

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES.-

El hormigón a base de Azufre, que es un material termoplástico, es el término genérico utilizado para un rango de productos que varían con los agregados, azufres cementantes y aditivos que cuando se solidifica gana resistencia rápidamente durante su proceso de enfriamiento.

El azufre, que es el componente aglomerante de este tipo de hormigón, es mezclado en caliente con los agregados para producir los moldes y en su proceso de enfriamiento, pasa de estado líquido, primero a cristales como azufre monoclinico (S_{β}) a 114° C, luego, cuando el enfriamiento alcanza los 96° C aproximadamente el S_{β} comienza a transformarse en azufre ortorrómbico (S_{α}), que es la forma estable del azufre a temperatura ambiente. Esta transformación ocurre en menos de 24 horas.

El hormigón convencional, mezcla de cemento Portland o cualquier otro cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua que al endurecer resiste altos esfuerzos de compresión; pero si se le adiciona armadura puede resistir adicionalmente gran esfuerzo de tensión. El cemento se puede obtener a partir de sustancias cementante del regalito o piedra caliza.

Para la fabricación del cemento se requiere de temperaturas muy elevadas (1.200°C-1.400°C) y grandes cantidades de energía, como también el uso de una serie de maquinarias de gran magnitud.

El agua para el mezclado tiene que ser limpia y de bajo PH lo cual lo hace escasa e muchos lugares del planeta.

A continuación se indicaran algunas ventajas del hormigón de azufre con relación al hormigón convencional:

- El ahorro energético derivado de la utilización de azufre es considerable y se incrementa porque no se requiere agua, ya que el azufre reemplaza este componente y el cemento del concreto convencional.
- Otra ventaja del azufre con respecto al hormigón convencional es que se puede mezclar con los áridos en condiciones de vacío.
- El hormigón y el mortero de azufre presenta una ventaja adicional con respecto al convencional, el cual se debía fabricar en un ambiente presurizado y esperar un tiempo antes de despresurizar, con el fin de disminuir el fenómeno de retracción. El hormigón de azufre es moldeable en condiciones de vacío.
- La resistencia a la compresión, tracción y flexión, así como el comportamiento a la fatiga del hormigón de azufre son superiores a la que se obtiene en hormigones convencionales.

La posible desventaja del hormigón de azufre radica en que los ciclos de temperatura afectan negativamente, lo cual provoca una disminución del módulo de elasticidad. A pesar de ello, la frecuencia de estos ciclos (uno cada mes) es tan pequeña que se puede asegurar una larga vida a las estructuras de este material (20 años).

Cuando se desea elaborar “hormigones de azufre”, este se debe mezclar con los áridos a una temperatura de 160°C, de manera que el azufre se encuentre en estado líquido y con la suficiente fluidez para envolver a los agregados.

Una diferencia sustancial entre el hormigón convencional y el hormigón de azufre es que el primero endurece durante un proceso de fraguado, mientras que el segundo lo hace mediante un proceso de cristalización, lo que impide el fenómeno de retracción después del endurecimiento, el cual se puede presentar en el hormigón convencional debido al ambiente seco y a los factores mencionados. El fenómeno de retracción no se presenta en el concreto de azufre, ya que éste, durante el proceso de fraguado baja de 114 a 96°C, con el consecuente cambio volumétrico. Por debajo de esta temperatura ya no se producen más transformaciones de la estructura cristalina del azufre ni, por consiguiente, grietas por retracción.

1.2. JUSTIFICACIÓN.-

Es muy común hoy en día, informarse por los medios televisivos, radiales o impresos de los problemas estructurales que presentan un sin número de obras civiles de hormigón armado. Como ejemplo podemos citar: La autopista La Paz – El Alto, la carretera Tarija – Potosí y por ende el tramo carretero Cucho Ingenio Cotagaita, el puente sobre el río Santa Ana, estructuras de edificación de diversa índole, losas, alcantarillas de hormigón, etc. Estos problemas, que lejos de reducirse se van incrementando, tienen como principal patología la existencia de fisuras que reducen la durabilidad de una obra de hormigón y motivan al estudio de un material de reparación que presente características similares a la estructura de hormigón original, además de garantizar una adherencia adecuada entre ambos materiales. Tal vez la solución no se encuentre tan lejos y además sea barata, nos referimos específicamente al “hormigón y mortero de azufre”.

Los esfuerzos internos y permeabilidad derivada del fisuramiento que sufre el hormigón hidráulico por la retracción ocasionada por los ciclos de temperaturas que se presenta durante el día, dicho problema es muy perjudicial cuando trabajamos con grandes volúmenes de hormigón.

Lo mencionado en los anteriores párrafos ocasiona que las estructuras de hormigón presenten patologías que deben ser rápidamente determinadas y subsanadas con el fin de evitar el acortamiento de la vida útil. Muchas veces; más aún cuando las patologías no son generalizadas sino localizadas en elementos determinados, la solución puede presentarse con erogaciones económicas bastante pequeñas con aditivos selladores comerciales y mejor aún con hormigones de azufre y/o morteros del mismo.

De aquí surge la necesidad de obtener un hormigón y/o mortero a base de azufre, resistente a la retracción ,resistente a ácidos y sulfatos, que se base en las características de baja permeabilidad, que presente alta resistencia a los ataques químicos y alta resistencia mecánica. Estas características en cualquier reparación se traducen en una mayor durabilidad de las estructuras, revirtiendo de esta manera, el acortamiento de vida útil provocado por la fisuración excesiva. Se ha demostrado que el tiempo de curado del

hormigón a base de azufre es mucho menor que el del hormigón hidráulico, lo que permite disminuir el tiempo de fabricación, ejecución y/o montaje.

El azufre es un elemento abundante, y se encuentra formando parte de algunos minerales. Para su obtención no se requiere de temperaturas muy elevadas.

Aprovechando la fácil obtención de este material, de sus bondades, y de la abundancia de áridos (gruesos y finos) de excelente calidad en el valle central es que se propone como trabajo de aplicación de estos tipos de hormigones en la reparación de pavimentos; que se obtienen sin más que mezclar a temperaturas adecuadas el azufre (como sustancia aglomerante) y los áridos (como materiales) llenantes.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

- ✚ Demostrar la utilidad del hormigón y mortero a base de azufre en el campo de la ingeniería vial mediante la reparación de grietas en pavimentos rígidos.

1.3.2. Objetivos Específicos

- ✚ Verificar la resistencia del mortero de azufre añadiendo tres clases de aditivos.
- ✚ Elegir el aditivo que mejores resultados obtenga en la fabricación de morteros para aplicarlo en la elaboración de la dosificación óptima en hormigones a base de azufre.
- ✚ Proporcionar la dosificación óptima del mortero y hormigón a base de azufre para su posterior utilización en la reparación de pavimentos.
- ✚ Proporcionar una metodología para la aplicación del hormigón y/o mortero a base de azufre en la reparación de grietas presentadas en los pavimentos.
- ✚ Elaborar una nueva alternativa en materiales para la reparación de las grietas del pavimento.
- ✚ Aplicar el producto obtenido mediante el método propuesto para la reparación de una losa dañada en una vía urbana. (Av. Circunvalación entre Av. Froilan Tejerina y Av. Dr. Jorge Magluf)

1.4. ALCANCE

En el presente proyecto se mostrarán los conocimientos necesarios que se debe tener para realizar la reparación de pavimentos con hormigones y morteros de Azufre; entre los cuales destacan las metodologías de identificación de patologías que nos ayudará a identificar los problemas que existen en los pavimentos. Otro punto que también presentaremos será la conservación y mantenimiento de pavimentos que pretende dar a conocer cómo se realizan estas actividades y cómo se deberá encarar la aplicación de un nuevo método.

Se proporcionará una idea conceptual y teórica del tema central del proyecto en donde se mostrará las distintas fases que se realizarán para el desarrollo del proyecto, entre las fases a ejecutarse mostraremos las propiedades de los materiales que componen el Hormigón y Mortero de Azufre.

Describiremos los equipos y muestras empleados para el proyecto así como el uso de los mismos, describiremos las técnicas a utilizar para la dosificación y pruebas de compresión, esta dosificación será realizada con dos tipos de aditivos con la finalidad de obtener la mejor mezcla y el aditivo ideal para el uso en pavimentos, el propósito de realizar las muestras con dos tipos de aditivos se debe a que en el mercado interno no se pueden encontrar los aditivos requeridos por las investigaciones ya realizadas es por esta razón que se realizarán las muestras con aditivos similares a los que proponen los investigadores los cuales pueden ser obtenidos en el mercado nacional y local; se dará a conocer las observaciones y resultados de las pruebas realizadas.

Se determinarán algunas bases en la aplicación del Hormigón y Mortero a base de Azufre en distintos tipos de patologías presentadas en los pavimentos las cuales afectan las vías de nuestra ciudad, se pretende elaborar una nueva alternativa en materiales para la reparación de las patologías del pavimento, para de esta manera colaborar a la investigación de nuevos e innovadores métodos; se elaborará una metodología de ejecución para la posterior implementación en el campo de la reparación de las patologías en pavimentos.

1.5. MEDIOS Y METODOLOGÍAS

Los medios que se utilizaron para hacer posible el presente trabajo están basados en investigaciones realizadas por instituciones (ACI) y personas interesadas en el campo de este tema que tiene como material principal al azufre.

Para determinar y verificar las bondades de este material se realizaron probetas en un número de 103 de las cuales 12 fueron para determinar el aditivo modificador del azufre, 64 para determinar el diseño de mezcla optima asiendo variar el aditivo modificador, 15 para verificar la resistencia a compresión de la mezcla optima en 1, 3, 7, 14 y 28 días, estas probetas tienen una dimensión de 5 cm. x 5cm x 5 cm.

También se realizaron probetas de mortero las mismas que tienen una forma cúbica de una dimensión de 5 por 5 cm., estas probetas fueron sometidas a ensayos de compresión basados en la norma ASTM C109 (Resistencia a la compresión de morteros hidráulicos), este ensayo se lo realizó con el fin de obtener el aditivo modificador del azufre; en número de probetas realizado fue de 96 en donde estas fueron realizadas con distintos porcentajes de aditivo.

En cuanto a la metodología de ejecución en campo de este material, se realizó un número de 5 probetas convencionales de hormigón hidráulico donde se observó el comportamiento del hormigón de azufre sobre el hormigón hidráulico. Estas probetas fueron hechas dejando una abertura en la parte central de dimensión igual a la que se aplica en campo la misma que tiene 5 cm. y una profundidad de 10 cm. para las probetas y de 5 cm. en campo. El método consiste en sellar la abertura con el material (Hormigón a base de Azufre) y posteriormente realizar las correspondientes pruebas de compresión.

Los materiales y equipos que se necesitaron para realizar las probetas y estudios de resistencia fueron: balanza, mezcladora para hormigones de azufre (presenta un sistema de hornallas que calientan la mezcla), una barra de hierro para compactar la mezcla, prensa hidráulica, entre otros materiales, los cuales mencionamos de forma detallada en los siguientes capítulos.

Las metodologías que se utilizaron para realizar los ensayos de los agregados está basado según las normas de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), entre los ensayos que se realizaron tenemos: Ensayo para tamizar y determinar la granulometría de los agregados (ASTM C 136 AASTHO T27), Ensayo para determinar el peso unitario o peso específico aparente (ASTM E 30 ASTM C 29), Método para determinar el peso específico real, el peso específico neto y la absorción de agua en áridos gruesos (ASTM C 127 AASHTO T85), Método para determinar el peso específico real, el peso específico neto y la absorción de agua en áridos finos (ASTM C 128 AASHTO T84).

El sistema de dosificación fue ejecutado en base al proyecto de grado “Análisis de la Resistencia a Compresión del Hormigón a Base de Azufre”, este proyecto nos da una idea de los porcentajes de azufre y aditivo que deben ser utilizados para obtener la resistencia optima de un hormigón y mortero a base de azufre.

En cuanto al procedimiento que se siguió para detectar las patologías en pavimentos, éstos fueron realizados con el método PCI (Índice de Condición del Pavimento), el cual consiste en realizar un inventario visual de la condición del pavimento en el cual se establecen CLASE, SEVERIDAD y CANTIDAD que cada daño presenta. El PCI se desarrolló para obtener un índice de la integridad estructural del pavimento y de la condición operacional de la superficie. La información de los daños obtenida como parte del inventario ofrece una percepción clara de las causas de los daños y su relación con las cargas o con el clima.

El trabajo de campo se realiza midiendo el ancho de las grietas y las fisuras con un flexómetro para de esta manera definir la severidad de la patología. La reparación de las patologías (grietas, fisura) fue ejecutada ensanchando las grieta para de esta manera poderla sellar y proporcionar un colocado ideal y la misma tenga una adherencia perfecta con la superficie a sellar; este procedimiento es detallado en los siguientes capítulos.

CAPÍTULO II

PRINCIPIOS BÁSICOS DE HORMIGONES Y PAVIMENTOS

2.1. EL HORMIGÓN

Conceptos básicos.- Hormigón en general, se le denomina a una masa de agregados pétreos con distintos tipos de materiales aglomerantes, con propiedades tanto adhesivas como cohesivas.

Definición.- Piedra artificial constituida por la mezcla de cemento, agregados y agua - en casos dado también aditivos y materiales adicionales - que se origina, con el endurecimiento de la pasta de cemento (DIN 1045).

El hormigón es un material que llega a la obra en forma plástica, pudiendo ser moldeado en ella de prácticamente cualquier forma. Presenta una gran variedad de texturas y colores y se utiliza para construir muchos tipos de estructuras, puentes, túneles, represas, canales, grandes edificios, pistas de aterrizaje y en prácticamente lo que uno se pueda imaginar en cuanto a construcción se refiere.

Un buen diseño estructural con hormigón sólo será útil si la ejecución física ha sido realizada con productos de buena calidad y con una buena práctica por la mano de obra contratada. De los mismos factores dependerá el tiempo que una estructura se mantenga en buen estado.

2.1.1. MATERIALES.

2.1.1.1. CEMENTO.

Es un conglomerante hidráulico, en forma de polvo muy fino que amasado con agua, forma una pasta capaz de fraguar y endurecer, formando una masa resistente en contacto con el aire o bajo el agua. Los cementos más comunes utilizados en nuestro medio son:

Cemento Hidráulico: Cemento que fragua y endurece por la interacción química con el agua, tanto al aire como bajo agua, a causa de las reacciones de hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables.

Cemento Pórtland: Un cemento hidráulico producido por la pulverización del clinker Pórtland, usualmente en combinación con sulfato de calcio.

2.1.1.2. AGREGADOS.

La norma boliviana NB 594 define árido como “Material granular, generalmente inerte, resultante de la desintegración natural y desgaste de las rocas o que se obtiene mediante la trituración de ellas, de escorias siderúrgicas o de otros materiales suficientemente duros que permiten obtener partículas de forma y tamaño estables.”

Los agregados en el hormigón corresponden a los componentes inertes del hormigón y constituyen entre el 60 y 80 % del volumen del hormigón, teniendo como funciones importantes:

- Proveer al hormigón una masa de partículas capaz de resistir los esfuerzos mecánicos que se aplicará en la pieza.
- Desplazar volumen con una masa de partículas resistentes a los esfuerzos mecánicos.
- Disminución de los cambios volumétricos (retracciones), como resultado de los procesos de fraguado, endurecimiento.
- Disminución de las temperaturas de fraguado.

Los agregados de calidad deben cumplir ciertas reglas para darles un uso óptimo: deben consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta del cemento. Las partículas de agregado que sean desmenuzables o susceptibles de resquebrajarse son indeseables.

Debido a esto influyen mucho en el costo económico y en las propiedades del hormigón fresco, como en el endurecido. Las propiedades físicas que podrían ser afectadas incluyen el peso unitario, la manejabilidad, el módulo de elasticidad, resistencia, contracción, flujo plástico, comportamiento térmico y durabilidad.

2.1.1.2.1. AGREGADOS EN EL HORMIGÓN.

Inicialmente se podría pensar que la función de los agregados en el Hormigón es la de reducir los costos, pero en realidad no se podría conseguir un buen hormigón si no se contara con éstos. Por ejemplo la pasta sin agregados sufriría una cantidad intolerable de contracción que conduciría al agrietamiento, debido a la contracción diferencial entre las partes exteriores e interiores. La superficie del agregado proporciona una enorme área de contacto para producir una liga íntima con la pasta. La rigidez de los agregados restringe en gran parte el cambio de volumen de la masa en conjunto.

2.1.1.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS PARA HORMIGÓN.

La gran variedad de material granular que se incorpora en el hormigón hace que sea muy difícil la expresión de una definición por completo satisfactoria de “Agregado”. Por lo que aquí se dan varias definiciones según tres clasificaciones: por su procedencia, por su tamaño y por su gravedad específica.

2.1.1.2.2.1. POR SU PROCEDENCIA.

Agregados naturales.- Formados por procesos geológicos.

Agregados artificiales.- Proviene de un proceso de transformación de los agregados naturales, dichos agregados artificiales son productos secundarios. Algunos de estos agregados son los que constituyen la escoria siderúrgica, la arcilla horneada, el hormigón reciclado, piedra triturada (chancada), etc.

- ***Piedra triturada.-*** Producto que resulta de la trituración artificial de rocas, piedra boleada o pedruscos grandes, del cual todas las caras poseen aristas bien definidas, resultado de la operación de trituración.
- ***Escoria siderúrgica.-*** Residuo mineral no metálico, que consta en esencia de silicatos y aluminosilicatos de calcio y otras bases, y que se produce simultáneamente con la obtención del hierro.

2.1.1.2.2.2. POR SU TAMAÑO.

Agregado grueso.- Agregado retenido de modo predominante por el tamiz No. 4 (de 4.75mm.); o bien, aquella porción de un agregado que es retenida por el tamiz No. 4 (de 4.75mm.).

El agregado grueso utilizado en nuestro medio es denominado “**Grava**”, que resulta de la desintegración y abrasión naturales de la roca o procede de la trituración de ésta.

Agregado fino.- Agregado que pasa por el tamiz de 3/4 in (9.5 mm.) y casi pasa por completo por el tamiz No. 4 (de 4.75 mm.) y es retenido de modo predominante por el tamiz No. 200 (de 75 μ m); o bien, aquella porción de un agregado que pasa por el tamiz No. 4 (de 4.75 mm.) y es retenida de modo predominante por el No. 200 (de 75 μ m).

El agregado fino utilizado en nuestro medio se denomina “**Arena**”, éste resulta de la desintegración y abrasión naturales de la roca o procede de la trituración de esta.

2.1.1.2.2.3. POR SU GRAVEDAD ESPECÍFICA.

Tabla II- 1: Propiedades Físicas De Los Tipos Principales De Rocas

Tipo De Roca	Gravedad específica	Absorción * %	Prueba de abrasión Los Angeles %
Igneas			
Granito	2.65	0.3	38
Sienita	2.74	0.4	24
Diorita	2.9	0.3	-
Gabro	2.96	0.3	18
Peridotita	3.31	0.3	-
Felsita	2.66	0.8	18
Basalto	2.86	0.5	14
Diabasa	2.96	0.3	18
Sedimentarias			
Piedra caliza	2.66	0.9	26
Dolomita	2.7	1.1	25
Arcilla esquistosa	1.8 - 2.5	-	-
Arenisca	2.54	1.8	38
Chert	2.5	1.6	26
Conglomerado	2.68	1.2	-
Brecha	2.57	1.8	-
Metamórficas			
Gneis	2.74	0.3	45
Esquisto	2.85	0.4	38
Anfibolita	3.02	0.4	35
Pizarra	2.74	0.5	20
Cuarcita	2.69	0.3	28
Mármol	2.63	0.2	47
Serpentina	2.62	0.9	19

Fuente: Referencia 5

Ligeros, $G_s < 2.5$. Los agregados ligeros, como la arcilla esquistosa y la expandida, la escoria expandida, la Vermiculita, la Perlita, la Piedra Pómez y las Cenizas, se utilizan para producir hormigón aislante, para unidades de mampostería o estructural ligero que pesa entre 400 y 2000 kg/m³.

Normales, $2.5 < G_s < 2.75$. Los materiales principales que se usan en el hormigón de peso normal, por lo común de 2300 a 2500 kg/m³, incluyen las arenas y gravas, roca triturada y escoria siderúrgica. Las rocas trituradas de uso más común son el Granito, Basalto, Arenisca, Piedra Caliza y Cuarzita.

Pesados, $G_s > 2.75$. Los agregados pesados, como la Magnetita, la Barita o el Hierro de desecho, se usan para producir hormigón de 2900 a 3500 kg/m³, utilizado para blindaje contra la radiación y para contrapesos de hormigón.

En Tabla II- 2 se da los valores promedio para las propiedades físicas de los tipos principales de rocas. La EHE limita estos valores a:

Tabla II- 2: Limitaciones Físico-Mecánicas De Los Agregados Según La EHE

Resistencia al desgaste de la grava determinada con el método de ensayo de Los Ángeles	≤40
Absorción de agua por los áridos	≤ 5%

Fuente: Referencia 5

Dentro de los agregados encontramos dos clasificaciones, los agregados gruesos o gravas y los agregados finos o arenas

2.1.1.2.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS.

La limpieza, sanidad, resistencia y forma de las partículas son importantes en cualquier agregado.

Los agregados se consideran **limpios** si están exentos de exceso de arcilla, limo, mica, materia orgánica, sales químicas y granos recubiertos. Un agregado es **físicamente sano** si conserva su integridad bajo cambios de temperatura o humedad y si resiste la acción de la intemperie sin descomponerse.

Se realizan variadas pruebas en los agregados del hormigón para:

- Establecer que se satisfagan requisitos mínimos de *calidad*; se incluyen esas cualidades básicas deseables como tenacidad, solidez y resistencia a la abrasión,
- Determinar características útiles para seleccionar las proporciones para el hormigón; como la gravedad específica y la absorción.
- Asegurar que en forma rutinaria se cumplan con los requisitos para el trabajo.

En la mayor parte de los casos, las pruebas aplicadas a los agregados dan un *índice* para predecir el comportamiento en el hormigón, en lugar de evaluar un atributo en verdad básico.

2.1.1.2.3.1. TEXTURA SUPERFICIAL.

La textura superficial de los agregados afecta la calidad del hormigón en estado fresco y tiene gran influencia en las resistencias, repercutiendo más en la resistencia a la flexotracción que a la compresión.

El hormigón puede contener agregado con una gran diversidad de características superficiales distintas desde una muy lisa hasta muy áspera y de panal y resultar en un hormigón satisfactorio.

Mientras mayor sea la rugosidad superficial de los agregados mayor es la superficie de contacto con la pasta de cemento; haciendo necesaria la utilización de mayor contenido de pasta para lograr la trabajabilidad deseada, pero favorece la adherencia pasta-agregado y así mejora las resistencias. Esto es característico de los agregados de trituración.

En el caso de los cantos rodados, donde su superficie es lisa, dan mejor trabajabilidad al hormigón pero menor adherencia pasta-agregado.

2.1.1.2.3.2. FORMA DEL AGREGADO.

La forma del agregado tiene gran influencia en las propiedades del hormigón fresco y endurecido, particularmente en lo que hace a la docilidad y resistencias mecánicas respectivamente.

Como en el caso de la textura superficial, se ha producido hormigón satisfactorio con agregado que consta de una gran diversidad de formas.

Las partículas naturales de agregado que han sido sujetas a la acción de las olas y el agua durante la historia geológica pueden ser esencialmente esféricas; las otras, rotas por la trituración, pueden ser cúbicas o tener muchos ángulos con vértices agudos, debiendo tener por lo menos una cara fracturada, resultante del proceso de trituración.

Un agregado grueso con muchos ángulos, que presentara un mayor número de vacíos, exigirá una mayor cantidad de arena para dar lugar a un hormigón trabajable, pero tendrá una mayor trabazón.

Inversamente, el agregado grueso bien redondeado que tiende hacia las partículas esféricas requerirá menos arena y tendrá mayor trabajabilidad, pero tendrá una menor trabazón. No obstante, resulta interesante hacer notar que los hormigones producidos con una gran disparidad en las formas de las partículas, con un contenido dado de cemento por metro cúbico de hormigón, con frecuencia tendrán más o menos la misma resistencia a la compresión.

2.1.1.2.3.3. RESISTENCIA ESTRUCTURAL.

“No se puede producir hormigón de alta resistencia que contenga agregados estructuralmente débiles”.

Para que un agregado pueda considerarse de resistencia adecuada, debe sobrepasar la resistencia propia del aglomerante (cemento).

A pesar de la aparente relación obvia entre la resistencia del hormigón y la del agregado, al menos en los casos extremos, otros factores, como la forma de la partícula, textura superficial y gradación, se conjugan contra la evaluación precisa de la contribución de la resistencia estructural del propio agregado. Por esto no se ha podido hacer predicciones de la calidad del hormigón con relación a la resistencia de los agregados. En Tabla II- 3 se muestran las resistencias a la compresión de diversas rocas.

Tabla II- 3: Resistencia A La Compresión De Rocas De Uso Común Como Agregados Del Hormigón

Tipo de roca	Nº de Muestras	Promedio (*)	Resistencia a la compresión [Kg/cm ²]	
			Después de suprimir los extremos(**)	
			Máxima	Mínima
Granito	278	1895	2622	1167
Felsita	12	3294	5364	1223
Trapeana	59	2949	3846	2053
Piedra caliza	241	1701	2454	949
Arenisca	79	1448	2447	450
Mármol	34	1505	2489	520
Cuarcita	26	2788	4310	1266
Gneis	36	1677	2397	956
Esquisto	31	1979	3030	928

Fuente: Referencia 5

Se considera que las arenas provenientes de río son las de mejores características puesto que, en su mayoría, son de cuarzo, por lo que no habría que preocuparse acerca de su resistencia y durabilidad.

Si se trata de arena proveniente de machaqueo o chancadas, se las puede considerar de buena calidad siempre y cuando provengan de una buena fuente.

La resistencia de la grava se encuentra ligada a su dureza, densidad y módulo de elasticidad. Para este propósito se realizan ensayos de resistencia al desgaste por abrasión mediante la máquina de Los Ángeles.

2.1.1.2.3.4. GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN (ASTM C127 y ASTM 128)

La Gravedad Específica: es la relación entre la densidad del agregado y la del agua (1000 kg/m³). Sin embargo, todos los agregados son porosos hasta cierto punto, lo que permite la entrada de agua en los espacios de los poros o capilares cuando se colocan en la mezcla de hormigón, o bien, ya están húmedos cuando entran al hormigón. Por lo tanto, la definición cuidadosa de la gravedad específica debe tomar en cuenta tanto el peso como el volumen de la porción de agua contenida dentro de las partículas.

La Absorción: se define como el incremento de peso de un árido poroso seco, hasta lograr su condición de saturación con la superficie seca, debido a la penetración de agua a sus poros permeables.

2.1.1.2.3.5. VACÍOS Y GRADACIÓN.

Vacíos.- La cantidad de compactación, la forma, textura superficial y la gradación del agregado influyen de manera importante sobre la cantidad de vacíos. Un agregado bien graduado es aquel que contiene cantidades apropiadas de las partículas progresivamente más finas para llenar las aberturas entre los tamaños mayores y, de este modo, reducir el contenido de vacíos. No obstante, no se ha encontrado que un agregado excelentemente graduado, como para dar lugar a un mínimo de vacíos, sea fundamental para tener un hormigón aceptable. De hecho, los agregados con curvas granulométricas discontinuas en uno o más tamaños de tamiz, se han empleado con éxito e, incluso, algunos los recomiendan.

Los vacíos en los agregados se pueden determinar a partir de la relación:

$$\% \text{ Vacíos} = \left(1 - \frac{M}{S \cdot 62.3} \right) \cdot 100 \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación II- 1}$$

Donde:

S = gravedad específica de la masa (secada al horno)

M = peso unitario del agregado, kg/cm³.

El valor de M dependerá del esfuerzo de compactación aplicado para consolidar el agregado, se calcula de la siguiente manera:

$$M = \frac{W}{V} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación II- 2}$$

Donde:

M = Peso unitario del agregado, Kg/ m³.

W = Peso del agregado, Kg.

V = Volumen del molde, m³.

El contenido de vacíos de los agregados típicos del hormigón variarán entre el 30 al 50%.

Gradación.- Después de la excavación o explotación en la mina, los agregados del hormigón casi siempre se sujetan a un proceso de tamizado para proporcionar los tamaños

adecuados para que exista una cantidad mínima de vacíos, los que serán ocupados por la pasta de cemento.

La confirmación de que los tamaños deseados se encuentran presentes en el producto se realiza por el "análisis mecánico" o prueba de tamices.

Dependiendo de la naturaleza de los agregados que se empleen, es posible que deba mantenerse un balance bastante preciso entre la relación de las fracciones de agregado fino y de agregado grueso, para lograr la movilidad, plasticidad y ausencia de segregación deseadas, todo lo cual se agrupa en el término general "trabajabilidad".

2.1.1.2.3.5.1. MÓDULO DE FINURA (M.F).

El módulo de finura, también llamado modulo granulométrico por algunos autores, no es un índice de granulometría, ya que un número infinito de tamizados da el mismo valor para el módulo de finura.

Sin embargo, da una idea del grosor o finura del agregado, por este motivo se prefiere manejar el término de Módulo de Finura.

El módulo de finura se calcula sumando los porcentajes retenidos acumulados en los tamices estándar (nombrados mas abajo) y dividiendo la suma entre 100.

Cambios significativos en la granulometría de la arena tienen una repercusión importante en la demanda de agua y, en consecuencia, en la trabajabilidad del hormigón, por lo que si hubiese una variación significativa en la granulometría de la arena deben hacerse ajustes en el aglomerante para conservar la resistencia del hormigón.

Para no tener que recalcular la dosificación del hormigón el módulo de finura del agregado fino, entre envíos sucesivos, no debe variar en más de ± 0.2 .

Los tamices especificados que deben usarse en la determinación del módulo de finura son:

No. 100, No. 50, No. 30, No. 16, No. 8, No. 4, $\frac{3}{8}$ ", $\frac{3}{4}$ ", $1\frac{1}{2}$ ", 3" y de 6"

Y el módulo de finura será determinado con la siguiente ecuación:

$$MF = \frac{\sum \%retenido_acumulado(6''+3''+1\frac{1}{2}''+\frac{3}{4}''+\frac{3}{8}''+N^{\circ}4+N^{\circ}8+N^{\circ}16+N^{\circ}30+N^{\circ}50+N^{\circ}100)}{100} \quad \dots \text{Ecuación II- 3}$$

2.1.1.2.3.5.2. CURVAS GRANULOMÉTRICAS.

Una vez tamizado el árido se grafica en papel semilogarítmico el porcentaje que pasa por cada tamiz vs. las aberturas de los tamices en mm. En general las normas establecen límites de acuerdo al tamaño nominal del agregado entre los cuales se deben encontrar las curvas granulométricas, para considerar al árido como adecuado para preparar el Hormigón.

Tabla II- 4: Requisitos De Gradación Para Los Agregados Finos Según ASTM-C33

Tamiz	Porcentaje que pasa
¾"	100
No. 4	95-100
No. 8	80-100
No. 16	50-85
No. 30	25-60
No. 50	10-30
No. 100	2-10

Fuente: Referencia 5

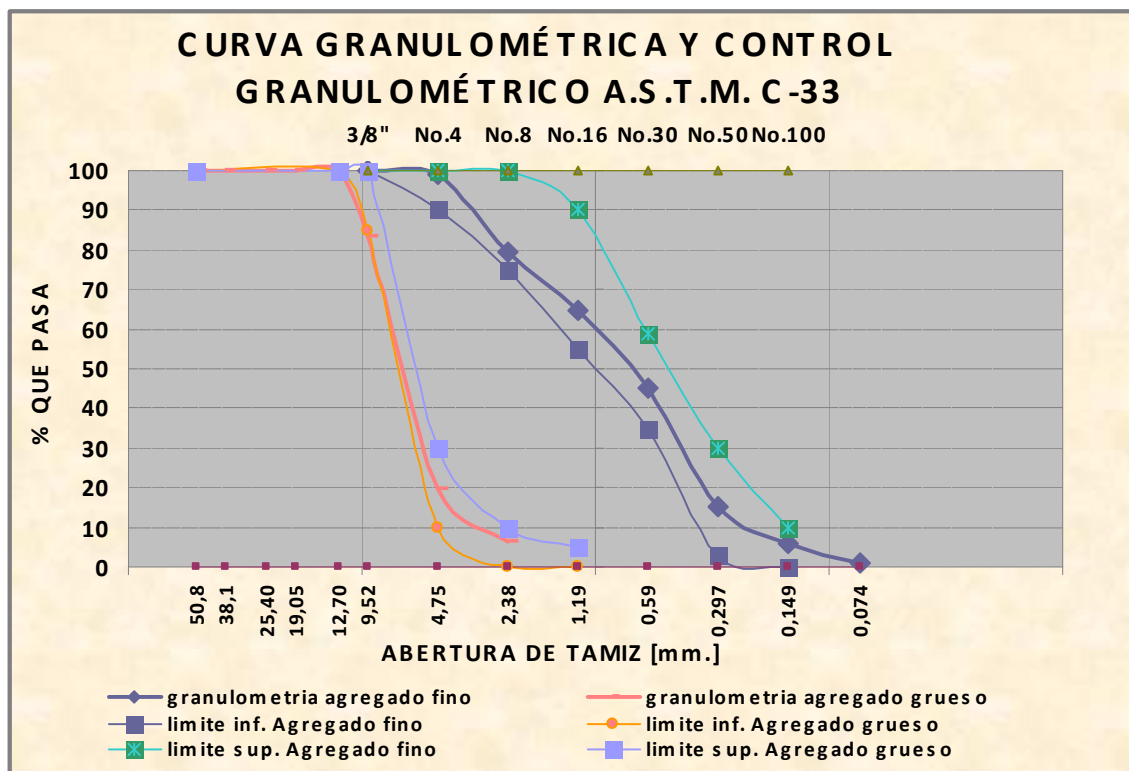
Tabla II- 5: Requisitos De Gradación Para Los Agregados Gruesos De Acuerdo Al Tamaño Nominal Según ASTM-C33

Tamaño nominal	Cantidades mas finas que cada tamiz de laboratorio (aberturas cuadradas), % en peso												
	4" 100 mm	3½" 90 mm	3" 75 mm	2½" 63 mm	2" 50 mm	1½" 37.5 mm	1" 25.0 mm	¾" 19.0 mm	½" 12.5 mm	⅜" 9.5 mm	No. 4 4.75 mm	No. 8 2.36 mm	No. 16 1.18 mm
¾" a 1½"	100	90-100	-	25-60	-	0-15	-	0-5					
2½" a 1½"	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5					
2" a No. 4	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	-	0-5		
1½" a No. 4	-	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	0-5		
1" a ¾"	-	-	-	-	-	100	90-100	40-85	10-40	0-15	0-5		
1" a No. 4	-	-	-	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5	
¾" a No. 4	-	-	-	-	-	-	100	90-100	-	20-55	0-10	0-5	
2" a 1"	-	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5				
1½" a ¾"	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5			
1 a ½"	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-10	0-5			
¾" a ¾"	-	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	0-5		
1½" a No. 4	-	-	-	-	-	-	-	100	90-100	40-70	0-15	0-5	
¾" a No. 8	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85-100	10-30	0-10	0-5

Fuente: Referencia 5

La definición de tamaño máximo se vuelve importante al seleccionar proporciones para el hormigón que resulten coherentes con los requisitos de agua para la mezcla, dimensiones del encofrado y espaciamiento entre los aceros de refuerzo.

Figura II- 1: Límites Granulométricos (Norma ASTM-C33)



Fuente: Elaboración Propia En Base A Los Datos De Los Agregados Utilizados En El Presente Proyecto

En la Figura II-1 se muestran las curvas granulométricas correspondientes a los agregados finos y gruesos utilizados en el proyecto en las que aparecen dentro de sus respectivos límites superior e inferior, según se especifican en la ASTM C33. Esas gráficas de gradaciones revelan tendencias que son difíciles de estimar a partir de datos tabulados.

2.1.1.3. DOSIFICACIÓN DE AGREGADOS.

La dosificación de agregados tiene el objeto de lograr una mezcla de agregados cuya gradación se encuentre dentro de los límites recomendados en una especificación determinada, resulta aconsejable realizar como primer paso las curvas granulométricas de todos los agregados involucrados o que se pretenden usar en la mezcla. De esta manera, es posible tener una apreciación visual de las proporciones requeridas de cada uno de los agregados. Actualmente casi todas las normas sobre agregados y hormigones establecen curvas o límites para las granulometrías de los agregados a usar en el hormigón.

Método de dosificación de agregados normado por curvas empíricas (DIN 1045).-

La norma alemana DIN 1045 tiene normadas curvas para los diferentes tamaños de partículas de agregados y según los requerimientos del concreto, como puede ser un hormigón bombeable.

Para cumplir con las condiciones de compacidad, docilidad y otras del hormigón, pueden recomendarse las zonas que se muestran en las figuras II-2, II-3, II-4 y II-5, cuyas curvas límites se indican en la tabla II-7.

Éstas son función del tamaño máximo de los agregados y coinciden fundamentalmente con la norma alemana DIN 1045-1972.

Una adecuada proporción de las arenas y gravas especificadas en las tablas 2 y 3 permite en la gran mayoría de los casos obtener áridos combinados que cumplen con estas bandas.

Las zonas tienen el siguiente significado:

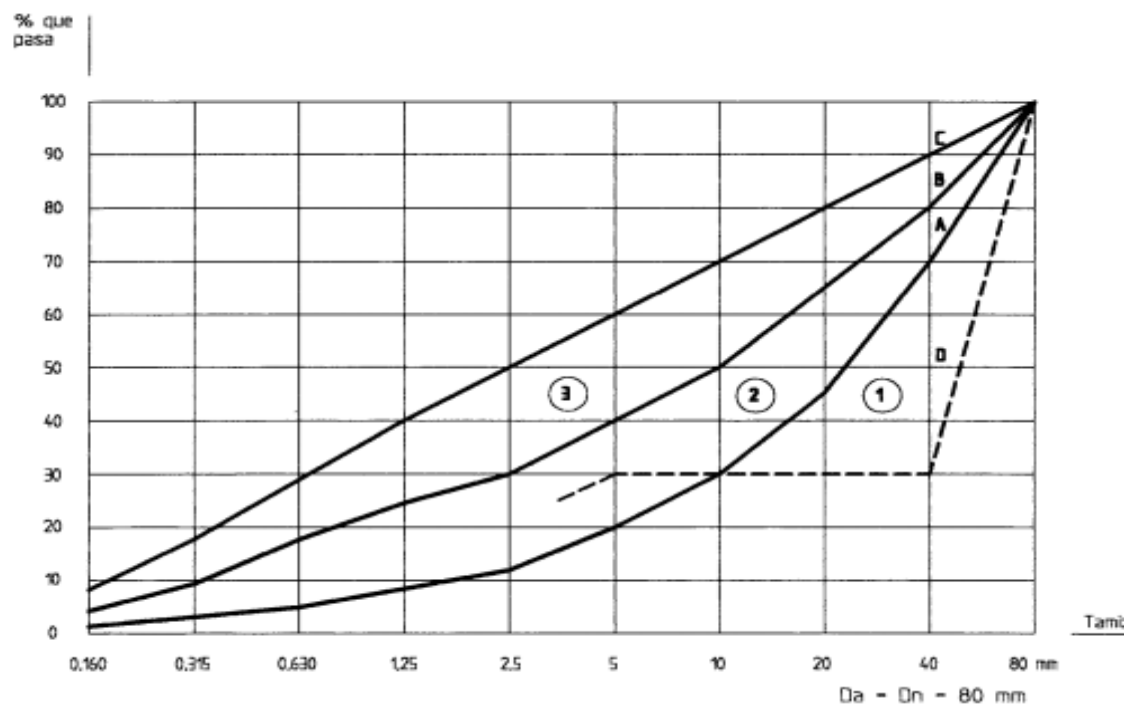
Tabla II- 6: Significado De Las Zonas De Ubicación De La curva del agregado combinado

Zona 1	<i>Acceptable</i> Para granulometrías discontinuas. Curvas límites: C y D.
Zona 2	<i>Preferida</i> Curvas límites: A y B.
Zona 3	<i>Acceptable</i> Con mayor necesidad de cemento y agua. Curvas límites: B y C.

Fuente: Referencia 8

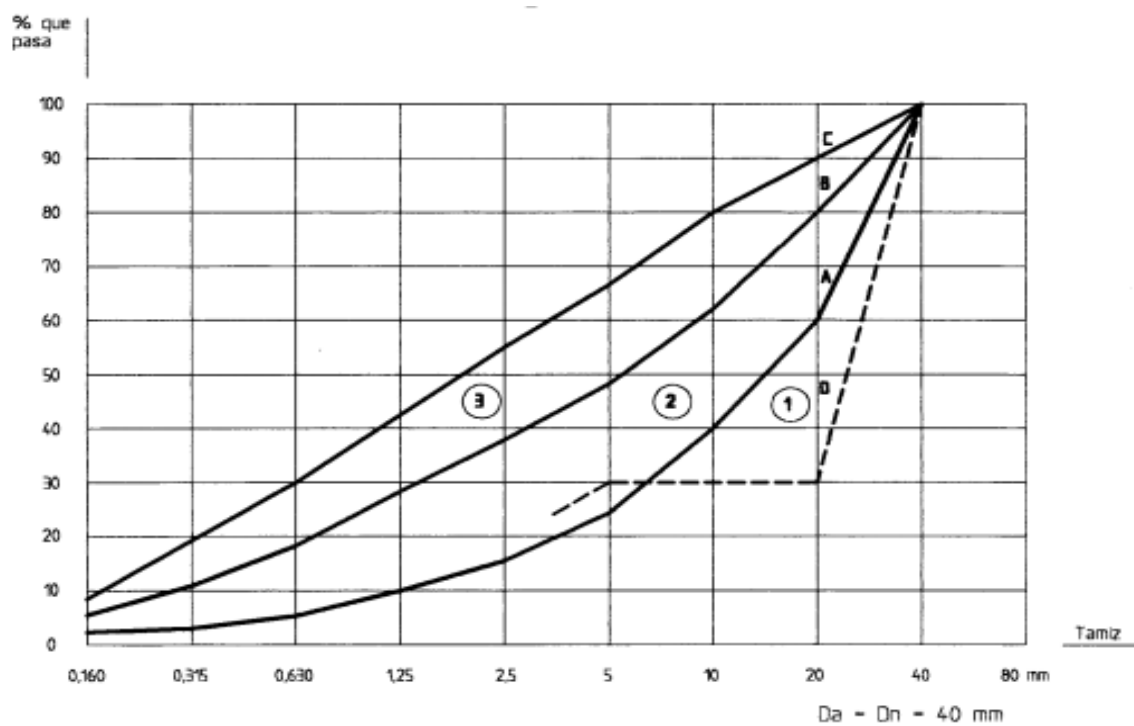
La curva del agregado combinado debe tener en lo posible una formación similar (paralela) a las curvas límites, y no debe cruzar de una zona a otra.

Figura II- 2: Granulometrías Recomendadas Para Dosificación De Agregados Para Un Tam. Max = 80mm.



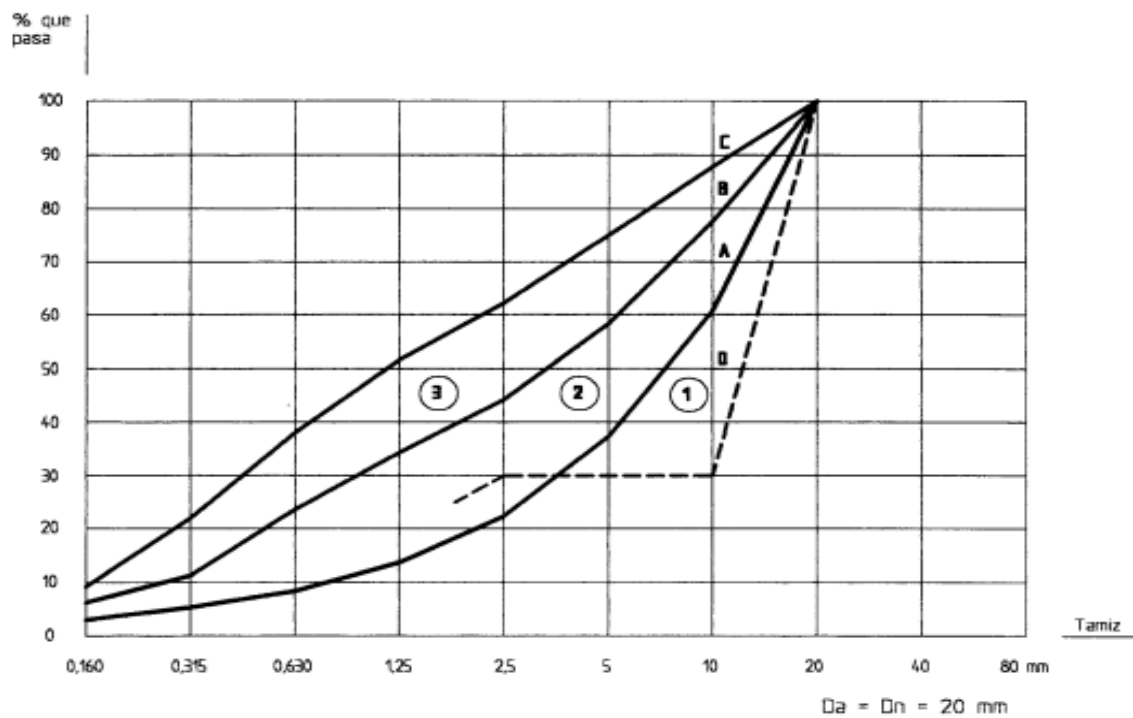
Fuente: Referencia 8

Figura II- 3: Granulometrías Recomendadas Para Dosificación De Agregados Para Un Tam. Max = 40mm.



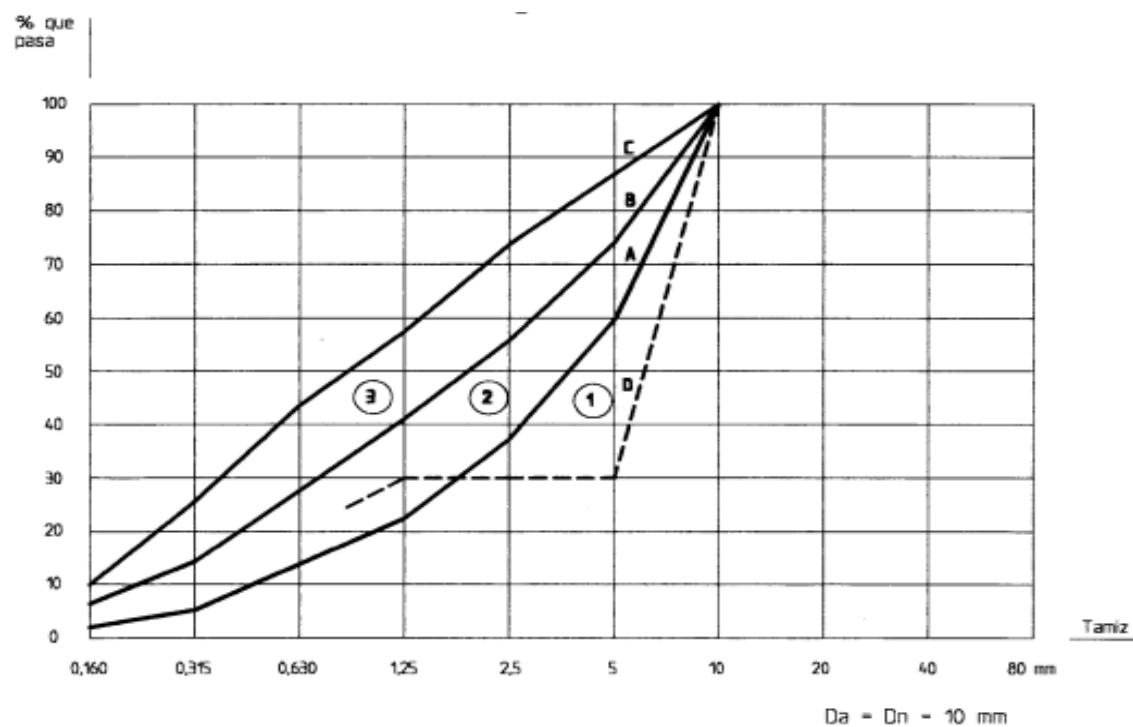
Fuente: Referencia 8

Figura II- 4: Granulometrías Recomendadas Para Dosificación De Agregados Para Un Tam. Max = 20mm.



Fuente: Referencia 8

Figura II- 5: Granulometrías Recomendadas Para Dosificación De Agregados Para Un Tam. Max = 10mm.



Fuente: Referencia 8

Tabla II- 7: Curvas Granulométricas Límites Recomendadas Por La Norma DIN 1045 Para La Dosificación De Agregados (% Acumulado Que Pasa)

CURVAS GRANULOMÉTRICAS LÍMITES RECOMENDADOS POR LA NORMA DIN 1045 PARA LA DOSIFICACIÓN DE AGREGADOS																	
Diámetro Nominal Dn= (mm)		80				40				20				10			
Curva=		A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
ABERTURA DE TAMIZ (mm)	80	100	100	100	100												
	40	70	80	90	30	100	100	100	100								
	20	45	65	80	30	60	80	90	30	100	100	100	100				
	10	30	50	70	30	40	61	80	30	62	77	88	30	100	100	100	100
	5	20	40	60	30	24	48	66	30	37	58	75	30	61	74	87	30
	2,5	12	30	50	-	15	37	55	-	22	43	63	30	37	56	73	30
	1,25	7	25	40	-	10	28	42	-	13	33	52	-	22	41	59	30
	0,63	4	17	28	-	6	19	30	-	8	23	38	-	13	27	43	-
	0,315	3	9	17	-	3	11	19	-	4	12	23	-	5	13	26	-
	0,16	2	4	7	-	2	5	8	-	3	6	9	-	3	7	10	-

Fuente: Referencia 8

2.2. EL PAVIMENTO

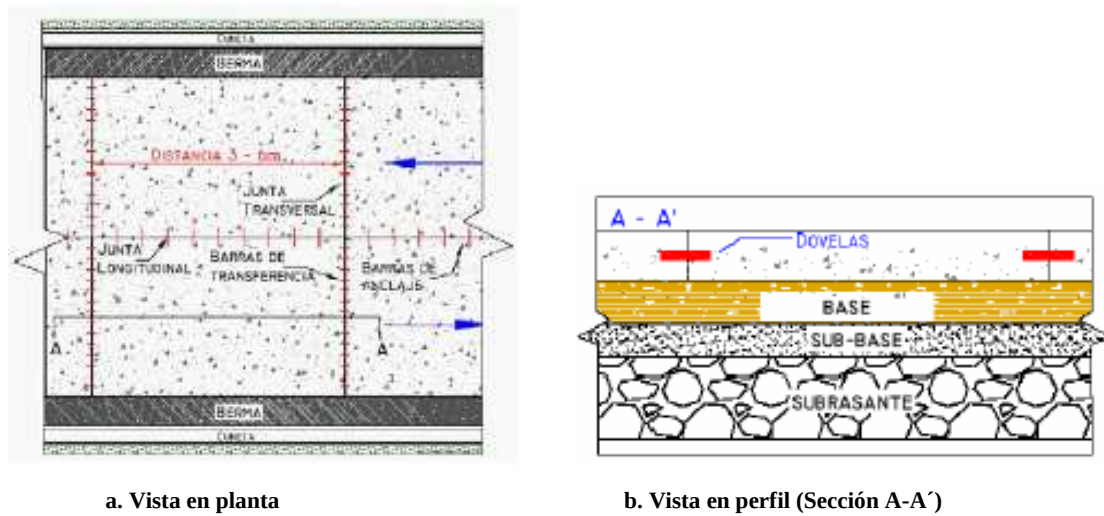
El pavimento es una estructura formada por una o más capas de materiales seleccionados y eventualmente tratados, que se colocan sobre la sub-rasante con el objetivo de proveer una superficie de rodadura adecuada y segura bajo diferentes condiciones ambientales y que soporta las solicitaciones que impone el tránsito.

2.2.1. TIPOS DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

2.2.1.1. LOSAS DE CONCRETO SIMPLE

Este sistema utiliza placas de concreto sin refuerzo. Las juntas de contracción transversal son en general construidas a intervalos entre 3 y 6 m. (Figura II-6), con el objetivo de controlar la fisuración de las losas. Dependiendo del diseño de las losas, éstas se pueden unir mediante dovelas o barras de transferencia colocadas en las juntas transversales asegurando la transferencia de carga entre éstas; además se colocan barras de anclaje en las juntas longitudinales, en dirección perpendicular al eje de la vía¹.

Figura II- 6: Losas de Concreto Simple

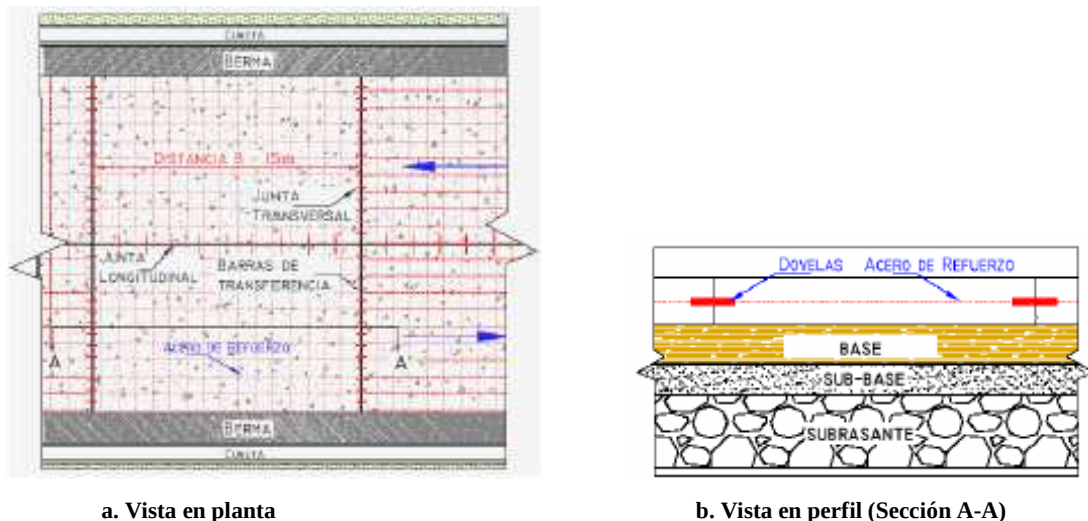


Fuente: Referencia 11

2.2.1.2. LOSAS DE CONCRETO REFORZADO

Debido a que el espaciamiento de las juntas transversales es mayor que el de las placas de concreto simple, con rangos típicos entre 7 – 15 m., este sistema utiliza juntas de contracción y adicionalmente acero de refuerzo para controlar la fisuración de las losas (Figura II-7). Las dovelas son usadas en las juntas transversales para asegurar la transferencia de cargas entre las losas.

Figura II- 7: Losas de Concreto Reforzado



Fuente: Referencia 11

2.2.1.3. PAVIMENTO CONTINUAMENTE REFORZADO

También conocido como PLV, este sistema no requiere juntas de contracción ya que su diseño guarda similitud con una losa de entrepiso (Figura II-8 y Fotografía II-1). En él, las fisuras transversales se consideran normales ya que están asociadas al acero de refuerzo de la losa de concreto, la experiencia ha mostrado que la abertura normal para estas fisuras es de aproximadamente 0,5 mm. lo que no resulta crítico en relación con la posibilidad de ingreso de agua. Los intervalos típicos de espaciamiento de estas fisuras están entre 1,10 y 2,40 m. El acero de refuerzo en estos pavimentos se encuentra en la parte superior y/o inferior. Se recomienda trabajar con barras No. 5 (5/8") y No. 6 (3/4")³.

Figura II-8: Concreto Continuamente Reforzado (Vista en Planta)

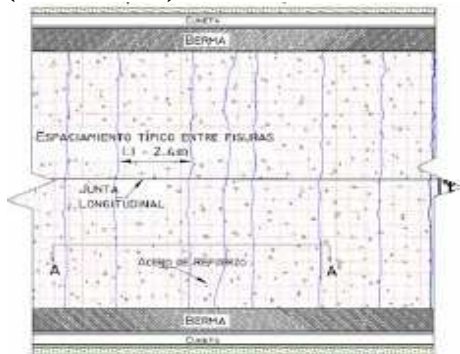


Figura II- 9: Vista típica del proceso constructivo de losas continuamente reforzadas



Fuente: Referencia 11

2.2.2. DESCRIPCIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS TIPOS DE DAÑOS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS

Lo fundamental antes de intervenir es detectar de qué tipo de agrietamiento estamos hablando. A continuación se presenta una descripción de los diferentes tipos de daños que puede presentar un pavimento rígido, los cuales fueron agrupados en cuatro categorías generales:

- Grietas
- Deterioro de las juntas
- Deterioro superficial
- Otros deterioros

Cada uno de los daños correspondientes a cada categoría se describe a continuación, presentando su definición, nivel de severidad, la forma de medición, sus posibles causas, su evolución probable y reparaciones que pueden realizarse.

Cuando en un mismo tipo de daño se advierten varios niveles de severidad es preciso reportar la más alta, es decir, si para un mismo tipo de daño en un mismo lugar se presentan deterioros con severidad baja y media, se debe reportar el daño con severidad media.

2.2.2.1. GRIETAS

Se define como grieta al quiebre o rotura que afecta al pavimento, de variados orígenes, y cuyo ancho superficial es mayor que 3 mm. Las losas de pavimento con quiebres o roturas de un ancho superficial menor a 3 mm. se denominan fisuras¹, en la Figura II-9 se muestra el ancho que define una grieta. Este grupo de deterioros incluye todas las discontinuidades y fracturas que afectan las losas de concreto.

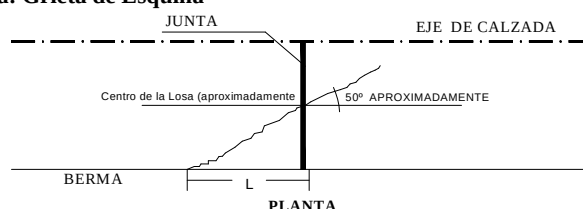
Figura II-10: Corte transversal de una losa, mostrando el ancho de una grieta,



2.2.2.1.1. Grieta de esquina/diagonal

Descripción: Grieta que origina un trozo de losa de forma triangular, al interceptar las juntas transversal y longitudinal y que forma un ángulo de aproximadamente 50 grados con la dirección del tránsito. La longitud de los lados del triángulo varía entre 300 mm. y la mitad del ancho de la losa. Figura II-10 Medidas mayores a 1.3 m. desde la esquina de la losa son consideradas fisuras diagonales.

Figura II-11: Vista en planta: Grieta de Esquina



Fuente: Referencia 11

¹Referencia N° 6

Niveles de Severidad: Se definen tres niveles de severidad (Bajo, Mediano y Alto) considerando la severidad misma de la fisura que la origina, como el estado del pavimento comprendido por la misma y los bordes de la losa, de acuerdo con la siguiente guía:

L (Bajo) El fracturamiento es definido por una fisura de severidad baja* y el área entre ésta y las juntas no se encuentra fisurado o bien hay alguna pequeña fisura.

M (Mediano) El fracturamiento es definido por una fisura de severidad moderada* y el área entre ésta y las juntas se encuentra medianamente fisurada.

H (Alto) El fracturamiento es definido por una fisura de severidad alta* y el área entre ésta y las juntas se encuentra muy fisurada o presenta hundimientos

Ver " Fisuras Longitudinales "

Medición: La losa dañada se registra como una (1) losa si:

1. Sólo tiene una grieta de esquina.
2. Contiene más de una grieta de una severidad particular.
3. Contiene dos o más grietas de severidades diferentes.

Para dos o más grietas se registrará el mayor nivel de severidad. Por ejemplo, una losa tiene una *grieta de esquina* de severidad baja y una de severidad media, deberá contabilizarse como una (1) losa con una *grieta de esquina* media.

Posibles Causas: Las principales causas de la formación de grietas de esquina son:

- Asentamiento de la base y/o la subrasante.
- Alabeo térmico.
- Sobrecarga en las esquinas.
- Repetición de cargas en combinación con falta de soporte y esfuerzos de pandeo generalmente ocasionan grietas diagonales.
- Falta de apoyo de la capa subyacente producida generalmente por fenómenos de bombeo de finos.
- Pérdida de transferencia de cargas entre losas, por mal funcionamiento de la junta producido por curvatura de pasadores.

Evolución probable: Se pueden generar o incrementar los escalonamientos y producir fracturas múltiples en las losas.

Opciones de reparación

L: No se hace nada. Sellado de grietas de más de 3 mm.

M: Sellado de grietas. Parcheo profundo.

H: Parcheo profundo.

Figura II- 12: Grieta de esquina de baja severidad.



Figura II- 13: Grieta de esquina de severidad media.



Figura II- 14: Grieta de esquina de alta severidad.

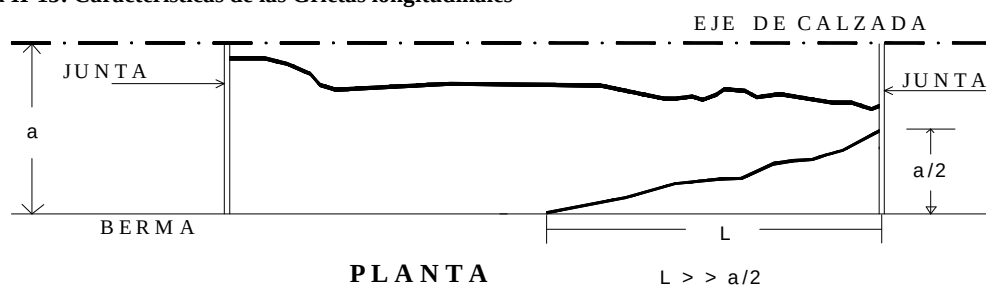


Fuente: Referencia 10

2.2.2.1.2. Agrietamiento longitudinal

Descripción: Las grietas longitudinales son roturas en dirección del tráfico vehicular paralelas al eje de la calzada, o que se extienden desde una junta transversal hasta el borde de la losa, pero la intersección se produce a una distancia (L) mucho mayor que la mitad del ancho de la losa ($a/2$). Cuando la rotura de la estructura a consecuencia de la sobrecarga o fatiga se produce en el centro de la losa principalmente se debe a la contracción por efecto de sobrecalentamiento. Sin embargo debe considerarse las condiciones existentes en la subrasante, sub-base, tipo de hormigón empleado, agregados y condiciones ambientales de la zona.

Figura II-15: Características de las Grietas longitudinales



Fuente: Referencia 11

Niveles de Severidad: Se definen tres niveles de severidad (bajo, mediano, alto) de acuerdo al ancho de la fisura, condición y estado de los bordes, según la siguiente guía:

L (Bajo) Existen algunas de las condiciones siguientes:

- Fisuras finas, no activas, de ancho promedio menor de 3 mm.
- Fisuras selladas de cualquier ancho, con el material de sello en condición satisfactoria; no hay signos visibles de despostillamiento y/o dislocamiento.

M (Mediano) Existen algunas de las condiciones siguientes:

- Fisuras activas, de ancho promedio entre 3 y 10 mm.
- Fisuras de hasta 10 mm. de ancho acompañadas de despostillamiento y dislocamiento de hasta 10 mm.
- Fisuras selladas de cualquier ancho, con material de sello en condición insatisfactoria y/o despostillamiento y/o dislocamiento menor de 10 mm.

H (Alto) Existen algunas de las condiciones siguientes:

- Fisuras de ancho mayor de 10 mm.
- Fisuras selladas o no, de cualquier ancho, con despostillamientos severos y/o dislocamiento mayor de 10 mm.

Medición: Una vez identificada la severidad de la fisura, ésta puede ser medida:

- En metros lineales, totalizando metros lineales en la sección o muestra.
- En términos de número de losas afectadas, totalizando el número de éstas que evidencien fisuras longitudinales.
- Si existen dos fisuras en una misma losa, se adopta el nivel de severidad de la fisura predominante.

Posibles Causas: Las principales causas de las grietas longitudinales son:

- Asentamiento de la base o la subrasante.
- Falta de apoyo de la losa, originado por erosión de la base.
- Alabeo térmico.
- Losa de ancho excesivo.
- Carencia de una junta longitudinal.
- Mal posicionamiento de las barras de traspaso de cargas.
- Demora en el aserrado de juntas e insuficiente profundidad en juntas.

Evolución probable: Los deterioros con mayor probabilidad de ocurrencia como consecuencia de la evolución de las grietas longitudinales, son:

- Incremento de los escalonamientos.
- Fracturas múltiples en las losas.

Opciones de reparación

L: No se hace nada. Sellado de grietas más anchas que 3.0 mm.

M: Sellado de grietas.

H: Sellado de grietas. Parcheo profundo. Reemplazo de la losa.

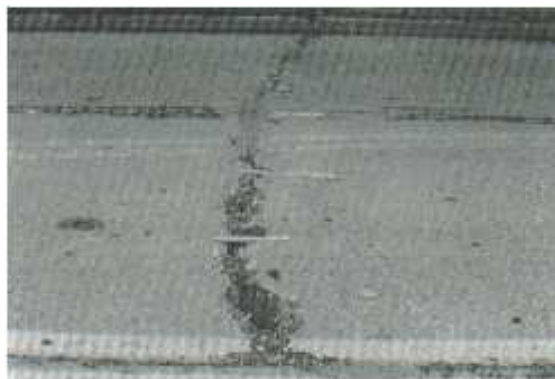
Figura II- 16: Grietas lineales de baja severidad en losa de concreto simple.



Figura II-17: Grietas lineales de severidad media en losa de concreto reforzado.



Figura II-18: Grietas lineales de alta severidad en losa de concreto simple.

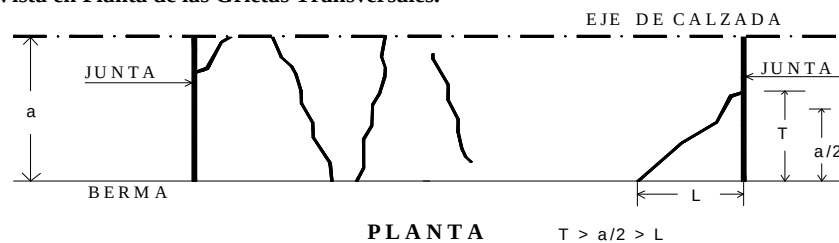


Fuente: Referencia 10

2.2.2.1.3. Agrietamiento transversal

Descripción: Grietas que se presentan perpendiculares al eje de circulación de la vía (Figura II-19 y Figura II-20). Pueden extenderse desde la junta transversal hasta la junta longitudinal, siempre que la intersección con la junta transversal esté a una distancia del borde (T) mayor que la mitad del ancho de la losa y la intersección con la junta longitudinal se encuentra a una distancia inferior que la mitad del largo de la losa (L), generalmente ocasionada por una combinación repetida de cargas de tráfico, levantamiento debido al gradiente térmico y cargas repetitivas en condiciones húmedas. Las grietas bastante finas de pocos centímetros de longitud que no se extienden por completo en la losa, se consideran como grietas de retracción.

Figura II- 19: Vista en Planta de las Grietas Transversales.



Fuente: Referencia 11

Figura II- 20: Vista típica de una Grieta Transversal.



Fuente: Referencia 11

Niveles de Severidad: El nivel de severidad se define de la misma manera que en las grietas longitudinales (Subtítulo 2.2.2.1.4.)

Medición: Se miden las losas afectadas de igual manera que para una grieta longitudinal (subtítulo 2.2.2.1.4.)

Posibles Causas: Las principales causas de las grietas transversales, son:

- Junta de contracción aserrada o formada tardíamente.
- Espesor de la losa insuficiente para soportar las solicitaciones.

- Problemas de drenaje.
- Cargas excesivas
- Longitud excesiva de losa, cuando la grieta se localiza en su tercio central.
- Demora en el proceso de sellado de la junta transversal.
- Colocación defectuosa de pasadores que impide el libre movimiento de losas.
- Falta de apoyo ocasionado por asentamientos de las capas inferiores, o formación de vacíos situados debajo de las losas por fenómenos de erosión.
- Asentamiento de la cimentación y cimentación no nivelada.
- Retracción térmica que origina alabeos.

Evolución probable: El daño con mayor probabilidad de aparición, como consecuencia de la evolución de las grietas transversales son las grietas en bloque, también puede haber escalonamiento por la entrada de agua.

Opciones de reparación

L: No se hace nada. Sellado de grietas más anchas que 3.0 mm.

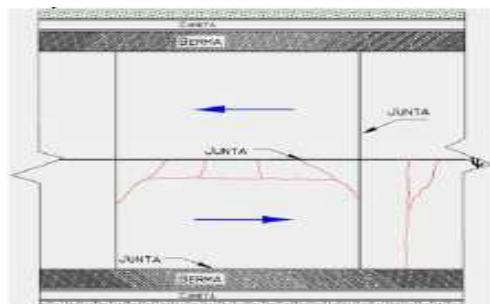
M: Sellado de grietas.

H: Sellado de grietas. Parcheo profundo. Reemplazo de la losa.

2.2.2.1.4. Losa Dividida

Descripción Aparecen por la unión de grietas longitudinales y transversales formando bloques a lo largo de la placa. Este grupo también comprende las grietas en “Y” (Figura II-21). Aunque se presenta en todos los tipos de pavimentos rígidos, es más frecuente que se presente en placas de concreto simple y en placas de concreto reforzado.

Figura II- 21: Características de las grietas en bloque



Fuente: Referencia 11

Niveles de severidad

En la tabla II- 8 se anotan los niveles de severidad para losas divididas.

Tabla II- 8: Niveles de Severidad para Losa Dividida

Severidad de la mayoría de las grietas	Número de pedazos en la losa agrietada		
	4 a 5	6 a 8	8 ó más
L	L	L	M
M	M	M	H
H	M	M	H

Fuente: Referencia 10

Ver " Fisuras Longitudinales "

Medición: Si la *losa dividida* es de severidad media o alta, no se contabiliza otro tipo de daño.

Posibles Causas: La fracturación múltiple, puede ser causada por la repetición de cargas pesadas (fatiga de concreto), el equivocado diseño estructural y las condiciones de soporte deficiente. Es la evolución final del proceso de fisuración, que comienza formando una malla más o menos cerrada; el tránsito y la continua flexión de las losas aceleran la subdivisión en bloques más pequeños, favoreciendo el desportillamiento de sus bordes. Pueden presentar diversas formas y aspectos, pero con mayor frecuencia son delimitados por una junta y una fisura.

Evolución probable: La evolución más probable de las grietas en bloque es el deterioro total de la estructura y/o hundimientos.

Opciones de reparación

L: No se hace nada. Sellado de grietas de ancho mayor de 3mm.

M: Reemplazo de la losa.

H: Reemplazo de la losa.

Figura II- 22: Losa dividida de baja severidad.



Figura II- 23: Losa dividida de severidad media.



Figura II- 24: Losa dividida de alta severidad.



Fuente: Referencia 10

2.2.2.2. DAÑOS EN JUNTAS

2.2.2.2.1. Daño del Sello de la Junta

Descripción: Es cualquier condición que permite que suelo o roca se acumule en las juntas, o que permite la infiltración de agua en forma importante. La acumulación de material incompresible impide que la losa se expanda y puede resultar en fragmentación, levantamiento o descascaramiento de los bordes de la junta. Un material llenante adecuado impide que lo anterior ocurra. Los tipos típicos del daño de junta son:

1. Desprendimiento del sellante de la junta.
2. Extrusión del sellante.
3. Crecimiento de vegetación.
4. Endurecimiento del material llenante (oxidación).
5. Pérdida de adherencia a los bordes de la losa.
6. Falta o ausencia del sellante en la junta.

Niveles de severidad: Se diferencian tres niveles de severidad (Bajo, Mediano y Alto) de acuerdo con la siguiente guía:

L (Bajo) El material de sello se encuentra en general en buena condición en toda la sección o muestra evaluada; pueden presentarse, pero sólo en cantidad reducida, algunos de los defectos arriba indicados, pero no existe riesgo de infiltración de material incompresible.

M (Mediano) El material de sello se encuentra en general en condición regular, en toda la sección o muestra; uno o más defectos de la relación arriba indicados ocurren en grado moderado; el material de sello necesita ser reemplazado en un período de dos años.

H (Alto) El material de sello se encuentra en general en condición pobre, o bien no existe; en toda la sección o muestra, uno o más defectos de la relación arriba indicada ocurren con grado de severidad alto, las juntas requieren ser selladas o reselladas a la brevedad.

Medición: Las deficiencias del material de sello no se contabilizan de losa en losa. La calificación asignada se refiere a la condición del material de sello en toda el área.

Posibles Causas: Las principales causas del deterioro de los sellos de las juntas, son:

- Pérdida de adherencia entre el sello y la placa: producto de mala calidad, sellado mal colocado, caja mal diseñada, paredes sucias en el momento de aplicar el sello.
- Extrusión del material del sello: exceso de sello, producto de mala calidad, procedimiento de colocación deficiente, incremento severo de temperatura que provoca el movimiento de las losas y el ablandamiento del material, puesta en servicio de la vía antes del fraguado del sello.
- Incrustación de material incompresible: ocasionada por la cercanía de bermas no pavimentadas o la caída de materiales de vehículos que transitan por la vía.
- Crecimiento de la vegetación: humedad en la junta.
- Dimensiones incorrectas del ancho de la junta.
- Exudación del producto de sellado por altas temperaturas y expulsión al paso de vehículos.

Evolución probable: El deterioro más probable de ocurrir debido a la evolución de la falla de sello es el desportillamiento y el bombeo.

Opciones de reparación

L: No se hace nada.

M: Resellado de juntas.

H: Resellado de juntas.

Figura II- 25: Daño del sello de junta de baja severidad.



Figura II- 26: Daño del sello de junta de severidad media.



Figura II- 27: Daño del sello de junta de alta severidad.



Fuente: Referencia 10

2.2.2.3. DETERIOROS SUPERFICIALES

2.2.2.3.1. Descascaramiento de Juntas

Descripción: Rotura, fracturación o desintegración de los bordes de las losas dentro de los 0.60 metros de una junta o una esquina y generalmente no se extiende más allá de esa distancia. Además no se extiende verticalmente a través de la losa sino que intersectan la junta en ángulo

Niveles de Severidad: En la tabla II- 9 se ilustran los niveles de severidad para *descascaramiento de junta*. Una junta desgastada, en la cual el concreto ha sido desgastado a lo largo de toda la junta se califica como de baja severidad.

Tabla II- 9: Niveles de Severidad Descascaramiento de Junta

Fragmentos del Descascaramiento	Ancho del descascaramiento	Longitud del descascaramiento	
		< 0.6m	> 0.6 m
Duros. No puede removerse fácilmente (pueden faltar algunos pocos fragmentos).	< 102 mm	L	L
	> 102 mm	L	L
Suelos. Pueden removerse y algunos fragmentos pueden faltar. Si la mayoría o todos los fragmentos faltan, el descascaramiento es superficial, menos de 25.0 mm.	< 102 mm	L	M
	> 102 mm	L	M
Desaparecidos. La mayoría, o todos los fragmentos han sido removidos.	< 102 mm	L	M
	> 102 mm	M	H

Fuente: Referencia 10

Medición: Si el *descascaramiento* se presenta a lo largo del borde de una losa, ésta se cuenta como una losa con *descascaramiento de junta*. Si está sobre más de un borde de la misma losa, el borde que tenga la mayor severidad se cuenta y se registra como una losa. El *descascaramiento de junta* también puede ocurrir a lo largo de los bordes de dos losas adyacentes. Si éste es el caso, cada losa se contabiliza con *descascaramiento de junta*.

Posibles Causas: Las principales causas del desportillamiento de las juntas, son:

- Debilitamiento de los bordes de la junta debido a defectos constructivos.
- Desintegración del concreto, por mala calidad del material.
- Presencia de material incompresible en la junta, el cual al expandirse genera concentración de esfuerzos y la posterior falla ante el paso de vehículos.
- Mal procedimiento de corte de la junta.
- Aplicación de cargas antes de conseguir la resistencia mínima recomendada del concreto.

Evolución probable: La evolución más probable del desportillamiento de las juntas es la entrada de agua a la base generando bombeo.

Opciones para Reparación:

L: No se hace nada.

M: Parcheo parcial.

H: Parcheo parcial. Reconstrucción de la junta.

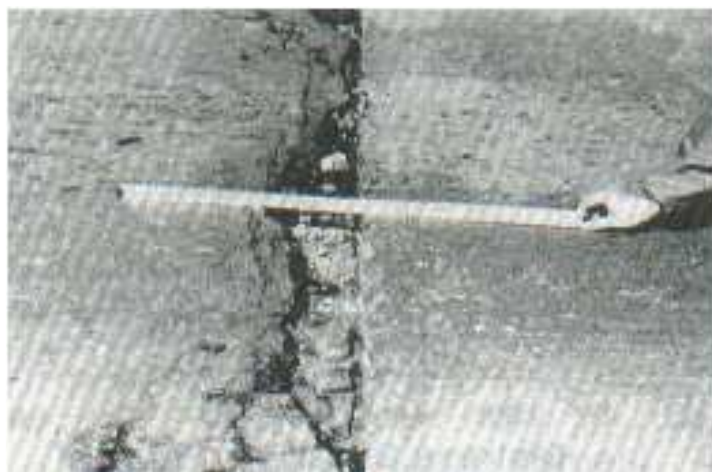
Figura II- 28: Descascaramiento de junta de baja severidad.



Figura II- 29: Descascaramiento de junta de severidad media.



Figura II- 30: Descascaramiento de junta de alta severidad.



Fuente: Referencia 10

2.2.2.3.2. Desconchamiento, Mapa de Grietas, Craquelado

Descripción: El *mapa de grietas o craquelado (crazing)* se refiere a una red de grietas superficiales, finas o capilares, que se extienden únicamente en la parte superior de la superficie del concreto. Las *grietas* tienden a interceptarse en ángulos de 120 grados. Generalmente, este daño ocurre por exceso de manipulación en el terminado y puede producir el *descamado*, que es la rotura de la superficie de la losa a una profundidad aproximada de 6.0 mm a 13.0 mm. El *descamado* también puede ser causado por incorrecta construcción y por agregados de mala calidad.

Niveles de severidad: Se diferencian tres niveles de severidad (Bajo, Mediano y Alto) según el tipo de daño y el área de la losa afectada, de acuerdo con la siguiente guía:

L (Bajo) Fisuras capilares se extienden sobre toda la losa; la superficie se encuentra en buena condición sin descascaramiento.

M (Mediano) La losa evidencia descascaramiento, pero estas son de reducida área, afectando menos del 10% de la losa.

H (Alto) La losa evidencia descascaramiento en áreas significativas, afectando más del 10% de la losa.

Medición: Una losa *descamada* se contabiliza como una losa. El *craquelado* de baja severidad debe contabilizarse únicamente si el *descamado* potencial es inminente, o unas pocas piezas pequeñas se han salido.

Posibles Causas: Los descascaramientos generalmente son consecuencia de un exceso de acabado del concreto fresco colocado, produciendo la exudación del mortero y agua, dando lugar a que la superficie del concreto resulte muy débil frente a la retracción.

Las fisuras capilares pueden evolucionar en muchos casos por efecto del tránsito, dando origen al descascaramiento de la superficie, posibilitando un levantamiento de material superficial que progresa tanto en profundidad como en área. También pueden observarse manifestaciones de descascaramiento en pavimentos con refuerzo, cuando las armaduras se colocan muy próximas a la superficie.

Evolución probable: El descascaramiento puede incrementar su grado de severidad hasta generar desintegración.

Opciones para Reparación

L: No se hace nada.

M: No se hace nada. Reemplazo de la losa.

H: Parcheo profundo o parcial. Reemplazo de la losa. Sobrecarpeta.

Figura II- 31: Desconchamiento / Mapa de grietas / Craquelado de baja severidad.



Figura II- 32: Desconchamiento / Mapa de grietas / Craquelado de severidad media.



Figura II- 33: Desconchamiento / Mapa de grietas / Craquelado de alta severidad.



Fuente: Referencia 10

2.2.2.3.3. Descascaramiento de esquina.

Descripción: Es la rotura de la losa a 0.6 m. de la esquina aproximadamente. Un *descascaramiento de esquina* difiere de la *grieta de esquina* en que el descascaramiento usualmente buza hacia abajo para interceptar la junta, mientras que la grieta se extiende verticalmente a través de la esquina de losa. Un *descascaramiento* menor que 127 mm. medidos en ambos lados desde la grieta hasta la esquina no deberá registrarse.

Niveles de severidad: En la tabla II-10 se listan los niveles de severidad para el *descascaramiento de esquina*. El *descascaramiento de esquina* con un área menor que 6452 mm² desde la grieta hasta la esquina en ambos lados no deberá contarse.

Tabla II- 10: Niveles de Severidad para Descascaramiento de Esquina.

Profundidad del Descascaramiento	Dimensiones de los lados del descascaramiento	
	127.0 x 127.0 mm a 305.0 x 305.0 mm	Mayor que 305.0 x 305.0 mm
Menor de 25.0 mm	L	L
> 25.0 mm a 51.0 mm	L	M
Mayor de 51.0 mm	M	H

Fuente: Referencia 10

Medición: Si en una losa hay una o más grietas con descascaramiento con el mismo nivel de severidad, la losa se registra como una losa con descascaramiento de esquina. Si ocurre más de un nivel de severidad, se cuenta como una losa con le mayor nivel de severidad.

Opciones de reparación:

L: No se hace nada.

M: Parcheo parcial.

H: Parcheo parcial.

Figura II- 34: Descascaramiento de esquina de baja severidad.



Figura II- 35: Descascaramiento de esquina de severidad media.



Figura II- 36: Descascaramiento de esquina de alta severidad.



Fuente: Referencia 10

2.2.2.3.4. Popouts

Descripción: Un *popout* es un pequeño pedazo de pavimento que se desprende de la superficie del mismo. Puede deberse a partículas blandas o fragmentos de madera rotos y desgastados por el tránsito.

Varían en tamaño con diámetros entre 25.0 mm. y 102.0 mm. y en espesor de 13.0 mm. a 51.0 mm.

Niveles de severidad: No se definen grados de severidad. Sin embargo, el *popout* debe ser extenso antes que se registre como un daño. La densidad promedio debe exceder aproximadamente tres por metro cuadrado en toda el área de la losa.

Medición: Debe medirse la densidad del daño. Si existe alguna duda de que el promedio es mayor que tres *popout* por metro cuadrado, deben revisarse al menos tres áreas de un metro cuadrado elegidas al azar.

Cuando el promedio es mayor que dicha densidad, debe contabilizarse la losa.

Posibles Causas: Es causado por el efecto abrasivo del tránsito sobre concretos de calidad pobre, ya sea por el empleo de dosificaciones inadecuadas (bajo contenido de cemento, exceso de agua, agregados de inapropiada granulometría), o bien por deficiencias durante su ejecución (segregación de la mezcla, insuficiente densificación, curado defectuoso), otras posibles causas:

- Material inapropiado en el interior del hormigón tal como terrones de arcilla ó cal viva.
- Mortero poco homogéneo.
- Deficiente calidad de los materiales.
- Agregados expansivos o de baja durabilidad.
- Reparaciones hechas sin seguir recomendaciones técnicas.

Evolución probable: La desintegración de la superficie del pavimento puede incrementar su grado de severidad hasta generar baches.

Opciones de reparación: L, M y H: No se hace nada.

Figura II- 37: Popout.



Fuente: Referencia 10

2.2.2.3.5. Pulimento de agregados

Descripción: La falla se da cuando los agregados en la superficie se vuelven suaves al tacto, se reduce considerablemente la adherencia con las llantas. Cuando la porción del agregado que se extiende sobre la superficie es pequeña, la textura del pavimento no contribuye significativamente a reducir la velocidad del vehículo. Este tipo de daño se reporta cuando el resultado de un ensayo de resistencia al deslizamiento es bajo o ha disminuido significativamente respecto a evaluaciones previas.

Niveles de Severidad: No se definen grados de severidad. Sin embargo, el grado de pulimento deberá ser significativo antes de incluirlo en un inventario de la condición y calificarlo como un defecto.

Medición: Una losa con agregado pulido se cuenta como una losa.

Posibles Causas: Esta deficiencia es causada principalmente por el tránsito, que produce el desgaste superficial de los agregados, especialmente cuando la mezcla de concreto y/o agregados es de calidad deficiente y favorece la exposición de los mismos. La reducción de la fricción o resistencia al deslizamiento, puede alcanzar niveles de riesgo para la seguridad del tránsito. El pulimento de los agregados puede ser considerado cuando un examen visual revela que la rugosidad sobre la superficie es muy reducida y se presenta una superficie suave al tacto.

Evolución probable: El pulimento de la superficie del pavimento puede generar cabezas duras.

Opciones de reparación: L, M y H: Ranurado de la superficie. Sobrecarpeta.

Figura II- 38: Pulimento de agregados.



Fuente: Referencia 10

2.2.2.3.6. Escala

Descripción: *Escala* es la diferencia de nivel a través de la junta.

Niveles de Severidad: Se definen por la diferencia de niveles a través de la grieta o junta como se indica en la tabla II-11

Tabla II- 11: Niveles de Severidad para Escala.

Nivel de severidad	Diferencia en elevación
L	3 a 10 mm
M	10 a 19 mm
H	Mayor que 19 mm

Fuente: Referencia 10

Medición: La *escala* a través de una junta se cuenta como una losa. Se cuentan únicamente las losas afectadas.

Las *escalas* a través de una grieta no se cuentan como daño pero se consideran para definir la severidad de las grietas.

Posibles Causas: Las principales causas del escalonamiento entre losas, son:

- Deficiencia en el traspaso de cargas entre las losas o trozos de losas.
- Erosión de la base en las inmediaciones de la junta o grieta.
- Asentamiento diferencial de la subbase ó subrasante.
- Falta de capacidad de soporte de la subrasante.
- Bombeo o erosión de material debajo de la losa.
- Pandeo en bordes de losas debido a cambios de temperatura y humedad.

Evolución probable: El escalonamiento de las juntas puede ocasionar fractura de la losa, si éste se combina con bombeo que implica pérdida del material de base.

Opciones de reparación

L: No se hace nada. Fresado.

M: Fresado.

H: Fresado.

Figura II- 39: Escala de baja severidad.



Figura II- 40: Escala de severidad media.



Figura II- 41: Escala de alta severidad.



Fuente: Referencia 10

2.2.2.3.7. Blowup – Buckling

Descripción: Los blowups o buckles ocurren en tiempo cálido, usualmente en una grieta o junta transversal que no es lo suficientemente amplia para permitir la expansión de la losa. Por lo general, el ancho insuficiente se debe a la infiltración de materiales incompresibles en el espacio de la junta. Cuando la expansión no puede disipar suficiente presión, ocurrirá un movimiento hacia arriba de los bordes de la losa (Buckling) o fragmentación en la vecindad de la junta. También pueden ocurrir en los sumideros y en los bordes de las zanjas realizadas para la instalación de servicios públicos.

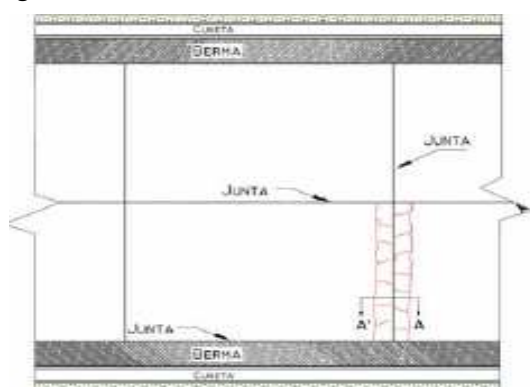
Niveles de Severidad: Según la incidencia en la comodidad de manejo, se diferencian tres niveles de severidad (Bajo, Mediano y Alto) de acuerdo con la siguiente guía:

L (Bajo) Baja incidencia en la comodidad de manejo, apenas perceptible a velocidad de operación promedio.

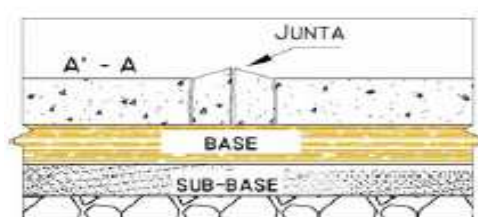
M (Mediano) Moderada incidencia en la comodidad de manejo, genera incomodidad y obliga a disminuir velocidad de circulación.

H (Alto) El levantamiento causa un excesivo salto del vehículo, generando la pérdida de control del mismo, una sustancial incomodidad, y/o riesgo para la seguridad y/o daños al vehículo, siendo necesario reducir drásticamente la velocidad.

Figura II- 42: Levantamiento Localizado



a. Vista en planta. Levantamiento Junta Transversal.



b. Vista en perfil: Detalle del Levantamiento

Fuente: Referencia 11

Medición: En una grieta, un *blowup* se cuenta como presente en una losa. Sin embargo, si ocurre en una junta y afecta a dos losas se cuenta en ambas. Cuando la severidad del *blowup* deja el pavimento inutilizable, éste debe repararse de inmediato.

Posibles Causas: Son causadas por falta de libertad de movimiento de las losas de concreto. La restricción a la expansión de las losas puede originar fuerzas de compresión considerables sobre el plano de la junta. Cuando estas fuerzas no son completamente perpendiculares al plano de la junta o son excéntricas a la sección de la misma, pueden ocasionar el levantamiento de las losas contiguas a las juntas, acompañados generalmente por la rotura de estas losas. Otras causas pueden ser mala colocación de barras de transferencia, presencia de un estrato de suelos expansivos a poca profundidad, variaciones térmicas cuando la longitud de las losas es excesiva y no cuenta con juntas de expansión o presentarse por la evolución de desportillamientos.

Evolución probable El levantamiento localizado puede ocasionar grietas en bloque. Este daño también puede llegar a afectar la junta (producir pérdidas de sello, desprendimiento, etc.)

Opciones de Reparación:

L: No se hace nada. Parcheo profundo o parcial.

M: Parcheo profundo. Reemplazo de la losa.

H: Parcheo profundo. Reemplazo de la losa.

Figura II- 43: Blowup / Buckling de baja severidad.



Figura II- 44: Blowup / Buckling de baja severidad.



Figura II- 45: Blowup / Buckling de baja severidad.



Fuente: Referencia 10

2.2.2.3.8. Parche grande (mayor de 0.45 m²) y acometidas de servicios públicos.

Descripción: Un *parche* es un área donde el pavimento original ha sido removido y reemplazado por material nuevo. Una *excavación de servicios públicos* (utility cut) es un *parche* que ha reemplazado el pavimento original para permitir la instalación o mantenimiento de instalaciones subterráneas. Los niveles de severidad de una *excavación de servicios* son los mismos que para el parche regular.

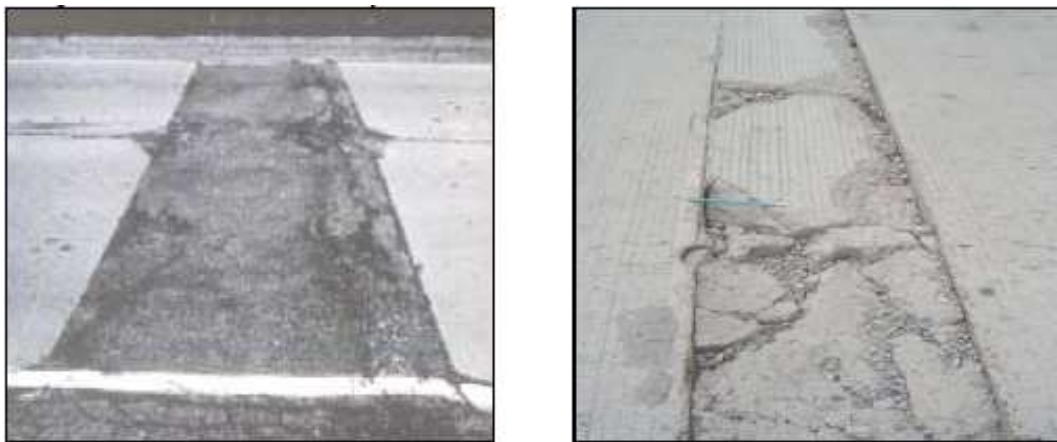
Niveles de severidad:

L (Bajo): El parche está funcionando bien, con poco o ningún daño.

M (Medio): El parche está moderadamente deteriorado o moderadamente descascarado en sus bordes. El material del parche puede ser retirado con esfuerzo considerable.

H (Alto): El parche está muy dañado. El estado de deterioro exige reemplazo.

Figura II- 46: Parches en asfalto y concreto.



Fuente: Referencia 11

Medición: Si una losa tiene uno o más parches con el mismo nivel de severidad, se cuenta como una losa que tiene ese daño. Si una sola losa tiene más de un nivel de severidad, se cuenta como una losa con el mayor nivel de severidad. Si la causa del parche es más severa, únicamente el daño original se cuenta.

Posibles Causas: Algunas de las posibles causas de los daños en parches, son:

- En parches asfálticos, la capacidad estructural del parche es insuficiente o se practicó un deficiente proceso constructivo.
- En parches de concreto de pequeñas dimensiones, la retracción por fraguado puede separar el parche del concreto antiguo, si no se utiliza un epóxico como material de adhesión.
- En el caso de parches de concreto, si hubo reemplazo de por lo menos la mitad de una losa de concreto, el traspaso de carga entre el parche y la losa es insuficiente por falta de dovelas o barras de amarre y/o por defectos en el proceso constructivo.

Evolución probable: El deterioro de los parches en concreto o asfalto, puede conducir a daño total del parche y de las zonas aledañas al mismo.

Opciones para Reparación:

L: No se hace nada.

M: Sellado de grietas. Reemplazo del parche.

H: Reemplazo del parche.

Figura II- 47: Parche grande y acometidas de servicios públicos de baja severidad.



Figura II- 48: Parche grande y acometida de servicios públicos de severidad media.



Figura II- 49: Parche grande y acometidas de servicios públicos de alta severidad.



Fuente: Referencia 10

2.2.2.3.9. Parche pequeño (menor de 0.45 m²).

Descripción: Es un área donde el pavimento original ha sido removido y reemplazado por un material de relleno.

Niveles de Severidad:

L (Bajo): El *parche* está funcionando bien, con poco o ningún daño.

M (Medio): El *parche* está moderadamente deteriorado. El material del *parche* puede ser retirado con considerable esfuerzo.

H (Alto): El *parche* está muy deteriorado. La extensión del daño exige reemplazo.

Medición: Si una losa presenta uno o más parches con el mismo nivel de severidad, se registra como una losa que tiene ese daño. Si una sola losa tiene más de un nivel de severidad, se registra como una losa con el mayor nivel de daño. Si la causa del parche es más severa, únicamente se contabiliza el daño original.

Opciones para Reparación:

L: No se hace nada.

M: No se hace nada. Reemplazo del parche.

H: Reemplazo del parche.

Figura II- 50: Parche pequeño de baja severidad.



Figura II- 51: Parche pequeño de severidad media.



Figura II- 52: Parche pequeño de alta severidad.



Fuente: Referencia 10

2.2.2.4. OTROS TIPOS DE DETERIOROS

2.2.2.4.1. Grietas de retracción

Descripción: Son *grietas capilares* usualmente de unos pocos pies de longitud y no se extienden a lo largo de toda la losa. Se forman durante el fraguado y curado del concreto y generalmente no se extienden a través del espesor de la losa.

Figura II- 53: Fisuración por retracción típica con nivel de severidad bajo.



Fuente: Referencia 11

Niveles de Severidad: No se definen niveles de severidad. Basta con indicar que están presentes.

Medición: Si una o más *grietas de retracción* existen en una losa en particular, se cuenta como una losa con *grietas de retracción*.

Posibles Causas: Se debe principalmente a:

- Curado inapropiado del concreto.
- Exceso de amasado superficial y/o adición de agua durante el alisado de la superficie.
- Malla de refuerzo muy cerca a la superficie.
- Acción del clima o de productos químicos.

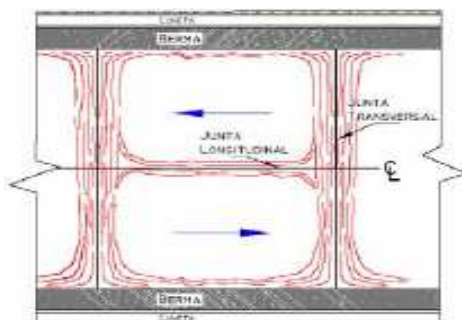
Evolución probable: La evolución más probable de las fisuras por retracción, es el descascaramiento.

Opciones de reparación: L, M y H: No se hace nada.

2.2.2.4.2. Grieta de durabilidad

Descripción: También denominadas grietas en un cuarto de luna generalmente aparecen como un patrón de grietas en la superficie del pavimento que se generan paralelamente y próximas a juntas o grietas longitudinales, transversales y diagonales; se inician en las esquinas de las losas. Estas grietas suelen curvarse en la intersección de las juntas longitudinales y transversales, presentan una coloración oscura. Este tipo de daño puede llevar a la destrucción eventual de la totalidad de la losa.

Figura II- 53: Fisuración por Durabilidad



Fuente: Referencia 11

La presencia de grietas por durabilidad en “D” disminuye la resistencia del hormigón en juntas y grietas; induciendo el astillamiento en juntas longitudinales y transversales.

Niveles de severidad:

L (Baja): Las grietas “D” cubren menos del 15% del área de la losa. La mayoría de las grietas están cerradas, pero unas pocas piezas pueden haberse desprendido.

M (Media): Existe una de las siguientes condiciones:

1. Las grietas “D” cubren menos del 15% del área de la losa y la mayoría de los pedazos se han desprendido o pueden removerse con facilidad.
2. Las grietas “D” cubren más del 15% del área. La mayoría de las grietas están cerradas, pero unos pocos pedazos se han desprendido o pueden removerse fácilmente.

H (Alta): Las grietas “D” cubren más del 15% del área y la mayoría de los pedazos se han desprendido o pueden removerse fácilmente.

Medición: Cuando el daño se localiza y se califica en una severidad, se cuenta como una losa. Si existe más de un nivel de severidad, la losa se cuenta como poseedora del nivel de daño más alto. Por ejemplo, si *grietas “D”* de baja y media severidad están en la misma losa, la losa se registra como de severidad media únicamente.

Posibles Causas: Las fisuras por durabilidad aparecen en el concreto, debido a:

- Ambientes alcalinos.
- Reactividad álcali-sílice cuando los agregados son expuestos a cambios de temperatura.
- Humedecimiento excesivo en el borde del pavimento sumado a exceso de cargas.

Evolución probable: La evolución más probable de las fisuras por durabilidad es el descascaramiento de la superficie de las losas de concreto.

Opciones de reparación

L: No se hace nada.

M: Parcheo profundo. Reconstrucción de juntas.

H: Parcheo profundo. Reconstrucción de juntas. Reemplazo de la losa.

Figura II- 54: Grieta de durabilidad de baja severidad.



Figura II- 55: Grieta de durabilidad de severidad media.



Figura II- 56: Grieta de durabilidad de alta severidad.



Fuente: Referencia 10

2.2.2.4.3. Bombeo (Pumping) Surgencia de finos

Descripción: El *bombeo* es la expulsión de material de la fundación de la losa a través de las juntas o grietas. Esto se origina por la deflexión de la losa debida a las cargas. Cuando una carga pasa sobre la junta entre las losas, el agua es primero forzada bajo losa delantera y luego hacia atrás bajo la losa trasera. Esta acción erosiona y eventualmente remueve las partículas de suelo lo cual generan una perdida progresiva del soporte del pavimento. El *bombeo* puede identificarse por manchas en la superficie y la evidencia de material de base o subrasante en el pavimento cerca de las juntas o grietas.

Niveles de Severidad: No se definen grados de severidad. Es suficiente indicar la existencia.

Medición: El *bombeo* de una junta entre dos losas se contabiliza como dos losas. Sin embargo, si las juntas restantes alrededor de la losa tienen bombeo, se agrega una losa por junta adicional con *bombeo*.

Posibles Causas: Las principales causas generadoras de los procesos de bombeo, son:

- Presencia de agua superficial que penetra entre la base y la losa de concreto.
- Material erodable en la base.
- Tráfico de vehículos pesados frecuente.
- Transmisión inadecuada de cargas entre losas.
- Sub-rasante compuesta por material arcilloso.
- Presencia de agua en la interfase losa- superficie de apoyo.
- Infiltración de agua por grietas y juntas carentes de material de sello.
- Falta de confinamiento lateral o bermas pavimentadas.

Evolución probable: La evolución más probable del bombeo es: escalonamiento, grietas longitudinales, transversales, de esquina y/o en bloque.

Opciones de reparación: L, M y H: Sellado de juntas y grietas. Restauración de la transferencia de cargas.

Figura II- 57: Bombeo.



Fuente: Referencia 10

2.2.2.4.4. Punzonamiento.

Descripción: Este daño es un área localizada de la losa que está rota en pedazos. Puede tomar muchas formas y figuras diferentes pero, usualmente, está definido por una *grieta* y una *junta* o dos *grietas* muy próximas, usualmente con 1.52 m entre sí. Este daño se origina por la repetición de cargas pesadas, el espesor inadecuado de la losa, la pérdida de soporte de la fundación o una deficiencia localizada de construcción del concreto (por ejemplo, hormigueros)

Niveles de Severidad: Los niveles de severidad se presentan en la siguiente tabla.

Tabla II- 12: Niveles de Severidad para Punzonamiento

Severidad de la mayoría de las grietas	Número de pedazos		
	2 a 3	4 a 5	Más de 5
L	L	L	M
M	L	M	H
H	M	H	H

Fuente: Referencia 10

Medición: Si la losa tiene uno o más punzonamientos, se contabiliza como si tuviera uno en el mayor nivel de severidad que se presente.

Opciones de reparación:

L: No se hace nada. Sellado de grietas.

M: Parcheo profundo.

H: Parcheo profundo.

Figura II- 58: Punzonamiento de baja severidad.



Figura II- 59: Punzonamiento de severidad media.



Figura II- 60: Punzonamiento de alta severidad.



Fuente: Referencia 10

2.2.3. MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS.

El sellado de agrietamientos en pavimentos de hormigón es una de las formas más utilizadas para el mantenimiento de vías, que como resultado restringe la penetración del agua superficial a las capas subyacentes de la base y sub-base, permitiendo mantener la capacidad óptima del pavimento y evitando la degradación del mismo.

Ahora si hay que hacer una diferencia entre sellar una agrietamiento o llenar un agrietamiento.

Del mismo modo una correcta configuración y aplicación del sello en una junta o grieta prolonga la vida útil del pavimento nos garantiza el sellado del mismo.

El deterioro de los pavimentos se debe a factores ambientales y al tránsito vehicular, la calidad de las mezclas y la correcta conformación de las bases y sub bases que empeoran su estado y calidad.

2.2.3.1. RELACION COSTO BENEFICIO Y AUMENTO DE LA VIDA UTIL

El estado de los pavimentos se evalúan por índice de condición del pavimento que van de 100 a 0 (de excelente a malo) determinando su vida útil, un pavimento en el cual se halla aplicado un sellado de agrietamiento efectivo prolonga su vida útil en 5 años a un costo muy bajo (relación Costo-Beneficio), como observamos en el grafico sobre la vida útil del pavimento el sellado de agrietamiento aumenta considerablemente la durabilidad de nuestras carpetas (Figura II-61).

Debemos buscar las estrategias de rehabilitación que optimizan los objetivos y los fondos de que dispongo para el mantenimiento, mientras antes realice el mantenimiento menor serán los costos y mayor su vida útil de los mismos (Tabla II-13)

Como se verifica en la realidad el primer deterioro que se produce es en la pérdida de finos y la aparición de grietas y fisuras, que con el paso del tiempo producen baches y hundimientos en las carpetas, provocando un costo mucho mayor en la reparación, lo más conveniente para que esto no se produzca, es sellar los agrietamientos antes de un año de producida su aparición para evitar la penetración del agua a la subrasarte o utilizar rejuvenecedores de pavimentos antes de producirse los agrietamientos.

El sellado de agrietamientos puede ser utilizado en cualquier etapa del mantenimiento excepto en la reconstrucción de una carpeta.

Figura II- 61 Mantenimiento vs el no mantenimiento de una carretera

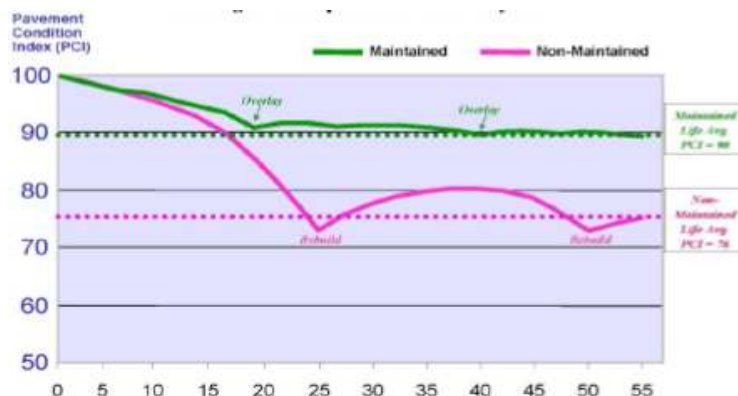


Tabla II- 13: Alternativas y Procedimientos del SMP (Sistema de Mantenimiento de Pavimentos) para varias condiciones

Rango IEP	Condición del Pavimento	Clasificación de las Alternativas del SMP	Objetivo	Procedimientos del Ejemplo
75 – 95	Muy Buenas	Rutina	Corregir deficiencias menores	Sellado de agrietamientos menores, sellado con capa final muy líquida; parchado menor
60 – 75	Buenas	Mantenimiento Preventivo	Restaurar superficie, aumentar vida útil	Sellado con Slurry, sellado con gravilla ruteado y sellado e agrietamientos parchado.
50 – 60	Regulares	Acción Diferida	Sin mejoramiento, mantener condiciones actuales	Sellado y parchado de agrietamientos para mantener la superficie.
25 – 50	Malas	Rehabilitación	Mejoramiento principal de superficie/reposición	Capas superpuestas rectificadas
0 – 25	Muy Malas	Reconstrucción	Construir nuevo pavimento	Eliminación de superficie, nueva base y sub base.

Fuente: Referencia 12

2.2.3.2. EN QUE CONSISTE EL CORRECTO SELLADO DE AGRIETAMIENTOS

El correcto sellado del agrietamiento consiste en el ruteado y la posterior aplicación de una banda angosta y delgada de selladores altamente aditivos, de propiedades específicas aplicados en caliente, estos selladores están compuestos en su mayoría de material asfáltico modificados con polímeros o elásticamente modificados que tienen una temperatura de

aplicación específica según cada fabricante la cual debe ser respetada para que la adhesión a la carpeta sea óptima.

Además de los selladores antes mencionados hay otros que no solo incorporan polímeros en sus diferentes variantes dentro de su composición sino que añaden ralladura de neumático (caucho) lo cual le brinda al material una mayor flexibilidad, adhesión y resistencia al desgaste superficial, permitiéndole así soportar los cambios de temperatura aumentando así su efectividad, manteniendo la elasticidad y adhesión del sellado por mucho más tiempo.

El tratamiento antes mencionado, tiene que encontrarse **limpio y seco** previo a ser sellado para garantizar una buena adhesión del sello.

2.2.3.3. TRATAMIENTO DE LOS AGRIETAMIENTOS

En el sellado de agrietamientos y toma de juntas hay que tener en cuenta tres cuestiones importantes la primera y fundamental es que la fisura o junta a tratar este **LIMPIA Y SECA** este trabajo se puede realizar con aire comprimido a presión en lugares de clima seco o con una lanza de aire en caliente que me permite secar, limpiar y eliminar los elementos orgánicos para lograr una buena adhesión del material sellador.

Este trabajo es fundamental ya que sin el mismo la penetración y adhesividad del sellador baja considerablemente y esto produce que el tránsito vehicular o una simple lluvia levante en muy poco tiempo el trabajo realizado.

La segunda y no menos importante es respetar la temperatura del material tanto de calentamiento como de aplicación, debido a que los selladores a base de asfalto se les incorporan polímeros y/o ralladura de neumático para lograr una mayor flexibilidad y adhesión estos necesitan una temperatura de 170 a 190 grados centígrados para que los polímeros actúen y no pudiendo ser superior a los 210 grados centígrados ya que así se provoca la cristalización de material perdiendo esta adhesión y flexibilidad.

La última y que garantiza la correcta configuración de la grieta es el ruteado de la misma la cual me permite formar una cavidad donde se depositara el sello que le proporciona un aumento del 50% en su durabilidad.

En la figura II- 62 que a continuación se muestra observamos los equipamientos que se utilizan para el ruteado, limpieza y secado de las grietas en ambos tipos de pavimentos que me garantizan el mejor resultado.

Figura II- 62. Equipos para el ruteado.



Fuente: Referencia 12

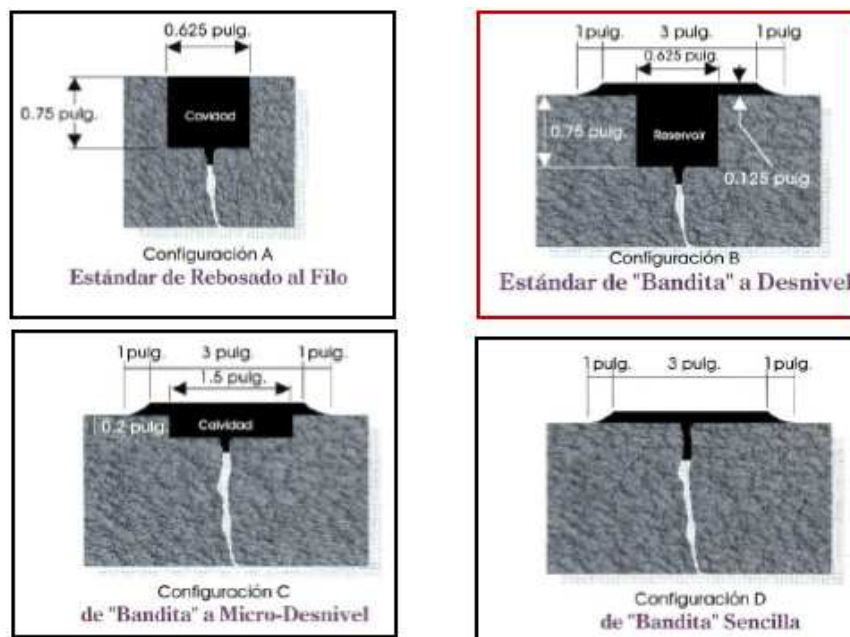
2.2.4. TIPOS DE CONFIGURACIONES PARA EL SELLADO DE AGRIETAMIENTOS

2.2.4.1. Grietas en pavimentos Rígidos y Flexibles

Teniendo en cuenta estos dos principios (costo, beneficio) ya podemos sellar, pero la pregunta es, como voy a obtener el mejor resultado y considerar si se quiere sellar o llenar una grieta o junta. Para ello hay cuatro configuraciones básicas para el sellado de agrietamientos (Figura II-63) lo ideal es utilizar una configuración B que se logra con un aserrado del agrietamiento y su posterior llenado con material sellador dejando una banda de 2,5 cm a cada lado de la fisura, el ruteado de los agrietamientos me aumenta en un 50% la vida del sellado.

La configuración B y D son las más utilizadas en el mercado actual para la preservación del pavimento, de todas formas las configuraciones y el tipo de material a utilizar varían dependiendo de las especificaciones técnicas de la obra a realizar, del tipo de carpeta a reparar y del tránsito. No es lo mismo realizar un sellado de agrietamiento en un Aeropuerto que en una calle de un barrio.

Figurar II- 63. Configuraciones básicas para el sellado de agrietamientos



Fuente: Referencia 12

En el caso de estar utilizando la configuración “D” lo que estamos realizando es el llenado de la grieta no el sellado.

Es importante conocer el trabajo que realizamos sobre las carpetas ya que cada metodología es creada para una finalidad específica y de su correcto uso depende el mejor resultado.

2.2.5. TÉCNICAS DE APLICACIÓN

El sellado de fisuras comenzó con el famoso tachito de asfalto caliente, luego siguieron pequeñas tolvas de calentamiento para la aplicación por gravedad pero nada fue realmente efectivo, la durabilidad de todos y cada uno de ellos era muy corta y el costo de la mano de obra alta.

En la actualidad con el equipamiento que se cuenta esto ha cambiado, ahora lo importante es hacer las cosa bien y a un bajo costo final, los modernos equipos para el sellado de fisura y grietas así como también para el sellado de juntas me permiten realizar el trabajo bien de una sola vez y con una durabilidad superior a los cinco años respecto de los sellados tradicionales, la inversión inicial es mayor pero es rápidamente amortizado con la durabilidad del trabajo y el ahorro en los costos de aplicación, lo importante es hacer las cosa bien y en una vez.

Figura II- 64. Técnica de aplicación.



Fuente: Referencia 12

2.2.6. ANÁLISIS DEL TIPO DE MATERIAL DE SELLO UTILIZADO ACTUALMENTE

El Departamento de Transportes de U.S.A. realizó uno de los más amplios estudios sobre el grado de deterioro de los pavimentos a largo plazo y su correcto mantenimiento (LTPP). Durante 20 años del programa, las agencias de Carreteras en los Estados Unidos y 15 años en otros países recogieron datos sobre pavimentos: su condición, clima, volúmenes de tráfico y cargas. Esa información permitió que los ingenieros en pavimentos diseñen mejores y más duraderos caminos.

Teniendo en cuenta la temperatura del pavimento, el tráfico, clima y la incidencia de los rayos ultravioletas podemos elegir el sellador.

Los pasos a seguir son los siguientes:

I) Evalúe el pavimento y determiné el tratamiento de la preservación más conveniente, verifique si desea:

a) Sellado de Grieta: Este proceso se debe realizar en los pavimentos que están en buena condición con una buena base, las grietas son normalmente térmicas y se presentan cada 6 metros y con un movimiento de 1/8 de pulgada. Para lograr conseguir un buen sello debemos rutar o ensanchar la grieta que me aumenta en un 50% la vida útil del sellador siendo de 5 a 9 años. Si requiere que dure el trabajo elija el material de sello correcto.

b) Relleno de la Grieta: Este procedimiento consiste en el llenado de las grietas con movimiento mayor a 1/8 de pulgada, debemos lograr que la humedad no pase a la sub-base evitando la formación de baches, en esta etapa ya tenemos piel de cocodrilo y daños mayores. El relleno de la grieta es un método muy rentable de reparación del pavimento que agregará años a su vida.

c) Relleno Común: Este tipo de sello lo utilizamos en las juntas y grietas en pavimentos de hormigón para evitar la penetración de agua con la consecuente fractura de las losas.

II) Determine los extremos de la Temperatura. Para elegir el tipo de material de sello es de vital importancia saber cuáles son las temperaturas máximas y mínimas de las carpetas de rodamientos, dependiendo de esta temperatura y del tipo de mantenimiento que desee realizar (rellenar o sellar) será el material elegido.

No olvide que el grado en que los rayos solares impactan sobre la carpeta y la altitud en la que se encuentre, son fuertes determinantes de la temperatura de la vía y esto puede o no coincidir con la temperatura ambiente.

III) Seleccione el Producto más adecuado. Selección del producto que corresponde al proceso del tratamiento que usted seleccionó en el paso uno (sellado o relleno). Muchos productos pueden ser utilizados en climas diferentes dependiendo si queremos sellar una grieta por más tiempo o llenarla con un rendimiento menor.

2.2.6.1. CARACTERÍSTICAS DE UN SELLANTE

BUENA ADHERENCIA

BUENA ELASTICIDAD

BUEN COMPORTAMIENTO A LOS AGENTES CLIMÁTICOS

BUENA “DUREZA” A ALTAS T°

“BLANDO” A BAJAS T°

RÁPIDA COLOCACIÓN Y APERTURA AL TRÁFICO

SELLOS ASFÁLTICOS

CEMENTOS ASFÁLTICOS

EMULSIONES ASFÁLTICAS

ASFALTOS CORTADOS

CA + PLASTOMEROS + CARGAS

CA + POLÍMEROS + CARGAS

2.2.6.2. TIPO DE SELLOS

2.2.6.2.1. ASFALTOS MODIFICADO.

Estos tipos de sellador son de un solo componente, aplicados en caliente, compuesto de asfalto elastoméricos modificados o modificados con polímeros, están especificados para sellado o llenado tanto de juntas como grietas en ambas superficies de rodamiento.

El usuario debe leer y seguir las instrucciones de uso del fabricante de los asfaltos modificados con polímeros y cauchos.

El procedimiento para la preparación será por un lado que la grieta o junta a tomar se encuentre LIMPIA Y SECA.

Se deberá elegir la configuración de grieta de acuerdo con el trabajo que se desee realizar:

Si nos referimos a un sellado de Grietas, utilizar la configuración B como vimos en el punto anterior, en el caso de un simple llenado tomar la precaución que la fisura se encuentre Limpia y Seca.

La diferencia sustancial entre el sellado y el llenado radica fundamentalmente en dos componentes: por un lado el sello elegido y por el otro la configuración adecuada.

Estos sellantes son solo de aplicación en caliente, son provistos en bloques de aproximadamente 18 Kg en diferentes presentaciones.

Dentro de los asfaltos modificados con polímeros los que poseen más alta viscosidad son los que tienen agregados de caucho.

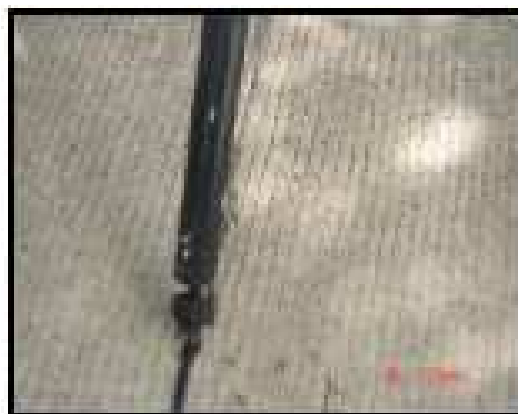
Petróleos modificados con polímeros

Son selladores de un solo componente, a base de petróleo o alquitrán de hulla con la incorporación de polímeros, para el sellado permanente de agrietamientos y juntas. Los selladores se abastecen en forma sólida, al derretirse y aplicarse correctamente, son autonivelantes y forman un adhesivo elástico que sella efectivamente los agrietamientos y la toma de juntas en pavimentos de hormigón.

Algunos emplean caucho recuperado y otros no. Algunos son espesos y otros más líquidos, dependiendo del trabajo que uno tenga que realizar.

Son de aplicación en caliente y su duración es de más de 8 años. Estos materiales si requieren el uso de cordón de respaldo para garantizar una mayor adherencia y elasticidad a lo largo del tiempo.

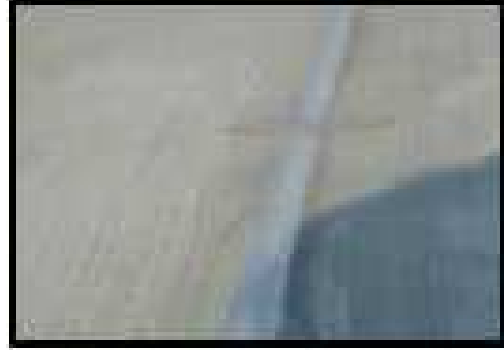
Figura II- 65 Aplicación de Petróleo mejorado con polímeros



Fuente: Referencia 12

2.2.6.2.2. SILICONA

Figura II- 66 Aplicación de Silicona



Fuente: Referencia 12

Sin lugar a duda las siliconas son los materiales de sello de mayor performance que encontramos hoy en el mercado siempre y cuando realicemos una correcta configuración de la junta y la aplicación sea realizada sobre una superficie limpia y seca.

Siliconas de bajo módulo, son capaz de elongarse hasta 6 veces su ancho de aplicación original sin romperse, lo que asegura su capacidad de mantener sellada la junta por más tiempo, la duración de las siliconas es superior a 10 años. Pueden ser autonivelantes o no. Este tipo de sello está específicamente diseñado para ser aplicado sobre juntas en pavimentos rígidos, nuevas o viejas previamente aserradas y limpias, lo fundamental en la aplicación es que las paredes de contacto de la junta se encuentren totalmente limpias y sin rastros de combustible ya que esto perjudicará su adherencia.

Figura II- 67 Equipo Aplicador



Fuente: Referencia 12

2.2.6.2.3. EPÓXICOS

Los adhesivos en base a resinas epóxicas requieren el uso de elementos de seguridad personal para su aplicación.

Los adhesivos en base a resinas epóxicas tienen un tiempo determinado de uso almacenado y sellado en su envase original, para lo cual se recomienda seguir las instrucciones del fabricante al respecto.

Se debe establecer con claridad el uso específico de un determinado adhesivo epóxido, verificando que lo que se especifica es efectivamente aplicable a la situación que se está presentando.

2.2.6.2.4. POLIURETANOS

Son compuestos elásticos de poliuretano de uno o dos componentes para sello de juntas de construcción, poseen elasticidad permanente. Se aplican generalmente en juntas de dilatación en pavimentos de hormigón, sellos de hojalatería, sello de juntas en elemento prefabricados, sellos entre diferentes materiales de construcción, y otras.

Para la especificación de sellantes de poliuretano, se debe tener en consideración los siguientes aspectos:

Establecer en la especificación si el puente adherente estará destinado a: unir superficies de hormigón fresco con endurecido o para la reparación de grietas en superficies de hormigón. Dependiendo de las necesidades se elegirá el producto.

Figura II- 68 Equipo Aplicador de dos componentes



Fuente: Referencia 12

2.2.6.2.5. RESUMEN DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MATERIALES DE SELLO

Tabla II- 14: Resumen de los tipos de materiales sellantes

ASFALTOS Y EMULSIONES	MENOS DE 1 AÑO
EMULSIONES MODIFICADAS CON POLIMEROS	DE 1 A 2 AÑOS
ASFALTOS MODIFICADOS CON LA INCORPORACION DE RALLADURA DE NEUMATICO Y POLIMEROS	DE 1 A 6 AÑOS
ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS APLICACION EN CALIENTE	DE 1 A 4 AÑOS, DEPENDIENDO DEL CLIMA TRAFICO Y APLICACION
ALQUITRANES MODIFICADOS CON POLIMEROS	DE 3 A 7 AÑOS
SILICONAS DE BAJO MODULO DE UN COMPONENTE	MAS DE 10 AÑOS
BASES DE DOS COMPONENTES	Más de 5 AÑOS
BASES EPOXICAS	DE 5 A 8 AÑOS

Fuente: Referencia 12

Tabla II- 15: Ventajas y Desventajas de los Productos Sellantes

PRODUCTO	VENTAJA	DESVENTAJA
ASFALTOS Y EMULSIONES	- Al derretirse y aplicarse correctamente, son autonivelantes y forman una adhesión elástica sobre pavimentos rígidos y flexibles. - Hay que considerar que estos materiales absorben las tensiones producidas por el movimiento de las losas.	La contaminación ambiental y el despilfarro energético que ocasionan sus solventes. Está científicamente demostrado que estos solventes inciden directamente en el deterioro de la capa de ozono.

EMULSIONES MODIFICADAS CON POLÍMEROS	• Mayor elasticidad • Mayor adherencia • Mayor cohesión: el polímero refuerza la cohesión de la mezcla. • Mejora la trabajabilidad y la compactación • Mejor impermeabilización • Evita la propagación de las fisuras.	• Elevado costo de aplicación. • Alto costo del polímero.
ASFALTOS MODIFICADOS CON LA INCORPORACIÓN DE RALLADURA DE NEUMÁTICO Y POLÍMEROS	• Mayor intervalo de plasticidad(diferencia entre el punto de ablandamiento y el Fraass) • Mayor cohesión. • Mejora de la respuesta elástica. • Mayor resistencia a la <u>acción</u> del <u>agua</u>. • Mayor resistencia al envejecimiento.	• En todo el mundo se conoce que la modificación de asfaltos con polímeros tiene un alto costo, debido mas que nada al extremo costo del uso de energía.
ASFALTOS MODIFICADOS CON POLÍMEROS APLICACIÓN EN CALIENTE	• Mayor resistencia al derrame de combustibles. • Reduce el costo de mantenimiento. • Disminuye el nivel de ruidos: sobre todo en mezclas abiertas. • Aumenta el módulo de la mezcla.	• Alto costo del polímero. • Dificultades del mezclado: no todos los polímeros son compatibles con el asfalto base. • La temperatura mínima de distribución es de 145°C por su rápido endurecimiento
ALQUITRANES MODIFICADOS CON POLÍMEROS	• Son autonivelantes y forman un adhesivo elástico que sella efectivamente los agrietamientos y la toma de juntas en pavimentos de hormigón. • Son resistentes al combustible con alta adherencia y durabilidad.	• Alto costo del polímero. • Los agregados no deben estar húmedos ni sucios.
HORMIGONES Y MORTEROS A BASE DE AZUFRE	• El fenómeno de retracción no se presenta en el concreto de azufre • La obtención de más del 70% de resistencia a compresión se produce en el hormigón de azufre a las 24 horas	• Los ciclos de temperatura afectan negativamente, lo cual provoca una disminución del módulo

	• Prácticamente no se necesita hacer el curado del Hormigón a base de Azufre puesto que este no presenta cambios con las variaciones de temperatura ambiente. • El hormigón y mortero a base de azufre es un producto reciclable. • Presenta una buena adherencia al hormigón hidráulico viejo. • Los productos elaborados a base de azufre son impermeables. • Evita el congestionamiento vehicular ya que el mismo alcanza un 70% de su resistencia a las 24 horas lo que permite poner en servicio la vía en corto tiempo (24 hrs.)	de elasticidad. • El gas que despiden el hormigón de azufre en su elaboración es muy tóxico. • El uso del azufre requiere de elementos de protección contra el gas tóxico.
--	--	--

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla II- 15 se muestran las ventajas y desventajas de los productos sellantes de grietas en pavimentos rígidos. De los productos mencionados en la tabla la mayoría tiene un costo alto en el mercado y en el mercado local muchos de ellos no están al alcance para ser empleados.

Es por esta razón que necesitamos un producto que sea fácil de obtenerlo en el mercado y tenga una aplicación en obra práctica además de no interrumpir el tráfico por periodos largos, éstos y otros requisitos lo cumple el hormigón y mortero a base de azufre ya que su elaboración se lo puede hacer con materiales que están al alcance en el mercado local; en cambio los otros productos son difíciles de obtenerlos ya que estos son expendidos por empresas internacionales o importadoras donde muchas veces hay que hacer el pedido con anticipación lo cual demora la reparación en obra, mas allá de este motivo los productos utilizados convencionalmente ocasionan una contaminación alta al medio ambiente. Está demostrado que el hormigón y mortero de azufre incide de manera más baja en la contaminación ambiental (ver capítulo III subtítulo 3.7. figura III-6); es por estas razones que a la hora de elegir entre los productos convencionales y el hormigón y mortero a base de azufre debemos de elegir el producto elaborado con azufre.

2.2.7. DAÑOS REPARABLES CON EL PRODUCTO Y EL MÉTODO PROPUESTO

Para fines del presente proyecto los daños que se repararan a través del método propuesto serán los correspondientes a la categoría de Grietas, las mismas pueden ser:

- Grieta de esquina/diagonal (GE)
- Agrietamiento longitudinal (GL)
- Agrietamiento transversal (GT)
- Grietas en bloque o Fracturación múltiple (GB)

Estos daños (grietas) podrán ser reparados desde un nivel de severidad: **bajo, medio o alto**, donde las grietas tendrán una variación de **3mm a 50 mm**.

No diciendo con esto que el método propuesto es inadecuado para reparar otros daños si no que los mismos tienen que ser motivo de otro estudio para de esta manera poder confirmar su aplicación.

2.2.8. EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS

El Índice de Condición del Pavimento (PCI, por su sigla en inglés) se constituye en la metodología más completa para la evaluación y calificación objetiva de pavimentos, flexibles y rígidos, dentro de los modelos de Gestión Vial disponibles en la actualidad. La metodología es de fácil implementación y no requiere de herramientas especializadas más allá de las que constituyen el sistema y las cuales se presentan a continuación.

2.2.8.1. ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO (PCI – Pavement Condition Index)

El deterioro de la estructura de pavimento es una función de la clase de daño, su severidad y cantidad o densidad del mismo. La formulación de un índice que tuviese en cuenta los tres factores mencionados ha sido problemática debido al gran número de posibles condiciones. Para superar esta dificultad se introdujeron los “*valores deducidos*”, como un arquetipo de factor de ponderación, con el fin de indicar el grado de afectación que cada combinación de clase de daño, nivel de severidad y densidad tiene sobre la condición del pavimento.

El PCI es un índice numérico que varía desde cero (0), para un pavimento fallado o en mal estado, hasta cien (100) para un pavimento en perfecto estado. En la tabla II-16 se presentan los rangos de PCI con la correspondiente descripción cualitativa de la condición del pavimento.

Tabla II- 16: Rangos de Calificación del PCI

Rango	Clasificación
100 – 85	Excelente
85 – 70	Muy Bueno
70 – 55	Bueno
55 – 40	Regular
40 – 25	Malo
25 – 10	Muy Malo
10 – 0	Fallado

Fuente: Referencia 10

El cálculo del PCI se fundamenta en los resultados de un inventario visual de la condición del pavimento en el cual se establecen CLASE, SEVERIDAD y CANTIDAD de cada daño presenta. El PCI se desarrolló para obtener un índice de la integridad estructural del pavimento y de la condición operacional de la superficie. La información de los daños obtenida como parte del inventario ofrece una percepción clara de las causas de los daños y su relación con las cargas o con el clima.

2.2.8.2. PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN DEL PAVIMENTO

La primera etapa corresponde al trabajo de campo en el cual se identifican los daños teniendo en cuenta la clase, severidad y extensión de los mismos. Esta información se registra en formatos adecuados para tal fin. La Figura II-26 ilustra el formato para la inspección de pavimentos de concreto (ANEXO A). La figura es ilustrativa y en la práctica debe proveerse el espacio necesario para consignar toda la información pertinente.

Figura II- 69: Índice de Condición del Pavimento “Carreteras con Superficie Concreto Hidráulico”

EXPLORACIÓN DE LA CONDICIÓN POR UNIDAD DE MUESTREO					
ZONA		ABSCISA INICIAL		UNIDAD DE MUESTREO	
CÓDIGO VÍA		ABSCISA FINAL		NÚMERO DE LOSAS	
INSPECCIONADA POR				FECHA	
No.	Daño	No.	Daño	No.	Daño
21	Blow up / Buckling.	27	Desnivel Carril/ Berma.	34	Punzonamiento.
22	Grieta de esquina.	28	Grieta lineal.	35	Cruce de vía férrea
23	Losa dividida.	29	Parcheo (grande).	36	Desconchamiento
24	Grieta de durabilidad "D".	30	Parcheo (pequeño)	37	Retracción
25	Escala.	31	Pulimento de agregados	38	Descascaramiento de esquina
26	Sello de junta.	32	Popouts	39	Descascaramiento de junta
		33	Bombeo		
Daño	Severidad	No. Losas	Densidad (%)	Valor deducido	ESQUEMA
					o o o o o
					10
					o o o o o
					9
					o o o o o
					8
					o o o o o
					...
					o o o o o
					1 2 3 4

Fuente: Referencia 10

2.2.8.2.1. Unidades de Muestreo:

Se divide la vía en secciones o “unidades de muestreo”, cuyas dimensiones varían de acuerdo con los tipos de vía y de capa de rodadura:

- Carreteras con capa de rodadura en losas de concreto de cemento Pórtland y losas con longitud inferior a 7.60 m: El área de la unidad de muestreo debe estar en el rango **20 ± 8 losas**.

Se recomienda tomar el valor medio de los rangos y en ningún caso definir unidades por fuera de aquellos. Para cada pavimento inspeccionado se sugiere la elaboración de esquemas que muestren el tamaño y la localización de las unidades ya que servirá para referencia futura.

2.2.8.2.2. Determinación de las Unidades de Muestreo para Evaluación:

En la “**Evaluación De Una Red**” vial puede tenerse un número muy grande de unidades de muestreo cuya inspección demandará tiempo y recursos considerables; por lo tanto, es necesario aplicar un proceso de muestreo. En la “**Evaluación de un Proyecto**” se deben inspeccionar todas las unidades; sin embargo, de no ser posible, el número mínimo de unidades de muestreo que deben evaluarse se obtiene mediante la Ecuación II- 4, la cual produce un estimado del PCI ± 5 del promedio verdadero con una confiabilidad del 95%.

$$n = \frac{N \times \sigma^2}{\frac{e^2}{4} \times (N - 1) + \sigma^2} \dots\dots\dots \text{Ecuación II- 4}$$

Donde:

n: Número mínimo de unidades de muestreo a evaluar.

N: Número total de unidades de muestreo en la sección del pavimento.

e: Error admisible en el estimativo del PCI de la sección (e = 5%)

s: Desviación estándar del PCI entre las unidades.

Durante la inspección inicial se asume una desviación estándar (s) del PCI de 10 para pavimento asfáltico (rango PCI de 25) y de 15 para pavimento de concreto (rango PCI de 35) En inspecciones subsecuentes se usará la desviación estándar real (o el rango PCI) de la inspección previa en la determinación del número mínimo de unidades que deben evaluarse.

Cuando el número mínimo de unidades a evaluar es menor que cinco ($n < 5$), ***todas las unidades deberán evaluarse.***

2.2.8.2.3. Selección de las Unidades de Muestreo para Inspección:

Se recomienda que las unidades elegidas estén igualmente espaciadas a lo largo de la sección de pavimento y que la primera de ellas se elija al azar (aleatoriedad sistemática) de la siguiente manera:

a. El intervalo de muestreo (*i*) se expresa mediante la Ecuación II- 5:

$$i = \frac{N}{n} \dots\dots\dots \text{Ecuación II- 5}$$

Donde:

N: Número total de unidades de muestreo disponible.

n: Número mínimo de unidades para evaluar.

i: Intervalo de muestreo, se redondea al número entero inferior (por ejemplo, 3.7 se redondea a 3)

b. El inicio al azar se selecciona entre la unidad de muestreo 1 y el intervalo de muestreo *i*. Así, si *i* = 3, la unidad inicial de muestreo a inspeccionar puede estar entre 1 y 3. Las unidades de muestreo para evaluación se identifican como (S), (S + 1), (S + 2), etc.

Siguiendo con el ejemplo, si la unidad inicial de muestreo para inspección seleccionada es 2 y el intervalo de muestreo (*i*) es igual a 3, las subsiguientes unidades de muestreo a inspeccionar serían 5, 8, 11, 14, etc.

Sin embargo, si se requieren cantidades de daño exactas para pliegos de licitación (rehabilitación), todas y cada una de las unidades de muestreo deberán ser inspeccionadas.

2.2.8.2.4. Selección de Unidades de Muestreo Adicionales:

Uno de los mayores inconvenientes del método aleatorio es la exclusión del proceso de inspección y evaluación de algunas unidades de muestreo en muy mal estado. También puede suceder que unidades de muestreo que tienen daños que sólo se presentan una vez (por ejemplo, “*cruce de línea férrea*”) queden incluidas de forma inapropiada en un muestreo aleatorio.

Para evitar lo anterior, la inspección deberá establecer cualquier unidad de muestreo inusual e inspeccionarla como una “*unidad adicional*” en lugar de una “*unidad representativa*” o aleatoria. Cuando se incluyen unidades de muestreo adicionales, el cálculo del PCI es ligeramente modificado para prevenir la extrapolación de las condiciones inusuales en toda la sección.

2.2.8.2.5. Evaluación de la Condición:

El procedimiento varía de acuerdo con el tipo de superficie del pavimento que se inspecciona. La evaluación de la condición incluye los siguientes aspectos:

a. Equipo.

- Odómetro manual para medir las longitudes y las áreas de los daños.
- Regla y una cinta métrica para establecer las profundidades de los ahuellamientos o depresiones.
- Manual de Daños del PCI con los formatos correspondientes y en cantidad suficiente para el desarrollo de la actividad.

b. Procedimiento. Se inspecciona una unidad de muestreo para medir el tipo, cantidad y severidad de los daños de acuerdo con el Manual de Daños, y se registra la información en el formato correspondiente. Se deben conocer y seguir estrictamente las definiciones y procedimientos de medida de los daños. Se usa un formulario u “*hoja de información de exploración de la condición*” para cada unidad muestreo y en los formatos cada renglón se usa para registrar un daño, su extensión y su nivel de severidad.

c. El equipo de inspección deberá implementar todas las medidas de seguridad para su desplazamiento en la vía inspeccionada, tales como dispositivos de señalización y advertencia para el vehículo acompañante y para el personal en la vía.

2.2.8.3. CÁLCULO DEL PCI DE LAS UNIDADES DE MUESTREO

Al completar la inspección de campo, la información sobre los daños se utiliza para calcular el PCI. El cálculo puede ser manual o computarizado y se basa en los “*Valores Deducidos*” de cada daño de acuerdo con la cantidad y severidad reportadas.

2.2.8.3.1. Cálculo para Pavimentos con Capa de Rodadura en Concreto de Cemento Pórtland:

Etapas 1. Cálculo de los Valores Deducidos.

1. a. Contabilice el número de LOSAS en las cuales se presenta cada combinación de tipo de daño y nivel de severidad en el formato de la figura II-26.

1. b. Divida el número de LOSAS contabilizado en 1.a. entre el número de LOSAS de la unidad y exprese el resultado como porcentaje (%) Esta es la DENSIDAD por unidad de muestreo para cada combinación de tipo y severidad de daño.

1. c. Determine los VALORES DEDUCIDOS para cada combinación de tipo de daño y nivel de severidad empleando la curva de “*Valor Deducido de Daño*” apropiada entre las que se adjuntan a este documento.

Etapas 2. Cálculo del *Número Máximo Admisible de Valores Deducidos (m)*

2. a. Si ninguno ó tan sólo uno de los “Valores Deducidos” es mayor que 2, se usa el “Valor Deducido Total” en lugar del mayor “Valor Deducido Corregido”, CDV, obtenido en la *Etapas 4*. De lo contrario, deben seguirse los pasos 2.b. y 2.c.

2. b. Liste los valores deducidos individuales deducidos de mayor a menor.

2. c. Determine el “*Número Máximo Admisible de Valores Deducidos*” (*m*), utilizando la Ecuación II- 6:

$$m_i = 1.00 + \frac{9}{98}(100 - HDV_i) \dots\dots\dots \text{Ecuación II- 6}$$

Donde:

m_i: Número máximo admisible de “valores deducidos”, incluyendo fracción, para la unidad de muestreo *i*.

HDV_i: El *mayor valor deducido individual* para la unidad de muestreo *i*.

2. d. El número de valores individuales deducidos se reduce a m , inclusive la parte fraccionaria. Si se dispone de menos valores deducidos que m se utilizan todos los que se tengan.

Etapla 3. Cálculo del “Máximo Valor Deducido Corregido”, CDV.

El máximo CDV se determina mediante el siguiente proceso iterativo:

3. a. Determine el número de valores deducidos, q , mayores que 2.0.

3. b. Determine el “Valor Deducido Total” sumando TODOS los valores deducidos individuales.

3. c. Determine el CDV con q y el “Valor Deducido Total” en la curva de corrección pertinente al tipo de pavimento.

3. d. Reduzca a 2.0 el menor de los “Valores Deducidos” individuales que sea mayor que 2.0 y repita las etapas 3.a. a 3.c. hasta que q sea igual a 1.

3. e. El máximo CDV es el mayor de los CDV obtenidos en este proceso.

Etapla 4. Calcule el PCI de la unidad restando de 100 el máximo CDV obtenido en la Etapa 3.

En la Figura II-70 se presenta un formato para el desarrollo del proceso iterativo de obtención del “Máximo Valor Deducido Corregido”, CDV.

Figura II- 70: Formato para la Obtención del Máximo Valor Deducido Corregido

No.	Valores Deducidos										Total	q	CDV
1													
2													
3													
4													

Fuente: Referencia 10

2.2.9. DETERMINACIÓN DEL PCI EN LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio presenta una longitud de 252,96 m., tiene 126 losas de 3,75 m de ancho y 4 m de largo; esta zona fue dividida en 6 muestras para su mejor estudio, las tres primeras muestras están conformadas por un número de 22 losas cada muestra y las tres ultimas por un número de 20 losas cada muestra. (El procedimiento para determinar el PCI se encuentra en el ANEXO B).

A continuación mostramos una tabla resumen del Máximo Valor Deducido y del Índice de Condición del Pavimento (PCI) de las unidades de muestreo y de la zona o sección en estudio.

Tabla II- 17 Resumen del Máximo Valor Deducido y PCI de la zona en estudio

	Max. CDV =	PCI
Muestra 1	23	77
Muestra 2	46	54
Muestra 3	19	81
Muestra 4	35	65
Muestra 5	58	42
Muestra 6	64	36
	Promedio	59

Fuente: Elaboración Propia

El resultado del PCI nos indica que la zona en estudio se encuentra en un estado bueno (ver Tabla II-16). Esto no quiere decir que todas las losas se encuentran sin ningún daño ya que este valor es la referencia de toda la zona de estudio que tienen un número de 126 losas. Esta zona fue dividida en 6 muestras como se observa en la tabla, donde a cada muestra se le realizó la respectiva evaluación superficial para obtener el PCI de cada muestra, los mismos que se pueden apreciar en la Tabla II-17. Es por esta razón que podemos decir que existen losas de algunas muestras que necesitan ser reparadas ya que presentan un PCI inferior a 55 que vendrían a estar en el rango de regulares según la Tabla II-16.

La evaluación realizada nos permite determinar el sitio donde es necesario realizar una reparación según las características del daño que presente la losa; en nuestro caso elegiremos la muestra 6 que es la que presenta el PCI más bajo y por ende es la que mayor necesidad tiene en ser reparada.

CAPÍTULO III HORMIGÓN Y MORTERO DE AZUFRE

3.1. EL HORMIGÓN A BASE DE AZUFRE.

El Hormigón a base de Azufre es un compuesto termoplástico constituido por una mezcla de áridos gruesos y finos, firmemente ligados mediante un aglomerante de azufre, químicamente modificado que se comporta como un cemento que se solidifica y gana resistencia rápidamente durante su proceso de enfriamiento.

El hormigón a base de azufre se fabrica fundiendo el azufre a una temperatura de 120 a 130 grados agregando posteriormente el árido, obteniendo la mezcla que se vacía en molde para obtener la pieza que se desea fabricar.

3.1.1. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL HORMIGÓN A BASE DE AZUFRE

Resistencia máxima a compresión:

Se puede observar que las probetas tienden a alcanzar la mayoría de su resistencia entre los primeros 7 días teniendo que *la resistencia a un día de edad de la probeta alcanza los 173.03 kg/cm² siendo esta equivalente al 89% de la resistencia de 194.2 kg/cm² obtenida a los 28 días de edad¹*

Tabla III- 1: Promedio De La Resistencia Máxima A La Compresión Con Aditivo Tipo (C)

PROMEDIO DE LA RESISTENCIA MÁXIMA A LA COMPRESIÓN DE H°S° (kg/cm ²) con aditivo tipo (C)						
RELACIÓN (Ad/Az) = 0,13		Edad de ruptura de probetas (días)				
		1	3	7	14	28
	Resistencia “fc” a la compresión kg/cm ² probetas Convencionales	173,053	184,398	193,435	193,820	194,204

Fuente: Referencia 3

Módulo de elasticidad y peso unitario promedio:

EL módulo de elasticidad promedio es de “E”= 197032.3 kg/cm² y el peso unitario del Hormigón de Azufre promedio es de “ρ H°S° ”= 2277.8 kg/m³.

Ensayo de corrosión en el hormigón a base de azufre:

El ensayo que consistió en colocar la pieza de hormigón a base de azufre en soluciones de ácido sulfúrico 40 % por un tiempo de 28 días, según la norma ASTM C 579.

Para calcular el índice de degradabilidad del Hormigón a base de Azufre se hizo un control de pesaje de la pieza y verificar su pérdida de material mostrándose a continuación los resultados del ensayo:

Tabla III-2: Ensayo de corrosión en el Hormigón de Azufre

ENSAYO DE CORROSIÓN EN EL H ² S°	
Tipo De Hormigón De La Probeta =	H ² S
Altura De Probeta (cm) h=	20
Peso Seco Antes Del Ensayo (grs) (A)	3232
Peso Seco Después Del Ensayo (grs) (B)	3230
Índice De Degradabilidad %D= (1-(B/A))x100 %	0,06%

Fuente: Referencia 3

Como se puede observar en Tabla IV- 36 se indica que el índice de degradabilidad del Hormigón a base de Azufre es de 0.06%

Nota: el aditivo modificador que se utilizó en estos ensayos fue el Óxido de Calcio (C)

3.1.2. VENTAJAS.

Debido a su modo de elaboración, fraguado rápido y endurecimiento rápido el hormigón a base de azufre presenta las siguientes ventajas con relación al hormigón convencional:

- La obtención de más del 70% de resistencia a compresión se produce en el hormigón de azufre a las 24 horas, a diferencia de los siete días requeridos para el hormigón convencional. Esta ventaja del Hormigón a base de Azufre nos permite una rápida puesta en servicio.
- El fenómeno de retracción no se presenta en el hormigón a base de azufre, ya que éste durante el proceso de fraguado baja de 114 a 96°C, con el consecuente cambio volumétrico. Por debajo de esta temperatura ya no producen más transformaciones de la estructura cristalina del azufre ni, por consiguiente, grietas por retracción.

- Prácticamente no se necesita hacer el curado del Hormigón a base de Azufre puesto que éste no presenta cambios con las variaciones de temperatura ambiente.
- El azufre elemental puro abunda en muchas regiones; puede ser guardado indefinidamente y puede usarse una gran cantidad de veces; necesita sólo un equipo simple para fundirlo; se adhiere a una amplia variedad de materiales; no tiene sabor ni olor (excepto cuando es calentado o cortado con una sierra eléctrica) y no actúa sobre la piel; y es un pobre conductor de calor y electricidad.

3.1.3. COMPONENTES DEL HORMIGÓN Y MORTERO A BASE DE AZUFRE.

3.1.3.1. AZUFRE.

Aunque hay varias aplicaciones muy útiles del azufre como material de construcción, la tecnología aún no es ampliamente conocida. Esto probablemente se debe a que la investigación y desarrollo ha tenido lugar casi exclusivamente en Canadá y Estados Unidos y solo algunas edificaciones prototipo han sido construidas en países en desarrollo. Sin embargo, la creciente disponibilidad de azufre, principalmente de la desulfuración del petróleo y el gas natural, están causando problemas con su disposición en algunos países, problemas que pueden ser resueltos si el azufre es empleado ampliamente como material de construcción.

3.1.3.1.1. PROPIEDADES DEL AZUFRE.

En Tabla III- 3 se muestra una caracterización general de las propiedades del azufre:

Tabla III- 3: Propiedades Del Azufre

GENERAL	
<u>Nombre, Símbolo, Número</u>	Azufre, S, 16
<u>Serie Química</u>	<u>No metal</u>
<u>Densidad</u>	1960 <u>kg/m³</u>
<u>Apariencia</u>	Amarillo Limón 

PROPIEDADES FÍSICAS	
<u>Estado De La Materia</u>	Sólido
<u>Punto De Fusión</u>	115 °C
<u>Punto De Ebullición</u>	445 °C
<u>Entalpía¹ De Vaporización</u>	10.5 kJ/mol
<u>Entalpía De Fusión</u>	1,7175 kJ/mol

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Burning-sulfur.png>

El azufre tiene un color amarillento, amarronado o naranja, es blando, frágil, ligero, desprende un olor característico a huevo podrido al combinarse con hidrógeno y arde con llama de color azul (Figura III- 1), desprendiendo dióxido de azufre reacciona con el agua atmosférica para producir la lluvia ácida esta irrita las mucosidades y los ojos y provoca tos al ser inhalado.

Figura III- 1: Azufre Ardiendo



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Burning-sulfur.png>

Todas las formas de azufre son insolubles en agua, y las formas cristalinas son solubles en disulfuro de carbono. Cuando el azufre ordinario se funde, forma un líquido de color pajizo que se oscurece si se calienta más, alcanzando finalmente su punto de ebullición. Si el azufre fundido se enfría lentamente, sus propiedades físicas varían en función de la temperatura (Figura III- 2), la presión y el método de enfriamiento.

Figura III- 2: Azufre Fundido



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Burning-sulfur.png>

¹ **Entalpía:** cantidad de energía de un sistema termodinámico que éste puede intercambiar con su entorno

3.1.3.1.2. DISPONIBILIDAD DE AZUFRE

El azufre ocupa el lugar 16 en abundancia entre los elementos de la corteza terrestre, y se encuentra ampliamente distribuido tanto en estado libre como combinado con otros elementos. Así se halla en numerosos sulfuros metálicos, como el sulfuro de plomo o galena, PbS ; la esfalerita, ZnS ; la calcopirita, (CuFeS_2) ; el cinabrio, HgS ; la estibina, Sb_2S_3 , y la pirita de hierro, FeS_2 .

También se encuentra combinado con otros elementos formando sulfatos como la baritina, BaSO_4 ; la celestina, SrSO_4 , y el yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Asimismo está presente en moléculas de una gran variedad de sustancias como la mostaza, el huevo y las proteínas. En estado libre se encuentra mezclado con rocas de yeso y pumita en zonas volcánicas, principalmente en Islandia, Sicilia, México y Japón, apareciendo a menudo como sublimados en las inmediaciones de orificios volcánicos.

Figura III- 3: Azufre En Estado Natural



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Burning-sulfur.png>

El azufre en estado natural (Figura III- 3) puede formarse por la acción del aire sobre las piritas, o también depositarse por aguas sulfurosas calientes, en las cuales el sulfuro de hidrógeno se ha oxidado en contacto con la atmósfera.

3.1.3.1.3. TIPOS DE EXTRACCIÓN DEL AZUFRE.

Existen varios métodos para la extracción del azufre. En Sicilia se colocan las rocas sulfurosas en grandes pilas y se prenden. El azufre líquido que se va formando pasa a unos moldes de madera en los que solidifica, produciéndose el llamado azufre en cañón. Este último se puede purificar posteriormente por destilación, haciendo pasar el vapor por una gran cámara de ladrillos, en cuyas paredes se condensa en forma de polvo fino llamado flor

de azufre. En Estados Unidos, en donde los depósitos de azufre pueden encontrarse a unos 275 m o más bajo la superficie terrestre, el método más utilizado es el de Frasch, inventado en 1891 por el químico estadounidense Herman Frasch. En este método se introducen en el depósito de azufre cuatro tuberías concéntricas, la mayor de las cuales mide 20 cm de diámetro. A través de las dos tuberías exteriores se inyecta agua calentada bajo presión a 170 °C, fundiendo el azufre. Cuando se ha conseguido fundir una cantidad suficiente de azufre, el aire caliente baja por las tuberías internas formando una espuma con el azufre fundido, lo que hace subir la mezcla a la superficie por la tubería restante. Entonces se coloca el azufre en contenedores de madera, donde solidifica, alcanzándose una pureza de un 99,5%. El azufre también se puede extraer de las piritas por destilación en retortas de hierro o arcilla refractaria, aunque con este proceso el azufre obtenido suele contener porciones de arsénico.

3.1.3.1.4. APLICACIONES DEL AZUFRE EN LA CONSTRUCCIÓN.

- Hormigón a base de azufre, comprende del azufre modificado como aglomerante y de agregados fino y grueso. Al calentar estos materiales y mezclándolos forman un material semejante al hormigón que puede ser moldeado y que es impermeable.
- Revestimiento de azufre en materiales débiles, flexibles y porosos los hace fuertes, sólidos e impermeables. Mediante inmersión, roseado o pintado, casi cualquier material puede ser impregnado con azufre.
- Adhesivo de azufre, empleando azufre fundido como un adhesivo, o aplicando externamente sobre juntas no adherentes, se pueden producir adherencias extremadamente fuertes entre dos componentes.
- Espuma de azufre, producido introduciendo pequeñas cantidades de agentes espumantes, son livianos (pesando aprox. 170 kg/m³), rígidos y tienen excelente resistencia térmica, baja contracción y absorción de agua.
- Asfaltos sulfurados, en los cuales el árido o el asfalto (empleados en construcción de pavimentos y carreteras) es reemplazado parcialmente por azufre, elevando así la viscosidad a altas temperaturas o disminuyéndola a bajas temperaturas.
- Concreto infiltrado con azufre, producido introduciendo azufre fundido en concreto pobre curado-húmedo, para incrementar su resistencia a los esfuerzos y al agua.

3.1.3.2. AGREGADOS.

Los agregados en el hormigón a base de azufre corresponden a los componentes inertes del hormigón y constituyen entre el 60 y 80 % del volumen del hormigón, teniendo como funciones importantes:

- proveer al hormigón una masa de partículas capaz de resistir los esfuerzos físicos que se aplicará en la pieza.
- desplazar volumen con una masa de partículas resistentes a los esfuerzos mecánicos.
- disminución de los cambios volumétricos (retracciones), como resultado de los procesos de fraguado, endurecimiento

Los agregados de calidad deben cumplir ciertas reglas para darles un uso óptimo: deben consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta. Las partículas de agregado que sean desmenuzables o susceptibles de resquebrajarse son indeseables. Debido a esto influyen mucho en el costo económico y en las propiedades del hormigón fresco, como en el endurecido. Las propiedades físicas que podrían ser afectadas incluyen el peso unitario, la manejabilidad, el módulo de elasticidad, resistencia, contracción, flujo plástico, comportamiento térmico y durabilidad.

3.1.3.3. ADITIVOS.

Ingrediente del hormigón a base de azufre para modificar o crear condiciones inexistentes en la mezcla y que se añade al azufre durante la fundición antes del mezclado con los agregados. El uso de los aditivos en este hormigón es parte del proceso de fabricación, facilitando el manejo y trabajabilidad de la mezcla. Algunas de las razones para el uso de aditivos en el hormigón a base de azufre son:

- Ser el único medio factible para alcanzar las características deseadas en la mezcla (homogeneidad).
- Beneficiar las características y propiedades del hormigón endurecido.
- Mejorar entre otras propiedades la trabajabilidad y el manejo de la mezcla.

Actualmente no existe un diseño de mezcla del Hormigón y Mortero a base de Azufre comerciable así que todos los aditivos utilizados en la fabricación de hormigones a base de azufre todavía están en etapa de investigación.

3.1.4. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN Y MORTERO A BASE DE AZUFRE.

3.1.4.1. FRAGUADO DEL HORMIGÓN Y MORTERO

El azufre, que es el componente aglomerante, es mezclado en caliente con los agregados para la obtención del hormigón a base de azufre, su proceso de fraguado, pasa de estado líquido, primero a cristales como azufre monoclinico (S_β) a 114° C, luego, cuando el enfriamiento alcanza los 96° C aproximadamente el S_β comienza a transformarse en azufre ortorrómbico (S_α), que es la forma estable del azufre a temperatura ambiente. Esta transformación ocurre en menos de 24 horas. Como la forma S_α es más densa que la forma S_β , se inducen altos esfuerzos internos en el material debido a la solidificación del azufre.

3.1.4.2. HORMIGÓN Y MORTERO ENDURECIDO.

El hormigón a base de azufre endurecido cuenta con las siguientes características:

Alta Resistencia en corto tiempo: la obtención del 70% de resistencia a compresión se produce en el hormigón a base de azufre a las 24 horas, a diferencia de los siete días requeridos para el hormigón convencional.

Baja retracción: la retracción no se presenta en el hormigón a base de azufre, ya que éste, durante el proceso de fraguado baja de 114 a 96°C, con el consecuente cambio volumétrico. Por debajo de esta temperatura ya no se producen más transformaciones de la estructura cristalina del azufre ni, por consiguiente, grietas por retracción.

3.2. METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL HORMIGON Y MORTERO DE AZUFRE.

3.2.1. AZUFRE.

Para elegir el tipo de azufre se toma en cuenta las consideraciones establecidas por el Instituto de Desarrollo de Azufre de Canadá (SUDIC) que indica que para emplear el azufre en la construcción de obras este básicamente tiene que tener un contenido de materia orgánica menor a 4 % y contenido de azufre mayor al 95%.²

3.2.2. AGREGADOS.

3.2.2.1. SELECCIÓN DE AGREGADOS.

Para la selección de agregados se toma en cuenta los siguientes aspectos:

- La cercanía de la cantera de donde se desea extraer los agregados
- La facilidad con la que se pueden extraer los mismos
- Estudios realizados por tesisistas acerca de la calidad de estos agregados
- Y la validación de su calidad debido a experiencias de instituciones y personajes que trabajaron con estos agregados

3.2.2.2. OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS.

A continuación se detallan los tipos de ensayos realizados en los agregados y la metodología empleada en la realización de los mismos.

3.2.2.2.1. ENSAYO PARA TAMIZAR Y DETERMINAR LA GRANULOMETRÍA DE LOS AGREGADOS (ASTM C 136 AASHTO T27).³

Este método de ensayo establece el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría (distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un árido).

² Referencia N° 5

³ Referencia N° 6

EQUIPOS NECESARIOS PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO:

Balanza.- Debe tener una capacidad superior a la masa de la muestra más el recipiente de pesaje y una precisión de 0,1 g.

Tamices.- Son tejidos, de alambre y abertura cuadrada, y sus tamaños nominales de abertura pertenecen a las series que se indican en la Tabla III- 4, esta serie de tamaños numerales esta normada por IBNORCA.

Tabla III- 4: Tamaños Nominales De Abertura Para Granulometrías Del Agregado

Tamaños nominales de abertura	
Mm	ASTM
75	(3")
63	(2 ½")
50	(2")
37,5	(1 ½")
25,0	(1")
19	(¾")
12,5	(1/2")
9,5	(3/8")
6,3	(1/4")
4,75	(Nº 4)
25,0	(Nº 8)
2,0	(Nº 10)
1,18	(Nº 16)
0,6	(Nº 30)
0,3	(Nº 50)
0,15	(Nº 100)
0,075	(Nº 200)

Fuente: Referencia 6

Los marcos de los tamices deben ser metálicos y suficientemente rígidos y firmes para fijar y ajustar las telas de alambre, a fin de evitar pérdidas de material durante el tamizado y alteraciones en la abertura de las mallas. Deben ser circulares, con diámetros de 200 mm y 300 mm, preferentemente para los gruesos.

Cada juego de tamices debe contar con un depósito que ajuste perfectamente, para la recepción del residuo más fino.

Cada juego de tamices debe contar con una tapa que ajuste perfectamente para evitar pérdidas de material.

Horno.- Provisto de circulación de aire y temperatura regulable para las condiciones del ensaye.

Herramientas y accesorios.- Espátulas, brochas, recipientes para secado, recipientes para pesaje, etc.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

- Se toma un tamaño de masa mínimo para muestra del material, por medio de un cuarteo previo, de acuerdo a las Tablas III- 5 y III- 6, donde se indica las cantidades aproximadas requeridas para el análisis granulométrico en función del tamaño máximo de partículas.

Tabla III- 5: Tamaño de muestra Para granulometrías de agregados finos

Tamiz	% Retenido	Masa mínima de la muestra (g)
4,75 mm	≤ 5 %	500
2,36mm	≤ 5 %	100

Fuente: Referencia 6

Tabla III- 6: Tamaño de muestra Para granulometrías de agregados gruesos

Absoluto Tamaño máximo Da (mm)	Masa mínima de la muestra (kg)
75	32
63	25
50	20
37,5	16
25,0	10
19	8
12,5	5
9,5	4

Fuente: Referencia 6

- Se coloca la muestra en el juego de tamices que se detalla en la Tabla III- 4
- El tamizado puede ser mecánico o manual.
- Luego se determina la masa final del material retenido en cada tamiz y del material que pasa por el tamiz de menor abertura, recogido en el depósito.
- Registrar la masa del retenido en cada tamiz con la aproximación que sea mayor entre 1g y 0,1% de la pesada.

CÁLCULOS:

Para la realización de los cálculos del ensayo se realizan los siguientes pasos;

- Sumar y registrar la masa total (100%) de las fracciones retenidas en todos los tamices y en el depósito receptor. Esta suma no debe diferir de la masa inicial registrada en 13 en más de 3% para los áridos finos y de 0,5% para los áridos gruesos.

- Calcular el porcentaje parcial retenido en cada tamiz, referido a la masa total de las fracciones retenidas, aproximando al 1%.
- Expresar la granulometría como porcentaje acumulado que pasa, indicando como primer resultado el del menor tamiz en que pasa el 100% y como último resultado, el del primer tamiz en que el porcentaje sea 0%.
- Adicionalmente la granulometría se puede expresar de acuerdo con cualquiera de las siguientes formas:
 - ☀ Como porcentaje acumulado retenido, indicando como primer resultado el del menor tamiz en que queda retenido un porcentaje igual a 0%, y como último resultado el del primer tamiz en que el porcentaje acumulado retenido sea 100%.
 - ☀ Como porcentaje parcial retenido.

3.2.2.2.2. MÓDULO DE FINURA (M.F).

El módulo de finura se calcula sumando los porcentajes retenidos acumulados en los tamices estándar (nombrados mas abajo) y dividiendo la suma entre 100.

Cambios significativos en la granulometría de la arena tienen una repercusión importante en la demanda de agua y, en consecuencia, en la trabajabilidad del hormigón, por lo que si hubiese una variación significativa en la granulometría de la arena deben hacerse ajustes en el aglomerante para conservar la resistencia del hormigón.

Para no tener que recalcular la dosificación del hormigón el módulo de finura del agregado fino, entre envíos sucesivos, no debe variar en más de ± 0.2 .

Los tamices especificados que deben usarse en la determinación del módulo de finura son:

No. 100, No. 50, No. 30, No. 16, No. 8, No. 4, $\frac{3}{8}$ ", $\frac{3}{4}$ ", $1\frac{1}{2}$ ", 3" y de 6"

Y el módulo de finura será determinado con la siguiente ecuación:

$$MF = \frac{\sum \% \text{retenido}_{\text{acumulado}} (6'' + 3'' + 1\frac{1}{2}'' + \frac{3}{4}'' + \frac{3}{8}'' + N^{\circ}4 + N^{\circ}8 + N^{\circ}16 + N^{\circ}30 + N^{\circ}50 + N^{\circ}100)}{100} \quad \dots \text{Ecuación III- 1}$$

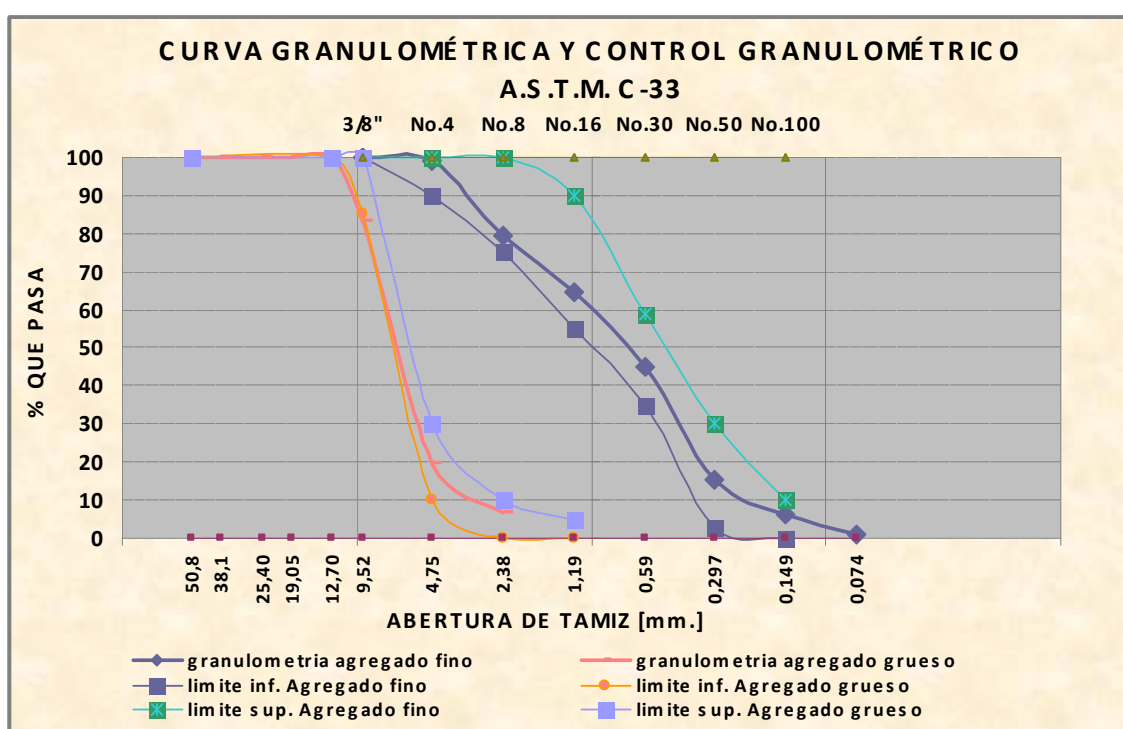
3.2.2.2.3. CURVAS GRANULOMÉTRICAS.

Una vez tamizado el árido se grafica en papel semilogarítmico el porcentaje que pasa por cada tamiz vs. las aberturas de los tamices en mm.

En general las normas establecen límites de acuerdo al tamaño nominal del agregado entre los cuales se deben encontrar las curvas granulométricas, para considerar al árido como adecuado para el preparar el Hormigón.

La definición de tamaño máximo se vuelve importante al seleccionar proporciones para el hormigón que resulten coherentes con los requisitos de agua para la mezcla, dimensiones del encofrado y espaciamiento entre los aceros de refuerzo.

Figura III- 4: Límites Granulométricos (Norma ASTM-C33)



Fuente: Elaboración Propia En Base A Los Datos De Los Agregados Utilizados En El Proyecto

En la Figura III- 4 se muestran las curvas granulométricas correspondientes a los agregados finos y gruesos utilizados en el proyecto en las que aparecen dentro de sus respectivos límites superior e inferior, según se especifican en la ASTM C33. Esas gráficas de gradaciones revelan tendencias que son difíciles de estimar a partir de datos tabulados.

3.2.2.2.4. ENSAYO PARA DETERMINAR EL PESO UNITARIO O PESO ESPECÍFICO APARENTE (ASTM E 30 ASTM C 29).⁴

Este método de ensayo establece los procedimientos para determinar el Peso específico de los áridos.

EQUIPOS NECESARIOS PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO:

Balanza.- De capacidad superior a la masa de la medida llena con un árido de Peso específico aparente de 2.000 kg/m^3 y una precisión de 0,1 g.

Horno.- Con circulación de aire y temperatura regulable para las condiciones del ensaye.

Varilla Pisón.- Barra cilíndrica de acero liso de 16 mm de diámetro y 600 mm de longitud, con sus extremos terminados en semiesferas de 16 mm de diámetro.

Medidas.- Metálicas, impermeables y provistas de dos asas. Su forma interior debe ser un cilindro recto abierto por una de sus caras planas y rectificado para asegurar sus dimensiones.

Dimensiones.- Las dimensiones son las que se indican en la Tabla III- 7 y podrán emplearse para áridos de tamaño máximo nominal igual o inferior a los señalados en la primera columna.

Tabla III- 7: Dimensiones De Las Medidas De Los Cilindros Para La Realización Del Ensayo "Determinación Del Peso Unitario"

Tamaño Máximo Nominal de áridos (mm)	Capacidad Volumétrica		Diámetro Interior (mm)	Altura Interior (mm)	Espesor mínimo del metal	
	m ³	l			Base (mm)	Pared (mm)
16	0,003	3	155 ± 2	160 ± 2	5	2,5
25	0,010	10	205 ± 2	305 ± 2	5	2,5
50	0,015	15	255 ± 2	295 ± 2	5	3,0
100	0,030	30	355 ± 2	305 ± 2	5	3,0

Fuente: Referencia 6

⁴Referencia N° 6

Refuerzos.- Además de cumplir con los espesores mínimos indicados en la Tabla III- 7, las medidas de 15 y 30 litros serán reforzados en sus bordes por una pletina de 3 a 5 mm de espesor y 40 mm de ancho, a fin de conservar su forma y dimensiones interiores en el trabajo brusco que requiera este ensaye.

Determinación de la capacidad volumétrica de la medida.- Determinar el volumen de la medida con una precisión de 0,1%, pesando la masa de agua que llena la medida y dividiendo esta masa por la densidad del agua a la temperatura en que se encuentra.

Herramientas Y Accesorios.- Palas, brocha, caja para secado, etc., necesarias para los procedimientos establecidos en el presente método.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Determinación Del Peso Específico Aparente Compactado.-

- Llenar la medida en tres capas de espesores aproximadamente iguales, teniendo la última capa un exceso de áridos por sobre el borde de la medida.
- Emparejar cada capa y compacte mediante 25 golpes de pisón uniformemente repartidos.
- Apisonar la capa inferior en todo su espesor evitando dañar el fondo de la medida.
- Apisonar las capas superiores haciendo penetrar el pisón en la capa inmediatamente inferior.
- Eliminar el exceso de áridos empleando la varilla pisón como regla de enrase, sin presionar
- Determinar y registrar la masa (kg/m^3) de áridos compactado que llena la medida, aproximando al 0,1 %.

Determinación Del Peso Específico Aparente Suelto.-

- Llenar la medida con una pala, descargándola desde una altura de aproximadamente 5 cm sobre el borde superior de la medida.
- Desplazar la pala o poruña alrededor del borde, distribuyendo uniformemente el vaciado.

- Eliminar el exceso de pétreo empleando la varilla pisón como regla de enrase, sin presionar
- Determinar y registrar la masa (kg/m^3) de áridos suelto que llena la medida aproximando al 0,1%

CÁLCULOS:

Peso Específico Aparente Compactado (ρ_{ac}).

Calcular el Peso específico aparente compactado para cada ensaye según la fórmula siguiente:

$$\rho_{ac} (\text{kg} / \text{m}^3) = \frac{mc}{V} \dots\dots\dots \text{Ecuación III- 2}$$

Donde:

mc : Masa de áridos compactado que llena la medida (kg/m^3)

V : Capacidad volumétrica de la medida (m^3).

Peso Específico Aparente Suelto (ρ_{as}) .-

- Calcular el Peso específico aparente suelto para cada ensaye según la fórmula siguiente, aproximando a 1 kg/m^3 .

$$\rho_{as} (\text{kg} / \text{m}^3) = \frac{ms}{V} \dots\dots\dots \text{Ecuación III- 3}$$

Donde:

ms : Masa del áridos suelto que llena la medida (kg/m^3).

V : Capacidad volumétrica de la medida (m^3).

- Calcular el Peso especifico aparente como el promedio aritmético de dos ensayes sobre muestras gemelas.

3.2.2.2.5. MÉTODO PARA DETERMINAR EL PESO ESPECÍFICO REAL, EL PESO ESPECÍFICO NETO Y LA ABSORCIÓN EN ÁRIDOS GRUESOS (ASTM C 127 AASHTO T85).⁵

Este método establece los procedimientos para determinar el Peso específico real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos.

EQUIPOS Y MATERIALES:

Balanza.- De capacidad superior a la masa del canastillo portamuestra más la masa de la muestra de ensaye y una precisión mínima de 1 g.

Horno.- Con circulación de aire y temperatura regulable para las condiciones del ensaye.

Canastillo Portamuestra.- De alambre de acero inoxidable lo suficientemente resistente para soportar el peso de la muestra, con malla de abertura igual o inferior que 2 mm y de capacidad igual o superior a 4 lit. Además, debe estar provisto de un dispositivo que permita suspenderlo del platillo de la balanza.

Estanque.- Impermeable, inoxidable, de forma y capacidad tal que permita contener totalmente y con holgura el canastillo portamuestra, de acuerdo con el procedimiento especificado en este método.

Recipientes.- Deben estar limpios, de material resistente, estancos y de capacidad suficiente para contener la muestra de ensaye.

TAMAÑO DE LA MUESTRA DE ENSAYE

La cantidad mínima de muestra para el ensaye se determina según la Tabla III- 8, en función del tamaño máximo nominal del árido.

⁵ Referencia N° 6

Tabla III- 8: Cantidad Mínima De Muestra Según El Tamaño Nominal El Agregado Grueso Para Determinar El Peso Específico De Los Agregados Gruesos

Tamaño máximo nominal (mm)	Cantidad mínima de muestra (g)
12,5 (1/2)	2.000
19 (3/4)	3.000
25,0 (1")	4.000
37,5 (1 1/2")	5.000
50 (2")	8.000

Fuente: Referencia 6

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

Efectuar las siguientes pesadas a la muestra de ensaye:

Pesada Al Aire Ambiente Del Pétreo Saturado Superficialmente Seco.-

- ⊕ Retirar la muestra del agua y seque superficialmente las partículas, haciéndolas rodar sobre un paño absorbente húmedo hasta que desaparezca la película visible de agua adherida. Seque individualmente las partículas mayores manteniendo el áridos, ya secado superficialmente, cubierto por un paño húmedo hasta el momento de pesar. Efectúe toda la operación en el menor tiempo posible.
- ⊕ Determinar inmediatamente la masa de áridos saturado superficialmente seco, por pesada al aire ambiente, aproximando a 1 g. Registrar su valor como M_{SSS} .

Pesada Sumergida.-

- ⊕ Colocar la muestra inmediatamente en el canastillo porta muestra.
- ⊕ Sumergir el canastillo en agua a $20 \pm 3^\circ \text{C}$, por un período de al menos 3 min.
- ⊕ Determinar la masa sumergida, aproximando a 1 g. Registrar su valor como M_{SUM} .

Pesada Al Aire Ambiente De Áridos Seco.-

- ⊕ Retirar la muestra del canastillo y vacíela completamente del recipiente, cuidando de no dejar partículas atrapadas.

- ⊕ Secar la muestra hasta masa constante en horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$.
- ⊕ Enfriar la muestra hasta temperatura ambiente, en lo posible dentro de un recipiente protegido, para evitar la absorción de humedad del aire.
- ⊕ Determinar la masa de la muestra seca, por pesada al aire ambiente, aproximando a 1 g. Registrar su valor como M_S .

CÁLCULOS:

Peso Específico Real (ρ_R).-

- ⊕ *Peso específico real de los áridos saturado superficialmente seco (ρ_{RT})* .- Calcular el Peso específico real de áridos saturado superficialmente seco según la fórmula siguiente, aproximando a 1 kg/m^3 .

$$\rho_{RT} (\text{kg/m}^3) = \frac{M_{SSS}}{M_{SSS} - M_{SUM}} \cdot 1.000 (\text{kg/m}^3) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación III- 4}$$

- ⊕ *Peso específico real de áridos seco (ρ_{RS})*.- Calcular el Peso específico real de áridos seco según la fórmula siguiente, aproximando a 1 Kg./m^3 :

$$\rho_{RS} (\text{kg/m}^3) = \frac{M_S}{M_{SSS} - M_{SUM}} \cdot 1.000 (\text{kg/m}^3) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación III- 5}$$

Peso Específico Neto (P_N).-

Calcular el Peso específico neto según la fórmula siguiente, aproximado a 1 kg/m^3 .

$$\rho_N (\text{kg/m}^3) = \frac{M_S}{M_S - M_{SUM}} \cdot 1.000 (\text{kg/m}^3) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación III- 6}$$

Absorción (α) .-

Calcular la absorción según la fórmula siguiente, aproximando a la centésima en porcentaje.

$$\alpha (\%) = \frac{M_{SSS} - M_S}{M_S} \cdot 100 \quad \text{..... Ecuación III- 7}$$

Donde:

ρ : Peso específico (kg/m³)

α : Absorción (%)

M_{SUM} : Masa del p áridos sumergida (g).

M_{SSS} : Masa del áridos saturado superficialmente seco (g).

M_S : Masa del áridos seco (g).

3.2.2.2.6. MÉTODO PARA DETERMINAR EL PESO ESPECÍFICO REAL, EL PESO ESPECÍFICO NETO Y LA ABSORCIÓN DE AGUA EN ÁRIDOS FINOS (ASTM C 128 AASHTO T84).⁶

Este método establece los procedimientos para determinar el Peso específico real, el Peso específico neto y la absorción de agua de los áridos finos.

EQUIPOS Y MATERIALES:

Balanza.- De capacidad superior a 1 kg y una precisión mínima de 0,1 g.

Horno.- Con circulación de aire y temperatura regulable para las condiciones del ensaye.

Recipientes.- Limpios, de material resistente, estancos y de capacidad suficiente para contener la muestra del ensaye.

⁶ Referencia 6

Matraz.- Es un matraz aforado en el que se pueda introducir fácilmente la muestra de ensaye. Debe llevar una marca de calibración que indique el volumen contenido con una precisión de $\pm 0,1$ ml. Dicho volumen excederá a lo menos en un 50 % al volumen aparente de la muestra de áridos fino. Se recomienda emplear un matraz de 500 cm³ de capacidad. También puede emplearse un picnómetro.

Molde.- Con forma tronco - cónica, de 40 ± 3 mm de diámetro en la parte superior, 90 ± 3 mm de diámetro en la parte inferior y 75 ± 3 mm de altura. Confeccionado con una plancha metálica de un espesor igual o superior que 0,8 mm.

Pisón.- Es una varilla metálica, con uno de sus extremos de sección plana y circular, de 25 ± 3 mm de diámetro. Debe tener una masa de 340 ± 15 g.

MUESTRA DE ENSAYE:

Para cada ensaye se usa una cantidad de áridos fino superior a 50 g e inferior a 500g.

Preparación de la muestra de ensaye.-

- ✚ Cortar el material retenido en tamiz de referencia 4,75mm (Nº 4)
- ✚ Secar el árido en horno a una temperatura de 110 ± 5 ° C, durante 24 h.
- ✚ Cubrir el árido en su totalidad con el mínimo de agua a temperatura ambiente, necesaria para asegurar su saturación en un período de 24 ± 4 h.

PROCEDIMIENTO:

- ✚ Eliminar paulatinamente el exceso de agua, evitando la pérdida de finos. Revolver la muestra frecuentemente para asegurar un secado uniforme, hasta llevarla a su condición suelta.
- ✚ Colocar el molde cónico sujeto firmemente contra una superficie lisa, plana y no absorbente, con su diámetro mayor hacia abajo, llénelo con el árido en condición suelta en una capa y enrase.
- ✚ Compactar suavemente con 25 golpes de pisón uniformemente distribuidos sobre la superficie. En cada golpe deje caer el pisón libremente desde una altura de 5 mm

sobre la superficie del áridos. Dicha altura debe conservarse, ajustándola a la nueva elevación de la muestra después de cada golpe.

- ⊕ Remover cuidadosamente todo material sobrante en la superficie. Levantar el molde verticalmente. Si hay humedad libre la muestra conservará la forma del cono. En este caso elimine el exceso de humedad, repitiendo el procedimiento, a intervalos frecuentes, desde el principio.
- ⊕ Cuando, al retirar el molde, el áridos caiga suavemente según su talud natural, será indicación que éste ha alcanzado la condición saturada superficialmente seca.
- ⊕ Inmediatamente que el árido alcance la condición de saturado superficialmente seco, obtenga el tamaño de muestra de ensaye requerido, pesar y registrar su masa.
- ⊕ Colocar la muestra en el matraz y cubrir con agua a una temperatura de $20 \pm 3^\circ \text{C}$, hasta alcanzar aproximadamente $2/3$ del volumen del matraz.
- ⊕ Agitar el matraz a fin de eliminar burbujas de aire golpeándolo ligeramente contra la palma de la mano. En caso de áridos muy finos, se debe utilizar una bomba de vacío.
- ⊕ Dejar reposar durante 1 h manteniendo una temperatura de $20 \pm 3^\circ \text{C}$
- ⊕ Llenar con agua a $20 \pm 3^\circ \text{C}$ hasta la marca de calibración, agitar y dejar reposar un instante.
- ⊕ Medir y registrar la masa total del matraz con la muestra de ensaye y el agua (mm).
- ⊕ Sacar la muestra del matraz, evitando pérdidas de material, y secar hasta masa constante en horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$. Dejar enfriar a temperatura ambiente. Determinar y registrar la masa de la muestra de ensaye en condición seca (ms).
- ⊕ Llenar el matraz solamente con agua a una temperatura de $20 \pm 3^\circ \text{C}$ hasta la marca de calibración. Medir y registrar la masa del matraz con agua (Ma).

CÁLCULOS:

Peso Específico Real.-

- ☀ **Peso específico Real de áridos saturado superficialmente seco (ρ_{RT}).**.- Calcular el peso específico real de áridos saturado superficialmente seco, según la fórmula siguiente, aproximando a 1 kg/m³:

$$\rho_{RT} \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{M_{SSS}}{Ma + M_{SSS} + M_m} \cdot 1.000 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación III- 8}$$

- ☀ **Peso específico Real de áridos Seco (ρ_{RS}).**.- Calcular el peso específico real del áridos seco, según la fórmula siguiente, aproximando a 1 Kg./m³:

$$\rho_{RS} \text{ (kg / m}^3\text{)} = \frac{M_s}{Ma + M_{SSS} - Mm} \cdot 1.000 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación III- 9}$$

Peso Específico Neto (ρ_N).-

Calcular el peso específico neto, según la fórmula siguiente, aproximando a 1 kg/m³:

$$\rho_N \text{ (kg / m}^3\text{)} = \frac{M_s}{Ma + M_s - Mm} \cdot 1000 \text{ (kg / m}^3\text{)} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación III- 10}$$

Absorción (α)..- Calcular la absorción , según la fórmula siguiente, aproximando a la centésima, en porcentaje

$$\alpha \text{ (}\% \text{)} = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación III- 11}$$

Donde:

ρ : Densidad (kg/m³)

α : Absorción (%)

M_s : Masa de la muestra seca (g).

M_{SSS} : Masa de la muestra saturada superficialmente seca (g).

Ma : Masa del matraz con agua hasta la marca de calibración (g).

Mm : Masa del matraz con la muestra más agua hasta la marca de calibración (g)

3.2.2.3. DOSIFICACIÓN DE AGREGADOS.

Para la dosificación de agregado se hizo un análisis por peso y granulométrico por mediante el método propuesto por la norma DIN 1045 que consiste en jugar con los porcentajes de los agregados (α y β) en la granulometría general (C_1) hasta que esta se ajuste entre los límites (A, B, C y D) propuestos por el método ver capítulo II.1.1.3.

La ecuación de ajuste de la curva general C_1 viene dada de la siguiente forma:

$$C_1 = \alpha * \%pasa\ de\ arena + \beta * \%pasa\ de\ grava \dots\dots\dots \text{Ecuación III- 12}$$

Donde:

α = porcentaje total de arena que forma parte en la dosificación de agregados

β = porcentaje total de grava que forma parte en la dosificación de agregados

3.3. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA SELECCIÓN DEL ADITIVO MODIFICADOR DE AZUFRE.

Las mezclas de agregados y azufre no presentan pastosidad y son difíciles de trabajar ya que tienen un fraguado rápido además de carecer de una homogeneidad por esta razón es necesario la incorporación de un aditivo que ayude a mejorar estas propiedades permitiendo un mejor desempeño del hormigón y mortero a base de azufre tanto en resistencia como en trabajabilidad.

Buscando el aditivo que mejore las características del hormigón se procedió a realizar la selección de dos tipos de aditivos con los siguientes criterios:

- ⊕ Son fáciles de adquirir en nuestro medio
- ⊕ Son económicamente bajos
- ⊕ Al adicionar el aditivo este ayude en la cristalización del azufre, mejorando así la resistencia del hormigón.
- ⊕ El aditivo permitirá un tiempo de fraguado adecuado para la manipulación del hormigón

Llegándose a seleccionar dos tipos de aditivos denominándolos de la siguiente manera:

Tabla III- 9: Selección De Aditivos

SELECCIÓN DE ADITIVOS	
CÓDIGO	MATERIAL
A	Resina de poli estireno
B	Flux de Goma
C	Caucho (reciclado de llantas)

Fuente: Elaboración Propia

Figura III- 5: Aditivos Modificadores del Azufre (Resina de poli estireno izquierda, Flux de goma centro, Caucho derecha)



Fuente: Elaboración Propia

Estos aditivos fueron adheridos en distintos porcentajes con relación al azufre en mezclas de morteros para poder hacer las siguientes observaciones que las mismas puedan tener:

- ⊕ Homogeneidad: una mezcla uniforme con una buena pastosidad
- ⊕ Tiempo de fraguado adecuado, que permite su manipulación por tiempo necesario en la confección de piezas de hormigón
- ⊕ Resistencia a la compresión obtener la máxima resistencia a la compresión entre los cubos de mortero con distintos aditivos

3.3.1. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN MORTEROS A BASE DE AZUFRE.

Este ensayo esta basado en la norma (ASTM C109) resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico⁷ utilizado con el fin de elegir el aditivo que nos de la mayor resistencia a la compresión observando también que la mezcla obtenida con este aditivo tenga un tiempo de fraguado aceptable, sea homogénea y de fácil manipulación.

EQUIPO UTILIZADO:

Balanza.-con capacidad de 2.000 g y precisión de 0.5 g.

Termómetro.- para medir la temperatura del azufre en el momento de realizarse el mezclado

⁷ Referencia 6

Moldes.-Cubos de 50,8 mm (2") con caras interiores, planas y lisas con una variación máxima de 0,025 mm

Cocina.- con dos hornallas una para fundir el azufre y otra para calentar la arena

Recipientes de metal.- para la contener los materiales en caliente

Ropa de protección.- overoles, guantes, barbijos, lentes de protección y cascos.

Prensa para el ensayo a compresión de los cubos de mortero a base de azufre

PROCEDIMIENTO:

Dosificación De Morteros A Base De Azufre.-

Debido a que el aglomerante está constituido por azufre y aditivo, se emplea una relación aditivo/azufre (Ad/Az) como referencia para hacer variar la cantidad de aditivo para el diseño de mezcla

Las dosificaciones para el ensayo se hicieron de un 70 % de arena y un 30 % de aglomerante, en el aglomerante se hizo variar la relación aditivo/azufre en los siguientes intervalos: 0.05, 0.1, 0.15 y 0.2. En Tabla III- 10 se muestran las dosificaciones para la elaboración para 3 cubos de 5x5x5cm.

Tabla III- 10: Tabla De Dosificación Para Morteros Con Distintos Aditivos

DOSIFICACIÓN DE MATERIALES PARA MORTEROS (grs.)													
Ad/Az=		0,05			0,1			0,15			0,2		
ADITIVO	Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	A	A-I			A-II			A-III			A-IV		
	B	B-I			B-II			B-III			B-IV		
	C	C-I			C-II			C-III			C-IV		

Fuente: Referencia 3

Elaboración De Los Cubos De Mortero A Base De Azufre.-

Para la elaboración del mortero se siguieron los siguientes pasos:

- ✚ Calentar la arena en un recipiente metálico a una temperatura no mayor a 130°C

- ⊕ Luego se funde el azufre con el aditivo a una temperatura de 115°C
- ⊕ Se mezcla el azufre modificado fundido con la arena caliente obteniéndose la mezcla de mortero que posteriormente se vacían en los moldes
- ⊕ Se observa la homogeneidad y la maleabilidad de la mezcla obtenida de cada tipo de dosificación puesto que estos factores juegan un rol muy importante en la selección del aditivo.

Ensayo A La Compresión Simple De Los Cubos De Mortero A Base De Azufre.-

Se midieron las resistencias a la compresión de los cubos mediante la norma (ASTM C 39) a una edad del mortero de un (1) día en la prensa hidráulica que se tiene en el laboratorio de suelos y hormigones de la UAJMS.

MÉTODO DE ANÁLISIS PARA LA SELECCIÓN DEL ADITIVO MODIFICADOR DEL AZUFRE:

Luego de obtener los valores de las resistencias de los cubos de mortero de azufre se realizó un análisis comparativo entre textura o acabado de los morteros, homogeneidad de la mezcla en el vaciado y resistencia a la compresión simple de cada tipo de dosificación. Y poder elegir el aditivo que cumpla con lo requerido para la elaboración de hormigón a base de azufre.

3.4. METODOLOGÍA PARA DETERMINAR EL DISEÑO DE MEZCLA ÓPTIMO PARA LA ELABORACIÓN DE HORMIGÓN DE AZUFRE.

Una vez elegido el aditivo modificador se procedió a realizar dosificaciones de mezclas de hormigón variando los porcentajes de aglomerante y la relación aditivo/azufre con el fin de obtener el porcentaje óptimo de azufre modificado para un diseño de mezcla que tenga la máxima resistencia a compresión.

Por cuestiones económicas para este ensayo se elaboraron probetas de 10 cm. De diámetro por 20 cm de alto para evitar el uso excesivo de azufre ya que estas probetas son un tercio del volumen de las probetas convencionales de 15cm de diámetro por 30 cm. de alto.

3.4.1. DISEÑO DE DOSIFICACIONES DE HORMIGÓN DE AZUFRE POR EL MÉTODO DE DISEÑO FACTORIAL 4^2 .

Para el diseño de dosificaciones se utilizó un método de diseño experimental que sería el diseño factorial 4^2 este método nos permite hacer una tabla de diseño de dosificaciones (Tabla III- 11) haciendo variar dos parámetros: el porcentaje de aglomerante (azufre modificado) y la relación aditivo/azufre.

Tabla III- 11: Diseño De Dosificaciones Por El Modelo Factorial 4^2

TABLA DISEÑO DE DOSIFICACIONES POR EL MODELO FACTORIAL 4^2					
% DE AZUFRE MODIFIC.=		(A') = 20%	(B') = 25%	(C') = 30%	(D') = 35%
RELACIÓN (Ad/Az)	(A) = 0,075	A - A'	A - B'	A - C'	A - D'
	(B) = 0,100	B - A'	B - B'	B - C'	B - D'
	(C) = 0,125	C - A'	C - B'	C - C'	C - D'
	(D) = 0,150	D - A'	D - B'	D - C'	D - D'

Fuente: Referencia 3

Como se muestra en Tabla III- 11 a cada tipo de dosificación se le asignó un código y por cada tipo de dosificación se elaboraron 4 probetas para hacer un análisis estadístico de validación individual por dosificación.

3.4.2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO UTILIZADO.

Mezcladora para Hormigón de Azufre.- Esta mezcladora es de tamaño mediano y tiene una capacidad de 50lts. Para poder utilizar esta mezcladora en la elaboración de hormigones a base de azufre se hicieron las siguientes modificaciones:

- ✦ Se adaptó un sistema de calentamiento que consta de 3 calentadores a gas colocados al rededor del tambor para inducir calor en el interior del mismo

- ⊕ Se le colocó un recubrimiento de fibra de vidrio al rededor del tambor para evitar que el calor producido por los calentadores no se libere al exterior y mantenga un calor uniforme en el interior del tambor.
- ⊕ Para evitar una posible reacción química entre el acero y el azufre en el momento del mezclado, el interior del tambor fue forrado con panchas de acero inoxidable y las aspas se hicieron de platino de acero inoxidable.
- ⊕ En la parte exterior cerca de la boca del tambor se colocó un termómetro el cual permite hacer un control de temperaturas en el momento del mezclado

Moldes.- Los moldes utilizados fueron tienen una forma cilíndrica, de 10cm de diámetro y 20 cm de altura. Confeccionado con tubo metálico de un espesor igual a 0,8 mm. Con bases de plancha metálica de 1 mm de espesor.

Equipo de protección.- Cuando se trabajan con sustancias químicas inestables como el azufre es necesario contar la protección adecuada así que se hizo la compra del siguiente equipo de seguridad:

- ⊕ Overoles: resistentes al calor
- ⊕ Barbijos: para evitar la inhalación de gases desprendidos por el azufre durante el proceso de fundición, mezclado y elaboración de las probetas
- ⊕ Guantes: guantes de cuero para la manipulación de la mezcla en caliente y guantes de goma para la manipulación del azufre en frío
- ⊕ Casos, botas, lentes, etc.

Balanza.- Con capacidad de 2.000 g y precisión de 0.5 g.

Termómetro.- Para medir la temperatura del azufre en el momento de realizarse el mezclado

Recipientes metálicos y badilejos: Para la contener y manipular los materiales en caliente

Prensa hidráulica: Utilizado para el ensayo a compresión de las probetas de hormigón a base de azufre. La prensa utilizada es una prensa manual análoga para ensaye a

compresión, alcanza una medición de 1500 KN y cuenta con un manómetro Helicoidal. Esta prensa se encuentra ubicada en el laboratorio de suelos y hormigones de la UAJMS en zona El Tejar

3.4.3. PROCEDIMIENTO EMPLEADO PARA LA ELABORACIÓN DE PROBETAS.

Se elaboraron 4 probetas por cada tipo de dosificación haciendo el siguiente procedimiento:

- ✚ En primer lugar se procedió al pesado de los agregados, el azufre y el aditivo de acuerdo al diseño de dosificaciones mostrado anteriormente.
- ✚ Luego tener listos los componentes del H°S° se encienden los calentadores de la maquina mezcladora para que esta vaya ganando calor controlando en su termómetro que la temperatura no pase de los 100 °C.
- ✚ Se calientan los agregados en un horno a una temperatura constante no mayor a los 120 °C durante un tiempo aproximado de 20 minutos.
- ✚ Se funde el azufre en un recipiente metálico a fuego lento para evitar que el azufre alcance una temperatura mayor a los 115 C° porque si esto ocurriese el azufre podría arder y desprender dióxido de azufre que irrita los ojos y provoca tos al ser inhalado, luego se incorpora el aditivo previamente mezclado si tiene mas componentes.
- ✚ Una vez que tenemos los agregados calientes y el azufre modificado fundido, se introduce la grava la arena y el azufre modificado en la mezcladora
- ✚ Como no se puede hacer el ensayo de revenimiento porque este esta en una alta temperatura haciendo difícil su manipulación , se hace observación visual de la pasta de hormigón obtenida del mezclado es homogénea para luego proceder a confeccionar las probetas
- ✚ Para elaboración de probetas se vacía el hormigón fresco en el molde (de 10cm de diametro x 20cm de alto ó 5cm x 5cm x 5cm) mediante tres capas de espesores aproximadamente iguales y de manera que la última capa exceda sobre el borde de la medida.
- ✚ Se compacta cada capa con una varilla pisón de 1.2 cm de diámetro distribuyendo los golpes en toda la sección, a razón de 20 golpes por capa

- ⊕ Después de compactar cada capa, golpear 10 o más veces los costados del molde hasta que no continúen apareciendo burbujas grandes de aire en la superficie de la capa compactada y se cierren los vacíos dejados por la varilla pisón.
- ⊕ a las 24 horas de su vaciado se procede al desmoldado de las probetas para luego someterlas al ensayo de compresión.
- ⊕ El hormigón a base de azufre tiene un fraguado y endurecimiento rápido obteniéndose aproximadamente el 70 % de su resistencia a la compresión en menos de 24 horas, además el H°S° no presenta el fenómeno de la retracción puesto que la temperatura necesaria para que se produzca un cambio volumétrico en este hormigón debe ser mayor a los 96 °C. Por dichas razones no se realiza el curado en las probetas de H°S°, que normalmente se hace en la elaboración de probetas de hormigón hidráulico.

3.4.4. ENSAYO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA A LA COMPRESIÓN.

Para la realización del ensayo de rotura de probetas a la compresión se utilizó el procedimiento de la norma (ASTM C 39 AASHTOT22) detallándose en los siguientes pasos:

- ⊕ Limpiar la superficie de las placas de la prensa y de las caras de ensaye de la probeta.
- ⊕ Colocar la probeta sobre la placa inferior de la prensa alineando su eje central con el centro de esta placa.
- ⊕ Asentar la placa superior de la prensa sobre la probeta, guiándola suavemente con la mano para obtener un apoyo de la placa lo más uniforme posible.
- ⊕ Aplicar la carga en forma continua y sin choques, a una velocidad uniforme, que permita cumplir las siguientes condiciones:
 - φ Alcanzar una franca rotura de la probeta en un tiempo igual o superior a 100 s.
 - φ No superar la velocidad de 0,35 N/mm²/s.
- ⊕ Registrar la carga máxima P, expresada en N.

Cálculos.-

Como resultado del ensayo prueba se calculo la resistencia a compresión simple soportada por probeta, utilizando la siguiente expresión:

$$R = \frac{P}{A} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación III- 13}$$

Donde:

R = Resistencia a la compresión simple, (kg/cm²)

P = Carga máxima soportada por el espécimen, (kg)

A = Área promedio de la sección transversal del espécimen, (cm²)

3.4.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MODELO FACTORIAL 4²

Se realiza un análisis estadístico de las resistencias a la compresión de las probetas dosificadas por el diseño modelo factorial 4². Haciendo una validación de las resistencias obtenidas por cada tipo de dosificación y sacando un promedio. Esto nos permite graficar curvas de resistencia dependientes del porcentaje de azufre modificado adherido al hormigón y la relación aditivo / azufre

De este análisis se obtiene el porcentaje óptimo de azufre modificado y su relación aditivo/azufre que permite obtener un diseño de mezcla óptimo para la elaboración del hormigón a base de azufre.

3.5. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE AZUFRE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON EL DISEÑO DE MEZCLA ÓPTIMO.

Empleando el diseño de mezcla óptima, se procedió a la elaboración de probetas (5cm x 5cm x 5cm) para evaluar el comportamiento de la resistencia a la compresión del Hormigón de Azufre en función del tiempo. Se realizaron ensayos a los 1, 3, 7, 14 y 28 días de edad de las probetas de Hormigón de Azufre.

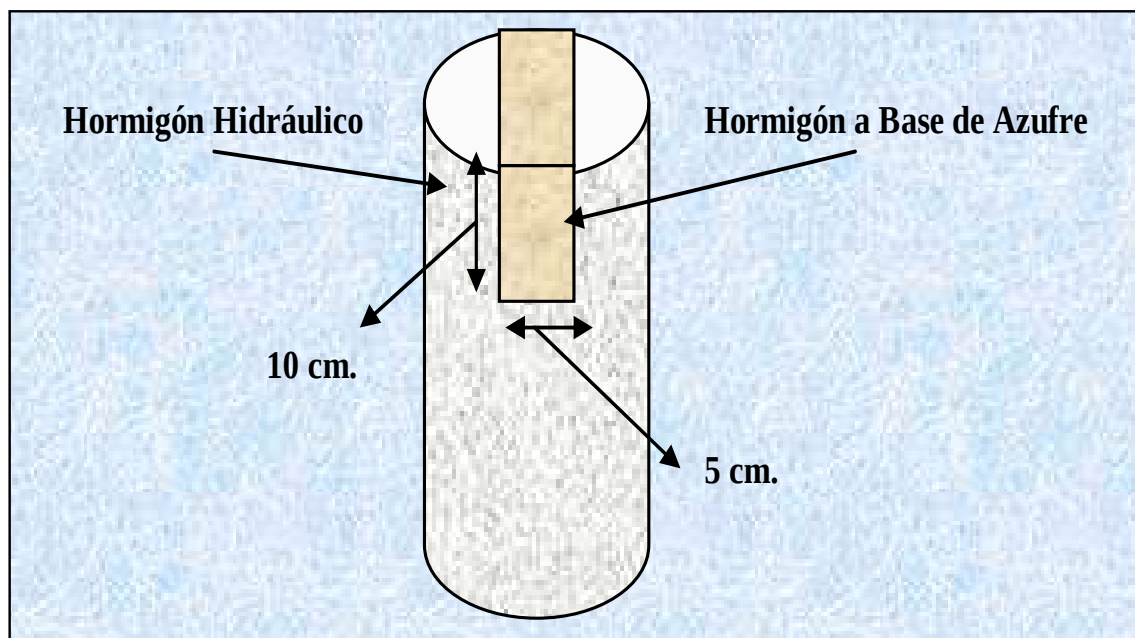
3.6. ELABORACIÓN DE PROBETAS DE HORMIGÓN CONVENCIONAL PARA REPRESENTAR EL MÉTODO DE REPARACIÓN DE LA FALLA.

El método consiste en realizar probetas de hormigón convencional las mismas que tendrá una dimensión de 20 cm. por 30 cm. (cilindros); estas probetas tienen una abertura en la parte media superior de unos 5 cm. y una profundidad de 10 cm., estas probetas deben ser curadas en agua el mayor tipo posible (7 a 28 días).

Una vez curadas las probetas se debe proceder al sellado de esta abertura con Hormigón a base de Azufre, este sellado se realizara con el método expuesto en el capítulo II subtítulo 2.2.3.3. que consiste en lanzar aire caliente a la abertura lo cual permite limpiar, secar y eliminar los elementos orgánicos para lograr una buena adhesión del material sellador.

Terminado el procedimiento anterior se esperara 24 horas para realizar la correspondiente ruptura de probetas, en donde se observara el comportamiento del elemento sellador cuando este es expuesto a cargas.

Figura III- 6: Esquema del proceso de confección de las probetas selladas con Hormigón a base de Azufre



Fuente: Elaboración Propia

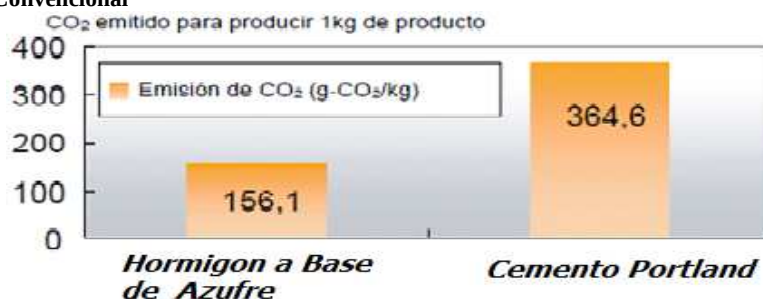
3.7. ANÁLISIS AMBIENTAL DE LA ALTERNATIVA EN ESTUDIO

La constante contaminación hoy en día es un tema muy importante ya que el planeta se encuentra en una situación crítica, donde el agua y la atmósfera son los elementos más contaminados y a su vez son los más indispensables, es por esta razón que necesitamos productos que dañen lo menos posible el medio ambiente.

El producto a emplear en la reparación de pavimentos (hormigón y mortero a base de azufre) tiene muchas cualidades entre las que destacan las referidas a la preservación del medio ambiente, es por esto que podemos señalar que el ahorro energético derivado de la utilización de azufre es considerable y se incrementa porque no se requiere agua, ya que el azufre reemplaza este componente y el cemento del hormigón convencional. Al referirnos al ahorro energético estamos diciendo que en la fabricación del producto no se necesita mucha maquinaria o grandes fábricas que son las principales contaminantes del medio ambiente puesto que estas despiden el dióxido de carbono principal contaminante de la atmósfera, además la no utilización de agua colabora para con el medio ambiente ya que dentro de un tiempo este producto (agua) será escaso el planeta.

En la Figura III-6 se muestra un diagrama de barras comparativo entre el Hormigón de Azufre y el cemento Pórtland, donde se compara la cantidad de dióxido de carbono emitido en la fabricación de 1kg. de producto pudiéndose observar que el grado de contaminación atmosférica en la elaboración de hormigón a base de azufre resulta ser menor que en la elaboración de cemento Pórtland.

Figura III- 7: Efectos De Ahorro De Energía Y Contaminación Atmosférica Entre El Hormigón A Base De Azufre Y El Hormigón Convencional



Fuente: Referencia 2

A diferencia del hormigón convencional el Hormigón a base de Azufre es un material que después de su uso se puede reutilizar en su totalidad disminuyendo así la contaminación al medio ambiente.

CAPÍTULO IV APLICACIÓN PRÁCTICA

4.1. SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL HORMIGÓN Y MORTERO DE AZUFRE.

4.1.1. AZUFRE.

El azufre utilizado en el proyecto fue proporcionado por la DISTRIBUIDORA DEL SUR siendo a su vez sucursal de la empresa TELCHI Ltda. Empresa que se encarga de purificar el azufre para su distribución a nivel nacional. Este azufre se lo compro en polvo tiene un nivel de pureza del 99.8 % de azufre y un contenido de materia orgánica igual al 0.003 %. Lo cual satisfacen los requerimientos mínimos del azufre para poder emplearse en la construcción según lo recomendado por el SUDIC que indica que el azufre debe tener un contenido de materia orgánica menor a 4 % y contenido de azufre mayor al 95%.

4.1.2. AGREGADOS.

4.1.2.1. SELECCIÓN DE AGREGADOS.

Los agregados obtenidos para el presente estudio fueron extraídos de una cantera ubicada en zona “LA VENTOLERA” aproximadamente a 23 Km de la ciudad de Tarija sobre la carretera Panamericana entre 34 y 35 grados longitud este y 99 grados latitud norte (como se muestra en la carta geográfica ver *ANEXO D*). Los agregados de la cantera indicada son arrastrados por el Río Tarija y son extraídos de forma mecánica mediante la maquina chancadora de propiedad del señor Henry Vargas. Obteniéndose un material aceptable con buenas propiedades mecánicas y con una granulometría uniforme.

4.1.2.2. CARACTERIZACIÓN U OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS.

4.1.2.2.1. CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO FINO

El agrado fino que se ha empleado para la presente investigación es de la cantera de la ventolera de la planta de extracción y trituración en La Pintada. Esta arena se la obtuvo lavada y limpia de materiales orgánicos

4.1.2.2.1.1. GRANULOMETRÍA Y MÓDULO DE FINURA.

GRANULOMETRÍA:

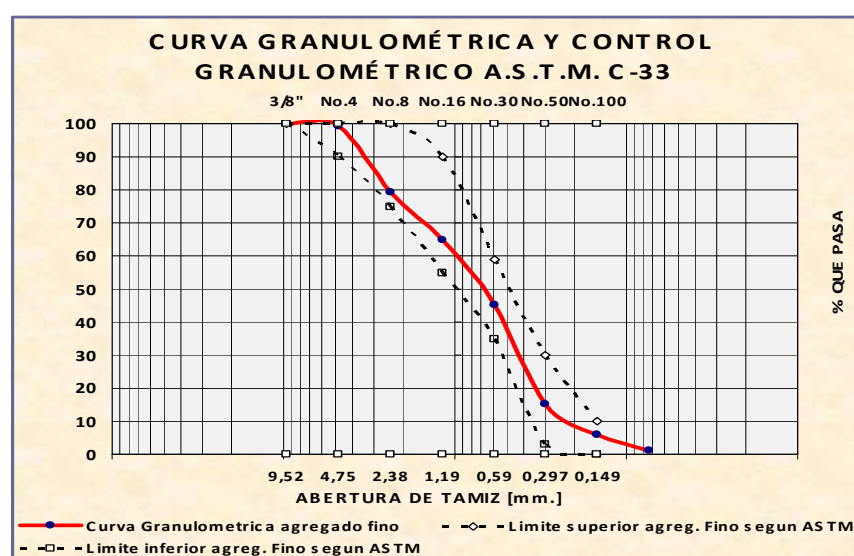
El ensayo realizado en el agregado fino muestra una curva granulométrica uniforme que se ajusta en los límites propuestos por la norma ASTM (Figura IV- 1) cumpliendo así los requisitos mínimos de gradación del agregado para su uso en la elaboración de hormigones.

Tabla IV- 1: Granulometría Del Agregado fino

GRANULOMETRÍA - AGREGADO FINO						
Peso Total (gr.)			996.50			
Tamices	Abertura	Peso	Peso Ret. acumulado		% que pasa del total	% Que Pasa según ASTM C-33
	(mm)	Ret. (gr)	(gr)	(%)		
3/8"	9,52	0,000	0,00	0,00	100,00	100
Nº 4	4,75	9,100	9,10	0,91	99,09	90 - 100
Nº 8	2,38	195,800	204,90	20,56	79,44	75 - 100
Nº 16	1,19	146,400	351,30	35,25	64,75	55 - 90
Nº 30	0,59	195,200	546,50	54,84	45,16	35 - 59
Nº 50	0,297	298,600	845,10	84,81	15,19	3 - 30
Nº 100	0,149	90,800	935,90	93,92	6,08	0 - 10
Nº 200	0,074	51,000	986,90	99,04	0,96	
Base		6,900	993,80	99,73		
SUMAS		993,80				
PERDIDAS		2,70				
Modulo de Finura MF =			2,90			

Fuente: Elaboración Propia

Figura IV- 1: Control Granulométrico Del Agregado Fino ASTM-C39



Fuente: Elaboración Propia

Observaciones: La muestra de material fue recolectada de la cantera de la Ventolera (Planta seleccionadora La Pintada)

MÓDULO DE FINURA: el módulo de finura del agregado fino se lo calculo partiendo de la granulometría utilizando la Ecuación III- 1 se determina que la ecuación para la obtención del modulo de finura para el agregado fino es:

$$MF = \frac{\sum \% \text{ ret } (3/8'' + N^{\circ} 4 + N^{\circ} 8 + N^{\circ} 16 + N^{\circ} 30 + N^{\circ} 50 + N^{\circ} 100)}{100} \quad \text{..... Ecuación IV- 1}$$

Obteniéndose un modulo de finura MF= 2,90

Cumpléndose con las limitaciones que se tiene en esta característica del agregado puesto que normalmente para producir hormigones normales el modulo de fineza debe de estar entre 2.3 y 3.1

4.1.2.2.1.2. PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN.

El ensayo realizado en el agregado fino para la determinación del peso especifico y la absorción muestra que el agregado tiene características de densidad optimas clasificándose como una roca sienita con un peso especifico igual a 2.73 gr/ cm³ y un porcentaje de absorción de 0.4% haciendo de este un agregado optimo para la fabricación de hormigones. En la Tabla IV- 2 se hace un resumen del procedimiento empleado para la obtención del peso específico y la absorción del agregado fino.

Tabla IV- 2: Peso Específico Y Absorción Del Agregado Fino

PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO		
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	MUESTRA
Temperatura del agua	°C	22
Peso muestra saturada superficie seca (B)	gr.	500
Peso del matraz (P)	gr	191
Peso muestra secada al horno (A)	gr	498
Peso matraz + agua (P1)	gr	670
Densidad del agua (Da)	gr/ cm ³	0,999
Peso del agua en el matraz Pa = P1 – P	gr	479
Volumen del agua en el matraz Va = Pa / Da	cm ³	479,479
Peso matraz + agua + muestra (P2)	gr	986
Peso del agua agregada en el matraz P ₃ = P ₂ – B – P	gr	295
Vol. del agua agregada al matraz V1 = P ₃ / Da	ml.	295,295
Peso Especifico Neto PN = A/ (Va – V1)	gr/ cm ³	2,7038
Peso Especifico Real del Árido Sat. Sup. seca ρ _{RT} = B/(Va – V1)	gr/ cm ³	2,7146
Peso Especifico Real Del Árido Seco ρ _{RS} =A/[(Va-V1)-(B-A)]	gr/ cm ³	2,7334
Porcentaje De Absorción α(%) = (B-A)*100/A	%	0,4016

Fuente: Elaboración Propia

4.1.2.2.1.3. PESO UNITARIO SUELTO Y COMPACTADO.

El peso unitario suelto y compactado del agregado fino se determino mediante el ensayo Para Determinar El Peso Unitario O Peso Específico Aparente (ASTM E 30 ASTM C 29) (ver subtítulo 3.2.2.2.4.). Obteniéndose así los valores promedios de 1,28 gr/ cm³ como peso unitario suelto y 1,57 gr/ cm³ como peso unitario compactado.

En Tablas IV- 3 y IV- 4 se hace un resumen del procedimiento empleado para la obtención del peso unitario suelto y compactado del agregado fino.

Tabla IV- 3: Peso Unitario Suelto Del Agregado Fino

PESO UNITARIO AGREGADO FINO SUELTO					
ENSAYO Nro	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cc)	P.(Recip.+muestra Suelta) (gr)	P.(muestra Suelta) (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cc)
1	2683	3000	6528,1	3845,10	1,281700
2	2683	3000	6570,5	3887,50	1,295833
3	2683	3000	6531,1	3848,10	1,282700
PROMEDIO					1,282

Fuente: Elaboración Propia

Tabla IV- 4: Peso Unitario Compactado Del Agregado Fino

PESO UNITARIO AGREGADO FINO COMPACTADO					
ENSAYO Nro	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cc)	P.(Recip.+muestra) (gr)	P.(muestra) (gr)	PESO UNITARIO COMPAC. (gr/cc)
1	2683	3000,00	7373,40	4690,40	1,563
2	2683	3000,00	7397,90	4714,90	1,572
3	2683	3000,00	7401,70	4718,70	1,573
PROMEDIO					1,568

Fuente: Elaboración Propia

4.1.2.2.1.4. RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO FINO.

A continuación se muestra un cuadro resumen de los resultados obtenidos de los ensayos realizados en el agregado fino.

Tabla IV- 5: Resumen De Las Características Del Agregado Fino

TABLA RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO FINO		
ENSAYO	VALORES	UNIDADES
<i>Módulo De Fineza</i>	2,90	----
<i>Peso Especifico Aparente</i>	2,73	gr/cm ³
<i>Peso Especifico En Condición Saturada</i>	2,71	gr/cm ³
<i>% De Absorción</i>	0,40	%
<i>Peso Unitario Suelto</i>	1,28	gr/cm ³
<i>Peso Unitario Compactado</i>	1,57	gr/cm ³

Fuente: Elaboración Propia

4.1.2.2.2. CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO GRUESO

4.1.2.2.2.1. GRANULOMETRÍA Y MÓDULO DE FINURA.

GRANULOMETRÍA:

El ensayo de granulometría realizado en el agregado grueso muestra una curva granulométrica uniforme que se ajusta en los límites propuestos por la norma ASTM (Figura IV- 2) cumpliendo así los requisitos mínimos de gradación del agregado para su uso en la elaboración de hormigones.

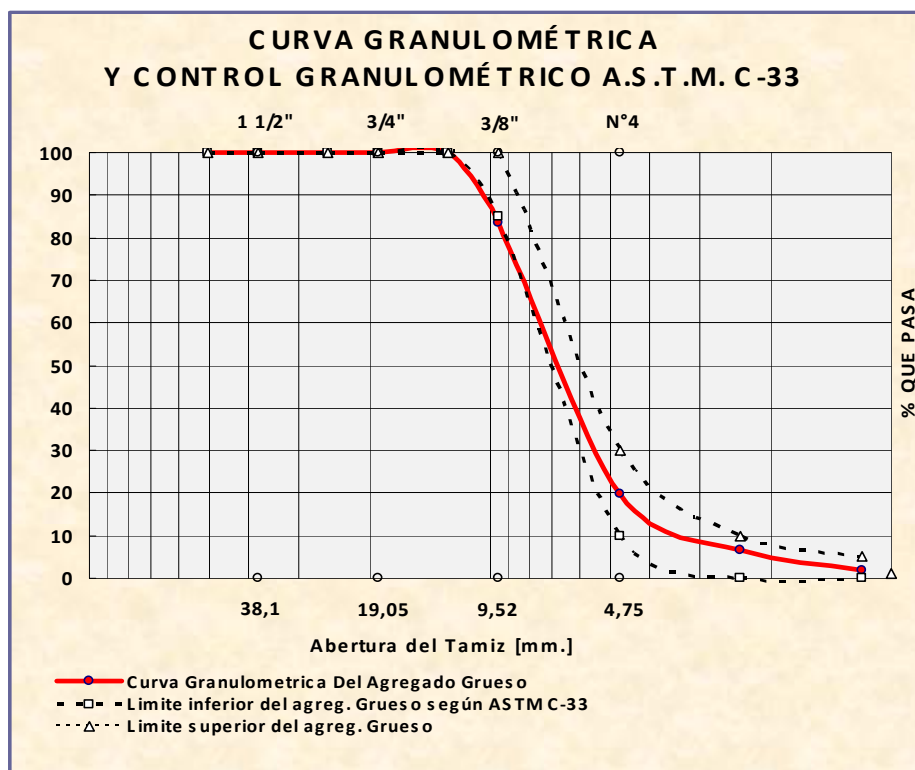
Tabla IV- 6: Granulometría Del Agregado Grueso

GRANULOMETRÍA - AGREGADO GRUESO							
Peso Total (gr.)		1545		Tamaño máx. 3/8"			
Tamices	Abertura	Peso	Peso Ret. Acum.		% pasa del total	% Que Pasa	
	(mm)	Ret. (gr)	(gr)	(%)		ASTM C33	
3/4"	19,05	0,00	0,00	0,00	100,00	-	-
1/2"	12,70	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/8"	9,52	256,50	256,50	16,60	83,40	80	100
Nº4	4,75	985,70	1242,20	80,40	19,60	10	30
Nº8	2,38	201,40	1443,60	93,44	6,56	0	10
Nº16	1,18	75,10	1518,70	98,30	1,70	0	5
Base		23,10	4232,00	99,93			
SUMAS		1541,80					
PERDIDAS		3,20					
Modulo de Finura MF =				5,89			

Fuente: Elaboración Propia

Observaciones: La muestra de material fue recolectada de la cantera en zona de la Ventolera

Figura IV- 2: Control Granulométrico Del Agregado Grueso (ASTM-C33)



Fuente: Elaboración Propia

MÓDULO DE FINURA:

El módulo de finura del agregado grueso se lo calculó partiendo de la granulometría utilizando la Ecuación III- 1 se determina que la ecuación reducida para la obtención del modulo de finura para el agregado grueso es:

$$MF = \frac{\sum \% \text{ret} (3/4'' + 3/8'' + N^{\circ}4 + N^{\circ}8 + N^{\circ}16 + \dots + N^{\circ}100)}{100} \dots\dots\dots \text{Ecuación IV- 2}$$

Obteniéndose un modulo de finura del agregado grueso igual a: MF= 5,89

4.1.2.2.2. PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN.

En la Tabla IV- 7 se hace un resumen del procedimiento empleado para la obtención del peso específico y la absorción del agregado grueso.

Tabla IV- 7: Peso Específico Y Absorción Del Agregado Grueso

PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO							
Nº	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABSORCIÓN
1	4972,9	5045	3107,7	2,57	2,60	2,67	1,45
2	4984,2	5027,2	3098,7	2,58	2,61	2,64	0,86
3	4956,6	5015,9	3097,7	2,58	2,61	2,67	1,20
PROMEDIO				2,58	2,61	2,66	1,17

Fuente: Elaboración Propia

4.1.2.2.2.3. PESO UNITARIO SUELTO Y COMPACTADO.

El peso unitario suelto y compactado del agregado grueso al igual que del agregado fino se determino mediante el ensayo “Ensayo Para Determinar El Peso Unitario O Peso Específico Aparente (ASTM E 30 ASTM C 29)” (ver subtítulo III.2.2.2.4.). Obteniéndose así los valores promedios para el agregado grueso de 1,41 gr/ cm³ como peso unitario suelto y 1.50 gr/ cm³ como peso unitario compactado.

En Tablas IV- 8 y IV- 9 se hace un resumen del procedimiento empleado para la obtención del peso unitario suelto y compactado del agregado fino

Tabla IV- 8: Peso Unitario Compactado Del Agregado Grueso

PESO UNITARIO AGREGADO GRUESO SUELTO

ENSAYO Nro	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cc)	P.(Recip.+muestra) (gr)	P.(muestra) (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cc)
1	5670,5	9650,5	19240	13569,50	1,406093
2	5670,5	9650,5	19295	13624,50	1,411792
3	5670,5	9650,5	19315	13644,50	1,413865
PROMEDIO					1,410

Fuente: Elaboración Propia

Tabla IV- 9: Peso Unitario Suelto Del Agregado Grueso

**PESO UNITARIO AGREGADO GRUESO
COMPACTADO**

ENSAYO Nro	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cc)	P.(Recip.+muestra) (gr)	P.(muestra) (gr)	PESO UNITARIO COMPAC. (gr/cc)
1	5670,50	9650,50	20085,00	14414,50	1,494
2	5670,50	9650,50	20035,00	14364,50	1,488
3	5670,50	9650,50	20110,00	14439,50	1,496
PROMEDIO					1,495

Fuente: Elaboración Propia

4.1.2.2.2.4. RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO GRUESO.

A continuación se muestra un cuadro resumen de los resultados obtenidos de los ensayos realizados en el agregado grueso.

Tabla IV- 10: Resumen De Las Características Del Agregado Grueso

TABLA RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO GRUESO		
ENSAYO	VALORES	UNIDADES
<i>Módulo De Fineza</i>	5,89	----
<i>Peso Específico Aparente</i>	2,61	gr/cm ³
<i>Peso Específico En Condición Saturada</i>	2,66	gr/cm ³
<i>% De Absorción</i>	1,17	%
<i>Peso Unitario Suelto</i>	2,410	gr/cm ³
<i>Peso Unitario Compactado</i>	2,495	gr/cm ³

Fuente: Elaboración Propia

4.2. DOSIFICACIÓN DE AGREGADOS.

Para la dosificación de agregados se aplica una dosificación empírica partiendo de las curvas de dosificación propuestas por la norma alemana DIN 1045 esto con el fin de constatar los resultados de dosificación propuestos por el estudio de Tesis “*Caracterización de los áridos de la cantera "La Ventolera" y comparación entre hormigones dosificados por el método O'Reilly y frente al A.C.I.*” realizado por el universitario Michel Loayza Rolando Javier. Este estudio nos indica que para un diseño de mezclas óptimo elaborado con agregados de la ventolera se utilizarán un 60% del total de agregados en peso de grava y un 40% del total de los agregados en arena.

En la dosificación de agregados, resulta aconsejable realizar como primer paso las curvas granulométricas de todos los agregados involucrados o que se pretenden usar en la mezcla. De esta manera, es posible tener una apreciación visual de las proporciones requeridas de cada uno de los agregados.

Tabla IV- 11: Dosificación De Agregados Granulometría De La Grava

GRANULOMETRÍA DE LA GRAVA					
Tamices	Abertura	Peso	Peso Ret.		% pasa
	(mm)	Ret. (gr)	Acum. (gr)	(%)	del total
1"	25,00	0,00	0,00	0,0000	100
3/4"	19,05	0,00	0,00	0,0000	100
1/2"	12,70	0,00	0,00	0,0000	100
3/8"	9,525	256,50	256,50	16,6019	83,3981
Nº 4	4,80	985,70	1242,20	80,4013	19,5987
Nº8	2,38	201,40	1443,60	93,4369	6,5631
Nº16	1,19	75,10	1518,70	98,2977	1,7023
Nº30	0,60	0,00	1518,70	98,2977	1,7023
Nº50	0,25	0,00	1518,70	98,2977	1,7023
Nº100	0,15	0,00	1518,70	98,2977	1,7023
Nº200	0,07	0,00	1518,70	98,2977	1,7023

Fuente: Elaboración Propia

Tabla IV- 12: Dosificación De Agregados Granulometría De La Arena

GRANULOMETRÍA DE LA ARENA					
Tamices	Abertura	Peso	Peso Ret.		% pasa
	(mm)	Ret. (gr)	Acum. (gr)	(%)	del total
1 "	25,00	0,00	0,00	0,00	100
3/4 "	19,05	0,00	0,00	0,00	100
1/2 "	12,70	0,00	0,00	0,00	100
3/8 "	9,525	0,000	0,00	0,00	100
Nº 4	4,80	9,100	9,10	0,91	99,0868
Nº8	2,38	195,800	204,90	20,56	79,4380
Nº16	1,19	146,400	351,30	35,25	64,7466
Nº30	0,60	195,200	546,50	54,84	45,1581
Nº50	0,25	298,600	845,10	84,81	15,1932
Nº100	0,15	90,800	935,90	93,92	6,0813
Nº200	0,07	51,000	986,90	99,04	0,9634

Fuente: Elaboración Propia

DOSIFICACIÓN DE AGREGADOS SEGÚN LA NORMA DIN 1045.-

Consiste en jugar con los porcentajes de los agregados en la granulometría general C_1 (Tabla IV- 13) hasta que esta (Ecuación III- 12) se ajuste entre los límites (A, B, C y D) (Tabla IV-14) propuestos por el método partiendo de la ecuación Ecuación III- 12. Obteniéndose para el proyecto los siguientes porcentajes de dosificación de agregados:

$$\beta = \% \text{Grava: } 60\%$$

$$\alpha = \% \text{Arena: } 40\%$$

Obteniéndose así la siguiente ecuación de la curva general de dosificación de agregados C_1 ajustada:

$$C_1 = 40\% * \% \text{pasa de arena} + 60\% * \% \text{pasa de grava} \dots\dots\dots \text{Ecuación III- 1}$$

Tabla IV- 13: Ajuste De La Curva General De Los Agregados “C₁” En Los Límites Propuestos Por El Método De Dosificación De Agregados De La Norma DIN 1045

AJUSTE DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA GENERAL “C₁” CON LOS % DE LOS AGREGADOS				
TAMIZ		% QUE PASA		C₁
Nº	mm.	arena	gravilla	
Nº200	0,07	0,96	1,7023	1,4067
Nº100	0,15	6,08	1,7023	3,4539
Nº50	0,25	15,19	1,7023	7,0987
Nº30	0,60	45,16	1,7023	19,0846
Nº16	1,19	64,75	1,7023	26,9200
Nº8	2,38	79,44	6,5631	35,7131
Nº 4	4,80	99,09	19,5987	51,3939
3/8"	9,525	100	83,3981	90,0388
1/2"	12,70	100	100,0000	100,0000

Fuente: Elaboración Propia

La Tabla IV-13 muestra la granulometría general C₁ de la mezcla de agregados del proyecto resultante de la dosificación de agregados.

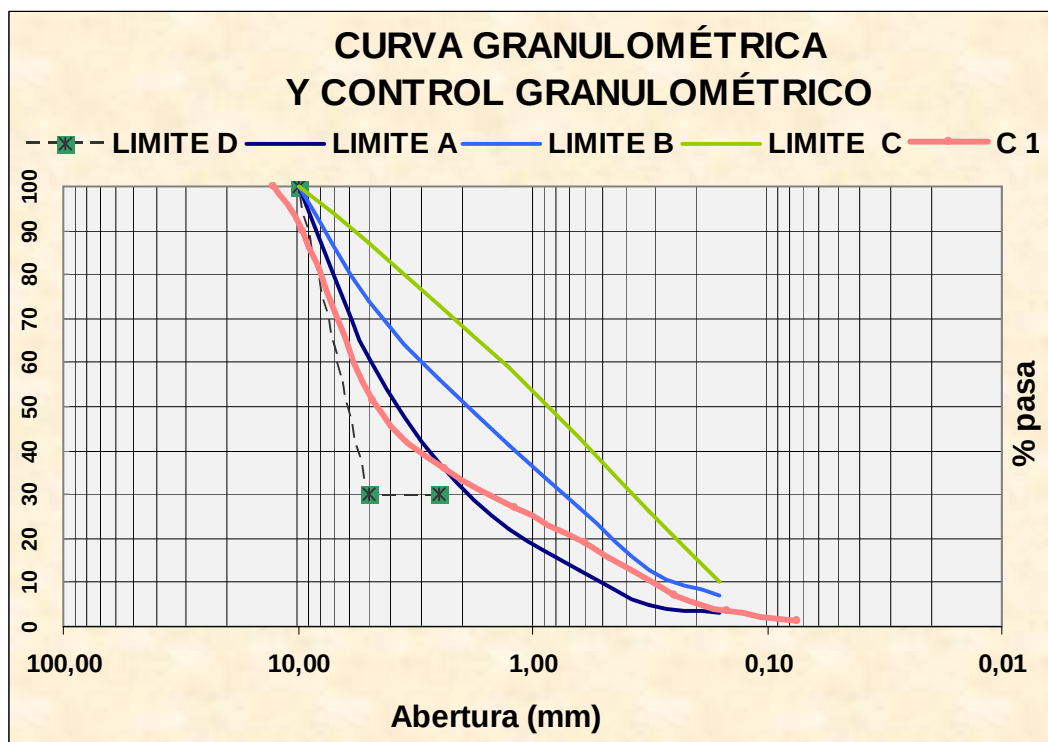
Tabla IV- 14: Límites Granulométricos Propuestos Por El Método De Dosificación De Agregados De La Norma DIN 1045

LÍMITES GRANULOMÉTRICOS MÉTODO DIN 1045 para T. Max=20mm				
TAMIZ mm	LÍMITE A	LÍMITE B	LÍMITE C	LÍMITE D
0,16	3	7	10	-
0,32	5	13	26	-
0,63	13	27	43	-
1,25	22	41	59	30
2,500	37	56	73	30
5,00	61	74	87	30
10,00	100	100	100	100

Fuente: Elaboración Propia

En Tabla IV-14 se muestran los límites A, B, C y D propuestos por el método de dosificación DIN 1045 donde la granulometría general C₁ debe ajustarse dentro de estos límites.

Figura IV- 3: Control Granulométrico De La Curva General de agregados C₁ Método DIN 1045



Fuente: Elaboración Propia

Observaciones: en la Figura IV- 3 se muestra la curva general de la dosificación de los agregados C₁ ajustada dentro de los límites establecidos por el método de dosificación de agregados de la norma DIN 1045

4.3. SELECCIÓN DEL ADITIVO MODIFICADOR DE AZUFRE.

Buscando el aditivo que mejore las características del hormigón se procedió a realizar la selección del aditivo modificador de azufre mediante una serie de dosificaciones con distintos tipos de aditivos llegando a escoger 3 aditivos (ver Tabla III- 6) para adicionarlos en distintos porcentajes en mezclas de morteros y hormigones a base de azufre para luego hacer un estudio comparativo de su comportamiento en tanto resistencia como su trabajabilidad y homogeneidad.

4.3.1. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN MORTEROS A BASE DE AZUFRE.

Basado en la norma (ASTM C109) resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico, utilizado con el fin de elegir el aditivo adecuado para la elaboración de morteros y hormigones a base de azufre.

Diseño De Dosificación De Morteros A Base De Azufre.-

Las dosificaciones para el ensayo fueron de un 70 % de arena y un 30 % de azufre modificado, haciendo variar la relación aditivo/azufre en los siguientes intervalos: 0.05, 0.1, 0.15 y 0.2. En Tabla IV-15 se muestran las dosificaciones para la elaboración de 1000 grs. de mortero para 3 cubos de 5x5x5cm.

Tabla IV- 15: Dosificación De Materiales Para Morteros A Base De Azufre

DOSIFICACIÓN DE MORTEROS (grs.)													
Ad/Az=		0,05			0,1			0,15			0,2		
ADITIVO		adit	azuf	agr	Adit	azuf	agr	adit	Azuf	agr	adit	azuf	agr
	A	14,3	285,7	700	27,27	272,7	700	39,2	260,9	700	50	250	700
	B	14,3	285,7	700	27,27	272,7	700	39,2	260,9	700	50	250	700
	C	14,3	285,7	700	27,27	272,7	700	39,2	260,9	700	50	250	700

Fuente: Elaboración Propia

Elaboración De Los Cubos De Mortero A Base De Azufre.-

A continuación se presenta un resumen fotográfico del procedimiento de la elaboración las probetas cúbicas confeccionadas por morteros a base de azufre con la adición de aditivos en distintos porcentajes esto con la finalidad de poder observar mas de cerca la trabajabilidad y el acabado superficial que presentan los cubos de mortero a base de azufre al adicionar distintos porcentajes de aditivos en la dosificación de mezclas:

Proceso De Confección De Probetas:

En Figura IV- 4 se puede observar la indumentaria de seguridad dotada para la protección del personal ante posibles intoxicaciones y quemaduras que se puedan dar durante la elaboración del mortero a base de azufre

Figura IV- 4: Indumentaria De Seguridad En La Elaboración Probetas De Mortero A Base De Azufre



Fuente: Elaboración Propia

Figura IV- 5: Calentamiento De La Arena Y El Azufre Para Elaboración De Morteros A Base De Azufre



Fuente: Elaboración Propia

En Figura IV- 5 se muestra el proceso de calentamiento de los agregados y fundición del azufre modificado con distintos porcentajes de aditivo a una temperatura controlada para luego realizar el mezclado (Figura IV- 5) de estos materiales obteniéndose una mezcla de mortero homogénea que se vacía en los moldes cúbicos

Figura IV- 6: Mezclado y vaciado de probetas cúbicas con morteros a base azufre



Fuente: Elaboración Propia

Acabado De Las Probetas Del Mortero A Base De Azufre Con Aditivos

Figura IV- 7: Acabados De Probetas De Mortero A Base De Azufre Codificadas De Acuerdo al tipo De Aditivo Utilizado Y Su Relación Aditivo/Azufre



Fuente: Elaboración Propia

En Figura IV-7 se observan los acabados de las probetas cúbicas, cada probeta esta codificada de acuerdo al tipo de aditivo añadido en la mezcla y la relación aditivo/azufre correspondiente.

Figura IV- 8: Probeta Cúbica De Mortero A Base De Azufre Modificado Con El Aditivo B A Una Relación Aditivo Azufre Igual A: $Ad/Az. = 0.15$



Fuente: Elaboración Propia

Figura IV- 9: Probeta cúbica de mortero a base de azufre modificado con el aditivo B a una relación aditivo azufre igual a: $Ad/Az. = 0.20$



Fuente: Elaboración Propia

En las Figuras IV-8 y IV-9 se muestran las probetas dosificadas con el aditivo tipo B ya que estas mezclas obtenidas resultaron ser más homogéneas y de buena trabajabilidad. Los acabados de las demás probetas realizadas con los otros aditivos son muy defectuosos debido a que le hace falta un llenante a la mezcla (material fino), además que cuando se realizaron las roturas de las probetas, resultó ser que las que tenían mejor acabado eran las más resistentes.

Ensayos de la resistencia a la compresión simple

Se procedieron a realizar la rotura de las probetas registrando la carga máxima aplicada en estas a una edad del mortero de un (1) día.

Este ensayo se lo hizo en la prensa hidráulica que se tiene en el laboratorio de suelos y hormigones de la UAJMS. Teniendo así los siguientes resultados:

Tabla IV- 16: Carga Máxima Aplicada En Probetas Cúbicas De Mortero A Base De Azufre

CARGA MÁXIMA APLICADA (kN) (por probeta)													
RELACIÓN Ad/Az :		0,05			0,1			0,15			0,2		
ADITIVO	PROB. N°:	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	A	21,4	22,6	26,2	21,8	18,2	33,5	9,3	8,1	8,5	10,9	19,4	13,3
	B	29,4	32,7	33,1	28,6	23,4	29,8	21,8	21,0	39,5	27,0	22,2	22,2
	C	10,1	8,1	15,4	21,8	18,2	15,4	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1

Fuente: Elaboración Propia

En Tabla IV-16 se muestra la carga máxima aplicada en las probetas cúbicas de mortero a base de azufre, se pueden observar que se confeccionaron 3 probetas por cada tipo de dosificación

Tabla IV- 17: Carga Máxima Aplicada En Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre (Promedios)

CARGA MÁXIMA APLICADA (kN) (promedio)													
RELACIÓN Ad/Az :		0,05			0,1			0,15			0,2		
ADITIVO	PROB. N°:	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	A	23,4			24,5			8,6			14,5		
	B	31,7			27,3			27,4			23,8		
	C	11,2			18,4			8,1			8,1		

Fuente: Elaboración Propia

Tabla IV-17 en esta tabla se muestra los promedios de la carga máxima aplicada en las probetas cúbicas de mortero a base de azufre.

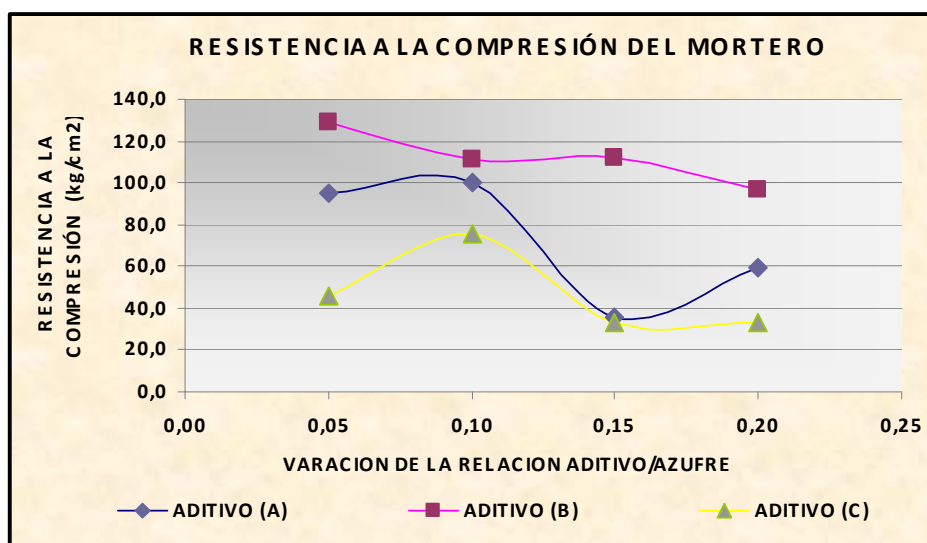
Tabla IV- 18: Resistencia Máxima A La Compresión En Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre

RESISTENCIA MÁXIMA A LA COMPRESIÓN (kg/cm2)													
RELACIÓN Ad/Az :		0,05			0,1			0,15			0,2		
ADITIVO	PROB. N°:	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	A	95,4			99,8			35,2			59,3		
	B	129,4			111,3			111,9			97,1		
	C	45,6			75,2			33,1			33,1		

Fuente: Elaboración Propia

Tabla IV-18 en esta tabla se muestra los promedios de la resistencia máxima a la compresión de las probetas cúbicas de mortero a base de azufre para luego proceder a graficar las curvas resistencia vs. Relación Ad/Az (Figura IV- 10) donde se realiza una mejor apreciación del tipo de aditivo que da la mayor resistencia en el mortero a base de azufre.

Figura IV- 10: Curvas De Resistencia A La Compresión De Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Dosificadas Con Distintos Aditivos Haciendo Variar La Relación Ad/Az



Fuente: Elaboración Propia

En la Figura IV- 10 se puede observar que los cubos confeccionados con los aditivos A y B son los que presentan mayores resistencias a la compresión, mientras que el aditivo C carece de una buena resistencia por lo que fue descartado en las siguientes pruebas. Pero haciendo una comparación en acabados, los cubos presentan una deficiencia siendo el motivo de que se busque un llenante para la mezcla que le dé un mejor acabado y colabore con su resistencia, para tal caso se realizaron cubos de mortero de azufre con llenante.

Diseño De Dosificación De Morteros A Base De Azufre Con La Incorporación De Un Llenante.-

Las dosificaciones para el ensayo fueron de un 70 % de arena modificada y un 30 % de azufre, haciendo variar la relación llenante/arena en los siguientes intervalos: 0.015, 0.03, 0.045 y 0.060. el llenante elegido es ceniza volcánica (D). En Tabla IV-19 se muestran las dosificaciones para la elaboración de 1000 grs. de mortero para 3 cubos de 5x5x5cm.

Tabla IV- 19: Dosificación De Materiales Para Morteros A Base De Azufre (sin aditivo) Con Arena Modificada (arena + llenante)

DOSIFICACIÓN DE MORTEROS (grs.)													
RELACIÓN LI/Ar=		0,015			0,030			0,045			0,060		
Llenant	D	lle	azuf	agr	Lle	azuf	agr	lle	azuf	agr	lle	azuf	agr
		10,5	300,0	689,5	21	300	679	31,5	300	668,5	42	300	658

Fuente: Elaboración Propia

NOTA: El llenante deberá ser molido y como mínimo deberá pasar por el tamiz N° 30 (0.59 mm.)

Acabado De Las Probetas Del Mortero A Base De Azufre Con Llenante

Figura IV- 11: Acabados De Probetas De Mortero A Base De Azufre Con Llenante De Ceniza Volcánica



Fuente: Elaboración Propia

En Figura IV-11 se observan los acabados de las probetas cúbicas, cada probeta esta codificada de acuerdo al porcentaje de llenante añadido en la mezcla. Estas muestras resultaron tener más homogeneidad y trabajabilidad mostrando una textura pastosa al momento de su elaboración, dando resultados alentadores por el acabado uniforme, sobre todo la dosificación realizada al 0.03 %.

Ensayos de la resistencia a la compresión simple

Se procedieron a realizar la rotura de las probetas registrando la carga máxima aplicada en estas a una edad del mortero de un (1) día.

Tabla IV- 20: Carga Máxima Aplicada En Probetas Cúbicas De Mortero A Base De Azufre Con Arena Modificada

CARGA MÁXIMA APLICADA (kN) (por probeta)													
RELACIÓN Ll/Ar=		0,015			0,030			0,045			0,060		
Llenant	D	19,4	21,8	19,8	28,6	35,5	25,4	21,4	23,8	27,8	27,8	25,4	19,4

Fuente: Elaboración Propia

En Tabla IV-20 se muestra la carga máxima aplicada en las probetas cúbicas de mortero a base de azufre con arena modificada (arena + llenante), se pueden observar que se confeccionaron 3 probetas por cada tipo de dosificación.

Tabla IV- 21: Carga Máxima Aplicada En Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Con Arena Modificada (Promedios)

CARGA MÁXIMA APLICADA (kN) (promedio)					
RELACIÓN Ll/Ar=		0,015		0,030	
Llenant		D		0,045	
				0,060	
		20,3		29,8	
				24,3	
				24,2	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla IV-21 en esta tabla se muestra los promedios de la carga máxima aplicada en las probetas cúbicas de mortero a base de azufre con arena modificada.

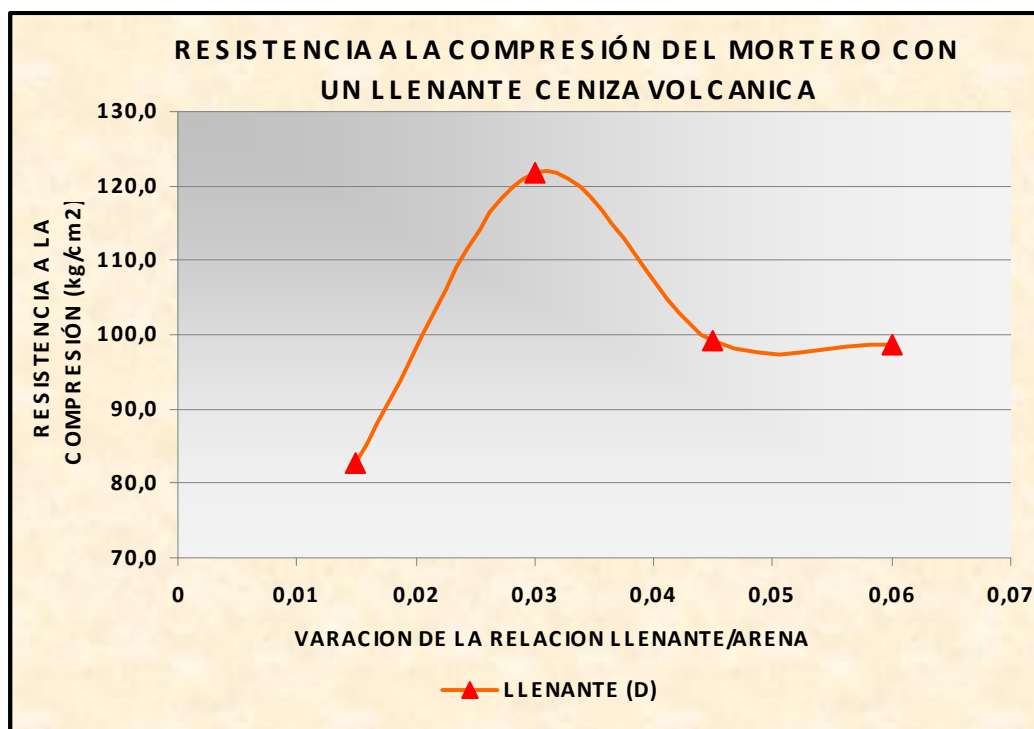
Tabla IV- 22: Resistencia Máxima A La Compresión En Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Con Arena Modificada.

RESISTENCIA MÁXIMA A LA COMPRESIÓN (kg/cm2)					
RELACIÓN Ll/Ar=		0,015		0,030	
Llenant		D		0,045	
				0,060	
		82,9		121,7	
				99,3	
				98,7	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla IV-22 en esta tabla se muestra los promedios de la resistencia máxima a la compresión de las probetas cúbicas de mortero a base de azufre con arena modificada para luego proceder a graficar las curvas resistencia vs. Relación Llen/Are (Figura IV- 12) donde se realiza una mejor apreciación de la relación llenante/arena que da la mayor resistencia en el mortero a base de azufre.

Figura IV- 12: Curvas De Resistencia A La Compresión De Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Dosificadas Con Distintos porcentajes de Llenante (Llen/Are)



Fuente: Elaboración Propia

En el grafico se puede observar que la relación llenante/arena que mayor resistencia ofrece es el de 0,030 (3%), además de que le da mejor acabado al producto, es por este motivo que se elige el porcentaje mencionado para realizar las pruebas con los aditivos.

Diseño De Dosificación De Morteros A Base De Azufre Con La Incorporación De Un Llenante Más Aditivos.-

Las dosificaciones para el ensayo fueron de un 70 % de arena y un 30 % de azufre, ambos materiales son modificados, en el caso de la arena con un llenante y el caso del azufre con un aditivo. La arena será modificada en un porcentaje de 3% por un llenante mientras que la relación aditivo/azufre variara en los siguientes intervalos: 0.05, 0.1, 0.15 y 0.2. En Tabla IV-23 se muestran las dosificaciones para la elaboración de 1000 grs. de mortero para 3 cubos de 5x5x5cm.

Tabla IV- 23: Dosificación De Materiales Para Morteros A Base De Azufre Con Llenante Más Aditivo (arena modificada y azufre modificado).

DOSIFICACIÓN DE MORTEROS (grs.)													
Ad/Az=		0,05			0,1			0,15			0,2		
ADITIVO		adit	Azuf	agre	Adit	azuf	agre	adit	Azuf	agre	adit	Azuf	agre
	A	14,3	285,7	679	27,27	272,7	679	39,2	260,9	679	50	250	679
	B	14,3	285,7	679	27,27	272,7	679	39,2	260,9	679	50	250	679

Fuente: Elaboración Propia

En la dosificación el 3% de agregado faltante es compensado con ceniza volcánica, la misma que equivale a 21 gramos.

Acabado De Las Probetas Del Mortero A Base De Azufre Con Llenante Más Aditivo

Figura IV- 13: Acabados De Probetas De Mortero A Base De Azufre Con Llenante De Ceniza Volcánica Más Aditivos (izquierda aditivo A, derecha aditivo B)



Fuente: Elaboración Propia

En Figura IV-13 se observan los acabados de las probetas cúbicas, cada probeta esta codificada de acuerdo al porcentaje de aditivo añadido en la mezcla (relación aditivo/azufre).

Podemos observar que las probetas realizados con el aditivo A todavía presentan un acabado defectuoso el cambio las probetas realizadas con el aditivo B mejoraron su acabado, esto muestra que en la confección de morteros con el aditivo A se requiera una cantidad mayor de producto llenante (material fino).

Ensayos de la resistencia a la compresión simple

Se procedieron a realizar la rotura de las probetas registrando la carga máxima aplicada en estas a una edad del mortero de un (1) día.

Tabla IV- 24: Carga Máxima Aplicada En Probetas Cúbicas De Mortero A Base De Azufre Con Llenante Más Aditivo

CARGA MÁXIMA APLICADA (kN) (por probeta)													
RELACIÓN Ad/Az :		0,05			0,1			0,15			0,2		
ADITIVO	PROB. N°:	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	A	33,5	48,4	36,7	31,9	15,8	20,6	29,4	37,5	27,0	21,4	8,9	8,1
	B	53,6	73,7	33,9	27,4	26,6	29,4	24,6	37,5	34,3			

Fuente: Elaboración Propia

En Tabla IV-24 se muestra la carga máxima aplicada en las probetas cúbicas de mortero a base de azufre, se pueden observar que se confeccionaron 3 probetas por cada tipo de dosificación

Tabla IV- 25: Carga Máxima Aplicada En Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Con Llenante Más Aditivo (arena modificada y azufre modificado) (Promedios)

CARGA MÁXIMA APLICADA (kN) (promedio)													
RELACIÓN Ad/Az :		0,05			0,1			0,15			0,2		
ADITIVO	PROB. N°:	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	A	39,5			22,7			31,3			12,8		
	B	53,7			27,8			32,1					

Fuente: Elaboración Propia

Tabla IV-25 en esta tabla se muestra los promedios de la carga máxima aplicada en las probetas cúbicas de mortero a base de azufre

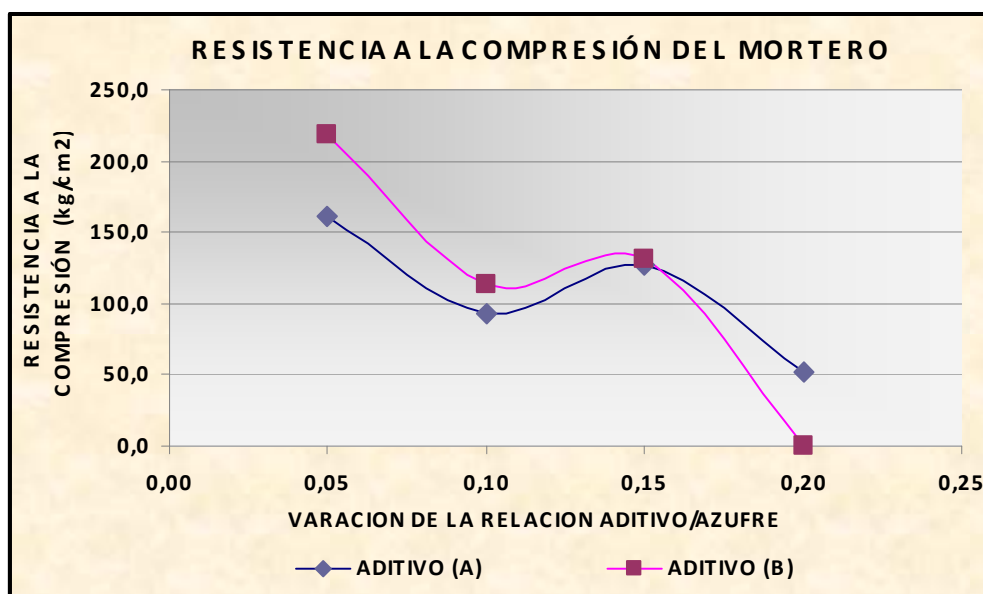
Tabla IV- 26: Resistencia Máxima A La Compresión En Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Con Llenante Más Aditivo (arena modificada y azufre modificado)

RESISTENCIA MÁXIMA A LA COMPRESIÓN (kg/cm2)													
RELACIÓN Ad/Az :		0,05			0,1			0,15			0,2		
ADITIVO	PROB. N°:	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	A	161,1			92,7			127,7			52,2		
	B	219,1			113,5			131,0					

Fuente: Elaboración Propia

Tabla IV-26 en esta tabla se muestra los promedios de la resistencia máxima a la compresión de las probetas cúbicas de mortero a base de azufre para luego proceder a graficar las curvas resistencia vs. Relación Ad/Az (Figura IV- 14) donde se realiza una mejor apreciación del tipo de aditivo que da la mayor resistencia en el mortero a base de azufre.

Figura IV- 14: Curvas De Resistencia A La Compresión De Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Con Llenante (relación Llenante/Arena de 0,030) Más Aditivo



Fuente: Elaboración Propia

En la figura IV- 14 podemos observar que el aditivo B es el que tiene mayor resistencia y mejor acabado, esta resistencia se presenta a una relación aditivo/azufre de 0,05; la desventaja del aditivo B radica en que este producto es inflamable y el proceso de elaboración de la mezcla es mas peligroso, es por esta razón que descartaremos el uso de este aditivo. En cambio el aditivo A no tiene la textura adecuada debiendo el mismo ser objeto de una nueva dosificación con relación al material llenante; en cuanto a su elaboración no presenta ningún peligro ya que el producto no es inflamable.

Diseño De Dosificación De Morteros A Base De Azufre Con El Aditivo “A” Y La Incorporación De Un Llenante Para Mejorar El Acabado.-

Las dosificaciones para el ensayo fueron de un 70 % de arena modificada y un 30 % de azufre modificado, haciendo variar la relación llenante/arena en los siguientes intervalos:

0.06, 0.075, 0.09 y 0.105. el llenante elegido es ceniza volcánica (D). La relación aditivo/azufre será de 0,05 ya que es la relación que mayor resistencia obtuvo en los ensayos anteriores. En Tabla IV-27 se muestran las dosificaciones para la elaboración de 1000 grs. de mortero para 3 cubos de 5x5x5cm.

Tabla IV- 27: Dosificación De Materiales Para Morteros A Base De Azufre Con El Aditivo “A” a una relación Aditivo/Azufre de 0,05 y Material Llenante (arena modificada)

DOSIFICACIÓN DE MORTEROS (grs.)													
RELACIÓN Ll/Ar=		0,06			0,075			0,09			0,105		
Llenant	D	lle	azuf	agr	lle	azuf	agr	lle	azuf	agr	Lle	azuf	agr
		42,0	285,7	658	52,5	285,7	647,5	63	285,7	637	73,5	285,7	626,5

Fuente: Elaboración Propia

Nota: el peso en gr. del aditivo “A” será de 14,3 que es la relación a 0,05 de adit/azuf

Acabado De Las Probetas Del Mortero A Base De Azufre Con Llenante Más El Aditivo “A” a Una relación aditivo/azufre de 0,05

Figura IV- 15: Acabados De Probetas De Mortero A Base De Azufre Con Llenante De Ceniza Volcánica Más El Aditivo “A” a Una Relación Adit/Azuf de 0.05



Fuente: Elaboración Propia

En la Figura IV-15 se observan los acabados de las probetas cúbicas, cada probeta esta codificada de acuerdo al porcentaje de llenante añadido en la mezcla. Estas muestras resultaron tener más homogeneidad y trabajabilidad mostrando una textura pastosa al momento de su elaboración. Una vez desencofradas las muestras todavía existía del defecto del acabado el cual no era muy bueno excepto por las muestras realizadas a una dosificación de llenante/arena de 0,075; estas muestras son las que tuvieron mejor acabado.

Ensayos de la resistencia a la compresión simple

Se procedieron a realizar la rotura de las probetas registrando la carga máxima aplicada en estas a una edad del mortero de un (1) día.

Tabla IV- 28: Carga Máxima Aplicada En Probetas Cúbicas De Mortero A Base De Azufre Con El Aditivo “A” a una relación Aditivo/Azufre de 0,05 y Material Llenante

CARGA MÁXIMA APLICADA (kN) (por probeta)													
RELACIÓN LI/Ar=		0,06			0,075			0,09			0,105		
Llenant	D	53,2	33,5	38,3	41,1	36,7	52,4	57,6	52,8	31,5	49,6	37,1	49,2

Fuente: Elaboración Propia

En Tabla IV-28 se muestra la carga máxima aplicada en las probetas cúbicas de mortero a base de azufre con arena modificada (llenante+arena), se pueden observar que se confeccionaron 3 probetas por cada tipo de dosificación

Tabla IV- 29: Carga Máxima Aplicada En Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Con El Aditivo “A” a una relación Aditivo/Azufre de 0,05 y Material Llenante (Promedios)

CARGA MÁXIMA APLICADA (kN) (promedio)					
RELACIÓN LI/Ar=		0,06		0,075	
		0,09		0,105	
Llenant	D	41,7		43,4	
		47,3		45,3	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla IV-29 en esta tabla se muestra los promedios de la carga máxima aplicada en las probetas cúbicas de mortero a base de azufre con arena modificada (llenante + arena).

Tabla IV- 30: Resistencia Máxima A La Compresión En Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Con El Aditivo “A” a una relación Aditivo/Azufre de 0,05 y Material Llenante

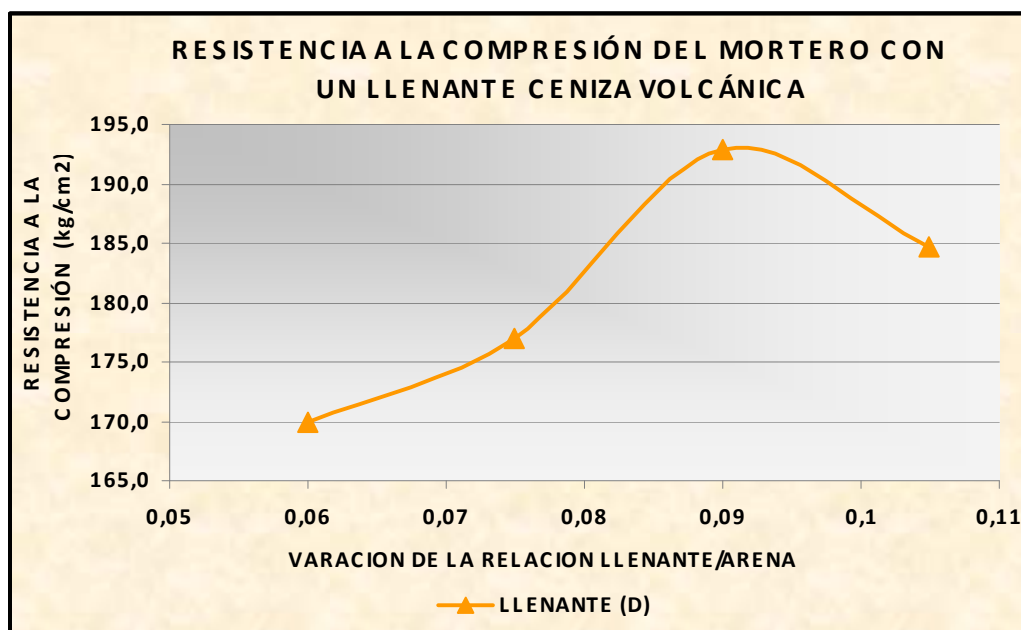
RESISTENCIA MÁXIMA A LA COMPRESIÓN (kg/cm2)					
RELACIÓN LI/Ar=		0,06		0,075	
		0,09		0,105	
Llenant	D	169,9		177,0	
		192,9		184,7	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla IV-30, en esta tabla se muestra los promedios de la resistencia máxima a la compresión de las probetas cúbicas de mortero a base de azufre con el aditivo “A” asiendo variar la relación llenante/arena para luego proceder a graficar las curvas resistencia vs.

Relación Llen/Are (Figura IV- 16) donde se realiza una mejor apreciación de la relación llenante/arena que da la mayor resistencia en el mortero a base de azufre.

Figura IV- 16: Curvas De Resistencia A La Compresión De Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Dosificadas Con Distintos porcentajes de Llenante Llen/Are Más El Aditivo “A” a Una Relación Adit/Azuf de 0.05



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico se puede observar que la relación llenante/arena que mayor resistencia ofrece es el de 0,09 (9%), pero el acabado de estas muestras es defectuoso es por esta razón que se eligió la relación llenante/arena a 0,075 que nos ofrece un mejor acabado y una resistencia considerable.

Diseño Final De Dosificación De Morteros A Base De Azufre Con El Aditivo “A” a Distintos Porcentajes de Relación Aditivo/Azufre Y La Incorporación De Un Llenante A Una Relación Llenante/Arena De 0.075

Las dosificaciones para el ensayo fueron de un 70 % de arena modificada y un 30 % de azufre modificado, donde la relación llenante/arena es de 0.075, el llenante elegido es ceniza volcánica (D), esta relación fue elegida debido a que esta proporción nos da un buen acabado. La relación aditivo/azufre varia como en el primer caso siendo esta variación de 0.05, 0.10, 0.15 y 0.20. En Tabla IV-31 se muestran las dosificaciones para la elaboración de 1000 grs. de mortero para 3 cubos de 5x5x5cm.

Tabla IV- 31: Dosificación De Materiales Para Morteros A Base De Azufre Con Distintos Porcentajes de Relación Aditivo/Azufre a una relación Llenante/Arena de 0,075

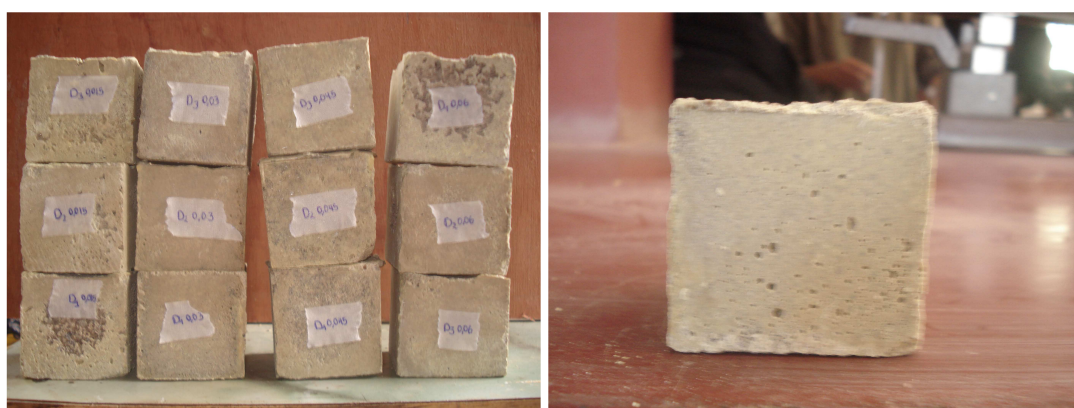
DOSIFICACIÓN DE MORTEROS (grs.)													
RELACIÓN Ad/Az =		0,05			0,10			0,15			0,20		
Aditivo	A	adit	azuf	agr	adit	azuf	agr	adit	azuf	agr	Adi t	azuf	agr
		14,3	285,7	647,5	27,3	272,7	647,5	39,1	260,9	647,5	50,0	250	647,5

Fuente: Elaboración Propia

Nota: el peso en gr. del Llenante “D” será de 52.5 que es la relación a 0,075 de llenante/arena

Acabado De Las Probetas Del Mortero A Base De Azufre Con Llenante Más El Aditivo “A” a Una relación aditivo/azufre de 0,05

Figura IV- 17: Acabados De Probetas De Mortero A Base De Azufre Con Distintos Porcentajes de Relación Aditivo/Azufre a una relación Llenante/Arena de 0,075



Fuente: Elaboración Propia

En la Figura IV-17 se observan los acabados de las probetas cúbicas, cada probeta esta codificada de acuerdo al porcentaje de aditivo añadido en la mezcla. Estas muestras resultaron ser mas fáciles de trabajar, mostrando una textura pastosa al momento de su elaboración. Una vez desencofradas las muestras el defecto del acabado era casi nulo es decir que de las 6 caras del cubo una tenia un acabado defectuoso.

Ensayos de la resistencia a la compresión simple

Se procedieron a realizar la rotura de las probetas registrando la carga máxima aplicada en estas a una edad del mortero de un (1) día.

Tabla IV- 32: Carga Máxima Aplicada En Probetas Cúbicas De Mortero A Base De Azufre Con Distintos Porcentajes de Relación Aditivo/Azufre a una relación Llenante/Arena de 0,075

CARGA MÁXIMA APLICADA (kN) (por probeta)													
RELACIÓN Ad/Az =		0,05			0,10			0,15			0,20		
Aditivo	A	31,5	35,5	34,7	63,7	41,5	45,6	53,6	57,6	37,5	31,1	29,4	37,1

Fuente: Elaboración Propia

En Tabla IV-32 se muestra la carga máxima aplicada en las probetas cúbicas de mortero a base de azufre con llenante, se pueden observar que se confeccionaron 3 probetas por cada tipo de dosificación.

Tabla IV- 33: Carga Máxima Aplicada En Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Con Distintos Porcentajes de Relación Aditivo/Azufre a una relación Llenante/Arena de 0,075 (Promedios)

CARGA MÁXIMA APLICADA (kN) (promedio)					
RELACIÓN Ad/Az=		0,05	0,10	0,15	0,20
Aditivo	A	33,9	50,3	49,6	32,5

Fuente: Elaboración Propia

Tabla IV-33 en esta tabla se muestra los promedios de la carga máxima aplicada en las probetas cúbicas de mortero a base de azufre con llenante y aditivo (arena modificada y azufre modificado).

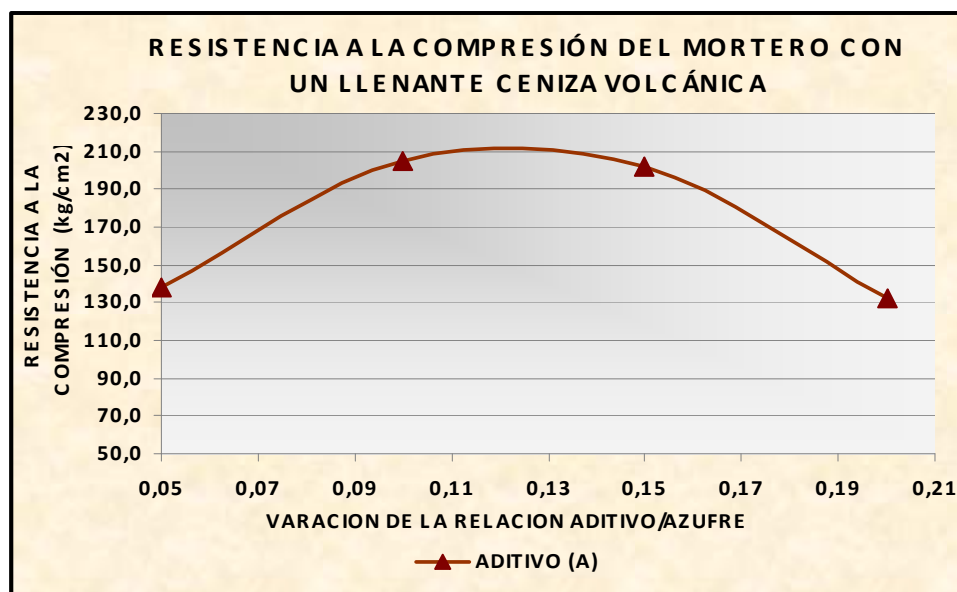
Tabla IV- 34: Resistencia Máxima A La Compresión En Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Con Distintos Porcentajes de Relación Aditivo/Azufre a una relación Llenante/Arena de 0,075

RESISTENCIA MÁXIMA A LA COMPRESIÓN (kg/cm2)					
RELACIÓN Ad/Az=		0,05	0,10	0,15	0,20
Aditivo	A	138,1	204,9	202,2	132,7

Fuente: Elaboración Propia

Tabla IV-34, en esta tabla se muestra los promedios de la resistencia máxima a la compresión de las probetas cúbicas de mortero a base de azufre con el aditivo “A” siendo variar el mismo en distintos porcentajes (0.05, 0.10, 0.15 y 0.20); luego se procede a graficar la curva resistencia vs. Relación Aditivo/Azufre (Figura IV- 18) donde se realiza una mejor apreciación de la relación aditivo/azufre que da la mayor resistencia en el mortero.

Figura IV- 18: Curvas De Resistencia A La Compresión De Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Con Distintos Porcentajes de Relación Aditivo/Azufre a una relación Llenante/Arena de 0,075



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico se puede observar que la relación Aditivo/azufre que mayor resistencia ofrece es el de 0,10, siendo esta resistencia de 204,9 kg/cm², además de tener un acabado adecuado y ser una mezcla homogénea de fácil manipulación lo que proporcionara una puesta en obra del producto de manera eficiente. El mortero realizado con la relación óptima presentaron un peso unitario promedio de 2350 kg./m³.

La resistencia obtenida a compresión corresponde a un Hormigón H200 según al norma Boliviana del Hormigón (CBH 87), la misma que alcanza una resistencia de 200 kg/cm² a los 28 días, en cambio el mortero de azufre alcanza esta resistencia a las 24 horas.

Tabla IV- 35: Dosificación En % Del Diseño De Mezcla Óptimo Desarrollado En El Proyecto Para Morteros a Base de Azufre

DOSIFICACIÓN EN % DEL DISEÑO DE MEZCLA ÓPTIMO DESARROLLADO EN EL PROYECTO PARA MORTEROS A BASE DE AZUFRE		
DISEÑO DE MEZCLA ÓPTIMO %	MATERIAL	PORCENTAJE
%ARENA MODIFICADA= 70 % Con relación Llen/Are=0,075	Arena	64,75 %
	Llenante	5,25 %
AZUFRE MODIFICADO= 30 % con relación: Ad/Az=0,10	Azufre	27 %
	Aditivo	3 %

Fuente: Elaboración Propia

4.3.2. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN HORMIGONES A BASE DE AZUFRE PARA LA SELECCIÓN DEL RANGO DE VARIACIÓN EN LA RELACIÓN ADITIVO/AZUFRE

Como se indico anteriormente en esta etapa se procedieron a elaborar probetas de hormigón a base de azufre con los aditivos que mejor comportamiento tuvieron en el estudio de morteros, para lo cual se hizo variar la relación aditivo azufre con el fin de observar su comportamiento en la resistencia a la compresión y en su acabado superficial. Las probetas utilizadas para este ensayo son de 10 cm. de diámetro y 20 cm. de alto. Con una edad de ruptura de 24 horas.

Tabla IV- 36: Carga Máxima (kN) Aplicada En Probetas De Hormigones de Azufre A 1 Día De Edad Para La Selección Del Rango De Variación En La Relación Aditivo/Azufre En Hormigones A Base De Azufre

% DE AGREGADO MOD. EN PESO	% DE AZUFRE EN PESO	RELACIÓN AD./AZ.	ADITIVO A		
			N° DE PROBETAS		
			1	2	3
70	30	0,05	40	50	55
70	30	0,1	45	56	58
70	30	0,15	25	30	20
70	30	0,2	15	20	15

Fuente: Elaboración Propia

En Tabla IV-36 se muestra la carga máxima aplicada (kN) en las probetas de hormigón a base de azufre dosificadas con distintas relaciones Ad/Az, confeccionándose 3 probetas de Hormigón a Base de Azufre por cada tipo de dosificación.

Tabla IV- 37: Carga Máxima (kN) Aplicada A Probetas De Hormigones de Azufre A 1 Día De Edad (Promedios) Para La Selección Del Rango De Variación En La Relación Aditivo/Azufre En Hormigones A Base De Azufre

% DE AGREGADO EN PESO	% DE AZUFRE EN PESO	RELACIÓN AD./AZ.	ADITIVO A
			PROMEDIO
70	30	0,05	48,33
70	30	0,1	53
70	30	0,15	25
70	30	0,2	16,67

Fuente: Elaboración Propia

Tabla IV-37 en esta tabla se muestra los promedios de la carga máxima aplicada en las probetas de hormigón a base de azufre.

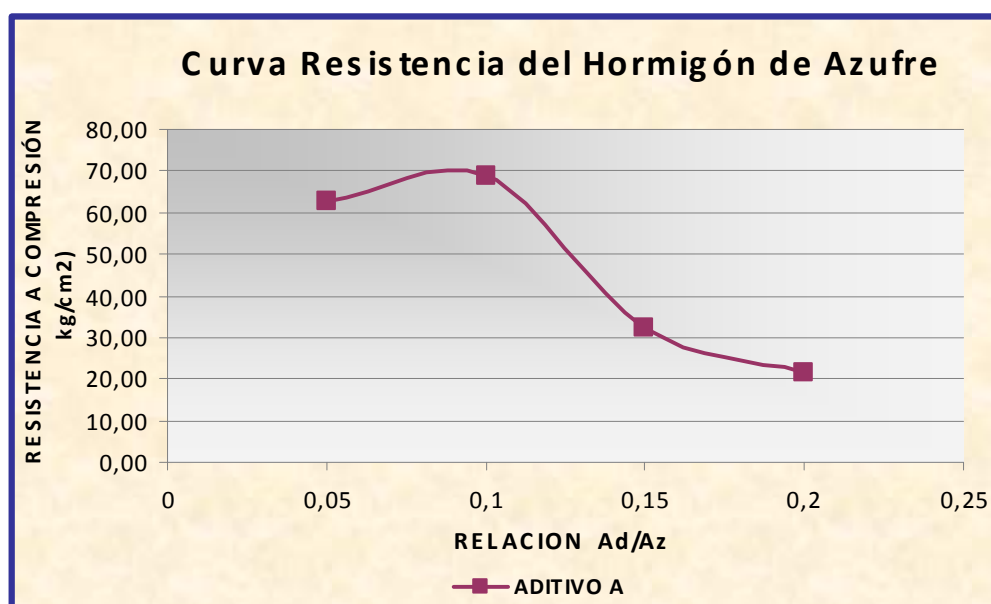
Tabla IV- 38: Resistencia A Compresión (kg/cm²) Del Hormigones de Azufre A 1 Día De Edad Para La Selección Del Rango De Variación En La Relación Aditivo/Azufre En Hormigones A Base De Azufre

% DE AGREGADO EN PESO	% DE AZUFRE EN PESO	RELACIÓN AD./AZ.	ADITIVO A
			RESISTENCIA
70	30	0,05	62,73
70	30	0,1	68,79
70	30	0,15	32,45
70	30	0,2	21,63

Fuente: Elaboración Propia

Tabla IV-38 en esta tabla se muestra los promedios de la resistencia máxima a la compresión de las probetas de hormigón a base de azufre para luego proceder a graficar las curvas resistencia vs. Relación Ad/Az (Figura IV-19) donde se realiza una mejor apreciación de la mayor resistencia en el hormigón a base de azufre.

Figura IV- 19: Curvas De Resistencia A La Compresión De Probetas De Hormigones A Base De Azufre Dosificada Con El Aditivo A Haciendo Variar La Relación Ad/Az



Fuente: Elaboración Propia

Como se ve claramente en la Figura IV-19 las resistencias de las probetas elaboradas con el aditivo tipo A resultan tener una resistencia no muy alta, estas muestras están elaboradas con un material llenante a una relación agregados/llenante de 0.075, este valor fue obtenido del estudio de morteros. Obteniéndose la mayor resistencia de las probetas a una relación Ad/Az=0.10.

Tomando como referencia los resultados obtenidos del ensayo se puede apreciar que en los hormigones a base de azufre con el aditivo A (resina) existe una resistencia baja lo cual nos indica que el porcentaje de azufre modificado no es el ideal, por lo que realizaremos posteriores dosificaciones asiendo variar el porcentaje de azufre modificado y la relación aditivo azufre en intervalos de 0.075, 0.10, 0.125, 0.15 (este intervalo se obtuvo del ensayo realizado)

4.4. ENSAYO PRELIMINAR DE LA MEZCLA PARA LA ELABORACIÓN DE HORMIGONES A BASE DE AZUFRE MEDIANTE EL MODELO FACTORIAL 4^2 .

Una vez elegido el aditivo modificador (aditivo tipo A) y los intervalos de variación de la relación aditivo/azufre se procedió a realizar dosificaciones de mezclas de hormigón variando los porcentajes de aglomerante (azufre modificado) y la relación aditivo/azufre con el fin de optimizar la el diseño de mezclas. Las probetas utilizadas para este ensayo son de 10 cm de diámetro y 20 cm de alto Con una edad de ruptura de 24 horas.

4.4.1. ENSAYO PRELIMINAR DE DOSIFICACIONES DE HORMIGONES A BASE DE AZUFRE POR EL MODELO FACTORIAL 4^2 .

Para el diseño de dosificaciones se utilizo un método de diseño experimental que seria el diseño factorial 4^2 con este método de diseño de dosificación se elaboro una tabla diseño de dosificaciones (Tabla IV-39) haciendo variar dos parámetros: el porcentaje de aglomerante (azufre modificado) y al relación aditivo/azufre.

Tabla IV- 39: Diseño Preliminar De Dosificaciones Del Modelo Factorial 4^2 Para La Obtención Del Diseño De Mezcla Óptimo aditivo tipo (A)

DISEÑO DE DOSIFICACIONES DEL MODELO FACTORIAL 4^2					
Aditivo tipo (A)					
% DE AZUFRE MODIFICADO =		(A') = 20%	(B') = 25%	(C') = 30%	(D') = 35%
RELACIÓN (Ad/Az)	(A) = 0,075	A - A'	A - B'	A - C'	A - D'
	(B) = 0,100	B - A'	B - B'	B - C'	B - D'
	(C) = 0,125	C - A'	C - B'	C - C'	C - D'
	(D) = 0,150	D - A'	D - B'	D - C'	D - D'

Fuente: Elaboración Propia

En Tabla IV-40 se muestra la dosificación en peso de los materiales de acuerdo al diseño de dosificaciones desarrollado por el modelo factorial 4^2 para la elaboración de 4 probetas por dosificación.

Tabla IV- 40: Dosificación En Peso De Materiales De Acuerdo Al Diseño Del Modelo Factorial 4^2 Para La Elaboración De 4 Probetas (grs.) Por Dosificación con aditivo tipo (A)

DOSIFICACIÓN EN PESO DE MATERIALES DE ACUERDO AL DISEÑO DEL MODELO FACTORIAL 4^2 PARA LA ELABORACIÓN DE 4 PROBETAS (grs.) aditivo tipo (A)						
% DE AZUFRE MODIFICADO =			20%	25%	30%	35%
RELACIÓN (Ad/Az)	0,075	arena =	3552	3330	3108	2886
		grava=	5328	4995	4662	4329
		azufre=	2220	2775	3330	3885
		llenante=	720	675	630	585
		aditivo=	180	225	270	315
	0,1	arena =	3552	3330	3108	2886
		grava=	5328	4995	4662	4329
		azufre=	2160	2700	3240	3780
		llenante=	720	675	630	585
		aditivo=	240	300	360	420
	0,125	arena =	3552	3330	3108	2886
		grava=	5328	4995	4662	4329
		azufre=	2100	2625	3150	3675
		llenante=	720	675	630	585
		aditivo=	300	375	450	525
	0,15	arena =	3552	3330	3108	2886
		grava=	5328	4995	4662	4329
		azufre=	2040	2550	3060	3570
		llenante=	720	675	630	585
		aditivo=	360	450	540	630

Fuente: Elaboración Propia

El mezclado y vaciado se lo realizo de acuerdo al procedimiento indicado en el capítulo III subtítulo 3.4.3.

NOTA: El llenante incorporado a la mezcla (ceniza volcánica) es del orden de 0,075 de la relación llenante/agregados (arena, grava), esta relación se obtuvo del ensayo de morteros, con la cual obtuvimos los mejores resultados tanto en resistencia como en acabado.

4.4.2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO UTILIZADO EN LA ELABORACIÓN DE HORMIGONES A BASE DE AZUFRE

En este subtítulo se quiere hacer un reporte fotográfico de los equipos utilizados en el mezclado del Hormigón a base de Azufre y confección de probetas.

Mezcladora para Hormigón a base de Azufre.- Es de tamaño mediano y tiene una capacidad de 50lts cuenta con las siguientes modificaciones:

- ✱ sistema de calentamiento que consta de 3 calentadores a gas
- ✱ recubrimiento de fibra de vidrio al rededor del tambor para evitar la perdida del calor
- ✱ forrado interior con planchas de acero inoxidable
- ✱ aspas de platino de acero inoxidable.
- ✱ termómetro ubicado cerca de la boca del tambor

Figura IV- 20: Sistema De Calentamiento De La Mezcladora (Izquierda) Y Forro De Fibra De Vidrio (Derecha)



Fuente: Elaboración Propia

Figura IV- 21: Forrado Interior Con Planchas De Acero Inoxidable Y Aspas De Platino De Acero Inoxidable (Izquierda), Termómetro Cerca De La Boca Del Tambor (Derecha)



Fuente: Elaboración Propia

Moldes.- de diseño propio, tienen una forma cilíndrica, de 10cm de diámetro y 20 cm de altura. Confeccionado con tubo metálico de un espesor igual a 0,8 mm. Con bases de plancha metálica de 1 mm de espesor.

Figura IV- 22: Moldes De Forma Cilíndrica, De 10 cm De Diámetro Y 20 cm De Altura.



Fuente: Elaboración Propia

Equipo de protección.-

- ☀ Overoles: resistentes al calor (Figura IV-23 derecha)
- ☀ Barbijos y lentes : para evitar la inhalación de gases desprendidos por el azufre e irritación de los ojos durante el proceso de fundición, mezclado y elaboración de las probetas (Figura IV-24 derecha)
- ☀ Guantes: guantes de cuero para la manipulación de la mezcla en caliente y guantes de goma para la manipulación del azufre en frío (Figura IV-24 izquierda)
- ☀ Cascos y botas (Figura IV-25)

Figura IV- 23: Protección Personal (Izquierda), Overoles (Derecha)



Fuente: Elaboración Propia

Figura IV- 24: Guantes De Cuero (Izquierda), Barbijos Y Lentes (Derecha)



Fuente: Elaboración Propia

Figura IV- 25 Cascos (Izquierda), Botas (Derecha)



Fuente: Elaboración Propia

Balanza y termómetro.- la balanza Con capacidad de 2.000 g y precisión de 0.5 g. y el termómetro digital con alcance a una temperatura máxima de 240 °C (Figura IV- 26)

Figura IV- 26: Balanza y termómetro digital



Fuente: Elaboración Propia

Prensa hidráulica: es una prensa manual análoga para ensaye a compresión (Figura IV- 27), alcanza una medición de 1500 KN y cuenta con un manómetro Helicoidal. Esta prensa se encuentra ubicada en el laboratorio de suelos y hormigones de la UAJMS en zona El Tejar

Figura IV- 27: Prensa Hidráulica Para Pruebas De Resistencia A La Compresión Del Laboratorio De Suelos Y Hormigones De La UAJMS



Fuente: Elaboración Propia

4.4.3. PROCESO DE ELABORACIÓN DE PROBETAS DE HORMIGÓN A BASE DE AZUFRE

Proceso De Confección De Probetas:

Figura IV- 28: Mezclado de la Arena con la Ceniza Volcánica y posterior Calentamiento De Los Agregados en horno.



Fuente: Elaboración Propia

Figura IV- 29: Mezclado del aditivo con los catalizadores y fundición del Azufre Modificado



Fuente: Elaboración Propia

En Figura IV-28 se muestra el mezclado de la arena con el llenante de ceniza volcánica y proceso de calentamiento de los agregados en un horno; en la Figura IV-29 se muestra el mezclado del aditivo (resina de poli estireno) con los respectivos catalizadores y la fundición del azufre modificado para su posterior mezclado con el aditivo modificador a una temperatura controlada para luego realizar el mezclado (Figura IV-30) de estos materiales en la mezcladora para H²S^o y su posterior vaciado en los moldes.

Figura IV- 30: proceso del Mezclado y vaciado de probetas de Hormigón a Base de Azufre



Fuente: Elaboración Propia

Acabado De Las Probetas De Hormigón A Base De Azufre

Figura IV- 31: Acabados De Probetas De Hormigón a Base de Azufre con distintas dosificaciones



Fuente: Elaboración Propia

En Figura IV-31 se observan los acabados de las probetas de H°S°, las probetas que tienen un acabado superficial brusco (izquierda) tienen una dosificación de 80% de agregados y 20% de azufre modificado y por consiguiente esto afecta negativamente en las resistencias, mientras que las probetas que tienen un acabado superficial uniforme liso (derecha) tienen una dosificación de 25%, 30% azufre modificado y 75%, 70% de agregados.

4.4.4. RESISTENCIA MECÁNICA A LA COMPRESIÓN.

Des pues del confeccionara las probetas estas fueron sometidas al ensayo de rotura por compresión registrándose las resistencias máximas a una edad del hormigón de un 1 día. La prensa hidráulica utilizada es del laboratorio de suelos y hormigones de la UAJMS. Teniendo así los siguientes resultados:

Tabla IV- 41: Fuerza Ultima Aplicada (kN) En Probetas De Hormigón a Base de Azufre con aditivo tipo (A)

FUERZA ÚLTIMA APLICADA (kN) EN PROBETAS DE H°S° aditivo tipo (A)									
% DE AZUFRE MODIFICADO		20%		25%		30%		35%	
RELACIÓN (Ad/Az)	0,075	50	85	40	50	50	55	10	25
		80	100	55	60	60	70	25	30
	0,1	40	70	60	75	40	60	15	25
		70	75	80	105	65	65	30	30
	0,125	55	80	20	50	20	20	10	20
		85	85	60	70	20	20	20	20
	0,15	20	55	10	10	10	10	10	10
		50	60	10	10	10	10	10	10

Fuente: Elaboración Propia

En Tabla IV-41 se muestra la carga máxima aplicada (kN) en las probetas de hormigón a base de azufre dosificadas por el modelo factorial 4^2 confeccionándose 4 probetas de H°S° por cada tipo de dosificación

Tabla IV- 42: Resistencia Máxima A La Compresión (kg/cm²) En Probetas De Hormigón a Base de Azufre con aditivo tipo (A)

RESISTENCIA MÁXIMA A LA COMPRESIÓN (kg/cm ²) aditivo tipo (A)					
% DE AZUFRE MODIFICADO		20%	25%	30%	35%
RELACIÓN (Ad/Az)	0,075	64,89	51,92	64,89	12,98
		103,83	64,89	71,38	32,45
		110,32	71,38	77,87	32,45
		129,79	77,87	90,85	38,94
	0,1	51,92	77,87	51,92	19,47
		90,85	97,34	77,87	32,45
		90,85	103,83	84,36	38,94
		97,34	136,28	84,36	38,94
	0,125	71,38	25,96	25,96	12,98
		103,83	64,89	25,96	25,96
		110,32	77,87	25,96	25,96
		110,32	90,85	25,96	25,96
	0,15	25,96	12,98	12,98	12,98
		64,89	12,98	12,98	12,98
		71,38	12,98	12,98	12,98
		77,87	12,98	12,98	12,98

Fuente: Elaboración Propia

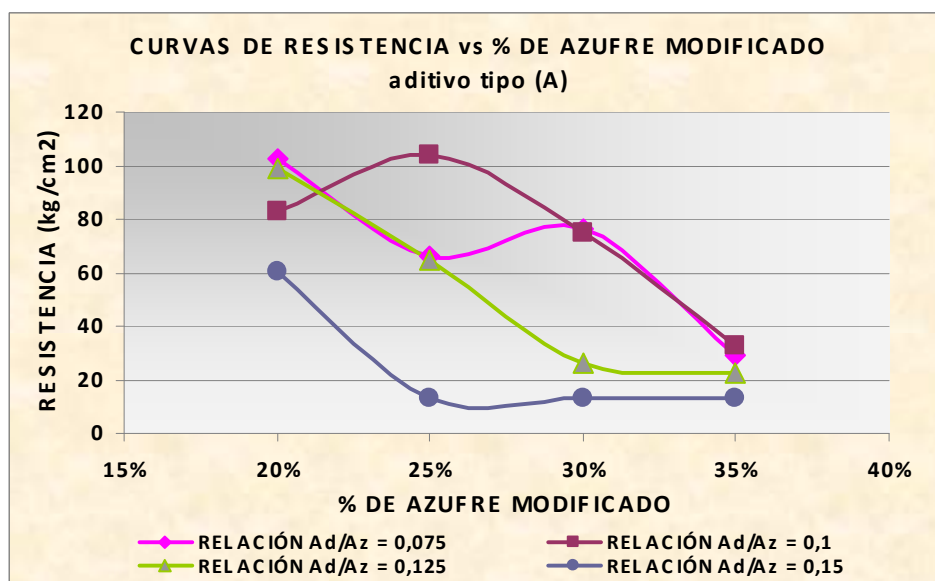
En la Tabla IV-42 se muestra la resistencia máxima a la compresión (kg/cm²) en probetas de Hormigones a Base de Azufre. La resistencia a la compresión de las probetas se calcula dividiendo la carga máxima aplicada entre el área de contacto de la probeta.

Tabla IV- 43: Resistencia Máxima Promedio A La Compresión (kg/cm²) En Probetas De Hormigón a Base de Azufre con aditivo tipo (A)

RESISTENCIA MÁXIMA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN (kg/cm ²) aditivo tipo (A)					
% DE AZUFRE MODIFICADO		20%	25%	30%	35%
RELACIÓN (Ad/Az)	0,075	102,2075	66,515	76,2475	29,205
	0,1	82,74	103,83	74,6275	32,45
	0,125	98,9625	64,8925	25,96	22,715
	0,15	60,025	12,98	12,98	12,98

Fuente: Elaboración Propia

Figura IV- 32: Curvas De Resistencia A Compresión vs. %De Azufre Modificado Con Distintas Variaciones De La Relación Ad/Az con aditivo tipo (A)



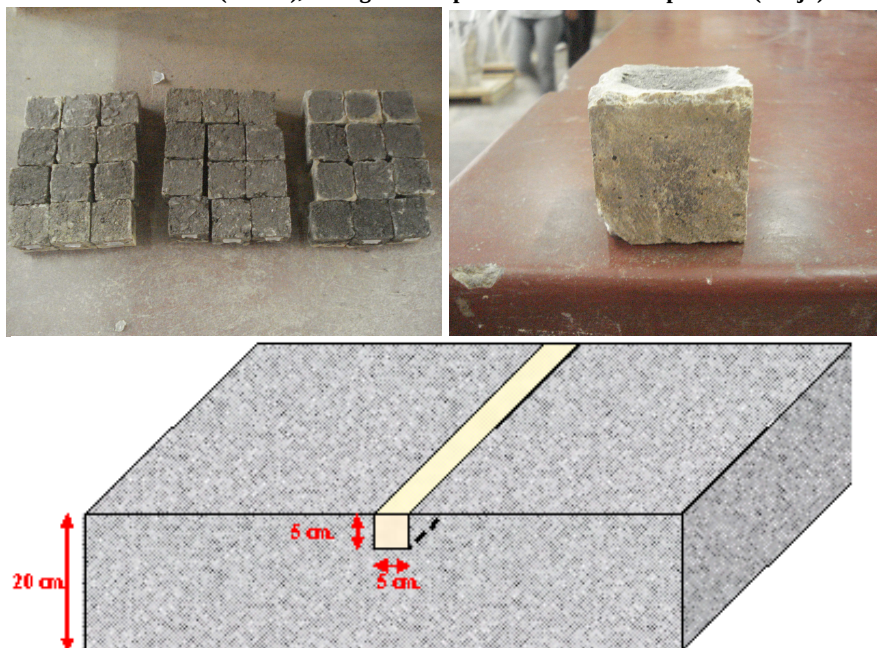
Fuente: Elaboración Propia

En la figura IV- 32 se puede observar que las resistencias obtenidas con los distintos porcentajes de azufre modificado son relativamente bajas, esto debido a que en la mayoría de las probetas el azufre modificado y el material fino se asentaron en la parte inferior dejando el tercio superior de la probeta con una carencia de estos dos componentes, razón por la que en el momento de romper las probetas estas fallaron en dicho extremo (tercio superior) haciendo que los resultados obtenidos sean bajos, otro factor para que la resistencia sea baja en las probetas con mayor porcentaje de azufre modificado fue que este componente no termino de secar; en lo que se refiere a la parte inferior de la probeta esta no sufrió ningún daño al momento de la ruptura lo que nos llevo a realizar nuevos ensayos con probetas mas pequeñas, ya que la falla a reparar en pavimentos no excederá los 5 cm de profundidad según el diseño propuesto para la reparación (ver capítulo II subtítulo 2.2.4.); en estas probetas se demostrara la resistencia que debe tener el hormigón de azufre ya que trabajara en esas dimensiones a la hora de ser puesto en obra.

4.5. DISEÑO FINAL DE LA MEZCLA ÓPTIMA PARA LA ELABORACIÓN DE HORMIGONES A BASE DE AZUFRE MEDIANTE EL MODELO FACTORIAL 4^2 .

El diseño de la mezcla se lo realiza de la misma forma que se hizo con el ensayo preliminar (Tabla IV- 39). Las probetas utilizadas para este ensayo son cubos de 5 cm X 5 cm X 5 cm. Con una edad de ruptura de 24 horas; se incorporara un llenante a la mezcla para proporcionarle un mejor acabado y mayor resistencia en una relación llenante/agregados de 0,075. Se eligieron esta dimensión de probetas debido a que la configuración de sellado de la grietas será de estas dimensiones (alto, ancho).

Figura IV- 33: Probetas de Hormigón de Azufre realizadas con distintos porcentajes de aditivo y distintos porcentajes de Azufre Modificado (arriba), configuración para las losas a ser reparadas (abajo)



Fuente: Elaboración Propia

4.5.1. DISEÑO FINAL DE DOSIFICACIONES DE HORMIGONES A BASE DE AZUFRE POR EL MODELO FACTORIAL 4^2 .

En Tabla IV-44 se muestra la dosificación en peso de los materiales de acuerdo al diseño de dosificaciones desarrollado por el modelo factorial 4^2 para la elaboración de 4 probetas por dosificación.

Tabla IV- 44: Dosificación En Peso De Materiales De Acuerdo Al Diseño Del Modelo Factorial 4² Para La Elaboración De 4 Probetas de 5x5x5 (grs.) Por Dosificación con aditivo tipo (A)

DOSIFICACIÓN EN PESO DE MATERIALES DE ACUERDO AL DISEÑO DEL MODELO FACTORIAL 4 ² PARA LA ELABORACIÓN DE 4 PROBETAS (grs.) aditivo tipo (A)						
% DE AZUFRE MODIFICADO =			20%	25%	30%	35%
RELACIÓN (Ad/Az)	0,075	arena =	352	330	308	286
		grava=	528	495	462	429
		azufre=	220	275	330	385
		llenante=	71	67	62	58
		aditivo=	18	22	27	31
	0,1	arena =	352	330	308	286
		grava=	528	495	462	429
		azufre=	214	268	321	375
		llenante=	71	67	62	58
		aditivo=	24	30	36	42
	0,125	arena =	352	330	308	286
		grava=	528	495	462	429
		azufre=	208	260	312	364
		llenante=	71	67	62	58
		aditivo=	30	37	45	52
	0,15	arena =	352	330	308	286
		grava=	528	495	462	429
		azufre=	202	253	303	354
		llenante=	71	67	62	58
		aditivo=	36	45	54	62

Fuente: Elaboración Propia

El mezclado y vaciado se lo realizo de acuerdo al procedimiento indicado en el capitulo III subtítulo 3.4.3.

NOTA: El llenante incorporado a la mezcla (ceniza volcánica) es del orden de 0,075 de la relación llenante/agregados (arena, grava), esta relación se obtuvo del ensayo de morteros, con la cual obtuvimos los mejores resultados tanto en resistencia como en acabado.

4.5.2. RESISTENCIA MECÁNICA A LA COMPRESIÓN.

Des pues del confeccionara las probetas estas fueron sometidas al ensayo de rotura por compresión registrándose las resistencias máximas a una edad del hormigón de un 1 día.

La prensa hidráulica utilizada es del laboratorio de suelos y hormigones de la UAJMS. Teniendo así los siguientes resultados:

Tabla IV- 45: Fuerza Última Aplicada (kN) En Probetas De Hormigón a Base de Azufre Para La Obtención Del Diseño De Mezcla Óptimo con aditivo tipo (A)

FUERZA ÚLTIMA APLICADA (kN) EN PROBETAS DE H°S° aditivo tipo (A)									
% DE AZUFRE MODIFICADO		20%		25%		30%		35%	
RELACIÓN (Ad/Az)	0,075	17,8	46,4	45,2	57,6	33,5	31,5	23,2	28,4
		49,6	50,0	65,7	69,7	31,5	61,7	25,5	28,2
	0,1	44,7	45,6	17,8	37,5	23,0	27,4	16,5	20,5
		51,6	53,6	36,7	41,5	27,0	28,2	17,2	30,2
	0,125	61,7	65,7	33,5	67,7	23,0	49,6	14,3	16,8
		66,9	80,6	63,3	69,7	49,6	51,6	15,5	17,5
	0,15	27,8	28,6	50,4	52,8	15,4	16,2	8,7	10,2
		29,4	41,1	51,6	53,6	15,4	22,2	9,5	11,5

Fuente: Elaboración Propia

En Tabla IV-45 se muestra la carga máxima aplicada (kN) en las probetas de hormigón a base de azufre dosificadas por el modelo factorial 4^2 confeccionándose 4 probetas de Hormigón a Base de Azufre por cada tipo de dosificación.

Tabla IV- 46: Resistencia Máxima A La Compresión (kg/cm²) En Probetas De Hormigón a Base de Azufre Para La Obtención Del Diseño De Mezcla Óptimo con aditivo tipo (A)

RESISTENCIA MÁXIMA A LA COMPRESIÓN (kg/cm²) aditivo tipo (A)					
% DE AZUFRE MODIFICADO		20%	25%	30%	35%
RELACIÓN (Ad/Az)	0,075	72,5	184,1	128,3	94,6
		189,0	235,0	128,3	104,0
		202,2	267,8	136,5	115,8
		203,8	284,3	251,4	115,0
	0,1	182,5	72,5	93,8	67,3
		185,7	149,6	110,2	70,1
		210,4	152,9	111,9	83,6
		218,6	169,3	115,1	123,1
	0,125	251,4	136,5	93,8	58,3
		267,8	258,0	202,2	63,2
		272,8	276,0	202,2	68,5
		328,6	284,3	210,4	71,4
	0,15	113,5	205,4	62,6	35,5
		116,8	210,4	62,6	38,7
		120,1	215,3	65,9	41,6
		167,7	218,6	90,5	46,9

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla IV-46 se muestra la resistencia máxima a la compresión (kg/cm^2) en probetas de Hormigón de Azufre. La resistencia a la compresión de las probetas se calcula dividiendo la carga máxima aplicada entre el área de contacto de la probeta.

4.5.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO FACTORIAL 4²

Luego de haber obtenido las resistencias a la compresión de las probetas de Hormigón a base de Azufre se procedió a hacer un análisis estadístico individual de validación de datos (véase ANEXO E) para cada tipo de dosificación obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla IV- 47: Análisis de Validación De Las Resistencias 1ª parte

DEPURACIÓN DE DATOS					
% DE AZUFRE MODIFICADO		20%	25%	30%	35%
RELACIÓN (Ad/Az)	0,075	72,5	184,1	128,3	94,6
		189,0	235,0	128,3	104,0
		202,2	267,8	136,5	115,8
		203,8	284,3	251,4	115,0
	0,1	182,5	72,5	93,8	67,3
		185,7	149,6	110,2	70,1
		210,4	152,9	111,9	83,6
		218,6	169,3	115,1	123,1
	0,125	251,4	136,5	93,8	58,3
		267,8	258,0	202,2	63,2
		272,8	276,0	202,2	68,5
		328,6	284,3	210,4	71,4
	0,15	113,5	205,4	62,6	35,5
		116,8	210,4	62,6	38,7
		120,1	215,3	65,9	41,6
		167,7	218,6	90,5	46,9

Fuente: Elaboración Propia

Después de hacer la validación de datos de las resistencias de las probetas de H°S° obtenidas mediante el modelo factorial se en marcan con rojo (Tabla IV- 47) los valores que presentan un error significativo dentro de las resistencias de la probetas con el mismo tipo de dosificación para su posterior depuración.

Tabla IV- 48: Análisis de Validación De Las Resistencias 2° parte

DEPURACIÓN DE DATOS					
% DE AZUFRE MODIFICADO		20%	25%	30%	35%
RELACIÓN (Ad/Az)	0,075			128,3	94,6
		189,0	235,0	128,3	104,0
		202,2	267,8	136,5	115,8
		203,8	284,3		115,0
	0,1	182,5		93,8	67,3
		185,7	149,6	110,2	70,1
		210,4	152,9	111,9	83,6
		218,6	169,3	115,1	
	0,125	251,4			58,3
		267,8	258,0	202,2	63,2
		272,8	276,0	202,2	68,5
			284,3	210,4	71,4
	0,15	113,5	205,4	62,6	35,5
		116,8	210,4	62,6	38,7
		120,1	215,3	65,9	41,6
			218,6		46,9

Fuente: Elaboración Propia

En Tabla IV- 48 se muestra la tabla de resistencias con datos depurados

Tabla IV- 49: Resistencias Máximas Promedio A La Compresión (kg/cm²) En Hormigones A Base D e Azufre

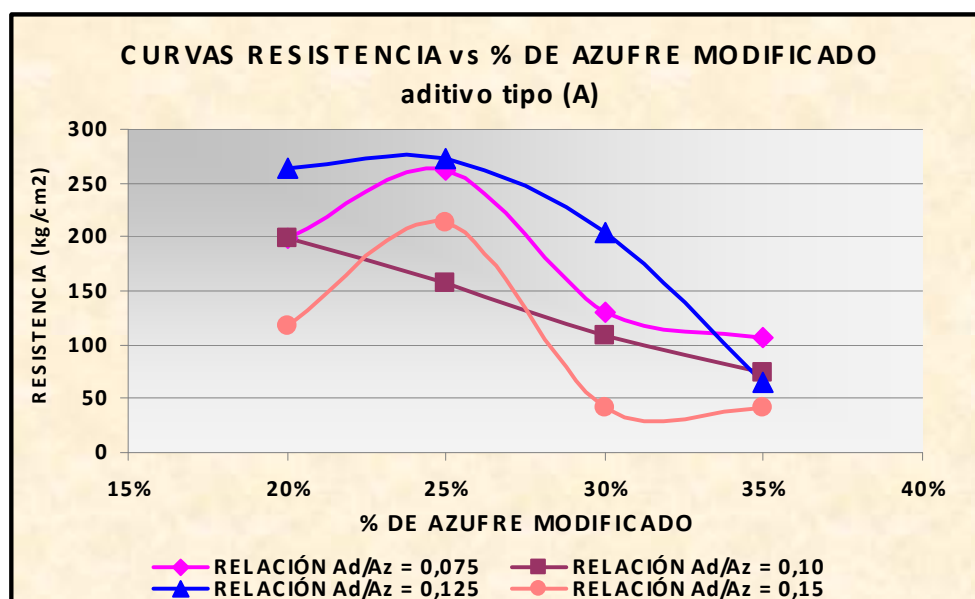
RESISTENCIA MÁXIMA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN (kg/cm ²)					
% DE AZUFRE MODIFICADO		20%	25%	30%	35%
RELACIÓN (Ad/Az)	0,075	198,333	262,366	131,016	107,339
	0,1	199,291	157,286	107,756	73,666
	0,125	264,008	272,765	204,900	65,341
	0,15	116,786	212,426	40,673	40,673

Fuente: Elaboración Propia

La Tabla IV- 49 muestra la resistencia máxima promedio a compresión para la obtención del diseño de mezcla óptima.

La resistencia máxima a compresión a las 24 horas para el diseño de mezcla óptima es de 272,765 kg./cm², esta resistencia corresponde a un hormigón tipo H250 según la Norma Boliviana del Hormigón (NBH 87).

Figura IV- 34: Curvas De Resistencia A Compresión vs. %De Azufre Modificado Con Distintas Variaciones De La Relación Ad/Az Para El Diseño De Mezcla Optimo con aditivo tipo (A)



Fuente: Elaboración Propia

Según la grafica de curvas mostrada en la Figura IV- 34 y la Tabla IV- 49 las probetas elaboradas con una relación aditivo azufre $Ad/Az=0.125$ y un porcentaje de azufre modificado del 25% son las que presentaron mayor resistencia en modelo de dosificaciones. El peso unitario promedio del hormigón de azufre realizado con esta dosificación es de 2440 kg./m^3 .

Tomando como referencia los resultados obtenidos del diseño de mezclas con el modelo factorial 4^2 . *Se asume que el diseño de mezcla óptimo del Hormigón a base de Azufre desarrollado en el proyecto tiene la siguiente dosificación:*

Tabla IV- 50: Dosificación En % Del Diseño De Mezcla Óptimo Desarrollado En El Proyecto Para Hormigones a Base de Azufre

DOSIFICACIÓN EN % DEL DISEÑO DE MEZCLA ÓPTIMO DESARROLLADO EN EL PROYECTO PARA HORMIGONES A BASE DE AZUFRE		
DISEÑO DE MEZCLA ÓPTIMO %	MATERIAL	PORCENTAJE
%AGREGADOS MODIFI.= 75 % Con relación Llen/Agre = 0,075	Arena	27,75 %
	Gravilla	41,62 %
	Llenante	5,63 %
AZUFRE MODIFICADO= 25 % con relación: $Ad/Az=0.125$	Azufre	21,87 %
	Aditivo	3,13 %

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla IV- 50 se expone la dosificación en porcentaje de mezcla óptima para hormigones a base de azufre, la misma que se obtuvo de los ensayos realizados asiendo variar dos componentes (%azufre de modificado y relación aditivo/azufre), en donde se pudo apreciar que la relación más conveniente es la indicada en la tabla ya que presenta mayor resistencia y un acabado uniforme.

4.6. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN A BASE DE AZUFRE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON EL DISEÑO DE MEZCLA ÓPTIMO.

Empleando el diseño de mezcla óptima mostrado en Tabla IV-50, se procedió a la elaboración de probetas .Se realizaron ensayos a compresión a los 1, 3, 7, 14 y 28 días de edad de las probetas de Hormigones a Base de Azufre.

Tabla IV- 51: Fuerza Ultima Aplicada En Las Probetas (kN) Para El Análisis De Resistencia A La Compresión Del Hormigón a Base de Azufre En Función Del Tiempo

FUERZA ÚLTIMA APLICADA EN LAS PROBETAS (kN) con aditivo tipo (A)								
% DE AZUFRE MODIFICADO = 25%								
RELACIÓN (Ad/Az) = 0,125	TIPO DE PROBETAS		EDAD DE RUPTURA DE PROBETAS (DÍAS)					
			1	3	7	14	28	
	3 PROBETAS DE 5X5X5 cm.		1	65,3	71,2	75,3	76,1	77,2
			2	66,5	72,5	76,2	76,8	76,9
			3	68,1	72,7	74,5	77	77,4

Fuente: Elaboración Propia

En Tabla IV-51 se muestra la carga máxima aplicada (kN) en las probetas de hormigón a base de azufre dosificadas para la obtención de la resistencia a compresión en función del tiempo.

Tabla IV- 52: Resistencia Máxima A La Compresión De Las Probetas De Hormigón a Base de Azufre (kg/cm²) Para El Análisis De Resistencia A La Compresión Del Hormigón a Base de Azufre En Función Del Tiempo

RESISTENCIA MÁXIMA A LA COMPRESIÓN DE LAS PROBETAS (kg/cm ²) con aditivo tipo (A)							
% DE AZUFRE MODIFICADO = 25%							
RELACIÓN (Ad/Az) = 0,125	TIPO DE PROBETA	área cm2	edad de ruptura de probetas (días)				
			1	3	7	14	28
	probetas de 5x5x5 cm.	25	266,259	290,316	307,034	310,296	314,781
		25	271,152	295,617	310,703	313,150	313,558
		25	277,676	296,432	303,772	313,965	315,596

Fuente: Elaboración Propia

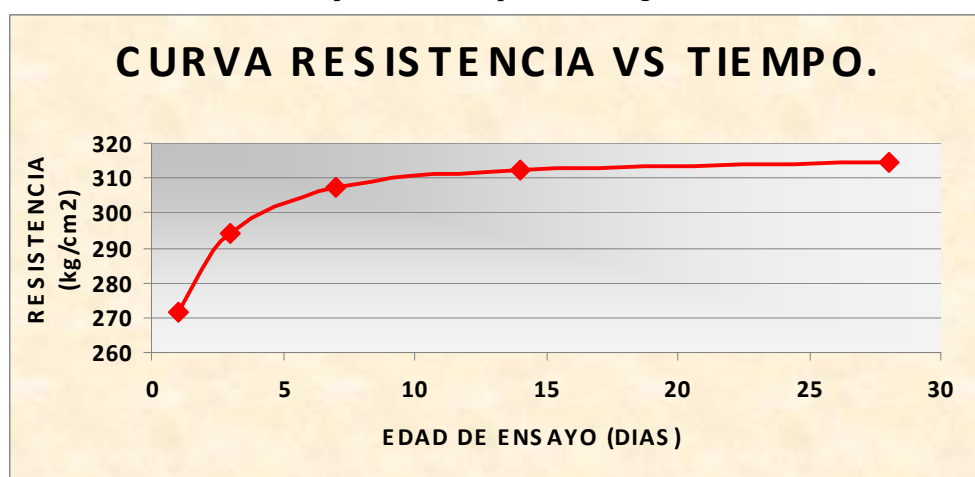
En Tabla IV-52 se muestra la resistencia máxima a compresión en las probetas de hormigón a base de azufre dosificadas para la obtención de la resistencia a compresión del Hormigón a Base de Azufre en función del tiempo.

Tabla IV- 5319: Promedio De La Resistencia Máxima A La Compresión Con Aditivo Tipo (A)

PROMEDIO DE LA RESISTENCIA MÁXIMA A LA COMPRESIÓN (kg/cm ²) con aditivo tipo (A)						
% DE AZUFRE MODIFICADO = 25%						
RELACIÓN (Ad/Az) = 0,125		Edad de ruptura de probetas (días)				
		1	3	7	14	28
	Resistencia “fc” a la compresión kg/cm ²	271,696	294,122	307,170	312,470	314,645

Fuente: Elaboración Propia

Figura IV- 35: Curva Resistencia A Compresión Vs Tiempo Del Hormigón a Base de Azufre



Fuente: Elaboración Propia

Según la grafica mostrada en la Figura IV-35 la resistencia máxima que adquiere el Hormigón a Base de Azufre a los 28 días es de 314,65 kg./cm², y la resistencia al primer día 271,70 kg/cm² siendo esta equivalente al 86% de la resistencia máxima alcanzada a los 28 días. También se puede observar que la resistencia tiende a alcanzar la mayoría de su resistencia entre los primeros 7 días.

Realizado este ensayo se puede decir que el hormigón a base de azufre alcanza una resistencia considerable a comparación del hormigón convencional, lo que nos permitirá utilizarlo como un producto en la reparación de pavimentos ya que alcanza el 86% de su resistencia a las 24 horas.

4.7. ELABORACIÓN DE PROBETAS DE HORMIGÓN CONVENCIONAL PARA REPRESENTAR EL MÉTODO DE REPARACIÓN DE LA FALLA

Se elaboraron probetas de hormigón hidráulico en dimensiones de 15 cm. de diámetro por 30cm. de alto con una dosificación para que se obtenga una resistencia característica de 200 kp/m^2 . los valores obtenidos por metro cúbico de hormigón fueron:

Cemento = 336 kg.

Agua = 225 litros

Arena = 788 kg.

Gravilla = 1003 kg.

Dosificación para 5 probetas de $0,0053 \text{ m}^3$ cada una, siendo un total de $0,0265 \text{ m}^3$ de hormigón.

Cemento = kg. 8,904 kg.

Agua = 5,963 litros

Arena = 22,472 kg.

Gravilla = 25,334 kg.

Las probetas realizadas con hormigón convencional fueron selladas a los 20 días de su elaboración y fueron rotas a los 21 días.

A continuación explicamos el proceso de sellado de las probetas de hormigón hidráulico:

Se realiza el preparado de la mezcla de Mortero de azufre como se ve en la figura IV-36.

Figura IV- 36: Preparado de la Mezcla de Mortero de Azufre



Fuente: Elaboración Propia

Realizamos el correspondiente ruteado del elemento a sellar (probeta), este es realizado con la ayuda de un soplete el cual limpiará y proporcionará la temperatura necesaria que se requiere para que la mezcla se adhiera de manera satisfactoria y penetre en las grietas (Figura IV-37), de esta manera se aumentará la vida útil del producto y de la zona a reparar.

Figura IV- 37: Equipo para el Ruteado de l elemento a Sellar



Fuente: Elaboración Propia

Una vez realizado el ruteado se procede a sellar la grieta, en este caso la abertura que se dejo en la probeta; el sellado se lo realiza incorporando la mezcla a la abertura con la ayuda de una espátula y compactando la mezcla con el uso de una barrilla (figura IV-38).

Figura IV- 38: Sellado de la Abertura de la Probeta



Fuente: Elaboración Propia

Pasadas las 24 horas se procede a romper las probetas, observando el comportamiento del producto con el hormigón hidráulico viejo cuando ambos son sometidos a una carga (figura IV- 39).

Figura IV- 39: Ensayo a Compresión de las Probetas Selladas con Mortero de Azufre



Fuente: Elaboración Propia

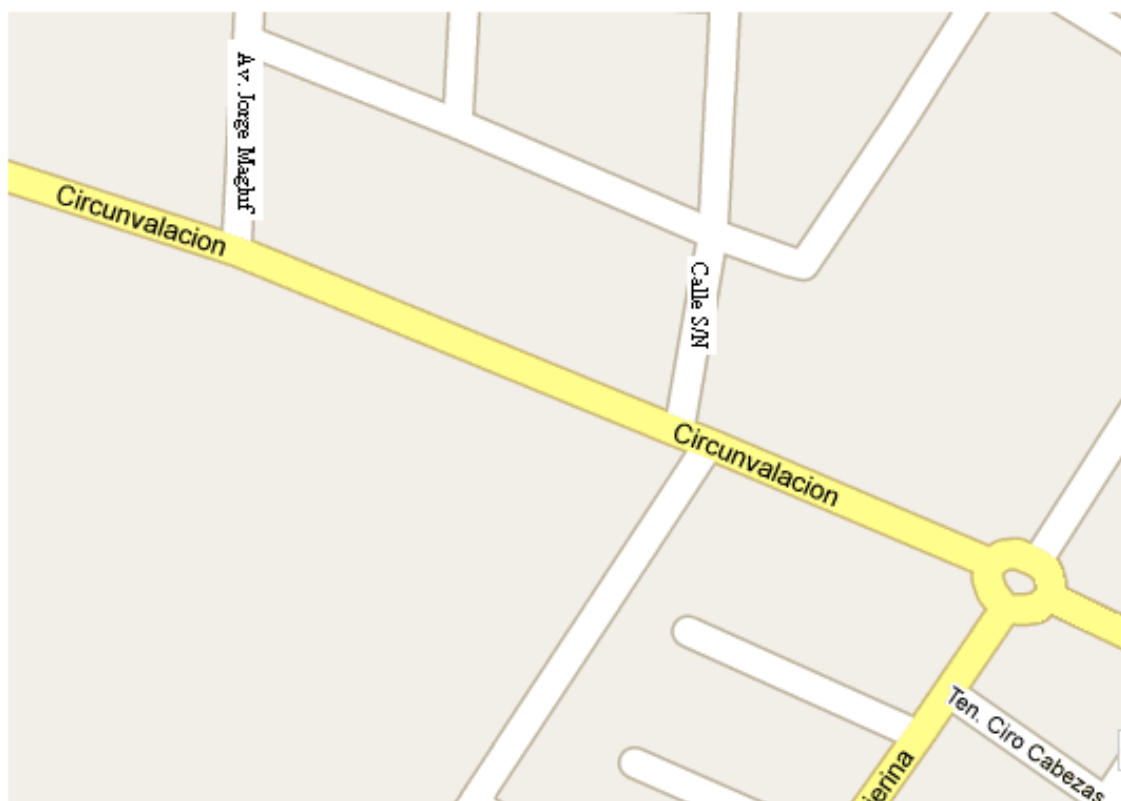
4.8. APLICACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO PARA LA REPARACIÓN DEL PAVIMENTO EN UNA LOSA DE LA CIUDAD DE TARIJA

4.8.1. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ZONA

El método será aplicado en la zona del barrio los Chapacos de la ciudad de Tarija; en la Avenida Circunvalación entre la Avenida Dr. Jorge Magluf que es el ingreso al barrio los Chapacos y la Avenida Froilan Tejerina (Figura IV- 40).

Esta Avenida (Circunvalación) es caracterizada por ser de pavimento rígido y tener un trafico pesado ya que es el eje por donde transitan los vehículos de alto tonelaje que pasan por la ciudad, razón por la cual las losas de este tramo tienden a presentar numerosas fallas en distintos puntos uno de esos puntos es el lugar a reparar.

Figura IV - 40: Mapa de Localización de la Vía bajo Análisis



Fuente: Elaboración Propia

4.8.2. UBICACIÓN DE LA LOSA EN LA MUESTRA DE ESTUDIO DE LA EVALUACIÓN SUPERFICIAL.

La muestra que se eligió para realizar la reparación de una de sus losas fue la muestra N° 6 (ver capítulo II subtítulo 2.2.9.), esta muestra tiene un PCI bajo ($PCI = 36$) y se encuentra con una calificación de malo (Tabla II-16); con relación a las demás muestras de la zona que se estudio esta muestra es la que se encuentra en peor estado.

Dentro de la muestra la losa a reparar es la número A6 correspondiente al lado derecho de la calzada del carril de subida, esta losa presenta una grieta lineal transversal que corta toda la losa en dos, tiene una severidad alta (ver ANEXO A). La longitud de la grieta es de 3,93 metros y el ancho de la grieta de 10 a 20 mm.

Figura IV- 41: Losa a Reparar de la Muestra 6 en la Zona de Evaluación Superficial.



Fuente: Elaboración Propia

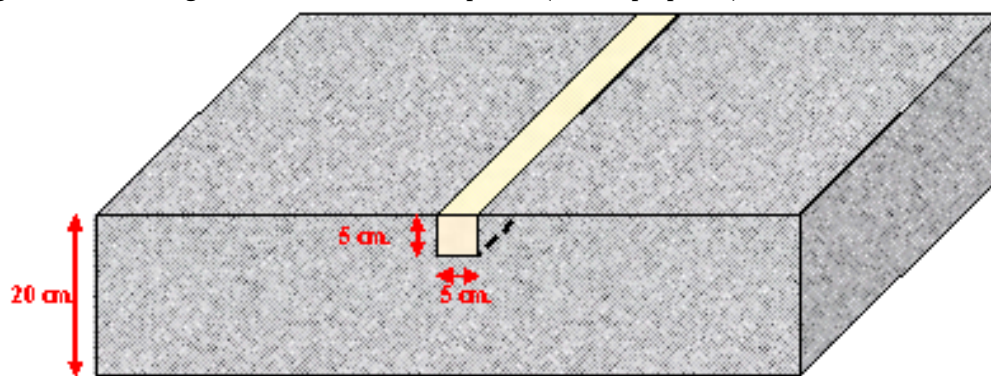
4.8.3. PROCEDIMIENTO PARA LA REPARACIÓN DE LA LOSA

El método empleado se describe en los siguientes puntos:

- Primeramente se debe realizar una evaluación de la zona donde se pretende realizar la reparación de las losas, con el motivo de verificar el estado en el que se encuentran las losas y de esta manera clasificar las fallas que presentan para así determinar la prioridad de reparación de las losas mas dañadas. Este procedimiento se lo realiza con una evaluación superficial para obtener el PCI de la zona de estudio.

- Una vez obtenido el PCI de la zona y de las correspondientes muestras se procede a elegir la muestra más dañada que es la que tienen preferencia a la hora de la reparación. En nuestro caso es la muestra N° 6 (ver capítulo II subtítulo 2.2.9.), de esta muestra se eligió la losa A6 que presenta una grieta lineal transversal.
- Elegida la losa a reparar se procede a elegir un tipo de configuración para su reparación, para lo cual proponemos ensanchar la grieta en un orden de 5 cm. y una profundidad de 5 cm.

Figura IV- 42: Configuración de la Losa a ser Reparada (método propuesto)



Fuente: Elaboración Propia

- Con la configuración elegida se procede a delimitar la sección de la grieta y después con la ayuda de una cortadora se procede a cortar la grieta delimitada para luego realizar el correspondiente picado con un cincel y combo (Figuras IV-43, IV-44, IV-45).

Figura IV- 43: Delimitación de la sección de la Grieta



Fuente: Elaboración Propia

Figura IV- 44: Corte de la Losa delimitada según la Configuración



Fuente: Elaboración Propia

Figura IV- 45: Picado de la Losa para su posterior Reparación



Fuente: Elaboración Propia

- Se procede a limpiar bien la sección a sellar (grieta), esto es realizado con una escoba y si se dispone de una compresora será mejor ya que cuanto más limpia este la sección la reparación será mas efectiva (Figura IV-46).

Figura IV- 46: Limpieza de la Grieta Calada para su posterior Sellado



Fuente: Elaboración Propia

- Terminadas estas actividades se elabora la mezcla sellante (mortero a base de azufre) que a continuación describimos en las siguientes figuras.

Figura IV- 47: Calentamiento de los Agregados en el Horno



Fuente: Elaboración Propia

Figura IV- 48: Fundido del Azufre a fuego lento en una olla



Fuente: Elaboración Propia

Figura IV- 49: Preparación del Aditivo (resina)



Fuente: Elaboración Propia

Figura IV- 50: Incorporación y Mezclado del Aditivo en el Azufre Fundido



Fuente: Elaboración Propia

Figura IV- 51: Mezclado del Azufre Modificado con los Agregados



Fuente: Elaboración Propia

Figura IV- 52: Ruteado de la Sección a Sellar (grieta) con soplete



Fuente: Elaboración Propia

Figura IV- 53: Sellado de la Grieta



Fuente: Elaboración Propia

Figura IV- 54: Pintado con Resina para ayudar a la impermeabilización y el deterioro superficial.



Fuente: Elaboración Propia

4.9. DETERMINACIÓN DE COSTOS

Los costos para realizar un Hormigón y Mortero a base de Azufre se exponen en las siguientes Tablas:

Tabla IV- 54: Costo de un metro cúbico de Mortero a Base de Azufre en Bs.

COSTO DEL MORTERO A BASE DE AZUFRE PARA 1m3 (Bs)				
MATERIALES	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo Parcial
Arena	m3	0,55	90	49,74
Ceniza volcánica	kg.	122,33	0,3	36,70
Azufre	kg.	629,10	7,2	4529,52
Aditivo (Resina)	kg.	69,90	40	2796,00
Gas	glob.	3	25	75,00
			Costo Total	7486,95

Fuente: Elaboración Propia

Tabla IV- 55: Costo de un metro cúbico de Hormigón a Base de Azufre en Bs.

COSTO DEL HORMIGÓN A BASE DE AZUFRE PARA 1m3 (Bs)				
MATERIALES	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo Parcial
Arena	m3	0,25	90	20,50
Grava	m3	0,39	120	46,80
Ceniza volcánica	kg.	137,37	0,3	41,21
Azufre	kg.	533,63	7,2	3842,14
Aditivo (Resina)	kg.	76,37	40	3054,80
Gas	glob.	3	25	75,00
			Costo Total	7082,51

Fuente: Elaboración Propia

Costo de la reparación de la losa en la Avenida Circunvalación

El volumen de mortero que entra en la grieta es de $0,01 \text{ m}^3$, debido a que la longitud de la grieta es de 3,93 m redondeando 4 m. debiendo ensancharse 5 x 5 cm. (ancho, alto). Para este volumen se necesita una inversión de **74,87 Bolivianos**.

Si se realiza la reparación con hormigón necesitamos **70,83 Bolivianos**.

Comparación de Costos con un Producto del mercado

Si comparamos costos con el producto para reparar grietas que nos ofrece Sika (Sikadur 52), el mismo que cuesta 200 Bs. el kilo y tiene un rendimiento de 1,10 kg./L de relleno; este producto es muy caro para emplearlo en la reparación de grietas que tiene un ancho considerable (3 a 50 mm.) y además si se tiene una cantidad enorme de losas dañadas el uso de este producto tendría un presupuesto muy elevado.

Tabla IV- 56: Comparación de Costo entre un Hormigón o Mortero de Azufre y El Producto Sikadur 52

Producto	Configuración de la grieta			Volumen (m3)	Rendimiento	Costo del producto (Bs.)	Costo sellado de la grieta (Bs)
	Largo	Ancho	Alto				
Hº de Azufre	3,93	0,05	0,05	0,01	-----	7082,51	70,83
Mortero de Az.	3,93	0,05	0,05	0,01	-----	7486,95	74,87
Sikadur 52	3,93	0,01	0,25	0,005	1100 kg/m3	200	1100,00

Fuente: Elaboración Propia

En cambio si empleamos el hormigón o el mortero de azufre estos costos rebajarían en comparación del anterior producto (Sika), pues se necesitaría una inversión menor y se obtendría los mismos resultados este análisis puede ser observado de mejor forma en la Tabla IV-56 (*Nota: el área de relleno para el producto Sika fue calculado como un triangulo*).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES.

DEL DISEÑO DE MEZCLA ÓPTIMO DEL MORTERO A BASE DE AZUFRE Y DE SU ACABADO SUPERFICIAL.

- ⊕ Para obtener la mezcla óptima del mortero a base de azufre se tuvo que realizar una serie de dosificaciones asiendo variar la relación Aditivo/Azufre y Llenante/Arena y no así el porcentaje de azufre modificado, éste se mantuvo en el orden del 30%, este valor fue determinado por experiencias de otros investigadores que trabajaron con este producto, este porcentaje de azufre modificado (azufre + aditivo) nos proporciona una adecuada mezcla.
- ⊕ La Tabla IV-18 muestra las resistencias máximas a compresión obtenidas en el primer ensayo donde los aditivos son: Resina Poliéster (A), Polímero Flux (B) y Caucho de llantas (C), se pudo observar que los mejores resultados a compresión corresponden al mortero elaborado con el aditivo B (Polímero Flux), y los peores resultados se encuentran en las muestras elaboras con el aditivo C (Caucho de llantas), además que todas las muestras presentan un acabado defectuoso lo que significa que le hace falta un material fino a la mezcla (llenante). Por lo expuesto anteriormente se procede a depurar el aditivo C (Caucho de llantas) que es el que obtuvo menor resistencia y se realiza una dosificación para encontrar el llenante que le de el acabado perfecto a la muestra.
- ⊕ La dosificación para encontrar el porcentaje de llenante adecuado se lo realiza asiendo variar la relación llenante/arena, en este caso el llenante vendría a ser la ceniza volcánica. La dosificación se realizó sin el uso de aditivos.
La relación que mejores resultados ofrece es la de 0,030 de relación llenante/arena, esta relación presenta un acabado uniforme (Figura IV-11).
- ⊕ Obtenida la relación llenante/arena que mejor acabado nos ofrece se realiza una nueva dosificación con la incorporación de aditivos (azufre modificado), que serán los dos aditivos que mejores resultados nos dieron en el primer ensayo (Resina Poliéster, Polímero Flux).

- ⊕ El aditivo que mejores resultados obtuvo fue el B (Polímero flux) llegando a una resistencia a compresión de 219 kg/cm^2 . a una relación aditivo/azufre de 0,05 (Tabla IV-26), además de presentar un excelente acabado , este aditivo será depurado por su excesivo grado de inflamación, lo que hace que este producto sea muy peligroso a la hora de realizar la mezcla ya que se trabaja con equipos que generan calor (cocina a gas, horno),
- ⊕ En cambio el aditivo A (Resina Poliéster) todavía presenta un acabado defectuoso el cual puede ser arreglado con la incorporación de un porcentaje más alto de llenante (ceniza volcánica); la resistencia a compresión máxima fue de $161,1 \text{ kg/cm}^2$. a una relación aditivo/azufre de 0,05 (para la relación llenante/arena de 0,03 Tabla IV-26). En cuanto se refiere a la peligrosidad de su uso éste no presenta ningún inconveniente, es así que nos quedamos con el aditivo A (Resina Poliéster) para realizar los siguientes ensayos.
- ⊕ Se realizó una dosificación con la variable llenante/arena y una relación aditivo/azufre fijo, esta relación se obtiene del ensayo anterior que vendría hacer el que mejor resultado obtuvo en relación a su resistencia, en nuestro caso 0,05, esta dosificación se realiza para encontrar el porcentaje de llenante adecuado para la mezcla (proporcione mejor acabado a las muestras).
- ⊕ La relación llenante/arena que mejor acabado ofrece es la de 0,075 (Figura IV-15), teniendo una resistencia a compresión de 177 kg/cm^2 . (Tabla IV-30), aunque esta resistencia no es la mayor es la que ofrece un mejor acabado; esta relación servirá para realizar la dosificación óptima del mortero y hormigón a base de azufre.
- ⊕ El porcentaje de mezcla óptima para morteros se lo realizó haciendo variar la relación aditivo/azufre (0.05, 0.10, 0.15 y 0.20), con una relación llenante/arena de 0,075.
- ⊕ Se determinó que las muestras que mejor resistencia a compresión tuvieron (Tabla IV-34) son las realizadas con una dosificación al 0,10 de relación aditivo/azufre, para el 30% de azufre modificado (azufre + aditivo), presentando a la hora de su elaboración una consistencia pastosa y uniforme, en cambio las otras dosificaciones presentaron algunos defectos en su acabado. En cuanto a la consistencia de la

mezcla se puede decir que a mayor porcentaje de azufre modificado la mezcla se hace más líquida.

- ⊕ La máxima resistencia obtenida fue de 204,9 kg/cm². en 24 horas de realizada la ruptura. El diseño de mezcla óptima es el que mostramos a continuación y será con este diseño que se trabajara en la reparación de pavimentos.

Tabla V- 1: Dosificación En % Del Diseño De Mezcla Óptimo Desarrollado En El Proyecto Para Morteros a Base de Azufre

DOSIFICACIÓN EN % DEL DISEÑO DE MEZCLA ÓPTIMO DESARROLLADO EN EL PROYECTO PARA MORTEROS A BASE DE AZUFRE		
DISEÑO DE MEZCLA ÓPTIMO %	MATERIAL	PORCENTAJE
%ARENA MODIFICADA= 70 % Con relación Llen/Are=0,075	Arena	64,75 %
	Llenante	5,25 %
AZUFRE MODIFICADO= 30 % con relación: Ad/Az=0,10	Azufre	27 %
	Aditivo	3 %

Fuente: Elaboración Propia

- ⊕ El mortero a base de azufre presentó un acabado superficial muy uniforme, representado básicamente por un mínimo porcentaje de porosidad en su superficie. Esto se constituye en una ventaja importante para su uso en zonas sometidas a corrientes, vapores y goteo continuo de ácidos y sulfatos, ya que este factor se traduce en la baja permeabilidad de este material de construcción y por lo tanto en la durabilidad de las estructuras construidas con este tipo de material

DEL DISEÑO DE MEZCLA ÓPTIMO DEL HORMIGÓN A BASE DE AZUFRE.

- ⊕ Para encontrar la mezcla óptima en hormigones se realizaron un ensayo preliminar que consiste en verificar el comportamiento del aditivo mediante el modelo factorial 4² (Resina poliéster) para la elaboración de hormigones.
- ⊕ La manipulación del hormigón a base de azufre depende de la cantidad de azufre modificado (azufre + aditivo) ya que si se le añade mucho azufre modificado la mezcla es muy líquida y carece de consistencia y si se le añade poco azufre

modificado la mezcla es muy seca y su manipulación tiende a disminuir. Se pudo observar que en las probetas con mayor cantidad de azufre modificado (aditivo + azufre) la resistencia tiende a bajar esto debido a que la resina no termina de secar.

- ⊕ Las resistencias a compresión obtenidas en las probetas (10 cm. de diámetro por 20cm. de alto) del ensayo preliminar son muy bajas y no cumplen las expectativas deseadas, esto debido a que en la mayoría de las probetas el azufre modificado y el material fino se asentaron en la parte inferior dejando el tercio superior de la probeta con una carencia de estos dos componentes, razón por la que en el momento de romper las probetas estas fallaron en dicho extremo (tercio superior) haciendo que los resultados obtenidos sean bajos; en lo que se refiere a la parte inferior de la probeta esta no sufrió ningún daño al momento de la ruptura.
- ⊕ El diseño de mezcla óptima se lo realizó en probetas de 5x5x5 cm. esta dimensión fue elegida porque la configuración de la reparación de la grieta lleva estas dimensiones es decir que la grieta debe ser ensanchada en una dimensión de 5 cm. por 5 cm. de profundidad. Al realizar el hormigón en estos moldes se obtendrá la resistencia real con la que trabajará el hormigón como material sellante, además se evitará que el material fino se asiente gracias a la altura del molde que es la misma que se presenta en la reparación de grietas.
- ⊕ Las dosificaciones de las probetas de 5x5x5 cm. se realizaron mediante el modelo factorial 4^2 que nos permite hacer variar dos componentes que en este caso son: el porcentaje de azufre modificado y la relación aditivo/azufre.
- ⊕ La dosificación que mejor resultado obtuvo fue la realizada a 25% de azufre modificado (aditivo + azufre) y a una relación aditivo/azufre de 0,125, dando con esta relación la máxima resistencia que es de $272,765 \text{ kg/cm}^2$. en 24 horas de realizada la ruptura.

Tabla V- 2: Dosificación En % Del Diseño De Mezcla Óptimo Desarrollado En El Proyecto Para Hormigones a Base de Azufre

DOSIFICACIÓN EN % DEL DISEÑO DE MEZCLA ÓPTIMO DESARROLLADO EN EL PROYECTO PARA HORMIGONES A BASE DE AZUFRE		
DISEÑO DE MEZCLA ÓPTIMO %	MATERIAL	PORCENTAJE
%AGREGADOS MODIFI.= 75 % Con relación Llen/Agre = 0,075	Arena	27,75 %
	Gravilla	41,62 %
	Llenante	5,63 %
AZUFRE MODIFICADO= 25 % con relación: Ad/Az=0.125	Azufre	21,87 %
	Aditivo	3,13 %

Fuente: Elaboración Propia

- ⊕ Como se puede observar en Tabla V-2 el hormigón a base de azufre presenta cinco componentes, los dos primeros son los agregados (arena, gravilla), el tercero es un llenante (ceniza volcánica) que fue de terminado en función de la relación llenante/agregados, este componente colabora en el acabado de del producto dándole mayor resistencia y homogeneidad, estos tres componentes vendrían a constituir el 75% (Agregado modificado) en peso del hormigón a base de azufre. Teniendo como agregados un 40 % de arena y un 60 % de grava de los cuales el 7,5 % es el material llenante (ceniza volcánica)
- ⊕ El porcentaje de azufre modificado (azufre + aditivo) en la elaboración del Hormigón a base de Azufre desarrollado en este proyecto es del 25% del total en peso.
- ⊕ El aditivo que mejor desempeño tuvo en la elaboración de Hormigones a base de Azufre ayudando tanto en mejorar la resistencia del hormigón como en la trabajabilidad del mismo fue el aditivo de **Resina Poliéster “tipo A”** con una relación en el aglomerante de aditivo azufre igual a $Ad/Az=0,125$
- ⊕ El hormigón a base de azufre presento un acabado superficial muy uniforme, representado básicamente por un mínimo porcentaje de porosidad en su superficie. Esto se constituye en una ventaja importante para su uso en zonas sometidas a corrientes, vapores y goteo continuo de ácidos y sulfatos, ya que este factor se traduce en la baja permeabilidad de este material de construcción y por lo tanto en la durabilidad de las estructuras construidas con este tipo de material

DE SU USO COMO MATERIAL PARA LA CONSTRUCCIÓN

En La Reparación De Fisuras

- ⊕ Debido que el hormigón a base de azufre tiene propiedades de rápido fraguado, buena adherencia y baja retracción, se plantea usar este material en la reparación de fisuras que se presenta en las construcciones de obras civiles especialmente en la reparación de fisuras en pavimentos rígidos de hormigón, Puesto que la buena adherencia y el rápido fraguado del Hormigón a base de Azufre implica que se puede recuperar el pavimento durante la noche, sin estorbar el tránsito, y como las características de ambos hormigones son compatibles, esto les permite trabajar bien en conjunto.

Como Recubrimiento Anticorrosivo

- ⊕ El hormigón de azufre tiene una alta resistencia a la corrosión haciendo posible de considerarse como un material para recubrimiento anticorrosivo en: piezas de hormigón (fundaciones y pilotes) que están en contacto con suelos excesivamente corrosivos, paredes con exposición a aguas saladas, desagües de trinchera para el tratamiento de aguas servidas con un PH menor a 1, células electrolíticas.

Elementos Prefabricados

- ⊕ Debido a que el Hormigón y Mortero de Azufre tiene un fraguado rápido y una resistencia a la corrosión alta, éste se podría utilizar en el vaciado de Tubos de hormigón a base de azufre para alcantarillas de tratamiento de aguas negras.
- ⊕ En Bloques y ladrillos de cualquier forma deseada hechos de Hormigón y Mortero de Azufre para construcciones de muro y piso de carga. facilitando construcciones rápidas y exactas.

DE LA ELABORACIÓN DE PROBETAS DE HORMIGÓN CONVENCIONAL PARA REPRESENTAR Y VERIFICAR EL METODO DE REPARCIÓN DE LA GRIETA Y SU RESPECTIVA ADHERENCIA

Se realizó la representación del sellado de la grieta en una probeta de hormigón convencional la cual fue sellada con el producto para luego ser sometida al ensayo de compresión (el proceso de sellado se explica en el capítulo IV subtítulo 4.6.) donde se observó que el producto sellante tiene una buena adherencia y resistencia, desprendiéndose únicamente cuando la probeta se rompe. La carga máxima que soportó la probeta fue de 320 kN.

DE LA REPARACIÓN DE LA LOSA UBICADA EN LA AVENIDA CIRCUNVALACIÓN

La reparación fue realizada en una losa que presentaba una grieta transversal de severidad alta.

Ésta fue realizada con la mezcla óptima de mortero y hormigón a base de azufre. La reparación se la realizó con dos preparaciones una de mortero y otra de hormigón las mismas que presentaron una buena trabajabilidad en obra, dándonos un tiempo considerado para su manipulación y aplicación en la grieta antes de que este se solidifica por la pérdida de calor.

Uno de los principales motivos para que el sellado resultara efectivo fue la realización del ruteado que consiste en limpiar y calentar con un soplete la superficie a sellar, este procedimiento ayuda a que el producto (hormigón y mortero a base de azufre) tenga una temperatura constante y seque de manera uniforme evitando la contracción del mismo.

Una vez sellada la grieta se debe realizar un pintado que colabore con el acabado superficial ya que éste estará en contacto con los vehículos que pasan, este pintado es realizado con resina poliéster que proporcionara un plastificado superficial evitando el desgaste del producto.

El sellado realizado no necesitó de las 24 horas para que se lanzara el tráfico por el sitio de reparación, éste sólo necesitó que el producto se enfriara aproximadamente 2 horas para posteriormente lanzar el tráfico por la zona reparada, esto muestra una de las ventajas de este producto el cual nos permite realizar la reparación sin incomodar al usuario conductor por largos periodos de tiempo.

DEL COSTO DE FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN Y MORTERO A BASE DE AZUFRE

El costo de elaboración del hormigón y mortero a base de azufre es muy alto si lo empleamos para realizar estructuras, lo que implicarían volúmenes grandes de este material que tiene un costo por metro cúbico de aproximadamente 7487 Bs. para morteros y 7083 Bs. para hormigones, cabe recalcar que estos costos se refieren al gasto en material que se necesita para elaborar un metro cúbico de hormigón o mortero.

Pero si nos referimos a emplearlo en la reparación de grietas en pavimentos rígidos estos costos bajan ya que los productos empleados para la reparación de grietas en pavimentos rígidos son muy caros y en nuestro medio estos productos algunas veces son escasos. Si analizamos el costo de reparación de la grieta sellada en la avenida Circunvalación esta resulta ser relativamente económico pues el volumen de grieta sellado fue de $0,01 \text{ m}^3$, y si se calcula el costo de la mezcla utilizada este seria de 74,82 Bs. en mortero y si se utiliza hormigón seria 70,80 Bs. En cambio si se hubiera utilizado un producto de reparación de grietas convencional (Sikadur – 52), es costo de sellado de la grieta hubiera sido de 1100 Bs. aproximadamente (ver Tabla IV-56). Asiando éstas comparaciones podemos decir que el producto elaborado es económico en relación con el producto Sikadur – 52, y por consiguiente es factible en grietas, y más aun en grietas de ancho considerable (1 a 5 cm.).

Lo mencionado anteriormente se puede confirmar con el análisis de precios unitarios (ANEXO G), donde se calcula la Reparación de Grietas con un metro cúbico de hormigón y mortero de azufre los mismos que tienen un costo de 20323,78 Bs. el hormigón y 20785,01 Bs. el mortero (este precio unitario fue realizado a base de la experiencia obtenida en la grieta que se reparo). Si se hace un análisis, podríamos reparar 100 losas con las mismas características de la losa sellada ya que en esta losa entro $0,01 \text{ m}^3$ de mezcla.

DESVENTAJAS DEL HORMIGÓN DE AZUFRE

- ⊕ El azufre tiene un bajo punto de fusión (aprox. 115°C) y se inflama aproximadamente 245°C . La combustión del azufre se automantiene y por ello, una vez inflamado, continuará prendido hasta extinguirse. Al quemar azufre se produce dióxido de azufre que es un gas tóxico.
- ⊕ El azufre puro se vuelve frágil y desmenuzable (forma cristalina ortorómbica) al enfriarse, haciéndolo inadecuado para diversas aplicaciones.
- ⊕ El azufre tiene un coeficiente de expansión térmica mucho mayor que el concreto de cemento portland, y el concreto de azufre tiende a contraerse al enfriarse.
- ⊕ Bajo condiciones húmedas, el acero de refuerzo tiende a corroerse pudiendo provocar una reacción aun más corrosiva en presencia del azufre, levando a considerar al hormigón a base de azufre inadecuado para aplicaciones estructurales con hormigón armado.

5.2. RECOMENDACIONES

GENERALES

- ⊕ No debe emplearse el azufre como material de construcción en donde la temperatura probablemente exceda de 80°C.
- ⊕ Un incendio de azufre en una estructura cerrada puede ser sofocada cerrando todas las entradas e impidiendo el ingreso del aire; también puede ser extinguida con agua o arena.
- ⊕ Evitar todas las fuentes potenciales de fuego (ejem. cocinas, calentadores) cerca de los componentes a base de azufre.
- ⊕ La tendencia del azufre al volverse frágil y desmenuzable se subsana añadiendo un elemento plastificador que retarde la cristalización del azufre. La norma ACI 548.2R-93 recomienda añadir dicitopentadieno para reducir la fragilidad del azufre e incrementar la estabilidad térmica del hormigón a base de azufre.

PARA EL USO DE HORMIGOBES Y MORTEROS DE AZUFRE EN LA REPARACIÓN DE PAVIMENTOS

Consideraciones de seguridad:

Las personas que van a intervenir en la reparación de pavimentos con hormigones y morteros a base de azufre tendrán que estar consientes que el azufre es un material tóxico especialmente cuando arde, éste desprende gases que al ser inhalados provocan tos y producen irritación en los ojos. Se dan las siguientes consideraciones de seguridad para evitar posibles incidentes que pudieran provocarse:

- ⊕ Contar con ropa de seguridad apropiada resistente al calor puesto que en la manipulación del $H^{\circ}S^{\circ}$ este se encuentra en altas temperaturas.
- ⊕ Utilizar barbijos y lentes de protección para evitar el contacto con los gases emanados por el azufre en un posible incendio.
- ⊕ Contar con un extintor a mano para prevenir cualquier incidente con el fuego.

Preparación de los materiales:

Los materiales que serán utilizados en la preparación de hormigones y morteros deberán tener las siguientes propiedades:

- ⊕ Los agregados: deberán consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes, con granulometría uniforme y libre de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta. Las partículas de agregado que sean desmenuzables o susceptibles de resquebrajarse deben ser rechazadas.
- ⊕ El azufre: los requerimientos mínimos del azufre para poder emplearse en la construcción según lo recomendado por el Instituto de Desarrollo de Azufre de Canadá (SUDIC) que indica que el azufre debe tener un contenido de materia orgánica menor a 4 % y contenido de azufre mayor al 95%.

Dosificación de los materiales:

La dosificación de los materiales se lo realiza con el diseño de mezcla óptima tanto para hormigones como para morteros (*Ver Capítulo IV.*)

Calentamiento de los materiales

- ⊕ Luego de tener listos los componentes del Hormigón o Mortero a base de Azufre se encienden los calentadores de la máquina mezcladora de Hormigón a base de Azufre para que ésta vaya ganando calor controlando que la temperatura no pase de los 120 °C; el mezclado también puede ser realizado de forma manual sin la necesidad de la mezcladora si este es el caso se espera que los agregados obtengan la temperatura requerida.
- ⊕ Se calientan los agregados en un horno a una temperatura constante no mayor a los 120 °C durante un tiempo aproximado de 20 minutos (la arena debe estar mezclada con el llenante de ceniza volcánica).



- ⊕ Luego se funde el azufre en un recipiente metálico a fuego lento esto para evitar que el azufre no alcance una temperatura mayor a los 115 °C porque si esto ocurriese el azufre podría arder.

- ✦ Se debe realizar el mezclado del aditivo (Resina Poliéster) con el catalizador y acelerante correspondiente para luego ser incorporado en el azufre fundido.



Mezclado

- ✦ Una vez que tenemos los agregados calientes y el azufre modificado fundido, se introduce la grava la arena y el azufre modificado en la mezcladora de H°S°.
- ✦ Como no se puede hacer el ensayo de revenimiento porque este está en una alta temperatura haciendo difícil su manipulación, se hace observación visual de la pasta de hormigón obtenida del mezclado es homogénea.

Colocado de la mezcla

- ✦ Para el colocado de la mezcla la superficie a sellar debe estar previamente ruteada (limpia y calentada con un soplete).
- ✦ Una vez rutada la superficie a sellar se procede a colocar la mezcla en la grieta con una cuchara compactando la mezcla con una varilla.
- ✦ La mezcla que se enfría y se endurece puede ser recalentada para su posterior uso ya que el producto es renovable en el tiempo
- ✦ Al finalizar el sellado se realiza una plastificación de la superficie con Resina Poliéster para garantizar la durabilidad del sellado.

DE LA POSIBLE INTOXICACIÓN POR LA ASPIRACIÓN DE DIÓXIDO DE AZUFRE

Inhalación: Puede provocar asfixia, tos, falta de respiración, dolor de garganta, estornudos, rinorrea, dificultad en la respiración, disnea, cianosis, dolor de pecho, traqueitis, bronquitis, nauseas, fatiga, vómitos, broncoconstricción, neumonitis, edema en la laringe/glottis, edema en las vías respiratorias superiores u obstrucción e incremento de la resistencia de la circulación del aire. La muerte puede ser causada por edema pulmonar, acidosis sistémica o paro respiratorio.

Los síntomas del edema pulmonar no se ponen de manifiesto, a menudo, hasta pasadas algunas horas y se agravan por el esfuerzo físico.

Ingestión: El contacto con el dióxido de azufre líquido puede provocar congelación y quemaduras químicas en la boca y a nivel esofágico.

Contacto con la piel: El dióxido de azufre es un irritante corrosivo de la piel. Puede provocar lesión o quemaduras por congelación debido al contacto de dióxido de azufre líquido.

Contacto con los ojos: El dióxido de azufre es un irritante corrosivo de los ojos, aunque es poco común que en estado gaseoso produzca lesiones.

Puede causar escozor en los ojos, lagrimeo, irritación conjuntival, enrojecimiento, dolor y quemaduras profundas graves.

Puede provocar lesión o quemaduras por congelación debido al contacto de dióxido de azufre líquido.

Opacidad corneal, erosión o necrosis y finalmente ceguera son posibles consecuencias de la exposición de los ojos.

Tabla V- 3: Concentraciones de dióxido de azufre y sus posibles Efectos

Concentración de dióxido de azufre	Efecto
1,3-5,2 mg/m ³ (0.5-2 ppm)	La función pulmonar cambia en sujetos asmáticos durante el ejercicio
7,9-13 mg/m ³ (3-5 ppm)	Detección del olor
16-31 mg/m ³ (6-12 ppm)	Puede causar irritación nasal y de la garganta
21-31 mg/m ³ (8-12 ppm)	Puede producir irritación conjuntival y lagrimeo
26 mg/m ³ (10 ppm)	Se puede observar irritación en las vías respiratorias superiores y posibles hemorragias nasales.
52 mg/m ³ (20 ppm)	Puede causar irritación en los ojos
131-262 mg/m ³ (50-100 ppm)	Se puede observar irritación grave de los ojos, garganta, tracto respiratorio inferior y lagrimeo, que pueden ser tolerados durante 30 – 60 minutos.
262 mg/m ³ (100 ppm)	IDLH (Inmediatamente peligroso para la vida y la salud; 30 minutos)
1049 mg/m ³ (400 ppm)	Concentración mínima letal en aire durante una exposición de 1 minuto.

MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS

OJOS: LAS PERSONAS CON EXPOSICIÓN POTENCIAL NO DEBEN LLEVAR LENTES DE CONTACTO. Lave los ojos contaminados con abundantes cantidades de agua. Aparte los párpados para asegurar un enjuague completo. Continúe por un mínimo de 15 minutos. Busque atención médica inmediata.

PIEL: Remueva la ropa contaminada tan rápido como sea posible. Lave el área afectada con voluminosas cantidades de agua. Busque atención médica inmediata.

INGESTIÓN: Ninguna requerida.

INHALACIÓN: disponer de atención médica inmediata. Lleva la víctima a un área no contaminada para que inhale aire fresco, mantenerla consciente y en reposo. Si para la respiración, suministrar oxígeno suplementario o respiración artificial.