



Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería en Construcción

Evaluación de la utilización de vidrio reciclado para el control de las fallas por humedad en pavimentos asfálticos en zonas lluviosas.

Por

Andrea Macarena Torres Peñaloza

Tesis para optar al título de Ingeniero Constructor y al grado de Licenciado en ciencias de la Construcción

Prof. Guía: Andrés Jamet

Junio, 2017

Agradecimiento

Empezar con Dios y mi familia, ya que sin su apoyo incondicional no sería ni la mitad de la persona que soy hoy en día, siendo mi pilar para lograr cualquier objetivo que tuviera en mente. A mi profesor guía Andrés Jamet y secretarías académicas, pues aun cuando no estuve cerca al término de este proceso siempre tuvieron la mejor disposición al momento de pedirles ayuda.

“No te rindas que la vida es eso, continuar el viaje, perseguir tus sueños, destrabar el tiempo, correr los escombros y destrabar el cielo”

Mario Benedetti.

Índice General

Resumen	8
Abstract	9
Capítulo 1.-Antecedentes Generales	10
1.1 Planteamiento del problema	10
1.2 Objetivo general	12
1.3 Objetivos específicos	12
1.4 Alcances	12
1.5 Hipótesis	12
1.6 Metodología de la investigación	13
1.6.1 Diagrama	13
1.6.2 Diseño de la investigación	14
Capítulo 2.- Marco teórico	17
2.1 Generalidades del asfalto	17
2.1.1 Sus orígenes	17
2.1.3 Tipos de asfaltos.....	18
2.1.4 Función de los asfaltos en los pavimentos	19
2.1.5 Cemento asfáltico	19
2.1.6 Aplicaciones asfálticas.....	20
2.2 Fallas por humedad en pavimentos asfálticos	22
2.2.1 Factores que influyen en las fallas por humedad	22
2.2.2 Formas de prevenir las fallas por humedad	24
2.2.3 Pruebas de sensibilidad por humedad	24
2.3 Mezclas Asfálticas con agregado de vidrio	26
Capítulo 3.- Diseño experimental	28
3.1 Definición de variables	28
3.1.1 Variables Independientes o Factores:	28
3.1.2 Variable Dependiente o Variables de respuesta:	28
3.2 Factorial Experimento	29
3.2.1 Primera etapa	29
3.2.2 Segunda etapa	30
3.3 Caracterización materiales constituyentes	31
3.3.1 Asfalto.....	31

3.3.2 Áridos	32
3.3.3 Vidrio	35
3.4 Primera etapa laboratorio: Influencia del contenido de vidrio en el contenido óptimo de asfalto de las HMA.....	37
3.5 Segunda etapa laboratorio: Evaluación de la susceptibilidad al agua de una Mezcla asfáltica en caliente modificada con vidrio	40
Capítulo 4.- Presentación y Análisis resultados.....	41
4.1 Primera etapa de investigación.....	41
4.2 Segunda etapa de investigación	60
4.2.1 Ensayo Tracción Indirecta.....	60
4.2.2 Resistencia conservada.....	61
Capítulo 5.- Conclusiones y propuestas de futuras investigaciones.....	64
Capítulo 6.- Anexos	67
6.1 Imágenes.....	67
6.2 Formulas	70
6.2.1 Ensayo Marshall	70
6.2.2 ITS y TSR.....	71
6.2.3 T de Student	72
Capítulo 7.- Bibliografía.....	73

Índice de Tablas

Tabla 3.1: Resultados de Parámetros Volumétricos, Estabilidad Marshall y fluencia para los porcentajes de vidrio	29
Tabla 3.2: Resultados ITS y TSR	¡Error! Marcador no definido. 9
Tabla 3.3: Granulometría de cada tipo de árido	31
Tabla 3.4: Constantes físicas e hídricas de los áridos	31
Tabla 3.5: Dosificación de áridos	32
Tabla 3.6: Granulometría de la mezcla	¡Error! Marcador no definido. 2
Tabla 3.7: Características de la mezcla	¡Error! Marcador no definido. 3
Tabla 3.8: Granulometría de vidrio	¡Error! Marcador no definido. 4
Tabla 3.9: Reemplazo del Polvo Roca a vidrio, en peso.	¡Error! Marcador no definido. 5
Tabla 3.10: Resultados Parámetros en muestra patrón.....	36
Tabla 4.1: Dmm probetas con Vidrio.....	40
Tabla 4.2: Resultados Parámetros en mezcla con vidrio.....	41
Tabla 4.3: Asfalto optimo para cada porcentaje de vidrio.....	57
Tabla 4.4: Resultados Parámetros de muestra en seco	58
Tabla 4.5: Resultados Parámetros de muestra saturadas.....	58
Tabla 4.6: Resultados TSR (%)......	59
Tabla 4.7: Variable de análisis estadístico	60
Tabla 4.8: Promedio y Varianza TSR.....	61
Tabla 4.9: Resultados T de Student.....	61

Índice de Figuras

Figura 1.1: Ensayo de Tracción indirecta (ITS)	165
Figura 2.1: Fallas por humedad	21
Figura 2.2: Glassphalt.....	25
Figura 3.1: Propiedades Volumétricas.....	287
Figura 3.2: Monograma de Heukelom.....	30
Figura 3.3: Granulometría de muestra patrón.....	33
Figura 3.4: Desgaste de los Ángeles. Laboratorio de Vialidad, V Región.....	354
Figura 3.5: Granulometría del Vidrio	365
Figura 3.6: Martillo Marshall. Laboratorio de Vialidad, V Región.....	387
Figura 3.7: Ensayo Marshall. Bitumix s.a. planta Concón	398
Figura 4.1: Vacíos de aire para 5% de vidrio.....	42
Figura 4.2: Estabilidad Marshall para 5% de vidrio.....	42
Figura 4.3: Densidad para 5% de vidrio.....	43
Figura 4.4: Vacíos llenos de asfalto para 5% de vidrio.	43
Figura 4.5: Vacíos agregado mineral para 15% de vidrio	44
Figura 4.6: Fluencia para 5% de vidrio	44
Figura 4.7: Vacíos de aire para 15% de vidrio.....	45
Figura 4.8: Estabilidad Marshall para 15% de vidrio.....	465
Figura 4.9: Densidad para 15% de vidrio	476
Figura 4.10: Vacíos llenos de asfalto para 15% de vidrio.....	476
Figura 4.11: Vacíos agregado mineral para 15% de vidrio.....	487
Figura 4.12: Fluencia para 15% de vidrio.....	487
Figura 4.13: Vacíos de aire para 25% de vidrio.....	498
Figura 4.14: Estabilidad Marshall para 25% de vidrio	498
Figura 4.15: Densidad para 25% de vidrio	509
Figura 4.16: Vacíos llenos de asfalto para 25% de vidrio.....	509
Figura 4.17: Vacíos de agregado mineral para 25% de vidrio	50
Figura 4.18: Fluencia para 25% de vidrio.....	50
Figura 4.19: Vacíos de aire para 35% de vidrio.....	51
Figura 4.20: Estabilidad Marshall para 35% de vidrio	51
Figura 4.21: Densidad para 35% de vidrio	532
Figura 4.22: Vacíos llenos de asfalto para 35% de vidrio.....	542
Figura 4.23: Vacíos agregado mineral para 35% de vidrio.....	543
Figura 4.24: Fluencia para 35% de vidrio.....	553
Figura 4.25: Vacíos de aire para 40% de vidrio.....	564
Figura 4.26: Estabilidad Marshall para 40% de vidrio	564
Figura 4.27: Densidad para 40% de vidrio	575
Figura 4.28: Vacíos llenos de asfalto para 40% de vidrio.....	575
Figura 4.29: Vacíos agregado mineral para 40% de vidrio.....	586
Figura 4.30: Fluencia para 40% de vidrio.....	586

Figura 4.31: ITS Saturada v/s ITS Seca	619
Figura 4.32: TRS(%) para cada cantidad de vidrio	60
Figura 6.1: Tratamiento de vidrio en laboratorio.....	65
Figura 6.2: Material tamizado	65
Figura 6.3: Material para las probetas	66
Figura 6.4: Preparación probetas	66
Figura 6.5: Material para Densidad máxima de la mezcla.....	67
Figura 6.6: Probetas ensayadas, con deformación pero sin rotura.....	67
Figura 6.7: Densidad Maxima de la mezcla	68
Figura 6.8: Vacios de aire en la mezcla.....	569
Figura 6.9: Vacios de agregado mineral.....	6956

Resumen

Los pavimentos asfálticos pueden generar grandes cantidades de fallas *in situ*, por ejemplo, una mala instalación, factor que se puede fiscalizar, pero la gran mayoría de estas fallas son difíciles de controlar, ya que se producen por el paso del tiempo, fluctuaciones de temperatura o bien la combinación de ambas.

La falla por humedad es una de las que forja mayor importancia para los pavimentos asfálticos, ya que el agua produce distintas reacciones químicas que generan el desprendimiento del ligante asfáltico y el agregado pétreo (Fenómeno de Stripping), haciéndose grietas cortas, agrietamientos y arrugas en el pavimento.

Se busca minimizar las fallas por humedad agregando a las mezclas asfálticas en caliente (HMA) vidrio reciclado, éste reemplazará en parte el Polvo Roca, ya que los trozos de vidrio grandes se alinean en la superficie del pavimento generando bajas en la resistencia al deslizamiento a comparación de un pavimento convencional. Esto se pudo apreciar en los pavimentos asfálticos con vidrio que se han trabajado con anterioridad en ciertos lugares de Estados Unidos, conociéndose a este sistema como glassphalt.

Se analizará si el vidrio ayuda a minimizar las fallas por humedad trabajándose con distintos porcentajes de éste en las muestras, las cuales nos llevarán a encontrar el asfalto óptimo, mediante el ensayo Marshall. Teniendo este óptimo se ensayarán nuevas probetas mediante Tracción indirecta (ITS), la cual da los resultados más fidedignos sobre este tipo de fallas, al conseguir los datos del ITS de las probetas saturadas y secas, se compararan estas mediante la relación de la Resistencia conservada (TSR), buscando que cumplan con el porcentaje estándar (80%) esperado.

Abstract

Asphaltic pavements can generate large amounts of *on site* faults, either due to poor installation, a factor that can be monitored, while the vast majority of these faults are difficult to control, as they occur over time, fluctuations Temperature or the combination of both.

Moisture failure is one of the most important for asphalt pavements, since water produces different chemical reactions which lead to the detachment of the asphalt binder and the stony aggregation (Stripping Phenomenon), causing short cracks, cracks and wrinkles in the pavement.

It is sought to minimize the moisture failure by adding recycled glass to the hot asphalt mixtures (HMA), this will partly replace the Roca Powder, since the large pieces of glass are aligned on the surface of the pavement generating downs on the slip resistance compared to a conventional pavement. These could be seen in asphalt pavements with glass that have been worked previously in certain places in United States. This system is known as Glassphalt.

It will be analyzed if the glass helps to minimize the faults by humidity working with different percentages of that in the samples, which will lead us to find the optimum asphalt by Marshall test. With this optimum, new samples will be tested by indirect traction (ITS), which gives the most reliable results on this type of failure, when once obtained the ITS data of the saturated and dry samples are compared they are compared by means of the relation of the conserved resistance (TSR), seeking to meet get the expected standard percentage (80%).

Capítulo 1.-Antecedentes Generales

1.1 Planteamiento del problema

Uno de los grandes factores que afectan la durabilidad *in situ* de la mezcla asfáltica son la edad de envejecimiento y la humedad (1). Por lo tanto las mezclas no solo deben ser construidas para resistir las sollicitaciones de carga, también deben poder enfrentar la acción del medio ambiente.

Cuantificar los daños que causa el ambiente es un proceso muy complicado, por lo que se separan todos los componentes (agua, aire, temperatura y rayos ultravioleta) y se evalúa cada uno de ellos de manera separada: sobre el ligante y la muestra (2; 1).

Además estos estudios utilizan ensayos y equipos que no pueden reproducir en su totalidad la influencia de los componentes ambientales (3), incluso la mayor parte de estas investigaciones combinan estos ensayos y equipos, intentando evaluar cómo es el cambio de las propiedades de estos materiales en condiciones ambientales (4; 1).

Ya que no hay ensayos precisos para medir la acción del medio ambiente, se busca mejorar el pavimento en su diseño o en la misma colocación, por lo cual en la actualidad se utilizan los aditivos en las mezclas asfálticas, que sirven como promotores de adherencia, disminuyendo la susceptibilidad a la humedad y reduciendo la viscosidad del asfalto líquido, este último siendo beneficioso al momento de mezclar y compactar la mezcla debido a la reducción de fricción entre los agregados. Gran parte de los aditivos se crearon como una medida para reducir la emisión de gases del efecto invernadero, disminuir el consumo de combustibles y reducir la exposición de los trabajadores a emulsiones asfálticas (5).

Una de las grandes mejoras que han tenido los pavimentos asfálticos son los aditivos, los cuales cada día trabajan en nuevos avances, buscando distintos componentes para su mejor utilización. Existen ciertos aditivos actuales que reducen la probabilidad de falla por humedad, pero al momento de aplicarlo se pueden producir ciertas complicaciones como: que al reducir la temperatura de los agregados estos no se sequen completamente, lo que daría un mal funcionamiento del pavimento. Además, un buen funcionamiento del aditivo puede llegar a ser muy variable, ya que hay veces que a un asfalto que no tenga la mejor calidad pero agregándole el aditivo suficiente se logra un buen funcionamiento del pavimento, mientras que hay otras veces que, aun cuando se aplique el mejor aditivo disponible en el mercado no llegará a alcanzar los estándares esperados (viscosidad, elasticidad, soporte de cargas constantes, etc).

Uno de los mayores daños en las zonas con gran humedad es el proceso en el cual las mezclas asfálticas pierden los áridos, fundamentalmente los gruesos, por el efecto de separación del ligante asfáltico con el agregado pétreo (6; 7; 8), la interacción entre ambos elementos deja de cumplir su función por efecto del agua, o de algún agente químico o físico (9; 10). Este fenómeno fue identificado en la década de los 30' (8; 11; 12) como stripping (pérdida de la película asfáltica), el cual conlleva al desmoronamiento del pavimento y aumenta la posibilidad de una falla prematura. Este fenómeno es muy amplio (lo que hace complejo la identificación de los factores que lo provocan), lo cual limita al momento de acotar los factores que lo provocan, por lo cual nos centraremos en las fallas por humedad de los pavimentos.

Sabemos que el asfalto es un material impermeable que reacciona muy poco ante la presencia de agentes químicos externos, sin embargo, el agua, al presentar como uno de sus componentes químicos esenciales el oxígeno y otros compuestos, es capaz de generar cambios en las propiedades químicas y físicas del asfalto, a largo plazo (ej. oxidación y endurecimiento), en especial cuando la interconexión ligante-pétreo es muy delgada (9; 10).

La susceptibilidad por humedad es un fenómeno complejo, que hace difícil predecir con certeza la causa que genera la falla prematuramente. Sin embargo, se sabe que ésta se incrementa por cualquier factor que aumente el contenido de agua en el asfalto (13), algunos de los factores que afecta la susceptibilidad por humedad son los siguientes; Características del ligante o del agregado, cantidad de vacíos de aire, clima de construcción y tráfico.

Para prevenir las fallas por humedad se deben tener pavimentos que no tengan una gran absorción de agua, como ya se dijo anteriormente, además, se deben tratar *in situ* las fallas por envejecimiento, ya que son estas las que provocan los espacios para que el agua ingrese al pavimento.

En esta investigación se propone que a los pavimentos asfálticos en zonas de climas húmedos se reemplace parte del árido (Polvo Roca) por vidrio molido. Se toma este material asumiendo que se obtendrían mejoras por la baja absorción de agua que tiene el vidrio, esto se debe a que tiene una permeabilidad similar a la de la arena gruesa. Además que este material tiene una alta aislación de temperatura (14), lo que provoca que el pavimento conserve más el calor y por consiguiente llegue a secarse de manera más rápida que un pavimento convencional (15; 16). Estos datos nos llevan a pensar que aun cuando el pavimento absorba algo de agua, esta será evaporada de manera más rápida lo que provocara que no se produzcan las reacciones químicas que hacen que el asfalto se separe del agregado.

Este tipo de pavimento se analizara con el ensayo de tracción indirecta (ITS), siendo este el más confiable para el análisis de problemas de humedad. Para esto se tomarán muestras secas y saturadas las que se analizarán mediante el estándar del coeficiente de resistencia conservada viendo con esto la influencia que tiene el vidrio en el pavimento y si es capaz de controlar las fallas por humedad.

1.2 Objetivo general

- ❖ Evaluar la influencia que tiene el vidrio reciclado como reemplazo parcial del árido fino en el control de la falla por humedad en mezclas asfálticas en caliente.

1.3 Objetivos específicos

- ❖ Evaluar la influencia que tiene la cantidad de vidrio en el contenido óptimo de asfalto de una mezcla asfáltica en caliente modificada.
- ❖ Determinar la Influencia que el contenido de vidrio en reemplazo parcial del árido fino tiene en las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas en caliente.
- ❖ Determinar la Influencia que el contenido de vidrio en reemplazo parcial del árido fino tiene en la tracción indirecta y resistencia conservada de las mezclas asfálticas en caliente.

1.4 Alcances

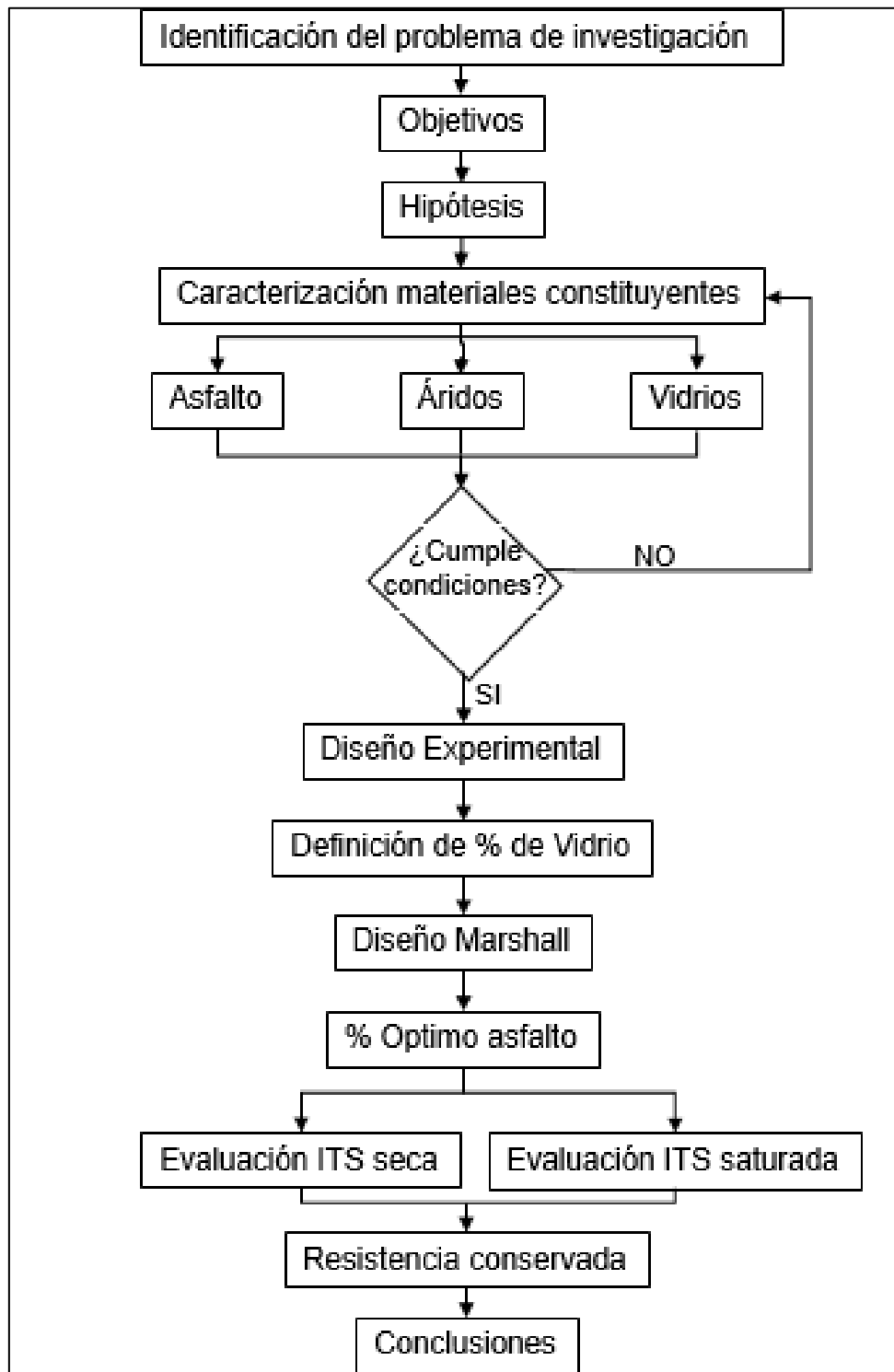
- ❖ El vidrio será chancado en el ensayo Desgaste de los Ángeles en el Laboratorio de la carrera de Ingeniería en Construcción, Universidad de Valparaíso.
- ❖ Las pruebas para determinar la cantidad de vidrio a utilizar se llevarán a cabo en el laboratorio de Vialidad de la región de Valparaíso y la empresa Bitumix s.a. ubicada en la V región de Valparaíso.
- ❖ Tanto los áridos como el asfalto (CA-24) son de la empresa Bitumix s.a. ubicada en la V región de Valparaíso.
- ❖ Las muestras de vidrio serán de una granulometría igual o menor al tamiz N° 4.
- ❖ Se excluirán todos los procesos de construcción de pavimentos anteriores a la capa asfáltica con la que nosotros trabajaremos, teniendo en cuenta que en el diseño completo de la construcción vial sí deben ser considerados.
- ❖ Estos estudios se desarrollarán solo en los casos de interés, es decir, en zonas con climas húmedos, como es el caso de Valparaíso.

1.5 Hipótesis

Existe una proporción óptima de vidrio molido que nos permite controlar las fallas por humedad, tomándose por estándar una resistencia conservada de un 80% en pavimentos asfálticos, haciendo que estos duren más años en climas húmedos y, además, que conserven las propiedades físicas y mecánicas que todo pavimento debe soportar.

1.6 Metodología de la investigación

1.6.1 Diagrama



1.6.2 Diseño de la investigación

Investigación experimental

Etapa I: En esta se comienza con la identificación del problema a investigar (en este caso el desprendimiento del pavimento asfáltico en zonas húmedas).

Etapa II: Se comienza con la investigación sobre todos los temas que están implícitos en el problema que estamos investigando, con esto se empiezan a buscar las alternativas para solucionar el problema, siendo para esta investigación la utilización de vidrio como sustitución en parte del árido de la mezcla asfáltica.

Etapa III: Experimentación en laboratorio

Antes de la elaboración de las probetas se tendrán en consideración los siguientes factores:

- Una de las variables a considerar son los porcentajes de vidrio en reemplazo del polvo roca, los cuales son; 5%, 15%, 25%, 35% y 40%. Pasando el 40% podría tener fallas (15), ya que perdería parte de sus propiedades de anti deslizantes.
- Se realizará el diseño Marshall para cada contenido de vidrio.
- Se ocupara CA – 24.

Probetas a ocupar: las probetas a utilizar se harán con los mismos criterios que para el ensayo Marshall.

- La Probeta es cilíndrica y con unas dimensiones de 101,6 mm de diámetro por 63,5 mm de alto.
- Tendrá un porcentaje de vacíos alrededor de un 5%.
- Su compactación estará regida por la AASHTO T245.
- Se harán las 15 bridgetas de cada porcentaje de asfalto y con estas se sacará el contenido de asfalto óptimo.
- Luego de sacar el molde se deben dejar de 24 +- 3 horas a temperatura ambiente.
- Se tendrán probetas de control (ocupando de referencia en ensayo de Lottman), las cuales tendrán 100% de árido.
- Las probetas de control se compararan con las 15 probetas las que ya contarán con el contenido de asfalto óptimo. Estas se saturarán antes de ensayarlas.

Ensayo de Lottman:

- A las distintas probetas se las someterá a saturación parcial o completa (basándose en este ensayo debe ser completa).
- Ya teniendo las muestras con el acondicionamiento previsto se ejecuta la prueba de tracción indirecta.



Figura 1.1: Ensayo de Tracción indirecta (ITS)

- Se anotarán los resultados de la carga máxima de ruptura y además se le hará un análisis visual en el cual se estimará visualmente el grado aproximado de daño por humedad.

Etapas IV: Análisis de resultados, evaluaciones técnicas y económicas.

- Se calculan los coeficientes entre los módulos resilientes y la resistencia a la tracción indirecta de los valores promedios.
- Se usa el ensayo de tracción indirecta para determinar el coeficiente de resistencia a tracción entre las probetas húmedas y secas, denominado TSR (tensile strength ratio).
- Se comienza el análisis del funcionamiento de este tipo de mezcla asfáltica.

Etapas V: Comparar Hipótesis con resultados obtenidos.

Etapas VI: Desarrollar las conclusiones sobre la solución a la falla por humedad y ver futuras investigaciones.

Capítulo 2.- Marco teórico

2.1 Generalidades del asfalto

2.1.1 Sus orígenes

El asfalto es uno de los materiales ingenieriles más arcaicos utilizados desde los inicios del hombre en la construcción (Manual del instituto de Asfalto). Su descubrimiento se llevó a cabo en Egipto, aproximadamente en el año 2500 a.c.; asfalto es una palabra que deriva del acadio “Sphalto” que significa “que deja caer”, este término se utilizaba en Asiria entre los años 1400 y 600 a.c., tiempo después el vocablo fue adoptado por los griegos, quienes le otorgaron el significado de “que rigidiza o estabiliza y finalmente evoluciono al latín y después al francés (Asphalte) y al español (Asfalto), hasta llegar al inglés.

En la antigüedad el asfalto era utilizado como mortero de pega de bloques de construcción, en la realización de pavimentos interiores y como impermeabilizante en la industria naval y numerosas aplicaciones más.

En esos tiempos era común encontrar asfalto natural depositado en estanques y lagos asfálticos. Esto se explica debido a las fuerzas geológicas que provocan el ascenso del asfalto a la superficie y al hacer contacto este con los elementos de la atmósfera se endurece. De los yacimientos más famosos son; “lago asfáltico” de Brea, la isla de Trinidad, que es el mayor del mundo, el de Bernudez, en Sucre (Venezuela) y el mar muerto. Sin embargo, en la actualidad el asfalto que se utiliza es artificial y se deriva del petróleo. También se pueden encontrar muchas rocas sedimentarias porosas en las cuales se impregna el asfalto, llegando a contener hasta un 15% del mismo, y constituyen un material natural adecuado para la pavimentación de calles y carreteras o para la extracción de asfalto.

Hace casi 200 años comenzó a utilizarse el asfalto refinado, el cual nace como sustituto del asfalto natural debido a que este último solo se encontraba en lugares apartados y su reología no era tan buena, ya que su contenido malténico al calentarse se evaporaba con rapidez y se endurecía con mucha facilidad.

En la mitad del siglo XIX se intenta que el asfalto fuera manufacturado para utilizarse superficies de carreteras. En esta misma época el uso del asfalto estaba limitado por su escasa disponibilidad, no obstante en 1870 fue la primera en Francia en utilizarse roca asfáltica. En 1907 La producción de asfalto del petróleo refinado superó a la utilización de asfalto natural. Con la popularidad de los automóviles, creció la demanda de más y mejores carreteras, esto llevó a las innovaciones, tanto en la producción como en la colocación del asfalto. Los pasos hacia la mecanización incluye tambores mezcladores y cemento portland, esparcidores mecánicos de hormigón para la primera máquina de asfalto.

Luego en 1942 Durante la Segunda Guerra Mundial, la tecnología de asfalto mejoró en gran medida, impulsada por la necesidad de aviones militares para las superficies que pudiera hacer frente a cargas más pesadas.

El asfalto son mezclas de materiales de hidrocarburos y minerales, ellos tienen varios propósitos, pero el más ejemplar es el pavimento que se emplea en calles y avenidas. Los beneficios de los asfaltos son imprescindibles para la ciudad y la vida urbana que conocemos, ya que toda gran ciudad tiene kilómetros de este, lo cual nos da toneladas de material y nos indica que se debe tratar correctamente para que tenga el funcionamiento deseado.

2.1.2 Constituyentes del asfalto

El modelo adoptado para configurar la estructura del asfalto se denomina modelo micelar, grandes moléculas de asfátenos, rodeadas por aromáticos polares y no polares, suspendidas en aceites saturados, todos los constituyentes peptizados en una solución coloidal. Del asfalto bruto, mediante disolventes orgánicos, pueden separarse varios componentes, incluso inorgánicos. Los principales son: Máltenos (solubles en benzol y tetracloruro de carbono), asfátenos (soluble en benzol y tetracloruro de carbono, pero no en bencina).

Los máltenos y asfátenos existen como islas flotantes en el tercer componente del asfalto, los aceites.

- a) Asfátenos: Son compuestos de alto peso molecular, principalmente de naturaleza aromática con pocas ramificaciones. Se encuentran en sus cadenas, en cantidad apreciable, elementos como oxígeno, azufre y nitrógeno. Los asfátenos le dan la componente de dureza al asfalto y se encuentran disueltos en los máltenos.
- b) Máltenos: Estos a su vez se subdividen en resinas y aceites. Las resinas son moléculas de bajo peso molecular, que tiene un mayor número de ramificaciones en sus cadenas, observándose con menos frecuencia la presencia de azufre y nitrógeno. Los aceites son moléculas de peso molecular mucho menor, con cadenas menos ramificadas y con pocos anillos. Los máltenos están ligados con las propiedades elásticas del asfalto.

Según el grado de aromaticidad de los máltenos y la naturaleza de la concentración de los asfátenos, se pueden formar dos tipos de estructuras:

- a) Asfalto tipo sol, en las cuales las micelas de asfalto se mueven libremente entre sí.
- b) Asfalto tipo gel, en los cuales las micelas, por atracción mutua, forman una estructura en toda la masa bituminosa.

2.1.3 Tipos de asfaltos

La gran parte de los asfaltos son utilizados en trabajos de pavimentación, teniendo una participación menor en aplicaciones industriales.

Tomando en cuenta sus aplicaciones se pueden separar en:

1. Para pavimentos:
 - Cementos asfálticos
 - Asfaltos cortados
 - Emulsiones asfálticas
 - Asfaltos modificados
 - Asfaltos espumados
2. Para industrias:
 - Asfaltos oxidados
 - Asfaltos modificados

2.1.4 Función de los asfaltos en los pavimentos

De sus principales funciones tenemos:

- Aglomerante: proporciona una íntima ligación entre los agregados, capaz de resistir la acción mecánica producida por las cargas de vehículos, otorga flexibilidad.
- Impermeabilizante: Otorga al pavimento una acción eficaz contra la penetración de agua proveniente tanto de las precipitaciones, como del subsuelo por acción capilar.

También le da al pavimento características de flexibilidad que permiten su acomodo sin fisuras, ante eventuales consolidaciones de capas subyacentes.

Se debe tomar en cuenta que para que estas funciones se llevan a cabo de forma satisfactoria, debemos tener asfalto de buena calidad, y al momento de la ejecución del pavimento se respeten todas las especificaciones establecidas en el diseño.

2.1.5 Cemento asfáltico

La ASTM define al asfalto o cemento asfáltico como “un cementante de color marrón oscuro o negro en el que sus componentes predominantes son los asfáltenos o máltenos que pueden ser naturales u obtenidos como residuo en la refinación del petróleo crudo”.

Sus propiedades químicas son:

- Consistencia: es la habilidad que tiene para fluir a diferentes temperaturas, esto en razón a que el asfalto es un material termoplástico, es decir, se fluidifica a altas temperaturas.
- Pureza: Define que en su composición química, sus impurezas son casi inertes.
- Seguridad: Define su comportamiento de afinidad química con las diferentes cargas eléctricas.

También se tienen características de aglutinación, esto debido a su composición principalmente de asfáltenos y máltenos. Esto último es lo que define la capacidad del asfalto de ser manejado a altas temperaturas.

Asimismo, el asfalto posee las siguientes propiedades de reología físico-mecánica, que son determinantes para su clasificación:

- Viscosidad: Propiedad de un fluido que tiende a oponerse a su flujo cuando se le aplica fuerza. Los fluidos de alta viscosidad presentan mayor resistencia en comparación a los fluidos en caso contrario. Es importante mencionar que la viscosidad es inversamente proporcional a la temperatura.
- Elasticidad: Propiedad que tienen los materiales para recuperar su forma al finalizar o disminuir las cargas que los modifica.
- Resistencia al corte: Es aquella que resiste altas temperaturas, la cual se determina con un “reómetro de corte dinámico”, que es el aparato que imprime una fuerza cortante cosenoidal con la que se mide dicha resistencia.
- Ductilidad: Es la capacidad de disipación de energía que tiene un material dentro de un rango plástico. En el caso del asfalto, esta propiedad es la que le permite tener mejores propiedades aglomerantes, y los asfaltos con una ductilidad muy elevada son usualmente susceptibles a los cambios de temperatura.

Los cementos asfálticos son designados como CA, y son asfaltos obtenidos especialmente de la destilación del petróleo, para presentar características adecuadas para uso de la construcción de pavimentos, la mayor o menor dureza que presenten los cementos asfálticos dependen principalmente de las condiciones de destilación de las cuales fueron extraídos, tales como presión, temperatura de destilación y tiempo. Por lo cual estos ligantes se pueden diferenciar por grados de dureza que estos presentan, medido mediante el ensayo de penetración.

Para elegir el tipo adecuado de cemento asfáltico a utilizar se deben tomar en cuenta los siguientes criterios:

- Si se desea tener una mayor estabilidad se debe utilizar un asfalto de baja penetración dado que mientras menor sea esta, mayor ha de ser la dureza de este y aportara mayor rigidez a la mezcla.
- Para climas con bajas temperaturas deben usarse asfaltos con penetraciones más altas (80 – 100, 120 – 150), debido a que los asfaltos duros tienden a cristalizarse fácilmente ante heladas, fracturándose y perdiendo finalmente su estructura. En cambio para climas cálidos deberán usarse en cambio asfaltos con penetración más bajas (60 – 80), dado que las temperaturas elevadas incitan una disminución de la viscosidad del asfalto, provocando una pérdida de estabilidad.
- El clima es solo uno de los factores importantes para la elección de un asfalto, otro límite a utilizar es la cantidad de tráfico.
- También se toma en cuenta el tipo de árido, como por ejemplo para agregados finos deben utilizarse asfaltos con penetraciones bajas, por razones de buen esparcido y bañado de los áridos del asfalto.
- Los asfaltos de altas penetraciones (120 – 150, 200 – 300) son utilizados mayormente en tratamientos dobles, no utilizándose en la construcción de carpetas estructurales.

Clasificación de los tipos de asfalto:

- Clase CA 14: Aquellos cuya viscosidad absoluta original a 60° C y 300 mm de Hg debe ser mayor o igual a 1400 poises y menor a 2400 poises. Este se recomienda en zonas de clima templado, climas fríos o muy fríos. En caso de ser utilizado en casos de clima templado o incluso caluroso, se recomienda una viscosidad mínima de 1600 poises.
- Clase CA 24: Aquella cuya viscosidad absoluta original a 60°C y 300 mm Hg debe ser mayor o igual a 2400 poises. Esta se recomienda en zonas de climas templados, cálidos o muy cálidos.

2.1.6 Aplicaciones asfálticas

2.1.6.1 Mezclas asfálticas en caliente

Es el producto resultante de la mezcla en caliente y en una planta adecuada, de uno de los agregados pétreos y cementos asfálticos tradicionales o modificados, el cual se esparce y compacta en caliente.

2.1.6.2 Tipos de capas

Las mezclas en caliente pueden ser utilizadas como pacas nivelantes, bases o rodado. Dependiendo de la granulometría del agregado empleado, pueden ser mezclas de graduación densa o graduación abierta. Los distintos tipos de mezcla que conforman un pavimento, las que pueden ir por separado o en combinación, son las siguientes:

- a) Capas de rodados: Es la capa expuesta al tránsito vehicular, compuesta de agregados seleccionados y cementos asfálticos tradicionales o modificados, diseñada para resistir el desgaste y conservar sus propiedades antideslizantes con estándares mínimos de seguridad y confort para el usuario. Dentro de esta categoría podemos distinguir:
 - o Mezclas densas: se utilizan áridos de granulometría continua, partiendo desde el tamaño máximo hasta el filler, de manera de tener un buen control de contenidos de huecos, logrando de esta forma una alta estabilidad.
 - o Mezclas drenantes: Se utilizan áridos de granulometría discontinua con bajo contenido de finos, obteniéndose una mezcla con alto porcentaje de huecos, lo que facilita el drenaje de agua, mejora la resistencia al deslizamiento y reduce el ruido.
 - o Mezcla SMA: Se utilizan áridos de granulometría discontinua con un bajo contenido de fracciones intermedias y alto contenido de fracciones gruesas, obteniéndose una mezcla con un adecuado porcentaje de huecos y buena trabazón mecánica entre las piedras, lo que permite un mayor contenido de asfalto de alta viscosidad o modificado, que la mezcla densa.

Normalmente se incorporan fibras para estabilizar las mezclas. Este tipo de carpeta posee una alta estabilidad, resistencia a la fatiga y envejecimiento, buen drenaje lateral de agua, resistencia a los deslizamientos y reducción de ruido.

- b) Capa intermedia: Comúnmente se conoce con el nombre de "Binder" y se ubica entre la base asfáltica y la capa de rodado. Esta mezcla actúa como capa estructural y se fabrica con áridos de mayor tamaño que los usados en la capa de rodado, pudiendo ser estos de granulometría abierta o cerrada, dependiendo del diseño del pavimento.
- c) Base asfáltica: Se ubica inmediatamente sobre la base granular intermedia, pudiendo ir sobre ella la capa intermedia o capa de rodado, dependiendo del diseño del pavimento, actuando como capa de soporte. Se fabrica generalmente con áridos de granulometría abierta y de graduación gruesa.

2.2 Fallas por humedad en pavimentos asfálticos

Las fallas por humedad se producen cuando el agua entra en la superficie agregada y extrae el revestimiento de asfalto dejando de tener la cohesión entre el asfalto y el árido. En su mayor parte, el daño inicia en la capa de asfalto inferior y produce su daño hacia arriba, debilitando toda la estructura a través de su progresión. Las grietas entonces comienzan a formarse y pueden causar que la estructura del pavimento se desintegre por completo.

Los síntomas comunes de extracción de asfalto son grietas cortas, agrietamiento y arrugas. Las cuales se traducen como agrietamiento o ahuellamiento por fatiga como se muestra en la Figura 2.1.



Figura 2.1: Fallas por humedad

2.2.1 Factores que influyen en las fallas por humedad

La susceptibilidad a la humedad es un fenómeno complejo el cual depende de la naturaleza de los mecanismos y su interacción, lo que hace que sea difícil predecir con certeza si una característica particular será el factor primordial en la determinación de la susceptibilidad a la humedad. En general, la susceptibilidad a la humedad se incrementa por cualquier factor que aumenta el contenido de humedad en el asfalto, disminuye la adhesión de aglutinante de asfalto a la superficie agregada o físicamente recorre el aglutinante de asfalto. Los factores que se analizarán a continuación dan la susceptibilidad a la influencia de humedad.

- Características del ligante: La viscosidad es importante porque puede indicar mayores concentraciones de asfaltenos (grandes moléculas polares). Las moléculas polares pueden crear una mayor tensión de adhesión y orientación molecular. Por lo tanto, viscosidades más bajas, que pueden representar menores concentraciones de asfaltenos, son generalmente más susceptibles a la extracción. Los componentes individuales de ligante asfáltico como sulfóxidos, ácidos carboxílicos, fenoles y bases de nitrógeno también pueden afectar el potencial de extracción.
- Características del agregado: En general, los agregados que son hidrófilos (atraen el agua) son más propensos a sacarlos que agregados que son hidrófobos (repelen el agua). Para solucionar esto, agregados de extracción susceptibles pueden ser evitados o se puede utilizar un modificador de ligante de asfalto anti-extracción. Las propiedades agregadas claves que determinan esta característica hidrofílica / hidrofóbica son:
 - La química superficial. Las superficies que pueden formar más fácilmente vínculos con el ligante asfáltico son menos propensas a causar desprendimiento. En general, una superficie agregada más ácida es más susceptible a la extracción. Hierro, magnesio, calcio y aluminio tal vez se consideran beneficiosas, mientras que el sodio y el potasio se consideran perjudiciales.
 - La porosidad y tamaño de poro. El tamaño de poro es el factor crítico. Si los poros son lo suficientemente grandes para permitir la entrada al ligante asfáltico, pueden ser un contribuyente a la susceptibilidad a la humedad. El resultado de alta porosidad es una alta absorción, lo que significa que más aglutinante de asfalto debe ser utilizado para lograr el contenido de aglutinante de asfalto eficaz deseado.
- Vacíos de aire: La medida en que los poros en el agregado absorben aglutinante de asfalto afecta el volumen de huecos de aire en la mezcla. Cuando los vacíos de aire en el asfalto exceden aproximadamente 8 por ciento en volumen, pueden llegar a ser interconectados y permitir que el agua penetre fácilmente en el pavimento y cause daño de humedad a través de la presión de poro o la expansión de hielo. Para solucionar esto, diseño de la mezcla ajusta el contenido de aglutinante de asfalto y el agregado de gradación para producir huecos de aire de diseño de alrededor de 4 por ciento.
- Construcción clima: La construcción en un clima fresco puede conducir a la compactación insuficiente, lo que resulta en altos vacíos de aire y un pavimento relativamente permeable. Esto aumenta la probabilidad de agua en la estructura del pavimento y, por tanto, daños por humedad. El clima húmedo también puede aumentar el contenido de humedad en los caminos asfálticos ya construidos.
- Clima: el proceso de ciclos-deshielos y fluctuaciones de temperatura pueden permitir más humedad en la estructura aumentando así la probabilidad de daños por humedad.
- Tráfico: Si el agua está presente en la estructura, el aumento de la carga de tráfico puede acelerar el daño de humedad por 2 razones:
 - La acumulación de presión en poro: Si el agua se encuentra en los poros de los agregados y no pueden escapar, la carga de tráfico tenderá a comprimir estos poros y causar una acumulación de presión, lo que podría empujar el aglutinante de asfalto de la superficie agregada.
 - Desgrasado hidráulico: Una rueda pasa sobre un pavimento asfáltico la cual tiende a mover el agua en el pavimento. Este movimiento genera una acción de fregado que podría eliminar el ligante asfáltico de la superficie total.

2.2.2 Formas de prevenir las fallas por humedad

Existen varias medidas que se pueden tomar para evitar, o al menos minimizar, los daños por humedad las cuales se muestran a continuación:

- Selección agregada: Elige baja porosidad agregada con superficies rugosas, limpia.
- Evitar la entrada de humedad en el pavimento asfáltico: Reduce la permeabilidad de la estructura del pavimento mediante la manipulación de aire contenido en huecos, grosor (espesor) y gradación. Además, los tratamientos superficiales tales como sellos, juntas de niebla en suspensión o tratamientos superficiales bituminosos (BSTS) pueden impermeabilizar el pavimento.
- Tratar previamente el agregado: Modificar propiedades de la superficie de agregado para reemplazar los iones que pueden contribuir a una mala adherencia del ligante asfáltico y agregado.
- Aditivos anti-tira: Añadir químicos o cal para el ligante asfáltico lo cual evita daños por humedad en el pavimento.
 - *Productos químicos*: Generalmente trabajan para reducir la tensión superficial en el aglutinante de asfalto, que promueve una mejor humectación, así como impartir una carga eléctrica al aglutinante de asfalto que es opuesta a la de la carga superficial del agregado. La mayoría de los aditivos químicos contienen aminas y se añaden a aproximadamente 0,1 a 1,0 por ciento en peso de aglutinante de asfalto.
 - *Lime*: funciona mediante la sustitución de los iones negativos en una superficie agregada con los iones de calcio positivos, resultando en una mejor adherencia de asfalto-agregado aglutinante. También reacciona con moléculas tanto en el aglutinante de asfalto (ácido carboxílico) y agregados (grupos OH ácidos) que resulta en moléculas que se absorben más fácilmente en la superficie agregada o moléculas que son menos propensas a ser disociadas y posteriormente asociadas con moléculas de agua. La cal se añade normalmente en aproximadamente 1,0 a 1,5 por ciento en peso acumulado total. Se necesita humedad para activar la cal, por lo que esta se añade normalmente como una suspensión o añadido en agregados ligeramente húmedos.

2.2.3 Pruebas de sensibilidad por humedad

En general, las pruebas de sensibilidad a la humedad no miden factores individuales, sino más bien tratan de cuantificar la capacidad de una mezcla de asfalto para resistir daños por humedad, no importa cuál sea la fuente. Por lo general son capaces de proporcionar resultados brutos o resultados comparativos, pero no son capaces de predecir el grado de daño de la humedad. Algunas de estas pruebas son las siguientes:

- **Ebullición de prueba (ASTM D 3625)**: Añadir al asfalto suelto el agua hirviendo y medir el porcentaje de área visible total de toda la superficie que conserva su recubrimiento ligante asfáltico. La prueba es simple, pero es subjetiva, pues no implica ninguna determinación de fuerza y examinar el agregado fino es un proceso complicado.

- **Prueba estática de inmersión (AASHTO T 182)**: El asfalto de muestra se sumerge en agua durante 16 a 18 horas y luego se observa a través del agua para medir el porcentaje del área total de la superficie visible del agregado que conserva su revestimiento de ligante asfáltico. Esta prueba también es simple pero subjetiva y no implica ninguna determinación de fuerza.

- Prueba de Lottman: Prueba 3 series de muestras compactadas.
 - Grupo 1, el grupo de control, no está condicionada.
 - Grupo 2, que representa el rendimiento de campo en 4 años, se somete a vacío la saturación con agua.
 - Grupo 3, lo que representa un rendimiento de campo de 4 a 12 años, se somete a la saturación de vacío y un ciclo de congelación-descongelación.

Un ensayo de tracción se realiza en cada muestra y la relación de la resistencia a la tracción indirecta de las muestras acondicionadas se compara con el grupo de control. Una relación mínima resistencia a la tracción (TSR) de 0,70 hasta 0,80 que se utiliza a menudo como un estándar.

- Ensayo de Tunnicliff y Root acondicionado: Al igual que en la prueba Lottman, esta prueba utiliza sólo 2 grupos y elimina el grupo de congelación-descongelación.

- Prueba de Lottman Modificado (AASHTO T 283): Una combinación de la Lottman y Tunnicliff y las pruebas de raíz. En esta se compara la resistencia a la tracción de muestras de control a muestras parcialmente saturadas con agua. La prueba somete al grupo de saturación a vacío parcial y un ciclo de congelación-descongelación opcional acondicionado. Aunque se espera que las muestras de agua acondicionada tendrán una resistencia a la tracción más baja, los valores excesivamente bajos indican el potencial de daño de la humedad.

- Inmersión-compresión (AASHTO T 165): Similar a una prueba de Lottman modificado, pero las muestras acondicionadas solamente se colocan en agua (no aspire saturada) y una prueba de resistencia a la compresión no confinada se utiliza en lugar de la prueba de tracción de división. La precisión no es buena y muestras que presenten signos evidentes de extracción puede dar una relación de fuerza de cerca de 1.0.

- Hamburg dispositivo de rueda de seguimiento: Se compactan muestras de asfalto y se prueban bajo el agua. Los resultados dan una indicación relativa de susceptibilidad a la humedad.

Todas estas pruebas tienen debilidades que resultan en una continua búsqueda de una mejor prueba de susceptibilidad a la humedad. Estas debilidades, además de las discutidas anteriormente, tienden a ser problemas con la repetitividad y reproducibilidad de los resultados de la prueba y la capacidad predictiva cuestionable. Además, las pequeñas variaciones en parámetros clave del asfalto como vacíos de aire, pueden afectar sustancialmente los resultados de la prueba.

2.3 Mezclas Asfálticas con agregado de vidrio

El reciclaje cada día se está volviendo más relevante en el entorno que nos rodea, lo que está provocando una conciencia social sobre los elementos que podemos darle nuevamente una vida útil. Uno de los materiales al que se le da mayor apogeo en este ámbito es el vidrio, ya que por sus características es de los pocos materiales que se puede llegar a reciclar al 100%.

El área de la Construcción no se quedó exenta de este material, y buscó nuevas alternativas de reciclaje de vidrio. Algunas que se han llevado a cabo son las siguientes:

1. Usar vidrio triturado como una base para la construcción de vías. El vidrio se compacta tan bien como la arena y forma una fuerte base para la vía.
2. Filtrar agua de desperdicio a través de vidrio molido en lugar de tierra granulada para mejorar el proceso de filtrado. Éste permite que el agua pase mientras atrapa contaminantes sólidos. Es un agente de filtrado superior para este propósito.
3. Agregar vidrio molido al concreto como reemplazo de la arena o de grava pequeña. El vidrio molido es más ligero que la arena o la grava, así que el concreto pesa menos por metro cuadrado sin perder su fuerza
4. **Mezclar vidrio triturado con asfalto para producir superficies de vías de alta duración. El vidrio triturado añade fuerza a la mezcla del asfalto y reduce los costos de construcción de vías.**



Figura 2.2: Glassphalt

Fuente: pflanigan.com/blog/test-blog/

Centrándonos en el último punto podemos dar a conocer que el asfalto que contiene desperdicios de vidrio como un agregado se llama "glassphalt", y ha sido ampliamente tratado como un medio para disponer los residuos de vidrio desde 1960. Este tipo de pavimentos es el que probablemente ha recibido más publicidad en Estados Unidos que cualquier otro uso alternativo para el vidrio reciclado, ya que el vidrio se trabaja con distintos colores los que afectan su uso, mientras que en el glassphalt el color es irrelevante haciendo más funcional la mezcla de vidrio y asfalto.

Glassphalt es básicamente lo mismo que el asfalto de mezcla en caliente convencional, excepto que 5% a 40% del agregado de roca y / o la arena se sustituye por vidrio triturado. El costo-efectividad de la sustitución de vidrio para el agregado convencional no tiene un precio fijo, ya que el valor del vidrio reciclado es variable, dependiendo de la ubicación, la calidad y el costo de los agregados locales. Así, en algunas áreas, el vidrio ofrece una dilución rentable, mientras que en otras no.

De acuerdo con el Manual Glassphalt pavimentación "La mejor posibilidad para la producción sostenida de glassphalt se concentra en las comunidades con planta de asfalto municipales, debido a que la comunidad puede hacer una correlación directa entre los costos adicionales incurridos en la instalación" (16), mostrando que eso no es el caso en la gran mayoría de los lugares.

Los pavimentos glassphalt son difíciles de reconocer por una persona común y corriente, a menos que partículas de vidrio grandes se presenten en la capa superficial como se presenta en la Figura 2.2. Cuando se instala correctamente, este pavimento no presenta ningún peligro para los seres humanos, ni daña los neumáticos de los vehículos, además debido a su contenido de vidrio, este pavimento asfáltico conserva más el calor que el convencional esto por la gran aislación térmica que tiene este material. Esta última característica podría resultar útil en situaciones en las que se llevan a cabo obras viales en tiempos fríos, o cuando se tienen largos períodos de transporte entre el mezclado y la compactación de la mezcla.

Por otra parte, las superficies glassphalt pueden secar más rápido que los pavimentos tradicionales después de la lluvia, debido a que las partículas de vidrio no absorben agua. Al tener vidrio en su composición este pavimento es más reflexivo, lo que indica que genera mejor visibilidad de la carretera durante la noche, pero no llegando a ser perjudicial para la conducción de día.

Cuando se coloca glassphalt y se compacta, las partículas de vidrio más grandes se alinearán paralelo a la superficie de la carretera. Esto puede hacer que la resistencia al deslizamiento del pavimento sea ligeramente menor que la del asfalto convencional. En consecuencia, glassphalt no se recomienda para el pavimento de superficie en las carreteras. Sin embargo, la resistencia al deslizamiento del pavimento que contiene menos de 10% de vidrio en peso, con partículas de desperdicios de vidrio más pequeñas que ¼- pulgada de tamaño, no muestra diferencias apreciables de asfalto que contiene 100% de agregado natural (15). Si el cristal agregado se utiliza como parte de la base, o inferior, entonces el tamaño de las partículas de vidrio y la resistencia al deslizamiento del material no son una preocupación.

Es recomendable ocupar para todo tipo de pavimentos, aditivos como cal hidratada o hidróxido de calcio, en especial cuando la capa de pavimento (en este caso glassphalt) es de un gran espesor.

Datos sobre este tipo de pavimento:

- Vidrio machacado en el asfalto fue utilizado por primera vez en la "ciudad esmeralda" de Nueva York pavimentación en 1990. En el momento de la pavimentación, el asfalto contenía hasta un 40% de vidrio.
- En Estados Unidos se han realizado un gran número de demostraciones de glassphalt en distintas ciudades del país, pero muy pocas de ellas progresaron más de la etapa experimental, debido a la economía. Esto, como se explica con anterioridad, el vidrio reciclado tiene grandes fluctuaciones de precios.
- NYSDOT se toma como el líder en el uso de vidrio molido en el asfalto, después de haber establecido más de 220.000 toneladas de glassphalt.
- En la actualidad para pavimentos de poco tráfico se ocupa entre un 10 a 15% de vidrio.
- En la actualidad, el vidrio triturado se permite en un máximo del 5% del peso total agregado por el Estado de Nueva York Departamento de Transporte (NYSDOT).
- La cantidad de vidrio reciclado utilizado en el Glassphalt está dentro de un 10 a 20% del pavimento completo, esto no hace gran mella en la cantidad de vidrio producido.

Capítulo 3.- Diseño experimental

3.1 Definición de variables

3.1.1 Variables Independientes o Factores:

- % de Vidrio: Dentro de las probetas el porcentaje de vidrio reemplazará el polvo roca, en este árido podrá alcanzar hasta un 40% del peso. Sus niveles de variables serán de 5, 15, 25, 35 y 40% de vidrio. Para que pavimentos con vidrios tengan un buen funcionamiento se deben ocupar tamaños de vidrio de hasta ¼", esta es la razón por la que el remplazo va en el polvo roca y no en las otros tamaños de árido.

3.1.2 Variable Dependiente o Variables de respuesta:

- Parámetros Volumétricos: Un factor importante que debe ser considerado en el comportamiento de las mezclas asfálticas son las relaciones volumétricas entre el ligante asfáltico y los agregados. Las propiedades que se nombrarán a continuación proporcionan un índice del probable comportamiento de las mezclas durante su vida de servicio:
 1. Vacíos de aire (VA): Porcentaje en volumen respecto a la mezcla. Es un espacio que se requiere para la expansión del asfalto. Este es uno de los parámetros de desempeño más importante de la mezcla, ya que una gran cantidad de vacíos permite fácilmente la entrada de agua, lo que puede provocar daño de humedad a través de la presión de poro o la expansión de hielo. En el caso contrario, al tener poca cantidad de vacíos, el asfalto al ser un material susceptible a la temperatura al calentarse se expande y, por no tener suficiente espacio para acomodarse, se deforma.
 2. Vacíos llenos de asfalto (VFA): Porción del volumen de vacíos entre las partículas del agregado (VMA) que es ocupado por el asfalto efectivo.
 3. Vacíos agregado mineral (VAM): Volumen de vacíos entre los agregados de una mezcla compactada que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresando en porcentaje el volumen total de la mezcla.

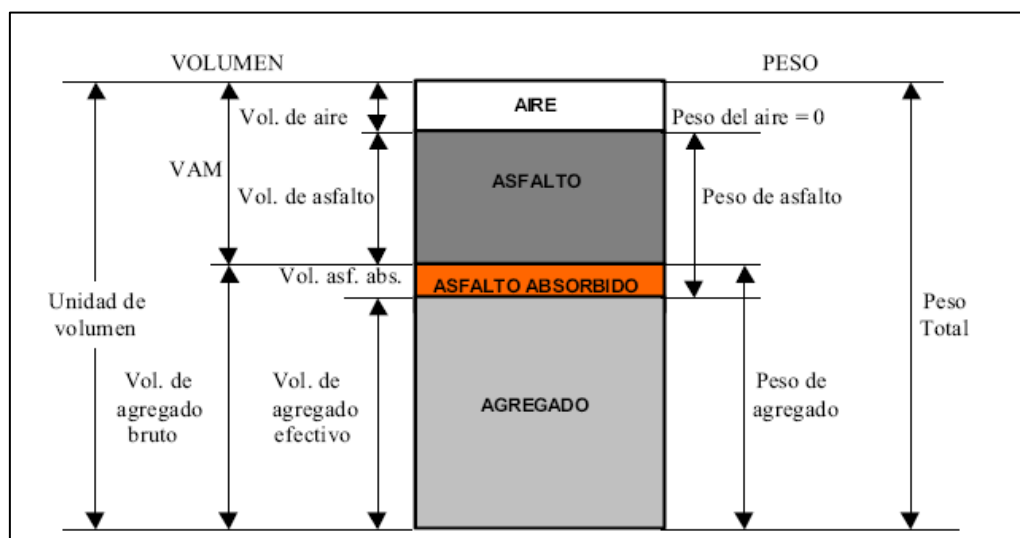


Figura 3.1: Propiedades Volumétricas

4. Densidad: Se considera el volumen macizo de la probeta, más el volumen de los poros accesibles e inaccesibles. Este se realiza antes de ensayar las probetas. Luego de desmoldar, se pesa la probeta (esta primera medición es la seca), después se dejan en agua como mínimo 3 minutos, con lo que se obtendrá el peso saturado y, a continuación de esto, se elimina el agua exterior de la probeta y se sacará el peso superficialmente seco.
- Estabilidad Marshall y Fluencia: estos factores son determinados mediante el método Marshall. Es aplicable únicamente a mezclas preparadas en caliente.
La Estabilidad Marshall, de una mezcla asfáltica es la carga máxima en Kg que soporta una probeta de 6,35 cm de altura. Este factor está íntimamente ligado a la altura de la probeta, ya que el resultado se toma como estándar, por lo que al obtener diferentes alturas se le debe agregar un factor de corrección (Normado en Manual de Carreteras, Volumen 8) para obtener la estabilidad real de la probeta.
Fluencia, es la deformación total expresada en mm que experimenta la probeta desde el comienzo de la aplicación de carga en el ensayo de estabilidad, hasta el instante de producir la falla.
 - ITS seco y saturado: El ensayo de tracción indirecta, destaca por ser un método simple y representativo, que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible y obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de romper. Este ensayo consiste en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica, igual a la definida en el ensayo Marshall, aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la rotura. Este ensayo, además, se puede aplicar para verificar la influencia del agua en los pavimentos asfálticos, esto se aplica ensayando probetas secas (solo con un baño María antes de ensayarla) y completamente saturadas a temperatura ambiente, haciendo con esto una comparación de los resultados.
 - Resistencia Conservada: También conocido como Coeficiente a la Resistencia a la Tracción (TSR) es el resultado que mide la sensibilidad de las probetas a la acción del agua. Este coeficiente se obtiene de los resultados del ITS saturado dividido por el ITS seco, lo cual nos indica que mientras menor es el coeficiente, mayor es el daño producido por la humedad.

3.2 Factorial Experimento

La investigación en laboratorio se dividirá en dos etapas.

3.2.1 Primera etapa

Se realizará para obtener el asfalto óptimo para cada porcentaje de vidrio.

Tabla 3.1: Resultados de Parámetros Volumétricos, Estabilidad Marshall y fluencia para los porcentajes de vidrio

	VIDRIO					
	0%	5%	15%	25%	35%	40%
Parámetros Volumétricos	X	X	X	X	X	X
Estabilidad Marshall/ Fluencia	X	X	X	X	X	X

X= 3 Repeticiones

Con estos resultados sacamos el porcentaje de asfalto promedio, tomando los distintos porcentajes de vidrios.

3.2.2 Segunda etapa

Al tener el porcentaje óptimo promedio de asfalto, se realiza el ensayo por tracción indirecta (grupo seco y saturado). Se obtiene la resistencia conservada, y con ella se apreciará el daño de las probetas a la acción del agua.

Tabla 3.2: Resultados ITS y TSR

% ASFALTO	A1	A1	A1	A1	A1	A1
% VIDRIO	0	5	15	25	35	40
ITS SECO	X	X	X	X	X	X
ITS SATURADO	X	X	X	X	X	X
TSR	X	X	X	X	X	X

X= 3 Repeticiones

3.3 Caracterización materiales constituyentes

3.3.1 Asfalto

Para esta investigación se utilizará un Cemento Asfáltico 24 (CA 24), entregado por Bitumix s.a. planta Concón.

CA 24: Viscosidad absoluta original a 60°C y 300 mm Hg debe ser mayor o igual a 2400 poises. Esta se recomienda en zonas de **climas templados** (nuestro caso), cálidos o muy cálidos.

A continuación se presenta el Monograma de Heukelom, el cual nos entrega los rangos de temperatura para el mezclado y la compactación de un pavimento asfáltico modificado.

Monograma de Heukelom

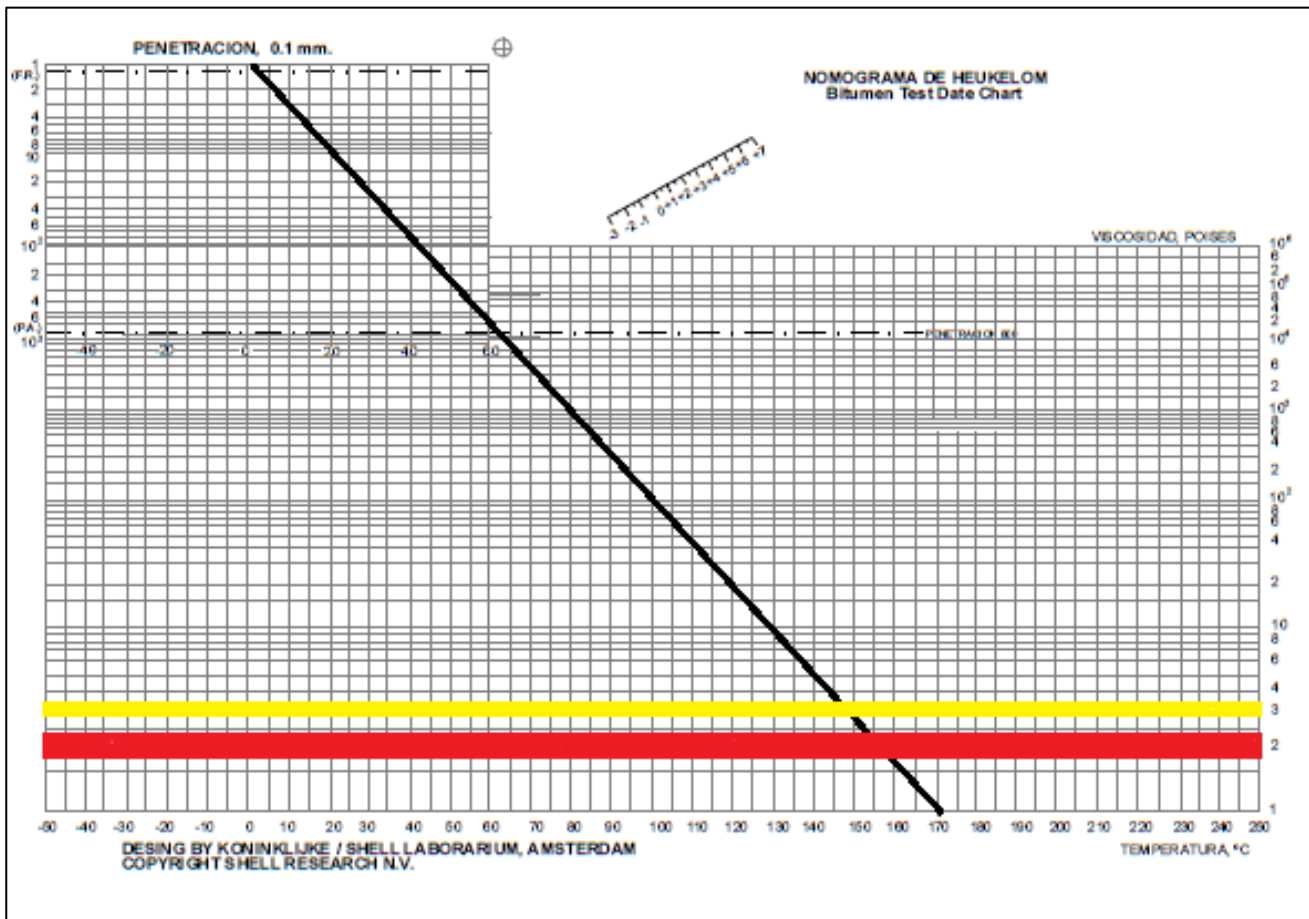


Figura 3.2: Monograma de Heukelom

Del Monograma de Heukelom (figura 3.2) se extraen las siguientes temperaturas:

Temperatura de mezclado en laboratorio (franja roja): 156 °C + – 3 °C.

Temperatura de compactación en laboratorio (franja amarilla): 147 °C + – 3 °C.

3.3.2 Áridos

El material es extraído del Río Aconcagua, por la empresa Bitumix s.a. ubicada en la V Región de Valparaíso, planta Concón. Se trabajaran con 3 tipos de áridos:

- Gravilla 11/17
- Gravilla 5/11
- Polvo Roca 0/5

La información que se presentara a continuación en las distintas tablas fue recopilada tanto por el Laboratorio de Vialidad de la V Región y la empresa Bitumix.

Tabla 3.3: Granulometría de cada tipo de árido

Tamiz		Gravilla 11/17	Gravilla 5/11	Polvo Roca 0/5
25 mm	1"			
19 mm	¾"	100		
12,5 mm	½"	32	100	
9,5 mm	3/8"	1	74	100
4,75 mm	Nº 4		3	92
2,36 mm	Nº 8		1	62
1,18 mm	Nº 16		1	40
0,6 mm	Nº 30		1	28
0,3 mm	Nº 50			21
0,15 mm	Nº 100			15
0,075 mm	Nº 200			11

Tabla 3.4: Constantes físicas e hídricas de los áridos

		Gravilla 11/17	Gravilla 5/11	Polvo Roca 0/5
Densidad aparente	Kg/m ³	1458	1430	1736
Densidad real seca	Kg/m ³	2652	2640	2648
Densidad neta	Kg/m ³	2739	2741	2750
Partículas Chancadas	%	96	97	100
Partículas Lajeadas	%	0	0	0,3
Índice de Lajas	%	7,4	14	6,1
Desgaste de los Ángulos	%	10	14	15,7
	Grado	5	6	7
Índice de Plasticidad	%	N.P.	N.P.	N.P.

Dosificación de áridos en peso

De acuerdo a las características de los áridos, estos se mezclaron de la siguiente forma:

Tabla 3.5: Dosificación de áridos

Gravilla 11/17	20%
Gravilla 5/11	28%
Polvo Roca 0/5	52%

Características de la Mezcla

Tabla 3.6: Granulometría de la mezcla

Especificación

Tamiz		% Pasa	Banda IV-A-12
25 mm	1"	100	-
19 mm	¾"	100	100 - 100
12,5 mm	½"	86	80 - 95
9,5 mm	3/8"	73	70 - 85
4,75 mm	Nº 4	49	43 - 58
2,36 mm	Nº 8	33	28 - 42
1,18 mm	Nº 16	21	-
0,6 mm	Nº 30	15	13 - 24
0,3 mm	Nº 50	11	8 - 17
0,15 mm	Nº 100	8	6 - 12
0,075 mm	Nº 200	6	4 - 8

En la siguiente figura se muestra la Banda especificada IV-A-12, la cual nos da los rangos granulométricos en que debe estar nuestro material:

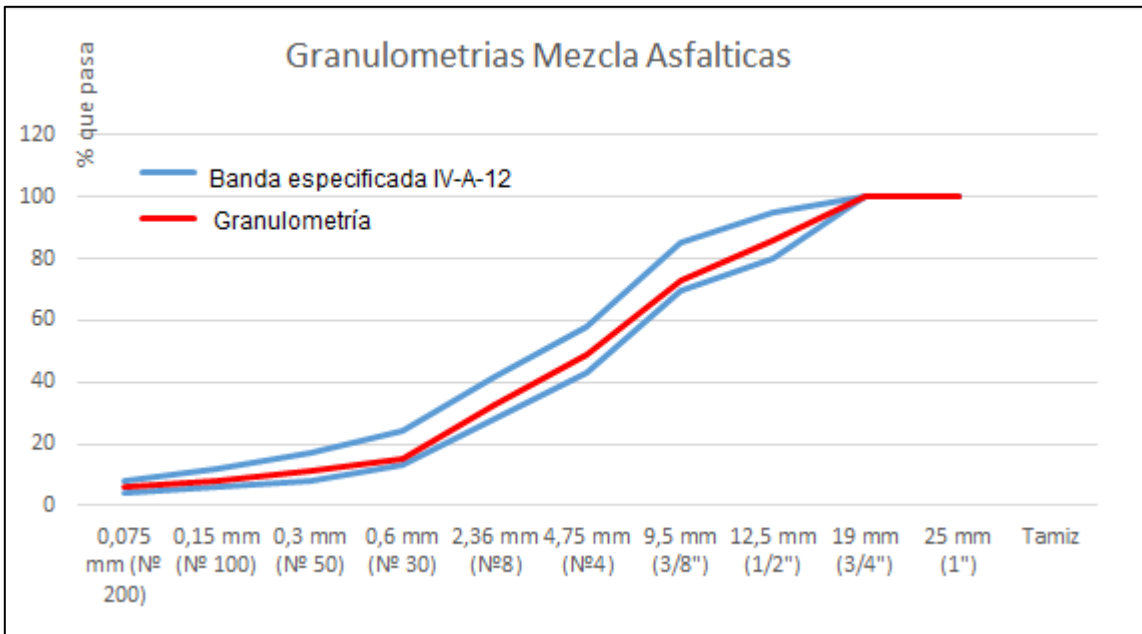


Figura 3.3: Granulometría de muestra patrón

Se aprecia que la granulometría de la mezcla está dentro de la Banda específica IV-A-12 por lo que se puede trabajar con estos materiales sin tener que hacerles una modificación.

Tabla 3.7: Características de la mezcla

			Rango
Partículas chancadas	%	98	mín. 90
Partículas lajeadas	%	0	máx. 10
Índice de Lajas	%	9	
Desgaste de los Ángeles	%	14	máx. 25
Índice de plasticidad	%	N.P.	N.P.
Sales solubles	%	0,2	máx. 2
Adherencia Método Estático	%	95	mín. 95
Adherencia Riedel- Weber	%	9-10	mín. 0- 5
Equivalente de Arena	%	54	mín. 50
Desintegración de Sulfato de Sodio F. Gruesa	%	0,71	máx. 12
Desintegración de Sulfato de Sodio F. Fina	%	0,71	máx. 15
Densidad Real seca ponderada	Kg/m3	2647	
Densidad efectiva	Kg/m3	2658	
Absorción de asfalto	%	0,17	

3.3.3 Vidrio

El vidrio a utilizarse será el reciclado de botellas, ya que es una forma de este material común de encontrar. Además al ser utilizadas todas para la misma función no tiene grandes diferencias entre sus constituyentes, los cuales comúnmente son materiales de origen mineral fusionados térmicamente.

El vidrio se trabajara en distintos tamices, a los que se llegara chancando el material mediante el Desgaste de los Ángeles (Figura 3.4).



Figura 3.4: Desgaste de los Ángeles. Laboratorio de Vialidad, V Región.

Al chancar el material tenemos una granulometría inicial, la cual se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.8: Granulometría de vidrio

Tamiz		% Pasa de Vidrio
25 mm	1"	
19 mm	¾"	
12,5 mm	½"	
9,5 mm	3/8"	100
4,75 mm	Nº 4	99
2,36 mm	Nº 8	58
1,18 mm	Nº 16	27
0,6 mm	Nº 30	19
0,3 mm	Nº 50	14

0,15 mm	Nº 100	9
0,075 mm	Nº 200	8

Banda especificada IV-A-12

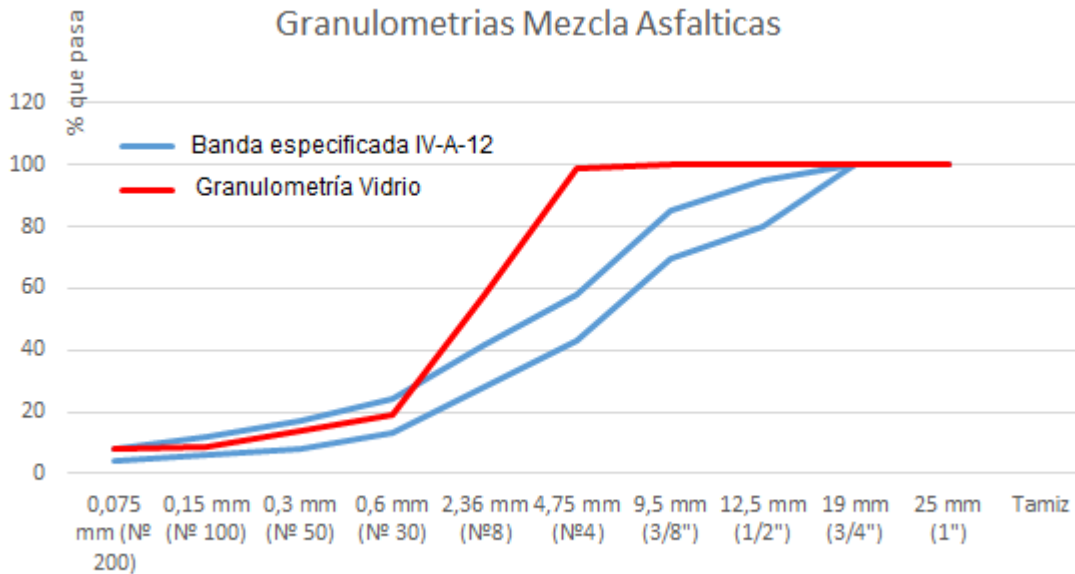


Figura 3.5: Granulometría del Vidrio

El gráfico (figura 3.5) nos muestra que el material es más fino en los tamices superiores, mientras que desde el tamiz Nº 30 hasta el 200 se encuentra dentro del rango.

Para el reemplazo de material, el vidrio ocupará parte del porcentaje del polvo roca. Se trabajará el material con la granulometría del árido a reemplazar, ya que el molido del vidrio se puede adaptar a lo requerido, ya sea dejándolo un menor tiempo de revoluciones o una menor cantidad de bolones dentro del desgaste de los Ángeles.

Mediante ensayos de Laboratorio se obtuvieron los siguientes datos:

Densidad Neta	2528 kg/m ³ (15°C)
Densidad Real	2500 kg/m ³
Punto de Ablandamiento	730 °C

Como se dijo anteriormente, el vidrio se reemplazará en el porcentaje en peso del Polvo Roca, al cual de su 100% se le harán reemplazos de 5, 15, 25, 35 y 40%.

Peso a reemplazar

Tabla 3.9: Reemplazo del Polvo Roca a vidrio, en peso.

	% Vidrio				
	5%	15%	25%	35%	40%

Reemplazo en peso	28,6 kg	85,8 kg	143 kg	200,2 kg	228,8 kg
--------------------------	---------	---------	--------	----------	----------

3.4 Primera etapa laboratorio: Influencia del contenido de vidrio en el contenido óptimo de asfalto de las HMA

Al comienzo de esta etapa se revisaran los datos de la muestra patrón (0% de vidrio) entregados tanto por la empresa Bitumix s.a. planta Concón y el laboratorio de Vialidad de la V región. Estos antecedentes se muestran en la siguiente tabla:

Muestra patrón, 0% de vidrio

Tabla 3.10: Resultados Parámetros en muestra patrón.

Parámetros	Un.	% Asfalto				
		4,5	5	5,5	6	6,5
Dmm	Kg/m3	2486	2470	2453	2437	2421
VA	%	6,8	5,5	4,4	4,1	3,7
VFA	%	58	65	72	75	79
VAM	%	16,3	16,1	16,1	16,7	17,3
Estabilidad	KN	9,7	9,9	9,8	9,6	9,5
Fluencia	0,25 mm	12,3	13,3	14,2	15,4	16,5
Densidad	Kg/m3	2316	2333	2344	2336	2332

El asfalto óptimo para la Probeta de control, según M.C.V.8 8.302.47 son:

Óptimo por densidad: 5,5

Óptimo por estabilidad: 5,0

Óptimo para 5% de huecos: 5,2

Óptimo a usar: 5,2 +/- 0,3

Analizados estos resultados, se procede a la confección de las probetas basándonos en el Diseño Marshall:

La importancia del diseño radica en el compactador utilizado (Figura 3.6) que se asume que simula la densidad que tiene la mezcla en el terreno. El principal objetivo de este método de diseño es determinar una mezcla económica de agregados y asfalto que cumpla con los requerimientos considerados para el correcto desempeño.



Figura 3.6: Martillo Marshall. Laboratorio de Vialidad, V Región.

Se comienza distribuyendo el árido en distintas bolsas que nos den una probeta compactada de 63,5 mm, lo que se consigue con aproximadamente 1100 gr del agregado (para esto se realizó con anterioridad el análisis de densidad entre el árido y vidrio para ver que no afectará en el reemplazo en peso). Ya creadas el total de las bolsas para los ensayos, se cambian a bandejas y se llevaran al horno, donde alcanzaran la temperatura necesaria para mezclado (normalmente se dejan toda la noche en esta etapa).

Teniendo el material a temperatura, este se coloca en un bol, donde se revuelve dejándole en el centro un cráter, se pesa el material real que hay en el bol y a este resultado se le aplica el porcentaje correspondiente para sacar la cantidad de asfalto que se debe agregar a la mezcla (el asfalto debe estar en temperatura de mezclado). Se le agrega el asfalto al centro del bol (donde se dejó el cráter) y se procede a mezclar de forma rápida para que no pierda temperatura, esto hasta que la mezcla quede totalmente cubierta y uniforme.

Las primeras mezclas se harán para sacar la Densidad máxima de la mezcla (Dmm) de cada porcentaje de vidrio (dos muestras por cada porcentaje, trabajadas con 5% de asfalto). Para sacar el Dmm se llega hasta la uniformidad de la mezcla en el bol (no se llega a compactar el material). Estas mezclas se hacen con el duplicado de peso que las de Diseño Marshall (2.200 gr de material), las cuales se ensayan en el equipo Rice Densidad Máxima de la Mezcla Asfáltica, que nos entrega el dato de la Densidad máxima de la mezcla, dato necesario para los cálculos del Va.

Terminadas las muestras del Dmm se prosigue con las probetas para el diseño Marshall. Mientras se prepara la mezcla entre el árido y el asfalto se alista el compactador, llamado martillo Marshall (Figura 3.6). Se asume que el martillo produce mezclas con densidad de diseño según el

tráfico esperado, que en este caso es un alto tráfico. Para esto se compacta la probeta con 75 golpes por cara.

Para la compactación de las probetas se prepara el molde y el martillo, limpiando completamente el conjunto del molde y cara del martillo de compactación, calentándolos a una temperatura próxima a la de compactación. Se sitúa un disco de papel filtro, cortado a medida, en la parte inferior del molde antes de colocar la mezcla. Se suaviza la parte interior del molde y la cara del martillo con un aceite grueso. Se sitúa el conjunto collar, molde y base en el pedestal del compactador.

Llenar el molde con una espátula, acomodando la mezcla 15 veces en el perímetro y 10 veces en el centro. Teniendo el material acomodado se procede a realizar los golpes por cada cara.

Ya desmoldado (1 día como mínimo antes de desmoldar) se saca el peso seco, peso húmedo, peso superficialmente seco y cuatro alturas por cada probeta antes de ensayarlas. Con los pesos sacar la Densidad Real de la mezcla. Las alturas se utilizan para obtener el factor de corrección para la Estabilidad (sacar del manual de carreteras Volumen 8).

Teniendo estos datos se llevan las probetas a ensayar (Figura 3.7 Ensayo Marshall), donde deben estar en un baño María (60°C) por 30 a 40 minutos. Luego de esto se procede a preparar los elementos para el ensayo, limpiando y colocando una capa de aceite espeso en la mordaza, después hay que retirar la probeta y secar cuidadosamente la superficie para luego colocar y centrar en mordaza. Se ensaya a una velocidad constante de deformación.

Ya con esto se procede a sacar los resultados y graficar tanto los Parámetros Volumétricos como la Estabilidad Marshall y la fluencia. Analizando los resultados se saca el porcentaje óptimo de asfalto para cada cantidad de vidrio en la mezcla.



Figura 3.7: Ensayo Marshall. Bitumix s.a. planta Concón

Para el análisis del efecto que tiene el vidrio en los pavimentos asfálticos en presencia de agua aplicaremos el ensayo de Tracción indirecta (ITS). Para este se toman los porcentajes óptimos de

asfalto de cada cantidad de vidrio en la mezcla y se saca un promedio con ellos, teniendo este promedio se procede a preparar el material para la segunda etapa de laboratorio.

3.5 Segunda etapa laboratorio: Evaluación de la susceptibilidad al agua de una Mezcla asfáltica en caliente modificada con vidrio

Se realizarán una cantidad de 6 mezclas para cada porción de vidrio considerando también para 0% de éste, a las que se le aplicará el promedio del asfalto óptimo obtenido. La preparación de la mezcla se hará de la misma forma que para el Ensayo Marshall (explicado en la primera etapa de laboratorio).

Ya teniendo probetas realizadas, se sacan los distintos pesos (seco, saturado y superficialmente seco) y una cantidad de cuatro alturas en cada una de las probetas. Luego se separaran para cada cantidad de vidrio 3 probetas para saturar y las otras 3 secas a temperatura ambiente.

Uno de los grupos se sumergirá en agua a una temperatura de 25 ± 1 °C, simulando la temperatura ambiente, en donde se dejaran por un día para provocar la saturación completa de las probetas. Pasado el día de saturación se ensayarán por tracción indirecta (misma máquina que para ensayo Marshall, pero distinta mordaza). A las probetas no saturadas se les aplicará un baño María a 25 °C por 20 minutos y luego de esto se ensayarán por ITS (Figura 1.1).

Luego se analizarán los resultados tanto del grupo saturado, como del seco. Con los resultados del ITS se sacará el Coeficiente de resistencia a la Tracción (TSR).

$$TSR = \frac{S_T(\text{acondicionada})}{S_T(\text{no _acondicionada})}$$

Se analizan los resultados del TSR, lo que nos dice que a mayor severidad se obtiene un menor coeficiente, o sea, el menor resultado es el que tiene mayor daño a la humedad.

Teniendo estos resultados se procede a sacar las distintas conclusiones.

Capítulo 4.- Presentación y Análisis resultados

4.1 Primera etapa de investigación

En esta etapa se analizan los resultados de los Parámetros Volumétricos, Estabilidad Marshall y Fluencia, los cuales se sacarán utilizando el Modelo Marshall. Todo esto es con el objetivo de llegar al asfalto óptimo para cada porcentaje de Vidrio.

Como primer proceso se realizan las dos muestras de 2200 gr de cada porcentaje de vidrio para sacar la Densidad Máxima de la mezcla. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos en el Laboratorio de Vialidad nacional:

Densidad Máxima de la mezcla para los distintos porcentajes de Vidrio

Tabla 4.1: Dmm probetas con vidrio

% Vidrio	Dmm
5	2451 kg/m ³
15	2447 kg/m ³
25	2444 kg/m ³
35	2440 kg/m ³
40	2437 kg/m ³

Las mezclas para el ensayo se hicieron con un 5% de asfalto, las muestras se realizaron en el Laboratorio de Vialidad de la V región, mientras que el ensayo Dmm se realizó en el Laboratorio Nacional de Vialidad (Región Metropolitana).

Se puede apreciar que los valores de los Dmm con vidrio son menores al de la muestra patrón. Para 5% de asfalto en la mezcla sin vidrio se obtuvo un Dmm de 2470 kg/m³, mientras que los valores con vidrio se asemejan a los que tienen mayor porcentaje de asfalto en la mezcla patrón (Tabla 10).

El Dmm es un factor primordial para seguir con la investigación, ya que se necesita para obtener el resultado de Vacíos de aire en la mezcla (VA).

Ensayadas las probetas mediante el Método Marshall, se presenta la siguiente tabla resumen (Tabla 4.3) la que muestra los resultados que se obtuvieron de acuerdo a las formulas presentadas en el anexo, las cuales se obtuvieron del manual de carreteras Volumen 8:

Parámetros Volumétricos, Estabilidad Marshall y fluencia

Tabla 4.2: Resultados Parámetros en mezclas con vidrio.

Asfalto	Parámetros	Un.	VIDRIO				
			5%	15%	25%	35%	40%
4 %	Va	%	6,72	7,28	7,76	-	6,76
	VFA	%	56,9	54,7	52,7	-	56,4
	VAM	%	15,6	16,1	16,4	-	15,5
	Estabilidad	KN	14,38	14,21	12,53	-	11,51
	Fluencia	0,25 mm	14	7,29	7,29	-	11,67
	Densidad	Kg/m3	2320	2302	2287	-	2305
4,5%	Va	%	5,88	6,39	6,47	5,56	5,43
	VFA	%	63	60,7	60,2	63,9	64,5
	VAM	%	15,9	16,3	16,3	15,4	15,3
	Estabilidad	KN	15,15	14,71	13,49	14,3	12,0
	Fluencia	0,25 mm	13,67	14	17,33	11,33	11,67
	Densidad	Kg/m3	2324	2307	2302	2321	2321
5%	Va	%	4,82	4,5	4,47	3,93	4,42
	VFA	%	69,8	71,2	71,1	73,7	71,3
	VAM	%	15,9	15,6	15,5	15	15,4
	Estabilidad	KN	15,9	16,67	13,55	14,44	12,73
	Fluencia	0,25 mm	13,67	20,33	13,67	13,33	15,33
	Densidad	Kg/m3	2333	2337	2335	2344	2329
5,5%	Va	%	3,7	4,1	3,3	3,13	3,45
	VFA	%	76,8	74,8	78,6	79,5	77,8
	VAM	%	15,9	16,2	15,5	15,3	15,6
	Estabilidad	KN	16,39	14,1	14,91	15,79	13,43
	Fluencia	0,25 mm	18,33	14,33	14,33	14	18,33
	Densidad	Kg/m3	2344	1330	2347	2347	2336
6%	Va	%	3,11	3,66	3,04	2,53	1,9
	VFA	%	81,1	78,2	81,3	83,9	87,5
	VAM	%	16,4	16,8	16,2	15,7	15,2
	Estabilidad	KN	16,29	14,13	13,35	14,08	13,69
	Fluencia	0,25 mm	18,33	16	17	11,67	15,67
	Densidad	Kg/m3	2342	2325	2337	2345	2358
6.5%	Va	%	-	-	-	2,02	1,47
	VFA	%	-	-	-	87,6	90,7
	VAM	%	-	-	-	16,2	15,8
	Estabilidad	KN	-	-	-	13,98	11,55
	Fluencia	0,25 mm	-	-	-	13	14,33
	Densidad	Kg/m3	-	-	-	2342	2352

Teniendo los resultados de los parámetros para cada porcentaje de vidrio se procede a hacer en análisis de gráficos:

1. Resultados de Parámetros Volumétricos para un 5% de reemplazo de vidrio
 - 1.1. Vacíos de aire en la mezcla

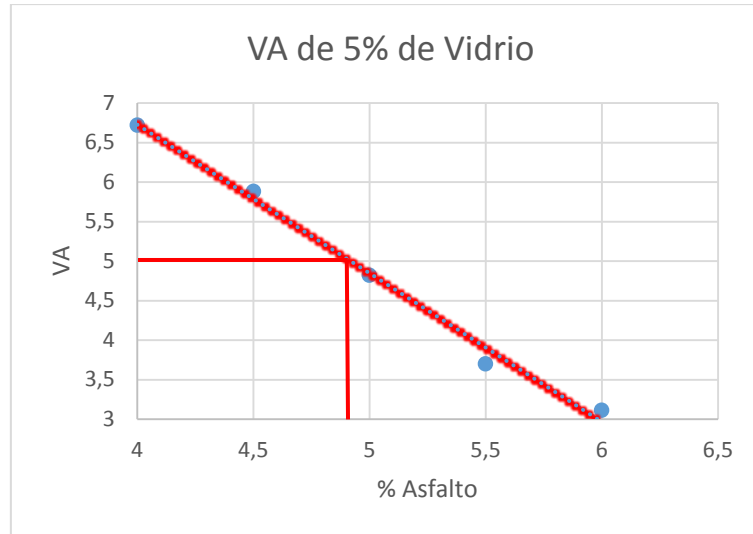


Figura 4.1: Vacíos de aire para 5% de vidrio

Al realizar el análisis de la figura 4.1 podemos ver que para un 5% de huecos, el óptimo de asfalto corresponde a un 4,9%.

- 1.2. Estabilidad Marshall

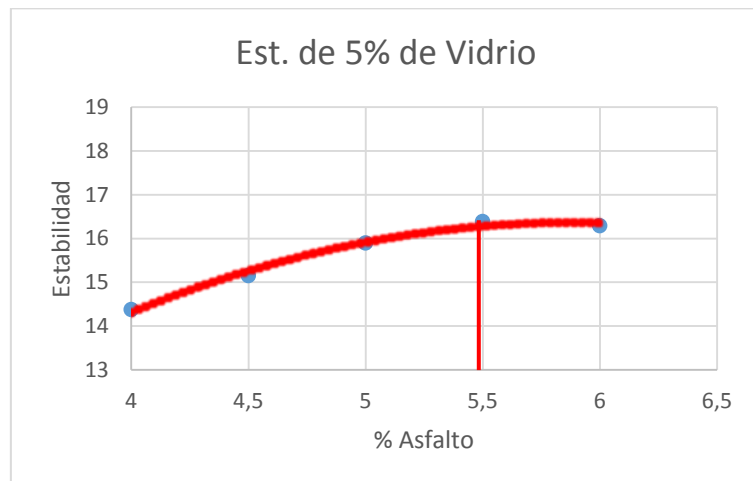


Figura 4.2: Estabilidad Marshall para 5% de vidrio

Para 5% de Vidrio, el óptimo de estabilidad es de 5,5% de asfalto.

1.3. Densidad

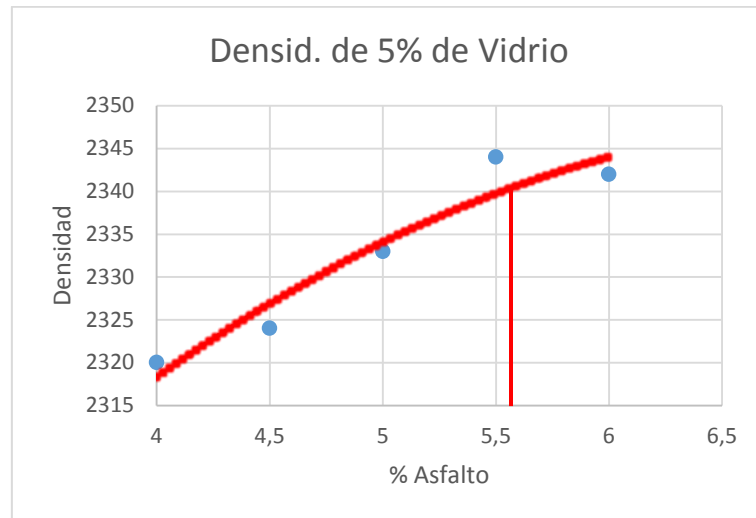


Figura 4.3: Densidad para 5% de Vidrio

El asfalto óptimo para la Densidad es de 5,6%.

Al obtener los óptimos de asfalto para estos 3 parámetros, se saca el promedio de asfalto óptimo para la mezcla con un 5% de Vidrio, el cual es de 5,33%. Con esto se procede a analizar los gráficos de VAM, VFA y Fluencia.

1.4. Vacíos llenos de asfalto

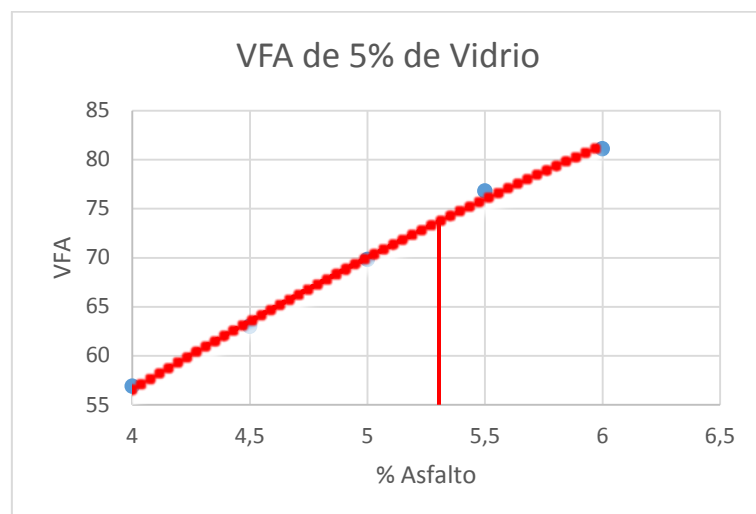


Figura 4.4: Vacíos llenos de asfalto para 5% de vidrio

El VFA nos da un 74%, lo cual está dentro del rango de 65 a 75%, por lo que cumple con la propiedad.

1.5. Vacíos en el agregado mineral

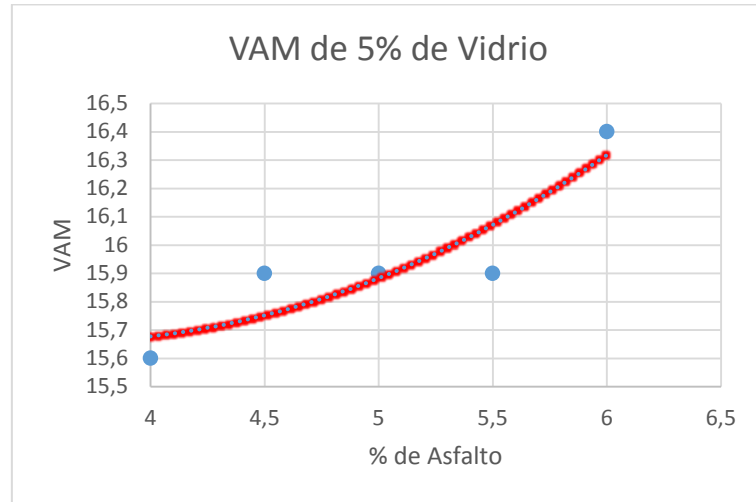


Figura 4.5: Vacíos agregado mineral para 5% de Vidrio

La figura 4.5 nos muestra que dentro de 4,5 a 5,5% de asfalto la cantidad de vacíos en el agregado mineral para un 5% de vidrio no tiene mayores cambios, ya que los tres puntos están en 15,9.

1.6. Fluencia

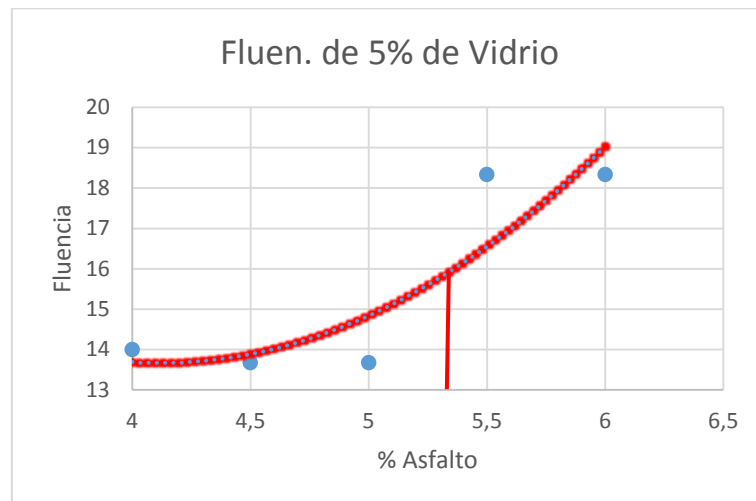


Figura 4.6: Fluencia para 5% de vidrio

En este parámetro vemos que el resultado es superior al Rango deseado para pavimentos de alto tráfico, ya que el máximo en este es de 14, y nosotros obtuvimos 17 aproximadamente.

2. Resultados de Parámetros Volumétricos para un 15% de reemplazo de vidrio
 2.1. Vacíos de aire en la mezcla

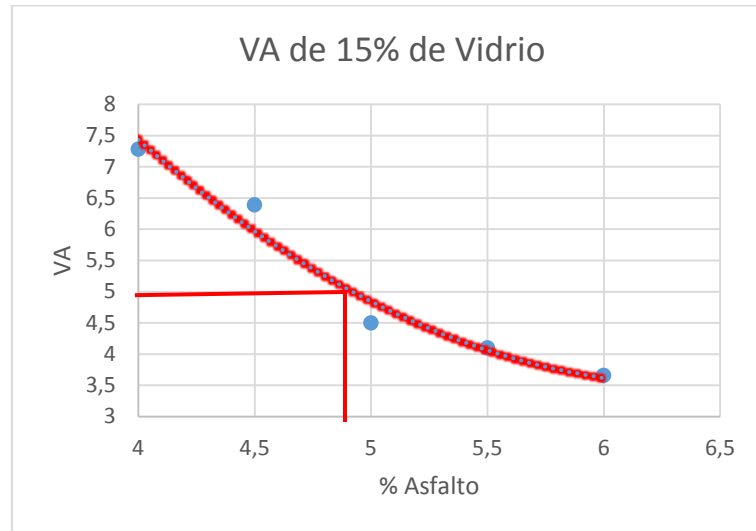


Figura 4.7: Vacíos de aire para 15% de vidrio

Para un 15% de vidrio, de la gráfica se puede apreciar que el asfalto óptimo del VA es de 4,9%.

2.2. Estabilidad Marshall

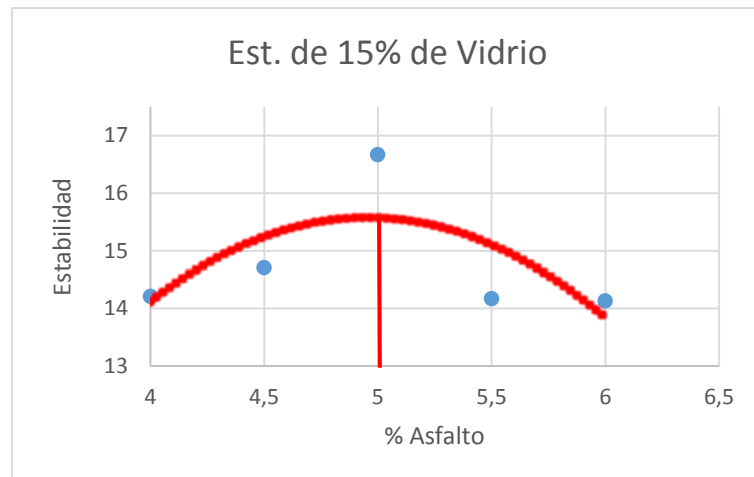


Figura 4.8: Estabilidad Marshall para 15% de vidrio

Para 15% de Vidrio, el óptimo de estabilidad es de 5,0% de asfalto.

2.3. Densidad

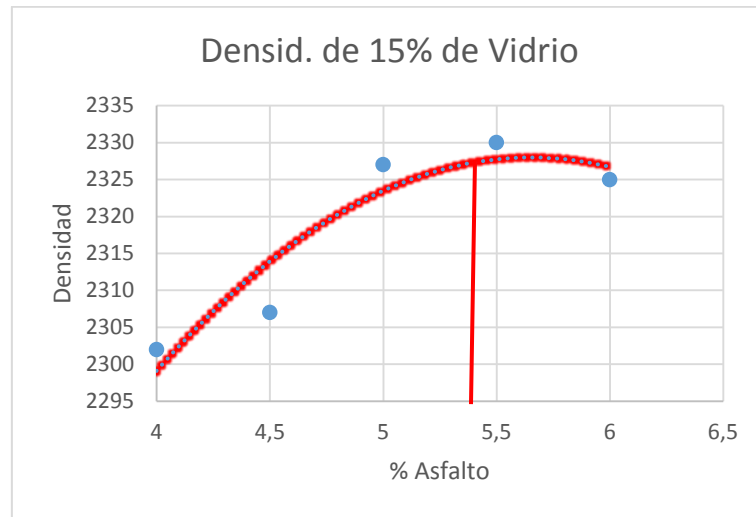


Figura 4.9: Densidad para 15% de vidrio

El asfalto óptimo para la Densidad es de 5,4%.

Al obtener los óptimos de asfalto para estos 3 parámetros, se saca el promedio de asfalto óptimo para la mezcla con un 15% de Vidrio, el cual es de 5,1%. Con esto se procede a analizar los gráficos de VAM, VFA y Fluencia.

2.4. Vacíos llenos de asfalto

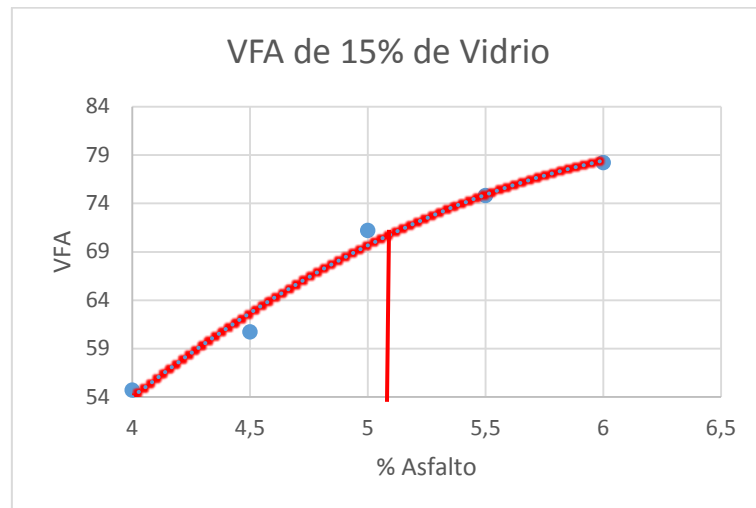


Figura 4.10: Vacíos llenos de asfalto para 15% de vidrio

El VAF es de 72 aproximadamente, es decir, se encuentra dentro del Rango de diseño (65 a 75), por lo que cumple con el rango para un alto tráfico.

2.5. Vacíos en el agregado mineral

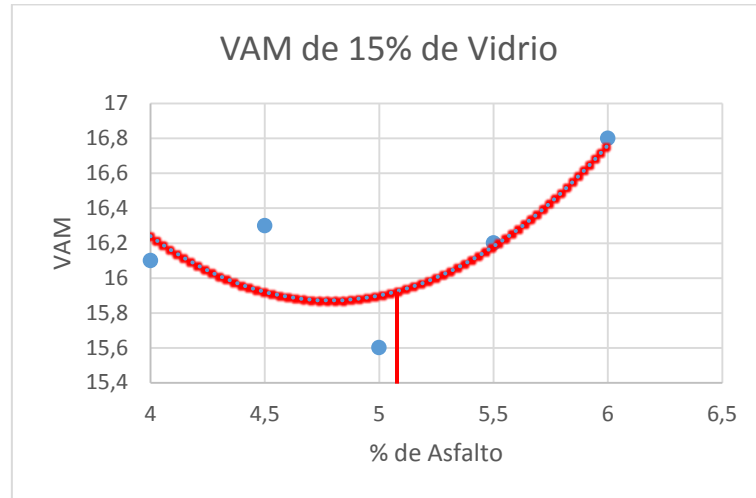


Figura 4.11: Vacíos agregado mineral para 15% de vidrio

Al tener dos lecturas mínimas, se toma que la curva tiene una forma amorfa. Esto podría suponer que el resultado de 4% de asfalto podría haber tenido alguna complicación.

2.6. Fluencia

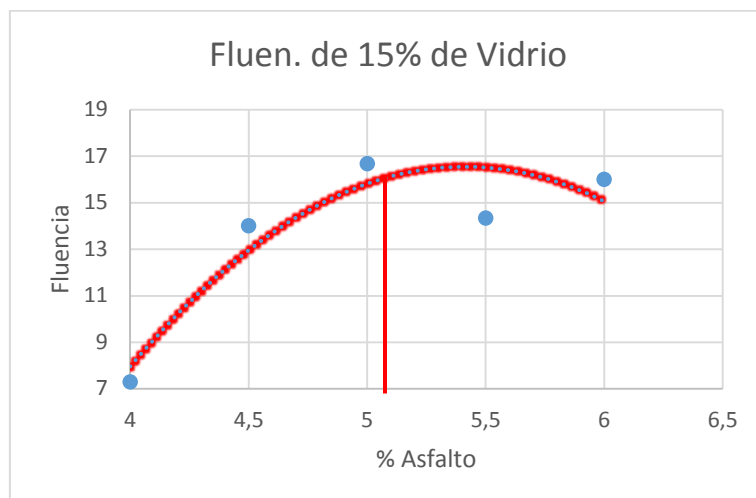


Figura 4.12: Fluencia para 15% de vidrio

En este parámetro vemos que el resultado es superior al Rango deseado para pavimentos de alto tráfico, ya que el máximo en este es de 14, y nosotros obtuvimos 16 aproximadamente.

Además de estar fuera del rango, la curva tiene una forma anormal ya que posee dos máximos.

3. Resultados de Parámetros Volumétricos para un 25% de reemplazo de vidrio

3.1. Vacíos de aire en la mezcla

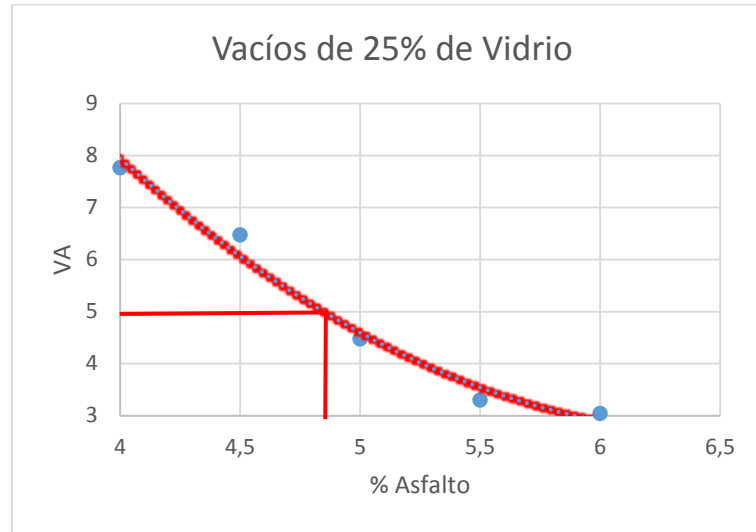


Figura 4.13: Vacíos de aire para 25% de vidrio

Para un 25% de vidrio, en la gráfica se puede apreciar que el asfalto óptimo del VA es de 4,8%.

3.2. Estabilidad Marshall

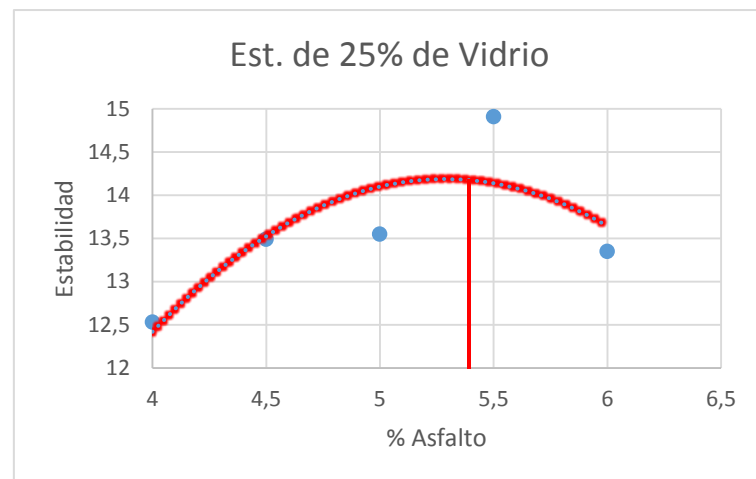


Figura 4.14: Estabilidad Marshall para 25% de vidrio

Para 25% de Vidrio, el óptimo de estabilidad es de 5,4% de asfalto.

3.3. Densidad

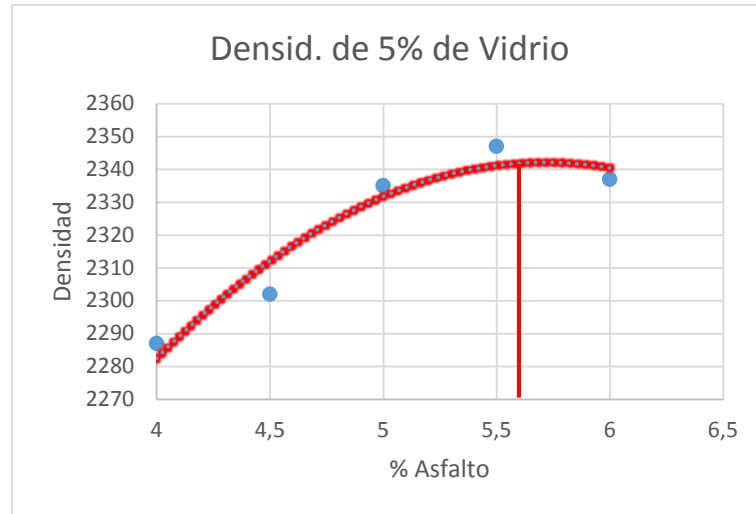


Figura 4.15: Densidad para 25% de vidrio

El asfalto óptimo para la Densidad es de 5,5%.

Al obtener los óptimos de asfalto para estos 3 parámetros, se saca el promedio de asfalto óptimo para la mezcla con un 25% de Vidrio, el que es de 5,27%. Con esto se procede a analizar los gráficos de VAM, VFA y Fluencia.

3.4. Vacíos llenos de asfalto

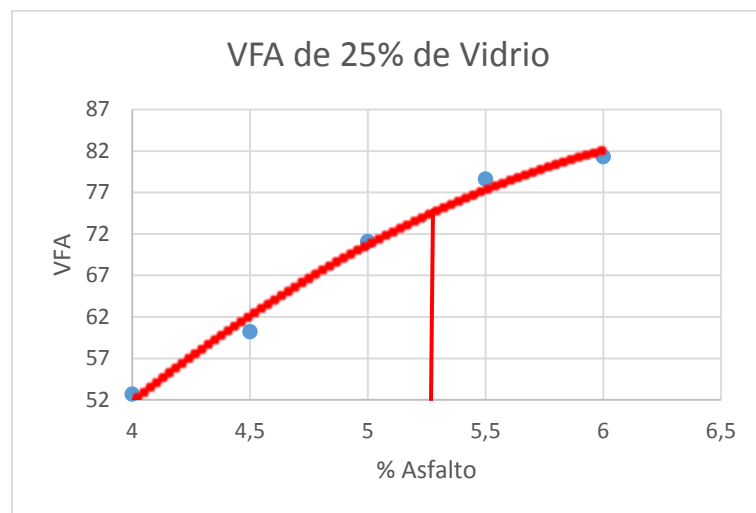


Figura 4.16: Vacíos llenos de asfalto para 25% de vidrio

El VAF es de 74,5 aproximadamente, se encuentra dentro del Rango de diseño (65 a 75), por lo que cumple con el rango dado para un alto tráfico.

3.5. Vacíos en el agregado mineral

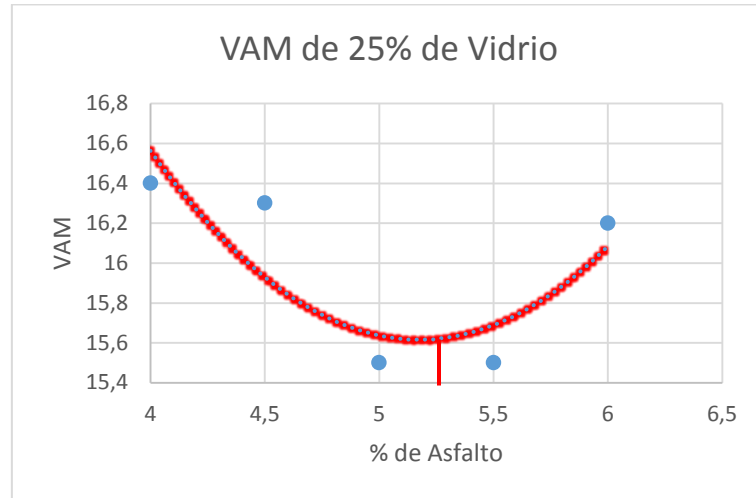


Figura 4.17: Vacíos de agregado mineral para 25% de vidrio

Como resultado de VAM nos muestra 15,4. Además se puede apreciar que tanto para 5 como para 5,5% de asfalto tenemos el mismo resultado de vacíos en el agregado mineral, que es de 15,5.

3.6. Fluencia

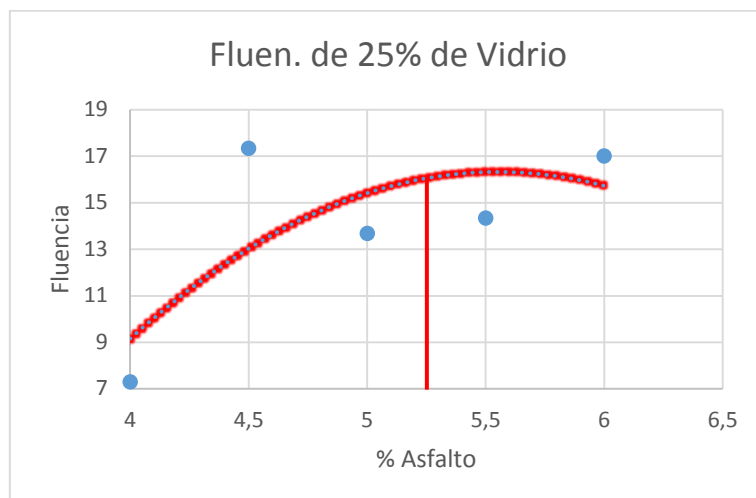


Figura 4.18: Fluencia para 25% de vidrio

En este parámetro vemos que el resultado está fuera del Rango deseado para pavimentos de alto tráfico, ya que es de 8 a 14, y nosotros obtuvimos 16 aproximadamente.

La curva de fluencia tiene dos mínimos, tanto en 4% de asfalto como en 5%. Se podría asumir que el resultado de 4% sea el errado.

4. Resultados de Parámetros Volumétricos para un 35% de reemplazo de vidrio

Para esta cantidad de vidrio, al momento de sacar las densidades se pudo apreciar que la curva iba en ascendente, pero que en 6% de asfalto aun no bajaba. Por esto, se obvió el de 4% de asfalto y se prepararon las probetas con 6,5% de asfalto.

4.1. Vacíos de aire en la mezcla

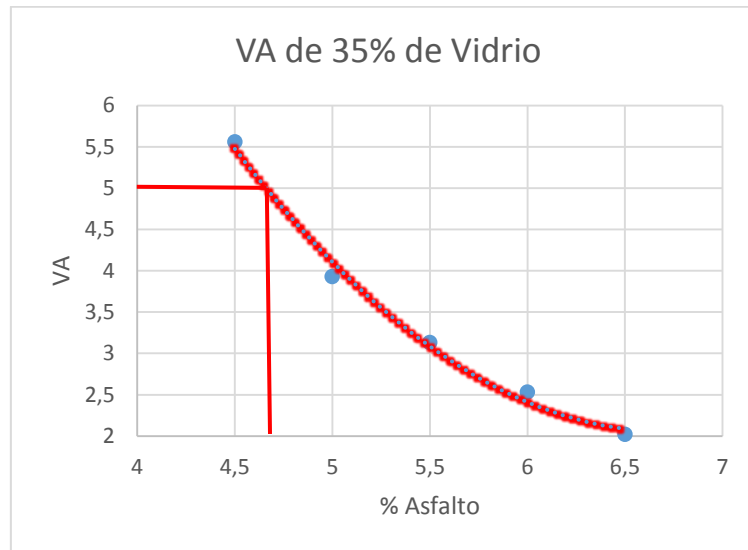


Figura 4.19: Vacíos de aire para 35% de vidrio

Para un 35% de vidrio, por la gráfica se puede apreciar que el asfalto óptimo del VA es de 4,7%.

4.2. Estabilidad Marshall

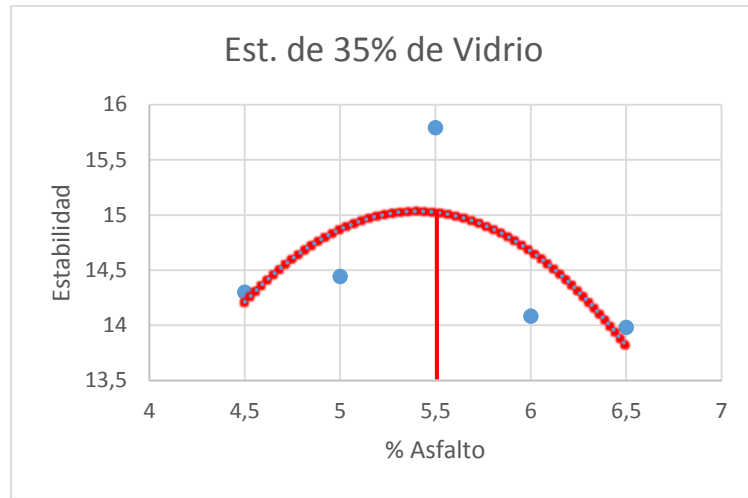


Figura 4.20: Estabilidad Marshall para 35% de vidrio

Para 35% de Vidrio, el óptimo de estabilidad es de 5,5% de asfalto.

4.3. Densidad

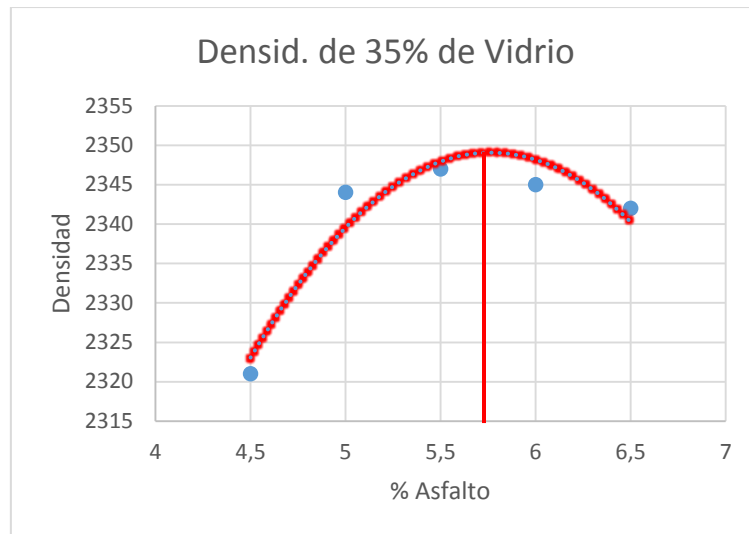


Figura 4.21: Densidad para 35% de vidrio

El asfalto óptimo para la Densidad es de 5,7%.

Al obtener los óptimos de asfalto para estos 3 parámetros, se saca el promedio de asfalto óptimo para la mezcla con un 35% de Vidrio, el cual es de 5,3%. Con esto se procede a analizar los gráficos de VAM, VFA y Fluencia.

4.4. Vacíos llenos de asfalto

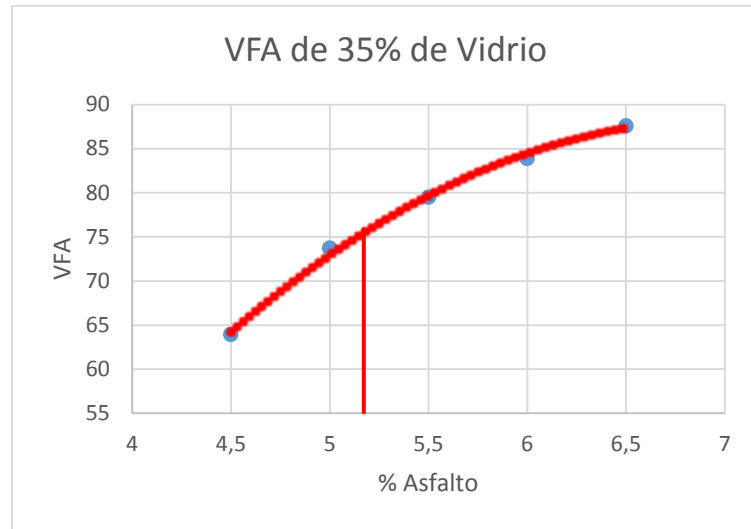


Figura 4.22: Vacíos llenos de asfalto para 35% de vidrio

El VAF es de 76 aproximadamente, no se encuentra dentro del Rango de diseño (65 a 75), por lo que no cumple.

4.5. Vacíos en el agregado mineral

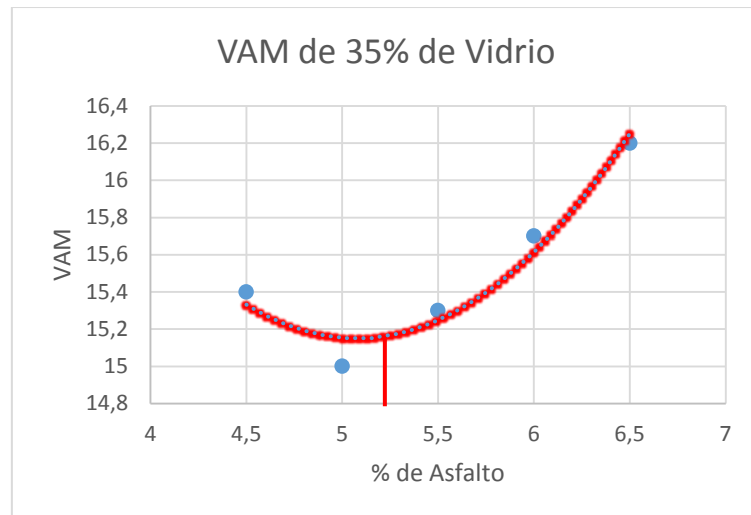


Figura 4.23: Vacíos agregado mineral para 35% de vidrio

Como resultado de VAM nos muestra 15,2 aproximadamente.

4.6. Fluencia

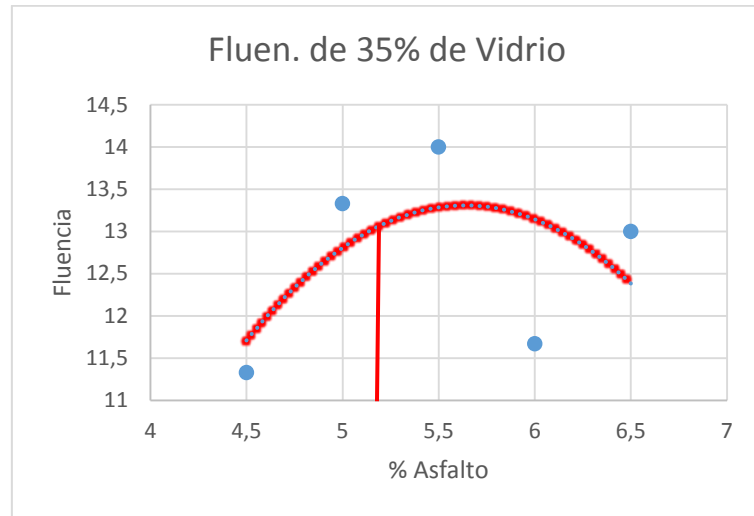


Figura 4.24: Fluencia para 35% de vidrio

En este parámetro vemos que el resultado está dentro del Rango deseado para pavimentos de alto tráfico, ya que es de 8 a 14, y nosotros obtuvimos 13 aproximadamente.

La curva de fluencia tiene dos máximos, tanto en 5,5% de asfalto como en 6,5%. Se podría asumir que el resultado de 6,0% sea el errado.

5. Resultados de Parámetros Volumétricos para un 40% de reemplazo de vidrio.

Para este porcentaje de vidrio se debieron llevar a cabo seis porcentajes de asfalto, ya que al momento de sacar la densidad seguíamos con la curva ascendente, sin encontrar el punto máximo. Por esto se realizaron tres nuevas probetas con 6,5% de asfalto.

5.1. Vacíos de aire en la mezcla

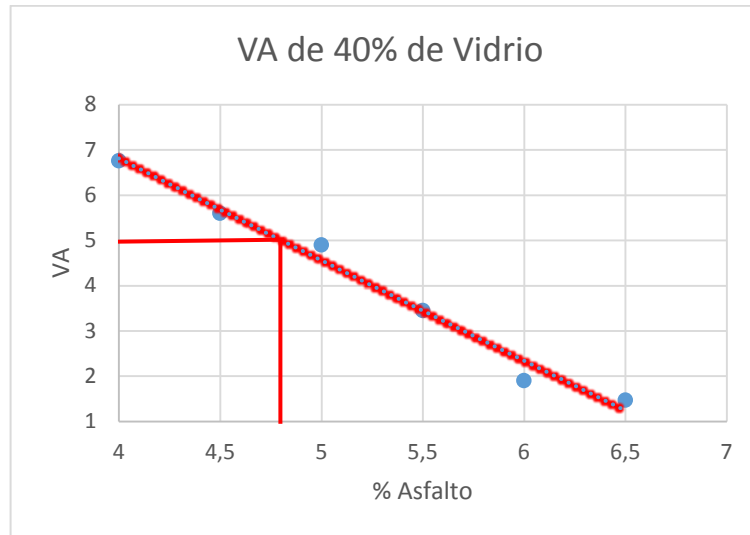


Figura 4.25: Vacíos de aire para 40% de vidrio

Para un 40% de vidrio, de la gráfica se puede apreciar que el asfalto óptimo del VA es de 4,85%.

5.2. Estabilidad Marshall

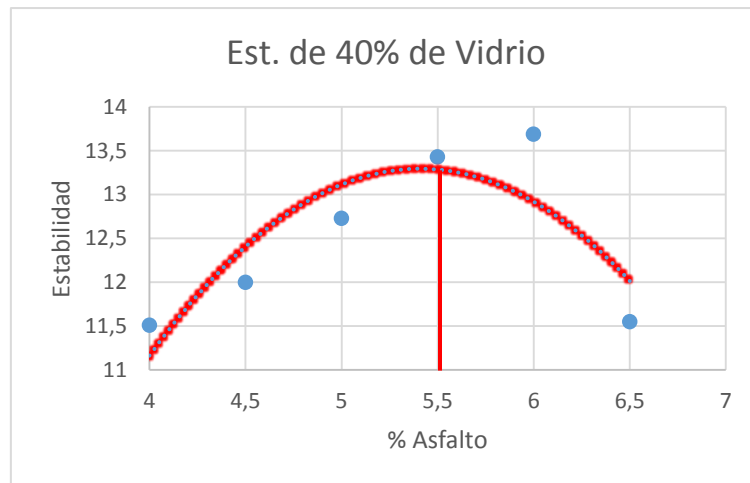


Figura 4.26: Estabilidad Marshall para 40% de vidrio

Para 40% de Vidrio, el óptimo de estabilidad es de 5,5% de asfalto.

5.3. Densidad

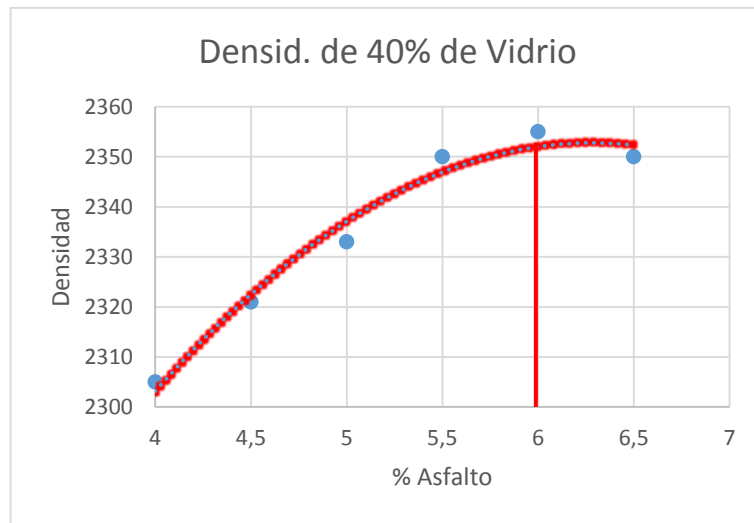


Figura 4.27: Densidad para 40% de vidrio

El asfalto óptimo para la Densidad es de 6,0%.

Al obtener los óptimos de asfalto para estos 3 parámetros, se saca el promedio de asfalto óptimo para la mezcla con un 40% de Vidrio, que es de 5,45%. Con esto se procede a analizar los gráficos de VAM, VFA y Fluencia.

5.4. Vacíos llenos de asfalto

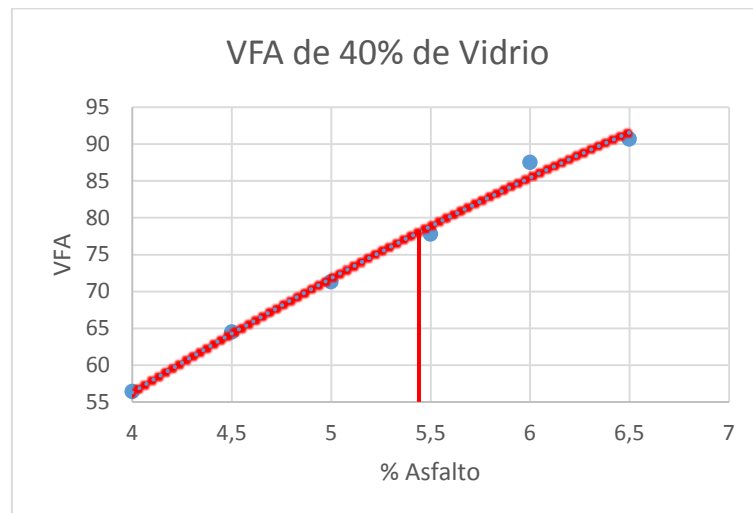


Figura 4.28: Vacíos llenos de asfalto para 40% de vidrio

El VAF es de 77 aproximadamente, este resultado no se encuentra dentro del Rango de diseño (65 a 75), por lo que no cumple con lo esperado para un alto tráfico.

5.5. Vacíos en el agregado mineral

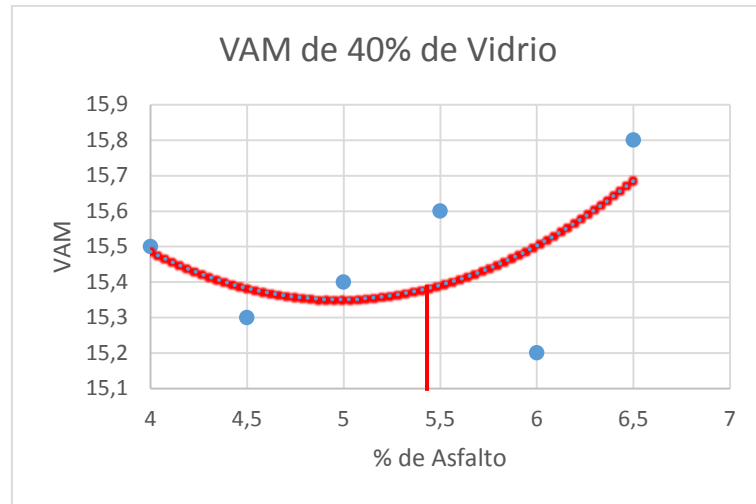


Figura 4.29: Vacíos agregado mineral para 40% de vidrio

Se puede apreciar un comportamiento anormal en la curva, ya que en la VAM se obtiene solo un mínimo, mientras que en este alcanzamos dos.

5.6. Fluencia

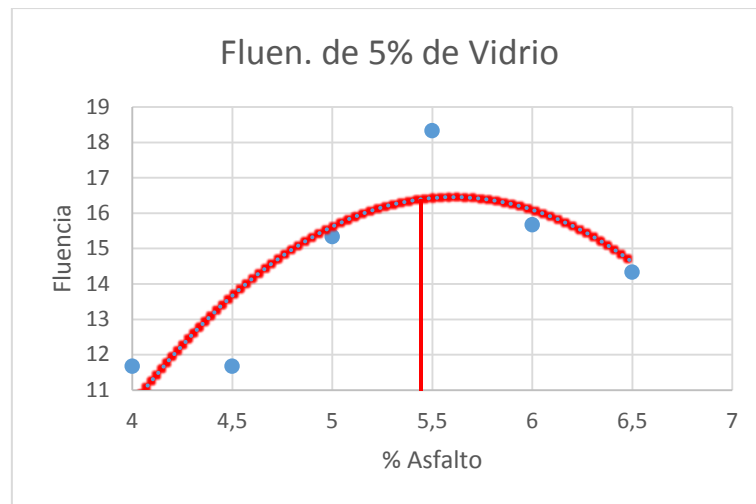


Figura 4.30: Fluencia para 40% de vidrio

En este parámetro vemos que el resultado es superior al Rango deseado para pavimentos de alto tráfico, ya que el máximo en este es de 14, y nosotros obtuvimos 16,5 aproximadamente.

Teniendo la representación gráfica, se pueden apreciar los resultados necesarios para el análisis del porcentaje óptimo de asfalto, esto centrándonos en las gráficas de vacíos de aire, densidad y estabilidad Marshall. De estos se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4.3: Asfalto óptimo para cada porcentaje de vidrio

% Vidrio	% Asfalto			Promedio	Desviación Estándar	Coef. Variación
	Densidad	Vacíos	Estabilidad			
0%	5,5	5,2	5,0	5,20	0,206	3,96
5%	5,6	4,9	5,5	5,33	0,379	7,10
15%	5,4	4,8	5,1	5,10	0,300	5,88
25%	5,6	4,8	5,4	5,27	0,416	7,91
35%	5,7	4,7	5,5	5,30	0,493	9,37
40%	6,0	4,9	5,5	5,45	0,503	9,26

Teniendo los porcentajes óptimos para cada cantidad de vidrio (mostrado en el figura 4.4), se procede a obtener un asfalto óptimo promedio. Para este se toman solo las que tienen porcentaje de vidrio.

El asfalto óptimo para la Probeta, según M.C.V.8 8.302.47 son:

Óptimo por densidad: 5,66

Óptimo por estabilidad: 5,54

Óptimo para 5% de huecos: 4,82

Óptimo a usar: 5,28 +/- 0,3

Con estos resultados se concluye que el contenido de vidrio no influencia en el porcentaje óptimo de asfalto, ya que no hay una variabilidad importante entre los resultados, ya sea entre los resultados de cada porcentaje de vidrio y del óptimo a usar con el patrón.

4.2 Segunda etapa de investigación

Con los resultados obtenidos en la primera etapa se comienzan a realizar los ensayos para el reconocimiento de la susceptibilidad al agua.

4.2.1 Ensayo Tracción Indirecta

Se crean las 6 probetas para cada porcentaje de vidrio, incluyendo patrón, con el porcentaje óptimo de asfalto obtenido en la primera etapa de la investigación la cual fue de 5,3%. Estas se trabajaran con un grupo de probetas secas y otro saturadas (3 y 3 para cada porcentaje de vidrio).

A continuación se muestran las tablas resúmenes de los resultados obtenidos mediante fórmulas del anexo para los ITS seco y saturado.

Tabla 4.4: Resultados Parámetros de muestras en seco.

Asfalto	Parámetro	Un.	% Vidrio					
			0%	5%	15%	25%	35%	40%
5,3%	ITS	KN	1.202	1.168,3	1.077,8	1.230,9	1.077,9	1.108,2
	Densidad	Kg/m3	2.350,4	2.334,6	2.336,8	2.363,4	2.346	2.359
	Va	%	3,7	4,2	4	2,7	3,3	4,8
	VAM	%	15,7	16,1	15,8	14,7	15,1	14,6
	VFA	%	76,4	74	74,9	81,5	77,9	67,2

Tabla 4.5: Resultados Parámetros de muestras saturadas.

Asfalto	Parámetro	Un.	% Vidrio					
			0%	5%	15%	25%	35%	40%
5,3%	ITS	KN	1.067	1.012,5	837,5	1.055,9	910,4	952,1
	Densidad	Kg/m3	2.342,4	2.331,1	2.328,2	2.361,7	2.349,2	2.359,2
	Va	%	4	4,3	4,3	2,8	3,2	4,8
	VAM	%	16	16,2	16,2	14,8	15	14,6
	VFA	%	74,8	73,3	73,2	81,1	78,7	67,2

En laboratorio se pudo apreciar visualmente que ninguna probeta, secas ni saturadas mostraban rotura solo deformación ligera.

En la figura 4.31 se presenta la relación existente entre el contenido de asfalto y de Tracción indirecto para cada condición, seca y saturada.

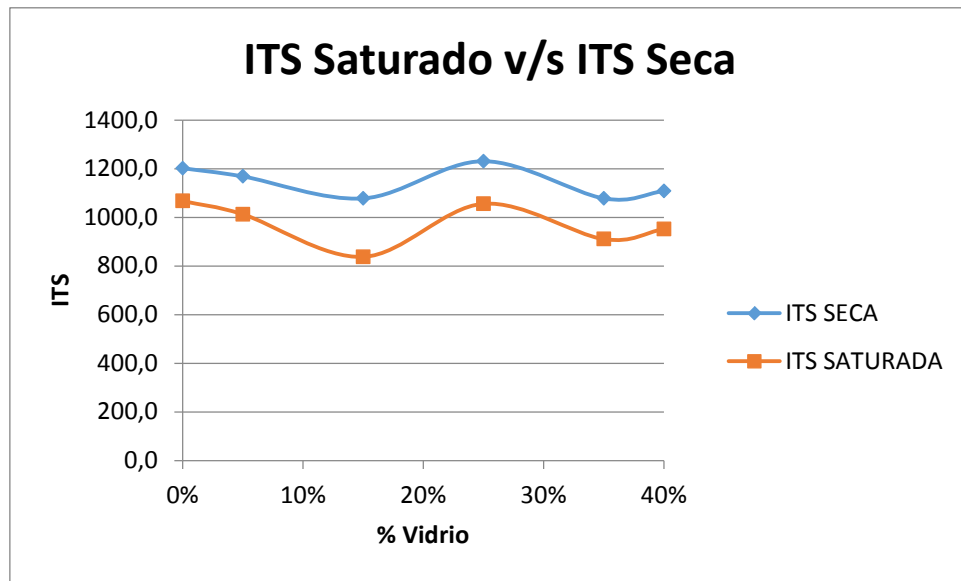


Figura 4.31: ITS Saturada v/s ITS Seca

La figura 4.31 que la mayor resistencia a la tracción indirecta se encuentra en el 25% de vidrio, tanto en el grupo saturado como en el seco. Además con un 5% de vidrio podemos notar que su ITS es muy parecido a los de la muestra patrón, pasado del 15% de vidrio se ve claramente una baja en su resistencia, con mayor severidad en las pruebas saturadas.

Las curvas mostradas en la figura 4.31 presentan un comportamiento poco inusual para este tipo de materiales, ya que se alcanzaron distintos máximos tanto como distintos mínimos.

4.2.2 Resistencia conservada

Analizados los resultados de los ITS se procede a conseguir el TSR(%), el cual muestra la severidad que tiene el agua en las probetas. La siguiente tabla muestra sus resultados:

Tabla 4.6: Resultados TSR (%).

% Vidrio	ITS Saturada	ITS Seca	TSR (%)
0%	1.067	1.202	88,8
5%	1.012,5	1.168,3	86,7
15%	837,5	1.077,8	77,7
25%	1.055,9	1.230,9	85,8
35%	910,4	1.077,9	84,5
40%	952,1	1.108,2	85,9

Con los resultados de la Tabla 4.7 obtenemos la siguiente gráfica:

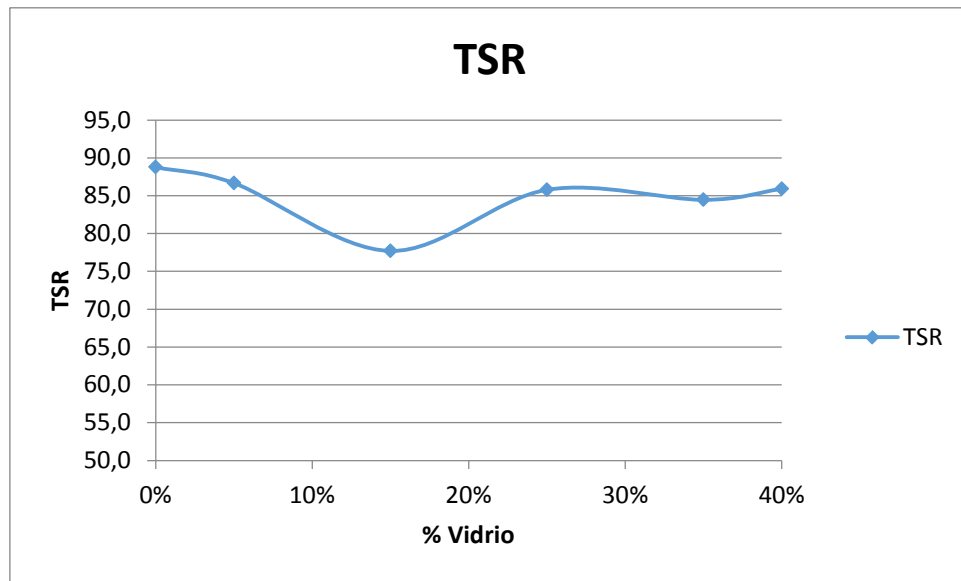


Figura 4.32: TRS(%) para cada cantidad de vidrio

Al igual que el ITS la curva del TSR (Figura 4.32) tiene un comportamiento sinusoidal, obteniendo su mayor baja en 15% de vidrio, mientras que de 25% a 40% la resistencia conservada se mantiene bastante uniforme, estando en el rango de los 85%.

La muestra con 0% de vidrio nos regala la menor severidad a la influencia del agua, seguida por los 5% de vidrio, dando la imagen que entre menos vidrio, mayor TSR se puede obtener.

De igual manera se aprecia que todos los porcentajes de vidrio cumplen con el mínimo permitido para el TSR, el cual es de 70%. Mientras que eliminando el resultado 15% de vidrio todos los demás se encuentran sobre el estándar de TSR que es de un 80%.

A través de un análisis estadístico, test de comparación de pruebas, más específicamente la T de Student obtenemos los siguientes resultados:

Tabla 4.7: Variables de análisis estadístico

Variables para cada una de las mezclas	
n	3
a	0,05
Grados de libertad	4

Teniendo los grados de libertad y a podemos encontrar el Alfa de la tabla de T de Student.

Alfa: 2,13

Tabla 4.8: Promedio y Varianza TSR

% de vidrio	TSR o Promedio	Varianza
0%	88,8	20,295
5%	87,0	44,67
15%	77,7	0,03
25%	85,8	2,09
35%	84,5	9,44
40%	85,9	2,04

Aplicando las formulas del anexo se llega al valor del T de Student, los que se muestran a continuación:

Tabla 4.9: Resultados T de Student

% de Vidrio	0%- 5%	0%- 15%	0%- 25%	0%- 35%	0%- 40%
t	0,310	3,465	0,884	1,098	0,852

Teniendo la t y el alfa podemos demostrar que solo para un 15% de vidrio las diferencias con la muestra patrón es significativa, ya que 3,465 es mayor que 2,13, estando fuera del rango aceptable. Obviando este porcentaje de vidrio podemos llegar a la conclusión que no hay influencia del contenido de vidrio en el TSR.

Capítulo 5.- Conclusiones y propuestas de futuras investigaciones

“Evaluar la influencia que tiene el vidrio reciclado como reemplazo parcial del árido fino en el control de la falla por humedad ...” (Objetivo general)

El objetivo general de la investigación habla de un global, por lo que para dar una respuesta, nos centraremos en cada objetivo específico.

“Evaluar la influencia que tiene la cantidad de vidrio en el contenido óptimo de asfalto de una mezcla asfáltica en caliente modificada” (Objetivo específico 1)

Antes de dar respuesta a este objetivo se analizará cada uno de los parámetros que influyen directamente en el asfalto óptimo, para esto ocuparemos los resultados obtenidos por la Tabla 4.4 sobre vacíos, estabilidad Marshall y densidad.

Para el parámetro de vacíos del agregado se puede apreciar que para un 5% de vacíos en la muestra se obtiene un 4,82% de asfalto óptimo para las probetas con vidrio, este resultado nos da a conocer que todas las muestras condicionadas, en el factor de vacíos (Tabla 4.4), se encuentra dentro de los rangos, ya que las probetas tienen un factor de $\pm 0,3\%$ para el asfalto óptimo obtenido. Por otra parte, haciendo la comparación de la muestra patrón versus las muestras condicionadas se puede notar que esta última genera una caída en el porcentaje de asfalto óptimo para un 5% de vacíos, ya que para un 0% de vidrio el asfalto óptimo es de 5,2%.

Para la estabilidad Marshall se nota que las muestras de vidrio necesitan una mayor cantidad de asfalto para alcanzar la carga máxima a resistir, ya que la gran mayoría se encuentra en un 5,5% de asfalto. Este parámetro da un asfalto óptimo en las muestras condicionadas de 5,4%, superior al obtenido por la muestra patrón que llegó al 5% de asfalto, esto se puede explicar porque el vidrio al no tener porosidades necesita una mayor cantidad de asfalto para que genere la ligación necesaria para que obtenga una mayor resistencia a la fuerza aplicada.

La densidad tanto de la muestra patrón como las con vidrio nos da un óptimo bastante parecido, obteniéndose un 5,5% de asfalto para la patrón y un 5,6% para la condicionada, esto puede llevar a asumir que el vidrio no cambia la densidad de las probetas, esto se puede tomar como cierto, ya que la densidad del vidrio se analizó con anterioridad y no tenía un gran cambio con la del árido.

Teniendo los resultados de cada parámetro se puede sacar el porcentaje óptimo de asfalto a usar, que en este caso es de 5,28%, lo que muestra que el vidrio no provoca una variabilidad importante en el contenido óptimo de asfalto, ya que para la muestra patrón el óptimo a utilizar es de 5,2%, que al trabajarlo con el factor de $\pm 0,3\%$ deja al valor condicionado dentro del rango aceptable.

“Determinar la influencia que el contenido de vidrio en reemplazo parcial del árido fino tiene en las propiedades volumétricas en las mezclas asfálticas en caliente” (Objetivo específico 2).

Ya se analizaron tres de las propiedades, por lo que ahora se centrará en las tres faltantes.

Gráficamente se aprecia que en la gran mayoría de las propiedades de VFA, VAM y Fluencia dan resultados que no cumplen con los rangos normados para tráfico de alto rendimiento y además en los gráficos de VAM y Fluencia se dio el fenómeno de formarse curvas sin máximos definidos o sin mínimos definidos (esto sin trabajarse con curvas de tendencia).

En el caso de la fluencia, comúnmente nos dieron resultados fuera de rango, lo que dice que se obtuvieron deformaciones mayores de las permitidas para estos tipos de pavimentos. Que se tenga mayores deformaciones indica que el pavimento tendrá una menor vida útil.

Para el VFA dio resultados aceptables hasta el 25% de vidrio, mientras que los dos porcentajes faltantes quedaron fuera del rango, lo que muestra que a mayor cantidad de vidrio en la mezcla se deja de cumplir los estándares mínimos de las propiedades volumétricas.

Esta información evidencia que el vidrio afectó de manera negativa las propiedades volumétricas del pavimento asfáltico en caliente, lo cual lleva a la conclusión de que no es recomendable su utilización y, si se llegase a ocupar, que sea en pavimentos con un menor tráfico para que se tenga un mejor funcionamiento.

“Determinar la influencia que el contenido de vidrio en reemplazo parcial del árido fino tiene en ITS y TSR de las mezclas asfálticas en caliente” (Objetivo específico 3)

La gráfica del ITS (figura 4.31) da una comparación tanto de las probetas saturadas como las secas. Como primer análisis, se ve el comportamiento regular que se produce, ya que las probetas sin saturación obtienen una mayor resistencia antes de romper por tracción indirecta. El comportamiento extraño es la curva sinusoidal que se genera en ambos grupos (no tiene un máximo o un mínimo definido), ya que si se hubiera generado solo en uno de los grupos nos mostraría que algo se ejecutó mal en la experimentación, pero al mostrar que ambos grupos dieron curvas bastantes uniformes, teniendo bajas y altas en las mismas cantidades de vidrio, evidencia que esto está relacionado con el vidrio, ya que para los otros materiales trabajados este comportamiento es completamente anormal.

Este fenómeno se puede explicar porque el vidrio, al ser un material que conserva más el calor y que también puede llegar a secarse con mayor rapidez, podría provocar una saturación temporal de los vacíos de aire, lo que incitaría una saturación parcial de las probetas.

Para el gráfico del TSR (Figura 4.32) se obtuvieron los mismos resultados sinusoidal que para ITS, lo cual es lógico, ya que la resistencia conservada se obtiene de los resultados de la tracción indirecta, dándonos un porcentaje referencial del daño que produce la humedad en la mezcla. Este porcentaje -exceptuando al 15% de vidrio- se encuentra sobre el estándar a obtener en la resistencia conservada que es de un 80%, y aun cuando en 15% está bajo el estándar se encuentra sobre el mínimo permitido que es de un 70%.

Mediante el análisis estadístico se da cuenta que el vidrio no muestra una diferencia significativa en la resistencia conservada, y por consiguiente, en los resultados de la tracción indirecta, esto se muestra gráficamente (Figura 4.32) que las probetas condicionadas (eliminándose la de 15% de vidrio) tienen un comportamiento bastante uniforme a la severidad que puede llegar a tener al estar expuestas a humedad.

Por otra parte, aun cuando el vidrio no genero una diferencia estadística significativa, se puede apreciar en la Tabla 16 que ningún resultado de las muestras condicionadas llego a superar la de la muestra patrón, lo que se puede traducir en que la influencia a la humedad tiene una menor severidad en las probetas sin vidrio.

Tomando todos los resultados obtenidos podemos dar cuenta que no existe una proporción optima de vidrio molido que nos permita controlar las fallas por humedad, ya que aun cuando cumple con los resultados estándar de la resistencia conservada, sigue teniendo un mejor funcionamiento las mezclas sin vidrio para este tipo de falla. Además que no cumple con muchas de las propiedades físicas y mecánicas mínimas que se piden para un pavimento asfáltico de alto tráfico. Todos estos factores nos muestran que nuestra hipótesis no es verdadera.

Analizado las conclusiones obtenidas se realiza la propuesta para futura (as) investigación (es).

- Evaluar la utilización de vidrio reciclado junto con cal, como aditivo, para la influencia a la humedad en climas húmedos para pavimentos asfálticos de tráfico medio.

Capítulo 6.- Anexos

6.1 Imágenes

En la siguiente figura podemos ver el proceso de tamizado del vidrio y también el ensayo para obtener su densidad. Laboratorio de Vialidad.



Figura 6.1: Tratamiento del vidrio en laboratorio

Material tamizado y seco antes de confeccionar las bolsas.



Figura 6.2: Material tamizado

Bolsas de 1.100 gr para los distintos porcentajes de vidrio.



Figura 6.3: Material para las probetas

Mezclado del material a la temperatura indicada, para la confección del ensayo Marshall.



Figura 6.4: Preparación de probetas

Muestras de 2.200 gr por cada porcentaje de vidrio antes de ensayar para obtener la Densidad máxima de la mezcla.



Figura 6.5: Material para Densidad Máxima de la mezcla.

Probetas ensayadas por tracción indirecta, las cuales mostraron deformación pero no rotura.



Figura 6.6: Probetas ensayadas.

6.2 Formulas

6.2.1 Ensayo Marshall

Las formulas no mostradas se obtienen directamente el ensayo Marshall, la cual es Estabilidad, a esta solo se le multiplica por el factor de corrección obtenido del Manual de carretera V.8 sobre la altura de la probeta:

Densidad Máxima de la Mezcla sin compactar (Dmm):

$$D_{mm} = \frac{M_m}{M_m + MP_a - MP_{am}} \rho_T$$

donde:

- Dmm : Densidad máxima de la mezcla sin compactar (kg/m³)
- Mm : Masa de la muestra a temperatura ambiente (g)
- MPa : Masa del recipiente lleno con agua (g)
- MPam : Masa del recipiente lleno con agua y muestra (g)
- ρ_T : Densidad del agua a la temperatura de ensaye (kg/m³)

Figura 6.7: Densidad Máxima de la mezcla.

Fuente: Manual de carreteras Volumen 8

Densidad (G):

$$G = \frac{Masa_Seca}{Masa\ sss - Masa\ sumergida} \times 1.000 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

Fluencia: Este dato se trabaja con la lectura entregada por el Ensayo Marshall y la formula facilitada por cada máquina, en este caso la fórmula es la siguiente:

$$Y = 0,0415 \times Lectura + 0,1250$$

$$Y = Fluencia$$

Vacíos de aire en la mezcla (VA):

$$Va = 100 \times \frac{D_{mm} - G}{D_{mm}}$$

donde:

- Va : Porcentaje de huecos de aire en la mezcla (%).
 D_{mm} : Densidad máxima de la mezcla (kg/m³).
 G : Densidad de la mezcla compactada (kg/m³).

Figura 6.8: Vacíos de aire en la mezcla

Fuente: Manual de carreteras Volumen 8

Vacíos en el agregado mineral (VAM):

$$VAM = 100 \times \left(1 - \frac{G}{\rho_{RS}} \times \frac{100}{100 + Pb} \right)$$

donde:

- VAM : Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (%).
 G : Densidad de la mezcla compactada (kg/m³).
 ρ_{RS} : Densidad real seca del agregado (kg/m³).
 Pb : Porcentaje de asfalto referido al agregado (%).

Figura 6.9: Vacíos en el agregado mineral

Fuente: Manual de carreteras Volumen 8

Vacíos llenos de asfalto (VFA):

$$VFA(\%) = 100 \times \left(\frac{1 - VA}{VAM} \right)$$

6.2.2 ITS y TSR

Tracción indirecta (ITS):

$$ITS = \frac{2 \times \text{Carga de Rotura}}{\pi \times \frac{h \text{ promedio}}{10} \times 10,14} \times 1.000$$

Resistencia conservada (%):

$$TSR (\%) = \frac{ITS \text{ saturada}}{ITS \text{ seca}} \times 100$$

6.2.3 T de Student

Grado de Libertad (gl):

$$gl = n_1 + n_2 - 2$$

$n_1 =$ cantidad de mediciones primer grupo

$n_2 =$ cantidad de mediciones segundo grupo

Varianza (s):

$$S_p^2 = \frac{\sum(X_i - \bar{X})^2 + \sum(Y_i - \bar{Y})^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

T de Student:

$$T = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{S_p \sqrt{1/n_1 + 1/n_2}}$$

Capítulo 7.- Bibliografía

- ❖ (1) AIREY, GD Estado del informe de arte sobre el envejecimiento métodos de ensayo para materiales de pavimentos bituminosos. *International Journal of Pavement Engineering*, 2003, vol. 4, núm. 3, pp 165-176.
- ❖ (2) Khalid H. A. (2002), A new approach for the accelerated ageing of porous asphalt mixtures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Transport* 153, Issue 3, 171-181.
- ❖ (3) Verhasselt A. F (1997), Field Ageing of Bituminous Binders: Simulation and Kinetic approach. In: Di Benedetto, H., Francken, L., *Proc. Fifth International RILEM Symposium, Mechanical Tests for Bituminous Materials*, 121-128.
- ❖ (4) Montepara A. y Giuliani F. (2000), Comparison between ageing simulation tests of road bitumen. *Proc. 2nd Euraspalt and Eurobitume Congress, Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures*, (Barcelona), 518-523.
- ❖ (5) Prowell, B.D., Hurley, G.C., Frank, B. (2011). "Warm Mix Asphalt: Best Practices 2ndEdition", Quality Improvement Series Publication 125, National Asphalt PavementAssociation, Lanham, MD.
- ❖ (6) AMIRKHANIAN, S. N. y WILLIAMS, B. Recyclability of moisture damaged flexible pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1993, vol. 5, núm. 4, pp. 510-530.
- ❖ (7) WILLIAMS, T. M. y MIKNIS, F. P. Use of environmental SEM to study asphalt-water interactions. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1998, vol. 10, núm. 2, pp. 121-124.
- ❖ (8) CARO, S. *et al.* Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms. *International Journal of Pavement Engineering*, 2008, vol. 9, núm. 2, pp. 81-98.
- ❖ (9) PETERSON, J. C. Chemistry of asphalt--Aggregate interactions relationship with pavement moisture damage test. *Transportation Research Record*. 1982, vol. 83, pp. 95-104.
- ❖ (10) STUART, K. D. *Evaluation of procedure used to predict moisture damage in asphalt mixtures*. Report No. RD-8/091, Federal Highway Administration, 1986.
- ❖ (11) MOHAMED, E. H. H. Debonding location in asphalt concrete associated with moisture damage. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1993, vol. 5, núm. 4, pp. 497-509.
- ❖ (12) BAGAMPADDE, U.; ISACSSON, U. y KIGGUNDU, B. M. Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 2005, vol. 6, núm. 4, pp. 229-239.
- ❖ (13) Figueroa; Reyes. Moisture damage analysis for an asphalt mixture through the mist test and the ipas 2d® software.
- ❖ (14) Envase de vidrio, disponible en: <https://ar.verallia.com/el-vidrio/ventajas-del-vidrio>
- ❖ (15) Recycled Glass in Asphalt, disponible en: http://www.norpass-sail.com/gl_bp/gbp4-0201.htm#Day

- ❖ (16) Glassphalt: Have Roads Made with Recycled Glass Changed Pavement?
- ❖ Hugo Rodón y Luis Moreno, disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S012321262010000200005&script=sci_arttext
- ❖ Hugo Rodón y Fredy Reyes, disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732009000200006
- ❖ Ricardo Bisso; Vidrio reciclado en asfalto, disponible en: <http://ligante-asfaltico.blogspot.com/p/3-glassphalt.html>
- ❖ Manual de carreteras, Volumen N° 5
- ❖ Manual de carreteras, Volumen N° 8.
- ❖ Influencia de la composición química y mineralógica agregada sobre agotamiento en mezclas bituminosas; Revista internacional de ingeniería de pavimentos; Vo. 6, Num. 4, 2005.
- ❖ M. Ghasemi y S. M. Marandi, disponible en: http://www.sid.ir/en/VEWSSID/J_pdf/856201310A08.pdf
- ❖ Freddie Salado y Moises Estrada, disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3252/50777-.pdf?sequence=9>