



Universidad Autónoma de Querétaro
 Facultad de Ingeniería
 Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres, Transporte y Logística

Mejora de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas fabricadas con la técnica de asfalto espumado

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
 Maestro en Ingeniería

Presenta:
 Ing. Rubén Lugo Aguillón

Dirigido por:
 Dr. Mauricio Centeno Ortiz, Dra. Alexandra Ossa López

Dr. Mauricio Centeno Ortiz
 Presidente

Firma

Dra. Alexandra Ossa López
 Secretario

Firma

Dra. Ma. De la Luz Pérez Rea
 Vocal

Firma

M.I. Ramiro Guillermo Paz Cruz
 Suplente

Firma

Dr. J. Jesús Alonso Mota
 Suplente

Firma

Nombre y Firma
 Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
 Directora de Investigación y Posgrado

RESUMEN

La creciente demanda de infraestructura carretera, aunada a los problemas provocados por la contaminación derivado del consumo excesivo de combustibles fósiles y de la sobreexplotación de los recursos naturales, hacen innegable la necesidad de explorar nuevas formas de satisfacer estas demandas. Es por ello que en las últimas décadas se ha observado un incremento en la aparición y aplicación de nuevas técnicas de construcción; las cuales tienen la particularidad de ser más amigables con el medio ambiente, aportar en la disminución de costos de producción y al mismo tiempo poseer un desempeño adecuado en el tiempo y conforme a las exigencias del tránsito. El presente trabajo aborda específicamente el caso de las mezclas asfálticas fabricadas con Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP) y estabilizadas con la técnica de Asfalto Espumado para su aplicación como capa de base en una estructura de pavimento. Se buscó la mejora de las propiedades mecánicas y disminuir la susceptibilidad de estas mezclas ante condiciones poco favorables al incorporar aditivos promotores de adherencia en el proceso de fabricación. De esta manera, es posible aplicar la técnica bajo condiciones no óptimas (como las bajas temperaturas), o cuando el proceso de fabricación es poco uniforme, o bien, si las condiciones son ideales, mejorar el desempeño de la mezcla incrementando su resistencia y disminuyendo la susceptibilidad a la humedad y la aparición de deformaciones permanentes. Los resultados obtenidos muestran un incremento significativo pero no definitivo en los valores de resistencia de los materiales, los cuales son determinados por medio de las pruebas de Resistencia a Tracción Indirecta (ITS), Resistencia Retenida a la Tracción Indirecta (TSR) y Módulo de Resiliencia del Material (MR). Es necesario contrastar con un estudio económico la conveniencia de la aplicación de la técnica y de la incorporación de los aditivos promotores de adherencia.

(Palabras clave: asfalto espumado, aditivos promotores de adherencia, RAP)

SUMMARY

The increasing demand for road infrastructure, along with the problems caused by pollution resulting from the excessive consumption of fossil fuels and the exploitation of natural resources force the need to explore new ways to satisfy these demands. This is the reason why in the past few decades an increase in the emergence and application of new building techniques has been observed. These new techniques have the particular feature of being environmentally-friendly, granting reductions in costs and, at the same time, granting a favorable performance in times and demands from road traffic. The aim of this study deals with the specific case of asphaltic mixes produced with reclaimed asphalt pavement (RAP) and stabilized through the foamed bitumen technique for its application as base course in a pavement structure, the improvements of mechanical properties when incorporating adhesion promoter additives in the manufacturing process. In this way it is possible to apply the technique under adverse conditions (low temperatures) or, when the manufacturing process suffers from disadvantages, or, in ideal conditions, improving the performance of the mix by increasing its resistance, and reducing the moisture risk and the appearance of permanent bends. Results show a significant but not determinant increase in the resistance values of materials, calculated by means of indirect tensile strength tests (ITS) and tensile strength ratio (TSR). It is necessary to contrast through an economic study the convenience of the application of the technique and the incorporation of adhesion promoter additives.

(Key words: foamed bitumen, adhesion promoter additives, RAP)

Este trabajo de investigación lo dedico a mis familias. La que me educó, la que me adoptó y en especial a la que hemos formado.

A los oseznos...

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme llegar a la conclusión de este ciclo. Agradezco especialmente a mi esposa Ing. Mónica Gabriela Rodríguez Castillo, porque sin su ayuda simplemente no hubiera sido posible conseguir este objetivo.

Agradezco a mis padres Rubén y Lupita, así como a mis hermanas Dalila y Lupita y a mis abuelitos; de quienes siempre he recibido apoyo, palabras de aliento y llamadas de atención cuando han sido necesarias. Agradezco también a la familia Rodríguez Castillo por todo el apoyo y cariño demostrado desde que los conozco.

Doy gracias a las personas que me brindaron su apoyo para poder realizar este proyecto; al Dr. Mauricio Centeno Ortiz, quien además de ser mi asesor de tesis, estuvo en momentos personales muy importantes y trascendentales. Al Ing. Alejandro Díaz y a la empresa PROLASA, de quienes siempre recibí un apoyo incondicional.

Es necesario también expresar mi agradecimiento a la empresa Quimi-Kao, en particular al ing. Carlos Flores así como al Ing., Javier Fernández de la empresa COCONAL por el apoyo recibido al proporcionar las muestras de los materiales con los que se trabajó

Mi más sincero agradecimiento para la Dra. Alexandra Ossa López y al instituto de Ingeniería de la UNAM, a la Dra. Ma. De la Luz Pérez Rea, al M.I. Ramiro Guillermo Paz Cruz y al Dr. J. Jesús Alonso Mota, catedráticos de la UAQ.

Finalmente agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por ofrecer el soporte económico que permitió cubrir en parte los gastos generados durante este proceso.

TABLA DE CONTENIDOS

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 3 |
| 1.2 OBJETIVOS | 4 |
| 1.2.1 <i>Objetivo General</i> | 4 |
| 1.2.2 <i>Objetivos particulares</i> | 4 |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN | 5 |
| 1.4 HIPÓTESIS..... | 7 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 8 |
| 2.1 CLASIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS | 8 |
| 2.1.1 <i>Mezclas asfálticas en caliente</i> | 8 |
| 2.1.2 <i>Mezclas asfálticas en frío</i> | 9 |
| 2.2 MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS | 11 |
| 2.3 ASFALTO ESPUMADO..... | 15 |
| 2.4 PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO (RAP) | 20 |
| 3. METODOLOGÍA | 23 |
| 3.1 MEDICIONES Y ANÁLISIS | 23 |
| 3.2 MATERIALES..... | 28 |
| 3.2.1 <i>Asfalto</i> | 28 |
| 3.2.2 <i>Aditivos para el asfalto</i> | 37 |
| 3.2.3 <i>Agregado pétreo (RAP)</i> | 37 |
| 3.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS | 41 |
| 3.4 COMPORTAMIENTO MECÁNICO | 44 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 46 |
| 4.1 CLASIFICACIÓN DE MATERIALES | 46 |
| 4.1.1 <i>Asfaltos</i> | 46 |
| 4.1.2 <i>Asfalto espumado</i> | 47 |
| 4.1.3 <i>Agregado pétreo (RAP)</i> | 53 |
| 4.2 COMPORTAMIENTO MECÁNICO | 60 |
| 4.2.1 <i>Resultados de ITS y TSR</i> | 60 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.2.2 | <i>Resultados de módulo resiliente</i> | 71 |
| 5. | CONCLUSIONES | 76 |
| 5.1 | CONCLUSIONES | 78 |
| 5.2 | LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS | 82 |
| 6. | REFERENCIAS | 83 |
| 7. | APÉNDICE | 88 |
| 7.1 | DETERMINACIÓN DE ITS Y TSR | 88 |
| 7.2 | DETERMINACIÓN DE MÓDULO RESILIENTE (MR)..... | 93 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 3-1 Requisitos de calidad para los cementos asfálticos clasificados por viscosidad dinámica a 60°C. | 29 |
| Tabla 3-2 Requisitos de calidad para los materiales asfálticos de Grado PG | 30 |
| Tabla 4-1 Características de calidad a los asfaltos utilizados | 46 |
| Tabla 4-2 Características de espumación para el asfalto PEMEX Ekbé PG 64-22 a 180°C | 47 |
| Tabla 4-3 Características de espumación para el asfalto AC-20 con 0.55 MPa de presión | 48 |
| Tabla 4-4 Características de espumación para el asfalto AC-20 con agua a 23°C50 | |
| Tabla 4-5 Características de espumación para el asfalto AC-20 con agua a 5°C. 50 | |
| Tabla 4-6 Agua añadida para diferentes gradientes de temperatura | 52 |
| Tabla 4-7 Análisis granulométrico para el RAP de la carretera S.L.P. – Villa de Arriaga..... | 55 |
| Tabla 4-8 Análisis granulométrico para el RAP de Avenida de la Luz..... | 56 |
| Tabla 4-9 Variantes de las pruebas de compactación AASHTO | 57 |
| Tabla 4-10 Prueba de compactación RAP carretera S.L.P. – Villa de Arriaga | 58 |
| Tabla 4-11 Prueba de compactación RAP Avenida de la Luz | 59 |
| Tabla 4-12 Proporcionamiento de <i>filler</i> y aditivo promotor de adherencia en las mezclas | 60 |
| Tabla 4-13 Comportamiento mecánico bajo diferentes condiciones de temperatura | 61 |
| Tabla 4-14 Valores de módulo resiliente para las diferentes mezclas..... | 72 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1-1 Emisiones de CO2 en México | 5 |
| Figura 3-1 Desarrollo del experimento | 26 |
| Figura 3-2 Equipo de penetración en asfaltos | 31 |
| Figura 3-3 Preparación de la muestra para Punto de inflamación Cleveland..... | 31 |
| Figura 3-4 Obtención del punto de inflamación | 32 |
| Figura 3-5 Elaboración de briquetas para la prueba de ductilidad | 32 |
| Figura 3-6 Laboratorio móvil WLB 10-S utilizado | 36 |
| Figura 3-7 Fuente de RAP Carretera S.L.P. - Villa de Arriaga. | 39 |
| Figura 3-8 Fuente de RAP Av. De la Luz, Querétaro, Qro. | 39 |
| Figura 3-9 Ubicación de la fuente de RAP Villa de Arriaga | 39 |
| Figura 3-10 Ubicación de la fuente de RAP Avenida de la Luz..... | 39 |
| Figura 3-11 Granulometría recomendada por Asphalt Academy (2009). | 40 |
| Figura 3-12 Granulometría recomendada por Wirtgen Group (2004)..... | 40 |
| Figura 3-13 Adición de cal a la mezcla..... | 42 |
| Figura 3-14 Adición de cemento a la muestra. | 42 |
| Figura 3-15 Mezcla terminada de RAP, <i>Filler</i> industrial y asfalto espumado con 75% de la humedad óptima..... | 42 |
| Figura 4-1 Expansión y vida media para diferentes presiones de aire | 48 |
| Figura 4-2 Expansión y vida media a diferentes temperaturas..... | 49 |
| Figura 4-3 Características de espumación para el asfalto AC-20 a 170°C | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 4-4 Características de espumación para el asfalto AC-20 a 180°C | 51 |
| Figura 4-5 Cuarteo de los materiales | 53 |
| Figura 4-6 Reducción de muestras | 53 |
| Figura 4-7 Conjunto de mallas para granulometría | 54 |
| Figura 4-8 Granulometría a la fracción gruesa del agregado | 54 |
| Figura 4-9 Curva granulométrica para el RAP de la carretera S.L.P. – Villa de Arriaga..... | 55 |
| Figura 4-10 Curva granulométrica para el RAP de Avenida de la Luz | 56 |
| Figura 4-11 Curva de compactación RAP carretera S.L.P. – Villa de Arriaga..... | 58 |
| Figura 4-12 Curva de compactación RAP Avenida de la Luz..... | 59 |
| Figura 4-13 Equipo para prueba ITS | 62 |
| Figura 4-14 Proceso de saturación de los especímenes..... | 62 |
| Figura 4-15 Equipo para módulo resiliente..... | 62 |
| Figura 4-16 Valores de ITS y TSR | 63 |
| Figura 4-17 Influencia del filler en las mezclas asfálticas..... | 64 |
| Figura 4-18 Influencia de la cal hidratada usada como filler | 65 |
| Figura 4-19 Influencia del cemento Portland usado como filler..... | 66 |
| Figura 4-20 Mezclas fabricadas con el RAP Villa de Arriaga | 67 |
| Figura 4-21 Mezclas fabricadas con el RAP Avenida de la Luz | 67 |
| Figura 4-22 Influencia de los aditivos para asfalto en el comportamiento mecánico de las mezclas..... | 69 |

| | |
|---|----|
| Figura 4-23 Valores de Módulo resiliente obtenidos para cada mezcla | 73 |
| Figura 4-24 Influencia del filler en las mezclas..... | 73 |
| Figura 4-25 Influencia de la cal hidratada usada como filler | 74 |
| Figura 4-26 Influencia del cemento Portland usado como filler..... | 75 |

1. INTRODUCCIÓN

El progreso debe ligarse al concepto de sostenibilidad, para ello es necesario tener en cuenta el cuidado al medio ambiente y procurar técnicas de construcción que sean menos perjudiciales para el mismo.

De acuerdo con Nicuta y Frunza, (2013), el proceso de construcción se denomina sostenible cuando se seleccionan los materiales y procesos constructivos con el menor consumo de energía y agua, la menor cantidad de emisiones de CO₂ durante el ciclo de vida del producto, además de presentar los menores costos económicos y afectaciones al tráfico.

El asfalto espumado es una técnica que a pesar de haber sido descubierta hace casi 60 años, apenas en las últimas dos décadas ha cobrado popularidad su utilización, debido a que es posible estabilizar una gran variedad de materiales con dicha técnica. Se ha aplicado principalmente en la reutilización de estructuras de pavimento que al ser recuperadas se convertían en material de desperdicio.

El presente trabajo versa sobre la aplicación de la técnica de asfalto espumado y los avances que en dicha técnica se han realizado, con la intención de encontrar los factores que mayor influencia tienen sobre el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas elaboradas bajo este procedimiento y, a partir de estos resultados, proponer mejoras en el proceso de fabricación.

En este primer capítulo se mencionan los objetivos que se pretenden alcanzar con este trabajo de investigación, así como un análisis sobre la problemática que motivó el presente trabajo de investigación y las hipótesis planteadas.

Con la intención de ir de lo general a lo particular, se presenta en el capítulo 2 una descripción de los conceptos necesarios para comprender la técnica del asfalto espumado, sus aplicaciones, así como un análisis de los

trabajos de investigación previamente realizados en otras partes del mundo por distintos autores.

En el capítulo 3 se describe la metodología seguida para la realización de los experimentos, haciendo especial énfasis en tres aspectos: un análisis individual de los materiales, las variaciones realizadas y las diferentes mezclas producto de estas combinaciones para por último evaluar su comportamiento mecánico a partir de pruebas de laboratorio.

En el capítulo 4 se analizan los resultados obtenidos tanto para los materiales como para las mezclas asfálticas.

Finalmente en el capítulo 0 se presentan las conclusiones y recomendaciones producto de la investigación realizada.

1.1 Planteamiento del problema

A pesar de seguir las recomendaciones de la literatura disponible, la experiencia ha demostrado que en ocasiones la calidad de la mezcla con asfalto espumado no es la que se desea, puesto que el resultado obtenido es una mezcla que no tiene el comportamiento esperado, el cual se ve reflejado en deterioros prematuros.

Los problemas que se han presentado se atribuyen frecuentemente a una probable falta de cohesión a temprana edad entre las partículas del agregado provocado tal vez, por la variación de la temperatura del ambiente o bien, por pequeñas variaciones en la dosificación del agua necesaria para lograr la espuma en el asfalto¹.

No obstante que la metodología se encuentra bien definida, aún es posible mejorarla, es por ello que se estudiará el comportamiento mecánico de una mezcla realizada con esta técnica, buscando mejorar sus características de resistencia, con la intención de aumentar la durabilidad de la capa fabricada con dicha mezcla, lo cual se traduce en un uso de menos frecuente de materias primas y por lo tanto, en un ahorro económico. Este proceso se llevará a cabo utilizando material pétreo reciclado (RAP).

¹ Experiencia personal del director de tesis Dr. Mauricio Centeno Ortíz. Cuernavaca, Morelos, 2014

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Diseñar una mezcla asfáltica estabilizada con la técnica de asfalto espumado a partir de material pétreo recuperado, que cumpla con las condiciones de resistencia, deformabilidad y durabilidad exigidas en la normativa mexicana para el diseño de bases tratadas (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2004), siguiendo las recomendaciones para el diseño de la mezcla mencionadas en el documento de Asphalt Academy, (2009).

1.2.2 Objetivos particulares

- Determinar la cantidad óptima de asfalto y agua para la mezcla analizada con base en las recomendaciones de diseño propuestas por Asphalt Academy, (2009).
- Evaluar la influencia de la temperatura tanto de los agregados como del agua para la producción de espuma en el asfalto y su distribución en la mezcla, determinada por su resistencia a tracción indirecta.
- Evaluar el comportamiento mecánico de la mezcla al agregarle aditivos promotores de adherencia.

1.3 Justificación

De acuerdo a los datos disponibles en la página oficial del Banco mundial, (2015), de 2005 a 2011, las emisiones de CO2 a la atmosfera en todo el mundo, se incrementaron en más de 17%, lo cual representa un grave problema desde el punto de vista ambiental, puesto que hace evidente que es necesario reducir el uso de combustibles fósiles, y una opción es hacer uso de técnicas constructivas que requieran un menor consumo de los mismos.

La Figura 1-1 muestra el incremento en la cantidad de emisiones que se han registrado en nuestro país en el periodo de 1990 a 2010 causadas por la industria de la construcción y transporte.

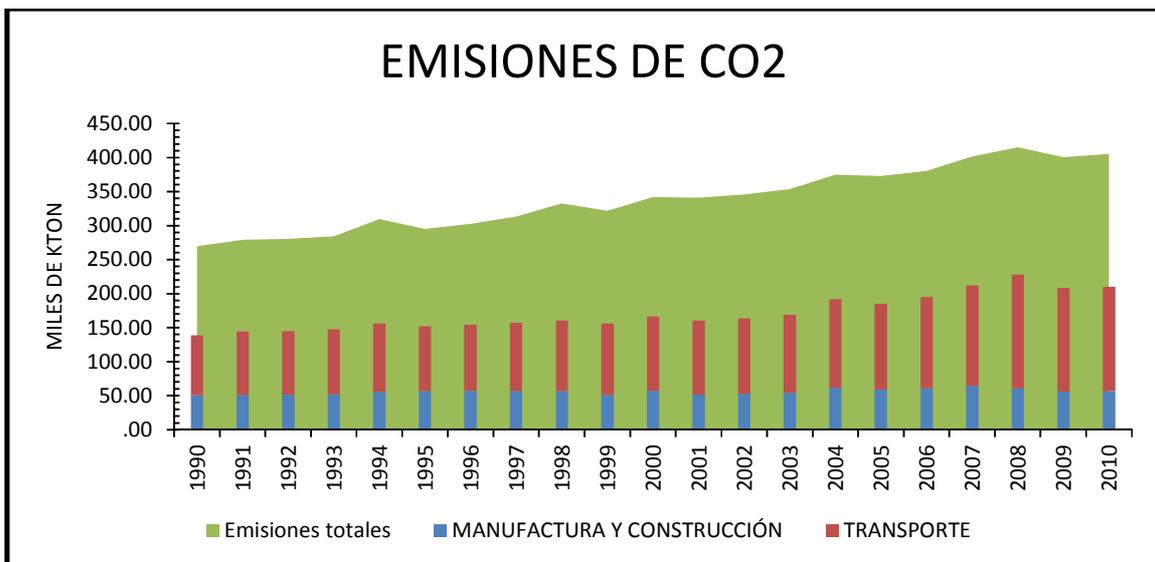


Figura 1-1 Emisiones de CO2 en México

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Banco Mundial, (2015)

En esta imagen se observa que estas dos industrias producen casi la mitad de las emisiones totales. Si se utilizan técnicas de construcción más amigables con el medio ambiente, la cantidad de emisiones producidas se puede llegar a reducir significativamente.

Es por este motivo que en los últimos años, se ha visto como una obligación de la industria el implementar procesos de fabricación que sean más

amigables con el medio ambiente y la industria de la construcción, en especial en la rama de los pavimentos no ha sido la excepción. De acuerdo con De Visscher et al., (2008), para lograr este tipo de prácticas en el asfalto es necesario reducir las temperaturas de uso y lograr que sean métodos de fácil implementación.

Los beneficios de las nuevas metodologías para el diseño y la construcción de mezclas asfálticas como el asfalto espumado son muchos y muy variados; ayudan a la protección del medio ambiente al mismo tiempo que representan un ahorro desde el punto de vista económico.

Estos beneficios pueden verse incrementados si se reutiliza el material pétreo, ya sea de la misma vialidad que se piensa rehabilitar o bien, material proveniente de otros sitios; puesto que el proceso de explotación de los bancos de material es un proceso muy costoso y de alto impacto ambiental, además de que la correcta disposición de los materiales que se plantea reciclar implica también un gasto económico.

1.4 Hipótesis

La incorporación de aditivos promotores de adherencia en el asfalto espumado como Kao-amin y Gripper, permite que, aún a bajas temperaturas, se pueda realizar la mezcla de asfalto espumado y RAP.

Además de esto, los aditivos para el asfalto permiten mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla, las cuales son determinadas por medio de pruebas de Resistencia a Tracción Indirecta (ITS), Índice de Resistencia a la Tracción Retenida (TSR) y Módulo de Resiliencia del Material (MR).

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Clasificación de mezclas asfálticas

De acuerdo a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2002 a), “una mezcla asfáltica es el producto obtenido de la incorporación y distribución uniforme de un material asfáltico en uno pétreo”.

Dependiendo del criterio que se utilice para diferenciar una mezcla asfáltica de otra, se pueden establecer distintas clasificaciones, tal como lo expresan Garnica et al., (2005) citando a Cepeda, (2002) en su documento. Estas clasificaciones toman en cuenta el tipo de material pétreo usado, la cantidad de vacíos de la mezcla, o bien, la temperatura de mezclado. Bajo este último criterio las mezclas se dividen en “mezclas en frío” y “mezclas en caliente”.

2.1.1 Mezclas asfálticas en caliente

Las mezclas asfálticas producidas en caliente, HMA por sus siglas en inglés (*Hot Mix Asphalt*), constituyen el tipo más generalizado. Se definen de acuerdo con Padilla, (2004) y Garnica *et al.*, (2005) como “la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados y eventualmente aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante”.

El proceso de fabricación para las HMA implica calentar el ligante y los agregados. Padilla, (2004) menciona que las temperaturas regularmente usadas en este tipo de mezclas, se encuentran en el rango de los 150 a 175 grados centígrados.

Esta necesidad de calentar a tan altas temperaturas los agregados es uno de los principales inconvenientes desde el punto de vista ecológico para las mezclas asfálticas calientes, pues el consumo de energía para lograrlo es muy alto.

De acuerdo con Kristjansdottir, (2006) y De Visscher *et al.*, (2008), las altas temperaturas para las mezclas en caliente son requeridas para lograr que el asfalto reduzca su viscosidad, de esta manera, lograr una completa cobertura del agregado y mejorar la trabajabilidad durante la colocación y compactación, logrando con esto el mejor desempeño posible de los materiales.

De acuerdo con todos los autores consultados, el consumo tan elevado de energía en la producción de las mezclas asfálticas calientes se encuentra justificado por ser el calor el medio para lograr que el asfalto se logre mezclar con los agregados y que la mezcla cumpla su función de diseño.

Garnica *et al.*, (2005) mencionan en su documento que las HMA son un tipo de mezcla compuesta en su mayoría por agregado pétreo (93 a 97 % regularmente) y únicamente de 3 a 7 % de asfalto, con respecto a la masa total de la mezcla.

Dicho de otra manera, si se logra reducir o eliminar la necesidad de calentar los agregados, el consumo de energía para producir una mezcla asfáltica se verá disminuido considerablemente.

El uso más común de las mezclas asfálticas fabricadas en caliente, es en la fabricación de carpetas asfálticas y/o capas de rodadura, las cuales, de acuerdo con la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2014) “Son aquellas que se construyen utilizando calor como vehículo de incorporación”.

2.1.2 Mezclas asfálticas en frío

Son conocidas en el campo de la investigación por sus siglas en inglés CMA (*Cold Mix Asphalt*) y según Padilla, (2004), este concepto se refiere a las mezclas fabricadas con emulsiones asfálticas.

En el documento redactado por Rodríguez *et al.*, (2008), se define a una emulsión como como “una dispersión fina más o menos estabilizada de un líquido en otro, los cuales son no miscibles entre sí y están unidos por un emulsificante, emulsionante o emulgente.”

Partiendo de esta definición, podemos definir una emulsión asfáltica como la mezcla de un cemento asfáltico en un medio acuoso; este concepto implica que, de un volumen determinado de emulsión asfáltica, un porcentaje considerable de la emulsión está compuesto por agua.

El inconveniente de la presencia de una cantidad importante de agua en la emulsión, antes de fabricar la mezcla, radica en el hecho de que cuando se transporta la emulsión desde el lugar de su fabricación hasta el lugar en el cual se aplicará, el costo por acarreo de la misma se refleja directamente en el costo del proyecto.

De esta manera, al elegir las mezclas en frío, si bien se genera un ahorro de energía al no ser necesario calentar los agregados durante el proceso de fabricación, se debe realizar un estudio económico que considere el acarreo de los materiales, para de esta manera tomar la decisión más adecuada.

2.2 Mezclas asfálticas tibias

Partiendo de la clasificación para las mezclas asfálticas mencionada anteriormente y con base en la temperatura a la que son fabricadas y utilizadas, es posible diferenciar un tercer grupo, las denominadas mezclas asfálticas tibias, WMA por sus siglas en inglés para *Warm Mix Asphalt*.

Este tipo de mezclas asfálticas son producidas a temperaturas más bajas que las requeridas para las mezclas asfálticas calientes, y según Yu *et al.*, (2013), “han obtenido gran popularidad alrededor del mundo debido a su ahorro de energía y otras características amigables con el medio ambiente”.

De Visscher *et al.*, (2008), encontraron que una reducción de la temperatura de las mezclas asfálticas de hasta 30°C con respecto a una HMA no representa un factor determinante en la trabajabilidad de la mezcla.

De acuerdo a la investigación realizada por Capitão *et al.*, (2012), “Las mezclas asfálticas tibias han sido utilizadas alrededor del mundo, obteniendo como resultado el ahorro de energía y la reducción de emisiones durante el proceso de producción, sin disminuir el rendimiento en servicio”.

Otro testimonio acerca del uso de mezclas asfálticas tibias es el que plasma Kristjansdottir, (2006) en su documento, donde expresa que “en Europa han sido investigadas principalmente tres tecnologías para producir mezclas asfálticas tibias: Mezclas asfálticas tibias espumadas, asfalto con Zeolita sintética Aspha-min® y adición de cera Sasobit®”.

En el documento de Rubio *et al.*, (2012) citado por Guo *et al.*, (2014), los autores afirman que “Actualmente las mezclas asfálticas tibias pueden ser producidas por la adición de aditivos orgánicos y/o aditivos químicos o a través de tecnologías de espumado (Aditivos acuosos o procesos basados solamente en agua) con el objetivo de incrementar la trabajabilidad durante el mezclado a reducidas temperaturas.”

Derivado de la gran cantidad de metodologías desarrolladas para la fabricación de mezclas asfálticas tibias, la *National Asphalt Pavement Association*, (2012), clasifica las tecnologías para la fabricación de mezclas asfálticas tibias en tres grandes grupos: por medio de aditivos químicos o surfactantes, procesos de espumación y aditivos no espumantes.

Los beneficios de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes se encuentran orientados hacia el tema ecológico principalmente, derivados del ahorro en el consumo de energía para su producción; mientras que al compararlas con las mezclas frías, los beneficios se inclinan hacia el plano de lo económico, en especial, al acarreo de los materiales, que como se explicó anteriormente, implica un sobrecosto debido al acarreo del agua contenida en la emulsión asfáltica, necesaria para su producción.

De esta manera, teniendo en cuenta las definiciones mencionadas a lo largo de este documento, podemos clasificar a una base tratada o estabilizada con asfalto espumado, en primer lugar, como una mezcla asfáltica.

Ahora bien, como los agregados no se calientan en el proceso de fabricación, no corresponde a una HMA, y como el asfalto que se incorpora no es en forma de emulsión, tampoco se clasifica como CMA, por lo tanto, estamos en presencia de una mezcla asfáltica tibia, debido a las temperaturas que se manejan en el proceso de fabricación.

Es importante recalcar que los beneficios de la utilización de mezclas asfálticas tibias, se reflejan en primera instancia en el ámbito ecológico, sin embargo, el factor económico también puede llegar a tener un gran impacto al momento de definir la viabilidad de los proyectos, permitiendo en algunas ocasiones obtener grandes ahorros, dependiendo de la técnica seleccionada.

Hoy en día, no podemos negar que la acción u omisión de prácticas encaminadas al cuidado del medio ambiente puede otorgar a las empresas una mayor credibilidad social si estas mantienen procesos estandarizados y

certificados por distintas organizaciones, para controlar la magnitud de los impactos ambientales que en sus procesos constructivos o de operación pudieran generar; en nuestro país, este es el caso de las empresas socialmente responsables (ESR).

“La responsabilidad social empresarial, es el compromiso consciente y congruente de cumplir integralmente con la finalidad de la empresa, considerando las expectativas económicas, sociales y ambientales de todos sus participantes, demostrando respeto por la gente, los valores éticos, la comunidad y el medio ambiente, contribuyendo así a la construcción del bien común.” (Cajiga, 2009).

Estas nuevas filosofías son las que han impulsado el desarrollo de tecnologías más amigables con el medio ambiente, sin dejar de lado la calidad en los procesos de construcción ni el desarrollo económico.

En un estudio publicado por el Instituto Mexicano del Transporte citando el documento redactado por López et al., (2011), se demuestra que en el proceso de producción se reduce hasta 60% la energía consumida para una mezcla asfáltica tibia si se compara con la de una mezcla asfáltica caliente, mientras que los trabajos en campo y de transporte son similares en ambos casos. En cuanto a la producción total de gases de efecto invernadero, al comparar los dos procesos productivos, se reducen hasta 55% en las mezclas asfálticas tibias comparadas con las producidas en caliente.

Por su parte, Orellana, (2002), reporta “ahorros de energía de más del 80% sobre los métodos tradicionales, en tramos experimentales de estabilización con asfalto espumado”. Al comparar el asfalto espumado con el uso emulsiones asfálticas, reportan en el mismo documento que se observan beneficios económicos puesto que “El uso del asfalto espumado reduce los costos de transporte, dado que para un mismo volumen de asfalto residual, el transporte del asfalto en forma de emulsión, requiere transportar adicionalmente un volumen adicional de 35 a 40% de agua”.

De acuerdo con Nicuta y Frunza, (2013), la manera más eficaz para determinar la alternativa de construcción con el mejor desempeño desde el punto de vista de la sostenibilidad, es realizando para cada una de ellas un análisis de ciclo de vida.

Es importante tener en cuenta al momento de realizar un diseño de pavimentos, que la metodología que se utilice, además de ser amigable con el ambiente, sea también económica; y que al mismo tiempo garantice un comportamiento adecuado durante el periodo de vida para el cual se requiere.

2.3 Asfalto espumado

Un mismo cemento asfáltico puede ser utilizado de diferentes maneras y en distintas aplicaciones, tal como lo menciona la normativa emitida por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2000a), la cual expresa que “se emplean en la elaboración de carpetas, mezclas asfálticas, morteros, riegos y estabilizaciones de materiales, ya sea para aglutinar los materiales pétreos utilizados, para ligar o unir diferentes capas del pavimento; o bien para estabilizar bases o subbases”.

Ahora bien, el tipo de cemento asfáltico que se utiliza en la mezcla, define en gran medida las características y comportamiento de la mezcla, a este respecto, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2008), clasifica a los materiales asfálticos de grado PG (*Performance grade*) como aquellos asfaltos “cuyo comportamiento en los pavimentos está definido por las temperaturas máxima y mínima que se esperan en el lugar de su aplicación, dentro de las cuales se asegura un desempeño adecuado para resistir las deformaciones o agrietamientos por temperaturas bajas o por fatiga”.

El grado de desempeño o Grado PG es el rango de temperaturas, máxima a mínima, entre las que un cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente. El Grado PG permite seleccionar el cemento asfáltico más adecuado para una determinada obra, en función del clima dominante y de la magnitud del tránsito a que estará sujeta durante su vida útil.

Una de las técnicas para la fabricación de mezclas asfálticas tibias es el asfalto espumado, y a diferencia de otras técnicas basadas también en el aprovechamiento de la fabricación de espuma en el asfalto, en este caso no hay necesidad de añadir ningún producto químico para lograr tal efecto.

El asfalto espumado es producido a partir de una reacción física en la cual se inyecta, con ayuda de aire presurizado, una pequeña cantidad de agua al asfalto caliente dentro de una cámara de expansión, lo que resulta en la

producción de espuma en el asfalto. Badilla *et al.*, (2011), mencionan que: “El efecto de espuma se produce en el momento que las pequeñas gotas de agua fría entran en contacto con el asfalto caliente, ocasionado por la transferencia de energía entre el asfalto y el agua. Esto produce un aumento en la temperatura del agua a más de 100°C, la cual se evapora instantáneamente creando burbujas de vapor cubiertas por una película delgada de asfalto”.

De acuerdo al documento elaborado por Wirtgen, (2004), “el asfalto espumado se puede caracterizar por dos de sus propiedades principales:

La razón de expansión, que es una medida de la viscosidad de la espuma y determina qué tan bien se dispersará el asfalto espumado en la mezcla. Se calcula como la razón entre el máximo volumen de la espuma respecto al volumen del asfalto en estado original.

Y la vida media, que es una medida de estabilidad de la espuma y provee una indicación de la tasa de colapso de la espuma. Se calcula como el tiempo, en segundos, que transcurre para que la espuma colapse a la mitad de su volumen máximo”.

El uso de asfaltos espumados en estructuras de pavimento ha ido adquiriendo cada vez mayor aceptación debido a las distintas ventajas que presenta respecto a los métodos convencionales de fabricación de mezclas asfálticas en caliente.

En un estudio realizado por Middleton y Forfyt, (2008), se sugiere que el uso de mezclas asfálticas tibias puede resultar en una reducción de hasta 10% en las emisiones de CO, CO₂ y NO_x así como una reducción de 24% en el consumo de energía, mientras que la aparición de roderas y la susceptibilidad a la humedad mantienen el mismo rendimiento que para una mezcla asfáltica caliente.

Otra de las ventajas económicas y a la vez ecológicas es la posibilidad de reutilizar el material pétreo que conforma las capas superiores de la estructura de un pavimento asfáltico típico (capa de rodadura, carpeta asfáltica y base); proceso

que de acuerdo con la definición hecha por Thenoux y Jamet, (2002a), consiste en la “recuperación del material de un pavimento asfáltico existente, mezclarlo con asfalto espumado, *filler* industrial (cemento o cal) y agregados nuevos (si es necesario) para formar una base estabilizada que puede ser colocada en el mismo lugar o en otro distinto”.

Como se mencionó anteriormente, el proceso de espumado del asfalto es dependiente del cambio de estado del agua de líquido a vapor. De acuerdo con Wirtgen, (2012), “cuando las partículas de agua entran en contacto con el asfalto caliente, la energía calórica del asfalto se transfiere al agua. Tan pronto como el agua alcanza su punto de ebullición ésta cambia de estado, y al hacerlo, crea una burbuja con una delgada película de asfalto llena con vapor de agua”.

Fu *et al.*, (2011) demostró que un pequeño cambio en los parámetros de espumación (temperatura del asfalto y contenido de agua) puede alterar significativamente la razón de expansión y la vida media y que los ligantes asfálticos con mejores propiedades de formación de espuma (más alta razón de expansión y vida media más prolongada) tienden a producir mezclas con valores de resistencia más altos.

En el documento elaborado por Wirtgen, (2004), se afirma que al incrementar la cantidad de agua añadida en el proceso de espumación, aumenta el tamaño de las burbujas creadas, causando que aumente la razón de expansión. Sin embargo, “al aumentar el tamaño individual de las burbujas reduce el espesor de la película del asfalto que las rodea, haciéndolas menos estables lo que resulta en una reducción de la vida media”.

Sin embargo, según Ali *et al.*, (2013), “Aumentar el contenido de agua para formación de espuma (hasta 2,6% del peso del cemento asfáltico) durante la producción de mezcla asfáltica tibia espumada no parece tener un efecto negativo en el rendimiento o la susceptibilidad a la humedad”.

Durante su investigación, Jenkins, (1994), concluyó que a mejores propiedades de espumado, se obtiene una mejor calidad en el material estabilizado.

De esta manera queda demostrado que las variaciones en las condiciones bajo las cuales se trabaja el asfalto espumado se ven reflejadas directamente en la calidad de la espuma producida, en la dispersión de la misma en la mezcla asfáltica y por lo tanto, en el comportamiento de la misma.

De acuerdo con Wirtgen, (2012), una serie de ensayos con el Simulador de Vehículos Pesados (HVS, *Heavy Vehicle Simulator*) fueron realizados en Sudáfrica en un pavimento reciclado con una combinación de cemento y asfalto espumado. Los resultados sentaron las bases para redactar un documento guía que fue posteriormente publicado por Asphalt Academy, (2009), documento en el cual se afirma que “el comportamiento de los materiales estabilizados con asfaltos es similar al de los materiales granulares sin consolidar, pero con una resistencia cohesiva significativamente mejorada y una reducida susceptibilidad a la humedad”.

A diferencia de las HMA y las CMA en los materiales estabilizados con asfalto espumado, las partículas de agregado más grandes no están cubiertas con asfalto. El asfalto se dispersa solamente entre las partículas más finas, “resultando un mortero rico en asfalto entre las partículas gruesas del agregado; y el *filler* activo, actúa como catalizador en la dispersión de las partículas de asfalto” (Asphalt Academy, 2009).

De acuerdo con Edwards *et al.*, (2010), cuando se fabrica un mortero asfáltico (*mastic*), por lo general se requieren temperaturas más elevadas que las necesarias para fabricar una HMA, pero la mezcla de agregado grueso y *mastic* provee un pavimento denso a prueba de agua y con muy alta resistencia al desgaste.

Como resultado de su investigación y con base en una exhaustiva revisión de la literatura, He y Wong, (2008), encontraron que el método que arroja los resultados más congruentes al momento de determinar la resistencia y las deformaciones permanentes para el caso de mezclas tibias fabricadas con asfalto espumado, es realizando la prueba de resistencia a la tracción indirecta (*Indirect Tensile Strength Test*, ITS).

Además, Asphalt Academy, (2009) y Wirtgen, (2012), coinciden en que, para evaluar la resistencia de los materiales estabilizados con asfalto espumado, se utilice la prueba de resistencia a la tracción indirecta (ITS). Mientras que la susceptibilidad a la humedad del material, es generalmente expresada en términos de la razón de resistencia a la tracción retenida (*Tensile Strength Retained*, TSR), ensayando probetas de 100 mm.

De acuerdo con Ghanizadeh y Fakhri (2013) y con Venudharan y Biligiri (2015), el módulo de resiliencia de un material es un dato extremadamente importante para el diseño de los pavimentos de alta resistencia, la respuesta de los materiales a este tipo de cargas cíclicas ayuda a calcular el espesor óptimo de las capas del pavimento.

2.4 Pavimento asfáltico recuperado (RAP)

La reutilización de los materiales pétreos de un pavimento en la creación de nuevas estructuras se encuentra apenas saliendo de la etapa de investigación, puesto que desde la década de 1970, según el documento de Nicuță y Andrei, (2012), se han investigado diferentes opciones para la reutilización de los materiales por medio de distintos métodos y técnicas.

Una de las técnicas para mitigar el daño a los ecosistemas es la reutilización de materiales pétreos. El término RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) es dado a “cualquier agregado pétreo que es recuperado de un pavimento asfáltico existente. El tipo de asfalto que fue usado originalmente, junto con las variaciones en la mezcla asfáltica, serán por lo tanto reflejados en el material” (Wirtgen, 2012).

El reciclado en frío de pavimentos asfálticos consiste en la recuperación del material de un pavimento asfáltico existente, el cual es mezclado con asfalto espumado, aditivos o *filler* industrial (cemento o cal) y agregados nuevos (si es necesario) para formar una base asfáltica que será colocada en el mismo lugar o en otro distinto.

Como resultado de sus investigaciones, Nicuta y Frunza, (2013), encontraron un ahorro de casi 38% en la cantidad de emisiones de CO₂ al comparar los resultados de un análisis de ciclo de vida para una mezcla asfáltica realizada con métodos convencionales y una realizada con RAP, demostrando así los beneficios tan importantes de la reutilización de los materiales para la construcción de pavimentos.

De acuerdo con Thenoux y Jamet, (2002b), “La recuperación puede ejecutarse mediante un equipo fresador capaz de disgregar el material o mediante métodos convencionales donde el proceso de disgregación ocurre con posterioridad a la recuperación”.

La historia del reciclaje de pavimento asfáltico se remonta a principios de 1900. Sin embargo, no fue hasta el embargo de petróleo de la década de 1970 que la práctica moderna de pavimento reciclado verdaderamente se generalizó. En ese momento, había poca experiencia en cuanto a tecnología y el diseño de las mezclas y diseño de pavimentos. La construcción, y el desempeño de los pavimentos reciclados se consideraban experimentales o desconocidos, según lo menciona la *National Asphalt Pavement Association*, (2007).

Como se mencionó anteriormente, una de las ventajas de trabajar con asfalto espumado es la posibilidad de reutilizar el material que conforma las capas superiores de una estructura de pavimento para conformar una nueva estructura con características mejoradas.

El reciclaje de materiales de pavimento tiene varias ventajas desde los puntos de vista ambiental, económico y de ingeniería. Conservación de los recursos petroleros y en bancos de agregados, así como el ahorro de espacio en los vertederos son las principales ventajas ambientales. El número de vehículos utilizados en el transporte de materiales también se reduce, y por lo tanto, el consumo de energía resulta disminuido, lo que se refleja en una mejor calidad del aire, así como en la reducción de energía en la obtención de agregados y asfalto (National Asphalt Pavement Association, 2007).

Valdés *et al.*, (2011), encontró como resultados de su investigación que es posible utilizar altos porcentajes de RAP (hasta 60%) en la fabricación de mezclas asfálticas calientes y que el comportamiento mecánico de las mismas podría ser similar al de una mezcla convencional de alto módulo.

Por su parte, Zhao *et al.*, (2013), demostró que las mezclas asfálticas tibias con altos porcentajes de RAP muestran por lo general un desempeño similar o mejor en resistencia a la fatiga y agrietamiento que las mezclas asfálticas calientes con bajo contenido de RAP “lo cual hace evidente que las deformaciones por fatiga y agrietamiento pueden no ser un inconveniente grande cuando se aplica una técnica de mezcla asfáltica tibia con altos porcentajes de RAP”.

En general, la mayoría de las restricciones para el uso del RAP, según el documento de Nicuță y Andrei, (2012), están más relacionadas con la durabilidad de dichos materiales que con un comportamiento inadecuado en la estructura.

Estos y muchos más testimonios acerca del uso de materiales pétreos reciclados con buenos resultados, son los que dan certeza a la investigación sobre nuevas metodologías para integrar este tipo de materiales en las prácticas cotidianas para la construcción de carreteras.

3. METODOLOGÍA

3.1 Mediciones y análisis

En México, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) es el organismo encargado de regular todos los aspectos relacionados con la construcción, operación y mantenimiento de la red carretera federal, y para ello emite y actualiza la normativa con la intención de orientar la selección y aplicación de los criterios, métodos y procedimientos más convenientes para la realización de estudios y proyectos, ejecución, supervisión, aseguramiento de la calidad, operación y mitigación del impacto ambiental de la infraestructura durante su construcción, conservación, reconstrucción y modernización, entre otros, como lo menciona la propia Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (1999).

Existen dentro de estas normas enfocadas a carreteras, especificaciones tanto de calidad como de procesos constructivos, para muchos tipos de materiales usados en la construcción, sin embargo, en ninguno de los apartados se habla de materiales estabilizados con asfalto espumado y mucho menos sobre el uso, aplicación y restricciones de los mismos.

Es por este motivo que, con la intención que los experimentos realizados en este trabajo de investigación puedan ser replicados más adelante, se utilizarán manuales que han sido redactados por distintos organismos internacionales, producto de años de investigación y desarrollo.

Uno de estos manuales es el que elaboró la empresa Wirtgen, (2012), el cual incluye recomendaciones acerca de los materiales que son aptos para la aplicación de la técnica de asfalto espumado, el proceso constructivo a detalle y los parámetros que se deben medir para garantizar un correcto funcionamiento del material estabilizado.

Otro de los documentos es el de Asphalt Academy, (2009). En este documento se concentran dos metodologías para estabilización de materiales por

medio de asfalto. El primero de ellos es utilizando asfalto espumado, metodología que se utilizará en este trabajo de investigación, el segundo, se refiere a estabilización por medio de emulsiones.

Como se describió anteriormente, y de acuerdo con Asphalt Academy, (2009) “la estabilización de materiales con asfalto espumado mejora la resistencia al esfuerzo cortante de un material y reduce significativamente la susceptibilidad a la humedad”. Sin embargo, estos procesos de mejoramiento de los materiales implican un costo económico que puede llegar a ser elevado, es por ello que por lo general se utilizan en las capas de pavimento superiores, las cuales son las que se encuentran expuestas a condiciones de operación más adversas.

Debido a estas condiciones, en nuestro país, el uso más recomendado para los materiales estabilizados con asfalto espumado es en la formación de la capa base sobre la cual se colocará la carpeta asfáltica y/o capa de rodadura. La capa base puede formarse con materiales granulares que sin ningún tratamiento, cumpla ciertas condiciones mínimas y a la cual se le denomina base hidráulica.

Esta capa de base es la que se analizará con más detalle dentro de las diferentes capas de la estructura del pavimento en este trabajo de investigación, pues si bien, el tráfico no circulará directamente sobre ella, de ésta depende en gran medida el espesor de la(s) capa(s) superiores.

Es importante hacer énfasis en que un espesor menor de las capas superiores del pavimento implica una menor cantidad de materiales de mayor calidad, lo cual se traduce indirectamente en un ahorro económico derivado de la utilización de materiales estabilizados con asfalto espumado dentro de la estructura del pavimento.

Dentro de la normativa para la Infraestructura del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2004), para bases tratadas, se mencionan los materiales estabilizados con asfalto. En los cuales se toma en cuenta únicamente los casos en los cuales se utilizan emulsiones asfálticas,

asfaltos rebajados para fabricar las denominadas bases negras como agente estabilizador del material.

De acuerdo con las normas de construcción emitidas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2011a), se define a una base hidráulica como la “capa de materiales pétreos seleccionados que se construye generalmente sobre la subbase o la subrasante, cuyas funciones principales son proporcionar un apoyo uniforme a la carpeta asfáltica, la capa de rodadura asfáltica o la carpeta de concreto hidráulico; soportar las cargas que éstas le transmiten aminorando los esfuerzos inducidos y distribuyéndolos adecuadamente a la capa inmediata inferior, y proporcionar a la estructura del pavimento la rigidez necesaria para evitar deformaciones excesivas, drenar el agua que se pueda infiltrar e impedir el ascenso capilar del agua subterránea”.

En caso de que los “materiales granulares no cumplan con alguno de los requisitos de calidad establecidos para bases hidráulicas, o bien, por razones estructurales, se puede realizar un tratamiento para estabilizarlos mediante la incorporación de algún producto que modifique algunas de sus características físicas, generalmente haciéndolos más rígidos y resistentes mejorando su comportamiento mecánico e hidráulico”. A estos materiales, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2004) los define como materiales para bases tratadas.

Dentro de la normativa de la SCT, sólo aparecen los requisitos mínimos que se deben cumplir en los materiales para conformar bases hidráulicas y para algunos tipos de bases tratadas (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2004), pero no existe normativa específica para bases tratadas con asfalto espumado, por esta razón, se compararán los resultados de las pruebas con los parámetros que la normativa exige cumplir para las bases negras, debido a que el agente estabilizador utilizado en ambos casos es el asfalto.

Sin embargo, la misma Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2012), emitió un catálogo de secciones para diferentes secciones de pavimentos,

en el cual se recomiendan valores de Módulo resiliente para bases estabilizadas con asfalto (BEA) superior a 30,000 Kg/cm² (2943 MPa), mientras que para bases hidráulicas se recomienda que sea superior a 3,000 Kg/cm² (294.3 MPa). Es importante señalar que al inicio del documento se aclara que se debe usar esta información únicamente como una guía rápida de consulta.

Se muestra en la Figura 3-1 un diagrama de la metodología que se seguirá para la determinación de las características individuales de cada material, así como las variantes en las temperaturas, dosificaciones y demás variables a evaluar.

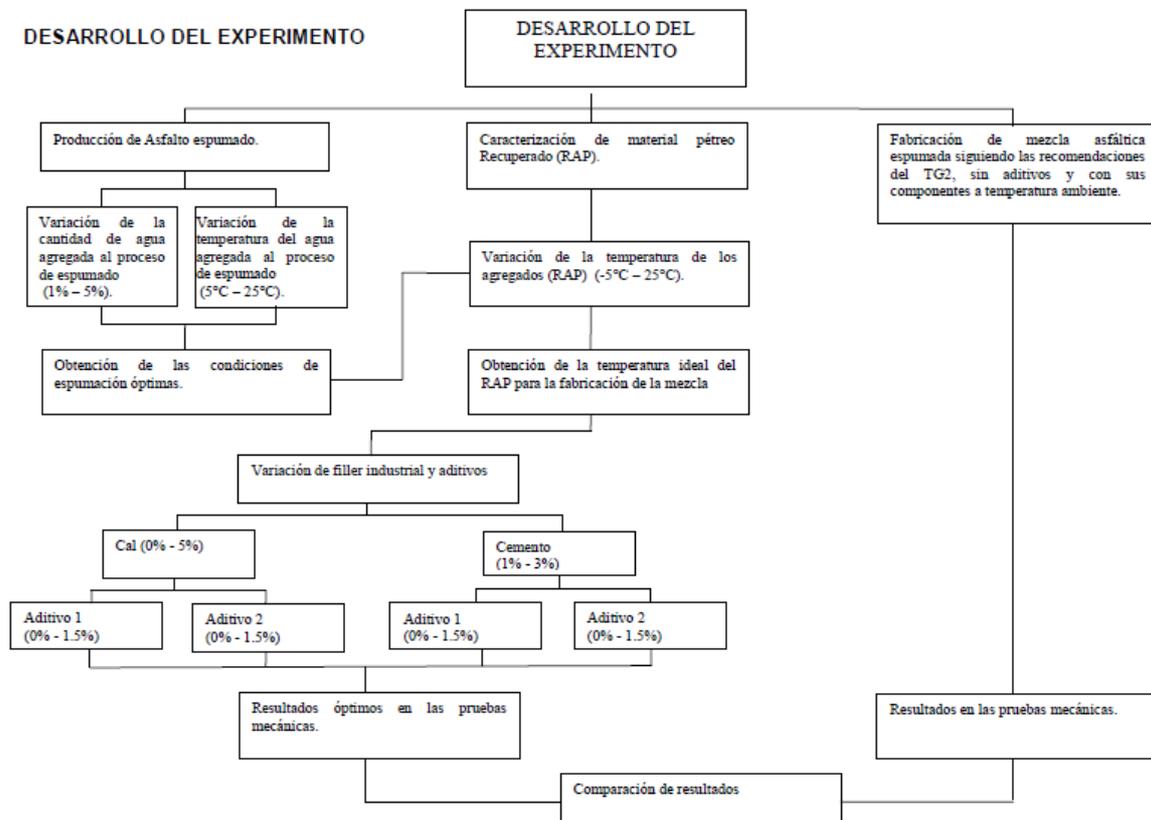


Figura 3-1 Desarrollo del experimento

Fuente: Elaboración propia

Como se explica en el diagrama, el primer paso es caracterizar los materiales, para ello se utilizaron pruebas estandarizadas que aparecen en la

normativa de la SCT. En segundo lugar, se evaluarán la cantidad y temperatura del agua para obtener las condiciones óptimas de espumación.

Después de esto, se evaluó la influencia de la temperatura del agregado en la mezcla, con la intención de observar si debido al choque térmico que se provoca entre el asfalto espumado y el agregado a bajas temperaturas, la dispersión en la mezcla se ve afectada, y si este efecto se refleja en las propiedades mecánicas de la mezcla.

El porcentaje de *filler* adicionado a cada una de las mezclas, será el máximo recomendado por Asphalt Academy, (2009), es decir, 1.00% de cemento Portland y 1.50% de cal hidratada respecto a la masa de los agregados.

Una vez obtenidas las características de espumación (cantidad y temperatura del agua) y las condiciones óptimas para la realización de la mezcla en cuanto a temperatura se refiere, se procede a evaluar la influencia de los aditivos para asfalto que se pretende utilizar (Kao-amin y Gripper), mezclados con las mismas cantidades de *filler* utilizadas en todos los casos.

Los resultados finales obtenidos para de cada una de las mezclas realizadas fueron comparados con los obtenidos en los puntos de control, los cuales determinados al realizar una mezcla asfáltica siguiendo las recomendaciones de diseño en la metodología sudafricana plasmada en el documento de Asphalt Academy, (2009).

Se muestran en la Tabla 4-12 las diferentes mezclas que se realizaron una vez que se han definido las condiciones óptimas de espumación con la intención de evaluar el comportamiento de la mezcla con diferentes cantidades y tipos de *filler* industrial.

3.2 Materiales

3.2.1 Asfalto

Se evaluó el asfalto PEMEX EKBÉ PG 64-22 obtenido de la refinería de Salamanca a partir de las muestras del producto proporcionadas por la empresa PROLASA S.A. Esta misma empresa facilitó sus instalaciones y equipos para realizar las diferentes pruebas a las muestras de asfalto obtenidas, las cuales que se presentan más adelante.

Se obtuvieron también muestras de asfalto AC-20 de penetración estándar, al cual se le realizaron también las pruebas para determinar sus características y de esta manera tratar de predecir su comportamiento una vez que son aplicadas en campo.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2000a), dentro de su normativa, especifica los valores mínimos que deben cumplirse tanto para los materiales asfálticos como para los de grado PG. Estos valores se muestran en la Tabla 3-1 para los cementos asfálticos y en la Tabla 3-2, para los materiales asfálticos de grado PG.

Tabla 3-1 Requisitos de calidad para los cementos asfálticos clasificados por viscosidad dinámica a 60°C.

| Características | Clasificación | | | |
|--|---------------|----------|----------|----------|
| | AC-5 | AC-10 | AC-20 | AC-30 |
| Del cemento asfáltico original | | | | |
| Viscosidad dinámica a 60°C; Pa*s | 50 ± 10 | 100 ± 20 | 200 ± 40 | 300 ± 60 |
| Viscosidad cinemática a 135°C; mm ² /s, mínimo (1mm ² /s=1 centistoke) | 175 | 250 | 300 | 350 |
| Viscosidad Saybolt-Furol a 135°C, s, mínimo | 80 | 110 | 120 | 150 |
| Penetración a 25°C, 100g, 5s; 10-1 mm, mínimo | 140 | 80 | 60 | 50 |
| Punto de inflamación Cleveland, °C, mínimo | 177 | 219 | 232 | 232 |
| Solubilidad; %, mínimo | 99 | 99 | 99 | 99 |
| Punto de reblandecimiento; °C | 37 – 43 | 45 - 52 | 48 - 56 | 50 – 58 |
| Del residuo de la prueba de la película delgada | | | | |
| Pérdida por calentamiento; %, máximo | 1 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Viscosidad dinámica a 60°C; Pa*s máximo | 200 | 400 | 800 | 1200 |
| Ductilidad a 25°C y 5cm/min; cm, min | 100 | 75 | 50 | 40 |
| Penetración retenida a 25°C; %, mínimo | 46 | 50 | 54 | 58 |

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2000a)

Tabla 3-2 Requisitos de calidad para los materiales asfálticos de Grado PG

| Grado de comportamiento | PG 64 | | | | PG 70 | | | | PG 76 | | | | PG 82 | | | | PG 88 | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|
| | -22 | -28 | -34 | -40 | -22 | -28 | -34 | -40 | -22 | -28 | -34 | -40 | -22 | -28 | -34 | -40 | -22 | -28 | -34 | |
| Temperatura máxima de diseño del pavimento (promedio de 7 días), °C | 64 | | | | 70 | | | | 76 | | | | 82 | | | | 88 | | | |
| Temperatura mínima de diseño del pavimento, °C | >- 22 | >- 28 | >- 34 | >- 40 | >- 22 | >- 28 | >- 34 | |
| Asfalto original | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Punto de inflamación Cleveland, °C, mínimo | | | | | | | | | | | | | | | | | 230 | | | |
| Viscosidad dinámica a 135°C; Pa*s, máximo | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | |
| Módulo reológico de corte dinámico (G*/senδ) Kpa, mínimo | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | |
| * Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C | 64 | | | | 70 | | | | 76 | | | | 82 | | | | 88 | | | |
| Después de la prueba de película delgada y aire de horno | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pérdida por calentamiento, %, máximo | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | |
| Módulo reológico de corte dinámico (G*/senδ) Kpa, mínimo | | | | | | | | | | | | | | | | | 2.2 | | | |
| * Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C | 64 | | | | 70 | | | | 76 | | | | 82 | | | | 88 | | | |
| Después de envejecimiento en vasija de presión, temperatura y aire | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Temperatura de envejecimiento PAV; °C | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| * En climas normales | 100 | | | | 100 | | | | 100 | | | | 100 | | | | 100 | | | |
| * En climas desérticos | 100 | | | | 110 | | | | 110 | | | | 110 | | | | 110 | | | |
| Índice de endurecimiento físico, máximo | | | | | | | | | | | | | | | | | Reportar | | | |
| Rigidización (G* senδ) Kpa, máxima | | | | | | | | | | | | | | | | | 5000 | | | |
| * Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C | 25 | 22 | 19 | 16 | 28 | 25 | 22 | 19 | 31 | 28 | 25 | 34 | 31 | 28 | 34 | 31 | 28 | | | |
| Rigidez de flexión S(t); Mpa, máximo (m=0.3 min) | | | | | | | | | | | | | | | | | 5000 | | | |
| * Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C | -12 | -18 | -24 | -30 | -12 | -18 | -24 | -30 | -12 | -18 | -24 | -12 | -18 | -24 | -12 | -18 | -24 | | | |

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2000a)

Se muestra a continuación una serie de imágenes con algunos de los equipos utilizados para la realización de las pruebas mencionadas anteriormente para los materiales asfálticos.



Figura 3-2 Equipo de penetración en asfaltos



Figura 3-3 Preparación de la muestra para Punto de inflamación Cleveland



Figura 3-4 Obtención del punto de inflamación



Figura 3-5 Elaboración de briquetas para la prueba de ductilidad

3.2.1.1 Viscosidad

La prueba de viscosidad dinámica permite determinar la consistencia de los materiales asfálticos mediante sus características de flujo a una temperatura de 60°C. Es aplicable a materiales asfálticos que presenten una viscosidad de 4.2 a 20, 000 Pa*s.

Consiste en determinar el tiempo que tardan en pasar 20 ml del material evaluado a través de un tubo capilar al vacío, bajo condiciones de presión y temperaturas preestablecidas, corregido por el factor de calibración del viscosímetro.

Por su parte, la prueba de viscosidad cinemática permite determinar la consistencia de los cementos asfálticos mediante sus características de flujo a una temperatura de 135°C. Es aplicable a materiales asfálticos que presenten una

viscosidad de 30 a 100, 000 mm²/s. El procedimiento de prueba es el mismo que para la de Viscosidad dinámica.

La prueba de viscosidad Saybolt – Furol permite conocer la consistencia de los materiales asfálticos mediante sus características de flujo a una temperatura de 135°C, pudiendo realizarse a otras temperaturas con el propósito de estudiar su susceptibilidad al calor y determinar las viscosidades apropiadas para su utilización.

Consiste en determinar el tiempo que tardan en pasar 60 cm³ del material por probar a través de un orificio Furol instalado en un tubo Saybolt, bajo condiciones de presión y temperaturas preestablecidas.

3.2.1.2 Penetración en cementos asfálticos

Prueba que permite determinar la consistencia de los cementos asfálticos mediante la penetración vertical de una aguja en una muestra de prueba de dichos materiales bajo condiciones establecidas de masa, tiempo y temperatura.

La penetración retenida en el residuo de cemento asfáltico se expresa como porcentaje de la penetración en el cemento asfáltico original, mediante la Ecuación 1.

$$P_r = \frac{P_f}{P_i} \times 100$$

Donde:

Pr= Penetración retenida en el residuo de cemento asfáltico (%)

Pi= Penetración en el cemento asfáltico original (1x10-1 mm)

Pf= Penetración en el residuo de cemento asfáltico (1x10-1 mm)

Ecuación 1 Porcentaje de penetración del asfalto

3.2.1.3 Punto de inflamación Cleveland

Se realizó la prueba de punto de inflamación Cleveland, de acuerdo a las recomendaciones de la norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2000b). El objetivo de esta prueba es determinar la temperatura mínima a la que el asfalto produce flamas instantáneas al estar en contacto directo con el fuego directo, así como aquella en que inicia su combustión.

La prueba consiste en colocar una muestra de asfalto en una copa de Cleveland abierta donde se incrementa paulatinamente la temperatura hasta lograr que al pasar una flama por la su superficie de la muestra se produzcan en ella flamas instantáneas.

3.2.1.4 Solubilidad de cementos asfálticos

Esta prueba permite conocer la pureza del material asfáltico en cuanto a su contenido de sustancias sólidas. Consiste en disolver en tricloroetileno o tricloroetano una muestra de cemento asfáltico filtrándolo a través de una capa de fibra de asbesto, donde se retiene la fracción insoluble.

3.2.1.5 Punto de reblandecimiento

La prueba del punto de reblandecimiento para cementos asfálticos permite estimar la consistencia de los cementos asfálticos basándose en la determinación de la temperatura a la cual una esfera de acero produce una deformación de 25 mm en una muestra de asfalto sostenida en un anillo horizontal, que se calienta gradualmente dentro de un baño de glicerina o agua.

3.2.1.6 Pérdida por calentamiento

Esta prueba permite estimar el endurecimiento que sufren los cementos asfálticos que en películas de pequeño espesor se someten a los efectos del calor y el aire. La prueba consiste en someter una muestra de cemento asfáltico a un proceso de calentamiento para producir un residuo al cual, dependiendo del tipo de cemento asfáltico que se esté probando, se le realizan diversas

3.2.1.7 Pruebas de ductilidad

Esta prueba permite determinar la capacidad para deformarse sin romperse, de los cementos asfálticos producto del residuo de película delgada. La prueba consiste en medir la máxima distancia a la cual una briqueta del material de geometría definida y bajo condiciones de temperatura y velocidad de deformación específicas puede ser estirada sin romperse.

3.2.1.8 Módulo reológico de corte dinámico

Para determinar las propiedades viscoelásticas lineales del cemento asfáltico, se realizó la prueba de módulo reológico de corte dinámico del que se obtuvo también el ángulo de fase para este material.

La prueba consiste en someter una muestra a esfuerzos de torsión utilizando un reómetro dinámico de corte. Esta prueba es aplicable a cementos asfálticos con módulos complejos en el rango de 0.1 a 1000 KPa, los que se obtienen en forma típica entre 5°C y 85°C.

3.2.1.9 Envejecimiento

Para estimar el endurecimiento que sufrirá el asfalto al someterse a los efectos del calor y el aire, se sometieron las muestras de asfalto a un proceso de calentamiento para producir un residuo al que se le realizaron distintas pruebas.

El horno que se utilizó para este fin funciona a base de energía eléctrica, y es capaz de mantener la temperatura constante de 160°C. La puerta del horno cuenta con ventanas de vidrio y cierra herméticamente. Cuenta con las ranuras de ventilación necesarias para su funcionamiento en la parte superior del mismo, las cuales están conectadas a una campana extractora y un sistema de purificación de aire.

La plataforma en la que se colocarán los moldes que se utilizan en las pruebas se encuentra colocada en posición horizontal y tiene capacidad para colocar hasta 8 de estos moldes simultáneamente.

3.2.1.10 Capacidad de espumación

Como se mencionó anteriormente, existen dos parámetros fundamentales para poder caracterizar la capacidad de producir espuma de un asfalto: Vida media y razón de expansión.

Para realizar las pruebas y evaluar la calidad de la espuma del asfalto, se utilizó el laboratorio móvil marca Wirtgen modelo WLB 10S (Figura 3-6). Este laboratorio móvil cuenta con una consola electrónica que se encarga de controlar

las temperaturas y cantidades de los fluidos que se mezclan en su cámara de expansión.



Figura 3-6 Laboratorio móvil WLB 10-S utilizado

Cuenta con un depósito para el asfalto que lo hace circular de manera continua y de esta manera mantener su temperatura constante. Incluye también un compresor y tanque para almacenar aire el cual se inyecta a todo el sistema y se encarga de proveer las presiones necesarias en cada uno de los fluidos.

Una vez que se han calibrado los sistemas para inyectar la cantidad de aire, agua y asfalto precisas, solamente se debe presionar un botón y la computadora de la consola se encargará del proceso completo de proveer la cantidad justa de fluidos.

La cámara de expansión se encuentra en la parte opuesta a la consola; debajo de ella se coloca el recipiente con la varilla graduada, se mide la expansión del asfalto, así como el volumen máximo que llega a alcanzar la espuma y se comienza a contar el tiempo. Cuando el volumen llega a la mitad del volumen máximo, se detiene el cronómetro.

3.2.2 Aditivos para el asfalto

Una vez que fueron evaluadas las condiciones de espumación, y que se determinaron las condiciones óptimas para razón de expansión, vida media, y la influencia en el proceso de la temperatura del agua y de los agregados, se analizaron las muestras obtenidas de las mezclas realizadas siguiendo las recomendaciones hechas por Asphalt Academy, (2009) en su documento.

Después de evaluar las distintas condiciones de las mezclas, se agregaron al asfalto dos aditivos, con la intención de saber si existe alguna mejora significativa en las propiedades mecánicas del asfalto espumado. Los aditivos utilizados son el Kao-amin y Gripper, ambos producidos por la empresa Quimikao.

De acuerdo a la página web del fabricante (Kao Corporation, 2015), ambos aditivos aparecen como promotores de adherencia para su uso en asfaltos. Para llevar a cabo esta adición, se siguieron las recomendaciones del fabricante colocando una cantidad determinada de asfalto a 160°C en un recipiente, a la cual se le añadió el 1.0% y 2.0% en masa del asfalto respectivamente de cada uno de los aditivos mencionados y se sometió a un intenso proceso de agitación manteniendo la temperatura constante.

3.2.3 Agregado pétreo (RAP)

Se utilizó RAP proveniente de dos fuentes, con la intención de comparar el comportamiento mecánico de la mezcla y comprobar si la granulometría del material, así como el proceso de fresado, resultan ser un factor que influya en gran medida en los resultados.

Una de las fuentes de RAP fue la autopista San Luis Potosí – Villa de Arriaga, a la altura del Km 75, ubicación que se muestra en el tramo en el cual se realizan trabajos de mantenimiento de dicha vía utilizando la técnica de asfalto espumado y amablemente aceptaron cooperar proporcionando el material

necesario para la realización de las diferentes pruebas. En las figuras siguientes se muestra el material acumulado del cual se extrajeron las muestras.

La otra fuente de RAP es la Avenida de la Luz, en la ciudad capital del estado de Querétaro, a la altura de la intersección con la Avenida Prolongación Bernardo Quintana. Se puede apreciar en el estado original del material proporcionado y en la, la ubicación del lugar donde se depositó dicho material.



Figura 3-7 Fuente de RAP Carretera S.L.P. - Villa de Arriaga.



Figura 3-8 Fuente de RAP Av. De la Luz, Querétaro, Qro.

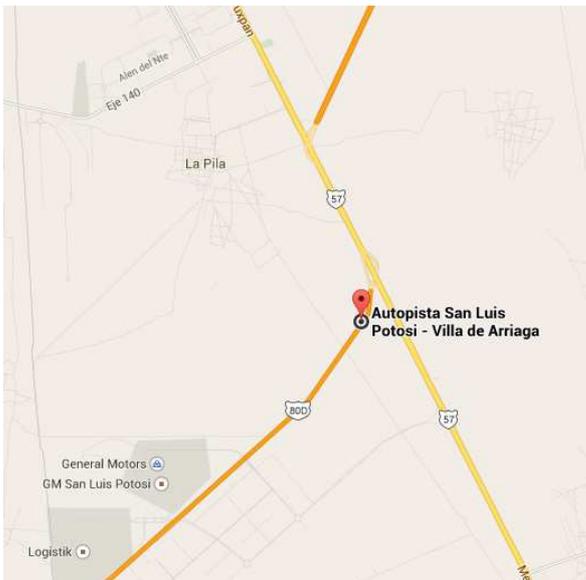


Figura 3-9 Ubicación de la fuente de RAP Villa de Arriaga



Figura 3-10 Ubicación de la fuente de RAP Avenida de la Luz

3.2.3.1 Composición Granulométrica

La intención de esta prueba es conocer la composición por tamaños de las partículas del material pétreo mediante su paso por una serie de mallas con aberturas determinadas (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2002b).

En la norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2002b), se presenta una zona granulométrica recomendable de los materiales para bases de pavimentos hidráulicos y asfálticos.

En el manual de Wirtgen, (2004) y en el editado por Asphalt Academy, (2009), también se menciona una zona recomendable para la granulometría del RAP.

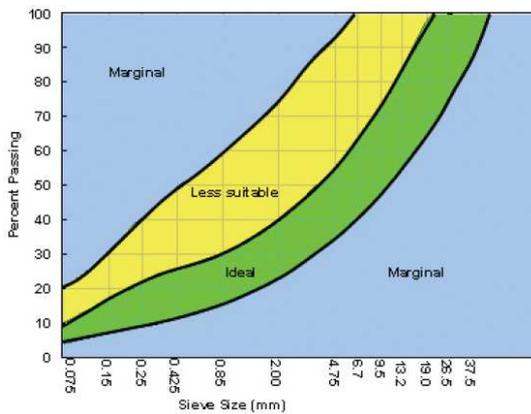


Figura 3-11 Granulometría recomendada por Asphalt Academy (2009).

Fuente: Asphalt academy, 2009

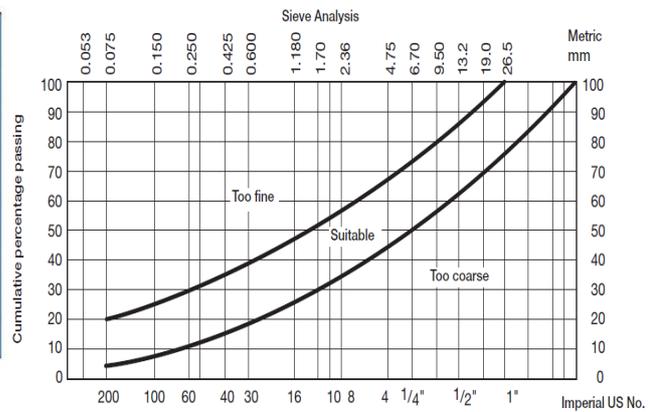


Figura 3-12 Granulometría recomendada por Wirtgen Group (2004).

Fuente: Wirtgen group, 2004

3.2.3.2 Compactación

Resulta necesario conocer la curva de compactación del material pétreo y a partir de ésta, inferir su masa volumétrica seca máxima y su contenido óptimo de humedad. Para esto, se realizó la prueba AASHTO modificada siguiendo las recomendaciones hechas en la norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2006).

Según De Visscher et al., (2008), una compactación pobre implica un desempeño inferior del material debido a agrietamientos por post-compactación, una mayor susceptibilidad a la humedad y envejecimiento prematuro.

3.3 Mezclas asfálticas

Una vez determinadas las condiciones ideales para generar espuma en el asfalto, se elige la que ofrece una mayor razón de expansión y vida media más prolongada; tomando en cuenta la influencia de la temperatura y cantidad de agua en el proceso.

También es necesario evaluar la influencia de la temperatura de los agregados al momento de mezclarlos con el asfalto, es por eso que una de las muestras se sometió a un proceso de refrigeración. Se evaluó la posibilidad de realizar las pruebas cuando el rap presenta temperaturas superiores a las mencionadas, pero debido a que el proceso implica calentar los agregados, el asfalto contenido en el RAP comenzó a separarse, lo cual ocasiona que las condiciones no sean las mismas que para las muestras anteriores y los resultados no serían comparables.

Se realizaron pruebas de resistencia a la tracción indirecta (ITS) y determinación del índice de resistencia a la tracción retenida (TSR) a cada una de las mezclas, con la intención de definir la influencia de la temperatura de los agregados en el comportamiento mecánico de la mezcla.

Se trabajaron mezclas con el asfalto en estado natural a las que se les agregaron dos tipos de *filler*. Cal en proporción de 1.5% y cemento Portland a 1.0% en ambos casos con respecto a la masa de agregado.

En las investigaciones De Visscher *et al.*, (2008), no encontraron evidencia clara de la influencia del *filler* en el grado de compactación, sin embargo, demostraron que el uso de éste mejora el rendimiento de la mezcla compactada.



Figura 3-13 Adición de cal a la mezcla



Figura 3-14 Adición de cemento a la muestra.



Figura 3-15 Mezcla terminada de RAP, *Filler* industrial y asfalto espumado con 75% de la humedad óptima.

Una vez que se colocó el RAP en el mezclador, se incorporó 75% de la humedad óptima para el material determinada por la prueba AASHTO modificada, se mezcló durante 2 minutos para garantizar una correcta incorporación de la misma. Se añadió el asfalto espumado a la mezcla y posteriormente, se le añadió el 25% restante de humedad y continuó mezclando durante 2 minutos más. La mezcla final se guardó en botes con capacidad de 19 litros con tapa hermética para evitar que perdiera la humedad, la cual se comprobó antes de realizar las pastillas probetas.

3.4 Comportamiento mecánico

La determinación del comportamiento mecánico de las distintas mezclas se obtuvo mediante la evaluación de los resultados de pruebas de resistencia a la tracción indirecta (ITS), e índice de resistencia a la tracción retenida (TSR).

La prueba para determinar la resistencia, de acuerdo al procedimiento descrito en la norma de la *American Society for Testing and Materials*, (2007), “se lleva a cabo mediante la carga de una muestra cilíndrica a través de su plano diametral vertical a una tasa especificada de deformación y temperatura de ensayo. La carga máxima en la rotura se registra y se utiliza para calcular la fuerza de ITS de la muestra”.

La resistencia a la tracción indirecta de una probeta se obtiene por medio de la Ecuación 2:

Donde:

$$IDT = \frac{2 * P}{\pi * h * d * 10,000}$$

ITS = Resistencia a la tracción indirecta (KPa)

P = Carga máxima aplicada a la muestra (KN)

h = Altura promedio de la muestra (cm)

d = Diámetro promedio de la muestra (cm)

Ecuación 2 Resistencia a la tracción indirecta

La resistencia a la tracción retenida se obtiene de la relación que existe al realizar la prueba de resistencia a la tracción indirecta (ITS) bajo condiciones secas y saturadas, las cuales se comparan y el resultado se expresa en porcentaje por medio de la Ecuación 3:

Donde:

$$TSR = \left(\frac{S_{t\ con}}{S_{t\ dry}} \right) 100$$

TSR = Índice de resistencia a la tracción retenida

$S_{t\ con}$ = Resistencia a la tracción indirecta de la muestra húmeda

$S_{t\ dry}$ = Resistencia a la tracción indirecta de la muestra seca

Ecuación 3 Índice de resistencia a la tracción retenida

Para poder evaluar el efecto en el comportamiento mecánico de los aditivos utilizados, fue necesario realizar muestras que sirvieran como punto de control. Estos puntos de control fueron mezclas fabricadas de acuerdo a las recomendaciones mencionadas por Asphalt Academy, (2009).

Para ello se replicó en el RAP una granulometría de acuerdo a las recomendaciones de la literatura. Se le añadieron las cantidades de filler especificadas (1.5% de cal a una muestra y 1.0% de cemento a la otra). La temperatura del agua y de los agregados fue la ambiental.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Clasificación de materiales

4.1.1 Asfaltos

Como resultado de las pruebas mencionadas en la Tabla 3-1 y en la Tabla 3-2, para la verificación de la calidad de los asfaltos utilizados en los experimentos, se muestran en la Tabla 4-1, los resultados obtenidos de dichas pruebas de laboratorio.

Tabla 4-1 Características de calidad a los asfaltos utilizados

| CARACTERÍSTICAS | UNIDAD | REQUISITO DE CALIDAD | CONDICIÓN | VALOR OBTENIDO EN LA MUESTRA | |
|--|--------------------|----------------------|-----------|------------------------------|-----------|
| | | | | AC-20 | EKBÉ |
| Del cemento asfaltico original | | | | | |
| Viscosidad dinámica a 60°C | Pa*s | 200 ± 40 | | Si cumple | Si cumple |
| Viscosidad cinemática a 135°C | mm ² /s | 300 | Mínimo | Si cumple | Si cumple |
| Viscosidad Saybolt-Furol a 135°C | S | 120 | Mínimo | Si cumple | Si cumple |
| Penetración a 25°C, 100g, 5 s | 10-1mm | 60 | Mínimo | Si cumple | Si cumple |
| Punto de inflamación Cleveland | °C | 232 | Mínimo | Si cumple | Si cumple |
| Solubilidad | % | 99 | Mínimo | Si cumple | Si cumple |
| Punto de reblandecimiento | °C | 48 - 56 | | Si cumple | Si cumple |
| Del residuo de la prueba de película delgada | | | | | |
| Pérdida por calentamiento | | 0.5 | Máximo | Si cumple | Si cumple |
| Viscosidad dinámica a 60°C | Pa*s | 800 | Máximo | Si cumple | Si cumple |
| Ductilidad a 25°C y 5cm/min | Cm | 50 | Mínimo | Si cumple | Si cumple |
| Penetración retenida a 25°C | % | 54 | Mínimo | Si cumple | Si cumple |

Fuente: Elaboración propia

Con base en estos resultados, podemos afirmar que los asfaltos cumplen con los requerimientos de calidad exigidos en la normativa aplicable y por lo tanto son elegibles para realizar la segunda etapa de la experimentación que corresponde a pruebas de espumación.

4.1.2 Asfalto espumado

Una vez comprobada la calidad de los asfaltos, se procedió a evaluar su capacidad de espumación, para de esta manera, determinar su viabilidad para ser utilizados en el proceso de estabilización de materiales con asfalto espumado.

Se muestra en la Tabla 4-2 los valores de razón de expansión y vida media de cada uno de los asfaltos con diferentes proporciones de agua de espumación y temperatura.

Tabla 4-2 Características de espumación para el asfalto PEMEX Ekbé PG 64-22 a 180°C

| CONDICIONES DE ESPUMACIÓN | | ASFALTO EKBÉ PG 64-22 | |
|---------------------------|--|---------------------------------|--------------------------|
| Presión de aire (MPa) | Contenido de agua (% en masa del asfalto) | Características de la espuma | |
| | | Razón de expansión (N veces) | Vida media (Segundos) |
| 300 | 3 | 5 | 6.3 |
| | 4 | 7 | 4.9 |
| | 5 | 7 | 5.2 |
| 500 | 3 | 5 | 6.6 |
| | 4 | 6 | 5.8 |
| | 5 | 7 | 5.1 |
| 700 | 2 | 5 | 5.9 |
| | 3 | 6 | 5.3 |
| | 4 | 7 | 5.3 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-3 Características de espumación para el asfalto AC-20 con 0.55 MPa de presión

| CONDICIONES DE ESPUMACIÓN | | ASFALTO AC-20 | |
|------------------------------|---|------------------------------|-----------------------|
| Temperatura del asfalto (°C) | Contenido de agua (% en masa del asfalto) | Características de la espuma | |
| | | Razón de expansión (N veces) | Vida media (Segundos) |
| 160 | 1.5 | 5 | 7.7 |
| | 2.5 | 9 | 6.7 |
| | 3.5 | 12 | 6.4 |
| 170 | 1.5 | 11 | 5.2 |
| | 2.5 | 10 | 7.2 |
| | 3.5 | 9 | 6.9 |
| 180 | 1.5 | 5 | 9.6 |
| | 2.5 | 6 | 8.5 |
| | 3.5 | 10 | 5.9 |

Fuente: Elaboración propia

Con los datos obtenidos para las diferentes condiciones de espumación es posible crear las gráficas por medio de las cuales se determina la cantidad óptima de agua añadida para espumar.

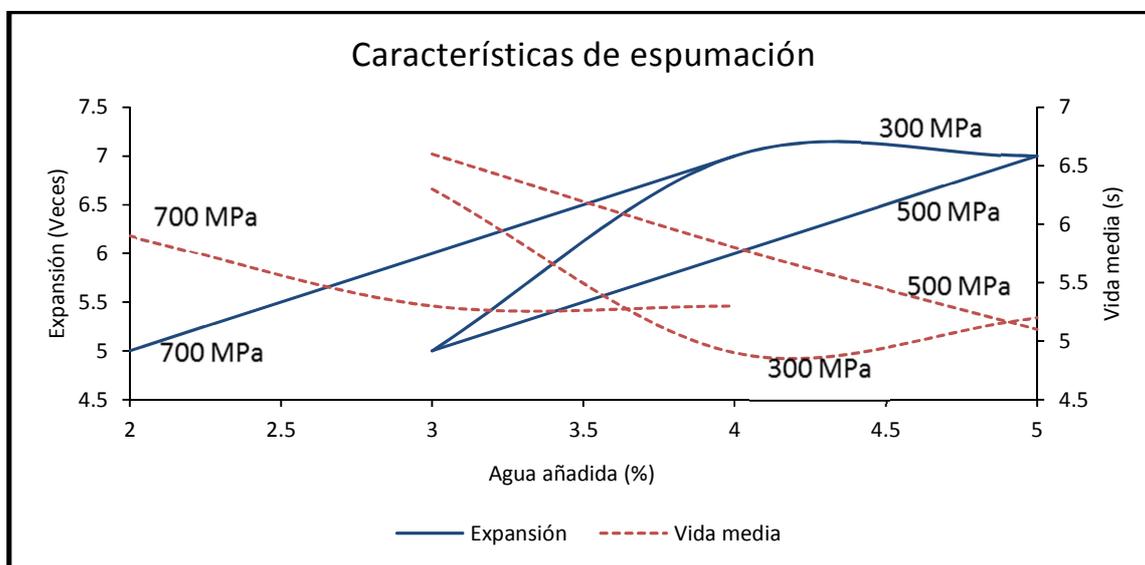


Figura 4-1 Expansión y vida media para diferentes presiones de aire

Fuente: Elaboración propia

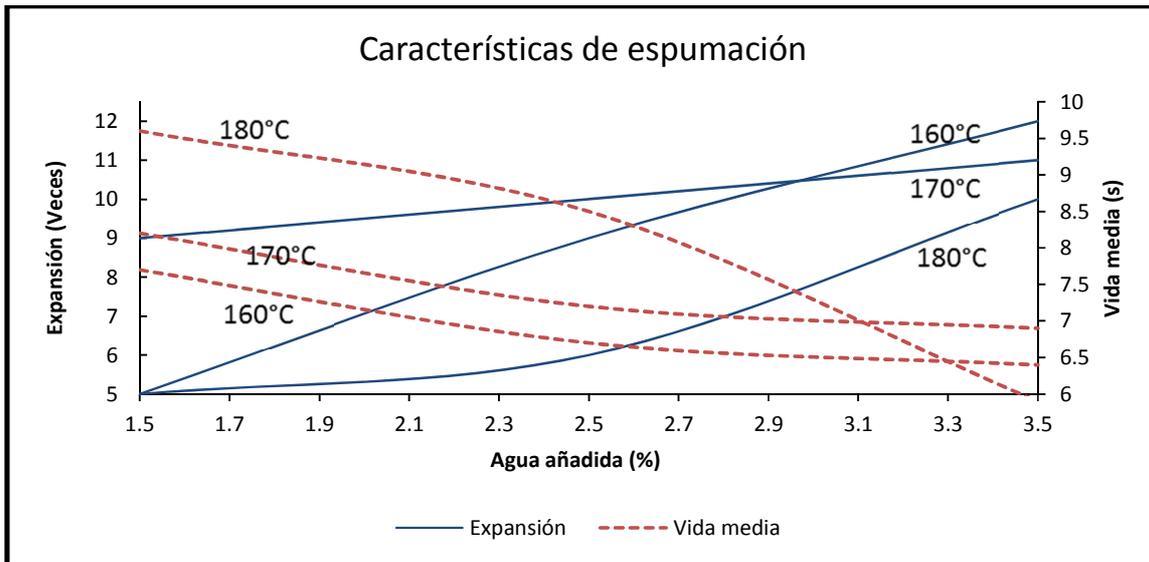


Figura 4-2 Expansión y vida media a diferentes temperaturas

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en los resultados obtenidos, solamente el asfalto AC-20 cumple con los requisitos mínimos necesarios recomendados en la literatura para expansión y vida media (8 veces y 6 segundos respectivamente), mientras que el asfalto Ekbé no cumple por lo cual se descarta su uso para las pruebas posteriores.

Las condiciones de espumación que mejores resultados en cuanto a expansión y vida media se refieren, se dan cuando se introduce una presión de aire de 0.55 MPa y la temperatura del asfalto es de 170°C con 2.5% de agua de espumación para el asfalto AC-20.

Con base en la premisa de que la temperatura del asfalto es uno de los factores que influyen en la calidad de la espuma formada, resulta lógico pensar que los resultados obtenidos son producto del gradiente de temperatura entre los fluidos (agua y asfalto).

Por esta razón se realizaron variaciones en la temperatura del asfalto, y en la Tabla 4-4 se muestran los resultados obtenidos para el asfalto AC-20 al evaluar sus capacidades de espumación.

Estas pruebas se llevaron a cabo para diferentes condiciones de temperatura de asfalto y con el agua a temperatura ambiente (23°C), mientras que en la Tabla 4-5 se muestran los resultados de evaluar estas condiciones para cuando la temperatura del agua es inferior a la ambiental (5°C). En ambos casos la presión de aire que se inyectó al sistema fue de 0.55 MPa.

Tabla 4-4 Características de espumación para el asfalto AC-20 con agua a 23°C

| CONDICIONES DE ESPUMACIÓN | | ASFALTO AC-20 | |
|------------------------------|---|------------------------------|-----------------------|
| Temperatura del asfalto (°C) | Contenido de agua (% en masa del asfalto) | Características de la espuma | |
| | | Razón de expansión (N veces) | Vida media (Segundos) |
| 170 | 2 | 5 | 14.0 |
| | 3 | 8 | 9.6 |
| | 4 | 8 | 10.5 |
| 180 | 2 | 4 | 17.6 |
| | 3 | 4 | 13.2 |
| | 4 | 7 | 9.2 |
| | 5 | 12 | 6.8 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-5 Características de espumación para el asfalto AC-20 con agua a 5°C

| CONDICIONES DE ESPUMACIÓN | | ASFALTO AC-20 | |
|------------------------------|---|------------------------------|-----------------------|
| Temperatura del asfalto (°C) | Contenido de agua (% en masa del asfalto) | Características de la espuma | |
| | | Razón de expansión (N veces) | Vida media (Segundos) |
| 170 | 2 | 4 | 19 |
| | 3 | 5 | 15.4 |
| | 4 | 6 | 11.2 |
| | 5 | 8 | 7.6 |
| | 2 | 6 | 17.7 |
| 180 | 3 | 6 | 16.3 |
| | 4 | 8 | 7.8 |
| | 5 | 10 | 5.1 |

Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo que en la etapa anterior, con estos resultados se elaboran gráficas que ilustran el comportamiento de las propiedades de expansión y vida media dependiendo de la cantidad de agua añadida para cada una de las condiciones de temperatura descritas anteriormente.

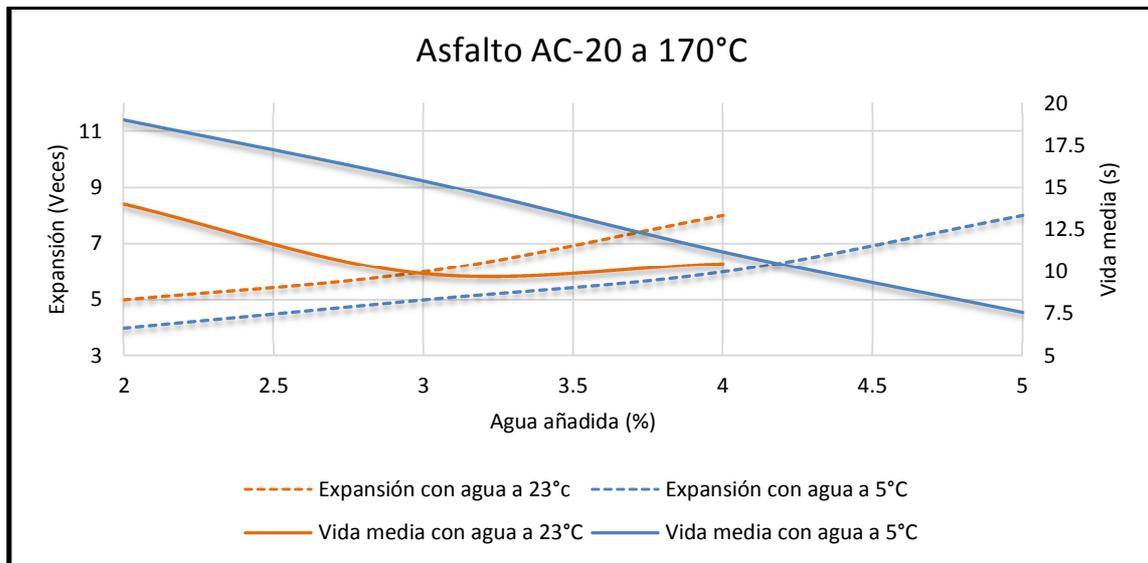


Figura 4-3 Características de espumación para el asfalto AC-20 a 170°C

Fuente: Elaboración propia

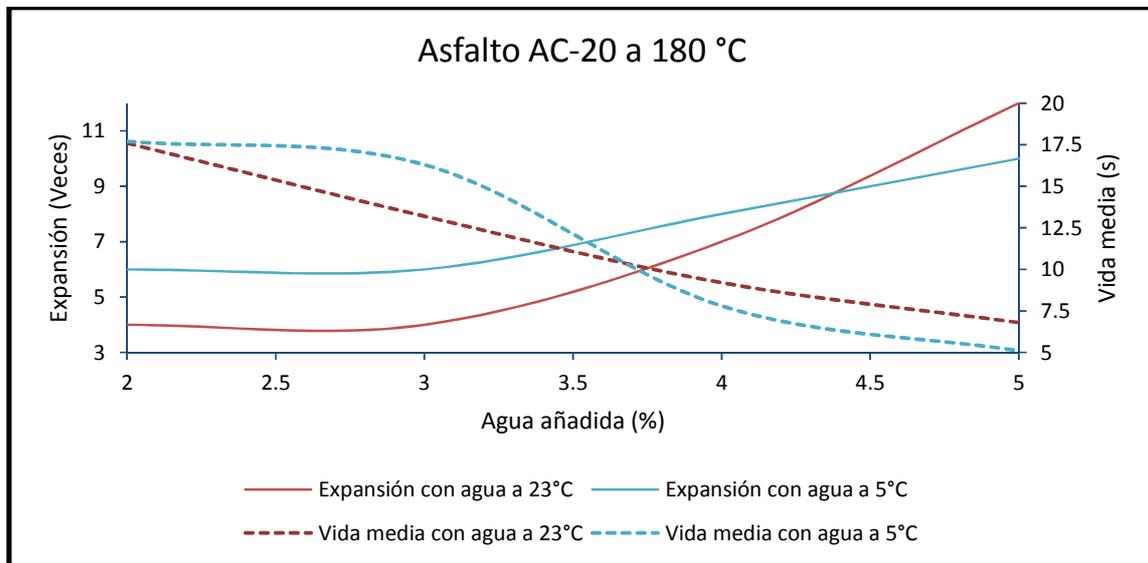


Figura 4-4 Características de espumación para el asfalto AC-20 a 180°C

Fuente: Elaboración propia

Como es posible observar en la Figura 4-3 y Figura 4-4, se encuentran algunas diferencias en el comportamiento de los materiales al momento de evaluar la razón de expansión y la vida media para determinar la cantidad de agua de espumación con mejores resultados.

Estas diferencias no son significativas, puesto que los valores obtenidos para cada una de las temperaturas en el asfalto resultan muy similares. Se muestran en la Tabla 4-6 los valores obtenidos para cada una de las condiciones.

Tabla 4-6 Agua añadida para diferentes gradientes de temperatura

| Temperatura del asfalto | Temperatura del agua | Agua de espumación |
|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| (°C) | (°C) | (%) |
| | 5 | 4.0 |
| 170 | 23 | 4.4 |
| | 5 | 4.0 |
| 180 | 23 | 3.4 |

Fuente: Elaboración propia

Es importante señalar que la diferencia que se encuentra en estos resultados se da para el caso del agua a temperatura ambiente, cuando la temperatura del asfalto es mayor, la cantidad de agua necesaria para lograr las mejores condiciones de espumación se ve reducida en 1.0%, sin embargo, como uno de los objetivos de las mezclas asfálticas tibias es la de ahorrar energía, esta opción se descarta y se usa la temperatura menor con la cual se obtengan condiciones necesarias. Adicionalmente es preferible elevar lo menos necesario la temperatura del asfalto para no inducir un envejecimiento prematuro.

Por otro lado, los resultados al variar la temperatura del agua, manteniendo constante la del asfalto, encontramos una diferencia de 0.2% para el asfalto a 170°C y de 1.4% cuando el asfalto se encuentra a 180°C. Con esto queda demostrado que es más relevante la temperatura del asfalto que el gradiente de temperaturas que pueda existir entre el agua y el asfalto.

A partir de este momento han quedado definidas las condiciones bajo las cuales se realizaron los experimentos restantes. El agua que se utilizó en la producción de espuma del asfalto se encuentra a temperatura ambiente y no es necesario reportarla, el contenido de agua para espumar es de 4.0% de la masa de asfalto, la temperatura del asfalto es de 175°C y la presión de aire en el sistema es de 0.55 MPa.

4.1.3 Agregado pétreo (RAP)

La prueba de granulometría se realizó siguiendo las recomendaciones de la norma MMP-4-04-002 emitida por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2002). En primer lugar, se realizó un cuarteo (Figura 4-5) y reducción de las muestras (Figura 4-6).



Figura 4-5 Cuarteo de los materiales



Figura 4-6 Reducción de muestras

En seguida, se colocaron las mallas con aberturas de 50mm, 37.5 mm, 25 mm, 19 mm, 12.5 mm, 9.5 mm, 6.35 mm, 4.75 mm, 2.36 mm, 1.18 mm, 0.6 mm, 0.425 mm, 0.3 mm, 0.15 mm y 0.075 mm (Figura 4-7). Se hizo pasar el

material por estas mallas de manera manual (Figura 4-8) y se graficaron los resultados.



Figura 4-7 Conjunto de mallas para granulometría



Figura 4-8 Granulometría a la fracción gruesa del agregado

Se presentan a continuación los resultados para las granulometrías realizadas a las dos fuentes de RAP. En la Tabla 4-7 y Figura 4-9, se muestran los resultados para el RAP obtenido de la carretera S.L.P. – Villa de Arriaga, mientras que en la Tabla 4-8 y la Figura los resultados obtenidos para el RAP extraído de la Avenida de la Luz en la ciudad de Querétaro, Qro.

Tabla 4-7 Análisis granulométrico para el RAP de la carretera S.L.P. – Villa de Arriaga

| Análisis granulométrico | |
|-------------------------|------------|
| Abertura de Malla (mm) | % que pasa |
| 50.000 | 100.000% |
| 37.500 | 100.000% |
| 25.000 | 98.526% |
| 19.000 | 95.049% |
| 12.500 | 80.026% |
| 9.500 | 66.706% |
| 6.350 | 47.137% |
| 4.750 | 36.789% |
| 2.360 | 20.534% |
| 1.180 | 10.208% |
| 0.600 | 6.156% |
| 0.425 | 5.592% |
| 0.300 | 3.368% |
| 0.150 | 0.934% |
| 0.075 | 0.353% |

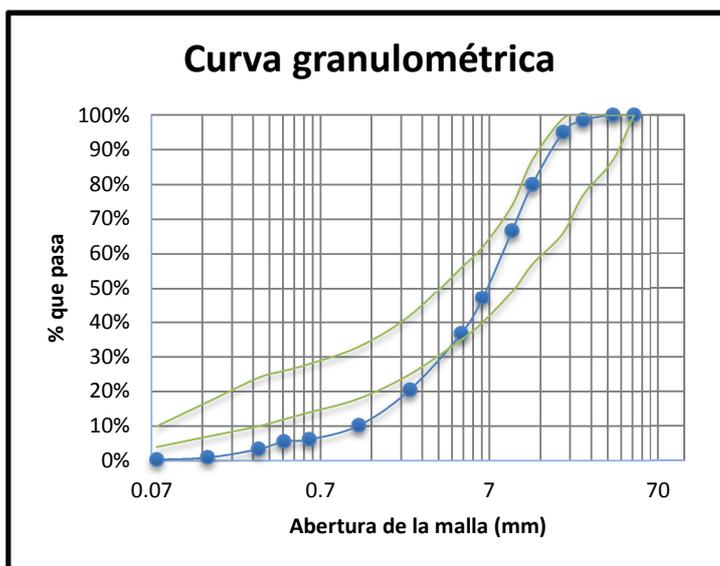


Figura 4-9 Curva granulométrica para el RAP de la carretera S.L.P. – Villa de Arriaga

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-8 Análisis granulométrico para el RAP de Avenida de la Luz

| Abertura de Malla (mm) | % que pasa |
|------------------------|------------|
| 50.000 | 100.000% |
| 37.500 | 100.000% |
| 25.000 | 100.000% |
| 19.000 | 100.000% |
| 12.500 | 86.501% |
| 9.500 | 79.069% |
| 6.350 | 56.771% |
| 4.750 | 42.589% |
| 2.360 | 21.145% |
| 1.180 | 11.491% |
| 0.600 | 6.835% |
| 0.425 | 5.297% |
| 0.300 | 4.443% |
| 0.150 | 2.734% |
| 0.075 | 1.538% |

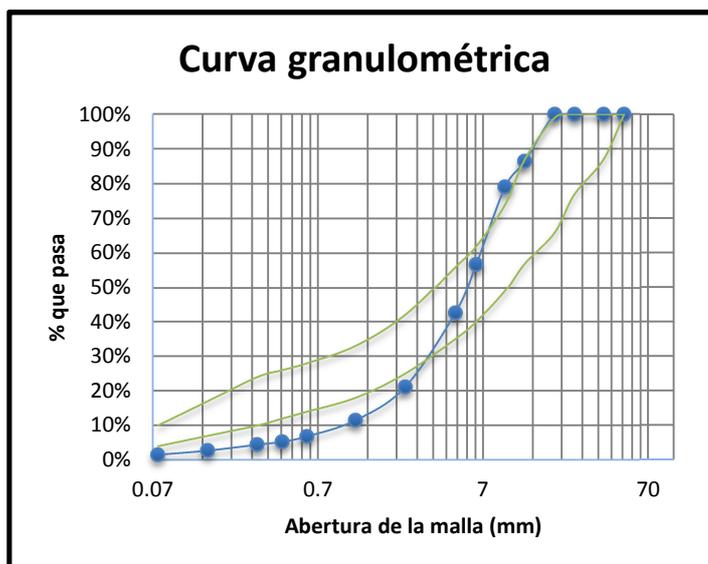


Figura 4-10 Curva granulométrica para el RAP de Avenida de la Luz

Fuente: Elaboración propia

Como se observa, el resultado del análisis granulométrico de los materiales, en la parte que corresponde a la fracción fina del material, en ambos casos los valores se encuentran por debajo de los límites inferiores; por el contrario, para la fracción gruesa del material, a pesar que se colocan muy cerca al límite superior de la zona recomendada, ambos materiales cumplen con esta recomendación.

A pesar de que los materiales no se encuentran totalmente dentro de la zona granulométrica recomendada se trabajó con estos materiales en estado natural, puesto que para corregir la granulometría, es necesario cambiar la

composición del RAP, lo cual provocaría que fuera inútil el hecho de contar con dos fuentes de independientes.

Una vez analizada la composición granulométrica de origen del material, se procede a calcular el contenido óptimo de humedad así como el peso volumétrico seco máximo por medio de la prueba de compactación AASHTO modificada.

De acuerdo a las características granulométricas que presenta el material, se realiza la variante C de dicha prueba, con las características que aparecen en la Tabla 4-9.

Tabla 4-9 Variantes de las pruebas de compactación AASHTO

| Variantes | A | B | C | D |
|---------------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| Tamaño máximo del material, mm | 4.75 (No. 4) | | 19.00 (3/4") | |
| Tamaño de la muestra, Kg | 4 | 7.5 | 4 | 7.5 |
| Diámetro interior del molde, mm | 101.6 ± 0.4 | 152.4 ± 0.7 | 101.6 ± 0.4 | 152.4 ± 0.7 |
| Número de golpes por capa | 25 | 56 | 25 | 56 |

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Se presentan en la Tabla 4-10 los valores obtenidos durante la realización de la prueba de compactación, y en la Figura 4-11 se muestra la curva de compactación para el RAP proveniente de la carretera S.L.P. – Villa de Arriaga. Para este material se determinó una humedad óptima de 8% con un valor de peso volumétrico máximo de 1.87 kg/m³.

Mientras que para el RAP proveniente de Avenida de la Luz, en la ciudad de Querétaro, se obtuvo una humedad óptima de 8.5% con un valor de peso volumétrico máximo de 1.93 kg/m³. Se muestra en la Tabla 4-11 las características del mismo y en la Figura 4-12 su curva granulométrica.

Estos valores son necesarios para determinar la cantidad de material que se debe utilizar en la elaboración de las pastillas con dimensiones Marshall, así como en la humedad que se debe dar al material para que las mismas logren

tener la mayor densidad y de esta manera minimizar la probabilidad de errores en los resultados de las pruebas mecánicas debidos a una compactación deficiente.

Tabla 4-10 Prueba de compactación RAP carretera S.L.P. – Villa de Arriaga

| ESPÉCIMEN NO. | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| CÁPSULA NO. | A | B | C | D |
| Masa de capsula + Suelo húmedo (g) | 24.52 g | 35.34 g | 32.79 g | 32.35 g |
| Masa de capsula + Suelo seco (g) | 24.25 g | 33.80 g | 30.95 g | 29.97 g |
| Masa del agua (g) | 0.27 g | 1.54 g | 1.84 g | 2.38 g |
| Masa de cápsula (g) | 8.61 g | 8.60 g | 7.96 g | 8.67 g |
| Masa de suelo seco W _s (g) | 15.64 g | 25.20 g | 22.99 g | 21.30 g |
| Contenido de agua W (%) | 1.73% | 6.11% | 8.00% | 11.17% |
| Masa del molde + Suelo húmedo W _i (g) | 6340.00 g | 6580.00 g | 6670.00 g | 6640.00 g |
| Masa del molde W _t (g) | 2740.00 g | 2740.00 g | 2740.00 g | 2740.00 g |
| Masa del suelo húmedo (g) | 3600.00 g | 3840.00 g | 3930.00 g | 3900.00 g |
| Volumen del molde V (cm ³) | 2105.00 cm ³ | 2105.00 cm ³ | 2105.00 cm ³ | 2105.00 cm ³ |
| Masa volumétrica húmeda Y _m (Kg/m ³) | 1.71 Kg/m ³ | 1.82 Kg/m ³ | 1.87 Kg/m ³ | 1.85 Kg/m ³ |
| Masa volumétrica seca Y _d (Kg/m ³) | 1.71 Kg/m ³ | 1.82 Kg/m ³ | 1.87 Kg/m ³ | 1.85 Kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia

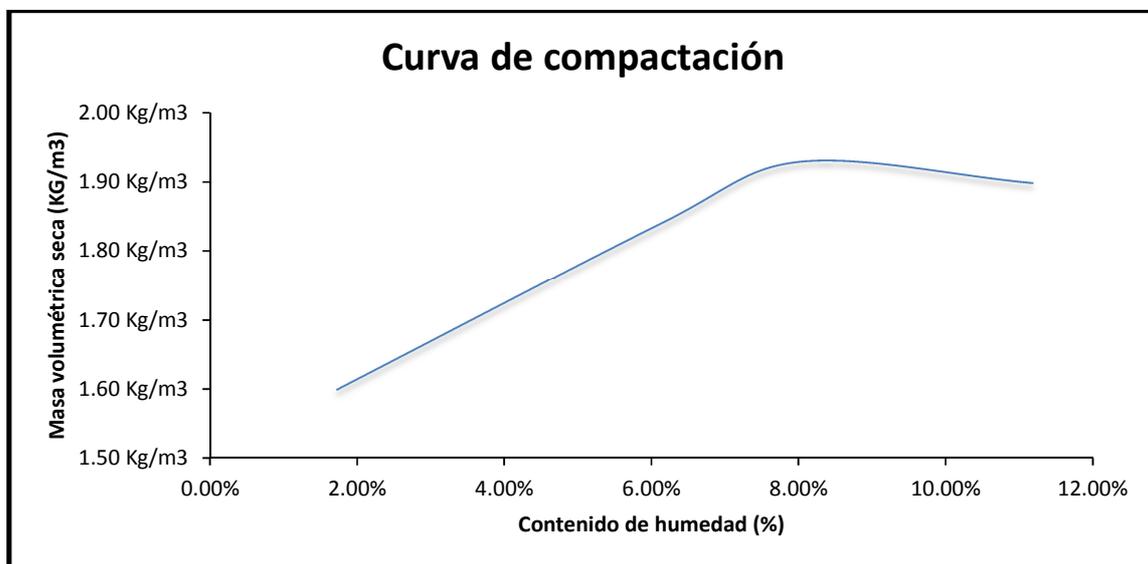


Figura 4-11 Curva de compactación RAP carretera S.L.P. – Villa de Arriaga

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-11 Prueba de compactación RAP Avenida de la Luz

| ESPÉCIMEN NO. | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| CÁPSULA NO. | A | B | C | D |
| Masa de capsula + Suelo húmedo (g) | 31.21 g | 35.03 g | 40.05 g | 35.50 g |
| Masa de capsula + Suelo seco (g) | 30.00 g | 33.38 g | 37.38 g | 32.81 g |
| Masa del agua (g) | 1.21 g | 1.65 g | 2.67 g | 2.69 g |
| Masa de cápsula (g) | 8.67 g | 7.96 g | 8.61 g | 8.60 g |
| Masa de suelo seco Ws (g) | 21.33 g | 25.42 g | 28.77 g | 24.21 g |
| Contenido de agua W (%) | 5.67% | 6.49% | 9.28% | 11.11% |
| Masa del molde + Suelo húmedo Wi (g) | 6450.00 g | 6690.00 g | 6790.00 g | 6790.00 g |
| Masa del molde Wt (g) | 2740.00 g | 2740.00 g | 2740.00 g | 2740.00 g |
| Masa del suelo húmedo (g) | 3710.00 g | 3950.00 g | 4050.00 g | 4050.00 g |
| Volumen del molde V (cm ³) | 2105.00 cm ³ | 2105.00 cm ³ | 2105.00 cm ³ | 2105.00 cm ³ |
| Masa volumétrica húmeda Ym (Kg/m ³) | 1.76 Kg/m ³ | 1.88 Kg/m ³ | 1.92 Kg/m ³ | 1.92 Kg/m ³ |
| Masa volumétrica seca Yd (Kg/m ³) | 1.76 Kg/m ³ | 1.88 Kg/m ³ | 1.92 Kg/m ³ | 1.92 Kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia

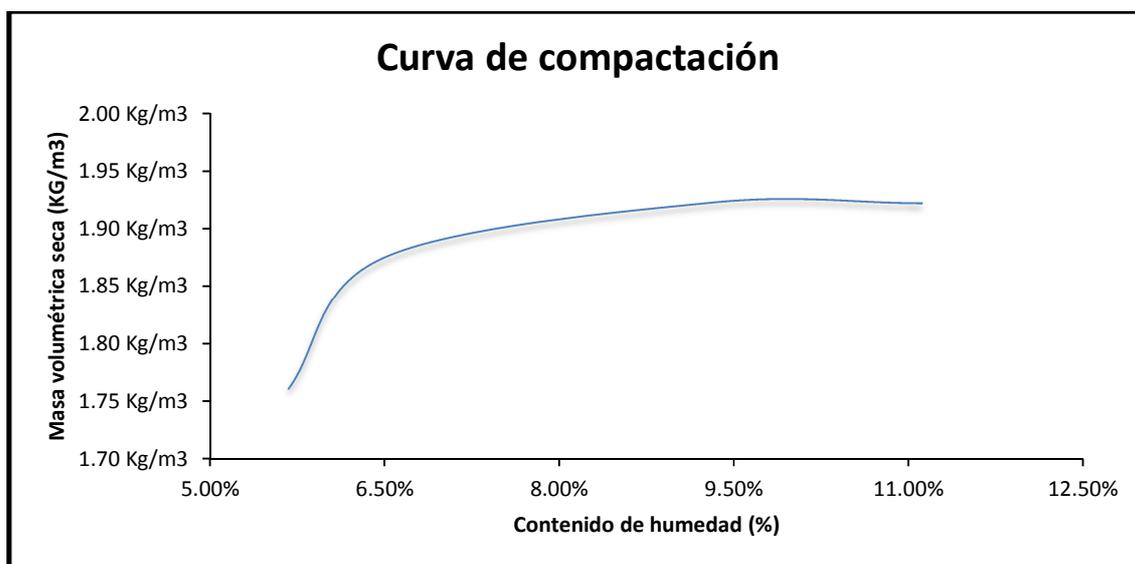


Figura 4-12 Curva de compactación RAP Avenida de la Luz

Fuente: Elaboración propia

4.2 Comportamiento mecánico

4.2.1 Resultados de ITS y TSR

Una vez que se han definido las condiciones bajo las cuales se realizarán las mezclas de material pétreo, asfalto espumado y *filler* industrial, se procede a realizar las diferentes mezclas asfálticas. Se presenta en la Tabla 4-12 un concentrado de las características de cada una de las 22 mezclas fabricadas.

Tabla 4-12 Proporcionamiento de *filler* y aditivo promotor de adherencia en las mezclas

| IDENTIFICACIÓN DE LA MEZCLA | ADITIVO | | FILLER | | ORIGEN DEL RAP | HUMEDAD DE LA MEZCLA |
|-----------------------------|-------------|----------|------------|---------|----------------|----------------------|
| | PORCENTAJE | TIPO | PORCENTAJE | TIPO | | |
| A | | | 1.50 | CAL | V. ARRIAGA | 8.50% |
| B | SIN ADITIVO | | 1.00 | CEMENTO | V. ARRIAGA | 8.50% |
| C | | | 1.50 | CAL | AV. LA LUZ | 8.00% |
| D | | | 1.00 | CEMENTO | AV. LA LUZ | 8.00% |
| E | | | 1.50 | CAL | V. ARRIAGA | 8.50% |
| F | | | 1.00 | CEMENTO | V. ARRIAGA | 8.50% |
| G | SIN ADITIVO | | SIN FILLER | | V. ARRIAGA | 8.50% |
| H | | | 1.50 | CAL | AV. LA LUZ | 8.00% |
| I | | | 1.00 | CEMENTO | AV. LA LUZ | 8.00% |
| J | | | SIN FILLER | | AV. LA LUZ | 8.00% |
| K | | | 1.50 | CAL | V. ARRIAGA | 8.50% |
| L | 1.00% | GRIPPER | 1.00 | CEMENTO | V. ARRIAGA | 8.50% |
| M | | | 1.50 | CAL | AV. LA LUZ | 8.00% |
| N | | | 1.00 | CEMENTO | AV. LA LUZ | 8.00% |
| O | | | 1.50 | CAL | V. ARRIAGA | 8.50% |
| P | 2.00% | GRIPPER | 1.00 | CEMENTO | V. ARRIAGA | 8.50% |
| Q | | | 1.50 | CAL | AV. LA LUZ | 8.00% |
| R | | | 1.00 | CEMENTO | AV. LA LUZ | 8.00% |
| S | | | 1.50 | CAL | V. ARRIAGA | 8.50% |
| T | 1.00% | KAO AMIN | 1.00 | CEMENTO | V. ARRIAGA | 8.50% |
| U | | | 1.50 | CAL | AV. LA LUZ | 8.00% |
| V | | | 1.00 | CEMENTO | AV. LA LUZ | 8.00% |

Fuente: Elaboración propia

Todas las mezclas se realizaron manteniendo constante la cantidad de 2.0% de asfalto espumado (400 g de asfalto para 20 Kg de material pétreo). Para la primera de las etapas, se colocó en el mezclador el material pétreo previamente

enfriado hasta lograr una temperatura de 3°C; se le añadió el *filler* (correspondiente para cada una de las fuentes de RAP).

En segundo lugar, se realizaron las pruebas correspondientes para determinar los valores de resistencia a la tracción indirecta (ITS) en cada una de las mezclas para la condición seca y saturada y se determinó el Índice de Resistencia a la Tracción Retenida (TSR).

Se muestran en la Figura 4-13 y Figura 4-14, el equipo utilizado para llevar a cabo dichas pruebas, mientras que en la Tabla 4-13 se presentan un concentrado de los valores de comportamiento mecánico obtenidos para las diferentes mezclas, para las cuales, el ID de la mezcla corresponde a los de la Tabla 4-12.

Tabla 4-13 Comportamiento mecánico bajo diferentes condiciones de temperatura

| ID DE LA MEZCLA | VALORES PROMEDIO | | |
|-----------------|------------------|--------------------|---------|
| | ITS Seco (KPa) | ITS Saturado (KPa) | TSR (%) |
| A | 368.00 | 150.00 | 40.67% |
| B | 164.25 | 57.75 | 35.34% |
| C | 242.00 | 98.00 | 40.09% |
| D | 151.33 | 53.33 | 35.00% |
| E | 291.00 | 225.29 | 77.31% |
| F | 184.14 | 52.57 | 28.36% |
| G | 397.89 | 65.67 | 16.42% |
| H | 276.00 | 151.29 | 54.80% |
| I | 215.50 | 73.00 | 35.28% |
| J | 380.13 | 95.38 | 25.01% |
| K | 231.25 | 150.88 | 64.98% |
| L | 191.25 | 80.25 | 41.99% |
| M | 232.67 | 155.00 | 64.76% |
| N | 273.71 | 65.14 | 23.83% |
| O | 294.67 | 150.22 | 51.02% |
| P | 201.29 | 83.00 | 43.96% |
| Q | 315.33 | 171.22 | 53.75% |
| R | 237.00 | 64.71 | 28.11% |
| S | 220.75 | 115.63 | 52.60% |
| T | 224.75 | 96.25 | 43.24% |
| U | 332.57 | 151.57 | 46.66% |

Fuente: Elaboración propia



Figura 4-13 Equipo para prueba ITS



Figura 4-14 Proceso de saturación de los especímenes

Además de la resistencia a la tracción indirecta y el índice de resistencia a la tracción retenida (TSR) para las mezclas asfálticas se calculó el módulo resiliente para cada una de ellas, estos resultados se encuentran en la Tabla 4-14, y en la Figura 4-15 se puede apreciar el equipo utilizado para esta prueba.



Figura 4-15 Equipo para módulo resiliente

De esta manera podemos observar que los datos obtenidos para ITS, TSR y módulo resiliente son consistentes en la mayoría de los casos. Es decir, las muestras que presentan valores de ITS mayores presentan también valores mayores para TSR y módulo resiliente.

En la Figura 4-16 es posible observar el comportamiento en los valores de ITS para la condición seca y saturada así como para el TSR de cada una de las mezclas.

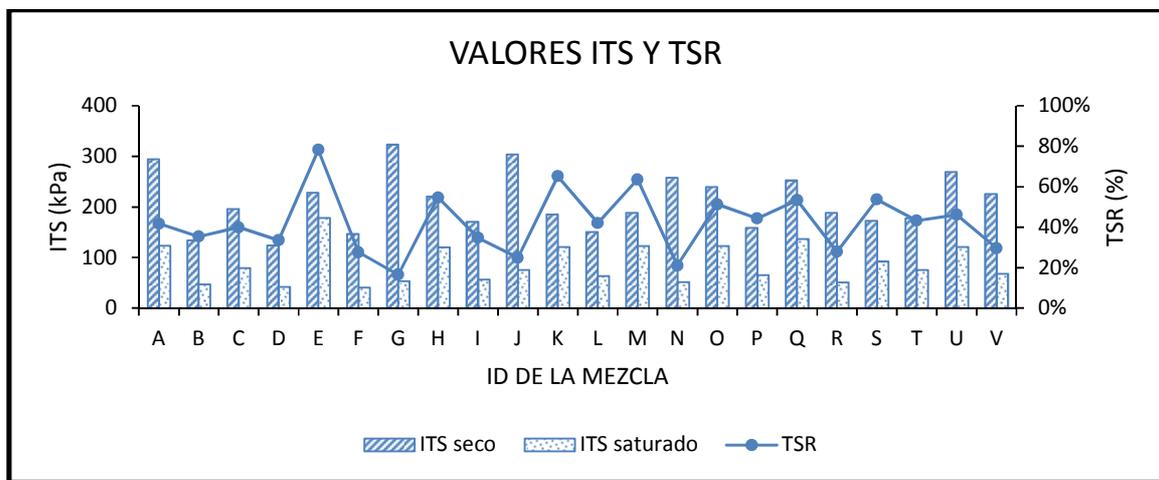


Figura 4-16 Valores de ITS y TSR

Fuente: Elaboración propia

A primera vista, parece describir un comportamiento errático, sin embargo, al analizar los resultados, es posible observar que para las mezclas en las cuales el filler activo es la cal, el comportamiento es en general mejor que para el cemento o bien, para las que no tienen filler activo añadido.

Esta afirmación se puede observar más adelante en la Figura 4-17, la cual compara las mezclas a las que se le incorporó distinto tipo de filler con las cuales se realizaron sin filler.

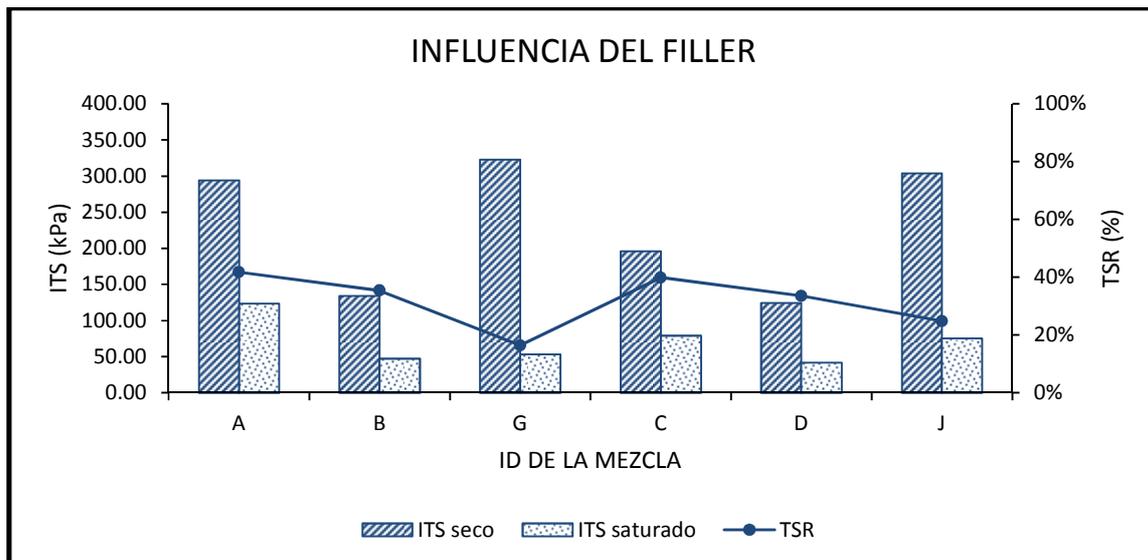


Figura 4-17 Influencia del filler en las mezclas asfálticas

Fuente: Elaboración propia

Al momento de comparar las mezclas fabricadas con los distintos tipos de filler (Cal hidratada y cemento Portland) con las mezclas a las cuales no se les añadió, se observan valores de TSR superiores en ambos agregados; siendo la mayor cuando el filler añadido es cal hidratada, en segundo lugar, para el cemento Portland y muy por debajo de estos valores, cuando no se añadió filler a la mezcla.

Los valores de ITS saturado presentan un comportamiento similar, es decir, cuando se añade un filler presentan mejores resistencias que cuando no lo tiene.

Por último, analizando los datos obtenidos para ITS seco, se presentan valores superiores para cuando el filler es ausente que para cuando se añade cal o cemento. Este comportamiento resulta interesante, puesto que es de esperarse que el filler actúe como catalizador de la dispersión del asfalto espumado en la mezcla, obteniendo de esta manera una mejor dispersión en la misma.

Debido que este comportamiento se presenta para ambas fuentes de RAP, por lo cual no podemos atribuirlo a un error de muestreo ni al proceso de fabricación de las mezclas.

De esta manera, resulta atinado pensar que debido a la distribución granulométrica de los materiales, los cuales tienen como similitud la ausencia de arenas, el asfalto espumado funciona como una especie de lubricante entre los agregados y a falta de un esqueleto firme de agregado, cuando se añade el filler a la mezcla, este se dispersa mejor y propicia la aparición de este efecto, condición que influye directamente en la interacción entre las moléculas de grava,

En la Figura 4-18 se muestran los valores de ITS en ambas condiciones así como de TSR obtenidos para las mezclas fabricadas usando cal hidratada como filler, mientras que en la Figura 4-19 se muestran los resultados de estos mismos parámetros para las mezclas cuando el filler empleado fue cemento Portland.

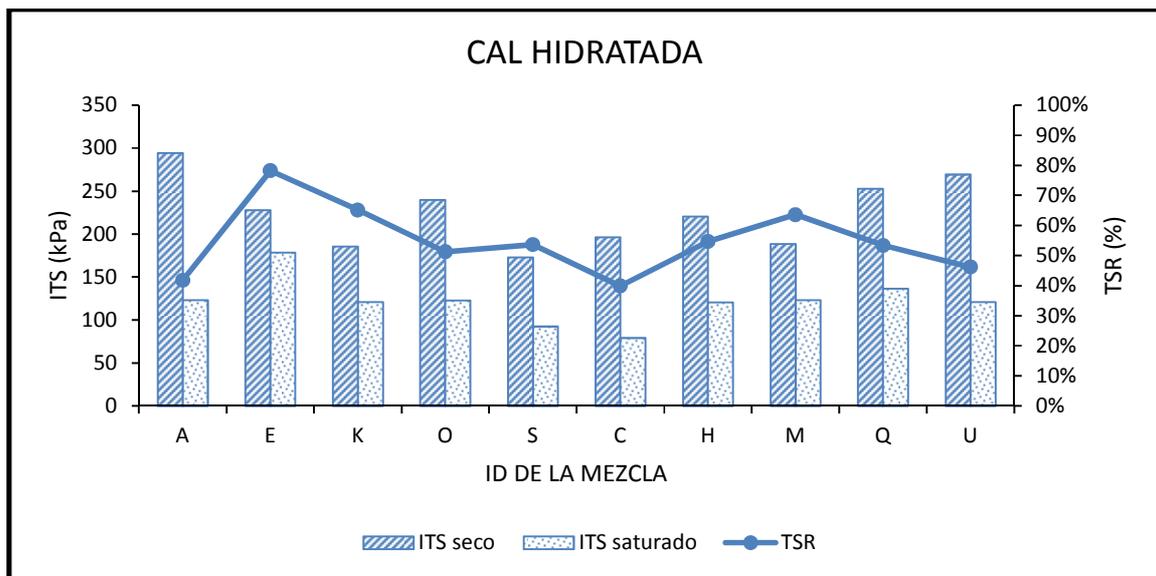


Figura 4-18 Influencia de la cal hidratada usada como filler

Fuente: Elaboración propia

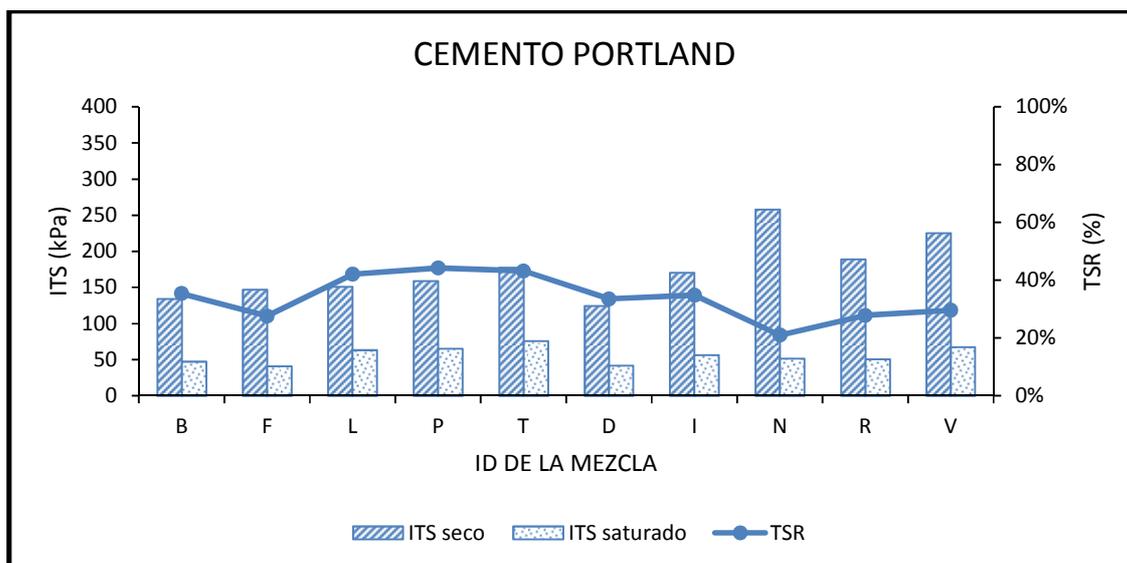


Figura 4-19 Influencia del cemento Portland usado como filler

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, podemos apreciar comportamiento considerablemente superior cuando el filler empleado es cal hidratada. En todos los parámetros medidos (ITS en ambas condiciones y TSR), tanto en los puntos de control, como en las mezclas en las cuales el asfalto contiene aditivos promotores de adherencia.

Esta condición deja en claro que para ambos orígenes de RAP, el filler más eficiente es la cal hidratada, la cual presenta mejor afinidad que el cemento Portland al ser incorporado.

Además, como se mencionó anteriormente, el costo puede resultar en un factor decisivo al momento de elegir un proceso de estabilización de suelos vs utilizar materiales de banco, y la cal hidratada es, por lo regular, más económica que el cemento.

Posteriormente, en la Figura 4-20 encontramos un resumen de las mezclas elaboradas con el RAP proveniente de la carretera a Villa de Arriaga, y los resultados podemos compararlos con los que se encuentran plasmados en la

Figura 4-21, la cual corresponde a las mezclas fabricadas con el RAP obtenido de la Avenida de la Luz, en la ciudad capital del estado de Querétaro.

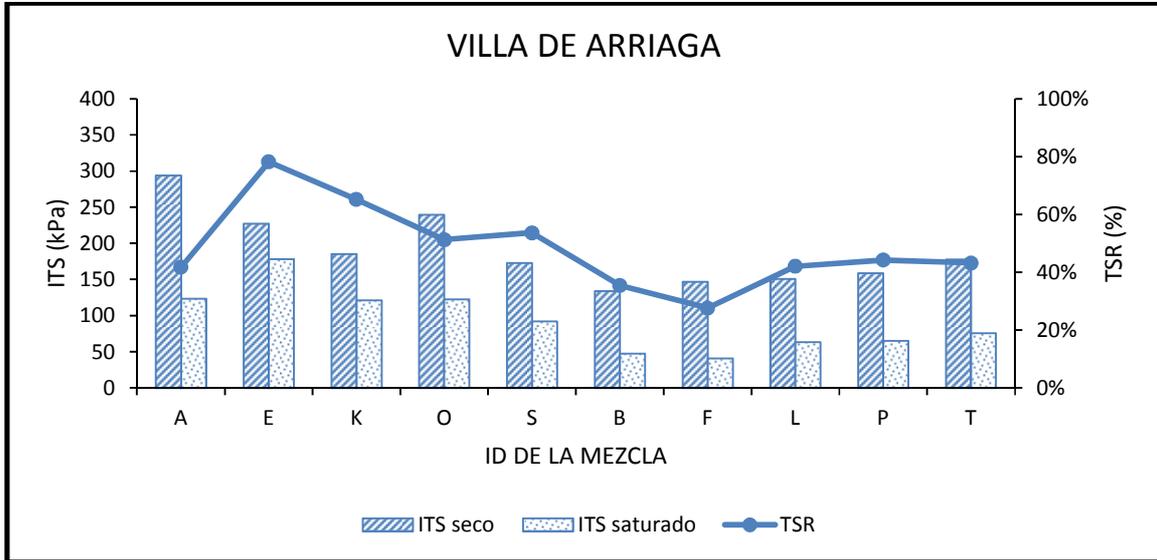


Figura 4-20 Mezclas fabricadas con el RAP Villa de Arriaga

Fuente: Elaboración propia

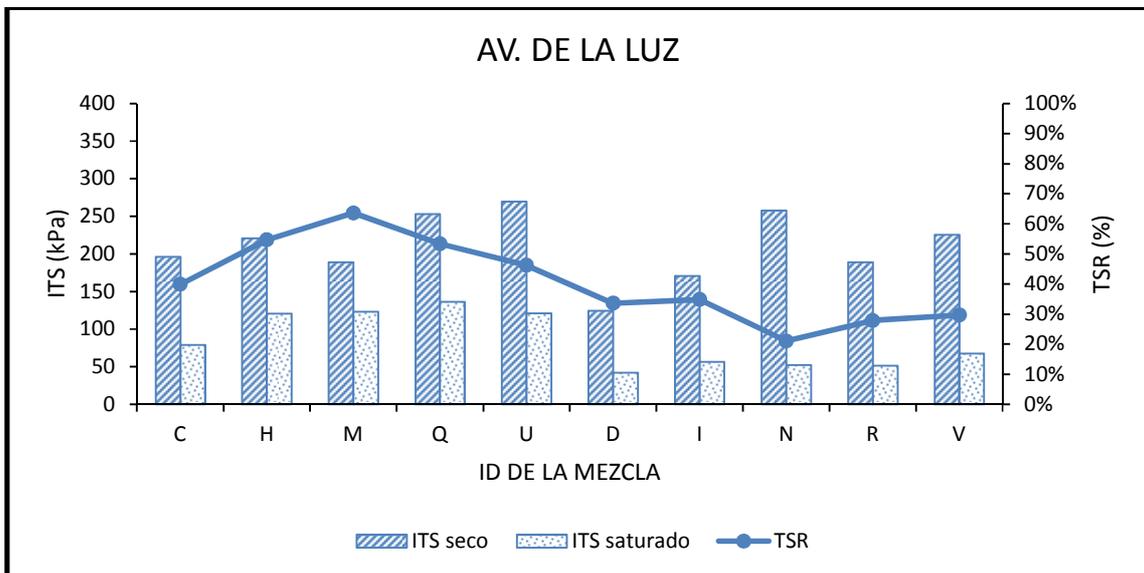


Figura 4-21 Mezclas fabricadas con el RAP Avenida de la Luz

Fuente: Elaboración propia

En cada una de estas gráficas es posible observar que existe una clara diferencia de los valores de TSR entre el primer grupo de mezclas, las cuales

corresponden a aquellas a las cuales se incorporó cal hidratada con respecto al segundo grupo, las cuales contienen cemento Portland.

Esta tendencia se repite para las dos fuentes de RAP, por lo cual, esta diferencia en los valores índice de comportamiento mecánico, se atribuye a uno de los agentes añadidos la mezcla, en este caso el filler, y no al origen del agregado que se usa.

Al comparar las mezclas fabricadas con cal hidratada, se aprecian valores similares en la resistencia ITS seco de las mezclas para ambas fuentes de RAP, sin embargo, al analizar las que contienen cemento Portland, se observa un ligero incremento en dichos valores para el agregado originario de la Avenida de la Luz, lo cual demuestra una mejor afinidad de este agregado y el cemento Portland que el que presenta el agregado originario de Villa de Arriaga.

En el caso del ITS saturado, esta última condición no se presenta, y por lo tanto, tampoco se refleja en los valores obtenidos de TSR.

En este caso, el comportamiento de ambos materiales presenta resistencias más altas para las mezclas que contienen cal hidratada que aquellas a las que se les incorporó cemento Portland.

Este comportamiento de mejor desempeño bajo condiciones de humedad, es debido a la afinidad de la cal hidratada con el agregado, la cual hace que el material estabilizado sea menos susceptible a la humedad.

En cuanto a los aditivos promotores de adherencia, se presenta en la Figura 4-22 un gráfico que resume los valores índice analizados para cada muestra que contiene aditivos promotores de adherencia y la respectiva comparación con los puntos de control creados.

Se presenta en primer lugar la mezcla de control, seguida de la que presenta 1.0% de Gripper añadido, a continuación aparece la que contiene 2.0% de Gripper y por último la que contiene 1.0% de Kao-amin; esto para cada filler

iniciando con el 1.50% de cal hidratada seguida del 1.0% de cemento Portland para cada origen de RAP.

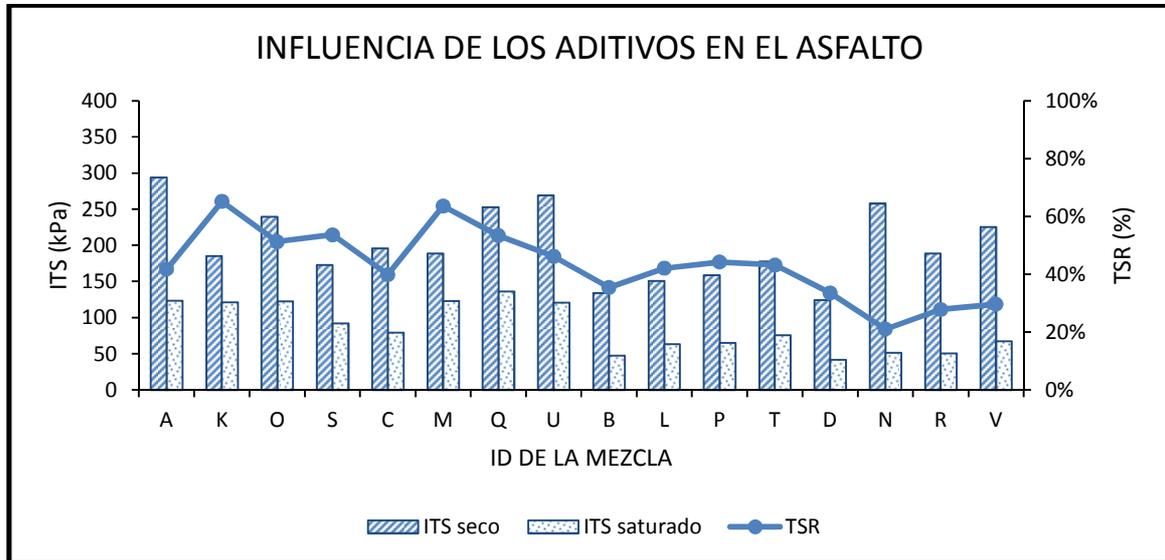


Figura 4-22 Influencia de los aditivos para asfalto en el comportamiento mecánico de las mezclas

Fuente: Elaboración propia

Cuando el filler añadido es cal hidratada, es posible observar para el RAP de Villa de Arriaga, un incremento en los valores obtenidos cuando se agrega una cantidad mayor de Gripper, y se reduce la resistencia cuando el aditivo incorporado es Kao-amin, sin embargo, los valores de ITS seco no llegan a ser superiores a los obtenidos en el punto de control; mientras que para el ITS saturado los valores son similares con Gripper que al del punto del control e inferiores a este cuando se agrega Kao-amin.

Para el RAP de Avenida de la Luz, al cual se agregó cal hidratada, los valores ITS seco se incrementan conforme se incrementa la cantidad de Gripper en el asfalto e incluso presenta mejores resultados Kao-amin que Gripper en la misma concentración, mientras que los valores de TSR incrementan solo para Gripper y se reduce para Kao-amín.

Los valores de TSR más altos obtenidos en este estudio se presentan para cuando el filler añadido es cal hidratada y se agrega al asfalto 1.0% de Gripper.

Cuando el filler añadido es cemento Portland, en las mezclas para ambos agregados se observa un comportamiento similar: La resistencia de ITS seco y saturado se incrementa conforme aumenta la concentración de Gripper en el asfalto, pero es incluso superior cuando se agrega solo 1.0% de Kao-amin, sin embargo, ninguno de estos valores llega a superar los obtenidos para la cal hidratada.

Los valores de TSR obtenidos presentan mayor variación. Para el RAP de Villa de Arriaga se observa un comportamiento similar al descrito anteriormente, aunque de menor magnitud en los incrementos. Sin embargo, para el RAP de Avenida de la Luz, se reduce considerablemente cuando se agrega solo el 1.0% de Gripper para posteriormente, continuar con un incremento, sin llegar a alcanzar los valores obtenidos en el punto de control.

4.2.2 Resultados de módulo resiliente

Como se mencionó anteriormente, el módulo de resiliencia del material ofrece un panorama acerca del comportamiento de los materiales bajo condiciones de cargas repetitivas, y su capacidad para recuperarse de las deformaciones causadas por esta acción.

Se muestra en la Tabla 4-14, el resumen de los valores de módulo resiliente instantáneo y total obtenidos para cada mezcla, para las cuales, el ID de la mezcla corresponde a los de la Tabla 4-12. En la Figura 4-23 se muestran gráficamente estos mismos resultados. Estos módulos se calcularon por medio de la Ecuación 4.

Ecuación 4 Módulo resiliente.

Donde:

$$E_i = \frac{P(n + 0.27)}{(s)D_i}$$

E_i y E_t = Módulo resiliente instantáneo y total respectivamente (MPa)

P= Amplitud del pulso de carga (N)

n= Coeficiente de Poisson (0.35 para este caso)

s= Espesor de la probeta (mm)

D_i y D_t = Deformación resiliente instantánea y total respectivamente (mm)

$$E_t = \frac{P(n + 0.27)}{(s)D_t}$$

Tabla 4-14 Valores de módulo resiliente para las diferentes mezclas

| ID DE LA MEZCLA | MR INSTANTANEO (MPa) | MR TOTAL (MPa) |
|------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| A | 1,241.00 | 1,155.14 |
| B | 644.79 | 577.46 |
| C | 848.64 | 848.64 |
| D | 1,064.92 | 1,012.88 |
| E | 820.40 | 758.14 |
| F | 451.63 | 392.08 |
| G | 1,482.30 | 1,333.39 |
| H | 1,343.98 | 1,339.19 |
| I | 701.84 | 668.12 |
| J | 1,101.04 | 982.68 |
| K | 1,297.31 | 1,137.07 |
| L | 599.29 | 525.72 |
| M | 1,320.04 | 1,155.22 |
| N | 353.18 | 328.02 |
| O | 805.68 | 729.28 |
| P | 730.79 | 660.88 |
| Q | 1,095.19 | 993.82 |
| R | 730.28 | 673.30 |
| S | 836.45 | 752.72 |
| T | 918.57 | 867.03 |
| U | 2,720.56 | 1,999.27 |
| V | 766.84 | 714.41 |

Fuente: Elaboración propia

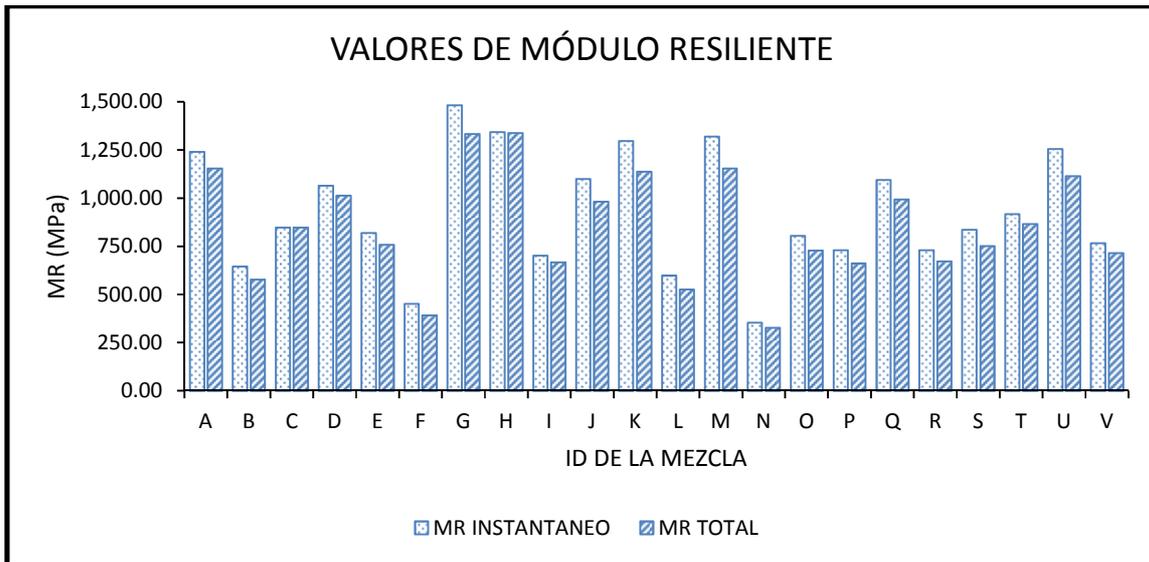


Figura 4-23 Valores de Módulo resiliente obtenidos para cada mezcla

Fuente: Elaboración propia

Para poder realizar un mejor análisis de estos resultados, es necesario realizar algunas distinciones, es por eso que se presentan a continuación una serie de gráficas que agrupan las mezclas con alguna característica en común. En primer lugar, se compara los puntos de control (Mezclas A, B, C y D) de cada origen de RAP con las mezclas que se fabricaron sin filler; estos resultados se reflejan en la Figura 4-24 .

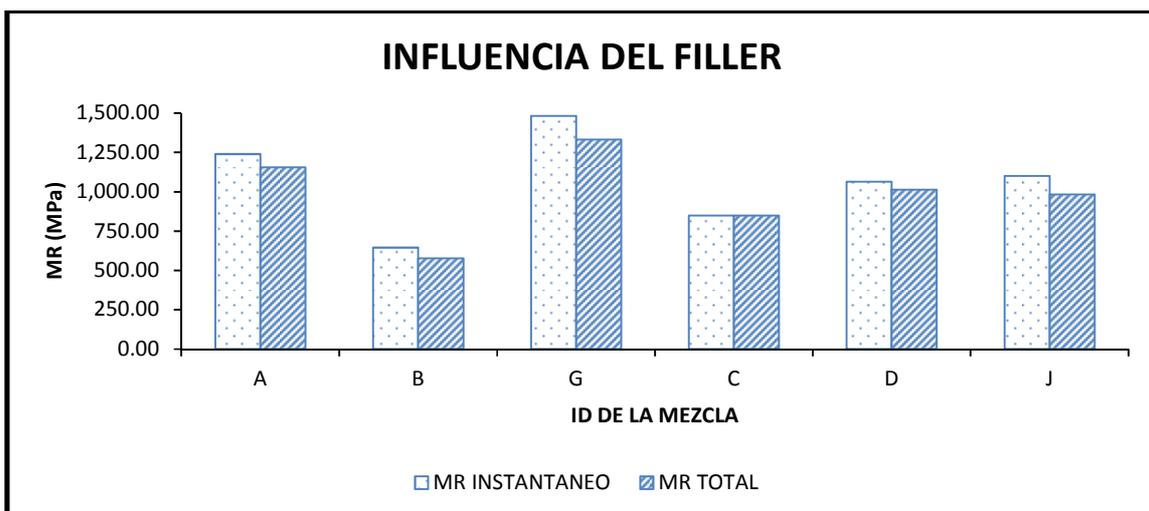


Figura 4-24 Influencia del filler en las mezclas

Fuente: Elaboración propia

Es posible observar que solo en el caso de los materiales pétricos originarios de Villa de Arriaga se presentan variaciones importantes, pero estas no son atribuibles al uso en particular de un filler activo, puesto que se trata de una reducción en los valores de MR cuando el filler es cemento Portland.

Para el caso del material originario de la ciudad de Querétaro, los valores de MR son muy similares y hasta ahora no se observan mejoras considerables en el comportamiento mecánico que se pueda atribuir al uso de un filler en particular.

Una vez que se ha definido que no existe diferencia significativa entre el uso o no de un filler en cuanto a los resultados de MR se refiere, se realiza una comparación entre las mezclas que contienen distinto tipo de filler, con la intención de evaluar la afinidad del asfalto con aditivos promotores de adherencia y el filler utilizado, diferenciando por origen de RAP para poder analizar de mejor manera los resultados obtenidos. Se muestran en la Figura 4-25 aquellas mezclas que contienen cal hidratada, mientras que en la Figura 4-26 aquellas que contienen cemento Portland.

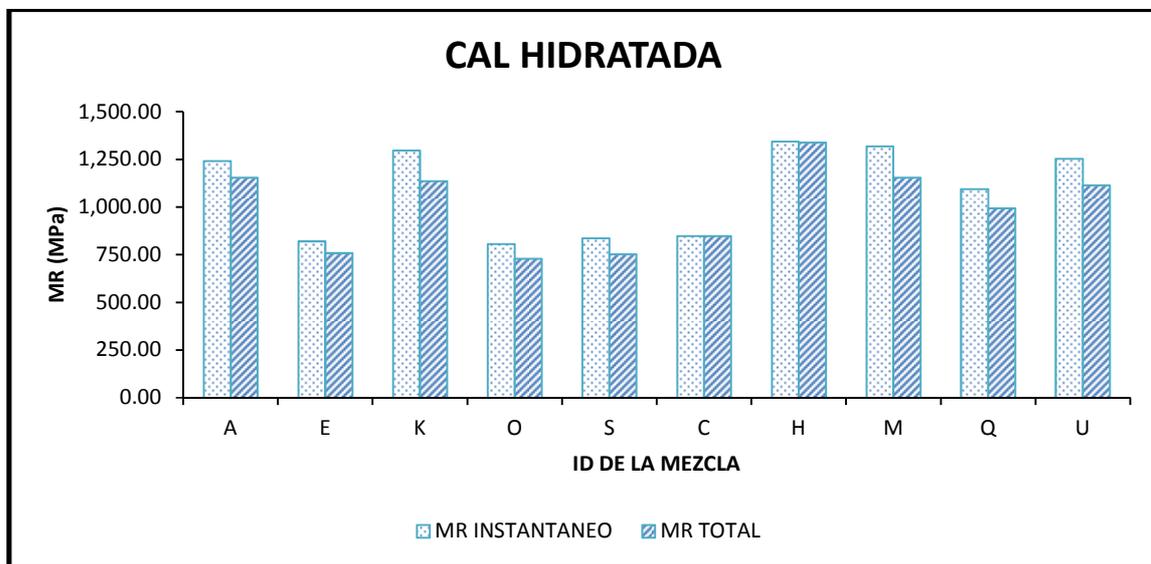


Figura 4-25 Influencia de la cal hidratada usada como filler

Fuente: Elaboración propia

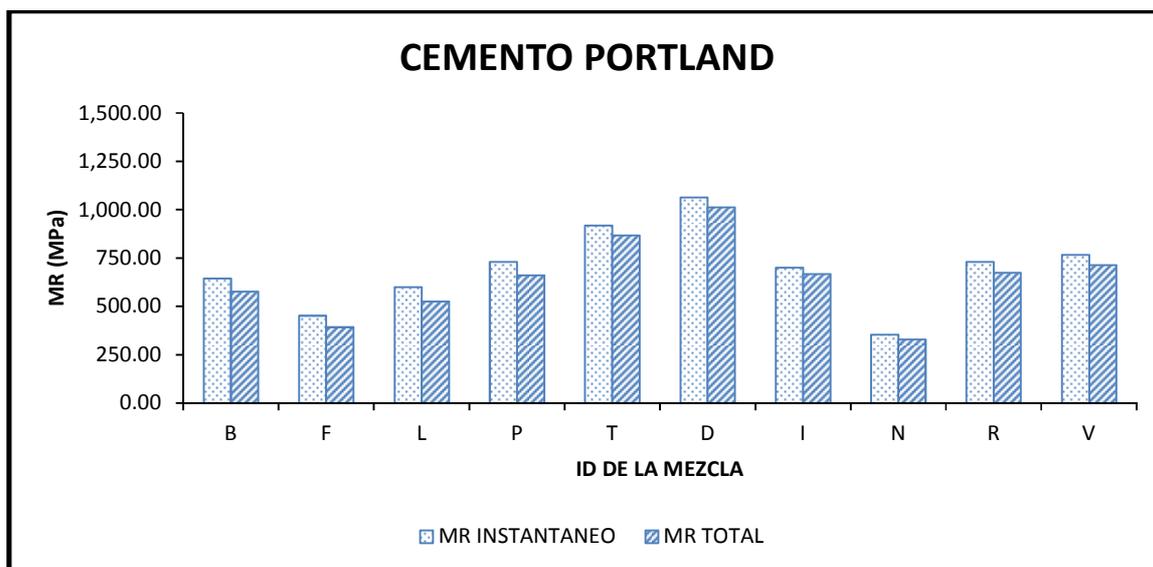


Figura 4-26 Influencia del cemento Portland usado como filler

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, es posible apreciar que existe una diferencia notable entre los valores de MR de las mezclas con cal hidratada, que son superiores a las que contienen cemento Portland. Esto indica que los aditivos promotores de adherencia actúan mejor cuando el filler incorporado a la mezcla es cal hidratada que cuando se usa cemento Portland.

Analizando los resultados para cada tipo y concentración de aditivo, se nota una tendencia que es consistente independientemente del origen del agregado. Para cuando el filler usado es cal hidratada, se obtienen mejores resultados al incorporar únicamente el 1.0% de Gripper, mientras que cuando se incorpora cemento Portland, conforme se incrementa la concentración de Gripper, los resultados se mejoran, e inclusive son aún mejores cuando se añade únicamente el 1.0% de Kao-amin al asfalto.

De esta manera observamos que existe una mejor afinidad entre el aditivo Gripper cuando se agrega cal hidratada y Kao-amin cuando el filler a usar es cemento Portland.

5. CONCLUSIONES

El objetivo general de este trabajo fue el de lograr una mezcla asfáltica utilizando la técnica de asfalto espumado que cumpliera y supere las especificaciones publicadas por la SCT para los materiales que conformen la capa de base tratadas de un pavimento.

Para la realización del presente trabajo se revisaron documentos especializados en el tema de asfalto espumado y acerca de la aplicación de esta técnica en diferentes países.

En México, la tecnología para la fabricación y aplicación del asfalto espumado no se utiliza aún de manera frecuente y solo algunos tramos de prueba se han realizado, es por ello que el uso de materiales estabilizados con esta técnica es aún escaso respecto al potencial que tiene la técnica.

A pesar de lo descrito en el párrafo anterior, es necesario reconocer el esfuerzo y la dedicación de algunas de las empresas particulares, así como de los organismos reguladores en nuestro país para contemplar cada vez con mayor seriedad la posibilidad de aplicar nuevas tecnologías en la construcción y rehabilitación de pavimentos.

Es necesario recalcar la importancia de conservar y construir nueva infraestructura para fomentar el progreso económico del país, teniendo en cuenta la aplicación eficaz de los recursos económicos disponibles.

Las exigencias actuales para la conservación y construcción de infraestructura ha vuelto indispensable el hecho de estudiar a detalle el comportamiento de los materiales estabilizados por medio de diferentes técnicas, como la de asfalto espumado, para lograr su adaptación a las condiciones particulares de nuestro país.

Tomando en cuenta lo expresado en los párrafos anteriores, se procede a realizar las conclusiones del presente trabajo de investigación, iniciando por verificar si la hipótesis y los objetivos planteados se han cumplido.

5.1 Conclusiones

El objetivo general de este trabajo fue el de lograr una mezcla asfáltica utilizando la técnica de asfalto espumado que cumpliera y supere las especificaciones publicadas por la SCT para los materiales que conformen la capa de base tratadas de un pavimento. Este objetivo no se ha cumplido puesto que los valores de MR obtenidos para las diferentes muestras, son inferiores a los que se recomienda en el catálogo de secciones de la SCT para bases estabilizadas con asfalto.

Sin embargo, al comparar los valores obtenidos con los que se recomienda para base hidráulica, incluso en las mezclas que no contienen ni filler ni aditivos se ven ampliamente superados.

Es necesario recordar que se trabajó solamente con materiales reciclados – salvo en los puntos de control– tal como se obtuvieron de la fuente, mientras que los materiales que se utilizaron para la realización del catálogo de secciones específica que fueron muestras obtenidas de bancos de materiales. Este sin duda es un factor determinante en el resultado de los valores obtenidos para MR, aunado a la granulometría que se utilizó en los materiales donde el tamaño máximo del agregado es de 19mm, lo cual también se refleja típicamente en valores más bajos.

El primero de los objetivos particulares fue el de determinar la cantidad óptima de asfalto y agua, así como evaluar la influencia de la temperatura de los mismos al momento de utilizar la técnica. Este objetivo ha quedado cubierto desde las primeras etapas del experimento.

Conforme se avanzó en la etapa de experimentación, se definieron las condiciones óptimas para la realización de la técnica, se determinó que el gradiente de temperatura entre el agua y el asfalto no es determinante en la calidad de la espuma, sin embargo, si lo es la temperatura del asfalto.

Cabe mencionar que uno de los resultados que más llaman la atención es el hecho de no haber obtenido las condiciones de espumación mínimas necesarias para cuando se realiza la técnica con el asfalto PEMEX Ekbé PG 64-22. Esto representa un gran problema y puede llegar a ser un obstáculo para la investigación, puesto que la tendencia es que el asfalto AC-20 sea sustituido por el PEMEX Ekbé PG 64-22.

Se observó que la temperatura del agua con la cual se realiza el proceso de espumado no presenta influencia significativa en la calidad de la espuma producida. Mientras que la temperatura de los agregados tampoco afecta directamente al comportamiento mecánico de la mezcla.

El segundo de los objetivos particulares se centró en la influencia de los aditivos al asfalto, *filler* industrial y aditivos para asfalto. En este aspecto, la investigación arrojó como resultado que el uso de los aditivos, genera una diferencia en el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas fabricadas con asfalto espumado, sin embargo, se hace necesario llevar a cabo un análisis de costo – beneficio con la intención de evaluar la factibilidad de utilizar estos aditivos.

Como es sabido ya, el *filler* tiene la finalidad de ayudar en la dispersión del asfalto en la mezcla, que al mezclarse estos dos componentes generan un mortero el cual resulta moldeable y una vez que alcanza la estabilidad ayuda a la cohesión de la mezcla.

Este aspecto quedó demostrado cuando se compararon los resultados obtenidos para las mezclas fabricadas con los dos diferentes tipos de *filler* empleados, estos resultados son superiores a los obtenidos para cuando no se añade *filler* alguno.

La cal y el cemento, además de cumplir esta función, ayudan a mejorar propiedades del material como reducir la plasticidad de los materiales –Aunque en

nuestro caso no se presentaron problemas de este tipo—, pero si el material que se está trabajando no presenta problemas de este tipo, cabe la posibilidad de usar otro tipo de filler que resulte más económico. Es por esto que se debe evaluar nuevamente el costo de estos aditivos.

Por último, en cuanto a los objetivos particulares de la investigación, podemos afirmar que el hecho de utilizar aditivos promotores de adherencia sí mejoran el comportamiento mecánico de las mezclas lo cual comprueba la hipótesis planteada en este documento.

Esto queda comprobado al comparar los resultados obtenidos de las mezclas asfálticas a las cuales se les agregaron aditivos al asfalto con los valores en las pruebas de comportamiento mecánico para las que se usó el asfalto en estado natural.

A pesar de que algunos aditivos dieron mejores resultados que otros, en todos los casos se vio mejorada la resistencia ITS, TSR y el MR de las mezclas. Esto indica que se mejora la resistencia a tracción del material, se reduce la susceptibilidad a la humedad de la mezcla y la capa formada se hace menos susceptible a las deformaciones permanentes, lo cual quedó demostrado con los resultados obtenidos para en la prueba de módulo resiliente.

Se redujeron también los efectos adversos provocados por la baja temperatura de los agregados, la cual es una de las limitantes en el uso de esta metodología.

De esta manera podemos afirmar que los aditivos promotores de adherencia son capaces en algunos casos de reducir la susceptibilidad de la mezcla a una mala dosificación de los componentes de la mezcla e incluso, a la temperatura ambiente a la cual es fabricada permitiendo que este no sea un factor decisivo en su implementación.

Una vez que se ha comprobado que la mezcla se puede realizar, aun cuando la temperatura de los agregados se encuentra por debajo de la recomendada en la literatura; y que a diferentes concentraciones de aditivos promotores de adherencia, las propiedades mecánicas de los materiales se ven mejoradas, es posible afirmar que la hipótesis se cumple satisfactoriamente.

5.2 Líneas de investigación futuras

- Es necesario realizar investigaciones sobre los agentes que inhiben la producción de espuma en el asfalto PEMEX Ekbé PG 64-22.
- La técnica de asfalto espumado se puede llevar a cabo con las condiciones que presenten los materiales en estado natural, teniendo en cuenta las recomendaciones mencionadas en la literatura acerca de las condiciones ambientales que deben prevalecer.
- Antes de recomendar el uso de cualquier aditivo para asfalto, es necesario realizar un análisis económico para cerciorarse que el incremento en resistencia de la mezcla justifica la inversión.
- Cada material utilizado presentará características particulares, es por ello que se debe realizar un diseño con base en las características particulares del proyecto.
- Es importante antes de recomendar el uso de los aditivos promotores de adherencia y algún tipo de filler en particular, evaluar la afinidad de éstos con el agregado que se empleará.

6. REFERENCIAS

Ali, A., A. Abbas, M. Nazzal, A. Alhasan, A. Roy, y D. Powers. 2013. Effect of temperature reduction, foaming water content, and aggregate moisture content on performance of foamed warm mix asphalt. *Constr. Build. Mater.* 48:1058-1066. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.081>

American Society for Testing and Materials, A. 2007. Standard Test Method for Indirect Tensile (ITS) Strength of Bituminous Mixtures. En: *Www.Astm.Org*. Vol. i. p. 1 - 5.

Asphalt Academy. 2009. A guideline for the Design and construction of Bitumen Stabilised Materials.

Badilla, V. G. A. ., E. T. Ávila, y P. A. Duarte. 2011. Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA).

Banco mundial. 2015. No Title. Indicadores. Available from: <http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT/countries/1W?display=graph>

Cajiga, C. J. F. 2009. Responsabilidad Social Empresarial. Available from: http://www.cemefi.org/esr/images/stories/pdf/esr/concepto_esr.pdf

Capitão, S. D., L. G. Picado-Santos, y F. Martinho. 2012. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. *Constr. Build. Mater.* 36:1016-1024.

Cepeda, A. J. B. 2002. Análisis del comportamiento de mezclas asfálticas a fisuración por fatiga mediante la aplicación de un nuevo ensayo dinámico a tracción directa. (U. P. de Cataluña, editor.).

Edwards, Y., Y. Tasdemir, y A. A. Butt. 2010. Energy saving and environmental friendly wax concept for polymer modified mastic asphalt. *Mater. Struct.* 43:123-131.

Fu, P., D. Jones, y J. T. Harvey. 2011. The effects of asphalt binder and granular material characteristics on foamed asphalt mix strength. *Constr. Build. Mater.* 25:1093-1101. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.067>

Garnica, A. P., F. M. Flores, y D. H. Alamilla. 2005. Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas. Sanfandila, Qro.

Guo, N., Z. You, Y. Zhao, Y. Tan, y A. Diab. 2014. Laboratory performance of warm mix asphalt containing recycled asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* 64:141-149. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.002>

He, G.-P., y W.-G. Wong. 2008. Effects of moisture on strength and permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating RAP materials. *Constr. Build. Mater.* 22:30-40.

Jenkins, K. J. 1994. Analysis of a Pavement Layer which has been treated by Single Pass in-situ Stabilisation. University of Natal, Natal, South Africa.

Kristjansdottir, O. 2006. Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving. :117.

López, D. M. G., S. J. F. Mendoza, y G. R. Téllez. 2011. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE SOBRE LAS METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE ECOEFICIENCIA EN PROCESOS PRODUCTIVOS DEL SECTOR TRANSPORTE. Sanfandila, Qro.

Middleton, B., y B. Forfylow. 2008. AN EVALUATION OF WARM MIX ASPHALT PRODUCED WITH THE DOUBLE BARREL GREEN PROCESS. 7th Int. Conf. Manag. Pavement Assets:1-14.

National Asphalt Pavement Association, N. 2007. Design HMA mixtures with high RAP content. A practical guide.

National Asphalt Pavement Association, N. 2012. Warm-Mix Asphalt: Best Practices.

Nicuță, A. M., y R. Andrei. 2012. Environmental Impact Assessment of Flexible Asphalt Pavements Integrating RAP. En: Highway and Bridge Engineering. Editura Societății Academice «Matei - Teiu Botez», Iasi, Romania. p. 117 - 122.

Nicuta, A. M., y R. Frunza. 2013. ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT FOR TRADITIONAL VERSUS RECYCLED ROAD ASPHALT MIXTURES. Environ. Eng. Manag. J. 12:575-585.

Orellana, L. R. 2002. Asfalto Espumado Tecnología y aplicaciones. Infraestruct. vial:26-29.

Padilla, R. A. 2004. ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LAS DEFORMACIONES PLÁSTICAS DE MEZCLAS BITUMINOSAS DENSAS DE LA NORMATIVA MEXICANA MEDIANTE EL ENSAYO DE PISTA.

Reza, A., y M. Fakhri. 2013. Effect of Waveform , Duration and Rest Period on the Resilient Modulus of Asphalt Mixes. Procedia - Soc. BehAv. Sci. 104:79-88. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.100>

Rodriguez, T. R., M. V. M. Castaño, y M. M. Martinez. 2008. Emulsiones Asfálticas. :46. Available from: <http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S365A.pdf>

Rubio, M. C., G. Martínez, L. Baena, y F. Moreno. 2012. Warm Mix Asphalt: An overview. J. Clean. Prod. 24:76-84. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.053>

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, S. 1999. Propósito de la normativa para la infraestructura del transporte. En: INT. Introducción. Sanfandila, Qro. p. 1-9.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, S. 2000a. Calidad de los materiales asfálticos. En: CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES. p. 1-13.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, S. 2000b. Punto de inflamación Cleveland en cementos asfálticos. En: MMP. Métodos de muestreo y pruebas de materiales. Sanfandila, Qro. p. 5-8.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, S. 2002a. Calidad de las mezclas asfálticas para carreteras. En: CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES. p. 1-16.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, S. 2002b. Granulometría de materiales pétreos para mezclas asfálticas. En: MMP. Métodos de muestreo y pruebas de materiales. Sanfandila, Qro. p. 1-7.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, S. 2004. Materiales para bases tratadas. En: CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES. p. 1-21.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, S. 2006. Compactación AASHTO. En: MMP. Métodos de muestreo y pruebas de materiales. Sanfandila, Qro. p. 1-9.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, S. 2008. Calidad de los materiales asfálticos de grado PG. En: CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES. p. 4-9.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, S. 2011a. Subbases y bases. En: CTR. Construcción. Sanfandila, Qro. p. 1-11.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, S. 2011b. Materiales para bases hidráulicas. En: CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES. Sanfandila, Qro. p. 1-11.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, S. 2012. CATÁLOGO DE SECCIONES ESTRUCTURALES DE PAVIMENTOS PARA LAS CARRETERAS DE LA REPÚBLICA MEXICANA. p11.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, S. 2014. Carpetas asfálticas con mezcla en caliente. En: CTR. Construcción. p. 1-29.

Thenoux, G., y A. Jamet. 2002a. Tecnología del asfalto espumado. *Rev. Ing. Construcción* 17:84-92.

Thenoux, G., y A. Jamet. 2002b. Asfalto Espumado : Tecnología y Aplicaciones. :1-3.

Valdés, G., F. Pérez-Jiménez, R. Miró, A. Martínez, y R. Botella. 2011. Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP). *Constr. Build. Mater.* 25:1289-1297.

Venudharan, V., y K. P. Biligiri. 2015. Estimation of phase angles of asphalt mixtures using resilient modulus test. *Constr. Build. Mater.* 82:274-286. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.061>

De Visscher, J., F. Vervaecke, A. Vanelstraete, H. Soenen, T. Tanghe, y P. Redelius. 2008. Asphalt production at reduced temperatures and the impact on asphalt performance. *Road Mater. Pavement Des.* 11:65-81.

Wirtgen, G. 2004. *Wirtgen Manual de Reciclado en Frío*.

Wirtgen, G. 2012. *Wirtgen Cold Recycling Technology*. :1-370.

Yu, X., Y. Wang, y Y. Luo. 2013. Impacts of water content on rheological properties and performance-related behaviors of foamed warm-mix asphalt. *Constr. Build. Mater.* 48:203-209. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.018>

Zhao, S., B. Huang, X. Shu, y M. Woods. 2013. Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement. *Constr. Build. Mater.* 44:92-100. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.010>

7. APÉNDICE

7.1 Determinación de ITS y TSR.

| ID | ESPECIMENES SECOS | | | | | ESPECIMENES SATURADOS | | | | | TSR (%) |
|------|-------------------|-------------|---------------|-------------------------------|------------------|-----------------------|-------------|---------------|-------------------------------|------------------|---------------|
| | PESO (g) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Densidad (Kg/m ³) | Resistencia (Kg) | PESO (g) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Densidad (Kg/m ³) | Resistencia (Kg) | |
| A- 1 | 937.9 | 6.28 | 10.24 | 1,813.46 | 281.52 | 996.6 | 6.27 | 10.21 | 1,941.39 | 107.27 | 38.10% |
| A- 2 | 996.6 | 6.55 | 10.23 | 1,851.14 | 291.92 | 1,000.60 | 6.2 | 10.16 | 1,990.63 | 115.62 | 39.61% |
| A- 3 | 936.4 | 6.26 | 10.21 | 1,827.03 | 309.3 | 990.3 | 6.18 | 10.17 | 1,972.63 | 147.33 | 47.64% |
| B- 1 | 929.1 | 6.26 | 10.15 | 1,834.28 | 122.81 | 998.8 | 6.24 | 10.17 | 1,970.44 | 39.35 | 32.04% |
| B- 2 | 937.5 | 6.26 | 10.23 | 1,822.03 | 122.67 | 1,003.10 | 6.25 | 10.2 | 1,964.15 | 48.96 | 39.92% |
| B- 3 | 937.7 | 6.23 | 10.2 | 1,841.98 | 130.99 | 984.1 | 6.23 | 10.16 | 1,948.38 | 49.31 | 37.65% |
| B- 4 | 936.8 | 6.26 | 10.14 | 1,853.13 | 160.63 | 985.4 | 6.27 | 10.14 | 1,946.16 | 51.55 | 32.09% |
| C- 1 | 974 | 6.26 | 10.21 | 1,900.39 | 180.7 | 1,032.10 | 6.32 | 10.16 | 2,014.32 | 56.71 | 31.39% |
| C- 2 | 975.6 | 6.35 | 10.18 | 1,887.61 | 196.36 | 1,037.50 | 6.31 | 10.2 | 2,012.19 | 82.45 | 41.99% |
| C- 3 | 974.3 | 6.29 | 10.15 | 1,914.34 | 211.86 | 1,040.60 | 6.39 | 10.13 | 2,020.57 | 98.05 | 46.28% |
| D- 1 | 929.6 | 6.32 | 10.25 | 1,782.55 | 109.22 | 1,036.00 | 6.2 | 10.16 | 2,061.06 | 34.69 | 31.76% |
| D- 2 | 917.4 | 6.14 | 10.2 | 1,828.52 | 117.95 | 1,031.40 | 6.67 | 10.2 | 1,892.39 | 39.76 | 33.71% |
| D- 3 | 925.1 | 6.13 | 10.24 | 1,832.48 | 145.86 | 1,043.50 | 6.49 | 10.29 | 1,933.42 | 51.41 | 35.25% |
| E- 1 | 953.6 | 6.49 | 10.19 | 1,801.70 | 173.06 | 993.4 | 6.53 | 10.15 | 1,880.13 | 125.58 | 72.57% |
| E- 2 | 954.4 | 6.54 | 10.2 | 1,785.92 | 183.27 | 997.1 | 6.49 | 10.12 | 1,910.04 | 158.42 | 86.44% |
| E- 3 | 957.7 | 6.52 | 10.21 | 1,794.07 | 220.38 | 1,005.70 | 6.55 | 10.16 | 1,893.87 | 164.16 | 74.49% |
| E- 4 | 959.4 | 6.49 | 10.11 | 1,841.46 | 245.79 | 1,010.30 | 6.54 | 10.09 | 1,931.97 | 165.56 | 67.36% |
| E- 5 | 960.1 | 6.55 | 10.16 | 1,808.00 | 248.59 | 1,002.50 | 6.5 | 10.17 | 1,898.63 | 188.87 | 75.98% |
| E- 6 | 956.2 | 6.66 | 10.19 | 1,760.50 | 250.66 | 1,000.00 | 6.41 | 10.17 | 1,920.48 | 209.08 | 83.41% |
| E- 7 | 958.1 | 6.47 | 10.18 | 1,819.37 | 272.5 | 985.8 | 6.32 | 10.2 | 1,908.89 | 238.07 | 87.37% |
| F- 1 | 962.5 | 6.47 | 10.18 | 1,827.73 | 131.9 | 996.6 | 6.55 | 10.23 | 1,851.14 | 31.06 | 23.54% |
| F- 2 | 928.4 | 6.56 | 10.16 | 1,745.64 | 134.25 | 1,039.40 | 6.57 | 10.27 | 1,909.79 | 34.7 | 25.84% |
| F- 3 | 930.1 | 6.42 | 10.19 | 1,776.46 | 143.14 | 1,021.60 | 6.64 | 10.24 | 1,868.20 | 37.49 | 26.19% |
| F- 4 | 928 | 6.35 | 10.17 | 1,799.05 | 149.03 | 1,031.40 | 6.67 | 10.2 | 1,892.39 | 39.76 | 26.68% |
| F- 5 | 917.4 | 6.25 | 10.23 | 1,785.82 | 152.15 | 995.2 | 6.51 | 10.14 | 1,893.06 | 40.98 | 26.93% |
| F- 6 | 929.3 | 6.45 | 10.18 | 1,770.15 | 150.54 | 978.8 | 6.29 | 10.17 | 1,915.63 | 48.79 | 32.41% |
| F- 7 | 930.6 | 6.32 | 10.18 | 1,809.09 | 168.19 | 1,030.70 | 6.69 | 10.17 | 1,896.59 | 53.52 | 31.82% |
| G- 1 | 929.6 | 6.32 | 10.25 | 1,782.55 | 301.15 | 994.2 | 6.3 | 10.18 | 1,938.87 | 43.8 | 14.55% |
| G- 2 | 932.2 | 6.27 | 10.16 | 1,833.85 | 306.24 | 997.3 | 6.3 | 10.12 | 1,968.04 | 48.96 | 15.99% |
| G- 3 | 928 | 6.34 | 10.18 | 1,798.35 | 304.68 | 996.5 | 6.27 | 10.16 | 1,960.34 | 49 | 16.08% |
| G- 4 | 931.1 | 6.38 | 10.13 | 1,810.78 | 313.93 | 1,000.40 | 6.3 | 10.19 | 1,947.13 | 48.62 | 15.49% |
| G- 5 | 933.9 | 6.4 | 10.17 | 1,796.34 | 319.71 | 999.2 | 6.3 | 10.19 | 1,944.79 | 48.62 | 15.21% |
| G- 6 | 928.2 | 6.45 | 10.15 | 1,778.52 | 318.65 | 994.1 | 6.43 | 10.17 | 1,903.21 | 50.12 | 15.73% |
| G- 7 | 846.2 | 5.87 | 10.17 | 1,774.61 | 352.93 | 995.2 | 6.36 | 10.17 | 1,926.29 | 52.28 | 14.81% |

| ID | ESPECIMENES SECOS | | | | | ESPECIMENES SATURADOS | | | | | TSR (%) |
|------|-------------------|-------------|---------------|------------------|------------------|-----------------------|-------------|---------------|------------------|------------------|---------------|
| | PESO (g) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Densidad (Kg/m3) | Resistencia (Kg) | PESO (g) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Densidad (Kg/m3) | Resistencia (Kg) | |
| G- 8 | 932.4 | 6.32 | 10.18 | 1,812.59 | 333.14 | 986.4 | 6.25 | 10.2 | 1,931.45 | 63.65 | 19.11% |
| G- 9 | 928.5 | 6.39 | 10.16 | 1,792.27 | 356.58 | 986.4 | 6.11 | 10.17 | 1,987.38 | 76.19 | 21.37% |
| H- 1 | 968.5 | 6.53 | 10.17 | 1,825.81 | 166.07 | 1,023.60 | 6.46 | 10.22 | 1,931.55 | 94.56 | 56.94% |
| H- 2 | 967.3 | 6.38 | 10.16 | 1,870.09 | 212.68 | 1,029.30 | 6.39 | 10.25 | 1,952.11 | 101.67 | 47.80% |
| H- 3 | 968.3 | 6.36 | 10.23 | 1,852.30 | 219.88 | 1,022.70 | 6.34 | 10.24 | 1,958.71 | 104.17 | 47.38% |
| H- 4 | 1,030.80 | 6.26 | 10.27 | 1,987.78 | 223.34 | 1,026.10 | 6.41 | 10.26 | 1,936.19 | 118.65 | 53.13% |
| H- 5 | 973.9 | 6.38 | 10.18 | 1,875.46 | 221.87 | 1,025.20 | 6.34 | 10.29 | 1,944.46 | 127.59 | 57.50% |
| H- 6 | 976.5 | 6.38 | 10.18 | 1,880.47 | 223.48 | 1,027.20 | 6.39 | 10.16 | 1,982.79 | 144.24 | 64.54% |
| H- 7 | 976.5 | 6.45 | 10.14 | 1,874.76 | 276.81 | 1,029.70 | 6.37 | 10.14 | 2,001.73 | 153.83 | 55.57% |
| I- 1 | 974.3 | 6.54 | 10.19 | 1,826.74 | 109.29 | 1,045.00 | 6.77 | 10.17 | 1,900.18 | 33.25 | 30.42% |
| I- 2 | 948.8 | 6.6 | 10.18 | 1,766.22 | 116.14 | 1,054.90 | 6.58 | 10.22 | 1,954.31 | 54.15 | 46.63% |
| I- 3 | 953.5 | 6.63 | 10.13 | 1,784.43 | 127.81 | 1,045.40 | 6.53 | 10.17 | 1,970.78 | 54.84 | 42.90% |
| I- 4 | 971.5 | 6.65 | 10.16 | 1,801.95 | 134.75 | 1,051.40 | 6.61 | 10.16 | 1,961.96 | 55.77 | 41.39% |
| I- 5 | 982.9 | 6.63 | 10.15 | 1,832.20 | 176.26 | 1,048.70 | 6.62 | 10.19 | 1,942.47 | 56.3 | 31.94% |
| I- 6 | 971 | 6.22 | 10.2 | 1,910.46 | 203.36 | 1,067.80 | 6.58 | 10.18 | 1,993.79 | 58.25 | 28.64% |
| I- 7 | 967.7 | 6.2 | 10.17 | 1,921.40 | 244.22 | 1,052.20 | 6.42 | 10.26 | 1,982.34 | 71.08 | 29.11% |
| I- 8 | 971.1 | 6.49 | 10.2 | 1,831.17 | 253.05 | 1,051.10 | 6.62 | 10.17 | 1,954.58 | 69.54 | 27.48% |
| J- 1 | 928 | 6.34 | 10.18 | 1,798.35 | 217.63 | 1,000.30 | 6.03 | 10.22 | 2,022.19 | 63.31 | 29.09% |
| J- 2 | 982.9 | 6.63 | 10.15 | 1,832.20 | 271.34 | 1,063.30 | 6.52 | 10.22 | 1,988.00 | 60.9 | 22.44% |
| J- 3 | 981.2 | 6.41 | 10.2 | 1,873.31 | 294.4 | 1,066.90 | 6.5 | 10.23 | 1,996.96 | 62.59 | 21.26% |
| J- 4 | 933.9 | 6.41 | 10.21 | 1,779.51 | 297.29 | 1,064.30 | 6.42 | 10.15 | 2,048.84 | 68.66 | 23.09% |
| J- 5 | 971.5 | 6.41 | 10.18 | 1,862.08 | 314.91 | 1,058.50 | 6.46 | 10.26 | 1,981.86 | 69.07 | 21.93% |
| J- 6 | 974 | 6.38 | 10.21 | 1,864.65 | 328.24 | 1,063.10 | 6.43 | 10.31 | 1,980.41 | 80.83 | 24.62% |
| J- 7 | 974.4 | 6.26 | 10.15 | 1,923.72 | 352.06 | 1,062.60 | 6.54 | 10.18 | 1,996.21 | 97.67 | 27.74% |
| J- 8 | 978.9 | 6.33 | 10.17 | 1,903.72 | 355.57 | 1,064.10 | 6.47 | 10.16 | 2,028.62 | 101.3 | 28.49% |
| K- 1 | 927.6 | 6.38 | 10.15 | 1,796.88 | 167.9 | 989.8 | 6.34 | 10.29 | 1,877.32 | 99.68 | 59.37% |
| K- 2 | 933.6 | 6.51 | 10.28 | 1,727.84 | 169.46 | 989.6 | 6.35 | 10.18 | 1,914.70 | 103.01 | 60.79% |
| K- 3 | 934.6 | 6.52 | 10.16 | 1,768.08 | 174.34 | 984.7 | 6.23 | 10.2 | 1,934.31 | 112.98 | 64.80% |
| K- 4 | 928.4 | 6.26 | 10.21 | 1,811.42 | 182.32 | 989 | 6.4 | 10.15 | 1,909.83 | 113.72 | 62.37% |
| K- 5 | 896.6 | 6 | 10.19 | 1,832.35 | 195.7 | 987.2 | 6.31 | 10.22 | 1,907.15 | 121.01 | 61.83% |
| K- 6 | 927.6 | 6.43 | 10.18 | 1,772.41 | 190.74 | 991.9 | 6.39 | 10.21 | 1,895.94 | 137.15 | 71.90% |
| K- 7 | 933.9 | 6.41 | 10.21 | 1,779.51 | 201.11 | 989.3 | 6.36 | 10.14 | 1,926.22 | 150.04 | 74.61% |
| K- 8 | 934.7 | 6.43 | 10.19 | 1,782.47 | 201.67 | 987.3 | 6.42 | 10.14 | 1,904.36 | 132.66 | 65.78% |
| L- 1 | 918.9 | 6.29 | 10.27 | 1,763.55 | 128.85 | 1,002.30 | 6.46 | 10.19 | 1,902.51 | 47.42 | 36.80% |
| L- 2 | 932.7 | 6.43 | 10.19 | 1,778.66 | 128.62 | 1,006.30 | 6.47 | 10.22 | 1,895.97 | 55.07 | 42.82% |
| L- 3 | 930 | 6.51 | 10.18 | 1,755.16 | 127.17 | 995.1 | 6.39 | 10.21 | 1,902.06 | 57.41 | 45.15% |
| L- 4 | 914.4 | 6.55 | 10.17 | 1,718.55 | 148.38 | 1,007.20 | 6.52 | 10.21 | 1,886.80 | 59.39 | 40.03% |
| L- 5 | 928.6 | 6.5 | 10.14 | 1,769.09 | 153.12 | 999.7 | 6.41 | 10.18 | 1,916.14 | 66.97 | 43.73% |
| L- 6 | 930.6 | 6.52 | 10.2 | 1,746.73 | 154.1 | 1,001.70 | 6.54 | 10.17 | 1,885.51 | 66.48 | 43.14% |

| ID | ESPECIMENES SECOS | | | | | ESPECIMENES SATURADOS | | | | | TSR (%) |
|------|-------------------|-------------|---------------|------------------|------------------|-----------------------|-------------|---------------|------------------|------------------|---------------|
| | PESO (g) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Densidad (Kg/m3) | Resistencia (Kg) | PESO (g) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Densidad (Kg/m3) | Resistencia (Kg) | |
| L- 7 | 927.6 | 6.37 | 10.16 | 1,796.16 | 171.21 | 1,000.20 | 6.41 | 10.21 | 1,905.84 | 75.52 | 44.11% |
| L- 8 | 925.5 | 6.56 | 10.22 | 1,719.81 | 195.54 | 982.3 | 6.37 | 10.17 | 1,898.34 | 80.3 | 41.07% |
| M- 1 | 915.6 | 6.06 | 10.2 | 1,849.03 | 168.33 | 1,013.40 | 6.33 | 10.19 | 1,963.08 | 40.33 | 23.96% |
| M- 2 | 952.9 | 6.27 | 10.23 | 1,849.01 | 166.27 | 1,012.80 | 6.35 | 10.21 | 1,948.09 | 56.17 | 33.78% |
| M- 3 | 938.7 | 6.25 | 10.17 | 1,848.91 | 171.87 | 1,010.90 | 6.24 | 10.18 | 1,990.39 | 104.83 | 60.99% |
| M- 4 | 944.1 | 6.2 | 10.24 | 1,849.00 | 180.27 | 1,010.40 | 6.24 | 10.24 | 1,966.16 | 115.61 | 64.13% |
| M- 5 | 949.9 | 6.25 | 10.23 | 1,849.08 | 187.14 | 1,036.60 | 6.56 | 10.19 | 1,937.62 | 124.52 | 66.54% |
| M- 6 | 967.7 | 6.33 | 10.26 | 1,849.07 | 192.24 | 1,013.40 | 6.22 | 10.23 | 1,982.21 | 142.26 | 74.00% |
| M- 7 | 940.4 | 6.2 | 10.22 | 1,848.97 | 203.61 | 1,038.30 | 6.5 | 10.24 | 1,939.63 | 153.97 | 75.62% |
| M- 8 | 930.6 | 6.22 | 10.15 | 1,849.06 | 206.83 | 1,035.20 | 6.54 | 10.13 | 1,963.98 | 193.96 | 93.78% |
| M- 9 | 999.3 | 6.64 | 10.18 | 1,849.02 | 223.19 | 1,039.60 | 6.55 | 10.16 | 1,957.71 | 177.45 | 79.51% |
| N- 1 | 966.7 | 6.2 | 10.18 | 1,915.64 | 187.93 | 1,043.60 | 6.32 | 10.21 | 2,016.86 | 24.19 | 12.87% |
| N- 2 | 965.4 | 6.19 | 10.16 | 1,923.71 | 274.63 | 1,042.30 | 6.66 | 10.18 | 1,922.80 | 26.86 | 9.78% |
| N- 3 | 972.3 | 6.25 | 10.2 | 1,903.84 | 197.48 | 1,039.60 | 6.31 | 10.21 | 2,012.31 | 48.45 | 24.53% |
| N- 4 | 958.9 | 6.26 | 10.17 | 1,885.68 | 207.55 | 1,039.00 | 6.18 | 10.24 | 2,041.44 | 53.43 | 25.74% |
| N- 5 | 965.6 | 6.25 | 10.16 | 1,905.64 | 232.67 | 1,060.90 | 6.5 | 10.22 | 1,989.62 | 65 | 27.94% |
| N- 6 | 959.8 | 6.08 | 5.21 | 7,404.77 | 469.7 | 1,033.70 | 6.18 | 10.19 | 2,051.01 | 72.7 | 15.48% |
| N- 7 | 966.5 | 6.3 | 10.16 | 1,892.27 | 235.7 | 1,057.80 | 6.62 | 10.22 | 1,947.84 | 73.05 | 30.99% |
| O- 1 | 935.5 | 6.27 | 10.18 | 1,833.12 | 189.9 | 1,011.30 | 6.41 | 10.12 | 1,961.42 | 78.59 | 41.39% |
| O- 2 | 939.1 | 6.4 | 10.17 | 1,806.34 | 191.82 | 992.8 | 6.17 | 10.22 | 1,961.48 | 103.13 | 53.76% |
| O- 3 | 934.5 | 6.28 | 10.18 | 1,828.24 | 199.37 | 1,001.10 | 6.32 | 10.14 | 1,961.53 | 113.65 | 57.01% |
| O- 4 | 932.6 | 6.17 | 10.15 | 1,868.05 | 228.44 | 987.9 | 6.2 | 10.17 | 1,961.51 | 121.28 | 53.09% |
| O- 5 | 937.1 | 6.22 | 10.18 | 1,851.02 | 230.05 | 982.8 | 6.18 | 10.16 | 1,961.55 | 125.94 | 54.74% |
| O- 6 | 935 | 6.33 | 10.19 | 1,811.21 | 254.05 | 985.2 | 6.22 | 10.19 | 1,942.21 | 128.86 | 50.72% |
| O- 7 | 939.8 | 6.24 | 10.15 | 1,861.35 | 264.48 | 988.7 | 6.24 | 10.13 | 1,965.94 | 132.5 | 50.10% |
| O- 8 | 928.6 | 6.34 | 10.19 | 1,795.98 | 291.5 | 992.8 | 6.29 | 10.16 | 1,946.86 | 149.78 | 51.38% |
| O- 9 | 929.1 | 6.28 | 10.21 | 1,807.01 | 308.31 | 997.6 | 6.33 | 10.17 | 1,940.09 | 151.92 | 49.28% |
| P- 1 | 911.3 | 6.45 | 10.26 | 1,708.90 | 82.54 | 997.3 | 6.33 | 10.16 | 1,943.32 | 56.62 | 68.60% |
| P- 2 | 921.5 | 6.52 | 10.18 | 1,736.45 | 131.68 | 986.8 | 6.42 | 10.17 | 1,892.18 | 56.57 | 42.96% |
| P- 3 | 924.7 | 6.6 | 10.14 | 1,734.97 | 139.92 | 990.5 | 6.43 | 10.18 | 1,892.60 | 68.35 | 48.85% |
| P- 4 | 923.9 | 6.66 | 10.2 | 1,697.70 | 141.67 | 987.7 | 6.66 | 10.2 | 1,814.93 | 66.63 | 47.03% |
| P- 5 | 922.6 | 6.45 | 10.18 | 1,757.39 | 198.07 | 992.2 | 6.57 | 10.16 | 1,862.76 | 68.58 | 34.63% |
| P- 6 | 924.7 | 6.36 | 10.19 | 1,782.81 | 201.48 | 994.7 | 6.52 | 10.18 | 1,874.39 | 69.76 | 34.62% |
| P- 7 | 919.5 | 6.41 | 10.17 | 1,765.88 | 215.47 | 982.6 | 6.46 | 10.13 | 1,887.28 | 71.55 | 33.21% |
| Q- 1 | 981.2 | 6.41 | 10.2 | 1,873.31 | 208.47 | 1,015.00 | 6.46 | 10.24 | 1,907.85 | 94.37 | 45.27% |
| Q- 2 | 970.8 | 6.3 | 10.21 | 1,882.12 | 226.46 | 1,017.40 | 6.36 | 10.21 | 1,953.86 | 109.76 | 48.47% |
| Q- 3 | 967.7 | 6.48 | 10.18 | 1,834.76 | 227.12 | 1,033.00 | 6.4 | 10.2 | 1,975.29 | 111.57 | 49.12% |

| ID | ESPECIMENES SECOS | | | | | ESPECIMENES SATURADOS | | | | | TSR (%) |
|------|-------------------|-------------|---------------|------------------|------------------|-----------------------|-------------|---------------|------------------|------------------|---------------|
| | PESO (g) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Densidad (Kg/m3) | Resistencia (Kg) | PESO (g) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Densidad (Kg/m3) | Resistencia (Kg) | |
| Q- 4 | 970.8 | 6.21 | 10.21 | 1,909.40 | 242.05 | 1,028.60 | 6.43 | 10.19 | 1,961.54 | 112.75 | 46.58% |
| Q- 5 | 972.7 | 6.49 | 10.24 | 1,819.89 | 273.98 | 1,023.00 | 6.4 | 10.21 | 1,952.33 | 119.42 | 43.59% |
| Q- 6 | 979.5 | 6.39 | 10.12 | 1,905.69 | 255.82 | 1,027.30 | 6.42 | 10.17 | 1,969.84 | 135.45 | 52.95% |
| Q- 7 | 966.7 | 6.32 | 10.19 | 1,875.58 | 255.26 | 1,044.30 | 6.41 | 10.17 | 2,005.56 | 169.18 | 66.28% |
| Q- 8 | 967.2 | 6.32 | 10.18 | 1,880.24 | 282.2 | 1,035.50 | 6.41 | 10.14 | 2,000.44 | 177.69 | 62.96% |
| Q- 9 | 982.2 | 6.4 | 10.17 | 1,889.24 | 303.72 | 1,024.60 | 6.43 | 10.13 | 1,977.13 | 198.07 | 65.22% |
| R- 1 | 967.9 | 6.45 | 10.15 | 1,854.59 | 186.74 | 1,049.30 | 6.6 | 10.26 | 1,922.96 | 38.41 | 20.57% |
| R- 2 | 961 | 6.64 | 10.14 | 1,792.21 | 184.67 | 1,052.30 | 6.48 | 10.29 | 1,952.74 | 44.47 | 24.08% |
| R- 3 | 965.8 | 6.43 | 10.23 | 1,827.41 | 115.47 | 1,043.40 | 6.47 | 10.28 | 1,942.99 | 47.71 | 41.32% |
| R- 4 | 978.7 | 6.34 | 10.18 | 1,896.60 | 181.36 | 1,036.70 | 6.57 | 10.28 | 1,901.13 | 48.53 | 26.76% |
| R- 5 | 970.1 | 6.55 | 10.16 | 1,826.83 | 197 | 1,023.00 | 6.13 | 10.16 | 2,058.44 | 58.47 | 29.68% |
| R- 6 | 974 | 6.38 | 10.21 | 1,864.65 | 215.63 | 1,040.10 | 6.47 | 10.23 | 1,955.82 | 58.16 | 26.97% |
| R- 7 | 967.4 | 6.21 | 10.15 | 1,925.27 | 241 | 1,062.20 | 6.45 | 10.22 | 2,007.50 | 61.56 | 25.54% |
| S- 1 | 934.9 | 6.48 | 10.17 | 1,776.06 | 159.46 | 976.5 | 6.45 | 10.18 | 1,860.06 | 72.89 | 45.71% |
| S- 2 | 933.8 | 6.45 | 10.17 | 1,782.22 | 160.99 | 978.6 | 6.44 | 10.16 | 1,874.31 | 77.12 | 47.90% |
| S- 3 | 933.9 | 6.45 | 10.17 | 1,782.42 | 164.96 | 1,009.60 | 6.51 | 10.19 | 1,901.65 | 84.7 | 51.34% |
| S- 4 | 932.4 | 6.47 | 10.19 | 1,767.09 | 168.86 | 994.3 | 6.44 | 10.21 | 1,885.78 | 87.03 | 51.54% |
| S- 5 | 938.8 | 6.32 | 10.21 | 1,814.32 | 188.65 | 991.5 | 6.39 | 10.2 | 1,898.90 | 95.78 | 50.77% |
| S- 6 | 934.3 | 6.4 | 10.16 | 1,800.65 | 193.61 | 992.3 | 6.38 | 10.21 | 1,899.68 | 97.43 | 50.32% |
| S- 7 | 940.8 | 6.34 | 11.17 | 1,514.30 | 193.2 | 995.2 | 6.29 | 10.15 | 1,955.41 | 105.93 | 54.83% |
| S- 8 | 924.5 | 6.68 | 10.13 | 1,717.20 | 153.76 | 1,005.50 | 6.34 | 10.16 | 1,956.21 | 117.91 | 76.69% |
| T- 1 | 934.4 | 6.44 | 10.17 | 1,786.14 | 142.97 | 990.5 | 6.58 | 10.19 | 1,845.82 | 60.52 | 42.33% |
| T- 2 | 924.4 | 6.52 | 10.17 | 1,745.34 | 142.79 | 977.9 | 6.51 | 10.09 | 1,878.63 | 67.32 | 47.15% |
| T- 3 | 923.1 | 6.7 | 10.16 | 1,699.40 | 141.38 | 991.8 | 6.44 | 10.16 | 1,899.59 | 69.97 | 49.49% |
| T- 4 | 927.4 | 6.44 | 10.19 | 1,765.81 | 185.5 | 1,002.00 | 6.51 | 10.21 | 1,879.95 | 70.44 | 37.97% |
| T- 5 | 928.2 | 6.41 | 10.17 | 1,782.59 | 201.1 | 1,008.60 | 6.47 | 10.18 | 1,915.27 | 75.04 | 37.31% |
| T- 6 | 929.6 | 6.43 | 10.15 | 1,786.75 | 209.64 | 1,003.70 | 6.42 | 10.2 | 1,913.28 | 79.44 | 37.90% |
| T- 7 | 923.7 | 6.42 | 10.18 | 1,767.71 | 216.51 | 1,004.60 | 6.34 | 10.22 | 1,931.58 | 90.73 | 41.90% |
| T- 8 | 932.4 | 6.49 | 10.17 | 1,768.58 | 181.28 | 986.6 | 6.57 | 10.2 | 1,837.75 | 93.93 | 51.82% |
| U- 1 | 981.5 | 6.23 | 10.18 | 1,935.61 | 288.74 | 1,036.50 | 6.44 | 10.16 | 1,985.21 | 81.1 | 28.09% |
| U- 2 | 975.9 | 6.46 | 10.15 | 1,867.03 | 226.12 | 1,044.50 | 6.4 | 10.22 | 1,989.47 | 113.74 | 50.30% |
| U- 3 | 981 | 6.35 | 10.15 | 1,909.30 | 282.5 | 1,036.70 | 6.31 | 10.21 | 2,006.70 | 119.51 | 42.30% |
| U- 4 | 959.2 | 6.34 | 10.17 | 1,862.47 | 258.19 | 1,035.90 | 6.38 | 10.17 | 1,998.78 | 121.87 | 47.20% |
| U- 5 | 960.2 | 6.22 | 10.16 | 1,904.12 | 349.86 | 1,043.20 | 6.45 | 10.22 | 1,971.59 | 126.27 | 36.09% |
| U- 6 | 967.1 | 6.41 | 10.18 | 1,853.65 | 248.74 | 1,038.60 | 6.4 | 10.17 | 1,997.73 | 134.28 | 53.98% |
| U- 7 | 976.4 | 6.25 | 10.23 | 1,900.67 | 231.08 | 1,042.10 | 6.38 | 10.16 | 2,014.70 | 150.88 | 65.30% |

| ID | ESPECIMENES SECOS | | | | | ESPECIMENES SATURADOS | | | | | TSR (%) |
|------|-------------------|-------------|---------------|------------------|------------------|-----------------------|-------------|---------------|------------------|------------------|---------------|
| | PESO (g) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Densidad (Kg/m3) | Resistencia (Kg) | PESO (g) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Densidad (Kg/m3) | Resistencia (Kg) | |
| V- 1 | 960.7 | 6.54 | 10.18 | 1,804.78 | 154.72 | 1,034.60 | 6.47 | 10.17 | 1,968.50 | 43.48 | 28.11% |
| V- 2 | 935.1 | 6.03 | 10.21 | 1,894.08 | 190.97 | 1,046.40 | 6.45 | 10.26 | 1,962.25 | 56.6 | 29.64% |
| V- 3 | 955.8 | 6.55 | 10.01 | 1,854.25 | 222.17 | 1,041.30 | 6.39 | 10.34 | 1,940.64 | 62.99 | 28.35% |
| V- 4 | 964 | 6.42 | 10.23 | 1,826.84 | 225.75 | 1,019.30 | 6.47 | 10.25 | 1,909.24 | 63.54 | 28.15% |
| V- 5 | 940.6 | 6.08 | 10.15 | 1,911.96 | 244.47 | 1,058.00 | 6.62 | 10.25 | 1,936.82 | 63.63 | 26.03% |
| V- 6 | 933.9 | 6 | 10.17 | 1,916.10 | 274.52 | 1,004.90 | 6.09 | 10.2 | 2,019.37 | 85.42 | 31.12% |
| V- 7 | 967.1 | 6.39 | 10.19 | 1,855.80 | 266.85 | 1,013.30 | 6.13 | 10.2 | 2,022.96 | 96.51 | 36.17% |

7.2 Determinación de módulo resiliente (MR).

| ESPÉCIMEN | ALTURA (cm) | CARGA MÁXIMA (Kg) | FIN DE CARGA (Kg) | DH0 (mm) | DH FIN DE CARGA (mm) | DH ÚLTIMA (mm) | AMPLITUD DE CARGA (Kg) | DH INSTANTÁNEA (mm) | DH TOTAL (mm) | MR INSTANTÁNEO (MPa) | MR TOTAL (MPa) |
|-----------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|
| A- 1- I | 63.1 | 22.28 | 2.11 | 0.5014 | 0.5001 | 0.5 | 197.8 | 0.0013 | 0.0014 | 1495.04 | 1388.25 |
| A- 1- II | 63.1 | 22.38 | 2.02 | 0.50155 | 0.50005 | 0.5 | 199.73 | 0.0015 | 0.00155 | 1308.31 | 1266.1 |
| A- 1- III | 63.1 | 22.31 | 2.01 | 0.50145 | 0.5001 | 0.50005 | 199.14 | 0.00135 | 0.0014 | 1449.37 | 1397.6 |
| A- 1- IV | 63.1 | 22.29 | 2.19 | 0.5014 | 0.50005 | 0.50005 | 197.21 | 0.00135 | 0.00135 | 1435.37 | 1435.37 |
| A- 1- V | 63.1 | 22.17 | 2.13 | 0.50135 | 0.5001 | 0.49995 | 196.62 | 0.00125 | 0.0014 | 1545.55 | 1379.96 |
| A- 2- I | 62.7 | 76.31 | 6.97 | 0.50795 | 0.50075 | 0.5002 | 680.26 | 0.0072 | 0.00775 | 934.26 | 867.95 |
| A- 2- II | 62.7 | 76.36 | 7 | 0.5081 | 0.5013 | 0.50065 | 680.41 | 0.0068 | 0.00745 | 989.43 | 903.1 |
| A- 2- III | 62.7 | 76.45 | 6.96 | 0.50875 | 0.5017 | 0.5011 | 681.74 | 0.00705 | 0.00765 | 956.21 | 881.21 |
| A- 2- IV | 62.7 | 76.27 | 6.96 | 0.50905 | 0.50185 | 0.5014 | 679.96 | 0.0072 | 0.00765 | 933.85 | 878.92 |
| A- 2- V | 62.7 | 76.52 | 6.86 | 0.50915 | 0.50225 | 0.50175 | 683.37 | 0.0069 | 0.0074 | 979.33 | 913.16 |
| A- 3- I | 61.8 | 55.37 | 5.09 | 0.5031 | 0.50015 | 0.4999 | 493.25 | 0.00295 | 0.0032 | 1677.46 | 1546.41 |
| A- 3- II | 61.8 | 55.35 | 5.12 | 0.5029 | 0.50005 | 0.4998 | 492.81 | 0.00285 | 0.0031 | 1734.75 | 1594.86 |
| A- 3- III | 61.8 | 55.26 | 5.05 | 0.5033 | 0.5002 | 0.49985 | 492.51 | 0.0031 | 0.00345 | 1593.9 | 1432.2 |
| A- 3- IV | 61.8 | 55.15 | 4.96 | 0.5028 | 0.5001 | 0.49985 | 492.37 | 0.0027 | 0.00295 | 1829.48 | 1674.44 |
| A- 3- V | 61.8 | 55.28 | 5.09 | 0.50355 | 0.50005 | 0.4998 | 492.37 | 0.0035 | 0.00375 | 1411.31 | 1317.22 |
| A- 4- I | 62.7 | 76.46 | 7.09 | 0.50735 | 0.5009 | 0.5004 | 680.55 | 0.00645 | 0.00695 | 1043.34 | 968.28 |
| A- 4- II | 62.7 | 76.63 | 7.02 | 0.5078 | 0.501 | 0.5008 | 682.92 | 0.0068 | 0.007 | 993.08 | 964.71 |
| A- 4- III | 62.7 | 76.54 | 6.92 | 0.50815 | 0.50145 | 0.50115 | 682.92 | 0.0067 | 0.007 | 1007.91 | 964.71 |
| A- 4- IV | 62.7 | 76.48 | 7.12 | 0.5086 | 0.50205 | 0.50155 | 680.41 | 0.00655 | 0.00705 | 1027.19 | 954.34 |
| A- 4- V | 62.7 | 76.42 | 7.17 | 0.5091 | 0.50255 | 0.5019 | 679.37 | 0.00655 | 0.0072 | 1025.63 | 933.04 |
| B- 1- I | 62.3 | 21.63 | 1.48 | 0.50355 | 0.5007 | 0.50025 | 197.66 | 0.00285 | 0.0033 | 690.19 | 596.07 |
| B- 1- II | 62.3 | 21.72 | 1.48 | 0.50365 | 0.50085 | 0.50035 | 198.54 | 0.0028 | 0.0033 | 705.67 | 598.75 |

| ESPÉCIMEN | ALTURA (cm) | CARGA MÁXIMA (Kg) | FIN DE CARGA (Kg) | DH0 (mm) | DH FIN DE CARGA (mm) | DH ÚLTIMA (mm) | AMPLITUD DE CARGA (Kg) | DH INSTANTÁNEA (mm) | DH TOTAL (mm) | MR INSTANTÁNEO (MPa) | MR TOTAL (MPa) |
|-------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|
| B - 1 - III | 62.3 | 21.58 | 1.39 | 0.50395 | 0.5008 | 0.5004 | 198.1 | 0.00315 | 0.00355 | 625.86 | 555.34 |
| B - 1 - IV | 62.3 | 21.73 | 1.5 | 0.504 | 0.5012 | 0.50065 | 198.54 | 0.0028 | 0.00335 | 705.67 | 589.82 |
| B - 1 - V | 62.3 | 21.7 | 1.47 | 0.50415 | 0.5013 | 0.50085 | 198.54 | 0.00285 | 0.0033 | 693.29 | 598.75 |
| B - 2 - I | 62.7 | 17.23 | 2.17 | 0.5041 | 0.5007 | 0.50035 | 147.65 | 0.0034 | 0.00375 | 429.42 | 389.34 |
| B - 2 - II | 62.7 | 17.32 | 2.07 | 0.50455 | 0.50095 | 0.50055 | 149.57 | 0.0036 | 0.004 | 410.84 | 369.76 |
| B - 2 - III | 62.7 | 17.24 | 2.17 | 0.50475 | 0.5012 | 0.50075 | 147.8 | 0.00355 | 0.004 | 411.69 | 365.37 |
| B - 2 - IV | 62.7 | 17.17 | 2.17 | 0.5047 | 0.5014 | 0.501 | 147.06 | 0.0033 | 0.0037 | 440.66 | 393.02 |
| B - 2 - V | 62.7 | 17.24 | 2.19 | 0.5051 | 0.5017 | 0.5012 | 147.65 | 0.0034 | 0.0039 | 429.42 | 374.36 |
| B - 3 - I | 62.7 | 16.34 | 1.78 | 0.50175 | 0.49985 | 0.4999 | 142.77 | 0.0019 | 0.00185 | 743.02 | 763.1 |
| B - 3 - II | 62.7 | 16.31 | 1.71 | 0.5019 | 0.50015 | 0.50025 | 143.21 | 0.00175 | 0.00165 | 809.22 | 858.26 |
| B - 3 - III | 62.7 | 16.43 | 1.72 | 0.502 | 0.50025 | 0.5003 | 144.25 | 0.00175 | 0.0017 | 815.07 | 839.04 |
| B - 3 - IV | 62.7 | 16.43 | 1.45 | 0.5022 | 0.50115 | 0.50085 | 146.91 | 0.00105 | 0.00135 | 1383.53 | 1076.08 |
| B - 3 - V | 62.7 | 16.34 | 1.66 | 0.50375 | 0.50135 | 0.5011 | 143.95 | 0.0024 | 0.00265 | 593.1 | 537.15 |
| B - 4 - I | 62.1 | 21.13 | 0.82 | 0.504 | 0.50085 | 0.50025 | 199.28 | 0.00315 | 0.00375 | 631.63 | 530.57 |
| B - 4 - II | 62.1 | 20.95 | 0.76 | 0.5045 | 0.5009 | 0.5006 | 198.1 | 0.0036 | 0.0039 | 549.39 | 507.13 |
| B - 4 - III | 62.1 | 21.01 | 0.76 | 0.50465 | 0.50125 | 0.50085 | 198.69 | 0.0034 | 0.0038 | 583.45 | 522.03 |
| B - 4 - IV | 62.1 | 20.98 | 0.92 | 0.5048 | 0.50185 | 0.50115 | 196.77 | 0.00295 | 0.00365 | 665.94 | 538.22 |
| B - 4 - V | 62.1 | 21.07 | 0.68 | 0.50505 | 0.5016 | 0.5014 | 200.02 | 0.00345 | 0.00365 | 578.84 | 547.13 |
| C - 1 - I | 63.9 | 33.08 | 2.76 | 0.5031 | 0.50025 | 0.5001 | 297.37 | 0.00285 | 0.003 | 1012.39 | 961.77 |
| C - 1 - II | 63.9 | 33.17 | 2.7 | 0.5031 | 0.50015 | 0.50025 | 298.85 | 0.00295 | 0.00285 | 982.94 | 1017.43 |
| C - 1 - III | 63.9 | 33.11 | 2.87 | 0.5032 | 0.5004 | 0.5001 | 296.63 | 0.0028 | 0.0031 | 1027.9 | 928.43 |
| C - 1 - IV | 63.9 | 33.18 | 2.79 | 0.50335 | 0.5005 | 0.50025 | 298.11 | 0.00285 | 0.0031 | 1014.91 | 933.06 |
| C - 1 - V | 63.9 | 33.09 | 2.64 | 0.50315 | 0.50045 | 0.50025 | 298.7 | 0.0027 | 0.0029 | 1073.42 | 999.39 |
| C - 2 - I | 63.7 | 32.13 | 2.34 | 0.5037 | 0.5006 | 0.5004 | 292.19 | 0.0031 | 0.0033 | 917.41 | 861.81 |
| C - 2 - II | 63.7 | 32.14 | 2.43 | 0.50415 | 0.5012 | 0.5008 | 291.45 | 0.00295 | 0.00335 | 961.61 | 846.79 |
| C - 2 - III | 63.7 | 32.2 | 2.31 | 0.5045 | 0.50145 | 0.50125 | 293.23 | 0.00305 | 0.00325 | 935.75 | 878.17 |

| ESPÉCIMEN | ALTURA (cm) | CARGA MÁXIMA (Kg) | FIN DE CARGA (Kg) | DH0 (mm) | DH FIN DE CARGA (mm) | DH ÚLTIMA (mm) | AMPLITUD DE CARGA (Kg) | DH INSTANTÁNEA (mm) | DH TOTAL (mm) | MR INSTANTÁNEO (MPa) | MR TOTAL (MPa) |
|-----------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|
| C- 2- IV | 63.7 | 32.28 | 2.45 | 0.50495 | 0.5021 | 0.50165 | 292.64 | 0.00285 | 0.0033 | 999.4 | 863.12 |
| C- 2- V | 63.7 | 32.22 | 2.31 | 0.5054 | 0.5019 | 0.502 | 293.38 | 0.0035 | 0.0034 | 815.85 | 839.85 |
| C- 3- I | 64.2 | 22.31 | 1.56 | 0.50255 | 0.5003 | 0.50005 | 203.57 | 0.00225 | 0.0025 | 873.77 | 786.39 |
| C- 3- II | 64.2 | 22.29 | 1.66 | 0.5027 | 0.5005 | 0.5 | 202.39 | 0.0022 | 0.0027 | 888.43 | 723.91 |
| C- 3- III | 64.2 | 22.34 | 1.75 | 0.5028 | 0.50055 | 0.50005 | 201.95 | 0.00225 | 0.00275 | 866.79 | 709.19 |
| C- 3- IV | 64.2 | 22.43 | 1.75 | 0.50285 | 0.50055 | 0.50005 | 202.83 | 0.0023 | 0.0028 | 851.67 | 699.58 |
| C- 3- V | 64.2 | 22.28 | 1.8 | 0.5029 | 0.5005 | 0.50005 | 200.91 | 0.0024 | 0.00285 | 808.44 | 680.79 |
| D- 1- I | 65.1 | 16.73 | 1.42 | 0.50185 | 0.5 | 0.50005 | 150.17 | 0.00185 | 0.0018 | 773.05 | 794.53 |
| D- 1- II | 65.1 | 16.83 | 1.44 | 0.50195 | 0.5001 | 0.5001 | 151.05 | 0.00185 | 0.00185 | 777.62 | 777.62 |
| D- 1- III | 65.1 | 16.88 | 1.33 | 0.5018 | 0.50015 | 0.5001 | 152.53 | 0.00165 | 0.0017 | 880.43 | 854.53 |
| D- 1- IV | 65.1 | 16.73 | 1.38 | 0.502 | 0.5001 | 0.5001 | 150.61 | 0.0019 | 0.0019 | 754.93 | 754.93 |
| D- 1- V | 65.1 | 16.76 | 1.42 | 0.5019 | 0.50015 | 0.5002 | 150.46 | 0.00175 | 0.0017 | 818.84 | 842.92 |
| D- 2- I | 66.1 | 16.34 | 1.56 | 0.50205 | 0.50035 | 0.5001 | 144.99 | 0.0017 | 0.00195 | 799.96 | 697.4 |
| D- 2- II | 66.1 | 16.28 | 1.5 | 0.5022 | 0.5003 | 0.5002 | 144.99 | 0.0019 | 0.002 | 715.76 | 679.97 |
| D- 2- III | 66.1 | 16.29 | 1.6 | 0.5023 | 0.5006 | 0.50035 | 144.1 | 0.0017 | 0.00195 | 795.07 | 693.14 |
| D- 2- IV | 66.1 | 16.31 | 1.42 | 0.50255 | 0.5006 | 0.50045 | 146.02 | 0.00195 | 0.0021 | 702.39 | 652.22 |
| D- 2- V | 66.1 | 16.34 | 1.45 | 0.5026 | 0.5007 | 0.50065 | 146.02 | 0.0019 | 0.00195 | 720.87 | 702.39 |
| D- 3- I | 63.2 | 11.09 | 1.13 | 0.50065 | 0.50015 | 0.5001 | 97.64 | 0.0005 | 0.00055 | 1915.82 | 1741.65 |
| D- 3- II | 63.2 | 10.98 | 1.04 | 0.5006 | 0.5001 | 0.50015 | 97.5 | 0.0005 | 0.00045 | 1912.91 | 2125.46 |
| D- 3- III | 63.2 | 10.89 | 1.06 | 0.5006 | 0.5001 | 0.5001 | 96.46 | 0.0005 | 0.0005 | 1892.58 | 1892.58 |
| D- 3- IV | 63.2 | 10.91 | 1.06 | 0.50085 | 0.50015 | 0.5002 | 96.61 | 0.0007 | 0.00065 | 1353.92 | 1458.07 |
| D- 3- V | 63.2 | 11.01 | 0.98 | 0.5007 | 0.50015 | 0.5001 | 98.38 | 0.00055 | 0.0006 | 1754.84 | 1608.61 |
| D- 4- I | 63.2 | 16.12 | 1.16 | 0.5017 | 0.5001 | 0.49985 | 146.76 | 0.0016 | 0.00185 | 899.85 | 778.25 |
| D- 4- II | 63.2 | 16.05 | 0.98 | 0.50175 | 0.5 | 0.4998 | 147.8 | 0.00175 | 0.00195 | 828.53 | 743.55 |
| D- 4- III | 63.2 | 16.02 | 1.04 | 0.50145 | 0.5 | 0.49975 | 146.91 | 0.00145 | 0.0017 | 993.94 | 847.77 |
| D- 4- IV | 63.2 | 16.03 | 1.13 | 0.5015 | 0.50015 | 0.49965 | 146.17 | 0.00135 | 0.00185 | 1062.19 | 775.11 |

96

| ESPÉCIMEN | ALTURA (cm) | CARGA MÁXIMA (Kg) | FIN DE CARGA (Kg) | DH0 (mm) | DH FIN DE CARGA (mm) | DH ÚLTIMA (mm) | AMPLITUD DE CARGA (Kg) | DH INSTANTÁNEA (mm) | DH TOTAL (mm) | MR INSTANTÁNEO (MPa) | MR TOTAL (MPa) |
|-----------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|
| D- 4- V | 63.2 | 16.25 | 1.03 | 0.5014 | 0.49985 | 0.49965 | 149.28 | 0.00155 | 0.00175 | 944.8 | 836.82 |
| E- 1- I | 64.8 | 22.58 | 2.02 | 0.5025 | 0.5001 | 0.5 | 201.65 | 0.0024 | 0.0025 | 803.91 | 771.75 |
| E- 1- II | 64.8 | 22.65 | 1.99 | 0.50245 | 0.5001 | 0.49995 | 202.69 | 0.00235 | 0.0025 | 825.23 | 775.72 |
| E- 1- III | 64.8 | 22.58 | 1.96 | 0.5025 | 0.50015 | 0.49995 | 202.24 | 0.00235 | 0.00255 | 823.42 | 758.84 |
| E- 1- IV | 64.8 | 23.11 | 2.01 | 0.5025 | 0.5001 | 0.4999 | 206.98 | 0.0024 | 0.0026 | 825.14 | 761.67 |
| E- 1- V | 64.8 | 22.76 | 2.05 | 0.50245 | 0.50015 | 0.5 | 203.13 | 0.0023 | 0.00245 | 845.02 | 793.28 |
| E- 2- I | 64.2 | 44.08 | 3.92 | 0.50445 | 0.50045 | 0.49995 | 393.98 | 0.004 | 0.0045 | 951.2 | 845.51 |
| E- 2- II | 64.2 | 43.95 | 3.95 | 0.5045 | 0.5005 | 0.50005 | 392.35 | 0.004 | 0.00445 | 947.27 | 851.48 |
| E- 2- III | 64.2 | 44.13 | 3.88 | 0.50465 | 0.50025 | 0.50015 | 394.87 | 0.0044 | 0.0045 | 866.68 | 847.42 |
| E- 2- IV | 64.2 | 43.96 | 3.95 | 0.5046 | 0.50065 | 0.5001 | 392.5 | 0.00395 | 0.0045 | 959.62 | 842.34 |
| E- 2- V | 64.2 | 43.92 | 3.88 | 0.5046 | 0.50065 | 0.50025 | 392.8 | 0.00395 | 0.00435 | 960.35 | 872.04 |
| E- 3- I | 64.6 | 65.55 | 5.87 | 0.509 | 0.50085 | 0.5004 | 585.42 | 0.00815 | 0.0086 | 689.4 | 653.33 |
| E- 3- II | 64.6 | 65.29 | 5.97 | 0.5093 | 0.50175 | 0.50075 | 581.87 | 0.00755 | 0.00855 | 739.67 | 653.16 |
| E- 3- III | 64.6 | 65.41 | 5.88 | 0.50985 | 0.50175 | 0.50115 | 583.95 | 0.0081 | 0.0087 | 691.9 | 644.19 |
| E- 3- IV | 64.6 | 65.5 | 5.84 | 0.5103 | 0.5021 | 0.5016 | 585.28 | 0.0082 | 0.0087 | 685.03 | 645.66 |
| E- 3- V | 64.6 | 65.41 | 5.87 | 0.51065 | 0.50255 | 0.5021 | 584.09 | 0.0081 | 0.00855 | 692.08 | 655.65 |
| F- 1- I | 64.5 | 53.01 | 4.77 | 0.51775 | 0.50505 | 0.50425 | 473.28 | 0.0127 | 0.0135 | 358.22 | 336.99 |
| F- 1- II | 64.5 | 52.92 | 4.89 | 0.52195 | 0.5098 | 0.50835 | 471.21 | 0.01215 | 0.0136 | 372.79 | 333.05 |
| F- 1- III | 64.5 | 53.04 | 4.84 | 0.5265 | 0.51335 | 0.51255 | 472.84 | 0.01315 | 0.01395 | 345.64 | 325.81 |
| F- 1- IV | 64.5 | 52.91 | 4.78 | 0.5306 | 0.5175 | 0.51665 | 472.1 | 0.0131 | 0.01395 | 346.41 | 325.3 |
| F- 1- V | 64.5 | 52.97 | 4.84 | 0.5347 | 0.52205 | 0.52085 | 472.1 | 0.01265 | 0.01385 | 358.73 | 327.65 |
| F- 2- I | 64.5 | 16.8 | 1.92 | 0.5046 | 0.50065 | 0.50015 | 146.02 | 0.00395 | 0.00445 | 355.35 | 315.42 |
| F- 2- II | 64.5 | 16.79 | 1.89 | 0.5048 | 0.50105 | 0.5003 | 146.17 | 0.00375 | 0.0045 | 374.68 | 312.23 |
| F- 2- III | 64.5 | 16.82 | 1.84 | 0.5049 | 0.50055 | 0.50045 | 146.91 | 0.00435 | 0.00445 | 324.64 | 317.34 |
| F- 2- IV | 64.5 | 16.68 | 1.84 | 0.50495 | 0.5012 | 0.5007 | 145.58 | 0.00375 | 0.00425 | 373.16 | 329.26 |
| F- 2- V | 64.5 | 16.73 | 1.92 | 0.5052 | 0.5014 | 0.5008 | 145.28 | 0.0038 | 0.0044 | 367.51 | 317.39 |

97

| ESPÉCIMEN | ALTURA (cm) | CARGA MÁXIMA (Kg) | FIN DE CARGA (Kg) | DH0 (mm) | DH FIN DE CARGA (mm) | DH ÚLTIMA (mm) | AMPLITUD DE CARGA (Kg) | DH INSTANTÁNEA (mm) | DH TOTAL (mm) | MR INSTANTÁNEO (MPa) | MR TOTAL (MPa) |
|-----------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|
| F- 3- I | 64.4 | 16.4 | 1.65 | 0.5022 | 0.50045 | 0.5002 | 144.69 | 0.00175 | 0.002 | 796 | 696.5 |
| F- 3- II | 64.4 | 16.43 | 1.62 | 0.50255 | 0.5007 | 0.50045 | 145.28 | 0.00185 | 0.0021 | 756.05 | 666.04 |
| F- 3- III | 64.4 | 16.35 | 1.53 | 0.50285 | 0.50085 | 0.5006 | 145.43 | 0.002 | 0.00225 | 700.06 | 622.27 |
| F- 3- IV | 64.4 | 16.43 | 1.62 | 0.50285 | 0.5009 | 0.5007 | 145.28 | 0.00195 | 0.00215 | 717.28 | 650.55 |
| F- 3- V | 64.4 | 16.55 | 16.43 | 0.50305 | 0.503 | 0.50095 | 1.18 | 5.00E-05 | 0.0021 | 227.99 | 5.43 |
| G- 1- I | 63 | 26.35 | 0.74 | 0.5008 | 0.5001 | 0.49995 | 251.21 | 0.0007 | 0.00085 | 3531.8 | 2908.54 |
| G- 1- II | 63 | 26.49 | 0.76 | 0.50085 | 0.50005 | 0.5 | 252.4 | 0.0008 | 0.00085 | 3104.88 | 2922.24 |
| G- 1- III | 63 | 26.52 | 0.73 | 0.50075 | 0.50005 | 0.49995 | 252.99 | 0.0007 | 0.0008 | 3556.75 | 3112.16 |
| G- 1- IV | 63 | 26.55 | 0.79 | 0.5008 | 0.5 | 0.49985 | 252.69 | 0.0008 | 0.00095 | 3108.52 | 2617.7 |
| G- 1- V | 63 | 26.32 | 0.92 | 0.5007 | 0.49995 | 0.49985 | 249.14 | 0.00075 | 0.00085 | 3269.16 | 2884.55 |
| G- 2- I | 62.9 | 108.93 | 10.2 | 0.51245 | 0.5023 | 0.501 | 968.61 | 0.01015 | 0.01145 | 940.64 | 833.84 |
| G- 2- II | 62.9 | 108.78 | 10.2 | 0.51335 | 0.5028 | 0.5019 | 967.13 | 0.01055 | 0.01145 | 903.59 | 832.57 |
| G- 2- III | 62.9 | 108.83 | 10.09 | 0.51445 | 0.5028 | 0.5028 | 968.61 | 0.01165 | 0.01165 | 819.53 | 819.53 |
| G- 2- IV | 62.9 | 108.9 | 10.15 | 0.5155 | 0.5042 | 0.50365 | 968.76 | 0.0113 | 0.01185 | 845.04 | 805.82 |
| G- 2- V | 62.9 | 108.86 | 10.15 | 0.51625 | 0.5049 | 0.5046 | 968.31 | 0.01135 | 0.01165 | 840.93 | 819.28 |
| G- 3- I | 61.1 | 109.4 | 9.78 | 0.5086 | 0.5007 | 0.5 | 977.34 | 0.0079 | 0.0086 | 1255.36 | 1153.18 |
| G- 3- II | 61.1 | 109.25 | 9.59 | 0.5087 | 0.5009 | 0.5001 | 977.63 | 0.0078 | 0.0086 | 1271.84 | 1153.53 |
| G- 3- III | 61.1 | 109.22 | 9.59 | 0.5088 | 0.5003 | 0.5002 | 977.34 | 0.0085 | 0.0086 | 1166.74 | 1153.18 |
| G- 3- IV | 61.1 | 109.24 | 9.79 | 0.509 | 0.5012 | 0.50035 | 975.56 | 0.0078 | 0.00865 | 1269.14 | 1144.43 |
| G- 3- V | 61.1 | 109.33 | 9.7 | 0.50905 | 0.50115 | 0.50045 | 977.34 | 0.0079 | 0.0086 | 1255.36 | 1153.18 |
| G- 4- I | 63.2 | 107.67 | 9.88 | 0.52175 | 0.5026 | 0.50205 | 959.29 | 0.01915 | 0.0197 | 491.42 | 477.7 |
| G- 4- II | 63.2 | 107.71 | 9.96 | 0.5236 | 0.50555 | 0.504 | 958.99 | 0.01805 | 0.0196 | 521.21 | 479.99 |
| G- 4- III | 63.2 | 107.71 | 9.97 | 0.52605 | 0.5067 | 0.506 | 958.84 | 0.01935 | 0.02005 | 486.12 | 469.15 |
| G- 4- IV | 63.2 | 107.79 | 9.99 | 0.5284 | 0.5097 | 0.50805 | 959.43 | 0.0187 | 0.02035 | 503.32 | 462.51 |
| G- 4- V | 63.2 | 107.8 | 10 | 0.5302 | 0.51155 | 0.50995 | 959.43 | 0.01865 | 0.02025 | 504.67 | 464.8 |
| H- 1- I | 63.9 | 34.15 | 3.4 | 0.50455 | 0.5005 | 0.5001 | 301.66 | 0.00405 | 0.00445 | 722.7 | 657.74 |

06

| ESPÉCIMEN | ALTURA (cm) | CARGA MÁXIMA (Kg) | FIN DE CARGA (Kg) | DH0 (mm) | DH FIN DE CARGA (mm) | DH ÚLTIMA (mm) | AMPLITUD DE CARGA (Kg) | DH INSTANTÁNEA (mm) | DH TOTAL (mm) | MR INSTANTÁNEO (MPa) | MR TOTAL (MPa) |
|-------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|
| H - 1 - II | 63.9 | 34.09 | 3.34 | 0.50465 | 0.5005 | 0.5001 | 301.66 | 0.004 | 0.00455 | 731.73 | 643.28 |
| H - 1 - III | 63.9 | 34.06 | 3.26 | 0.50475 | 0.5005 | 0.50035 | 302.11 | 0.004 | 0.0044 | 732.81 | 666.19 |
| H - 1 - IV | 63.9 | 34.1 | 3.26 | 0.505 | 0.5005 | 0.50045 | 302.55 | 0.00425 | 0.00455 | 690.72 | 645.18 |
| H - 1 - V | 63.9 | 34.1 | 3.23 | 0.5051 | 0.5005 | 0.50055 | 302.85 | 0.00425 | 0.00455 | 691.39 | 645.81 |
| H - 2 - I | 64.7 | 32.76 | 2.81 | 0.5013 | 0.4994 | 0.50015 | 293.82 | 0.0019 | 0.00115 | 1481.9 | 2448.35 |
| H - 2 - II | 64.7 | 32.77 | 2.82 | 0.50115 | 0.4994 | 0.49985 | 293.82 | 0.00175 | 0.0013 | 1608.91 | 2165.84 |
| H - 2 - III | 64.7 | 32.83 | 2.76 | 0.50125 | 0.49955 | 0.49985 | 295.01 | 0.0017 | 0.0014 | 1662.91 | 2019.25 |
| H - 2 - IV | 64.7 | 32.86 | 2.75 | 0.50105 | 0.50005 | 0.49965 | 295.45 | 0.001 | 0.0014 | 2831.19 | 2022.28 |
| H - 2 - V | 64.7 | 32.86 | 2.78 | 0.5013 | 0.50005 | 0.49945 | 295.15 | 0.00125 | 0.00185 | 2262.69 | 1528.85 |
| H - 3 - I | 63.1 | 32.97 | 2.82 | 0.50225 | 0.50025 | 0.50015 | 295.75 | 0.002 | 0.0021 | 1452.95 | 1383.76 |
| H - 3 - II | 63.1 | 33 | 2.76 | 0.50245 | 0.5002 | 0.50025 | 296.63 | 0.00225 | 0.0022 | 1295.39 | 1324.83 |
| H - 3 - III | 63.1 | 32.97 | 2.66 | 0.5025 | 0.50025 | 0.50025 | 297.37 | 0.00225 | 0.00225 | 1298.62 | 1298.62 |
| H - 3 - IV | 63.1 | 33.09 | 2.67 | 0.5026 | 0.5004 | 0.50045 | 298.41 | 0.0022 | 0.00215 | 1332.75 | 1363.75 |
| H - 3 - V | 63.1 | 33.08 | 2.67 | 0.50275 | 0.5006 | 0.50045 | 298.26 | 0.00215 | 0.0023 | 1363.07 | 1274.18 |
| I - 1 - I | 67.7 | 14.24 | 0.79 | 0.50165 | 0.4999 | 0.5002 | 131.97 | 0.00175 | 0.00145 | 690.61 | 833.5 |
| I - 1 - II | 67.7 | 14.21 | 0.7 | 0.50175 | 0.49995 | 0.50035 | 132.56 | 0.0018 | 0.0014 | 674.44 | 867.14 |
| I - 1 - III | 67.7 | 14.19 | 0.7 | 0.50205 | 0.5007 | 0.5004 | 132.41 | 0.00135 | 0.00165 | 898.25 | 734.93 |
| I - 1 - IV | 67.7 | 14.18 | 0.76 | 0.50225 | 0.50095 | 0.5009 | 131.67 | 0.0013 | 0.00135 | 927.58 | 893.23 |
| I - 1 - V | 67.7 | 14.21 | 0.77 | 0.5024 | 0.50085 | 0.5011 | 131.82 | 0.00155 | 0.0013 | 778.85 | 928.63 |
| I - 2 - I | 66.6 | 11.03 | 1.28 | 0.50205 | 0.5003 | 0.5 | 95.57 | 0.00175 | 0.00205 | 508.42 | 434.01 |
| I - 2 - II | 66.6 | 11.03 | 1.22 | 0.5023 | 0.50025 | 0.5 | 96.17 | 0.00205 | 0.0023 | 436.7 | 389.23 |
| I - 2 - III | 66.6 | 11.01 | 1.3 | 0.50215 | 0.50025 | 0.5 | 95.28 | 0.0019 | 0.00215 | 466.83 | 412.54 |
| I - 2 - IV | 66.6 | 11.04 | 1.25 | 0.50215 | 0.5004 | 0.5001 | 96.02 | 0.00175 | 0.00205 | 510.77 | 436.03 |
| I - 2 - V | 66.6 | 11.04 | 1.31 | 0.5022 | 0.5004 | 0.50015 | 95.42 | 0.0018 | 0.00205 | 493.52 | 433.34 |
| I - 3 - I | 65.9 | 15.55 | 1.16 | 0.5024 | 0.5004 | 0.5002 | 141.14 | 0.002 | 0.0022 | 663.94 | 603.58 |
| I - 3 - II | 65.9 | 15.43 | 1.19 | 0.50245 | 0.501 | 0.50025 | 139.66 | 0.00145 | 0.0022 | 906.18 | 597.26 |

| ESPÉCIMEN | ALTURA (cm) | CARGA MÁXIMA (Kg) | FIN DE CARGA (Kg) | DH0 (mm) | DH FIN DE CARGA (mm) | DH ÚLTIMA (mm) | AMPLITUD DE CARGA (Kg) | DH INSTANTÁNEA (mm) | DH TOTAL (mm) | MR INSTANTÁNEO (MPa) | MR TOTAL (MPa) |
|-----------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|
| I- 3- III | 65.9 | 15.48 | 1.16 | 0.5024 | 0.5007 | 0.50055 | 140.4 | 0.0017 | 0.00185 | 777.01 | 714.01 |
| I- 3- IV | 65.9 | 15.37 | 1.04 | 0.5028 | 0.5006 | 0.5007 | 140.55 | 0.0022 | 0.0021 | 601.05 | 629.67 |
| I- 3- V | 65.9 | 15.51 | 1.18 | 0.50285 | 0.50085 | 0.50085 | 140.55 | 0.002 | 0.002 | 661.16 | 661.16 |
| I- 4- I | 65.9 | 15.82 | 1.16 | 0.50175 | 0.5002 | 0.50005 | 143.8 | 0.00155 | 0.0017 | 872.86 | 795.84 |
| I- 4- II | 65.9 | 15.9 | 1.15 | 0.50185 | 0.5002 | 0.5001 | 144.69 | 0.00165 | 0.00175 | 825.02 | 777.88 |
| I- 4- III | 65.9 | 15.87 | 1.13 | 0.5019 | 0.50015 | 0.50015 | 144.54 | 0.00175 | 0.00175 | 777.08 | 777.08 |
| I- 4- IV | 65.9 | 15.84 | 1.16 | 0.5018 | 0.5001 | 0.5 | 143.95 | 0.0017 | 0.0018 | 796.66 | 752.4 |
| I- 4- V | 65.9 | 15.82 | 1.22 | 0.50175 | 0.5 | 0.4998 | 143.21 | 0.00175 | 0.00195 | 769.93 | 690.96 |
| J- 1- I | 65.4 | 43.69 | 4.13 | 0.50385 | 0.50075 | 0.5003 | 388.06 | 0.0031 | 0.00355 | 1186.74 | 1036.31 |
| J- 1- II | 65.4 | 43.78 | 4.17 | 0.50415 | 0.50075 | 0.5004 | 388.66 | 0.0034 | 0.00375 | 1083.68 | 982.53 |
| J- 1- III | 65.4 | 43.72 | 4.2 | 0.5043 | 0.50115 | 0.5007 | 387.77 | 0.00315 | 0.0036 | 1167.01 | 1021.13 |
| J- 1- IV | 65.4 | 44.04 | 4.04 | 0.50465 | 0.5015 | 0.5008 | 392.35 | 0.00315 | 0.00385 | 1180.81 | 966.12 |
| J- 1- V | 65.4 | 43.83 | 3.89 | 0.5049 | 0.50115 | 0.50115 | 391.76 | 0.00375 | 0.00375 | 990.39 | 990.39 |
| J- 2- I | 64.2 | 43.8 | 3.67 | 0.50425 | 0.5008 | 0.5003 | 393.69 | 0.00345 | 0.00395 | 1102.02 | 962.52 |
| J- 2- II | 64.2 | 43.74 | 3.64 | 0.50425 | 0.50105 | 0.5004 | 393.39 | 0.0032 | 0.00385 | 1187.22 | 986.78 |
| J- 2- III | 64.2 | 43.84 | 3.74 | 0.50445 | 0.50105 | 0.5003 | 393.39 | 0.0034 | 0.00415 | 1117.38 | 915.44 |
| J- 2- IV | 64.2 | 43.57 | 3.64 | 0.5048 | 0.50095 | 0.50035 | 391.76 | 0.00385 | 0.00445 | 982.69 | 850.2 |
| J- 2- V | 64.2 | 43.59 | 3.74 | 0.50485 | 0.501 | 0.5005 | 390.88 | 0.00385 | 0.00435 | 980.47 | 867.77 |
| J- 3- I | 64.1 | 65.5 | 5.91 | 0.50605 | 0.50075 | 0.5004 | 584.54 | 0.0053 | 0.00565 | 1066.77 | 1000.69 |
| J- 3- II | 64.1 | 65.44 | 5.93 | 0.5061 | 0.50095 | 0.50055 | 583.8 | 0.00515 | 0.00555 | 1096.45 | 1017.43 |
| J- 3- III | 64.1 | 65.42 | 5.82 | 0.5062 | 0.501 | 0.50085 | 584.69 | 0.0052 | 0.00535 | 1087.56 | 1057.07 |
| J- 3- IV | 64.1 | 65.52 | 5.88 | 0.50645 | 0.5014 | 0.50095 | 584.98 | 0.00505 | 0.0055 | 1120.43 | 1028.76 |
| J- 3- V | 64.1 | 65.46 | 5.85 | 0.5066 | 0.50175 | 0.50125 | 584.68 | 0.00485 | 0.00535 | 1166.04 | 1057.07 |
| K- 1- I | 63.6 | 10.24 | 0.62 | 0.5004 | 0.4999 | 0.4999 | 94.39 | 0.0005 | 0.0005 | 1840.31 | 1840.31 |
| K- 1- II | 63.6 | 10.12 | 0.65 | 0.5005 | 0.49985 | 0.49975 | 92.91 | 0.00065 | 0.00075 | 1393.43 | 1207.64 |
| K- 1- III | 63.6 | 10.27 | 0.67 | 0.50025 | 0.49995 | 0.4999 | 94.24 | 0.0003 | 0.00035 | 3062.36 | 2624.88 |

| ESPÉCIMEN | ALTURA (cm) | CARGA MÁXIMA (Kg) | FIN DE CARGA (Kg) | DH0 (mm) | DH FIN DE CARGA (mm) | DH ÚLTIMA (mm) | AMPLITUD DE CARGA (Kg) | DH INSTANTÁNEA (mm) | DH TOTAL (mm) | MR INSTANTÁNEO (MPa) | MR TOTAL (MPa) |
|-------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|
| K - 1 - IV | 63.6 | 10.15 | 0.65 | 0.50045 | 0.49995 | 0.4998 | 93.21 | 0.0005 | 0.00065 | 1817.22 | 1397.86 |
| K - 1 - V | 63.6 | 10.12 | 0.59 | 0.50035 | 0.4998 | 0.49985 | 93.5 | 0.00055 | 0.0005 | 1657.27 | 1823 |
| K - 2 - I | 64.7 | 32.44 | 2.55 | 0.5026 | 0.5004 | 0.5 | 293.23 | 0.0022 | 0.0026 | 1277.24 | 1080.75 |
| K - 2 - II | 64.7 | 32.46 | 2.67 | 0.5028 | 0.50055 | 0.50005 | 292.19 | 0.00225 | 0.00275 | 1244.45 | 1018.18 |
| K - 2 - III | 64.7 | 32.5 | 2.61 | 0.50295 | 0.5011 | 0.5004 | 293.23 | 0.00185 | 0.00255 | 1518.89 | 1101.94 |
| K - 2 - IV | 64.7 | 32.56 | 2.61 | 0.50305 | 0.5011 | 0.5005 | 293.82 | 0.00195 | 0.00255 | 1443.9 | 1104.16 |
| K - 2 - V | 64.7 | 32.53 | 2.58 | 0.50325 | 0.501 | 0.50055 | 293.82 | 0.00225 | 0.0027 | 1251.38 | 1042.81 |
| K - 3 - I | 62.9 | 44.67 | 4.23 | 0.5046 | 0.50085 | 0.50015 | 396.79 | 0.00375 | 0.00445 | 1042.97 | 878.91 |
| K - 3 - II | 62.9 | 44.66 | 4.17 | 0.5049 | 0.50085 | 0.5004 | 397.24 | 0.00405 | 0.0045 | 966.8 | 870.12 |
| K - 3 - III | 62.9 | 44.69 | 4.35 | 0.5049 | 0.5014 | 0.5007 | 395.76 | 0.0035 | 0.0042 | 1114.56 | 928.8 |
| K - 3 - IV | 62.9 | 44.75 | 4.26 | 0.50535 | 0.50165 | 0.5009 | 397.24 | 0.0037 | 0.00445 | 1058.25 | 879.89 |
| K - 3 - V | 62.9 | 44.69 | 4.2 | 0.50545 | 0.50125 | 0.5011 | 397.24 | 0.0042 | 0.00435 | 932.27 | 900.12 |
| K - 4 - I | 64.2 | 33.29 | 2.82 | 0.50375 | 0.5002 | 0.50035 | 298.85 | 0.00355 | 0.0034 | 812.99 | 848.86 |
| K - 4 - II | 64.2 | 33.23 | 2.91 | 0.50405 | 0.5008 | 0.5005 | 297.37 | 0.00325 | 0.00355 | 883.64 | 808.96 |
| K - 4 - III | 64.2 | 33.29 | 2.82 | 0.50385 | 0.5004 | 0.5004 | 298.85 | 0.00345 | 0.00345 | 836.55 | 836.55 |
| K - 4 - IV | 64.2 | 33.29 | 2.76 | 0.50385 | 0.50045 | 0.5002 | 299.44 | 0.0034 | 0.00365 | 850.54 | 792.28 |
| K - 4 - V | 64.2 | 33.23 | 2.93 | 0.5041 | 0.50105 | 0.5003 | 297.22 | 0.00305 | 0.0038 | 941.11 | 755.37 |
| L - 1 - I | 64.8 | 21.03 | 2.04 | 0.50495 | 0.50105 | 0.50075 | 186.26 | 0.0039 | 0.0042 | 456.96 | 424.32 |
| L - 1 - II | 64.8 | 21.01 | 2.07 | 0.5054 | 0.5019 | 0.5014 | 185.82 | 0.0035 | 0.004 | 507.98 | 444.48 |
| L - 1 - III | 64.8 | 21.13 | 1.95 | 0.50615 | 0.50225 | 0.50205 | 188.19 | 0.0039 | 0.0041 | 461.68 | 439.16 |
| L - 1 - IV | 64.8 | 21 | 1.98 | 0.50695 | 0.50295 | 0.50265 | 186.56 | 0.004 | 0.0043 | 446.25 | 415.11 |
| L - 1 - V | 64.8 | 21.09 | 2.14 | 0.5075 | 0.50385 | 0.50335 | 185.82 | 0.00365 | 0.00415 | 487.1 | 428.41 |
| L - 2 - I | 63.3 | 21.76 | 2.16 | 0.50245 | 0.5005 | 0.50015 | 192.33 | 0.00195 | 0.0023 | 966.06 | 819.05 |
| L - 2 - II | 63.3 | 21.83 | 2.28 | 0.5026 | 0.50075 | 0.5003 | 191.74 | 0.00185 | 0.0023 | 1015.14 | 816.52 |
| L - 2 - III | 63.3 | 21.81 | 2.16 | 0.5027 | 0.5008 | 0.50045 | 192.77 | 0.0019 | 0.00225 | 993.76 | 839.18 |
| L - 2 - IV | 63.3 | 21.73 | 2.14 | 0.50285 | 0.501 | 0.5005 | 192.18 | 0.00185 | 0.00235 | 1017.49 | 801 |

| ESPÉCIMEN | ALTURA (cm) | CARGA MÁXIMA (Kg) | FIN DE CARGA (Kg) | DH0 (mm) | DH FIN DE CARGA (mm) | DH ÚLTIMA (mm) | AMPLITUD DE CARGA (Kg) | DH INSTANTÁNEA (mm) | DH TOTAL (mm) | MR INSTANTÁNEO (MPa) | MR TOTAL (MPa) |
|-------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|
| L - 2 - V | 63.3 | 21.79 | 2.19 | 0.503 | 0.50095 | 0.50055 | 192.33 | 0.00205 | 0.00245 | 918.93 | 768.9 |
| L - 3 - I | 65.4 | 21.31 | 1.86 | 0.50505 | 0.5007 | 0.5001 | 190.85 | 0.00435 | 0.00495 | 415.93 | 365.51 |
| L - 3 - II | 65.4 | 21.33 | 1.75 | 0.5052 | 0.50065 | 0.5002 | 192.03 | 0.00455 | 0.005 | 400.11 | 364.1 |
| L - 3 - III | 65.4 | 21.37 | 1.78 | 0.5052 | 0.50065 | 0.5001 | 192.18 | 0.00455 | 0.0051 | 400.42 | 357.24 |
| L - 3 - IV | 65.4 | 21.42 | 1.8 | 0.5053 | 0.50045 | 0.50025 | 192.48 | 0.00485 | 0.00505 | 376.23 | 361.33 |
| L - 3 - V | 65.4 | 21.33 | 1.77 | 0.5053 | 0.5007 | 0.50025 | 191.89 | 0.0046 | 0.00505 | 395.46 | 360.22 |
| L - 4 - I | 63.7 | 21.03 | 1.48 | 0.5042 | 0.5006 | 0.50015 | 191.74 | 0.0036 | 0.00405 | 518.39 | 460.79 |
| L - 4 - II | 63.7 | 20.98 | 1.53 | 0.50445 | 0.50095 | 0.5006 | 190.85 | 0.0035 | 0.00385 | 530.74 | 482.49 |
| L - 4 - III | 63.7 | 21.01 | 1.47 | 0.5048 | 0.50115 | 0.5009 | 191.74 | 0.00365 | 0.0039 | 511.29 | 478.52 |
| L - 4 - IV | 63.7 | 20.94 | 1.48 | 0.5048 | 0.5015 | 0.5014 | 190.85 | 0.0033 | 0.0034 | 562.9 | 546.34 |
| L - 4 - V | 63.7 | 21.1 | 1.53 | 0.505 | 0.5019 | 0.50155 | 192.03 | 0.0031 | 0.00345 | 602.93 | 541.77 |
| M - 1 - I | 65.5 | 55.06 | 4.81 | 0.5033 | 0.5005 | 0.50025 | 492.96 | 0.0028 | 0.00305 | 1666.49 | 1529.89 |
| M - 1 - II | 65.5 | 55.11 | 4.8 | 0.50355 | 0.5011 | 0.5006 | 493.55 | 0.00245 | 0.00295 | 1906.85 | 1583.65 |
| M - 1 - III | 65.5 | 55.03 | 4.84 | 0.5038 | 0.5013 | 0.50095 | 492.37 | 0.0025 | 0.00285 | 1864.22 | 1635.29 |
| M - 1 - IV | 65.5 | 55.05 | 4.84 | 0.5042 | 0.5015 | 0.50115 | 492.51 | 0.0027 | 0.00305 | 1726.65 | 1528.51 |
| M - 1 - V | 65.5 | 55 | 4.84 | 0.50445 | 0.5019 | 0.5013 | 492.07 | 0.00255 | 0.00315 | 1826.57 | 1478.65 |
| M - 2 - I | 65.1 | 44.21 | 4.04 | 0.50655 | 0.50125 | 0.5007 | 393.98 | 0.0053 | 0.00585 | 707.96 | 641.4 |
| M - 2 - II | 65.1 | 44.16 | 4.09 | 0.50715 | 0.50185 | 0.5011 | 393.09 | 0.0053 | 0.00605 | 706.37 | 618.8 |
| M - 2 - III | 65.1 | 44.15 | 4.1 | 0.5076 | 0.50245 | 0.5018 | 392.8 | 0.00515 | 0.0058 | 726.4 | 644.99 |
| M - 2 - IV | 65.1 | 44.15 | 4.15 | 0.50815 | 0.5029 | 0.50215 | 392.35 | 0.00525 | 0.006 | 711.75 | 622.79 |
| M - 2 - V | 65.1 | 44.25 | 4.04 | 0.5087 | 0.50285 | 0.5027 | 394.42 | 0.00585 | 0.006 | 642.12 | 626.07 |
| M - 3 - I | 65.4 | 44.82 | 4.24 | 0.50555 | 0.5001 | 0.5001 | 398.12 | 0.00545 | 0.00545 | 692.53 | 692.53 |
| M - 3 - II | 65.4 | 44.73 | 4.24 | 0.50565 | 0.501 | 0.5001 | 397.24 | 0.00465 | 0.00555 | 809.86 | 678.53 |
| M - 3 - III | 65.4 | 44.79 | 4.3 | 0.5057 | 0.50085 | 0.50035 | 397.24 | 0.00485 | 0.00535 | 776.47 | 703.9 |
| M - 3 - IV | 65.4 | 44.75 | 4.32 | 0.50585 | 0.50085 | 0.50045 | 396.64 | 0.005 | 0.0054 | 752.05 | 696.34 |
| M - 3 - V | 65.4 | 44.7 | 4.32 | 0.50595 | 0.50115 | 0.50055 | 396.2 | 0.0048 | 0.0054 | 782.51 | 695.56 |

| ESPÉCIMEN | ALTURA (cm) | CARGA MÁXIMA (Kg) | FIN DE CARGA (Kg) | DH0 (mm) | DH FIN DE CARGA (mm) | DH ÚLTIMA (mm) | AMPLITUD DE CARGA (Kg) | DH INSTANTÁNEA (mm) | DH TOTAL (mm) | MR INSTANTÁNEO (MPa) | MR TOTAL (MPa) |
|-------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|
| M - 4 - I | 61.9 | 44.02 | 4.18 | 0.5024 | 0.5004 | 0.50015 | 390.87 | 0.002 | 0.00225 | 1957.53 | 1740.03 |
| M - 4 - II | 61.9 | 43.89 | 4.17 | 0.5027 | 0.5006 | 0.50045 | 389.69 | 0.0021 | 0.00225 | 1858.67 | 1734.76 |
| M - 4 - III | 61.9 | 43.9 | 4.17 | 0.50295 | 0.50105 | 0.50065 | 389.84 | 0.0019 | 0.0023 | 2055.1 | 1697.69 |
| M - 4 - IV | 61.9 | 43.99 | 4.17 | 0.5031 | 0.5012 | 0.5009 | 390.73 | 0.0019 | 0.0022 | 2059.78 | 1778.9 |
| M - 4 - V | 61.9 | 43.99 | 4.23 | 0.5035 | 0.5017 | 0.5013 | 390.14 | 0.0018 | 0.0022 | 2170.92 | 1776.21 |
| N - 1 - I | 66.6 | 26.41 | 1.9 | 0.5081 | 0.50155 | 0.5013 | 240.41 | 0.00655 | 0.0068 | 341.69 | 329.13 |
| N - 1 - II | 66.6 | 26.58 | 2.01 | 0.5096 | 0.50305 | 0.5027 | 241.01 | 0.00655 | 0.0069 | 342.53 | 325.16 |
| N - 1 - III | 66.6 | 26.56 | 2.13 | 0.511 | 0.5044 | 0.5042 | 239.67 | 0.0066 | 0.0068 | 338.06 | 328.12 |
| N - 1 - IV | 66.6 | 26.53 | 2.11 | 0.5124 | 0.50595 | 0.50545 | 239.52 | 0.00645 | 0.00695 | 345.71 | 320.84 |
| N - 1 - V | 66.6 | 26.56 | 2.08 | 0.51375 | 0.50735 | 0.5068 | 240.12 | 0.0064 | 0.00695 | 349.27 | 321.63 |
| N - 2 - I | 66.3 | 32.86 | 2.88 | 0.5148 | 0.50205 | 0.5007 | 294.12 | 0.01275 | 0.0141 | 215.72 | 195.07 |
| N - 2 - II | 66.3 | 32.97 | 2.91 | 0.51535 | 0.50275 | 0.5015 | 294.86 | 0.0126 | 0.01385 | 218.84 | 199.09 |
| N - 2 - III | 66.3 | 32.83 | 2.87 | 0.5159 | 0.50235 | 0.50205 | 293.97 | 0.01355 | 0.01385 | 202.88 | 198.49 |
| N - 2 - IV | 66.3 | 32.92 | 2.87 | 0.51665 | 0.5041 | 0.5028 | 294.86 | 0.01255 | 0.01385 | 219.71 | 199.09 |
| N - 2 - V | 66.3 | 33.02 | 2.91 | 0.5175 | 0.5048 | 0.5032 | 295.3 | 0.0127 | 0.0143 | 217.44 | 193.11 |
| N - 3 - I | 66.4 | 27.51 | 2.43 | 0.50525 | 0.50055 | 0.50005 | 246.03 | 0.0047 | 0.0052 | 488.79 | 441.79 |
| N - 3 - II | 66.4 | 27.63 | 2.29 | 0.5052 | 0.50065 | 0.5003 | 248.55 | 0.00455 | 0.0049 | 510.07 | 473.63 |
| N - 3 - III | 66.4 | 27.48 | 2.28 | 0.50535 | 0.5007 | 0.5004 | 247.22 | 0.00465 | 0.00495 | 496.42 | 466.34 |
| N - 3 - IV | 66.4 | 27.66 | 2.22 | 0.50555 | 0.5008 | 0.50055 | 249.59 | 0.00475 | 0.005 | 490.63 | 466.09 |
| N - 3 - V | 66.4 | 27.57 | 2.31 | 0.5056 | 0.50115 | 0.5006 | 247.81 | 0.00445 | 0.005 | 519.98 | 462.78 |
| O - 1 - I | 62.3 | 54.55 | 4.77 | 0.50695 | 0.50085 | 0.5002 | 488.37 | 0.0061 | 0.00675 | 796.75 | 720.03 |
| O - 1 - II | 62.3 | 54.7 | 4.84 | 0.50715 | 0.501 | 0.50045 | 489.11 | 0.00615 | 0.0067 | 791.47 | 726.5 |
| O - 1 - III | 62.3 | 54.73 | 4.78 | 0.50745 | 0.50135 | 0.5007 | 490 | 0.0061 | 0.00675 | 799.41 | 722.43 |
| O - 1 - IV | 62.3 | 54.67 | 4.92 | 0.50785 | 0.50215 | 0.50095 | 488.08 | 0.0057 | 0.0069 | 852.15 | 703.95 |
| O - 1 - V | 62.3 | 54.61 | 4.78 | 0.50795 | 0.5016 | 0.50115 | 488.82 | 0.00635 | 0.0068 | 766.08 | 715.38 |
| O - 2 - I | 62.2 | 54.73 | 4.95 | 0.50805 | 0.50115 | 0.5004 | 488.37 | 0.0069 | 0.00765 | 705.51 | 636.34 |

| ESPÉCIMEN | ALTURA (cm) | CARGA MÁXIMA (Kg) | FIN DE CARGA (Kg) | DH0 (mm) | DH FIN DE CARGA (mm) | DH ÚLTIMA (mm) | AMPLITUD DE CARGA (Kg) | DH INSTANTÁNEA (mm) | DH TOTAL (mm) | MR INSTANTÁNEO (MPa) | MR TOTAL (MPa) |
|-------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|
| O - 2 - II | 62.2 | 54.84 | 4.98 | 0.50895 | 0.50125 | 0.5009 | 489.11 | 0.0077 | 0.00805 | 633.17 | 605.64 |
| O - 2 - III | 62.2 | 54.79 | 4.99 | 0.50935 | 0.5023 | 0.5016 | 488.52 | 0.00705 | 0.00775 | 690.71 | 628.32 |
| O - 2 - IV | 62.2 | 54.73 | 4.93 | 0.50965 | 0.5026 | 0.5019 | 488.52 | 0.00705 | 0.00775 | 690.71 | 628.32 |
| O - 2 - V | 62.2 | 54.81 | 4.93 | 0.51055 | 0.50265 | 0.5026 | 489.26 | 0.0079 | 0.00795 | 617.32 | 613.44 |
| O - 3 - I | 62.4 | 49.24 | 4.06 | 0.50515 | 0.5008 | 0.50015 | 443.25 | 0.00435 | 0.005 | 1012.43 | 880.81 |
| O - 3 - II | 62.4 | 49.27 | 4 | 0.5052 | 0.50055 | 0.5003 | 444.14 | 0.00465 | 0.0049 | 949.01 | 900.59 |
| O - 3 - III | 62.4 | 49.15 | 4 | 0.5054 | 0.5007 | 0.5004 | 442.95 | 0.0047 | 0.005 | 936.41 | 880.22 |
| O - 3 - IV | 62.4 | 49.18 | 4.06 | 0.50565 | 0.5011 | 0.50065 | 442.66 | 0.00455 | 0.005 | 966.64 | 879.64 |
| O - 3 - V | 62.4 | 49.17 | 4.04 | 0.50595 | 0.50135 | 0.50075 | 442.66 | 0.0046 | 0.0052 | 956.13 | 845.8 |
| O - 4 - I | 62.9 | 44.69 | 4.12 | 0.5058 | 0.5009 | 0.49995 | 397.98 | 0.0049 | 0.00585 | 800.57 | 670.57 |
| O - 4 - II | 62.9 | 44.81 | 4.04 | 0.5061 | 0.50065 | 0.5003 | 399.9 | 0.00545 | 0.0058 | 723.26 | 679.62 |
| O - 4 - III | 62.9 | 44.72 | 4.18 | 0.50615 | 0.50095 | 0.5006 | 397.68 | 0.0052 | 0.00555 | 753.83 | 706.29 |
| O - 4 - IV | 62.9 | 44.69 | 4 | 0.50615 | 0.50155 | 0.5006 | 399.16 | 0.0046 | 0.00555 | 855.32 | 708.92 |
| O - 4 - V | 62.9 | 44.58 | 4.04 | 0.50635 | 0.50155 | 0.501 | 397.68 | 0.0048 | 0.00535 | 816.64 | 732.69 |
| P - 1 - I | 64.7 | 10.39 | 1.04 | 0.50095 | 0.5002 | 0.50015 | 91.73 | 0.00075 | 0.0008 | 1171.98 | 1098.73 |
| P - 1 - II | 64.7 | 10.39 | 1.01 | 0.5011 | 0.50025 | 0.5002 | 92.62 | 0.00085 | 0.0009 | 1044.12 | 986.11 |
| P - 1 - III | 64.7 | 10.39 | 1.09 | 0.5011 | 0.50035 | 0.50025 | 91.73 | 0.00075 | 0.00085 | 1171.99 | 1034.11 |
| P - 1 - IV | 64.7 | 10.39 | 1.09 | 0.50105 | 0.5004 | 0.50025 | 92.17 | 0.00065 | 0.0008 | 1358.84 | 1104.06 |
| P - 1 - V | 64.7 | 10.39 | 1.01 | 0.5014 | 0.50055 | 0.50035 | 92.02 | 0.00085 | 0.00105 | 1037.44 | 839.83 |
| P - 2 - I | 65.3 | 21.31 | 1.72 | 0.50245 | 0.50015 | 0.50005 | 192.18 | 0.0023 | 0.0024 | 793.35 | 760.29 |
| P - 2 - II | 65.3 | 21.19 | 1.72 | 0.50235 | 0.5002 | 0.5 | 191 | 0.00215 | 0.00235 | 843.47 | 771.69 |
| P - 2 - III | 65.3 | 21.25 | 1.72 | 0.5024 | 0.50005 | 0.49995 | 191.59 | 0.00235 | 0.00245 | 774.08 | 742.48 |
| P - 2 - IV | 65.3 | 21.22 | 1.72 | 0.5024 | 0.5003 | 0.5001 | 191.29 | 0.0021 | 0.0023 | 864.89 | 789.68 |
| P - 2 - V | 65.3 | 21.28 | 1.62 | 0.50245 | 0.5001 | 0.5 | 192.92 | 0.00235 | 0.00245 | 779.46 | 747.64 |
| P - 3 - I | 65.3 | 10.2 | 0.91 | 0.5033 | 0.50045 | 0.50015 | 91.13 | 0.00285 | 0.00315 | 303.61 | 274.7 |
| P - 3 - II | 65.3 | 10.2 | 0.79 | 0.5035 | 0.50065 | 0.50035 | 92.32 | 0.00285 | 0.00315 | 307.56 | 278.27 |

| ESPÉCIMEN | ALTURA (cm) | CARGA MÁXIMA (Kg) | FIN DE CARGA (Kg) | DH0 (mm) | DH FIN DE CARGA (mm) | DH ÚLTIMA (mm) | AMPLITUD DE CARGA (Kg) | DH INSTANTÁNEA (mm) | DH TOTAL (mm) | MR INSTANTÁNEO (MPa) | MR TOTAL (MPa) |
|-------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|
| P - 3 - III | 65.3 | 10.21 | 1 | 0.5036 | 0.50085 | 0.5005 | 90.4 | 0.00275 | 0.0031 | 312.1 | 276.86 |
| P - 3 - IV | 65.3 | 10.33 | 0.95 | 0.5038 | 0.5011 | 0.50065 | 92.02 | 0.0027 | 0.00315 | 323.6 | 277.37 |
| P - 3 - V | 65.3 | 10.24 | 1 | 0.50405 | 0.50135 | 0.50085 | 90.69 | 0.0027 | 0.0032 | 318.92 | 269.09 |
| P - 4 - I | 65.6 | 20.77 | 1.74 | 0.5035 | 0.50085 | 0.50055 | 186.71 | 0.00265 | 0.00295 | 665.9 | 598.18 |
| P - 4 - II | 65.6 | 20.77 | 1.68 | 0.5041 | 0.50105 | 0.501 | 187.3 | 0.00305 | 0.0031 | 580.4 | 571.04 |
| P - 4 - III | 65.6 | 20.71 | 1.75 | 0.5045 | 0.5018 | 0.50145 | 185.97 | 0.0027 | 0.00305 | 650.98 | 576.27 |
| P - 4 - IV | 65.6 | 20.71 | 1.59 | 0.50475 | 0.50215 | 0.5019 | 187.6 | 0.0026 | 0.00285 | 681.93 | 622.11 |
| P - 4 - V | 65.6 | 20.72 | 1.66 | 0.5052 | 0.5024 | 0.50225 | 187.01 | 0.0028 | 0.00295 | 631.22 | 599.13 |
| Q - 1 - I | 63.6 | 43.38 | 3.32 | 0.50645 | 0.50105 | 0.50045 | 392.95 | 0.0054 | 0.006 | 709.37 | 638.43 |
| Q - 1 - II | 63.6 | 43.26 | 3.37 | 0.5068 | 0.50115 | 0.50085 | 391.32 | 0.00565 | 0.00595 | 675.18 | 641.13 |
| Q - 1 - III | 63.6 | 43.27 | 3.41 | 0.5072 | 0.50175 | 0.5012 | 391.02 | 0.00545 | 0.006 | 699.42 | 635.31 |
| Q - 1 - IV | 63.6 | 43.39 | 3.41 | 0.50765 | 0.50215 | 0.50185 | 392.21 | 0.0055 | 0.0058 | 695.16 | 659.21 |
| Q - 1 - V | 63.6 | 43.3 | 3.38 | 0.5081 | 0.5026 | 0.50215 | 391.61 | 0.0055 | 0.00595 | 694.11 | 641.62 |
| Q - 2 - I | 63.3 | 55.06 | 5.3 | 0.5036 | 0.50055 | 0.5003 | 488.22 | 0.00305 | 0.0033 | 1567.86 | 1449.08 |
| Q - 2 - II | 63.3 | 55.09 | 5.31 | 0.50395 | 0.50105 | 0.5007 | 488.37 | 0.0029 | 0.00325 | 1649.45 | 1471.82 |
| Q - 2 - III | 63.3 | 55.15 | 5.27 | 0.50435 | 0.5012 | 0.501 | 489.41 | 0.00315 | 0.00335 | 1521.77 | 1430.92 |
| Q - 2 - IV | 63.3 | 55.2 | 5.3 | 0.50465 | 0.5016 | 0.5014 | 489.56 | 0.00305 | 0.00325 | 1572.14 | 1475.39 |
| Q - 2 - V | 63.3 | 55.03 | 5.36 | 0.505 | 0.5021 | 0.5017 | 487.34 | 0.0029 | 0.0033 | 1645.96 | 1446.45 |
| Q - 3 - I | 62.6 | 44.02 | 3.8 | 0.50515 | 0.50135 | 0.5008 | 394.57 | 0.0038 | 0.00435 | 1028.4 | 898.37 |
| Q - 3 - II | 62.6 | 43.92 | 3.79 | 0.5059 | 0.50205 | 0.50155 | 393.69 | 0.00385 | 0.00435 | 1012.76 | 896.35 |
| Q - 3 - III | 62.6 | 43.87 | 3.89 | 0.50665 | 0.5026 | 0.50225 | 392.21 | 0.00405 | 0.0044 | 959.13 | 882.84 |
| Q - 3 - IV | 62.6 | 43.9 | 3.77 | 0.50745 | 0.5035 | 0.503 | 393.69 | 0.00395 | 0.00445 | 987.12 | 876.21 |
| Q - 3 - V | 62.6 | 43.96 | 3.94 | 0.5083 | 0.50445 | 0.5038 | 392.65 | 0.00385 | 0.0045 | 1010.1 | 864.19 |
| R - 1 - I | 63.7 | 76.71 | 7.03 | 0.5134 | 0.50195 | 0.5009 | 683.51 | 0.01145 | 0.0125 | 581.02 | 532.22 |
| R - 1 - II | 63.7 | 76.51 | 7.05 | 0.51435 | 0.50195 | 0.50165 | 681.44 | 0.0124 | 0.0127 | 534.88 | 522.25 |
| R - 1 - III | 63.7 | 76.57 | 7.02 | 0.5152 | 0.50275 | 0.50225 | 682.33 | 0.01245 | 0.01295 | 533.43 | 512.83 |

| ESPÉCIMEN | ALTURA (cm) | CARGA MÁXIMA (Kg) | FIN DE CARGA (Kg) | DH0 (mm) | DH FIN DE CARGA (mm) | DH ÚLTIMA (mm) | AMPLITUD DE CARGA (Kg) | DH INSTANTÁNEA (mm) | DH TOTAL (mm) | MR INSTANTÁNEO (MPa) | MR TOTAL (MPa) |
|-------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|
| R - 1 - IV | 63.7 | 76.55 | 7.14 | 0.5158 | 0.50385 | 0.50315 | 681 | 0.01195 | 0.01265 | 554.66 | 523.97 |
| R - 1 - V | 63.7 | 76.77 | 7.15 | 0.5166 | 0.505 | 0.50385 | 682.92 | 0.0116 | 0.01275 | 573.01 | 521.33 |
| R - 2 - I | 61.3 | 44.27 | 4 | 0.50515 | 0.5009 | 0.5002 | 395.02 | 0.00425 | 0.00495 | 940.07 | 807.13 |
| R - 2 - II | 61.3 | 44.08 | 3.94 | 0.50525 | 0.50085 | 0.5006 | 393.83 | 0.0044 | 0.00465 | 905.3 | 856.62 |
| R - 2 - III | 61.3 | 44.42 | 3.88 | 0.50555 | 0.5008 | 0.50065 | 397.68 | 0.00475 | 0.0049 | 846.78 | 820.86 |
| R - 2 - IV | 61.3 | 44.3 | 3.83 | 0.50575 | 0.50145 | 0.50085 | 396.94 | 0.0043 | 0.0049 | 933.66 | 819.33 |
| R - 2 - V | 61.3 | 44.18 | 3.88 | 0.50605 | 0.5017 | 0.50105 | 395.31 | 0.00435 | 0.005 | 919.14 | 799.65 |
| R - 3 - I | 64.2 | 32.85 | 2.64 | 0.5042 | 0.50045 | 0.5 | 296.34 | 0.00375 | 0.0042 | 763.15 | 681.39 |
| R - 3 - II | 64.2 | 33.09 | 2.54 | 0.5045 | 0.5006 | 0.50025 | 299.74 | 0.0039 | 0.00425 | 742.23 | 681.1 |
| R - 3 - III | 64.2 | 32.99 | 2.61 | 0.50475 | 0.5007 | 0.50035 | 297.97 | 0.00405 | 0.0044 | 710.5 | 653.99 |
| R - 3 - IV | 64.2 | 32.89 | 2.51 | 0.50465 | 0.5006 | 0.50055 | 298.11 | 0.00405 | 0.0041 | 710.86 | 702.19 |
| R - 3 - V | 64.2 | 33.08 | 2.51 | 0.5047 | 0.50085 | 0.5006 | 299.89 | 0.00385 | 0.0041 | 752.24 | 706.37 |
| R - 4 - I | 64.4 | 55 | 5.04 | 0.50745 | 0.50125 | 0.5006 | 490.15 | 0.0062 | 0.00685 | 761.1 | 688.88 |
| R - 4 - II | 64.4 | 55.03 | 5.04 | 0.50815 | 0.5015 | 0.50105 | 490.44 | 0.00665 | 0.0071 | 710.02 | 665.02 |
| R - 4 - III | 64.4 | 55.09 | 5.02 | 0.50855 | 0.50195 | 0.5015 | 491.18 | 0.0066 | 0.00705 | 716.48 | 670.75 |
| R - 4 - IV | 64.4 | 55.14 | 4.99 | 0.5092 | 0.50255 | 0.5019 | 491.92 | 0.00665 | 0.0073 | 712.17 | 648.75 |
| R - 4 - V | 64.4 | 55.02 | 5.01 | 0.50965 | 0.50295 | 0.5024 | 490.59 | 0.0067 | 0.00725 | 704.94 | 651.46 |
| S - 1 - I | 63.6 | 32.44 | 2.79 | 0.50465 | 0.5007 | 0.50025 | 290.86 | 0.00395 | 0.0044 | 717.84 | 644.42 |
| S - 1 - II | 63.6 | 32.5 | 2.75 | 0.5049 | 0.49975 | 0.49935 | 291.9 | 0.00515 | 0.00555 | 552.53 | 512.71 |
| S - 1 - III | 63.6 | 32.5 | 2.99 | 0.5039 | 0.50015 | 0.49955 | 289.53 | 0.00375 | 0.00435 | 752.66 | 648.84 |
| S - 1 - IV | 63.6 | 32.47 | 2.84 | 0.50415 | 0.50045 | 0.49985 | 290.71 | 0.0037 | 0.0043 | 765.95 | 659.07 |
| S - 1 - V | 63.6 | 32.47 | 2.73 | 0.5045 | 0.50055 | 0.5001 | 291.75 | 0.00395 | 0.0044 | 720.03 | 646.39 |
| S - 2 - I | 63.3 | 32.23 | 3.12 | 0.50275 | 0.5004 | 0.50025 | 285.54 | 0.00235 | 0.0025 | 1190.1 | 1118.69 |
| S - 2 - II | 63.3 | 32.17 | 3.31 | 0.50285 | 0.50085 | 0.50035 | 283.17 | 0.002 | 0.0025 | 1386.77 | 1109.42 |
| S - 2 - III | 63.3 | 32.26 | 3.18 | 0.50315 | 0.50085 | 0.5005 | 285.24 | 0.0023 | 0.00265 | 1214.71 | 1054.28 |
| S - 2 - IV | 63.3 | 32.29 | 3.09 | 0.50335 | 0.50085 | 0.50065 | 286.42 | 0.0025 | 0.0027 | 1122.17 | 1039.05 |

| ESPÉCIMEN | ALTURA (cm) | CARGA MÁXIMA (Kg) | FIN DE CARGA (Kg) | DH0 (mm) | DH FIN DE CARGA (mm) | DH ÚLTIMA (mm) | AMPLITUD DE CARGA (Kg) | DH INSTANTÁNEA (mm) | DH TOTAL (mm) | MR INSTANTÁNEO (MPa) | MR TOTAL (MPa) |
|-----------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|
| S- 2- V | 63.3 | 32.73 | 3.11 | 0.50355 | 0.50105 | 0.5009 | 290.57 | 0.0025 | 0.00265 | 1138.4 | 1073.96 |
| S- 3- I | 63.5 | 31.88 | 2.48 | 0.50575 | 0.50095 | 0.50085 | 288.5 | 0.0048 | 0.0049 | 586.84 | 574.86 |
| S- 3- II | 63.5 | 31.79 | 2.58 | 0.5065 | 0.5017 | 0.5016 | 286.57 | 0.0048 | 0.0049 | 582.92 | 571.03 |
| S- 3- III | 63.5 | 31.94 | 2.6 | 0.50745 | 0.50295 | 0.5024 | 287.9 | 0.0045 | 0.00505 | 624.67 | 556.64 |
| S- 3- IV | 63.5 | 31.84 | 2.64 | 0.5083 | 0.5037 | 0.50315 | 286.42 | 0.0046 | 0.00515 | 607.95 | 543.03 |
| S- 3- V | 63.5 | 31.88 | 2.66 | 0.5091 | 0.5043 | 0.5039 | 286.72 | 0.0048 | 0.0052 | 583.22 | 538.36 |
| T- 1- I | 66.3 | 22.32 | 1.99 | 0.50195 | 0.49995 | 0.4996 | 199.43 | 0.002 | 0.00235 | 932.49 | 793.61 |
| T- 1- II | 66.3 | 21.98 | 1.92 | 0.50215 | 0.5007 | 0.50015 | 196.77 | 0.00145 | 0.002 | 1269.02 | 920.04 |
| T- 1- III | 66.3 | 21.78 | 2.11 | 0.50225 | 0.5003 | 0.4999 | 192.92 | 0.00195 | 0.00235 | 925.18 | 767.7 |
| T- 1- IV | 66.3 | 22.04 | 1.93 | 0.5019 | 0.5004 | 0.49995 | 197.21 | 0.0015 | 0.00195 | 1229.48 | 945.75 |
| T- 1- V | 66.3 | 21.92 | 1.89 | 0.50205 | 0.50025 | 0.50025 | 196.47 | 0.0018 | 0.0018 | 1020.72 | 1020.72 |
| T- 2- I | 65.7 | 32.88 | 3.08 | 0.5023 | 0.4995 | 0.49985 | 292.34 | 0.0028 | 0.00245 | 985.28 | 1126.03 |
| T- 2- II | 65.7 | 33 | 2.93 | 0.50215 | 0.50015 | 0.50015 | 295.01 | 0.002 | 0.002 | 1391.96 | 1391.96 |
| T- 2- III | 65.7 | 32.94 | 2.93 | 0.5026 | 0.50025 | 0.5001 | 294.41 | 0.00235 | 0.0025 | 1182.27 | 1111.33 |
| T- 2- IV | 65.7 | 33.39 | 2.84 | 0.5026 | 0.49965 | 0.5003 | 299.74 | 0.00295 | 0.0023 | 958.85 | 1229.82 |
| T- 2- V | 65.7 | 33 | 2.99 | 0.5025 | 0.5002 | 0.5004 | 294.41 | 0.0023 | 0.0021 | 1207.97 | 1323.02 |
| T- 3- I | 65.8 | 31.28 | 2.55 | 0.50635 | 0.50165 | 0.5008 | 281.84 | 0.0047 | 0.00555 | 565.03 | 478.49 |
| T- 3- II | 65.8 | 31.19 | 2.55 | 0.50725 | 0.50245 | 0.5017 | 280.95 | 0.0047 | 0.00555 | 551.51 | 476.98 |
| T- 3- III | 65.8 | 31.24 | 2.28 | 0.5082 | 0.503 | 0.5026 | 284.06 | 0.0047 | 0.0056 | 514.72 | 477.95 |
| T- 3- IV | 65.8 | 31.36 | 2.46 | 0.5091 | 0.5041 | 0.5035 | 283.47 | 0.0047 | 0.0056 | 534.19 | 476.96 |
| T- 3- V | 65.8 | 31.18 | 2.49 | 0.5101 | 0.5049 | 0.5044 | 281.39 | 0.0047 | 0.0057 | 509.89 | 465.16 |
| U- 2- I | 66.1 | 32.67 | 3.06 | 0.5059 | 0.501 | 0.5009 | 290.42 | 0.0049 | 0.005 | 555.93 | 544.81 |
| U- 2- II | 66.1 | 32.94 | 3.25 | 0.50655 | 0.5019 | 0.50165 | 291.31 | 0.00465 | 0.0049 | 587.61 | 557.63 |
| U- 2- III | 66.1 | 33.05 | 2.84 | 0.5073 | 0.50285 | 0.5023 | 296.34 | 0.00445 | 0.005 | 624.62 | 555.91 |
| U- 2- IV | 66.1 | 33.12 | 2.91 | 0.50795 | 0.50305 | 0.5029 | 296.34 | 0.0049 | 0.00505 | 567.26 | 550.41 |

| ESPÉCIMEN | ALTURA (cm) | CARGA MÁXIMA (Kg) | FIN DE CARGA (Kg) | DH0 (mm) | DH FIN DE CARGA (mm) | DH ÚLTIMA (mm) | AMPLITUD DE CARGA (Kg) | DH INSTANTÁNEA (mm) | DH TOTAL (mm) | MR INSTANTÁNEO (MPa) | MR TOTAL (MPa) |
|-------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|
| U - 2 - V | 66.1 | 32.59 | 3.2 | 0.5084 | 0.5046 | 0.50355 | 288.35 | 0.0038 | 0.00485 | 711.74 | 557.66 |
| U - 3 - I | 65.7 | 33.57 | 3.38 | 0.5017 | 0.5002 | 0.49995 | 296.19 | 0.0015 | 0.00175 | 1863.39 | 1597.19 |
| U - 3 - II | 65.7 | 33.72 | 3.15 | 0.50165 | 0.50025 | 0.50005 | 299.89 | 0.0014 | 0.0016 | 2021.42 | 1768.74 |
| U - 3 - III | 65.7 | 33.74 | 3.55 | 0.5016 | 0.5002 | 0.49995 | 296.19 | 0.0014 | 0.00165 | 1996.49 | 1693.99 |
| U - 3 - IV | 65.7 | 33.71 | 3.29 | 0.5016 | 0.49985 | 0.49985 | 298.41 | 0.00175 | 0.00175 | 1609.16 | 1609.16 |
| U - 3 - V | 65.7 | 33.6 | 3.2 | 0.50155 | 0.50015 | 0.4999 | 298.26 | 0.0014 | 0.00165 | 2010.45 | 1705.84 |
| V - 1 - I | 62.7 | 33.15 | 3.17 | 0.50325 | 0.5005 | 0.50015 | 294.12 | 0.00275 | 0.0031 | 1057.58 | 938.17 |
| V - 1 - II | 62.7 | 33.11 | 3.26 | 0.5035 | 0.5005 | 0.50015 | 292.79 | 0.003 | 0.00335 | 965.06 | 864.23 |
| V - 1 - III | 62.7 | 33.26 | 3.21 | 0.50345 | 0.50055 | 0.5003 | 294.71 | 0.0029 | 0.00315 | 1004.89 | 925.14 |
| V - 1 - IV | 62.7 | 33.24 | 3.09 | 0.50365 | 0.5006 | 0.50035 | 295.75 | 0.00305 | 0.0033 | 958.83 | 886.19 |
| V - 1 - V | 62.7 | 33.42 | 3.02 | 0.50375 | 0.50075 | 0.50055 | 298.26 | 0.003 | 0.0032 | 983.1 | 921.66 |
| V - 2 - I | 64.6 | 33 | 2.91 | 0.5037 | 0.50025 | 0.5001 | 295.15 | 0.00345 | 0.0036 | 821.08 | 786.87 |
| V - 2 - II | 64.6 | 33.05 | 3.11 | 0.5038 | 0.5005 | 0.5002 | 293.67 | 0.0033 | 0.0036 | 854.1 | 782.93 |
| V - 2 - III | 64.6 | 33.29 | 2.94 | 0.5039 | 0.50045 | 0.50025 | 297.67 | 0.00345 | 0.00365 | 828.08 | 782.71 |
| V - 2 - IV | 64.6 | 33.12 | 2.97 | 0.504 | 0.50045 | 0.5003 | 295.75 | 0.00355 | 0.0037 | 799.55 | 767.14 |
| V - 2 - V | 64.6 | 33.27 | 2.91 | 0.5041 | 0.50065 | 0.50035 | 297.82 | 0.00345 | 0.00375 | 828.49 | 762.21 |
| V - 3 - I | 63.8 | 31.67 | 2.63 | 0.5071 | 0.50145 | 0.50135 | 284.95 | 0.00565 | 0.00575 | 490.1 | 481.58 |
| V - 3 - II | 63.8 | 31.97 | 2.7 | 0.5085 | 0.50285 | 0.50245 | 287.16 | 0.00565 | 0.00605 | 493.92 | 461.26 |
| V - 3 - III | 63.8 | 31.9 | 2.67 | 0.50965 | 0.50395 | 0.5035 | 286.72 | 0.0057 | 0.00615 | 488.83 | 453.06 |
| V - 3 - IV | 63.8 | 31.82 | 2.42 | 0.5108 | 0.50475 | 0.5045 | 288.5 | 0.00605 | 0.0063 | 463.4 | 445.01 |
| V - 3 - V | 63.8 | 31.78 | 2.48 | 0.51175 | 0.50575 | 0.50565 | 287.46 | 0.006 | 0.0061 | 465.58 | 457.95 |