una postura homogénea firme con cierta sequedad generando así poca trabajabilidad.
- ✓ Las resistencias a flexión obtenidas son favorables, las mezclas con adición en ambos casos mejoran definitivamente la resistencia en relación a la mezcla patrón. A mayor porcentaje de aditivo las mezclas adquieren mayores resistencias a la flexión, concluyendo que el uso del grafito y las limaduras de hierro fundido son favorables.
- ✓ La incorporación del grafito y limaduras de hierro fundido dentro de la mezcla permite el llenado de espacios vacíos que pueden generarse en la mezcla, traducándose esto en probetas primaticas y cilíndricas mucho más compactas, rígidas y de mayor peso haciendo que las resistencias a flexión y compresión sean mayores comparadas con la mezcla patrón sin aditivos.
- ✓ Al adicionar limaduras de hierro fundido y grafito a la mezcla se presentan puntos óptimos de adición donde las resistencias tanto a flexión y compresión son

sobresalientes. Estos puntos óptimos se generan al adicionar 1.5 % de grafito y 1 % de limaduras de hierro fundido.

- ✓ En cuanto a la resistencia a compresión éstas reflejaron un comportamiento similar a la resistencia a flexión, es decir a mayor porcentaje de adición de grafito y limaduras de hierro fundido a la mezcla, estas adquieren mayores resistencias a compresión.
- ✓ La superioridad reflejada de la mezcla adicionada con limaduras de hierro fundido frente a la mezcla con grafito principalmente en las resistencias a flexión y compresión se encuentra dentro de lo pronosticado ya que no se debe dejar entrever que la limadura de hierro fundido posee grandes antecedentes en cuanto a resistencia, teniendo relación directa con el acero material que sin lugar a duda es sinónimo de resistencia en toda clase de estructuras.
- ✓ El peso por unidad de volumen de las mezclas también juega un papel importante dentro del presente trabajo de investigación, este mantiene un comportamiento creciente a medida que se incrementa los aditivos dejando en claro también que a mayor peso por unidad de volumen las resistencias tanto a flexión como a compresión también son mayores.
- ✓ Si bien el peso por unidad de volumen depende bastante de buen trabajo realizado en laboratorio como un vaciado cuidadoso del hormigón dentro de las probetas o la realización de un buen compactado del mismo, el incremento de estos pesos en cierta manera está basada en la implementación de los micro y nano materiales ya que estos llegan a opacar los espacios vacíos que normalmente se presentan en una probeta de concreto convencional generando así un espécimen mucho más compacto y rígido listo para ser ensayado a compresión y flexión.
- ✓ Evidentemente el aditivo de mayor conveniencia es el uso de limaduras de hierro fundido ya que este nos proporciona una mayor resistencia a flexión y compresión y su incremento respecto a la mezcla patrón es mayor. Sin embargo, no deja de ser una tentativa el uso de grafito en menores proporciones ya que dentro de los pavimentos rígidos la resistencia a flexión es fundamental, resistencias aceptables que se alcanza con total normalidad con el uso del grafito.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- ✓ El proceso de dosificación y hormigonado realizado en laboratorio, principalmente si se trata de la adición de nuevos materiales debe ser tratado con suma precisión y controlado con las pruebas necesarias (asentamientos, una buena caracterización de materiales) para no tener problemas al momento de realizar las pruebas respectivas de resistencias.
- ✓ Se debe tener mucho cuidado con la temperatura ambiente en el momento de realizar las mezclas, porque los climas extremos verdaderamente pueden llegar a afectar los procedimientos y resultados esperados en el hormigón.
- ✓ En el agua en la mezcla de los componentes del hormigón con y sin aditivo es muy importante especialmente cuando se trata de nuevos aditivos minerales, esta puede dificultar directamente la trabajabilidad del hormigón si no es tratado con suma precisión. En lo posible se recomienda si se desea continuar con los trabajos de investigación realizar un análisis del porcentaje de agua que absorben los aditivos y la corrección que se debe hacer en laboratorio o en previa dosificación.
- ✓ Las limaduras de hierro fundido son materiales que se encuentran como desecho de las tornerías y talleres metalúrgicos, se recomienda realizar un tamizado y control estricto a la hora de realizar las impurezas que contiene dicho material.
- ✓ El manejo de los aditivos se debe realizar con suma cautela ya que son materiales con partículas sumamente pequeñas que la hora de ser manipuladas se esparcen rápidamente por el viento.
- ✓ Al momento de realizar el hormigonado en las probetas prismáticas y cilíndricas se debe tener mucho cuidado en la rigidez y buena calidad de estas, para que así las muestras puedan tener la uniformidad correspondiente.
- ✓ El varillado mediante la sucesión de capas del hormigón es fundamental para obtener una buena muestra, se recomienda trabajar mínimamente entre dos personas para poder así efectuar el procedimiento de ensaye con mayor precisión.
- ✓ Se recomienda si se desea continuar con la investigación, evaluar porcentajes menores de adición de grafito y verificar si el comportamiento es favorable de acuerdo a objetivos y poder así también disminuir el costo por metro cubico de hormigón adicionado.

- ✓ Es recomendable realizar las evaluaciones en la parte económica de la misma, para poder concluir sobre qué tan conveniente resulta el uso de estos aditivos principalmente el grafito con el fin de disminuir costos en la elaboración de concretos para la construcción de carreteras.
- ✓ Esta investigación queda abierta a posteriores estudios, ya que existen todavía muchas variables por investigar que se encuentran fuera del alcance de este trabajo, por ejemplo, el comportamiento a largo plazo, el comportamiento ante ataques de sulfatos, entre otros. Sin embargo, existe muchas posibilidades de que se comporte favorablemente ya que los componentes de las limaduras de hierro fundido y grafito provienen en gran parte del acero material imprescindible dentro de las estructuras,