

Evaluación del pavimento asfáltico reciclado como sustituto de agregado virgen en mezclas asfálticas en caliente.



CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Sergio Fernández Cerdas, Ing. Pedro Castro Fernández, Ing. Alejandro Medina Angulo, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



Ing. Gustavo Rojas Moya.
Director



Ing. Sergio Fernández Cerdas.
Profesor Guía

P/ Braulio E. Umaña Q.
Ing. Pedro Castro Fernández.
Profesor Lector



Ing. Alejandro Medina Angulo.
Profesor Observador

Abstract

This report presents the results for the evaluation of recycled asphalt pavement (RAP) as aggregate, this with the purpose of incorporating it into hot mix asphalt as a substitute for virgin aggregates. This objective is fulfilled by carrying out laboratory tests requested in the “Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes” (CR-2010) and describe by the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), to check its behavior as fine or coarse aggregate.

Once verified that the RAP complies with the requests of the CR-2010, a mix design in the made for the Municipality of Cartago, in which 15% of the recycled material is included, the parameters indicated by the Marshall method.

Two Experimental mixing designs are made, with the only variation of the RAP contents ((0%,15% y 45%), that is, maintaining the percentage of asphalt used, in orden to testo the hypothesis that between the more RAP present in the mixture, the lower the fatigue cracking. This is verified with the performance review of the asphalt mixtures as described in CR-2010.

It is concluded, with the experimental methods, that it has been greater than the use RAP, the damage by the humidity, and the resistance to the failure by the fatigue cracking when comparing the data obtained with the results of the control asphalt mix.

Keywords:

AASHTO, CR-2010, Marshall, RAP.

Resumen

Este informe presenta los resultados de la evaluación del pavimento asfáltico reciclado (RAP, por sus siglas en inglés) como agregado, esto con la finalidad de incorporarlo dentro de las mezclas asfálticas en caliente, como sustituto de agregados vírgenes. Este objetivo se cumple mediante la realización de ensayos de laboratorio, solicitados en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes, (CR-2010) y descritos en las normas de referencia Asociación América de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO, por sus siglas en inglés) para comprobar su comportamiento como agregado fino y/o grueso.

Una vez comprobado que el RAP cumple con las solicitudes del CR-2010, se realiza un diseño de mezcla para la Municipality de Cartago, en el cual se incluyen un 15% del material reciclado, el cual cumple con los parámetros indicados para el método de diseño Marshall.

Además, se realizan dos diseños experimentales de mezcla, con la única variación de los contenidos de RAP (0%,15% y 45%), es decir, manteniendo el porcentaje de asfalto utilizado, con la finalidad de probar la hipótesis de que cuanto más RAP presente en la mezcla, menor será la resistencia a la fatiga. Esto se comprueba con la revisión del desempeño de las mezclas asfálticas, según lo descrito en el CR-2010.

Se concluye, con lo métodos experimentales, que a mayor uso de RAP, las mezclas asfálticas sufren menor daño por humedad, pero también presentan menor resistencia a la falla por fatiga, esto obtenido mediante indicadores de tensión indirecta, al comparar los datos obtenidos con los resultados de la mezcla asfáltica de control.

Palabras clave:

AASHTO, CR-2010, Marshall, RAP.

Evaluación del pavimento asfáltico reciclado como sustituto de agregado virgen en mezclas asfálticas en caliente

HANSI ALVARADO ROJAS

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Junio 2019

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

PREFACIO	1
RESUMEN EJECUTIVO	3
INTRODUCCIÓN	4
LIMITACIONES	5
MARCO TEÓRICO	6
METODOLOGÍA.....	16
RESULTADOS	23
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	43
CONCLUSIONES.....	48
RECOMENDACIONES	49
REFERENCIAS	50
APÉNDICES	52
ANEXOS.....	90

Prefacio

En la actualidad, las empresas y entidades gubernamentales se han comprometido a generar soluciones para disminuir el impacto ambiental generado por las diferentes actividades que realizan.

Es por ello que uno de los objetivos principales del presente Proyecto de Graduación está dirigido a fomentar el uso de material de reciclaje, en específico, el pavimento asfáltico reciclado (RAP, por sus siglas en inglés), dado que los materiales comúnmente utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas no son renovables, tales como: agregados (quintilla, cuartilla, polvo de piedra) y el asfalto. La utilización de este material es muy recurrente en países como Estados Unidos y España, debido a que es una alternativa tecnológicamente viable y lo más importante, sostenible.

Estudios realizados por la Asociación Nacional de Pavimento de Asfalto señalan que más de 67,65 millones de toneladas de material reciclado ha sido utilizado en nuevos pavimentos, lo que significa que más del 99% de material retirado en reconstrucciones o mantenimientos de carreteras se ha incluido en la generación de nuevas mezclas asfálticas. Esta práctica no es reciente, sin embargo, se mantiene en constantes estudios e investigaciones para mejorar su desempeño frente a las cargas de trabajo. Costa Rica ha mostrado un interés creciente en la inclusión de estos dado que los agregados representan un aproximado del 95% de las mezclas asfálticas

Debido a los beneficios anteriormente descritos, se ha presentado el expediente N°.20.570 "Ley para el uso de materiales reciclados en obras de infraestructura vial (Ley de Pavimentos Reciclados) donde se indica que, de aprobarse, se utilice en los primeros tres años un quince por ciento (15%) de material reciclado en mezclas asfálticas, en los siguientes dos años tendrán un treinta por ciento (30%) y después de cinco años al menos el cincuenta por ciento (50%) (expediente

N°.20.570, p 3). Una vez estudiada esta ley, se presenta uno de los objetivos específicos, de analizar las características físico-mecánicas del RAP para su uso como sustituto de agregado virgen.

La Municipalidad de Cartago desea incluir este tipo de prácticas en la elaboración de las mezclas asfálticas que utilizan en su red vial cantonal, ya que además de los beneficios ambientales y económicos que esta práctica conlleva, también representa para la entidad que los campos destinados para almacenamiento del material asfáltico retirado sean reducidos.

Los procedimientos técnicos realizados para ensayos de laboratorio están basados en lo descrito en las normas AASHTO, ASTM y el Instituto del Asfalto. La manipulación y elaboración de las mezclas asfálticas con RAP se ejecutan, según el Instituto del Asfalto.

Agradecimientos

Le agradezco a Dios por el don de la vida, sabiduría y fortaleza para culminar esta etapa de estudios universitarios.

A mis padres, Ricardo Alvarado y Xinia Rojas, mis hermanos Franklin y Angie por el apoyo incondicional en la obtención del título, por cada uno de sus consejos, y enseñanzas dadas a lo largo de la vida.

A Juan Carlos Mora, por ser un soporte en mis estudios, por brindarme motivación, cariño y compañía en todos estos años.

A mis amigos, que durante los años universitarios formaron parte de esta lucha por alcanzar nuestros sueños, brindándonos apoyo en cada uno de los retos que se nos presentaron para convertirnos en profesionales.

A la Escuela de Ingeniería en Construcción y a los técnicos del Laboratorio CIVCO por su colaboración en la elaboración para poder realizar este proyecto.

Finalmente, a mi profesor guía, el Ingeniero Sergio Fernández Cerdas por compartir sus

conocimientos y consejos, el apoyo, paciencia y confianza durante la etapa final de la carrera. Al señor Roger Arroyo y a los técnicos, Jorge Miranda y Bryan Irama de la empresa Ingeniería Técnica de Proyectos por su colaboración.

“Yo estaré contigo y no te abandonaré hasta cumplir lo que te he prometido. Te cuidaré por dondequiera que vayas”. (Génesis 28:15)

Resumen ejecutivo

La investigación desarrollada busca determinar si el pavimento asfáltico retirado, ya sea por reconstrucción, rehabilitación o mantenimiento de carreteras, sirve como sustituto de agregado virgen para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.

Para determinar esta posibilidad, se realizan una serie de pruebas para agregados finos y gruesos, las cuales son solicitadas en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes, CR-2010 y descritas en las normas AASHTO.

Una vez desarrolladas las pruebas requeridas se procede, mediante el uso de gráficos, a examinar los resultados con los datos de los agregados vírgenes y lo especificado en el CR-2010 para verificar si el agregado de RAP cumple con los requisitos solicitados para agregado grueso y fino para mezclas asfálticas. Se finaliza esta etapa con resultados satisfactorios, dado que el RAP cumple con lo solicitado para agregado grueso y agregado fino.

Cumplido este objetivo, se procede a incluir este material en la mezcla asfáltica, en un porcentaje de 15%, lo cual será la propuesta de diseño para la Municipalidad de Cartago; para este diseño, el RAP se trabaja como agregado individual. Los resultados obtenidos para el diseño propuesto son positivos, cumpliendo con los parámetros definidos por el CR-2010, cuando se realizan diseños mediante la metodología Marshall.

Luego, se proponen dos porcentajes adicionales de 15% y 45% , para maximizar el uso del RAP. Este diseño experimental se trabaja sustituyendo el agregado virgen por RAP en cada tamiz.

Para cada uno de los diseños, se utilizan cuatro porcentajes de asfalto 4.0%, 4.5%, 5.0% y 5.5%, se seleccionan estos porcentajes, debido al asfalto que posee el RAP, se realizan las pruebas correspondientes al método de diseño, para verificar el comportamiento físico y mecánico de los diseños de mezcla y obtener el porcentaje

óptimo de asfalto para un porcentaje de vacíos de 4%.

Una vez obtenido el porcentaje óptimo de asfalto, se procede a verificar que cumpliera con las solicitaciones indicadas en el CR-2010, sección 403. Dentro de las características más importantes a analizar, se encuentran el daño inducido por humedad y resistencia a la tensión indirecta, como indicador de la resistencia la fatiga. Mediante la elaboración de gráficos, se realiza la revisión del comportamiento de la mezcla asfáltica y se compara con una mezcla asfáltica de control, la cual no posee RAP.

Se concluye que a mayor porcentaje de RAP incluido en el diseño, se tiene una menor resistencia a la falla por fatiga, debido al asfalto oxidado que este posee, lo que genera una mezcla asfáltica más rígida, en comparación con la mezcla asfáltica de control.

Introducción

Hoy día, el cuidado del medio ambiente se ha vuelto parte importante de los objetivos de las empresas públicas y privadas. Es por eso que se lucha por hacer un aprovechamiento máximo de los materiales con los que se trabaja e inclusive darles una reutilización.

Generar una segunda vida útil a los materiales utilizados en los procesos constructivos de carreteras implica que se deben realizar una serie de pruebas solicitadas en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes, CR-2010 y descritas en las normas AASHTO, para definir si es posible su uso nuevamente, además de las implicaciones que esto generaría en la nueva mezcla asfáltica, ya que se cree que esta práctica puede mejorar o igualar las propiedades mecánicas y funcionales de las mezclas asfálticas siempre que su porcentaje de uso sea regulado, ya que un exceso de este puede generar una mezcla frágil y/o que falle por fatiga.

Esta aplicación del pavimento asfáltico reciclado (RAP), ha resultado ser una excelente alternativa para el área de carreteras, ya que no se deben generar lugares para almacenar el material retirado, ya sea por reconstrucción o por envejecimiento, además de reducir costos en compra y acarreo de material virgen.

Su uso en países como Estados Unidos data desde los años setenta, desde entonces, los avances en cuanto a maquinaria y cantidad permitida utilizada ha ido en aumento, para el año 2009, según la Administración Federal de Carreteras (FHWA, por sus siglas en inglés) se ha reciclado aproximadamente el 98% del material retirado.

En Costa Rica, su uso ha sido incluido dentro de la elaboración de mezclas asfálticas de manera cautelara, debido a las pocas investigaciones que se tienen al respecto, lo que genera desconfianza en su uso regular. Aunado a la poca información existente, en el país solo se distribuye cemento asfalto AC-30, el cual tiene como característica ser semirrígido, lo que limita el

uso del RAP, debido al contenido de ligante oxidado que este posee, ya que al ser combinados generan una rigidización de la mezcla asfáltica.

El expediente N°.20.570 "Ley para el uso de materiales reciclados en obras de infraestructura vial (Ley de Pavimentos Reciclados) viene a ser un incentivo por parte del gobierno hacia las municipalidades y entes privados, para generar más estudios y uso regular del RAP, además de mantener costos competitivos, de manera que nuevos inversores sean atraídos y se dé un mantenimiento regular a las carreteras existentes.

Objetivo general

- Evaluar el pavimento asfáltico reciclado RAP para uso, como sustituto de agregado pétreo en mezcla asfáltica en caliente en el cantón de Cartago

Objetivos específicos

- Determinar las características físicas y mecánicas del material reciclado para verificar su uso como agregado grueso y fino.
- Diseñar mezclas asfálticas variando porcentajes de material de reciclado.
- Evaluar el comportamiento volumétrico y desempeño mecánico de las mezclas asfálticas mediante pruebas de laboratorio.
- Comparar resultados obtenidos de los diseños de mezcla con lo especificado en la norma CR-2010.

Limitaciones

En lo que corresponde a la elaboración de las diferentes etapas del proyecto, se contó con las siguientes limitaciones:

- El agregado virgen sugerido por personeros de la Municipalidad de Cartago no posee las características mínimas establecidas por el CR-2010, por ende, no fue utilizado para elaborar el proyecto.
- El material reciclado no contaba con una granulometría ajustada, tal que se pudiese maximizar su uso en las mezclas asfálticas.
- Disponibilidad limitada de los equipos necesarios para realizar el proyecto, tales como hornos y charolas.

Marco teórico

Fundamentos del pavimento asfáltico

Definición

El pavimento asfáltico es el tipo de pavimento de mayor uso alrededor del planeta; siendo que este tiene usos desde residenciales, portuarios, aeroportuarios y autopistas, en general. Su elaboración y composición depende de factores como: clima, tráfico, materiales a disposición y su distancia, así como su ubicación geográfica. (Asphalt Institute, 2014, p.1)

Los pavimentos asfálticos se clasifican, según sus componentes, metodologías de diseño o la manera en que se realiza la mezcla; las cuales se presentan a continuación:

Tipos de mezclas asfálticas

Mezcla asfáltica en caliente

Se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de cemento asfáltico y agregados mineral, combinados de tal manera que todas las partículas de agregado estén cubiertas de ligante. (CR-2010, p.334)

Se caracteriza por tener una granulometría específica para los diferentes tamaños nominales de los agregados utilizados en el diseño, tal que cada uno de los tamaños cuenta con sus debidas especificaciones, tanto para límites superiores e

inferiores, o sea que la granulometría de diseño donde se combinen los agregados utilizados quede entre ellos.

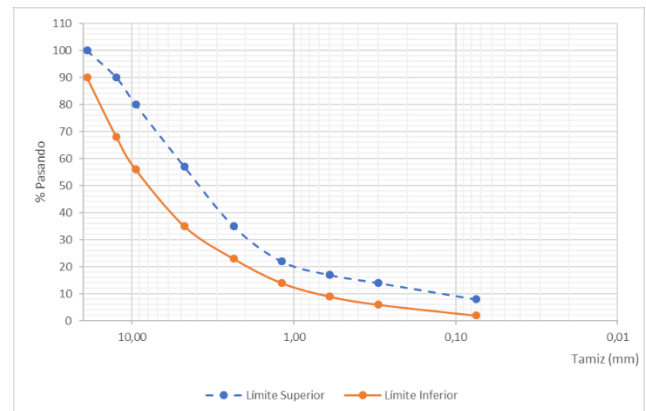


Figura 1. Gráfica de la curva granulométrica correspondiente a las especificaciones del CR-2010, para un tamaño máximo nominal de 19mm.

Se debe considerar que las graduaciones con un tamaño máximo nominal, igual o menor a 19 mm se utilizan para capas de rueda, mayor a este tamaño nominal, se usa en capas intermedias o en la base (CR-2010, p.335).

Mezcla asfáltica en frío

Las mezclas asfálticas en frío son una combinación de aglutinantes asfálticos emulsionados o recortados (Asphalt Institute, 2015, p.167). Al realizar una comparación entre la mezcla asfáltica caliente y en frío, se obtienen diferencias como el consumo de energía donde en esta segunda, tiende a ser menor al igual que sus emisiones; además, su temperatura de colocación es más baja.

Se recomienda su uso en la capa de rodadura, si el tráfico en sitio es liviano y medio; cuando se usa en la base o en la subbase no hay restricción en el tráfico (Asphalt Institute, 2015, p.167). Cuando se usan en trabajos grandes, se obtiene una reducción considerable en los costos de construcción, sin verse afectados parámetros como resistencia o calidad (Asphalt Institute, 2015,

p.167), además, esta mezcla puede ser utilizada para satisfacer las necesidades actuales del tráfico, sin embargo, se requiere de una capa delgada de mezcla asfáltica en caliente como un tratamiento superficial.

Este tipo de mezcla tiene como principal característica un contenido de vacíos alto (mayor al 10%), se puede aplicar tanto en bacheos como en capas de rodaduras. Cabe resaltar que su colocación y extensión se puede resaltar a temperatura ambiente; es una mezcla de agregado mineral con o sin relleno mineral, con asfalto emulsionado o rebajado.

Pavimentos flexibles

Constituidos por varias capas, que permiten una distribución de esfuerzos, inducidos por el tránsito, hasta el terreno natural sin que estas sufran deformaciones. Estructuralmente sus capas se colocan en orden descendente, de acuerdo con su capacidad de carga, las cuales son:

- **Carpeta asfáltica:** es el elemento visible de los pavimentos flexibles, las cargas debido al tránsito generan grandes deformaciones en ella.
- **Base:** ubicada bajo la carpeta de rodamiento, se encarga de absorber la mayor parte de los esfuerzos, debido a las sollicitaciones del tránsito, es por ello que para sollicitaciones bajas o medias se usan bases granulares tradicionales, mientras que para tránsito pesado, se utilizan bases tratadas con algún cementante.
- **Subbase:** se encuentra entre la base y la subrasante, encargada de brindar un apoyo uniforme y permanente.
- **Subrasante:** debe ser constituido por suelos compactables, tal que se obtenga al menos un 95% de compactación, ya que debe de brindar estabilidad a las otras capas y absorber los esfuerzos que le lleguen.

Su vida útil está estimada de 10 a 15 años, sin embargo, se debe considerar el darles un mantenimiento constante.

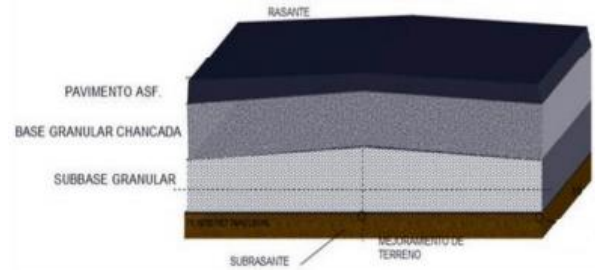


Figura 2. Composición de pavimento flexible.
Fuente: LANAMME UCR.

Pavimentos de concreto hidráulico o rígidos

Estos pavimentos están compuestos por agregados gruesos, finos, arenas, polvo de piedra y cemento asfáltico. Su temperatura de fabricación, colocación y fabricación depende de la viscosidad del asfalto utilizado. Posee bajo contenido de vacíos (4% generalmente). Estas mezclas pueden ser utilizadas, por su composición, en: capa de rodadura o base asfáltica. Generalmente, están constituidos por una losa de concreto con una subbase granular y colocada directamente sobre la subrasante (LANAMME, 2013)

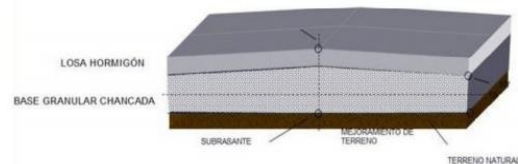


Figura 3. Composición de pavimento rígido.
Fuente: LANAMME UCR.

Componentes de la mezcla asfáltica

Agregado

Material granular duro, de composición mineralógica como arena, grava y polvo de piedra. Es de suma importancia en la mezcla asfáltica, dado que representa entre el 90%-95% de ella.

Los agregados se pueden clasificar de acuerdo con su tamaño, de la siguiente manera:

- ❖ **Agregado fino:** según CR-2010, en la página 16 se indica que el agregado fino se define como el material que pasa el tamiz de 4,75 mm (No.4).
- ❖ **Agregado grueso:** el CR- 2010, página 16, lo describe como el material retenido en el tamiz de 4,75 mm (No.4). Los agregados gruesos son los encargados de la resistencia a la tracción de la mezcla asfáltica.
- ❖ **Polvo de piedra o relleno mineral:** material que cuenta con al menos un 70% pasando tamiz No. 200 (0,075 mm), según lo descrito en el CR-2010 página 29.

Cemento asfáltico

Material cementante, de color marrón oscuro a negro, constituido principalmente por betunes de origen natural o de obtención mediante refinamiento del petróleo (Manual de productos, RECOPE, 2018, p. 36). Este material debe ser manejado con las estrictas recomendaciones dadas en la ficha técnica, dado que a una temperatura mayor a la indicada para mezclado, el aglutinante pierde características fisicoquímicas y tiende a degradarse. Aunado a ello, se debe controlar la temperatura para que tenga el comportamiento deseado, tanto en la colocación como en su reacción ante la aplicación de carga (Decreto ejecutivo N°32812).

Sus características físicas más importantes son la viscosidad, adherencia e impermeabilidad, además de su durabilidad, resistencia a la reacción con ácidos, bases y sales (Manual de productos, RECOPE, 2018, p. 36).

En Costa Rica, el asfalto de comercialización es el AC-30, el cual es distribuido por RECOPE, dado que según un convenio entre CONAVI, MOPT y RECOPE es el que más se adecua a las necesidades ambientales y constructoras del país (Decreto ejecutivo N°32812).

Pavimento asfáltico reciclado, RAP

El pavimento asfáltico reciclado RAP (*“Recycled Asphalt Pavement”* por sus siglas en inglés) se define, según FHWA (2008), como el material de pavimento retirado y/o procesado, el cual contiene

asfalto y agregados. Este material se obtiene cuando el pavimento asfáltico en uso es retirado para la rehabilitación o reconstrucción de la vía.

El material retirado es procesado, obteniendo una granulometría variada, junto con ella, características como el contenido de ligante adherido a los agregados, marcan un límite para su uso. Cabe recordar que el material retirado posee asfalto envejecido, debido a condiciones ambientales causadas por el calor o por el agua, sin embargo, esta misma condición de contenido de asfalto permite utilizar menos aglutinante virgen y por ende, disminuye su costo.

Su uso es permitido hasta en un 50%, según el CR-2010, página 258, esto debido a que el RAP presenta características similares a las mezclas asfálticas en caliente convencionales e inclusive, se pueden mejorar.

Debido al contenido de asfalto hallado en el RAP, se debe realizar un tratamiento a este que consiste en que este debe ser trabajado por aparte de los agregados vírgenes, dado que su preparación para ser mezclado debe realizarse con una anticipación de 2 horas y un máximo de 110°C, esto para evitar la activación del asfalto que posee.

Conociendo el contenido de asfalto se realiza una corrección del contenido de RAP seleccionado, tal que:

$$\%RAP \text{ corregido} = \%RAP \text{ propuesto} * 1 - \frac{Pb_{RAP}}{100} \dots (Ec. 1)$$

Con Pb correspondiente a la cantidad de asfalto en el RAP.

Continuando con las correcciones correspondientes a los porcentajes de agregados vírgenes a utilizar, dado que:

$$\%A.V_u = A.V_p + \frac{A.V_p}{\sum \%A.V} * (\%RAP - \%RAP_{correg}) \dots (Ec. 2)$$

A.V u= agregado virgen a usar (%).

A.V p= agregado virgen propuesto (%).

$\sum \%A.V$ = sumatoria de los porcentajes de agregado virgen a utilizar (%).

Este procedimiento se debe realizar para cada uno de los agregados vírgenes utilizados y su resultado se debe de multiplicar por el peso deseado para los cilindros de prueba. Para el RAP la corrección se realiza mediante:

$$RAP, ag (g) = RAP, corregido (g) * \frac{\%RAP, pro}{\%RAP, corre} \dots (Ec. 3)$$

Una vez corregidos los agregados vírgenes y el RAP se debe corregir la cantidad de asfalto virgen a utilizar en las mezclar, esto mediante:

$$\text{Asf. V} = T. A * \frac{Pb}{Ps} - (\text{RAP, ag} - \text{RAP, corr}) \dots \dots (\text{Ec. 4})$$

con;

Asf.V= asfalto virgen a utilizar (g).

T.A= peso total de los agregados (g).

Pb=porcentaje de asfalto propuesto (%).

Ps= contenido de agregado (%).

RAP, ag= peso de RAP a utilizar en la mezcla (g).

RAP, corr= peso de RAP corregido a utilizar en la mezcla (g).

Para comprobar que se puede utilizar como sustituto de agregado virgen se realizan las siguientes pruebas de laboratorio, las cuales se encuentran indicadas en la AASHTO:

- ❖ **Granulometría:** descrita en la AASHTO T27 “Método Estándar de Prueba para Análisis de Tamices de Agregados Finos y Gruesos”, se utiliza para determinar el tamaño máximo nominal del material en estudio. Para los agregados gruesos desde 50,8 mm hasta 4,75 mm y para los agregados finos se utilizan los tamices de 4,75 hasta lo retenido en la charola. Su distribución granulométrica se compara con la Tabla 418-2 del CR-2010, división 400, según el tamaño máximo nominal seleccionado para el diseño de la mezcla asfáltica.

La granulometría es de gran importancia en las mezclas asfálticas, debido a que según sea su capacidad de absorción de los agregados usados y el porcentaje de finos, así será el contenido de asfalto óptimo, debido que cuanto mayor cantidad de finos, mayor cantidad de asfalto será requerido.

- ❖ **Resistencia a la abrasión:** realizada mediante lo descrito en la AASHTO T-96 “Resistencia a la Degradación del Agregado Grueso de Pequeño Tamaño por Abrasión e Impacto en la Máquina de los Ángeles”. Se utiliza para determinar la resistencia de los agregados ante agentes abrasivos. Se compara con lo indicado en el CR-2010 sección 703.07.

Su valor se determina mediante la fórmula:

$$\% \text{ Abrasión} = \frac{A - B}{A} * 100 \dots \dots \dots (\text{Ec. 5})$$

con;

A= eso inicial de los agregados (g).

B=peso de los agregados secos al horno, después de la máquina Los Ángeles (g).

- ❖ **Contenido de asfalto:** esta prueba permite determinar el contenido de asfalto que posee el RAP. Es importante ya que con este valor se determinan las cantidades de asfalto virgen que se puede incorporar a la mezcla.

El método para encontrar dicho valor se encuentra descrito en la AASHTO T308/164 “Método Estándar de Prueba para Determinar el Contenido de Aglomerante de Asfalto de Mezcla Caliente mediante el Método de Ignición”, esta indica que su valor se obtiene con la siguiente formula:

$$Pb = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100 - MC - C_f \dots (\text{Ec. 15})$$

Pb= Contenido de asfalto (%).

Mi= Masa inicial antes de la ignición (g).

Mf=Masa final, después de la ignición (g).

MC= Contenido de humedad de la muestra (%).

- ❖ **Gravedades:** en el caso del RAP, l determinación de la gravedad máxima teórica, gravedad especifica bruta y gravedad aparente se realiza mediante lo descrito por el Instituto del Asfalto, dado que este material ya posee asfalto oxidado, por lo que de realizarse, según la AASHTO T84 y T85 para agregados finos y agregados gruesos respectivamente, no se obtendría datos válidos o representativos.

- **Gravedad máxima teórica (Gmm):** para realizar esta prueba, es preciso conocer de antemano, el contenido de asfalto que contiene el RAP. Aunado a esto, existen errores ligados a las caras sin recubrimiento de asfalto, debido al fresado o trituración del material, para evitar errores; se agrega asfalto virgen, de 1-3% del asfalto que contiene el RAP, tal que todas las caras del material estén cubiertas con asfalto.

$$Gmm = \frac{A - B}{(A + D) - (E + K)} \dots \dots (\text{Ec. 6})$$

Tal que:

A= masa de la muestra secada al horno (g).

B= masa de asfalto virgen agregado (g).

D= masa del recipiente lleno de agua a 25°C (g).

E= masa del recipiente lleno de agua a 25°C y muestra (g).

K= volumen del asfalto virgen agregado en ml.

• **Gravedad específica efectiva (Gse):**

$$Gse = \frac{100 - Pb}{\frac{100}{Gmm_{RAP}} - \frac{Pb}{Pb}} \dots \dots \dots (Ec. 7)$$

Pb= asfalto contenido en el RAP.

Gb= gravedad específica del asfalto.

• **Gravedad específica bruta (Gsb)=**

$$Gsb = \frac{Gse}{\frac{Pba * Gse}{100 * Gb}} \dots \dots \dots (Ec. 8)$$

Pba= asfalto absorbido.

Gb= gravedad específica del asfalto.

❖ **Caras fracturadas:** su resultado es importante en el diseño de la mezcla asfáltica, ya que genera aumento en la fricción interna de las partículas e indica el porcentaje de caras que estarán en contacto con el ligante. Se realiza, según la ASTM D5821 "Porcentaje de Partículas Fracturadas en el Agregado Grueso", se utiliza dos tamaños de 1/2" y 3/8"

Para determinar el porcentaje de caras fracturadas, se aplica:

$$Caras Fracturadas = \frac{A}{B} * 100 \dots \dots \dots (Ec. 9)$$

donde;

A= peso de partículas fracturadas (g).

B= peso total de la muestra (g)

❖ **Sanidad de los agregados:** esta prueba permite estimar la sanidad de los agregados cuando estos se encuentran expuestos a condiciones climatológicas. Se realiza, según lo indicado en la AASHTO T-104 "Pérdida por Disgregación en Sulfato de Sodio".

Para agregados gruesos se determina:

$$Pérdida total = \frac{A - B}{C} * 100 \dots \dots \dots (Ec. 10)$$

donde;

A= Peso de la fracción ensayada (g).

B= Peso retenido después del ensayo (g).

C= Peso de la fracción ensayada (g).

$$Pérdida Corregida = \frac{D - E}{100} \dots \dots \dots (Ec. 11)$$

D= Gradación original.

E= Pérdida total (g).

Con agregados finos se debe determinar:

$$Pérdida total = \frac{A - B}{C} * 100 \dots \dots \dots (Ec. 12)$$

Donde;

A= peso de la fracción ensayada (g).

B= peso retenido después del ensayo (g).

C= peso de la fracción ensayada

$$Pérdida coregida = \frac{E - D}{100} \dots \dots \dots (Ec. 13)$$

con;

D= gradación original

E= pérdida total.

❖ **Partículas friables y contenido de arcilla:** con la ASHTO T112 "Método Estándar de Prueba para algunos Grupos de Arcilla y Partículas Friables en Agregados" con ella se determina un aproximado de partículas friables en los agregados naturales. Su cálculo se obtiene:

$$\% Grupos Arcillas = \frac{A - B}{A} * 100 \dots \dots \dots (Ec. 14)$$

donde;

A= peso de la muestra de ensayo (g).

B= peso de las partículas retenidas en la malla (g).

El tamaño de la malla varía según el tamaño de las partículas de las que se componen la muestra, la cual va desde 850 μm hasta 4,75 mm.

- ❖ **Equivalente de arena:** determinar las proporciones relativas de partículas arcillosas, finos plásticos y polvo en suelos granulares y agregados finos que pasen por el tamiz de 4,75 mm, la descripción de los procesos se encuentra en la AASHTO T176 "Método Estándar de Prueba para Finos Plásticos en Agregados Graduados y Suelos Mediante el uso de Ensayo Equivalente en Arena".
- ❖ **Índice de durabilidad de los agregados:** se utiliza para determinar la resistencia relativa de los agregados cuando estos son sometidos a métodos mecánicos de desgaste. Su procedimiento se encuentra descrito en la AASHTO T210 "Método Estándar de Prueba para el Índice de Durabilidad del Agregado"

Metodologías de diseño de mezcla asfáltica

Método de diseño Marshall

La metodología Marshall utiliza una granulometría de diseño cerrada o densa, según sea lo deseado, dicha clasificación está en función de dos parámetros principales, los cuales son el tamaño máximo nominal y las especificaciones, las cuales en el presente proyecto están designadas por la tabla 418-2, página 336 del CR-2010, o simplificado, este método se basa en la estabilidad y contenido de vacíos de la mezcla.

Para un correcto funcionamiento de la mezcla asfáltica, se debe determinar una cantidad óptima de asfalto, el cual es el resultante de pruebas con diversos porcentajes de este. Dicho componente es de suma importancia, dado que si esta falla por fatiga, se da una pérdida paulatina de las propiedades estructurales de los pavimentos asfálticos, producto de las cargas reiteradas por estados de tensión y deformación en las fibras inferiores (FHWA, 2003).

Esta falla se puede describir en tres fases, según un análisis realizado por Baaj y Di Benedetto (2005), en la fase I, se inician las microfisuras, produciéndose un descenso rápido del módulo dinámico. La fase II; conocida también como fase de fatiga, es determinada por el rol más preponderante que toma el deterioro por fatiga; en la evolución del daño de mezcla, aparecen las microfisuras debido a la unión de las microfisuras generadas en la fase anterior. Por último, la fase III o fase de ruptura, donde las microfisuras progresan rápidamente hasta la falla total de la mezcla.

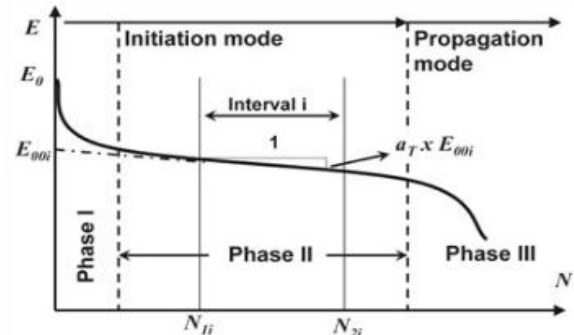


Figura 4. Fases de degradación por el fenómeno de fatiga.

Aunado a la determinación de la cantidad óptima de asfalto, se realizan una serie de pruebas para verificación del correcto funcionamiento del diseño, las cuales están avaladas por la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras y Transportes del Estado (AASHTO, por sus siglas en inglés) y la ASTM (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, por sus siglas en inglés), dichas pruebas son:

- ❖ **Elaboración de mezclas:** su procedimiento de elaboración se encuentra descrito en la ASTM D6926 "Práctica Estándar para la Preparación de Muestras de Mezcla Asfáltica Utilizando un Aparato Marshall", preparación y compactación de mezcla asfáltica para especímenes de $63,5 \pm 1,27$ mm de altura y un diámetro de 101,6 mm.
Cf= Factor de corrección.
- ❖ **Contenido de asfalto óptimo:** valor obtenido directamente de laboratorio, al analizar los resultados que se tienen de las diferentes pruebas que se describen en

esta sección, y es el porcentaje de vacíos en la mezcla una de las más importantes por cumplir.

Este valor depende del comportamiento de los agregados y su capacidad de absorción, granulometría del combo de diseño, tal que la presencia de muchos finos aumenta la superficie total, requiriendo así un mayor porcentaje de aglutinante.

- ❖ **Gravedad específica bruta:** se realiza, según la AASHTO T166 “Método estándar de prueba para la gravedad específica bruta (Gmb) de asfalto compacto de mezcla caliente (HMA) usando muestras saturadas de superficie seca”, se determina mediante la fórmula:

$$Gmb = \frac{A}{B - C} \dots \dots \dots (Ec. 16)$$

donde;

- A= Peso seco del espécimen (g).
- B= Peso sumergido del espécimen (g).
- C= Peso superficie saturada seca (g).

- ❖ **Gravedad máxima teórica:** AASHTO T209 “Método estándar de prueba para la gravedad específica máxima teórica (mm) y la densidad del asfalto de mezcla caliente (HMA)”, se calcula de la siguiente manera:

$$Gmm = \frac{D - E}{(D - E) + F - G} \dots \dots \dots (Ec. 17)$$

donde;

- D=Peso de recipiente más material (g).
- E=Peso de recipiente (g).
- F=Peso de recipiente, material y agua (g).
- G= Peso de calibración del equipo (g).

- ❖ **Estabilidad y Flujo Marshall:** mediante la AASHTO T245 “Método Estándar de Prueba de Resistencia al Flujo de Plástico de Mezclas Asfálticas Usando la Máquina Marshall”, se utiliza para medir la resistencia al flujo plástico de especímenes cilíndricos.

Estabilidad es la capacidad de resistir desplazamientos y deformaciones bajo las cargas de tránsito. Valores muy altos indican un pavimento demasiado rígido, y por ende, menos durable.

La cohesión interna entre las partículas de agregados y el ligante y la fricción entre ellos es una condición que genera una estabilidad deseada. Además, la angularidad de los agregados incide en una textura superficial áspera, aumentando la estabilidad.

Flujo es la deformación medida que tiene la mezcla asfáltica ante las cargas impuestas, un alto contenido de asfalto y agregado fino aumentarían esta condición al generar grandes películas alrededor de los agregados y por ende, perderían fricción entre ellos.

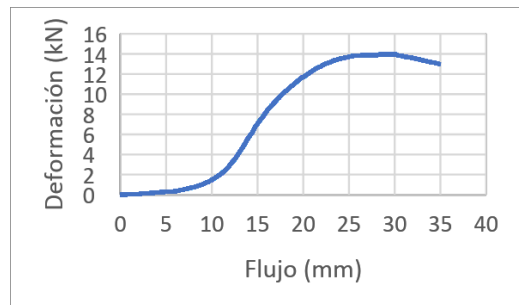


Figura 5. Gráfico de esfuerzo-deformación.

- ❖ **Análisis de vacíos:** este análisis conlleva diferentes pruebas incluidas en la ASTM D2041 “Método de Prueba Estándar para la Densidad y Densidad Específicas Máximas Teóricas de Mezclas de Pavimentación Bituminosas”, como:

- **Porcentaje de Vacíos (Va):** espacios de aire que se encuentran entre las partículas de agregados cubiertos con asfalto. En una mezcla asfáltica compactada, se realiza para verificar el cumplimiento del porcentaje de vacíos de diseño. Se desea un 4% de vacíos en campo, sin embargo, en la colocación, se deja un porcentaje mayor para que la carga vehicular al pasar llegue a alcanzar el porcentaje deseado. Se obtiene aplicando la fórmula:

$$\%Va = 100 * \left(1 - \frac{Gmb}{Gmm}\right) \dots \dots \dots (Ec. 18)$$

donde;

- Gmm= Gravedad específica máxima teórica.
- Gmb= Gravedad específica bruta de la mezcla.

➤ **Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral (VMA):** indica el espesor de la película de asfalto que rodea al agregado. Volumen ocupado por espacios vacíos entre las partículas de agregado de una mezcla asfáltica compactada.

$$VMA = 100 - \frac{Gmb * Ps}{Gsb} \dots \dots \dots (Ec. 19)$$

donde;
 Gmb= Gravedad específica bruta de la mezcla.
 Ps= Porcentaje de agregado de la mezcla.
 Gsb= Gravedad específica bruta del agregado.

➤ **Porcentaje de Vacíos llenados con Asfalto (VFA):** Porcentaje de volumen de vacíos en el agregado mineral lleno de asfalto.

$$VFA = 100 * \frac{VMA - Va}{VMA} \dots \dots \dots (Ec. 20)$$

donde;
 VMA= Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.
 Va= Porcentaje de vacíos.

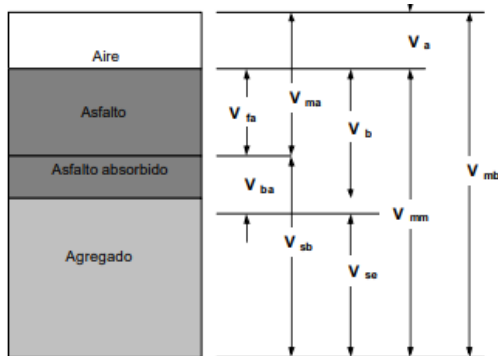


Figura 6. Componentes de mezcla asfáltica en caliente.

❖ **Tensión Diametral Indirecta:** se realiza mediante lo indicado en el AASHTO T283 "Método Estándar de Prueba de Resistencia de Mezclas Asfálticas Compactadas a Daños Inducidos por la Humedad", esta prueba se ejecuta, fallando al menos tres especímenes con el porcentaje óptimo de asfalto calculado

según la prueba de estabilidad y flujo. El contenido de asfalto óptimo debe de cumplir con todos los requerimientos del proyecto mencionados anteriormente.

El método de compactación se realiza, eligiendo primero la utilidad que se le dará a la mezcla, que en este caso de 75 golpes, está definido para un tráfico pesado.

Todo lo descrito anteriormente se realiza con la finalidad de obtener un diseño:

- Durable: capacidad de resistencia a la desintegración dada por el tránsito, clima o tiempo.
- Cohesivo: unión entre ligante y agregados.
- Impermeable: resistencia a la penetración de agua y aire.
- Trabajable: facilidad para colocación y compactación de manera correcta.
- Flexible: facilidad para adaptarse al lugar donde será colocado.
- Resistencia al deslizamiento: especialmente en pavimentos mojados que ofrecen resistencia de hidropelaneo.

Método de diseño Superpave

Este método surgió como resultado de un estudio para mejorar el rendimiento de los pavimentos. Este sistema fue desarrollado para dar las herramientas necesarias a los ingenieros y contratistas para perfeccionar las características de la mezcla.

El método Superpave consiste en interrelacionar dos elementos: una especificación de aglutinante de asfalto y un diseño de mezcla que especifica los criterios de agregados y propiedades volumétricas, dicho de otra manera, se basa en el contenido de vacíos. Su método de compactación es giratorio, consiste en una estructura no flexible, contra la cual, el pistón de carga empuja cuando se compactan los especímenes.

Ensayos de desempeño mecánico

Deformación plástica

La deformación plástica de la capa de rodadura se puede observar cuando se acumulan pequeñas

deformaciones permanentes debido al tránsito, generando así una ruta con leve inclinación o deslizamiento lateral de la mezcla. Esta falla se debe al flujo plástico y la densificación, tal que:

- **Flujo plástico:** asociado a un bajo contenido de vacíos en la mezcla, tal que el asfalto funciona como lubricante entre los agregados y no como adhesivo, tal que hay deformaciones laterales en los bordes donde se aplique la carga. (Castro, 2000).
- **Densificación:** relacionado con un alto contenido de vacíos en la mezcla asfáltica, dada por ausencia de asfalto o agregado fino y por deficiencias en la energía de compactación. (Castro, 2000).

La deformación plástica se puede dividir en tres categorías o causas: elementos relacionados en la estructura del pavimento, elementos relacionados con la aplicación de las cargas sobre el pavimento y las relaciones con las propiedades de la mezcla asfáltica (relacionado directamente al contenido de vacíos de la mezcla y resistencia a la deformación). (Castro, 2000).

Estas características se evalúan en laboratorio, mediante las pruebas de Estabilidad y Flujo Marshall y Tensión Diametral Indirecta, las cuales han sido descritas anteriormente.

Cuadro 1. Factores que afectan la deformación permanente en las mezclas asfálticas

	FACTOR	CAMBIO DEL FACTOR	EFEECTO SOBRE LA RESISTENCIA AL AHUELLAMIENTO
AGREGADO	Textura de la superficial	Lisa a rugoso	Incremento
	Granulometría	Discontinua a continua	Incremento
	Forma	Redondeada a angular	Incremento
	Tamaño	Aumento del tamaño máximo	Incremento
LIGANTE ASFÁLTICO	Stiffness o Módulo de Rigidez	Incremento	Incremento
MEZCLA ASFÁLTICA	Contenido de ligante	Incremento	Disminuye
	Contenido de vacíos de aire (no menor al 3%)	Incremento	Disminuye
	Contenido de vacíos en el agregado mineral (VAM) (no menor al 10%)	Incremento	Disminuye
	Método de compactación	Vibratorio o por amasado	Cambio en la estructura
CONDICIONES DE ENSAYO	Temperatura	Incremento	Disminuye
	Estado y Nivel de tensiones	Incremento en la presión de inflado de los neumáticos o el nivel de tensiones	Disminuye
	Presencia de humedad	Seco a saturado	Disminuye si la mezcla es sensible al agua

Fuente: Deformación permanente en mezclas asfálticas.

Fatiga y tensión indirecta

La resistencia a la fatiga de un pavimento es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito.

Una de las relaciones más importantes que se han logrado determinar respecto a la resistencia a la fatiga son los vacíos y la viscosidad del asfalto, de tal forma que en alto porcentaje de vacíos por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga disminuye. De igual manera, al utilizar asfaltos envejecidos y endurecidos (como el que contiene el RAP) tienden a incidir en bajas resistencias a la fatiga. Esta característica es de suma importancia, dada la vida útil de esta, pues es una de las principales fallas de los pavimentos asfálticos en el agrietamiento debido a la fatiga (Loria, 2012), por ende, al controlar esta característica, se puede mejorar, aumentar la vida útil de la carpeta de rodamiento.

En caso de las mezclas asfálticas las solicitaciones a las que son sometidas son cortas, se dan con el paso de los vehículos, sin embargo, su repetición es lo que genera las fallas, las cuales no son inmediatas. Existen dos métodos para determinar el valor límite:

1. Curva de Wöhler.
2. Modo de solicitación.

Durante el ensayo de fatiga, se distinguen tres fases de evolución del material: fase de adaptación, fase de la fatiga y fase de la ruptura.

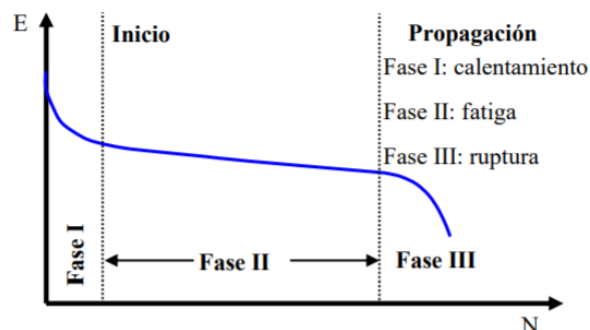


Figura 7. Distinción de las tres fases del ensayo de fatiga

Fuente: Determinación de la resistencia a la fatiga en mezclas asfálticas.

El ensayo de tracción indirecta, descrito en la AASHTO T 283, no solo aporta información de la resistencia a la tracción indirecta, sino que también da información sobre propiedades elásticas resilientes, fisuración térmica, fisuración por fatiga, deformación permanente y se puede utilizar también, para evaluar el efecto de la humedad en los cilindros de prueba.

La resistencia a la falla por fatiga es uno de los factores que tienen alta influencia en la

aprobación de las mezclas asfálticas, la prueba de tensión diametral indirecta, como se ha mencionado, brinda información relacionada con este comportamiento, así que, si los resultados de tensión indirecta son bajos tiende a ser deformable, es decir resiste mejor las fallas por fatiga.

Relación falla por fatiga-RAP

Al incluir el RAP en las mezclas asfálticas, se tienen ventajas como preservación del perfil existente, y conservación de recursos naturales, como se ha mencionado con anterioridad, sin embargo, se tiene cierta resistencia a usar altos porcentajes en las mezclas asfálticas en caliente, debido al asfalto oxidado que contiene el RAP, volviendo la mezcla asfáltica más rígidas que aquellas que no contienen dicho material. Este efecto incide en que en campo, las mezclas con RAP sea susceptible a fallas en el campo.

Es por ello que se debe contemplar la composición del RAP, tal como el contenido de asfalto oxidado, ya que al ser expuesto a las temperaturas propias del proceso de mezclado y condicionamiento para las pruebas descritas para el método Marshall y prueba de tensión indirecta, se activa e influye directamente en el comportamiento de la mezcla, además, de contemplar el tiempo que el RAP ha sido almacenado, dado que cambios en las propiedades de las mezclas asfálticas con iguales contenidos de material reciclado están relacionados, según estudio realizado en la Universidad de Pensilvania,

Para la prueba de tensión diametral directa, la presencia del asfalto oxidado tiende a generar que los cilindros condicionados no presenten altos grados de saturación, dado que el aglutinante virgen sumado con el oxidado cree una película superficial durante el proceso de mezclado y compactación, permeabilizando las pastillas, por lo que el daño por humedad tiende a disminuir.

Metodología

Información bibliográfica

La evaluación del comportamiento del pavimento asfáltico reciclado para su uso como sustituto de agregado virgen inicia con una búsqueda en la literatura sobre sus diferentes usos, beneficios ambientales y económicos, importancia y antecedentes, tanto en Costa Rica como en otros países.

Se investiga sobre diferentes métodos de inclusión del RAP a las mezclas asfálticas, así como lo indicado en normativas y técnicas nacionales e internacionales, respecto a los porcentajes de material tipo RAP que se puede reutilizar en las mezclas asfálticas en caliente (HMA, por sus siglas en inglés).

Características físico-mecánicas del RAP y agregados vírgenes

Para realizar la caracterización del RAP, se procede a seleccionar el material a utilizar en el desarrollo del proyecto, este es retirado de las carreteras del Cantón Central de la provincia de Cartago. Luego de su retiro y fresado, se almacena en el plantel municipal, en diferentes pilas, donde se procedió mediante un muestreo de acuerdo con lo indicado por la ASTM D75 "Práctica Estándar para el Muestreo de Agregados"

a seleccionar el material reciclado, el cual es trasladado al laboratorio.

Una vez en sitio, se ejecutan diversas pruebas para comprobar la calidad del RAP, siguiendo lo indicado en el CR-2010, debido a que la municipalidad desarrolla sus licitaciones con lo indicado en este Manual de Especificaciones, las cuales se ejecutan siguiendo las normas AASHTO (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transporte, por sus siglas en inglés) iniciando con un cuarteo del material seleccionado, del cual se obtienen las diferentes cantidades requeridas por las pruebas descritas a continuación:

Granulometría

Se realiza según lo indicado en la norma AASHTO T27 "Análisis Granulométrico por Tamices de los Agregados Finos y Gruesos", elaborada en el Laboratorio del CIVCO (Centro de Investigación para la Vivienda y Construcción). Se separaron los agregados finos de gruesos, pasando el material por la malla número cuatro y se realizan las respectivas granulometrías.

Para agregados gruesos, retenidos en dicha malla, se introducen al horno con una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, al ser retirados, se pasan por distintas mallas, tal que en una de ellas el porcentaje retenido sea nulo, y así en las mallas sucesivas hasta la número cuatro. Para efectos del proyecto, en agregados gruesos se usaron las mallas: 2", 1 ½", 1", ¾", ½", ⅜" y el tamiz #4.

En relación con los agregados finos, estos se secan a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, pasadas veinticuatro horas, el material se retira y es lavado, luego se procede a realizar masa constante a la misma temperatura. Al finalizar este proceso, se pasa el agregado por los tamices #4, #8, #16,

#30, #50 y #200, se debe incluir en los cálculos el material que queda en la charola.

Luego de esto, se procede a hacer la corrección por contenido de humedad para elaborar una distribución granulométrica donde se analicen gruesos y finos juntos, obteniendo un tamaño máximo nominal del RAP y porcentajes de retenidos. Su distribución se compara con la Tabla 418-2 del CR-2010, división 400, según el tamaño máximo nominal seleccionado para el diseño de la mezcla asfáltica.



Figura 8. Proceso de lavado para material fino.

Resistencia a la Abrasión

Se ejecuta según la AASHTO T-96, Resistencia a la Degradación del Agregado Grueso de Pequeño Tamaño por Abrasión e Impacto en la Máquina de los Ángeles, se realiza en el Laboratorio del CIVCO, su resultado se compara con lo indicado en la sección 703.07 del CR-2010, la cual recomienda un 40% como máximo.

Se utiliza agregado menor a 37,5 mm, la muestra correspondiente se introduce a la máquina Los Ángeles, durante 500 revoluciones, según el método A, indicado en la norma anterior, el agregado sufre degradaciones, debido a la abrasión e impacto de las esferas de acero y la rotación.

Al concluir las revoluciones, el material se lava en el tamiz #12 (1,70 mm) y el retenido en este, se seca en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ y se realiza masa constante, con el fin de comparar la muestra de masa inicial con la final, obteniendo una diferencia entre ellas, esta es la que determina el porcentaje de pérdida o desgaste sufrido por el RAP.



Figura 9. Máquina Los Ángeles utilizada en la prueba de resistencia a la Abrasión.

Contenido de Asfalto del RAP

Se realiza la prueba en el laboratorio de LANAMME (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales) e ITP, por el método A descrito en la AASHTO T308 "Asphalt Content of HMA by Ignition Method". Dichos resultados se utilizan para realizar el diseño de mezcla y las correcciones que esto implique.

Gravedades específicas

Para determinar la gravedad máxima teórica, se procede con lo descrito por el Instituto del asfalto. Se inicia con un secado de la muestra en el horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, esta muestra se separa en dos, manteniendo una masa similar a la utilizada en la prueba de Gmm estándar (AASHTO T85 y T84).

Luego se deben mezclar ambas muestras, de manera tal que el asfalto cubra todo el material, incluir el porcentaje de asfalto virgen deseado (1-3% del asfalto que contiene el RAP) y dejar enfriar.

Se procede con la determinación de la gravedad máxima teórica, como se realiza para mezclas asfálticas en caliente, donde no se separan los agregados entre finos y gruesos.

Para determinar sus valores, se aplican las ecuaciones 6 y 7 descritas en la sección de marco teórico.

Caras fracturadas

La prueba se realiza utilizando dos tamaños máximos nominales 1/2" y 3/8", según lo indicado en la ASTM D5821 "Porcentaje de Partículas Fracturadas en el Agregado Grueso", se compara con lo indicado en la sección 703.07 del CR-2010, la cual indica un mínimo de 75%.

La separación de las caras fracturadas o no, se realiza de forma manual y valorando si su forma se debe o no a la mezcla asfáltica que posean alrededor de ellos, debido a que es material reciclado.

Sanidad de los agregados

La prueba se ejecuta en los Laboratorio de ITP (Ingeniería Técnica de Proyectos), siguiendo lo indicado en la AASHTO T-104 "Pérdida por Disgregación en Sulfato de Sodio". Sus resultados se comparan con lo indicado en la sección 703.02 del CR-2010.

La muestra utilizada (retenido en tamiz N°4 como tamaño máximo nominal), se separa en agregado grueso y fino.

El agregado fino se lava sobre el tamiz N°50, luego se seca al horno a $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. El agregado grueso se lava, se seca hasta peso constante a $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Las muestras se sumergen en la solución de Sulfato de Sodio por un periodo de 16 horas como mínimo y un máximo de 18 horas, los recipientes con las muestras se cubren de manera que no haya contaminación ni evaporación de la muestra, se debe mantener una temperatura de $21 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, durante el periodo de sumersión de las muestras.

Pasado el tiempo, secar las muestras al horno a una temperatura de $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, hasta masa constante y se pesa.

Tamizar el agregado fino en el mismo tamiz donde se lavó e igual con el agregado grueso. Separar las partículas, según el daño producido por el ensayo, secar al horno a una temperatura de $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, y pesar.

Peso de partículas planas contenido de arcilla

La prueba que se presenta a continuación, se realiza en los Laboratorio de ITP (Ingeniería Técnica de Proyectos), siguiendo lo indicado en la AASHTO T-112 "Método Estándar de Prueba para algunos Grupos de Arcilla y Partículas Friables en Agregados".

La muestra por utilizar se seca hasta obtener un peso constante, a una temperatura de $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Dejar remojando durante 24 horas con agua destilada.

Pasado el tiempo indicado, se deben apretar las partículas tratando de quebrarlas, separar las que se identifican como arcillas y partículas planas y el material sobrante se tamiza en húmedo, secar al horno a una temperatura de $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ y pesar.

El CR-2010, sección 703.02 recomienda un porcentaje máximo de 1% de partículas finas.

Equivalente de arena

La descripción de los procesos se encuentra en la AASHTO T176 "Método Estándar de Prueba para Finos Plásticos en Agregados Graduados y Suelos Mediante el uso de Ensayo Equivalente en Arena" y se realiza en los Laboratorios de ITP (Ingeniería Técnica de Proyectos).

El material por utilizar se vierte dentro de un cilindro con la solución floculante, se agita y agrega la solución faltante, de manera que el material arcilloso se suspenda sobre las arenas, se deja sedimentar y medir la altura de la arcilla y la altura correspondiente a la arena.

El resultado de la prueba se compara con lo indicado en el CR-2010, donde se indica un porcentaje mínimo de 45%.

Índice de durabilidad

Se realiza en los Laboratorios de ITP (Ingeniería Técnica de Proyectos), según lo descrito en la AASHTO T210 "Método Estándar de Prueba para el Índice de Durabilidad del Agregado", sus resultados, tanto en agregados finos como en gruesos, deben de un 35% como mínimo.

Para el agregado grueso, su índice se calcula a partir de la masa corregida, para obtener valores de alturas de sedimentación neta. La muestra se lava en un agitador mecánico por un período de 10 minutos, el agua del lavado, junto con los finos (pasando malla N°200) se mezclan y se les

agrega una solución. Se deja sedimentar por un periodo de 20 minutos, leer la altura de la sedimentación.

Para los agregados finos, la muestra se lava en el vaso mecánico por un periodo de 2 minutos, se tamiza en la malla N° 200 y el material retenido se seca al horno y luego se tamiza.

Propuesta de diseño de mezcla asfáltica para la municipalidad

Una vez determinadas las características del RAP a utilizar, se procede a estudiar las fichas técnicas de los agregados vírgenes. A estos agregados no se les realizarán pruebas de laboratorio, ya que se pretende reproducir las condiciones reales de diseño de mezcla asfáltica en caliente, donde se toman los datos otorgados por los proveedores y se realiza en diseño.

Para la ejecución del proyecto, se utiliza como agregado virgen piedra cuartilla, quintilla y polvo de piedra proporcionada por MECO con fuente en Guápiles, junto con ellos se utiliza asfalto AC-30.

Una vez analizadas las granulometrías de los materiales vírgenes y el RAP, para el presente diseño los agregados utilizados se trabajan de manera individual, se realiza el diseño el cual cumpla con la tabla 418-2 del CR-2010, para un tamaño máximo nominal de 19 milímetros. Se procedió a realizar la debida combinación de agregados, donde se pesan los agregados vírgenes y el RAP por separado, debido a que al trabajar con RAP se debe tener consideraciones respecto a la cantidad de asfalto que posee, ya que esto influye en las temperaturas de trabajo previo a la mezcla de materiales, es por ello que, dos horas antes de realizar la mezcla de los agregados con el asfalto, los agregados vírgenes se calientan a la temperatura de mezcla indicada por el asfalto la cual es de 155°C como mínimo y 161° máximo, y el

RAP a 110°C; dado al contenido de asfalto oxidado se debe realizar una corrección respecto a la cantidad de agregado reciclado a utilizar, quedando el RAP en un 14,46%.



Figura 10. Preparación de los agregados antes de la mezcla.

Al tener listos los agregados, se procede a revisar las temperaturas de mezclado del asfalto, indicadas en su ficha técnica (anexo 1).



Figura 11. Verificación de la temperatura de mezclado.

Una vez determinado el diseño, se procede a realizar las mezclas asfálticas, para proceder con la elaboración de las pastillas, se verifican las temperaturas de compactación máximas y mínimas correspondientes a 149°C y 144°C, respectivamente, estas temperaturas fueron extraídas del certificado 444M19, emitido por RECOPE.

Para la compactación, se coloca el plato, luego los moldes (los cuales han sido calentados previamente) y el collarín, se coloca un filtro en el fondo y se introduce la mezcla asfáltica, la cual se debe acomodar, mediante el uso de una espátula, que se introduce 25 veces, tanto alrededor como en el centro y se realizan 75 golpes por cara con el

compactador Marshall, según la ASTM D6926 “Práctica Estándar para la Preparación de Muestras de Mezcla Asfáltica Utilizando un Aparato Marshall”.



Figura 12. Método de compactación Marshall.

Una vez realizados los cilindros de prueba, se procede con la elaboración de las pruebas de laboratorio para el método de diseño Marshall, las cuales son descritas a continuación:

Gravedad específica bruta

Se inicia con el peso seco de los especímenes, luego se sumergen por (4 ± 1) minuto, con una temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ y se toma el peso en esta condición, pasado este tiempo, se deben sacar y de manera rápida, llevar a una condición superficie saturada seca (sss) esto pasando por una franela y pesar nuevamente.

Lo anterior, según lo descrito en la AASHTO T166 y su valor se calcula mediante la ecuación 16, además, se realiza un ponderado con todos los resultados equivalentes a un porcentaje de asfalto, y así procede con los demás (apéndice 2, cuadro 7).

Gravedad específica máxima teórica

Se utiliza una muestra de mezcla asfáltica suelta, la cual se coloca en un frasco, del cual se debe tomar su peso inicial, se agrega la mezcla suelta y se toma el peso nuevamente, se agrega $\frac{3}{4}$ de agua a una

temperatura de $25^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ y se procede a aplicar vacío, gradualmente, para reducir la presión a 30,0 mm de Hg por un periodo de $15 \text{ min} \pm 2 \text{ min}$. Pasado ese tiempo, se completa el frasco con agua y se pesa nuevamente.

Su valor se determina mediante la ecuación 17, y al obtener los valores, se realiza un promedio para cada uno de los porcentajes de asfalto utilizados (apéndice 2, cuadro 8)



Figura 13. Aplicación de vacío a 30,0 mm de Hg.

Porcentaje de vacíos.

Al obtener los valores correspondientes a gravedad específica bruta y gravedad máxima teórica, se procede con los cálculos, según la ecuación 18, para la obtención de los vacíos en la mezcla para cada uno de los porcentajes de asfalto utilizados. Se busca un porcentaje de vacíos de un 4%, con ello se obtiene el porcentaje de asfalto óptimo.

Estabilidad y flujo Marshall

Se realiza, según lo indicado en la AASHTO T 245, que consiste en aplicar una carga en dirección perpendicular al eje cilíndrico mediante la utilización del equipo Marshall, a especímenes cilíndricos, los cuales han estado sumergidos en agua a una temperatura de $60^\circ \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ por un periodo de 30 minutos.

Sus resultados se utilizan para comprobar el comportamiento de las mezclas asfálticas realizadas, el CR-2010 recomienda un valor mínimo de 800 kg para la estabilidad y un rango de 20-35 centímetros para el flujo.



Figura 14. Prueba de laboratorio Marshall para determinar la estabilidad y flujo.



Figura 15. Pastillas luego de la falla de flujo y estabilidad Marshall.

Contenido óptimo de asfalto

Al determinar los valores obtenidos de la gravedad específica máxima, específica bruta se procede con la elaboración de gráficos, donde se relaciona el porcentaje de vacíos contra el porcentaje de asfalto, y se elabora una interpolación para obtener el porcentaje óptimo de asfalto.

Dicho contenido debe satisfacer los valores especificados para cada ensayo descrito, por lo que, al establecer dicho valor, se debe de corroborar el diseño, realizando los ensayos nuevamente, para el valor seleccionado.

Análisis vacíos

El diseño de mezcla se realiza para un porcentaje de vacíos correspondiente al 4% para resultados en laboratorio.

Luego, se continúa con la determinación de los porcentajes de vacíos en el agregado mineral, según lo indicado en la ecuación 19, incluida en el marco teórico.

Una vez determinados los parámetros anteriores, se procede a calcular el porcentaje de vacíos llenados con asfaltos, lo cual se realiza, según la ecuación 20 dada en la sección de marco teórico.

Tensión indirecta

Una vez determinado el porcentaje óptimo de asfalto para cada uno de los diseños, se procede a elaborar ocho cilindros de prueba por cada uno de ellos. Cuatro de ellos para ser ensayados en condición seca, cuatro para ser ensayados en condición de saturación parcial y condicionamiento húmedo, para ello, se utiliza un porcentaje de vacíos del 4%.

Una vez finalizadas las pruebas descritas, se realiza una evaluación del daño inducido por humedad mediante el ensayo del TSR para verificar que el incremento del RAP está relacionado con el aumento a la resistencia al daño inducido por humedad, así como la resistencia a la tensión indirecta, para estudiar su comportamiento, al aumentar la cantidad de RAP la mezcla tiende a fragilizarse más.

Diseño experimental

Como parte del proyecto, se procede a la elaboración de un diseño de mezcla experimental, el cual parte de un diseño de mezcla de control al cual se sustituyó, por tamiz, un porcentaje de RAP, indicados anteriormente.

Esta cantidad de agregado virgen es dividida de manera tal que se tenga un 15% de RAP en el primer diseño y un 45% de RAP en el segundo y como tamaño máximo nominal, 19 milímetros.

Cabe recordar que debido al asfalto que posee en RAP, se debe realizar una corrección por lo que el porcentaje final a utilizar en los diseños es de 14,46% y 43,39% respectivamente. De igual manera, se realizan las mezclas asfálticas con previa preparación de la cantidad de agregado, trabajando por separado el RAP y los agregados vírgenes.

Cuadro 2. Valores teóricos y corregidos de los porcentajes de agregados utilizados, para el diseño con 15% de RAP.

Material	Porcentaje teórico (%)	Porcentaje corregido (%)
Cuartilla	30	30,16
Quintilla	17	17,09
Polvo de Piedra	53	53,28
RAP	15	14,46

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 3. Valores teóricos y corregidos de los porcentajes de agregados utilizados, para el diseño con 15% de RAP.

Material	Porcentaje teórico (%)	Porcentaje corregido (%)
Cuartilla	30	30,48
Quintilla	17	17,27
Polvo de Piedra	53	53,85
RAP	45	43,39

Fuente: Elaboración propia.

Se realizan los ensayos indicados anteriormente para el método de diseño Marshall, para revisar el comportamiento físico y mecánico de los diseños.

Una vez concluida la etapa de pruebas de laboratorio, se procede a realizar las debidas comparaciones entre los resultados obtenidos y lo permitido, según el CR-2010, como se ha indicado en cada ensayo.

Resultados

Caracterización físico-mecánica del RAP y de agregados vírgenes

Granulometría

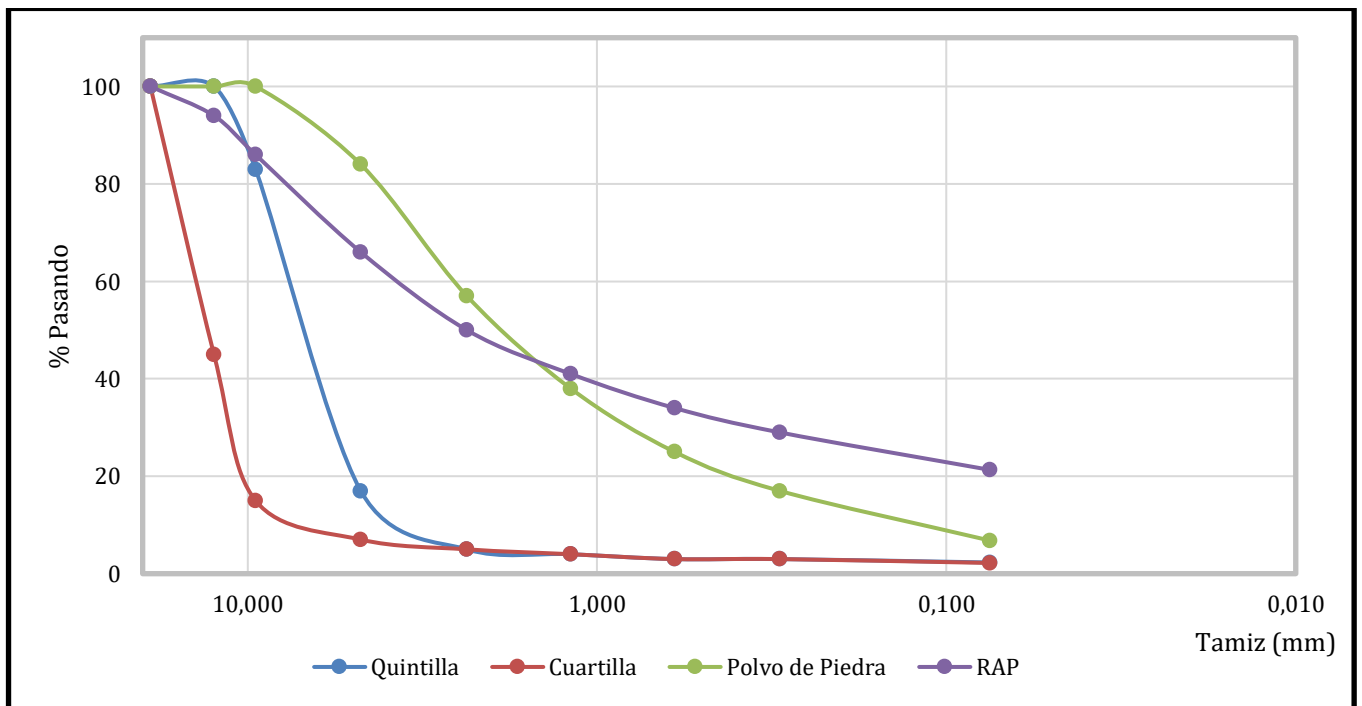


Figura 16. Gráfico 1. correspondiente a las diferentes granulometrías que presentan los agregados utilizados y el RAP.

Resistencia a la abrasión

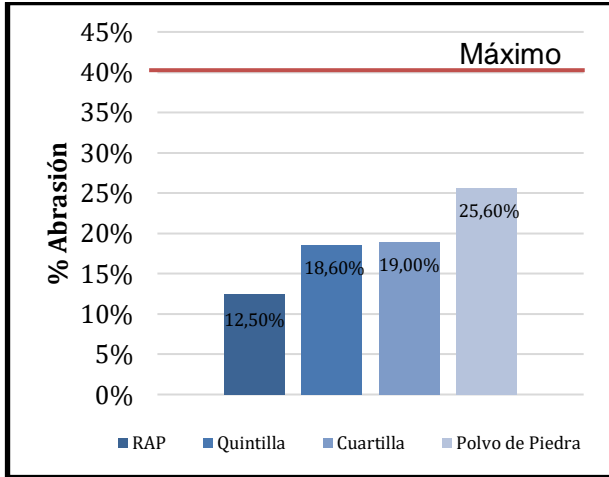


Figura 17. Gráfico 2. Porcentajes de abrasión de los agregados utilizados incluido el RAP.

Máximo permitido en el CR-2010, división 703.07.

- Gravedad específica superficie saturada seca

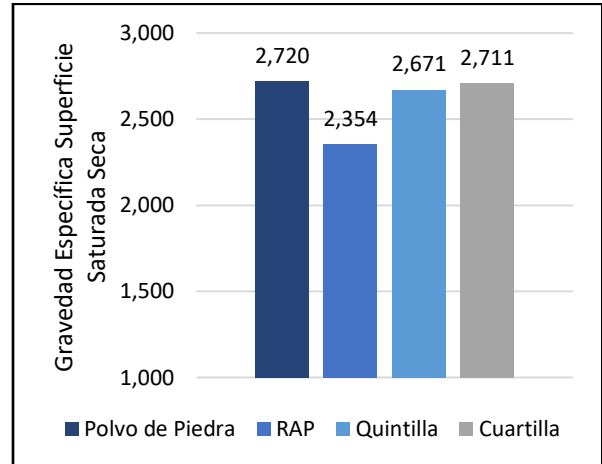


Figura 19. Gráfico 4. Gravedad específica superficie saturada seca correspondiente a los agregados vírgenes y RAP.

Gravedad específica

- Gravedad específica bruta seca

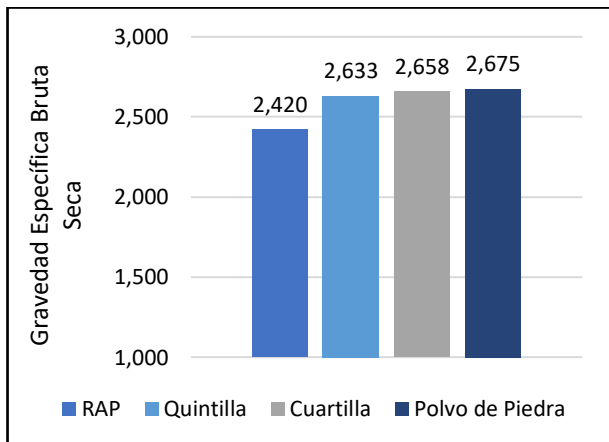


Figura 18. Gráfico 3. Gravedad específica bruta seca correspondiente a los agregados vírgenes y RAP.

- Porcentaje de absorción

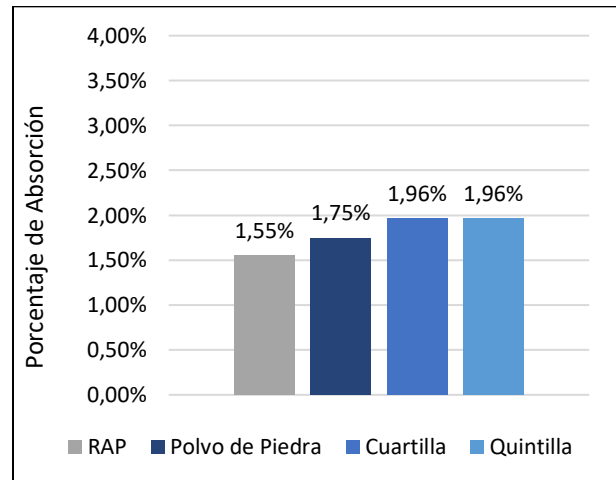


Figura 20. Gráfico 5. Porcentaje de absorción de los agregados vírgenes y RAP.

Caras fracturadas

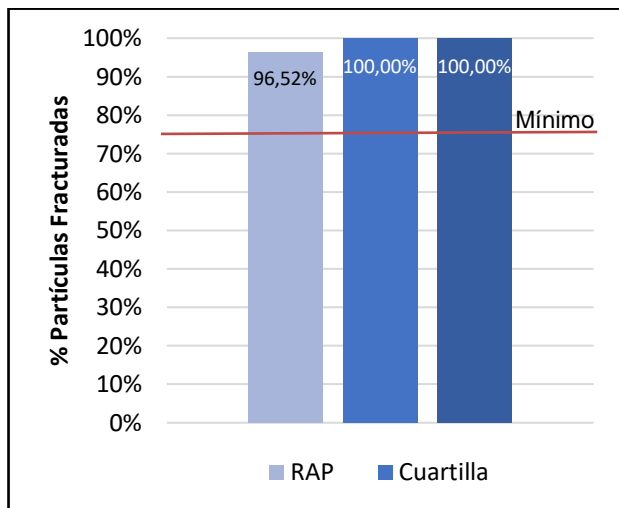


Figura 21. Gráfico 6. Porcentaje de caras fracturadas en los agregados vírgenes y RAP.

Mínimo permitido en el CR-2010, división 703.07.

Partículas friables y arcillosas

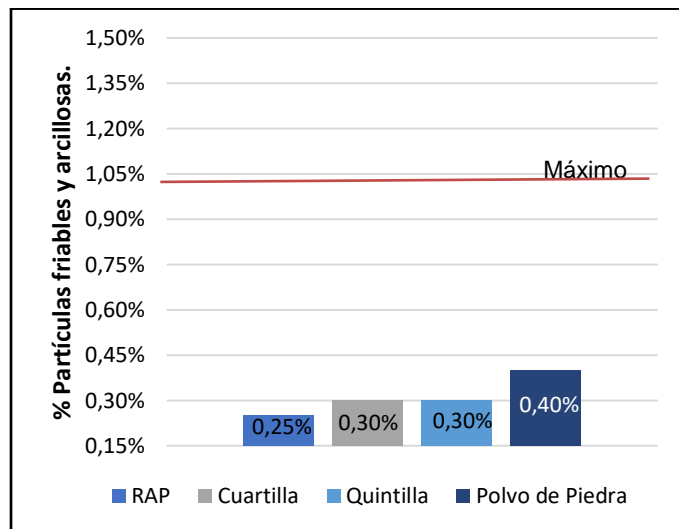


Figura 23. Gráfico 8. Porcentaje contenido de arcillas para cada uno de los agregados utilizados.

El contenido máximo admisible, según el CR-2010 es de un 1% como máximo.

Sanidad de los agregados

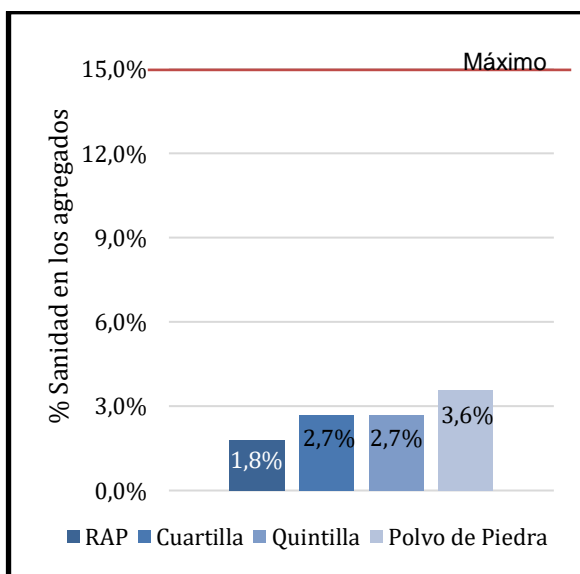


Figura 22. Gráfico 7. Porcentaje de sanidad para cada uno de los agregados utilizados.

El CR-2010, sección 703.02, establece un máximo permitido de 15%.

Equivalente de arena

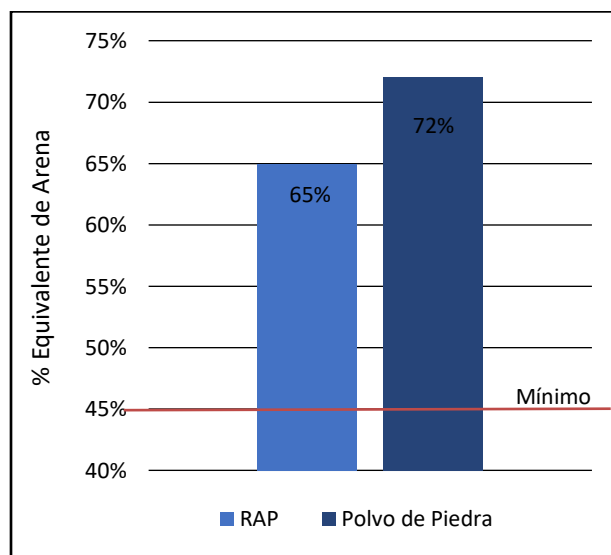


Figura 24. Gráfico 9. Porcentaje de equivalente de arena para cada uno de los agregados utilizados.

Contenido mínimo permitido de 45% según el CR-2010, sección 703.02.

Índice de durabilidad

- **Finos**

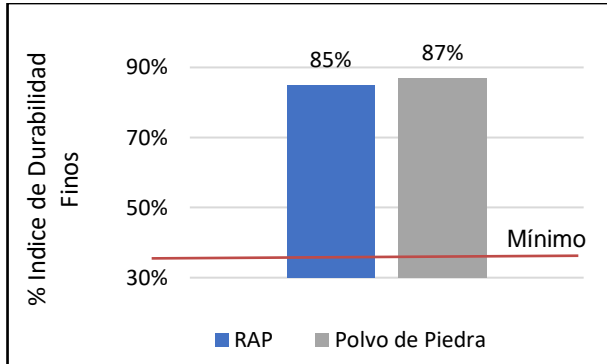


Figura 25. Gráfico 10. Porcentaje de índice de durabilidad para los agregados finos utilizados.

- **Grueso**

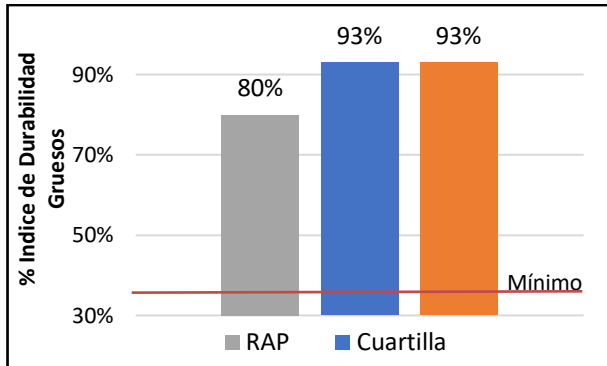


Figura 26. Gráfico 11. Porcentaje de índice de durabilidad para los agregados gruesos utilizados.

Tanto para agregados finos como para gruesos, el índice de durabilidad mínimo aceptado en el CR-2010, es de 35%.

Cuadro de resumen

Cuadro 4. Cuadro de resumen de las características físico-mecánicas de los agregados vírgenes y RAP

Ensayo	RAP	Polvo de Piedra	Quintilla	Cuartilla	Rango
Resistencia a la abrasión (%)	12,50	25,60	18,60	19,00	Máximo 40%
Gravedad específica bruta seca	2,420	2,675	2,633	2,658	-
Gravedad específica superficie saturada seca	2,354	2,720	2,671	2,711	-
Porcentaje de absorción	2,10	1,75	1,96	1,96	-
Caras fracturadas (%)	96,52	-	100,00	100,00	Mínimo 75%
Sanidad de los agregados (%)	1,8	3,6	2,7	2,7	Máximo 15%
Partículas friables y arcillosas (%)	0,25	0,40	0,30	0,30	Máximo 1%
Equivalente de arena (%)	65	72	-	-	Mínimo 45%
Índice de durabilidad de finos (%)	85	87	-	-	Mínimo 35%
Índice de durabilidad de gruesos (%)	80	-	93	93	Mínimo 35%

Diseño de Mezclas

Diseño de mezcla asfáltica para la municipalidad

Se realiza un diseño de mezclas asfáltico para la municipalidad, donde se inicia teóricamente con un 15% de RAP, 24% de quintilla, 26% de cuartilla y 35% de polvo de piedra, de igual manera, se eligen cuatro distintos porcentajes de asfalto (4.0, 4.5, 5.0, 5.5); sin embargo, al realizar la corrección, debido al contenido de asfalto que posee el RAP, según las ecuaciones 3 y 4, quedan de la siguiente manera:

Cuadro 5. Datos correspondientes a los porcentajes de agregado utilizado en el diseño con 15% de RAP, sin corregir

Material		Quintilla	Cuartilla	Polvo de Piedra	RAP	Combinación de Diseño
%		24%	26%	35%	15%	100%
Tamiz		% Pasando				
No	mm					
3/4	19,000	100	100	100	100	100
1/2	12,500	100	45	100	94	85
3/8	9,500	83	15	100	86	72
4	4,750	17	7	84	66	45
8	2,360	5	5	57	50	30
16	1,190	4	4	38	41	21
30	0,600	3	3	25	34	15
50	0,300	3	3	17	29	12
200	0,075	2,3	2,2	6,8	21,3	6,7

Cuadro 6. Porcentajes de agregados utilizados para el diseño con 15% de RAP, corregido

Material	Porcentaje teórico (%)	Porcentaje corregido (%)
Cuartilla	26	26,16
Quintilla	24	24,15
Polvo de Piedra	35	35,22
RAP	15	14,46

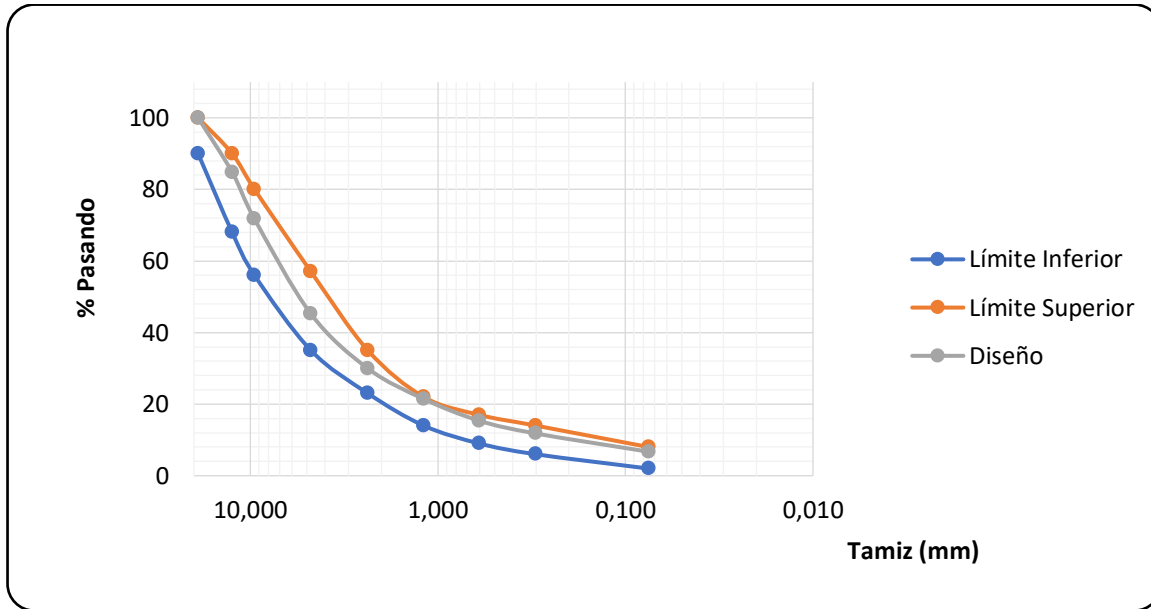


Figura 27. Gráfico 12. Granulometría correspondiente al combo de diseño para un 15% de RAP.

Características físico-mecánicas

Para la granulometría anteriormente descrita, se obtienen los siguientes resultados en las pruebas realizadas.

- **Gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica**

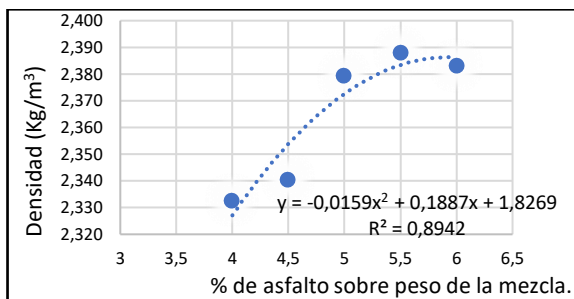


Figura 28. Gráfico 13. Valores correspondientes a las gravedades específicas brutas según el contenido de asfalto.

- **Gravedad máxima teórica**

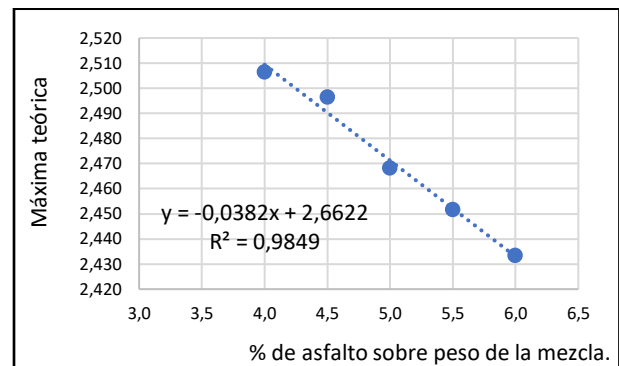


Figura 29. Gráfico 14. Valores correspondientes a las gravedades máximas teóricas, según el contenido de asfalto.

- **Porcentajes de vacíos.**

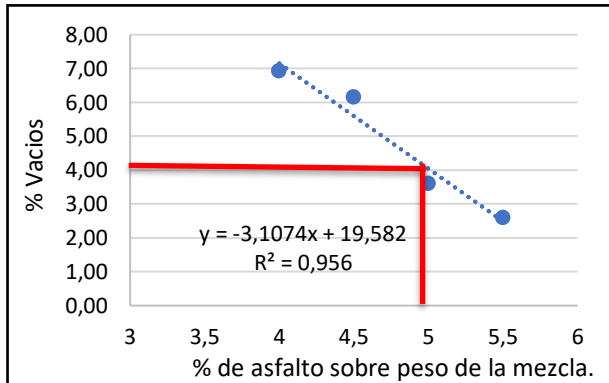


Figura 30. Gráfico 15. Valores correspondientes a los vacíos en la mezcla, según el contenido de asfalto.

Se obtiene un porcentaje óptimo de asfalto de **4,9**, para un 4% de vacíos en la mezcla.

- **Vacíos en el agregado mineral**

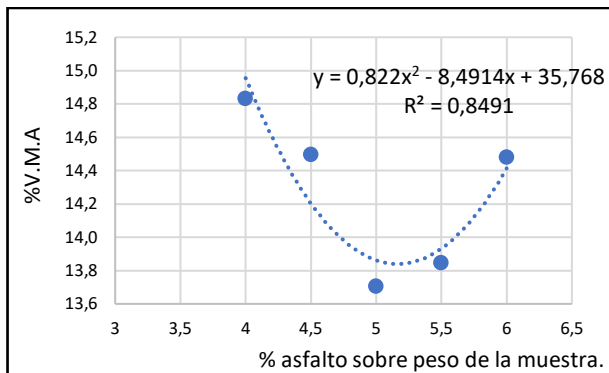


Figura 31. Gráfico 16. Valores correspondientes a los vacíos en el agregado mineral, según el contenido de asfalto.

Para el tamaño máximo nominal de 19 mm, se establece en el CR-2010 un porcentaje mínimo de 13%.

- **Vacíos llenos de asfalto**

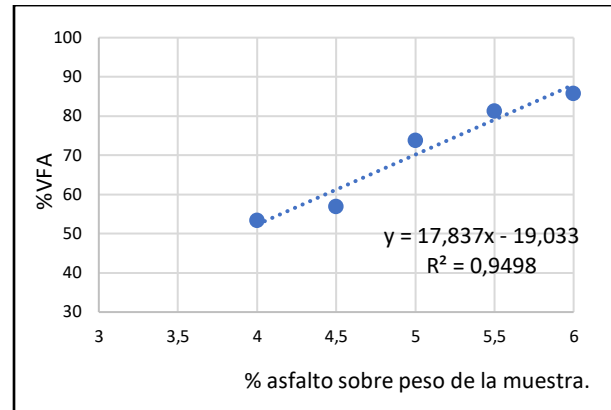


Figura 32. Gráfico 17. Valores correspondientes a los vacíos llenos con asfalto, según el contenido de asfalto.

Para el parámetro anterior se establece un rango de permisividad entre 65% y 75%.

- **Estabilidad y flujo Marshall**

Estabilidad

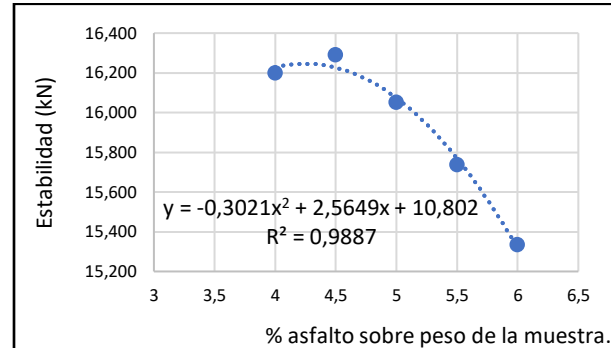


Figura 33. Gráfico 18. Valores correspondientes a la estabilidad, según el contenido de asfalto.

Flujo

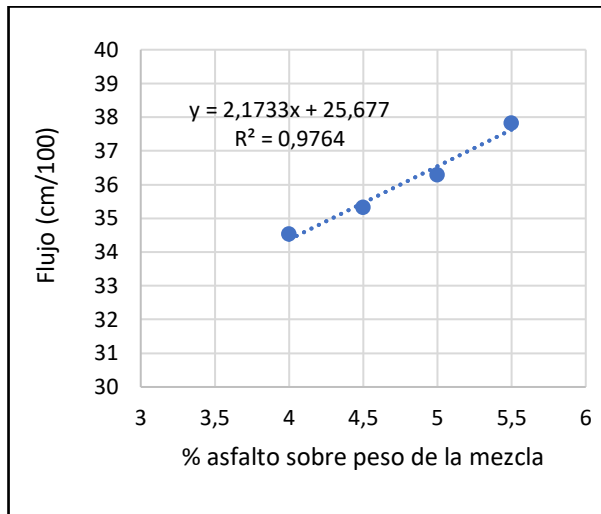


Figura 34. Gráfico 19. Valores correspondientes al flujo, según el contenido de asfalto.

Los valores permitidos para el flujo se encuentran entre 20-35 centímetros, y de 800 kg como mínimo para la estabilidad, según el CR-2010, para el porcentaje de asfalto óptimo.

Cuadro 7. Datos obtenidos en la prueba de tensión diametral para especímenes saturados y secos

PASTILLA	ESPESOR (cm)	CARGA (kN)	DIAMETRO (cm)	ESFUERZO A TENSIÓN (kPa)	DAÑO VISUAL POR HUMEDAD (DE 0 A 5)
1	6,4	10,652	10,2	1045,2	0,0
2	6,3	12,985	10,2	1279,7	
3	6,4	9,225	10,2	901,0	0,0
4	6,3	12,480	10,2	1231,8	
5	6,3	13,018	10,2	1296,8	
6	6,3	10,056	10,2	993,6	0,0
7	6,4	10,428	10,2	1014,6	0,0
8	6,4	12,423	10,2	1208,3	

ts humedo 988,6
ts seco 1254,2

Fuente: Laboratorios ITP.

Se obtiene un %TSR equivalente de 78,8 %.

Diseño de mezcla asfáltica experimental

Como se ha descrito anteriormente, se realiza un diseño de mezcla experimental con porcentajes de

RAP equivalentes a 15% y 45%. Sus resultados se compararán con un diseño de mezcla de control, de la cual, los porcentajes iniciales de los agregados vírgenes no se cambiarán (cuadro 8), sino que el RAP se incluirá sustituyendo el RAP en cada tamiz (cuadro 9), es decir, el RAP no se trabaja como agregado individual, es por ello que al sumar los porcentajes de agregados vírgenes, estos dan un resultado de cien por ciento.

Para las mezclas experimentales, se debe realizar, de igual manera, una corrección en los porcentajes de agregados vírgenes utilizados y el RAP, quedando de la siguiente manera.

Cuadro 8. Porcentajes de agregados utilizados para el diseño experimental con 15% de RAP

Material	Porcentaje utilizado (%)	Porcentaje corregido (%)
Cuartilla	30	30,16
Quintilla	17	17,09
Polvo de Piedra	53	53,28
RAP	15	14,46

Cuadro 9. Porcentaje de agregados utilizados para un diseño experimental con un 45% de RAP

Material	Porcentaje utilizado (%)	Porcentaje Corregido (%)
Cuartilla	30	30,48
Quintilla	17	17,27
Polvo de Piedra	53	53,85
RAP	45	43,39

Cuadro 10. Datos correspondientes a los porcentajes de agregados utilizados en el diseño de control y los diseños experimentales para 15% y 45% de RAP

Material		Quintilla	Cuartilla	Polvo de Piedra	RAP	Combinación de Diseño
%		17%	30%	53%	0%	100%
Tamiz		% Pasando				
No	mm					
3/4	19,000	100	100	100	100	100
1/2	12,500	100	45	100	94	84
3/8	9,500	83	15	100	86	72
4	4,750	17	7	84	66	50
8	2,360	5	5	57	50	33
16	1,190	4	4	38	41	22
30	0,600	3	3	25	34	15
50	0,300	3	3	17	29	10
200	0,075	2,3	2,2	6,8	21,3	4,7

Cuadro 11. Datos correspondientes a los porcentajes de agregado virgen y RAP

Tamiz	% Pasando	%Retenido	Peso por Tamiz (g)	Peso Agregado virgen	Peso RAP
3/4	100	0	0,00	0,00	0,00
1/2	100	0	0,00	0,00	0,00
3/8	83	17	32,74	28,01	4,73
4	17	66	127,12	108,73	18,38
8	5	12	23,11	19,77	3,34
16	4	1	1,93	1,65	0,28
30	3	1	1,93	1,65	0,28
50	3	0	0,00	0,00	0,00
200	2,3	0,7	1,35	1,15	0,19
Charola	0	2,3	4,43	3,79	0,64
Total		100	192,60	164,75	27,85

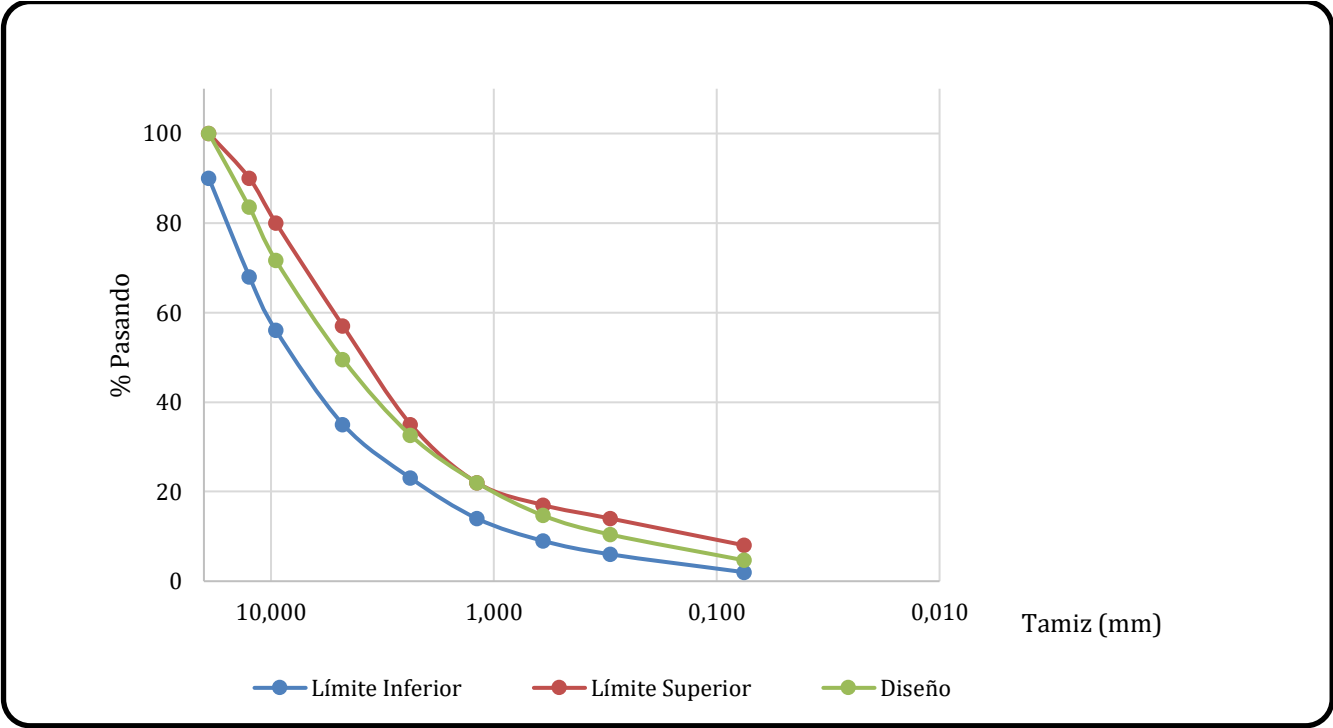


Figura 35. Gráfico 20. Granulometría correspondiente al combo de diseño de control y diseños experimentales.

Características físico-mecánicas de la mezcla asfáltica con 15% de RAP

- Gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica

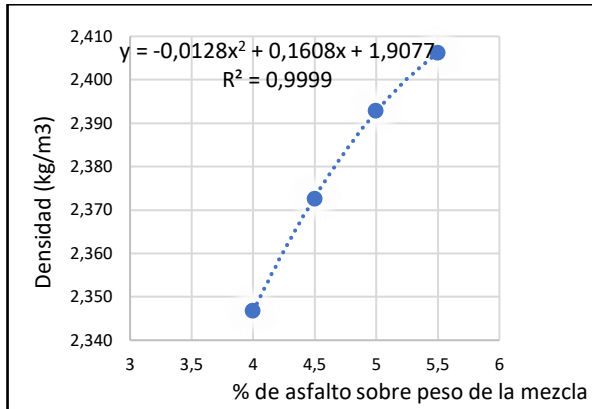


Figura 36. Gráfico 21. Valores correspondientes a las gravedades específicas brutas, según el contenido de asfalto.

- Gravedad máxima teórica

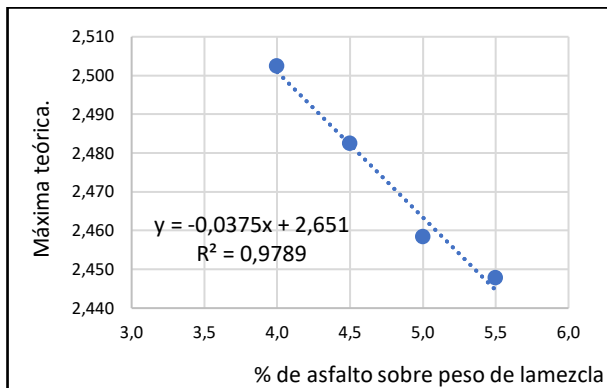


Figura 37. Gráfico 22. Valores correspondientes a las gravedades máximas teóricas, según el contenido de asfalto.

- Porcentajes de vacíos

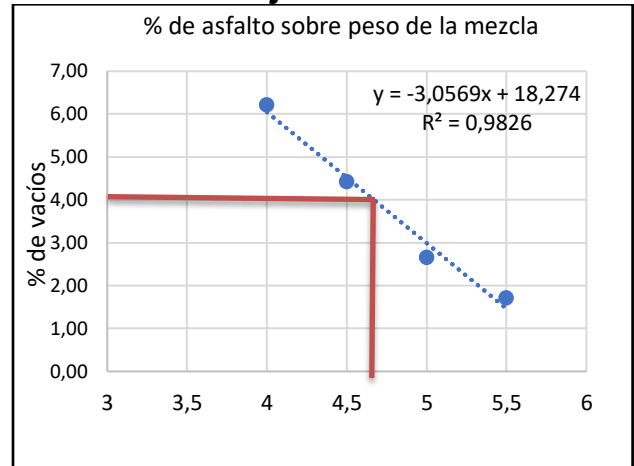


Figura 38. Gráfico 23. Valores correspondientes a los vacíos en la mezcla, según el contenido de asfalto.

Se obtiene un porcentaje óptimo de asfalto de 4,7.

- Vacíos en el agregado mineral

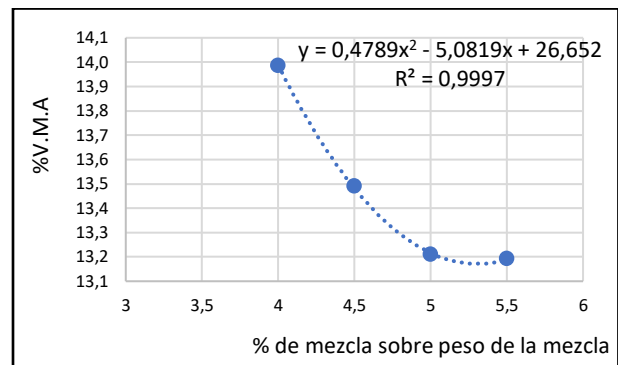


Figura 39. Gráfico 24. Valores correspondientes a los vacíos en el agregado mineral, según el contenido de asfalto.

Para el tamaño máximo nominal trabajado, el CR-2010 indica que el porcentaje mínimo establecido es de 13%.

- Vacíos llenos de asfalto

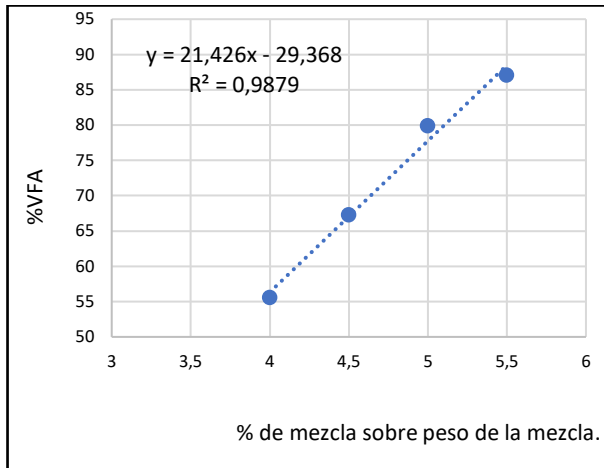


Figura 40. Gráfico 25. Valores correspondientes a los vacíos llenados con asfalto, según el contenido de asfalto.

Este parámetro debe encontrarse en valores entre 65% y 75%, el cual se indica en el CR-2010.

- Estabilidad y flujo Marshall

Estabilidad

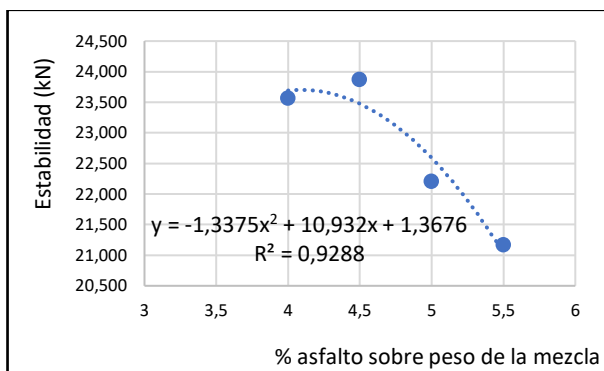


Figura 41. Gráfico 26. Valores correspondientes a la estabilidad según el contenido de asfalto.

Flujo

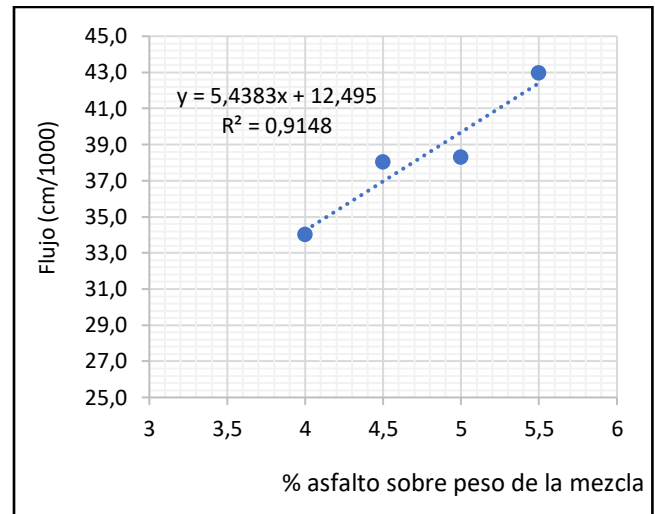


Figura 42. Gráfico 27. Valores correspondientes al flujo, según el contenido de asfalto.

El rango permitido para aprobar un diseño de mezcla es de 20-35 centímetros, en flujo, para la estabilidad el mínimo permitido es de 800 kg.

Cuadro 12. Datos obtenidos en la prueba de tensión diametral para especímenes saturados y secos

PASTILLA	ESPESOR (cm)	CARGA (kN)	DIAMETRO (cm)	ESFUERZO A TENSIÓN (kPa)	DAÑO VISUAL POR HUMEDAD (DE 0 A 5)
1	6,4	10,652	10,2	1045,2	0,0
2	6,3	12,985	10,2	1279,7	0,0
3	6,4	9,225	10,2	901,0	0,0
4	6,3	12,480	10,2	1231,8	0,0
5	6,3	13,018	10,2	1296,8	0,0
6	6,3	10,056	10,2	993,6	0,0
7	6,4	10,428	10,2	1014,6	0,0
8	6,4	12,423	10,2	1208,3	0,0

ts humedo 988,6
ts seco 1254,2

Fuente: Laboratorios ITP.

Se obtiene un %TSR equivalente de 78,8 %.

Características físico-mecánicas de la mezcla asfáltica con 45% de RAP

- Gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica

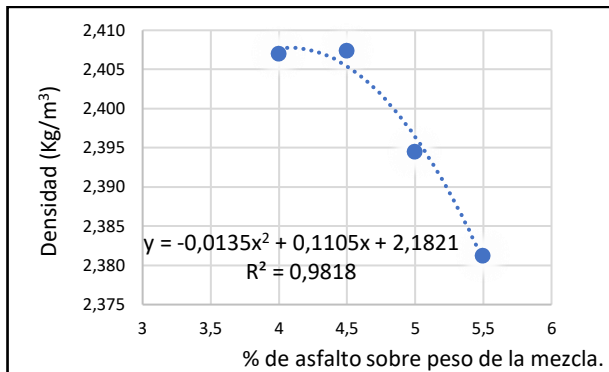


Figura 43. Gráfico 28. Valores correspondientes a las gravedades específicas brutas, según el contenido de asfalto.

- Gravedad máxima teórica

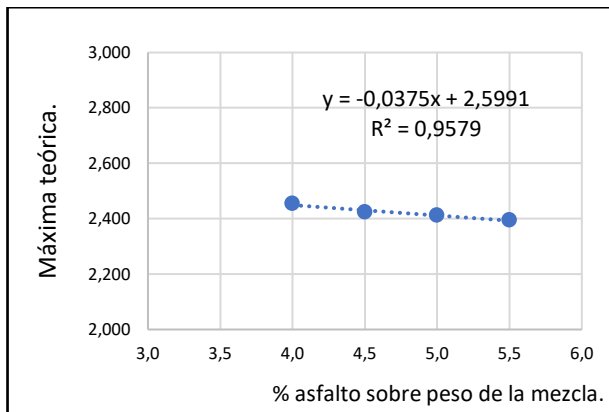


Figura 44. Gráfico 29. Valores correspondientes a las gravedades máximas teóricas, según el contenido de asfalto.

- Porcentajes de vacíos

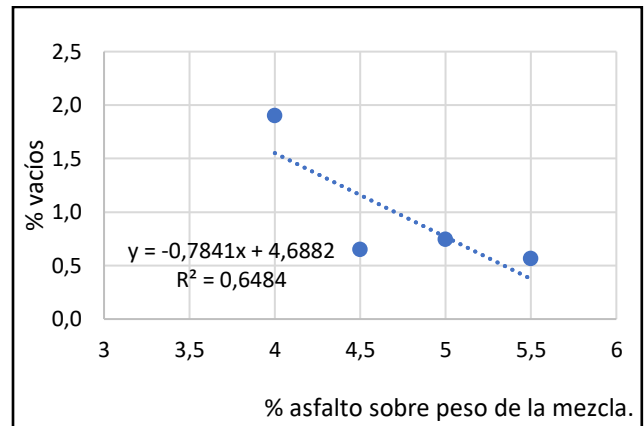


Figura 45. Gráfico 30. Valores correspondientes a los vacíos en la mezcla según, el contenido de asfalto.

- Vacíos en el agregado mineral

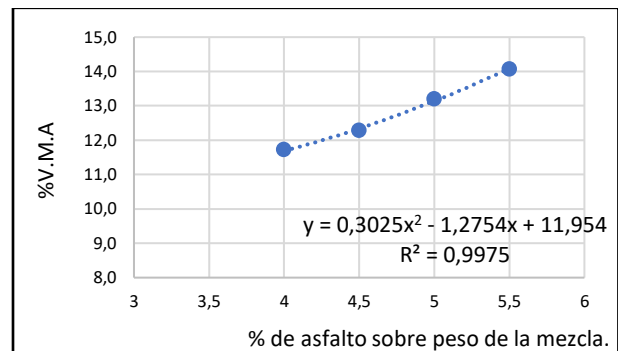


Figura 46. Gráfico 31. Valores correspondientes a los vacíos en el agregado mineral, según el contenido de asfalto.

Para el tamaño máximo nominal trabajado, el CR-2010 indica que el porcentaje mínimo establecido es de 13%.

• Vacíos llenos de asfalto

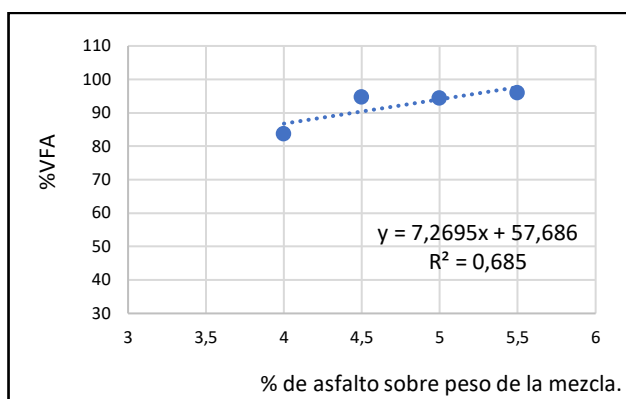


Figura 47. Gráfico 32. Valores correspondientes a los vacíos llenados con asfalto, según el contenido de asfalto.

Este parámetro debe encontrarse en valores entre 65% y 75%, el cual está indicado en el CR-2010.

• Estabilidad y flujo Marshall

Estabilidad

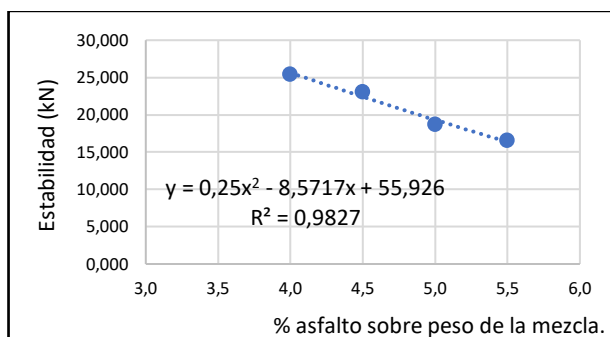


Figura 48. Gráfico 33. Valores correspondientes a la estabilidad, según el contenido de asfalto.

Flujo

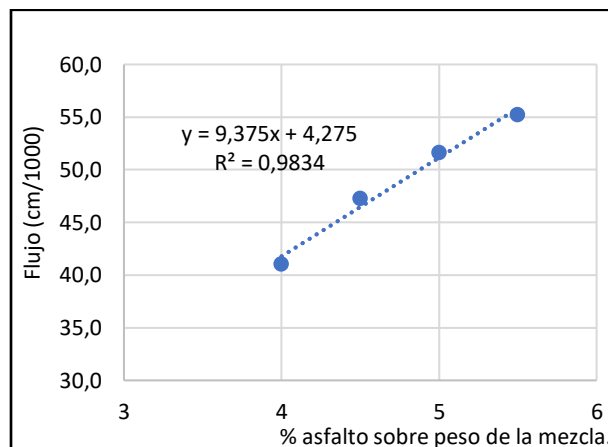


Figura 49. Gráfico 34. Valores correspondientes al flujo, según el contenido de asfalto.

El rango permitido para aprobar un diseño de mezcla es de 20-35 centímetros en flujo, para la estabilidad, el mínimo permitido es de 800 kg.

Cuadro 13. Datos obtenidos en la prueba de tensión diametral para especímenes saturados y secos

PASTILLA	ESPESOR (cm)	CARGA (kN)	DIAMETRO (cm)	ESFUERZO A TENSIÓN (kPa)	DAÑO VISUAL POR HUMEDAD (DE 0 A 5)
1	6,4	9,263	10,2	904,0	0,0
2	6,3	10,023	10,2	987,2	
3	6,4	11,792	10,2	1145,9	
4	6,5	8,745	10,2	840,1	0,0
5	6,4	10,256	10,2	1004,7	
6	6,4	9,456	10,2	920,1	0,0
7	6,5	8,425	10,2	812,1	0,0
8	6,5	11,123	10,2	1072,2	
				ts humedo	869,0
				ts seco	1052,5

Fuente: Laboratorios ITP.

Se obtiene un %TSR equivalente de 82,6 %.

Diseño de mezcla de control

La sección siguiente presenta los valores correspondientes al diseño de control utilizado, con un porcentaje óptimo de asfalto de 5,6% para mezclas que no contienen RAP.

- **Gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica**

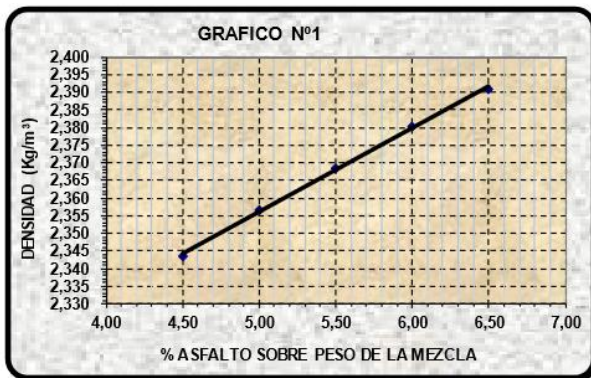


Figura 50. Gráfico 35. Valores correspondientes a las gravedades específicas brutas, según el contenido de asfalto.

Fuente: Laboratorio ITP.

- **Gravedad máxima teórica**

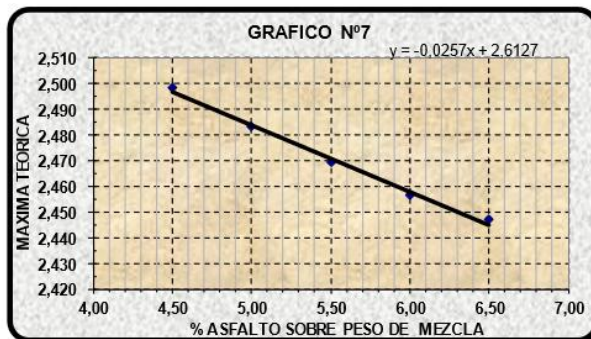


Figura 51. Gráfico 36. Valores correspondientes a las gravedades máximas teóricas, según el contenido de asfalto.

Fuente: Laboratorio ITP.

- **Porcentajes de vacíos.**

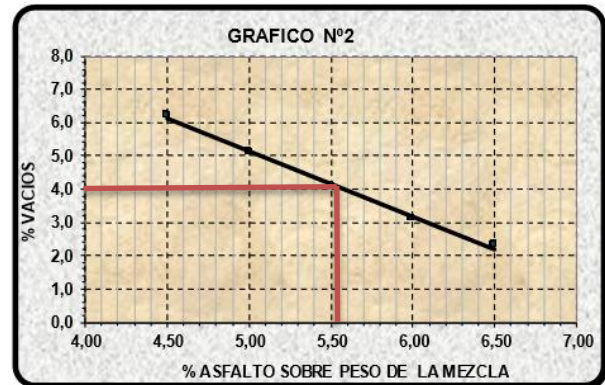


Figura 52. Gráfico 37. Valores correspondientes a los vacíos en la mezcla, según el contenido de asfalto.

Fuente: Laboratorio ITP.

Se obtiene un porcentaje óptimo de asfalto de 5,6%.

- **Vacíos en el agregado mineral**

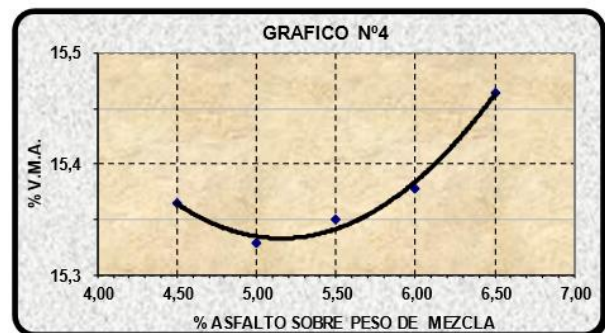


Figura 53. Gráfico 38. Valores correspondientes a los vacíos en el agregado mineral, según el contenido de asfalto.

Fuente: Laboratorio ITP.

- Vacíos llenos de asfalto

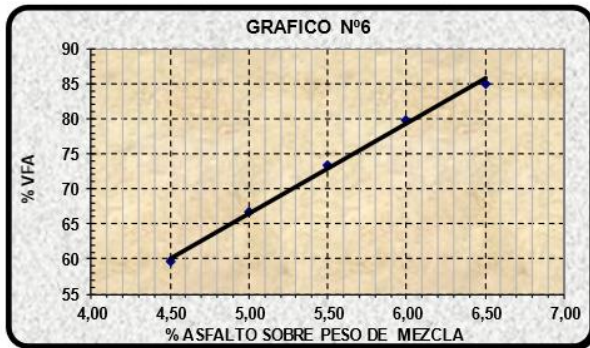


Figura 54. Gráfico 39. Valores correspondientes a los vacíos llenados con asfalto, según el contenido de asfalto.

Fuente: Laboratorio ITP.

Flujo



Figura 56. Gráfico 41. Valores correspondientes al flujo, según el contenido de asfalto.

Fuente: Laboratorio ITP

- Estabilidad y flujo Marshall

Estabilidad

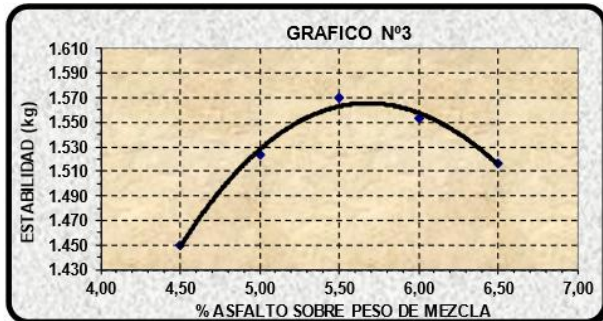


Figura 55. Gráfico 40. Valores correspondientes a la estabilidad, según el contenido de asfalto.

Fuente: Laboratorio ITP

Resistencia a la tensión diametral indirecta

Los resultados siguientes son equivalentes para un contenido de asfalto óptimo de 5,6%, obtenidos del diseño de mezcla de control, aunado a ello, se realizó la prueba para un contenido de asfalto de 4,7% resultado de los diseños experimentales.

Cuadro 14. Datos obtenidos en la prueba de tensión diametral para especímenes saturados y secos, para un contenido de asfalto óptimo de 5,6%

PASTILLA	ESPESOR (cm)	CARGA (kN)	DIAMETRO (cm)	ESFUERZO A TENSIÓN (kPa)	DAÑO VISUAL POR HUMEDAD (DE 0 A 5)
1	9,8	26,962	15,0	1172,7	0
2	9,8	27,608	15,0	1202,6	0
3	9,8	25,556	15,0	1113,0	1
4	9,7	24,307	15,0	1061,6	1
5	9,7	24,379	15,0	1062,5	1
6	9,7	27,323	15,0	1192,5	0

ts humedo 1079,0
ts seco 1189,3

Fuente: Laboratorios ITP.

Se obtiene un %TSR equivalente de 90,7.

Cuadro 15. Datos obtenidos en la prueba de tensión diametral para especímenes saturados y secos, para un contenido de asfalto óptimo de 4,7%

PASTILLA	ESPESOR (cm)	CARGA (kN)	DIAMETRO (cm)	ESFUERZO A TENSIÓN (kPa)	DAÑO VISUAL POR HUMEDAD (DE 0 A 5)
1	6,4	12,756	10,2	1243,9	
2	6,4	9,755	10,2	956,6	0,0
3	6,5	10,572	10,2	1023,9	0,0
4	6,6	10,890	10,2	1037,6	0,0
5	6,5	12,719	10,2	1231,2	
6	6,4	12,532	10,2	1219,6	
7	6,5	11,942	10,2	1150,8	
8	6,5	11,850	10,2	1144,5	0,0

ts humedo 1040,6
ts seco 1211,4

Fuente: Laboratorios ITP.

Se obtiene un %TSR equivalente de 85,9.

Resumen de los resultados

- Densidad de pastillas compactadas

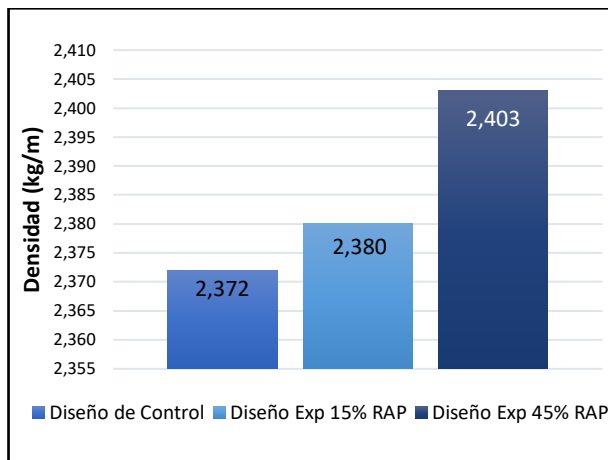


Figura 57. Gráfico 42. Valores correspondientes a las densidades obtenidas para cada uno de los diseños.

- Gravedad específica Máxima Teórica

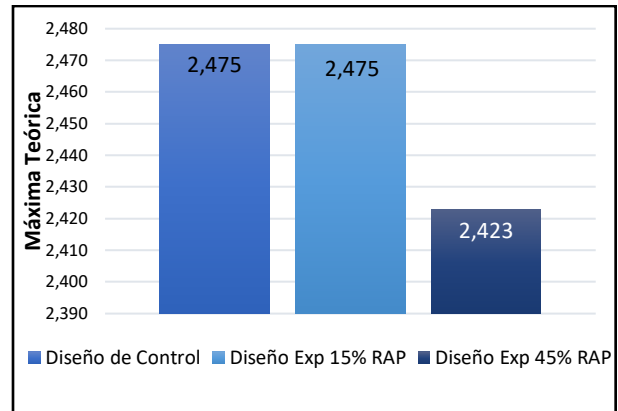


Figura 58. Gráfico 43. Valores correspondientes a las gravedades máximas teóricas para cada uno de los diseños.

- Vacíos en el Agregado Mineral.

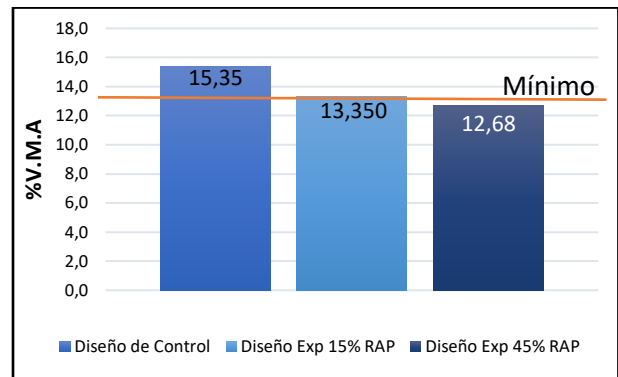


Figura 59. Gráfico 44. Valores correspondientes a los porcentajes de vacíos en el agregado mineral para cada uno de los diseños.

- Vacíos llenos de asfalto

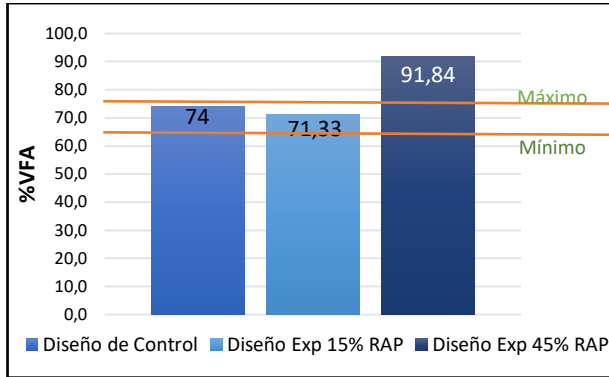


Figura 60. Gráfico 45. Valores correspondientes a los porcentajes de vacíos llenos con asfalto para cada uno de los diseños.

- Flujo

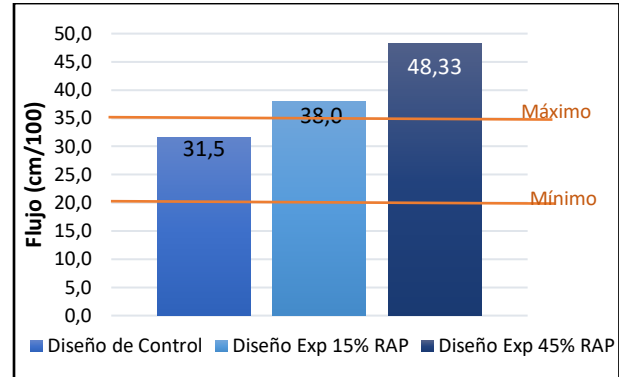


Figura 62. Gráfico 47. Valores correspondientes al flujo obtenido para cada uno de los diseños.

- Estabilidad

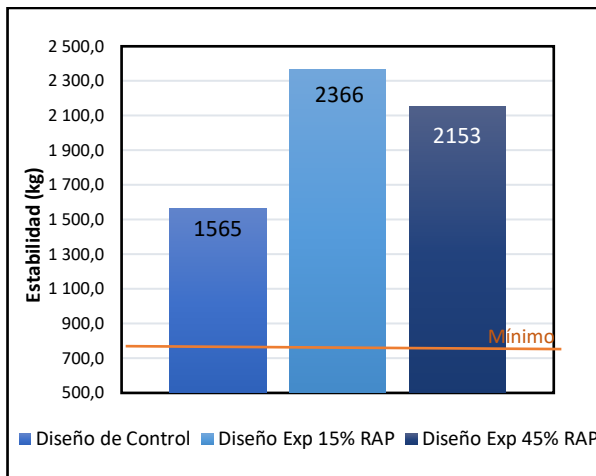


Figura 61. Gráfico 46. Valores correspondientes a las estabilidades obtenidas para cada uno de los diseños.

- Tensión diametral indirecta

Resistencia a la tensión indirecta, condicionada

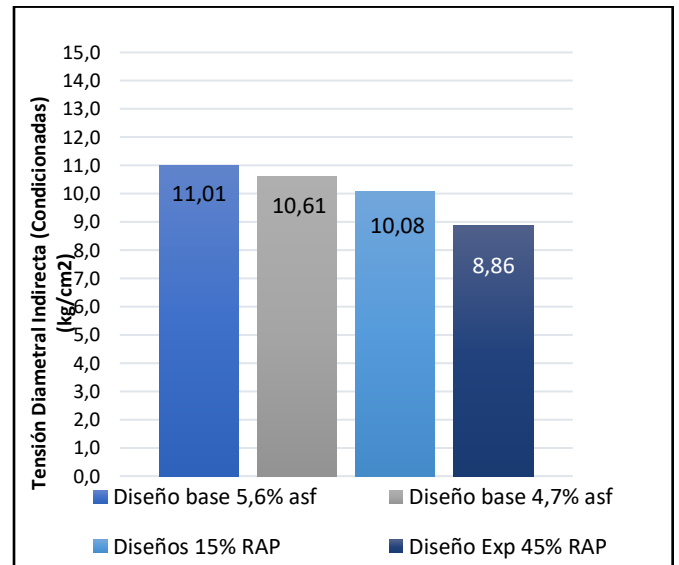


Figura 63. Gráfico 48. Valores correspondientes a la tensión diametral indirecta, cilindros condicionados.

Resistencia a la tensión indirecta, no condicionada

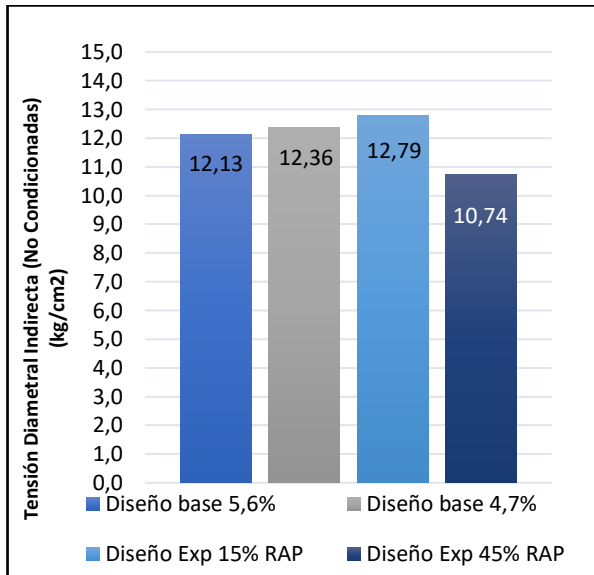


Figura 64. Gráfico 49. Valores correspondientes a la tensión diametral indirecta, cilindros no condicionados.

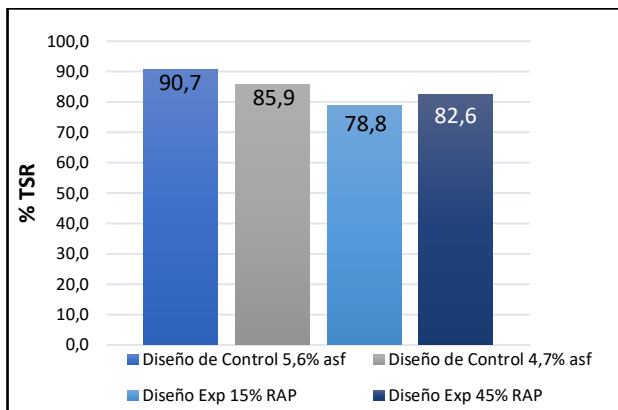


Figura 65. Gráfico 50. Valores correspondientes a la tensión indirecta obtenidas para cada uno de los diseños.

Análisis de los resultados

Características físico-mecánicas del RAP.

La necesidad de una caracterización del material reciclado nace ante la posibilidad de darle una utilidad a este, tal que genere impacto ambiental positivo. Cabe resaltar que el material a utilizar ya ha sido expuesto a diferentes esfuerzos mecánicos, ya que este material proviene de la carpeta de ruedo.

Los resultados obtenidos se comparan con los indicados en la división 700, sección 703.07 del CR-2010, ya que esta norma es la utilizada por las entidades como guía para elaborar mezclas asfálticas en caliente, para entidades gubernamentales.

Granulometría

Al realizar el análisis granulométrico, se observa en sus resultados que el RAP aporta agregado en todos los tamices, siendo así que el agregado fino aporta un 55,24% y el agregado grueso un 44,66%, es decir, el RAP aporta tamaños en todos los tamices, como se observa en la figura 16.

Dicha composición granulométrica conlleva como beneficio que un solo agregado satisface la demanda de tamaños nominales que se requieren para los diseños de mezcla con un tamaño nominal de 19 milímetros.

Aunque el RAP presenta agregados gruesos y finos, la presencia de más agregados finos no facilita el proceso de combinación con otros agregados, por lo que realizar un proceso de trituración controlado aumentaría el porcentaje de

RAP que se puede utilizar en los diseños de mezclas.

Resistencia a la abrasión

El RAP cumple con el porcentaje permitido de abrasión, siendo así que el CR-2010 indica un máximo permitido de 40% y el material reciclado presenta un 12,5%.

Esto indica que el material es capaz de resistir los procesos mecánicos a los que será sometido. Aunado a ello, al ser un material reciclado, ya este ha pasado por todos los procesos que implica realizar una mezcla asfáltica, los cuales han sido descritos anteriormente e inclusive, ha sido utilizado en carpetas asfálticas, y las partículas que componen al RAP utilizado en los diseños de mezclas son aquellas que han soportado los diversos esfuerzos a los que han sido sometidas durante su vida útil.

Gravedad específica bruta seca

Esta característica presenta una diferencia significativa entre el RAP y los agregados vírgenes, como se observa en la figura 18, la gravedad que presenta dicho agregado es más baja que los agregados vírgenes, dicha condición se debe a que este material posee asfalto oxidado sobre su superficie o en los vacíos que este poseía en un inicio.

Esta condición de menor peso, en comparación con los agregados vírgenes, incide directamente en los resultados de los diseños de mezcla

Gravedad específica saturada superficie seca

Este valor en el RAP es muy significativo, dado que el agua atrapada en los grumos (agregado fino, agregado grueso y asfalto) es difícil de secar o extraer, además, el asfalto existente que recubre las partículas evita que haya penetración de agua a los poros.

Dada la condición expuesta, se puede contemplar el porqué, los valores de las gravedades resultan similares.

Porcentaje de absorción

El valor presente en el RAP, posee un porcentaje de absorción menor, en comparación con los agregados vírgenes, lo cual se observa en la figura 17.

Esta condición se presenta debido al asfalto oxidado presente en el RAP, el cual rodea las partículas de manera tal que las impermeabiliza y evita que el agua sea absorbida

Caras fracturadas

Es una característica de los agregados gruesos, los cuales deben poseer como mínimo un 75% según lo indicado en el CR-2010, sección 703.07, cuyo resultado para el RAP es de un 96,52%.

Al comparar el valor obtenido por el RAP con los agregados vírgenes, se observa una pequeña diferencia de tan solo 3,48% por debajo (figura 21).

Sanidad de los agregados

Característica que define la resistencia a la desintegración y deterioro de los agregados, debido al medio al que esté expuesto, tal como lluvia o sol y que se traducen en expansión y contracción que poco a poco reducen la solidez.

El CR-2010 indica que el porcentaje máximo permitido será de un 15%, la figura 22 expresa los resultados obtenidos, tanto para el RAP con un valor de 1,8%, como para los agregados vírgenes.

Dicho valor indica que el RAP es un agregado con alta capacidad de resistencia ante los cambios volumétricos

Partículas friables y arcillosas

Dicha condición se indica en el CR-2010 como permitida hasta un 1%, para lo cual el RAP cumple, ya que presenta un contenido de arcillas de 0,25%, y es más bajo que los agregados vírgenes, los cuales tienen un 0,3%-0,4%, dicho comportamiento se puede observar en la figura 23.

Esta condición nos indica que el RAP es un material que presenta menos partículas friables y arcillosas, en comparación con los agregados vírgenes.

Equivalente de arena

Esta cualidad es exclusiva de los agregados finos, el CR-2010 permite un mínimo de 45%.

El resultado obtenido es el adecuado para utilizar el material en la construcción de mezclas asfálticas y no representa problemas de compactación en sitio.

Índice de durabilidad

El RAP es separado en finos y/o gruesos para la elaboración de la prueba, aunque en el CR-2010 se indica el porcentaje mínimo igual para ambos agregados, se desea tener un mayor asertividad en los resultados.

Para los agregados finos, (figura 25) se obtiene un 85% de durabilidad y en el polvo de piedra un 87%, y es así que ambos agregados presentan una resistencia similar a la generación relativa, fineza y cantidad del material arcilloso generado por los esfuerzos mecánicos a los que son sometidos.

En lo que a agregados gruesos (figura 26) se refiere, estos presentan para el RAP un 80% de durabilidad y cumplen con la solicitud, sin embargo, es menor a la presentada por los agregados vírgenes.

Diseño de mezcla asfáltica para la municipalidad

La siguiente sección muestra el diseño asfáltico que se propone a la Municipalidad de Cartago, en este lo que se busca es encontrar un diseño de mezcla tal que se pueda incluir el RAP como un material individual dentro del combo granulométrico, facilitando así la producción de esta.

Densidad

La densidad es una característica muy importante, ya que al obtener un valor alto, la mezcla tendría un rendimiento duradero, lo que implica que las cargas mecánicas a las que será expuesto no generará deformaciones en la capa asfáltica.

Si bien es cierto, la densidad obtenida en el laboratorio es un valor patrón, se usa como referencia para determinar si el diseño se puede utilizar en campo o no, aunado a ellos, los valores usados en práctica son generalmente un porcentaje de ese valor, dada la complejidad de obtener los mismos valores de laboratorio. Cabe resaltar que el CR-2010 no indica valores límites para este parámetro

Máxima Teórica

El CR-2010 no presenta valores límites, sin embargo, el diseño de mezcla asfáltico presenta un comportamiento normal, siendo que, a mayor contenido de asfalto; menor es su máxima teórica.

Vacíos en el agregado mineral

Un porcentaje de vacío alto indica que habrá mayor espacio para el asfalto, sin embargo, valores bajos generaría que no todas las partículas de agregado están siendo rodeadas por el aglutinante.

Para un diseño de mezcla asfáltica de 19 mm, el CR-2010 indica un porcentaje mínimo de 13%, valor para el cual el diseño propuesto cumple;

para porcentaje de vacíos del 4%, con un valor de 14,02% (figura 31). De igual manera, cumple para los porcentajes seleccionados para el proyecto.

Vacíos llenos de asfalto

Para el diseño expuesto, esta condición está cumpliendo con el rango indicado en el CR-2010, esto para el porcentaje de vacíos del 4% y un contenido de asfalto óptimo de 4,7%.

El valor obtenido fue de un 64%, lo cual está dentro del rango determinado por el CR-2010.

Estabilidad

Es la capacidad de resistir desplazamientos y deformaciones ante la carga impuesta por el tránsito en reiteradas ocasiones. Ahuellamientos, ondulaciones, agrietamientos son algunas de las señales de que la mezcla no cumple con los requerimientos.

El CR-2010 solicita un mínimo de estabilidad de 800 kg, el diseño analizado resiste el doble de lo solicitado.

Este comportamiento se debe a la inclusión del RAP, el cual es únicamente aquel que ha resistido a la intemperie y esfuerzos dados por el tránsito; es decir, se han incorporado a la mezcla agregados con mayor resistencia, es por ello que se concluye que la presencia de RAP, aumenta la rigidez de la mezcla.

Flujo

El CR-2010 establece un rango entre 20-35 cm para este parámetro, tal que, posea una fluidez que permita una trabajabilidad y compactación correcta, pero a su vez, no sufra grandes deformaciones ante los esfuerzos a los que será expuesta. El diseño propuesto para la Municipalidad cumple con los límites recomendados.

Tensión diametral indirecta

El contenido de RAP es de un 15%, como se ha mencionado anteriormente, lo que nos da un bajo contenido de asfalto oxidado, incidiendo en una

mezcla con resistencia alta a la falla por fatiga. A su vez, la inserción del RAP en la mezcla contribuye a que el daño por humedad disminuya, en comparación con las mezclas tradicionales.

Además de tener un valor de la resistencia a la tensión diametral indirecta de un 78.8%, superando el porcentaje mínimo establecido por el CR-2010.

Diseño de mezcla asfáltica experimental

Para los diseños experimentales, como se ha mencionado anteriormente, se utilizan dos porcentajes de RAP y sus resultados se comparan con los obtenidos en un diseño de control.

Densidad

La densidad es una característica muy importante, ya que es trascendente obtener un valor alto, pues representaría un rendimiento duradero.

Si bien es cierto, la densidad obtenida en el laboratorio es un valor patrón, se usa como referencia para determinar si el diseño se puede utilizar en campo o no, aunado a ellos, los valores usados en práctica son generalmente un porcentaje de ese valor, dada la complejidad de obtener los mismos valores de laboratorio. Cabe resaltar que el CR-2010 no indica valores límites para este parámetro, al comparar los valores obtenidos entre el diseño base y los diseños con un 4,7% de asfalto óptimo, se observan valores similares, sin embargo, se deben complementar con los otros parámetros a utilizar.

Máxima Teórica

No presenta valores límites, sin embargo, el diseño de mezcla asfáltico con 45% de RAP presenta en valor más bajo, dado el alto contenido de este y el valor de gravedad específica bruta que posee, siendo menor que los agregados vírgenes. Por ende, cuanto mayor sea la cantidad de RAP

presente en la mezcla asfáltica, hay mayor cantidad de asfalto, sumando el virgen y el oxidado, lo que generaría mayor presencia de aglutinante que de agregados pétreos.

De igual manera, los diseños elaborados presentan un comportamiento normal, es decir, a mayor contenido de asfalto, menor es su máxima teórica. El comportamiento del diseño propuesto y el diseño de control presentan un comportamiento similar, inclusive en sus valores (figura 37 y 51).

Vacíos en el agregado mineral

Como se ha indicado anteriormente, el CR-2010 indica un porcentaje mínimo de 13%, para el tamaño máximo nominal con el que se trabaja. Para el diseño con contenido de RAP de 15% se está cumpliendo lo solicitado, sin embargo, el diseño con un contenido de RAP de 45% no está cumpliendo, para todos los porcentajes de asfalto seleccionados (figura 46) y para el contenido de asfalto óptimo (4,7%), se tiene un valor de 12,68%.

La granulometría que presenta el diseño es densa, lo que deja poco espacio libre para acomodar aire y asfalto. Lo que explicaría por qué al aumentar el contenido de RAP, se limitan los espacios libres, debido al asfalto oxidado que aporta este, por lo que una trituración que engrose la distribución granulometría mejoraría esta condición.

Vacíos llenos de asfalto

Para el diseño con contenido de RAP de 45% esta prueba posee valores muy elevados, debido a la cantidad de asfalto oxidado que este posee.

Respecto a los otros diseños, su comportamiento es el esperado, el diseño con contenido de 15% de RAP presenta comportamiento y valores similares al del diseño de control.

Estabilidad

Retomando lo indicado en el CR-2010, se solicita un mínimo de estabilidad de 800 kg, razón para la cual los diseños analizados cumplen, siendo el diseño experimental con contenido de RAP de 15% el que presenta mejor comportamiento.

La inclusión del RAP, como se ha mencionado en pasadas ocasiones, adiciona consigo asfalto oxidado, el cual es activado cuando se condicionan los cilindros de prueba, es por ello que a mayor contenido de RAP, menor estabilidad (figura 61).

Flujo

El valor de esta prueba muestra un incremento en los diseños que contienen RAP, en comparación con el diseño de control, siendo que para la mezcla con contenido de 45% RAP, presenta un valor muy alto, dado que este material posee un contenido de asfalto, que, aunque oxidado por su uso anterior, se activa en las temperaturas de mezclado y condicionamiento, antes de la falla de estabilidad y flujo.

Para el diseño con contenido de 15% de RAP, el rango se supera por 3 centímetros (figura 62), por lo que la inclusión de un asfalto menos rígido que el AC-30 o aditivos, puede mejorar esta característica y a su vez, se maximiza la cantidad de RAP que puede ser utilizado.

Valores de estabilidad y flujo altos inciden en un pavimento muy frágil y rígido.

El rango permitido por el CR-2010 está entre 20-35 centímetros.

Tensión diametral indirecta

Se espera una resistencia a la tensión diametral indirecta mayor a 75%, valor para el cual los diseños cumplen perfectamente. Se presenta un %TSR, para el diseño de 45% mayor al diseño con contenido de 15%, debido a que este dato se obtiene de los resultados ponderados de los datos condicionados dividido entre el resultado ponderado de las no condicionadas (figura 65).

La adición del RAP en las mezclas asfálticas influye en que el daño inducido por humedad disminuya, en comparación con la mezcla asfáltica de control.

El comportamiento de las mezclas con 15% de RAP es similar a la mezcla asfáltica de control, por lo que su resistencia a la fatiga no se ve afectada (figura 63 y 64).

Sin embargo, el diseño que posee un contenido de RAP de 45%, los cilindros de falla se

encuentran muy sellados superficialmente, por ende, el agua no puede filtrarlas, por lo que el daño inducido por humedad, de manera visual es nulo, pero su resistencia a la fatiga se ve disminuida, debido al asfalto oxidado el cual incide en que la mezcla tenga un comportamiento más rígido, generando que su resistencia a la falla por fatiga se vea disminuida en comparación con la mezcla de control.

Esta condición se puede corregir, para maximizar el uso del RAP, con el uso de asfaltos más suaves que el AC-30 o aditivos rejuvenecedores.

Conclusiones

- El material reciclado cumple con las características físicas y mecánicas indicadas en el CR-2010 para ser utilizado como sustituto de agregado virgen.
- El diseño de asfalto propuesto para la Municipalidad de Cartago, con un contenido de RAP de 15% cumple con los parámetros indicados en el CR-2010, esto utilizando como fuente de agregados vírgenes los proporcionados por MECO; y un porcentaje óptimo de asfalto de 4,7%.
- Reducción en el consumo de asfalto virgen, debido al porcentaje contenido en el material de reciclaje. Dado que para la mezcla de control el porcentaje óptimo de asfalto virgen equivale a un 5,6% y para contenidos de 15% de RAP, esta baja a un 4,7%.
- Debido al asfalto presente en el RAP, se dificulta la absorción de asfalto virgen, lo que genera problemas en la elaboración de la mezcla en el diseño con 45% RAP.
- El diseño de mezcla con 45% de material reciclado, presenta valores de flujo altos, lo que incide en una mezcla altamente deformable.
- El diseño experimental con contenido de 45% de RAP, es el que presenta menor resistencia a la fatiga, siendo que, a mayor contenido de RAP, la mezcla presenta mayor fragilidad.
- El RAP representa una opción viable para reducir el consumo de agregado virgen, tal que los diseños presentados no se dispersan de los resultados volumétricos del diseño de mezcla de control.

Recomendaciones

- Procesar el material reciclado de manera que mejore las características granulométricas dando mayor versatilidad en la elaboración de la graduación de diseño, esto con la finalidad de mejorar características de trabajabilidad, flexibilidad, entre otras, a la mezcla.
- Reproducir las mezclas asfálticas en tramos de control donde se pueda registrar su comportamiento a través del tiempo, debido a los diferentes factores a los que se exponen las capas de rodamiento.
- Realizar pruebas de reología en el asfalto del material reciclado, para determinar qué tipo de asfalto permite maximizar el porcentaje de material reciclado.
- Es recomendable realizar nuevos estudios donde se amplíen los porcentajes de material reciclado utilizado.
- Se recomienda el uso de aditivos para mejorar algunas de las propiedades del asfalto oxidado que pertenece al RAP, o un asfalto más blando, tal que permita un mayor porcentaje de material de reciclaje.
- El RAP no es un material homogéneo, por lo que se recomienda que cuando se vaya a utilizar se lleven a cabo caracterizaciones previas, para realizar los ajustes necesarios.
- Realizar ensayos de fatiga de vigas para obtener un indicador más directo de desempeño por fatiga en laboratorio.

Referencias

- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T27 Standard Method of Test for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T96, Standard Method Of Test For Resistance To Degradation Of Small-Size Coarse Aggregate By Abrasion And Impact In The Los Angeles Machine
- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T104, Standard Method Of Test For Soundness Of Aggregate By Use Of Sodium Sulfate Or Magnesium Sulfate.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T112, Standard Method Of Test For Clay Lumps And Friable Particles In Aggregate.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T176, Standard Method Of Test For Plastic Fines In Graded Aggregates And Soils By Use Of The Sand Equivalent Test.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T210 Standard Method of Test for Aggregate Durability Index.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T308/164 Standard Method of Test for Determining the Asphalt Binder Content of Hot Mix Asphalt (HMA) by the Ignition Method.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T166 Standard Method of Test for Bulk Specific Gravity (Gmb) of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Using Saturated Surface-Dry Specimens.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T209 Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity (Gmm) and Density of Hot Mix Asphalt (HMA).
- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T245 Standard Method of Test for Resistance to Plastic Flow of Asphalt Mixtures Using Marshall Apparatus.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T283 Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage.
- American Society of Testing Materials, ASTM D6926 Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus.
- American Society of Testing Materials, ASTM D5821 Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate.
- Angelone, S. Martínez, F. Santamaría, E. Gavilán, E. Cauhapé, M. Deformación permanente de mezclas asfálticas. Universidad del Rosario. Argentina.
- Asphalt Mix Design Methods. Seventh edition. Asphalt Institute.
- Asphalt Pavement Recycling with Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
- Baaj H. and H. Di Benedetto. Effect of Binder Characteristics on Fatigue of Asphalt Pavement Using an Intrinsic Damage Approach. Road Materials and Pavement Design. Vol. 6, N° 2, pp. 147-174, (2005).
- Bonaquist, R. Laboratory Evaluation of Hot Mix Asphalt (HMA) Mixtures Containing 33 Recycled or Waste Product Materials Using Performance Testing. Publication FHWA-PA-2005- 34 006-98-32(19), Pennsylvania Department of Transportation, Office of Planning and Research, 35 2005.

- Castro, P. Deformación plástica en capas asfálticas. Roderas y corrugaciones. Revista Infraestructura Vial. Año II. Número 2. Agosto 2000.
- Flores, M. Delgado, A. Garnica, P. Determinación de la resistencia a la fatiga en mezclas asfálticas. Instituto Mexicano del Transporte.
- Loría, G. Determinación de leyes y una especificación costarricense para fatiga de mezclas asfálticas en caliente. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LANAMME. Universidad de Costa Rica.
- Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes. CR-2010. Ministerio de Obras Públicas y Transporte.
- Miranda, R. Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos. Universidad Austral de Chile. Chile.
- Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: U. S Department of Transportation.
- Segura, M. Diseño e implementación de nueve procedimientos técnicos como parte del Sistema de Gestión de Calidad del LabCIVCO. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

Apéndices

Apéndice 1. Diseño de mezcla.

**Apéndice 2.
Características físico-
mecánicas de los
diseños de mezcla.**

**Apéndice 3. Gráficas
de estabilidad y flujo
Marshall**

Apéndice 1. Diseño mezcla

Diseño mezcla con un 15% RAP

Los cuadros y valores que se presentan a continuación se repiten para los diferentes porcentajes de asfalto y RAP utilizado

Cuadro 1. Valores correspondientes a los porcentajes utilizados para un diseño de mezcla asfáltica con un contenido de 15% de RAP

Material		Quintilla	Cuartilla	Polvo de Piedra	RAP	Combinación de Diseño	Retenido	Retenido Acumulado	Especificaciones	
%		24%	26%	35%	15%	100%				
Tamiz		% Pasando								
No	mm									
3/4	19,000	100	100	100	100	100	0	0	90	100
1/2	12,500	100	45	100	94	85	15	15	68	90
3/8	9,500	83	15	100	86	72	13	28	56	80
4	4,750	17	7	84	66	45	27	55	35	57
8	2,360	5	5	57	50	30	15	70	23	35
16	1,190	4	4	38	41	21	9	79	14	22
30	0,600	3	3	25	34	15	6	85	9	17
50	0,300	3	3	17	29	12	4	88	6	14
200	0,075	2,3	2,2	6,8	21,3	7	5	93	2,0	8,0

Cuadro 2. Datos correspondientes a diseño de mezcla para un 15% RAP, para la elaboración de los especímenes cilíndricos

GMB Pastillas	
Contenido de Asfalto (*)	5,0%
Peso de Mezcla Asfáltica en Caliente (g)	1180,00
Peso de agregado (g)	1121,00
Peso de cemento asfáltico (g)	59,00
Total (g)	1180,00

(*) Se trabaja con cuatro porcentajes diferentes de asfalto, por ende, este valor varía.

Cuadro 3. Datos correspondientes a diseño de mezcla para un 15% RAP, para la elaboración de las muestras para máximas teóricas

GMM Pastillas	
Contenido de Asfalto (*)	5,0%
Peso de Mezcla Asfáltica en Caliente (g)	2000
Peso de agregado (g)	1900
Peso de cemento asfáltico (g)	100
Total (g)	2000

(*) Se trabaja con cuatro porcentajes diferentes de asfalto, por ende, este valor varía.

Cuadro 4. Valores correspondientes para la cantidad de agregado necesario en la elaboración de las muestras para los especímenes cilíndricos y máximas teóricas, según el porcentaje de agregado utilizado

Total de agregado por espécimen (g) (*)		1121,00			
Porcentaje de agregado (*)		24%			
Gramos requeridos		269			
Tamiz	% Pasando	%Retenido	Peso por Tamiz (g)	Peso acumulado	Peso 4 pastillas
3/4	100	0	0,00	0	0,00
1/2	100	0	0,00	0	0,00
3/8	83	17	45,74	46	182,95
4	17	66	177,57	223	710,27
8	5	12	32,28	256	129,14
16	4	1	2,69	258	10,76
30	3	1	2,69	261	10,76
50	3	0	0,00	261	0,00
200	2,3	0,7	1,88	263	7,53
Charola	0	2,3	6,19	269	24,75
Total		100	269,04	1837	1076,16

(*) Varían según el porcentaje de agregado utilizado en el diseño de la mezcla, tal como se muestra en el cuadro 1.

Diseño mezcla experimental.

Cuadro 5. Valores correspondientes a los porcentajes utilizados para un diseño de mezcla asfáltica experimental

Material		Quintilla	Cuartilla	Polvo de Piedra	RAP	Combinación de Diseño	Retenido	Retenido Acumulado	Especificaciones	
%		17%	30%	53%	0%	100%				
Tamiz		% Pasando					Retenido	Retenido Acumulado	Especificaciones	
No	mm									
3/4	19,000	100	100	100	100	100	0	0	90	100
1/2	12,500	100	45	100	94	84	17	17	68	90
3/8	9,500	83	15	100	86	72	12	28	56	80
4	4,750	17	7	84	66	50	22	50	35	57
8	2,360	5	5	57	50	33	17	67	23	35
16	1,190	4	4	38	41	22	11	78	14	22
30	0,600	3	3	25	34	15	7	85	9	17
50	0,300	3	3	17	29	10	4	90	6	14
200	0,075	2,3	2,2	6,8	21,3	5	6	95	2,0	8,0

Cuadro 6. Valores correspondientes para la cantidad de agregado necesario en la elaboración de las muestras para los especímenes cilíndricos y máximas teóricas, según el porcentaje de agregado utilizado

Total de agregado por espécimen (g)		1132,80					
Porcentaje agregado		17,00%					
Gramos requeridos		192,58					
Tamiz	% Pasando	%Retenido	Peso por Tamiz (g)	Peso vírgenes	Peso RAP	Peso acumulado	Peso 4 pastillas
3/4	100	0	0,00	0,00	0,00	0	0,00
1/2	100	0	0,00	0,00	0,00	0	0,00
3/8	83	17	32,91	28,15	4,76	33	131,65
4	17	66	127,78	109,30	18,48	161	511,12
8	5	12	23,23	19,87	3,36	184	92,93
16	4	1	1,94	1,66	0,28	186	7,74
30	3	1	1,94	1,66	0,28	188	7,74
50	3	0	0,00	0,00	0,00	188	0,00
200	2,3	0,7	1,36	1,16	0,20	189	5,42
Charola	0	2,3	4,45	3,81	0,64	194	17,81
Total		100	193,61	165,61	28,00	1322	774,43

Apéndice 2. Características físico-mecánicas de los diseños de mezcla.

Diseño mezcla para la Municipalidad de Cartago.

Cuadro 7. Datos completos para determinar los valores de gravedad específica bruta

% Asfalto	# Pastilla	Peso seco (g)	Peso Sumergido (g)	Peso SSS (g)	Gmb	Gmb Promedio
4	1.1	1170,6	673,6	1180,1	2,311	2,327
	1.2	1171,2	674,8	1175,7	2,338	
	1.3	1164,9	670,9	1171,2	2,328	
	1.4	1170,8	675,5	1177,7	2,331	
4,5	1.5	1170,3	671,4	1174,4	2,327	2,340
	1.6	1169,7	672,2	1172,7	2,337	
	1.7	1165	672,1	1167,7	2,351	
	1.8	1165,7	672,3	1168,9	2,347	
5	1.9	1143,5	665,6	1145,2	2,384	2,382
	1.10	1166,2	678,4	1168,3	2,380	
	1.11	1167,9	678,1	1170,3	2,373	
	1.12	1167,8	681,2	1169,4	2,392	
5,5	1.13	1159,9	675,6	1160,9	2,390	2,389
	1.14	1158,7	673,5	1159,8	2,383	
	1.15	1161,3	676,6	1162,3	2,391	
	1.16	1161,6	677,2	1162,6	2,393	

Cuadro 8. Datos completos para determinar los valores de la gravedad máxima teórica

% Asfalto	# Muestra	Recipiente (g)	Material (g)	Recipiente+material+agua (g)	Peso calibrado (g)	Gmm	Promedio Gmm
4,0	1	2476	2485,5	9175,5	7680	2,503	2,506
	2	2476	2492,9	9179,7	7680	2,510	
4,5	3	2476	2489,3	9169,5	7680	2,490	2,496
	4	2476,1	2480,8	9169,7	7680	2,503	
5,0	5	2478,5	2487,2	9163	7683,1	2,469	2,468
	6	2478,8	2487,3	9162,3	7683,1	2,467	
5,5	7	2478,8	2492,1	9158,7	7683,1	2,452	2,452
	8	2478,5	2492,6	9158,8	7683,1	2,451	

Cuadro 9. Datos completos para determinar los valores correspondientes a los porcentajes de vacíos según el contenido de asfalto

% asfalto	# Muestra	Gmb	Gmm	%vacíos
4	1	2,333	2,506	6,93
4,5	2	2,340	2,496	6,25
5	3	2,379	2,468	3,61
5,5	4	2,388	2,452	2,60

Cuadro 10. Datos completos para elaboración de las gráficas de estabilidad según contenido de asfalto

Estabilidad (kg)	Promedio Estabilidad (kg)	% asfalto
1993,5	1850,8	4
1759,0		
1713,1		
1937,4		
1677,4	1636,6	4,5
1708,0		
1529,6		
1631,5		
1677,4	1661,1	5
1607,0		
1682,5		
1677,4		
1422,5	1604,8	5,5
1687,6		
1662,1		
1646,8		

Cuadro 11. Datos completos para elaboración de las gráficas de flujo según contenido de asfalto

Flujo (mm)	Promedio Flujo (mm)	% asfalto
3,61	3,8575	4
4,22		
3,78		
3,82		
4,11	3,9575	4,5
3,89		
3,93		
3,9		
4,51	4,3325	5
4,38		
4,01		
4,43		
3,98	4,27	5,5
4,52		
4,19		
4,39		

Cuadro 12. Datos completos para elaboración de las gráficas de porcentajes de vacíos en el agregado mineral según contenido de asfalto

% Asfalto	Gmb	% Ps	Gsb	%VMA	%VMA promedio.
4	2,311	96	2,585	14,19	13,72
	2,338	96	2,585	13,18	
	2,328	96	2,585	13,55	
	2,331	96	2,585	13,44	
4,5	2,327	95,5	2,585	14,06	13,38
	2,337	95,5	2,585	13,68	
	2,351	95,5	2,585	13,17	
	2,347	95,5	2,585	13,30	
5	2,384	95	2,585	12,39	12,58
	2,380	95	2,585	12,53	
	2,373	95	2,585	12,81	
	2,392	95	2,585	12,11	
5,5	2,390	94,5	2,585	12,64	12,72
	2,383	94,5	2,585	12,91	
	2,391	94,5	2,585	12,61	
	2,393	94,5	2,585	12,53	

Cuadro 13. Datos completos para elaboración de las gráficas de porcentajes de vacíos llenos con asfalto según contenido de asfalto

% Asfalto	%VMA	%Va	%VFA
4	13,72	6,93	49
4,5	13,38	6,25	53
5	12,58	3,61	71
5,5	12,72	2,60	80

Diseño mezcla experimental para un contenido de 15% de RAP

Cuadro 14. Datos completos para determinar los valores de gravedad específica bruta

15% rap	# Pastilla	Peso seco (g)	Peso Sumergido (g)	Peso SSS (g)	Gmb	Gmb Prom
4	1.1	1180,2	681,9	1185,5	2,344	2,347
	1.2	1178,9	682,2	1184,7	2,346	
	1.3	1179,1	680,9	1183,9	2,344	
	1.4	1179,3	683,4	1184,5	2,353	
4,5	1.5	1177,6	685,5	1181,7	2,373	2,373
	1.6	1180,9	686,6	1183,9	2,375	
	1.7	1181,6	685,6	1185,8	2,362	
	1.8	1179,1	686,6	1181,9	2,381	
5	1.9	1168,9	682,9	1171,4	2,393	2,393
	1.10	1174,1	685,1	1176,1	2,391	
	1.11	1173	684,7	1175,0	2,392	
	1.12	1170	683,6	1172,1	2,395	
5,5	1.13	1169,9	685,4	1171,2	2,408	2,406
	1.14	1171,4	686,1	1172,4	2,409	
	1.15	1167,8	682,0	1169,7	2,395	
	1.16	1168,9	685,4	1169,9	2,413	

Cuadro 15. Datos completos para determinar los valores de la gravedad máxima teórica

% asfalto	# Muestra	Recipiente (g)	Material (g)	Recipiente +material+agua (g)	Peso Calibración (g)	Gmm	Promedio Gmm
4,0	1	2474	2503,3	9188,2	7680	2,502	2,502
	2	2474	2505,5	9190,2	7680	2,503	
4,5	3	2473,9	2497,8	9177,1	7680	2,484	2,482
	4	2473,9	2495,6	9174,5	7680	2,481	
5,0	5	2474	2506,3	9170,2	7680	2,458	2,458
	6	2474	2508,9	9172,3	7680	2,459	
5,5	7	2473,8	2500,9	9161,9	7680	2,449	2,448
	8	2473,8	2503,5	9162,2	7680	2,446	

Cuadro 16. Datos completos para determinar los valores correspondientes a los porcentajes de vacíos según el contenido de asfalto

% asfalto	# Muestra	Gmb	Gmm	%vacíos
4	1	2,347	2,502	6,22
4,5	2	2,373	2,482	4,42
5	3	2,393	2,458	2,66
5,5	4	2,406	2,448	1,71

Cuadro 17. Datos completos para elaboración de las gráficas de estabilidad según contenido de asfalto

Estabilidad (kg)	Promedio Estabilidad (kg)	% asfalto
2289,2	2446,0	4
2523,8		
2467,7		
2503,4		
2528,9	2443,7	4,5
2365,7		
2569,6		
2310,6		
2161,8	2212,7	5
2059,8		
2253,5		
2375,9		
2172,0	2202,6	5,5
2467,7		
2054,7		
2115,9		

Cuadro 18. Datos completos para elaboración de las gráficas de flujo según contenido de asfalto

Flujo (mm)	Promedio Flujo (mm)	% asfalto
3,62	3,73	4
3,6		
3,98		
3,		
3,78	3,80	4,5
3,58		
4,12		
4,05		
3,59	3,83	5
3,68		
3,76		
4,29		
3,7	3,86	5,5
4,22		
3,62		
3,9		

Cuadro 19. Datos completos para elaboración de las gráficas de porcentajes de vacíos en el agregado mineral según contenido de asfalto

% Asfalto	Gmb	% Ps	Gsb	%VMA	%VMA promedio
4	2,344	96	2,619	14,10	13,99
	2,346	96	2,619	14,01	
	2,344	96	2,619	14,08	
	2,353	96	2,619	13,74	
4,5	2,373	95,5	2,619	13,47	13,49
	2,375	95,5	2,619	13,42	
	2,362	95,5	2,619	13,87	
	2,381	95,5	2,619	13,20	
5	2,393	95	2,619	13,21	13,21
	2,391	95	2,619	13,27	
	2,392	95	2,619	13,23	
	2,395	95	2,619	13,13	
5,5	2,408	94,5	2,619	13,11	13,19
	2,409	94,5	2,619	13,09	
	2,395	94,5	2,619	13,61	
	2,413	94,5	2,619	12,96	

Cuadro 20. Datos completos para elaboración de las gráficas de porcentajes de vacíos llenos con asfalto según contenido de asfalto

% Asfalto	V%MA	%Va	%VFA
4	13,99	6,22	56
4,5	13,49	4,42	67
5	13,21	2,66	80
5,5	13,19	1,71	87

Diseño mezcla experimental para un contenido de 45% de RAP

Cuadro 21. Datos completos para determinar los valores de gravedad específica bruta

% asfalto	# Pastilla	Peso seco (g)	Peso Sumergido (g)	Peso SSS (g)	Gmb	Gmb Promedio
4	1.1	1187,8	697,2	1189,2	2,414	2,407
	1.2	1186,3	694,6	1187,7	2,406	
	1.3	1186,8	695,4	1188,0	2,409	
	1.4	1190,0	697,3	1191,9	2,406	
4,5	1.5	1177,0	689,3	1178,1	2,408	2,407
	1.6	1176,0	687,4	1177,1	2,401	
	1.7	1184,2	692,6	1185,0	2,405	
	1.8	1182,9	692,9	1183,9	2,409	
5	1.9	1174,6	684,3	1175,9	2,389	2,394
	1.10	1177,2	686,2	1178,4	2,392	
	1.11	1179,0	688,0	1180,2	2,395	
	1.12	1176,8	686,7	1177,8	2,396	
5,5	1.13	1174,2	682,4	1175,1	2,383	2,381
	1.14	1172,5	681,6	1173,5	2,384	
	1.15	1173,0	682,1	1174,1	2,384	
	1.16	1173,5	680,5	1174,4	2,376	

Cuadro 22. Datos completos para determinar los valores de la gravedad máxima teórica

% asfalto	# Muestra	Recipiente (g)	Material (g)	Recipiente+ material+agua (g)	Peso calibrado (g)	Gmm	Promedio Gmm
4,0	1	2474	2588,5	9215,3	7680	2,452	2,454
	2	2474	2587,1	9216	7680	2,455	
4,5	3	2473,4	2533,5	9172,9	7680	2,426	2,423
	4	2473,4	2532,8	9170,3	7680	2,421	
5,0	5	2473,2	2527,6	9162	7680	2,411	2,412
	6	2473,2	2529,5	9164	7680	2,413	
5,5	7	2473,5	2528,6	9154	7680	2,394	2,395
	8	2473,5	2530,7	9156,2	7680	2,400	

Cuadro 23. Datos completos para determinar los valores correspondientes a los porcentajes de vacíos según el contenido de asfalto

% asfalto	# Muestra	Gmb	Gmm	%vacíos
4	1	2,407	2,454	1,90
4,5	2	2,407	2,423	0,65
5	3	2,394	2,412	0,74
5,5	4	2,381	2,395	0,56

Cuadro 24. Datos completos para elaboración de las gráficas de estabilidad según contenido de asfalto

Estabilidad (kg)	Promedio Estabilidad (kg)	% asfalto
2610,4	2643,6	4
2610,4		
2794,0		
2559,4		
2202,6	2312,2	4,5
2324,9		
2355,5		
2365,7		
1901,7	1906,8	5
1952,7		
1835,5		
1937,4		
1509,2	1687,6	5,5
1651,9		
1743,7		
1845,7		

Cuadro 25. Datos completos para elaboración de las gráficas de flujo según contenido de asfalto

Flujo (mm)	Promedio Flujo (mm)	% asfalto
4,03	4,105	4
4,29		
3,79		
4,31		
4,51	4,73	4,5
4,29		
4,91		
5,21		
4,95	5,165	5
5,22		
5,58		
4,91		
4,6	5,5225	5,5
5,52		
5,68		
6,29		

Cuadro 26. Datos completos para elaboración de las gráficas de porcentajes de vacíos en el agregado mineral según contenido de asfalto

% Asfalto	Gmb	%Ps	Gsb	%VMA	%VMA promedio
4	2,414	96	2,619	11,51	11,67
	2,406	96	2,619	11,82	
	2,409	96	2,619	11,70	
	2,406	96	2,619	11,82	
4,5	2,408	95,5	2,619	12,20	12,30
	2,401	95,5	2,619	12,44	
	2,405	95,5	2,619	12,31	
	2,409	95,5	2,619	12,16	
5	2,389	95	2,619	13,34	13,24
	2,392	95	2,619	13,25	
	2,395	95	2,619	13,12	
	2,396	95	2,619	13,09	
5,5	2,383	94,5	2,619	14,02	14,00
	2,384	94,5	2,619	14,00	
	2,384	94,5	2,619	13,98	
	2,376	94,5	2,619	14,28	

Cuadro 27. Datos completos para elaboración de las gráficas de porcentajes de vacíos llenos con asfalto según contenido de asfalto

% Asfalto	%VMA	%Va	%VFA
4	11,71	1,90	84
4,5	12,28	0,65	95
5	13,20	0,74	94
5,5	14,07	0,56	96

Apéndice 3. Gráficas de estabilidad y flujo Marshall.

Los valores utilizados para la elaboración del proyecto son los obtenidos con las líneas de color azul, esto para todos los gráficos.

Diseño mezcla para la Municipalidad de Cartago.

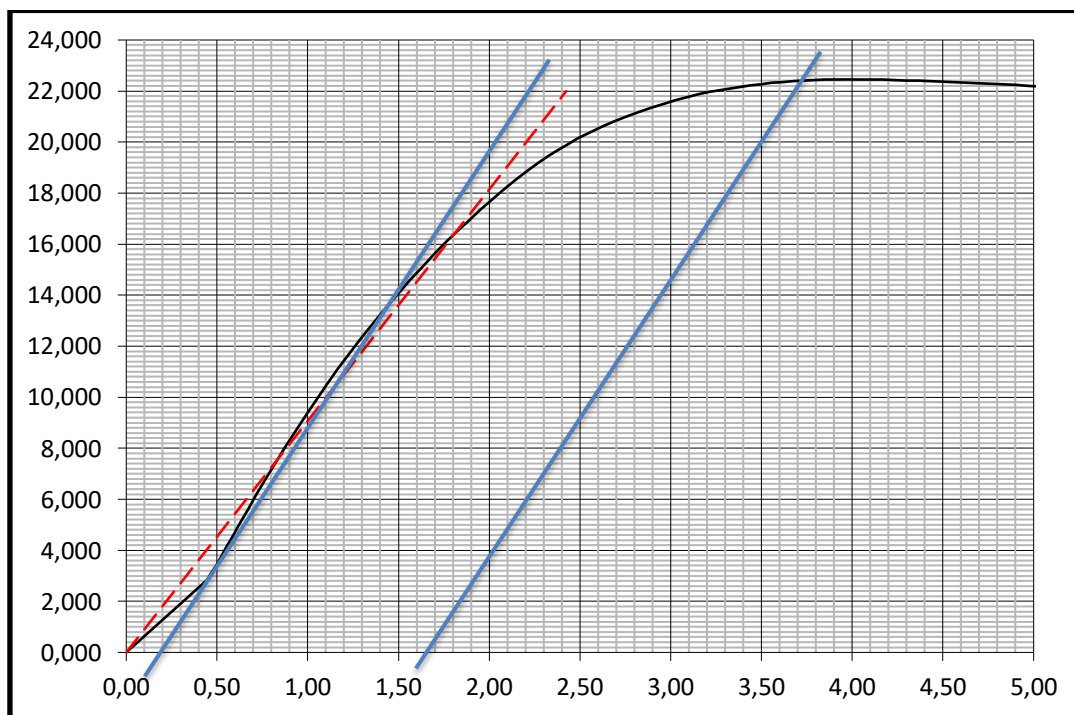


Figura 1. Gráfico 1. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,0%.

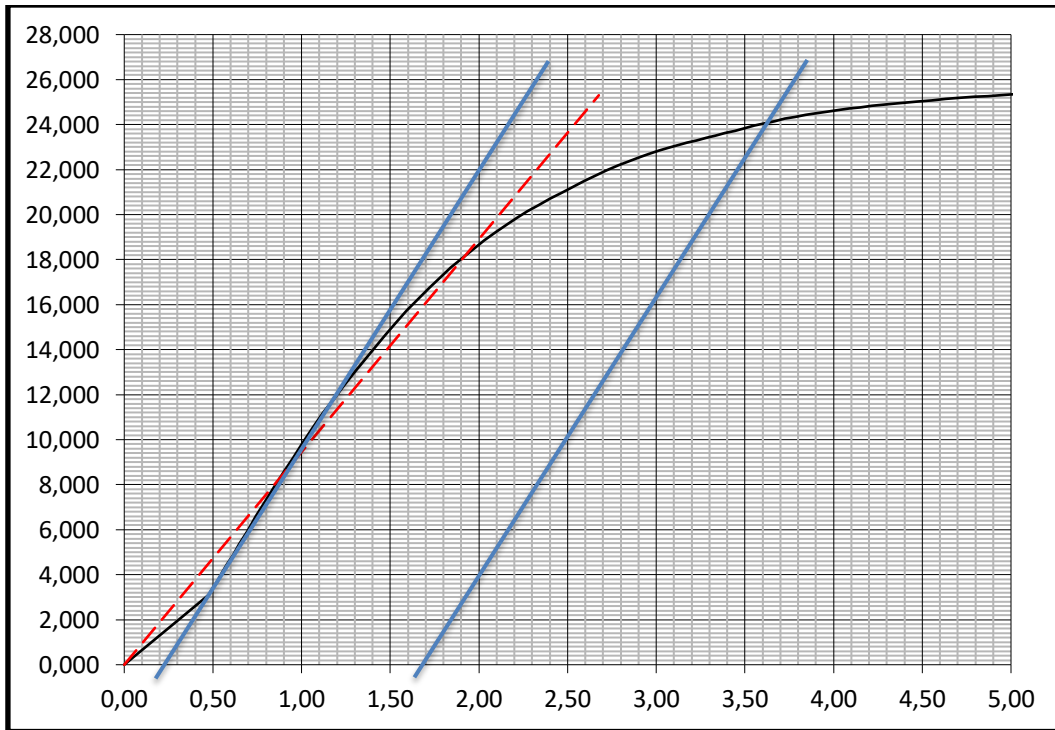


Figura 2. Gráfico 2. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,0%.

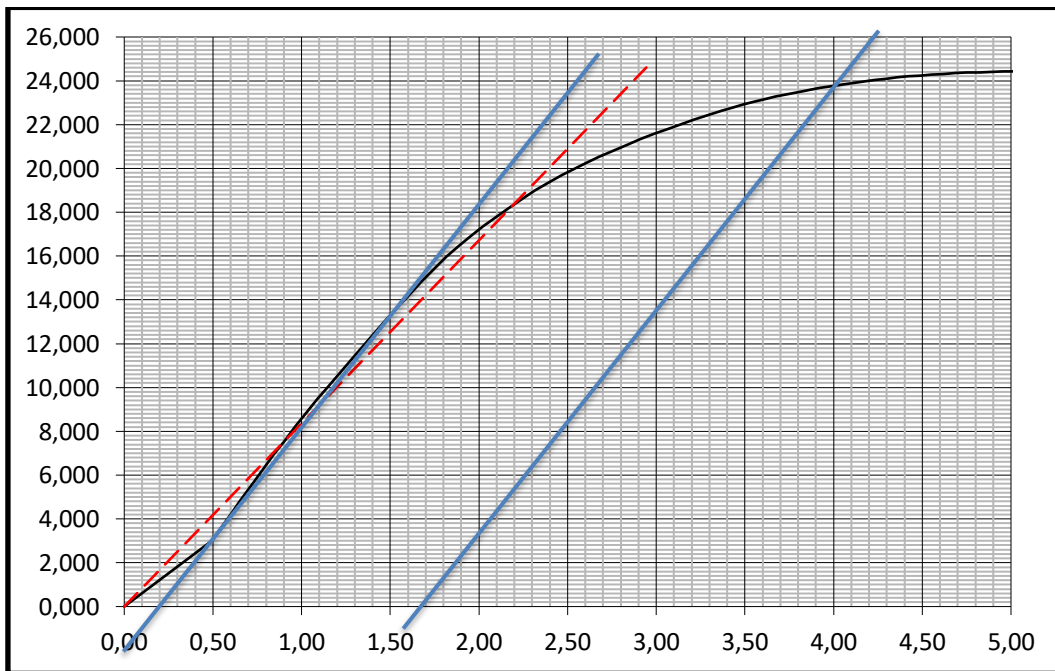


Figura 3. Gráfico 3. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,0%.

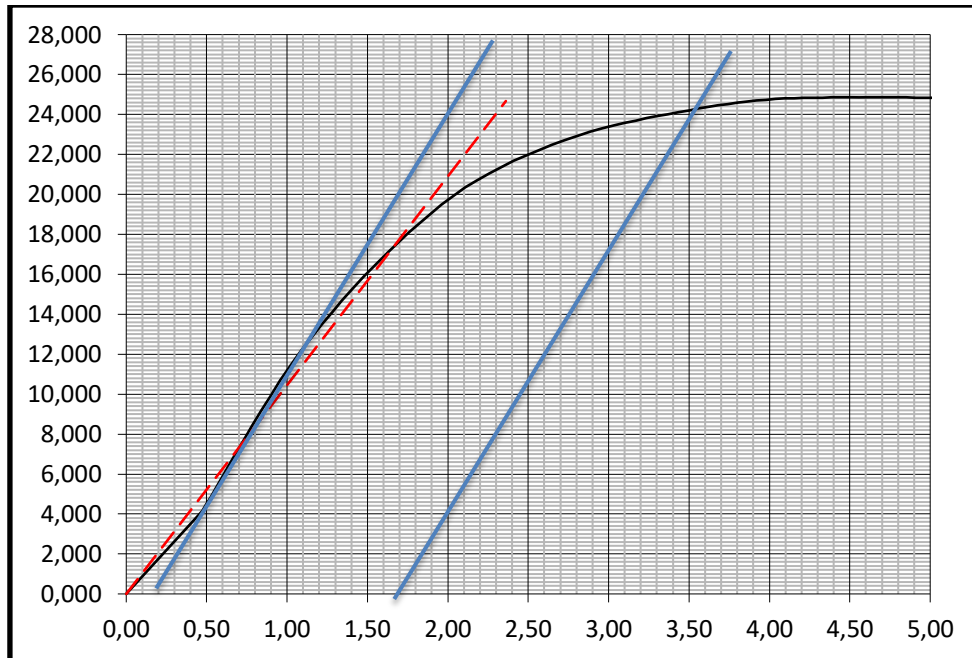


Figura 4. Gráfico 4. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,0%.

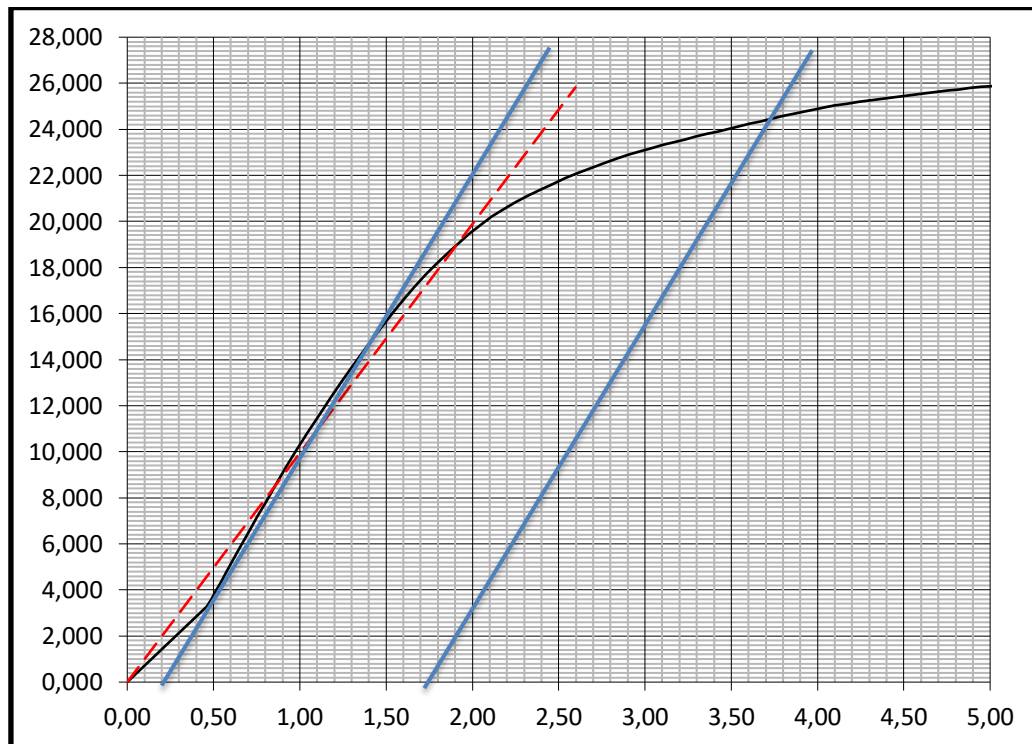


Figura 5. Gráfico 5. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,5%.

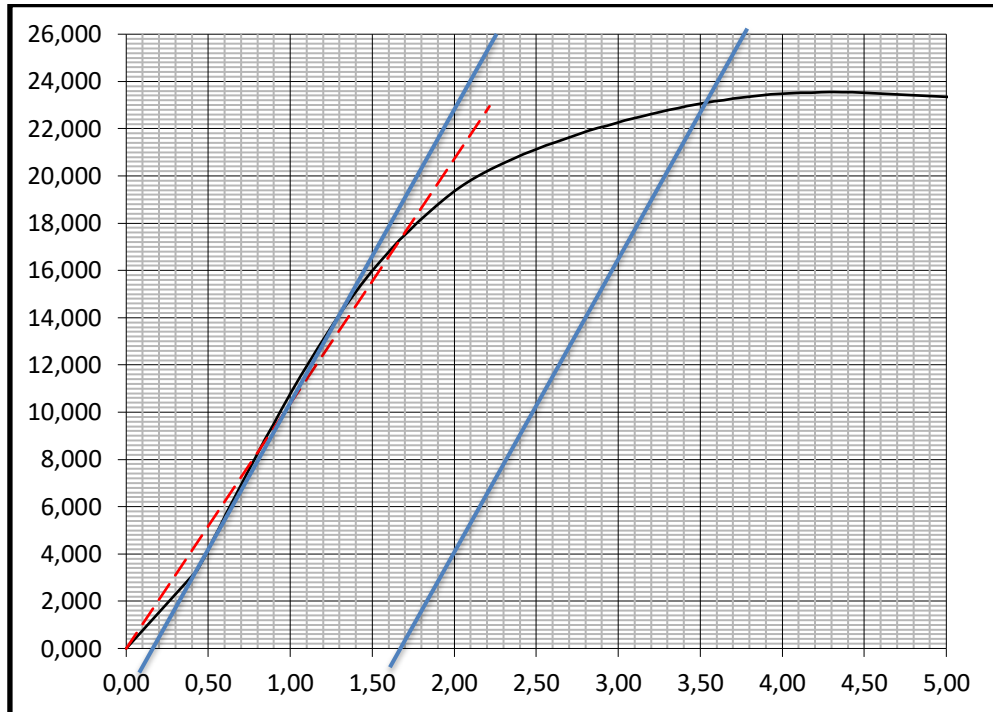


Figura 6. Gráfico 6. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,5%.

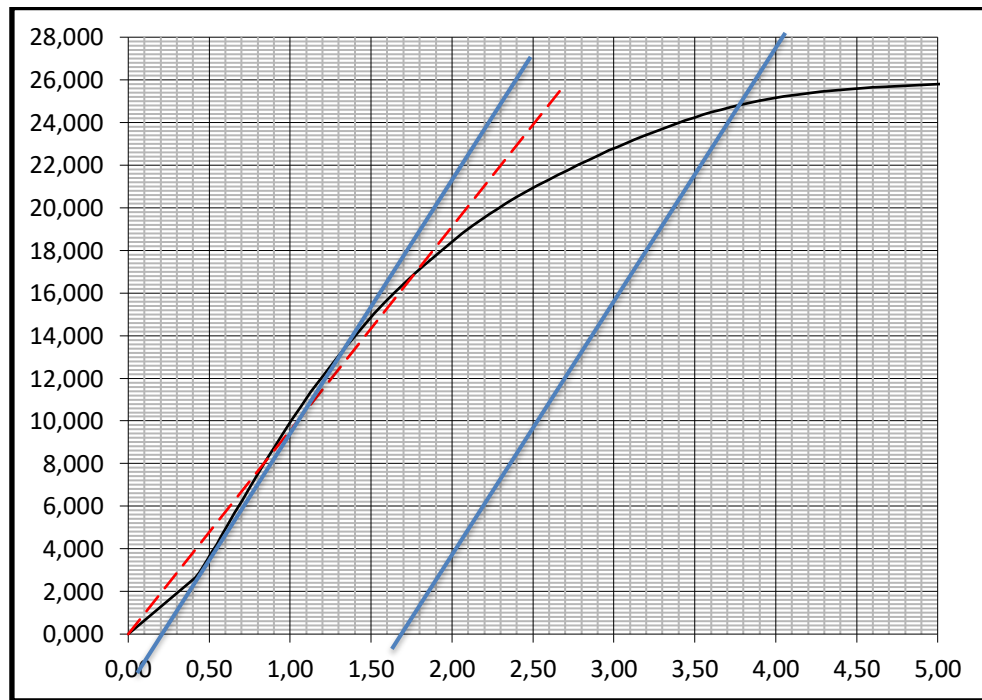


Figura 7. Gráfico 7. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,5%.

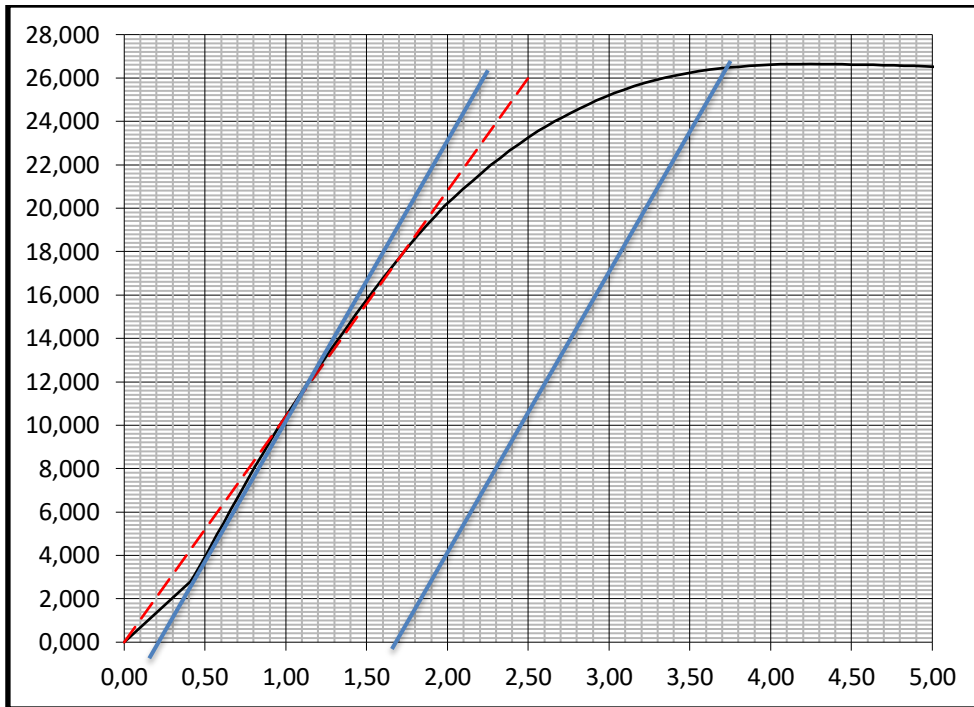


Figura 8. Gráfico 8. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,5%.

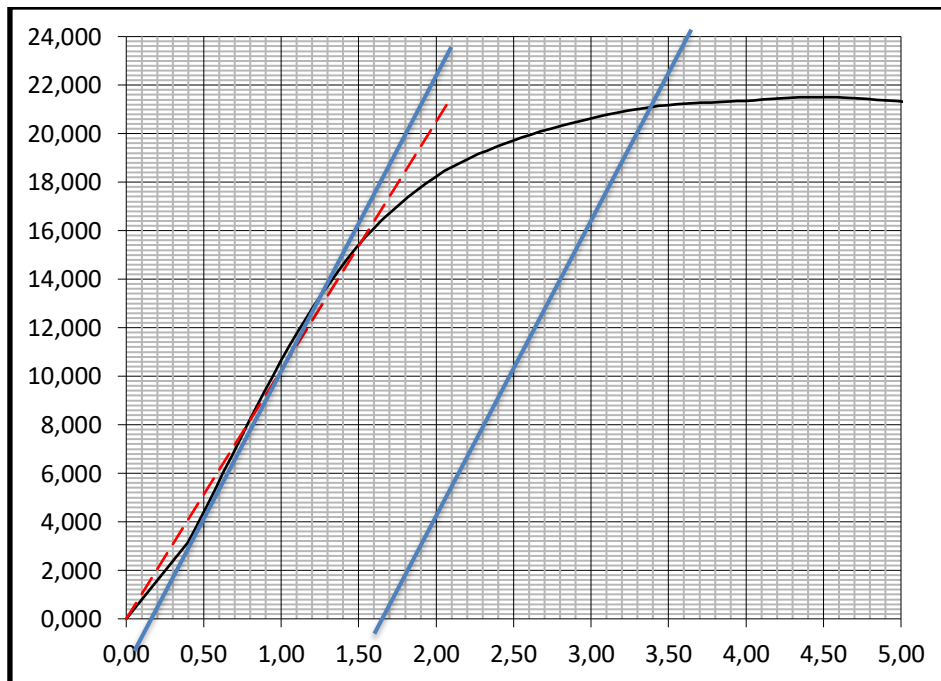


Figura 9. Gráfico 9. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,0%.

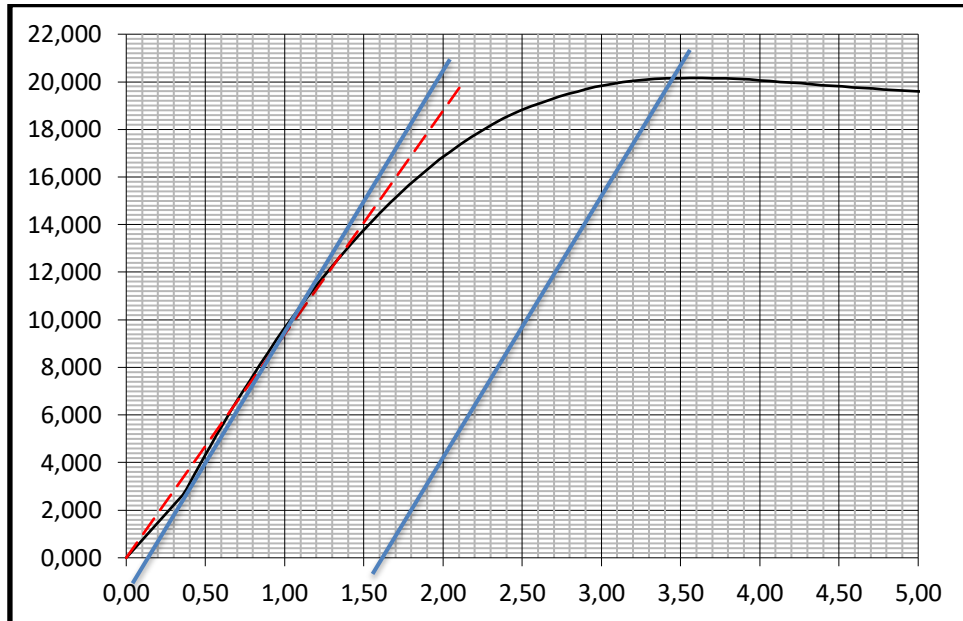


Figura 10. Gráfico 10. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,0%.

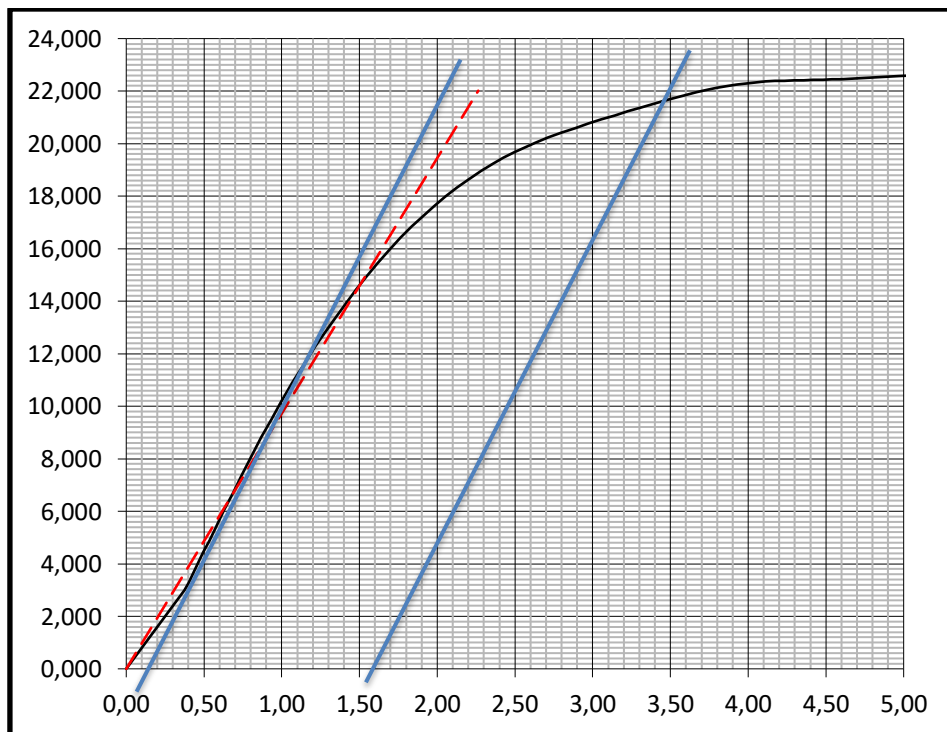


Figura 11. Gráfico 11. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,0%.

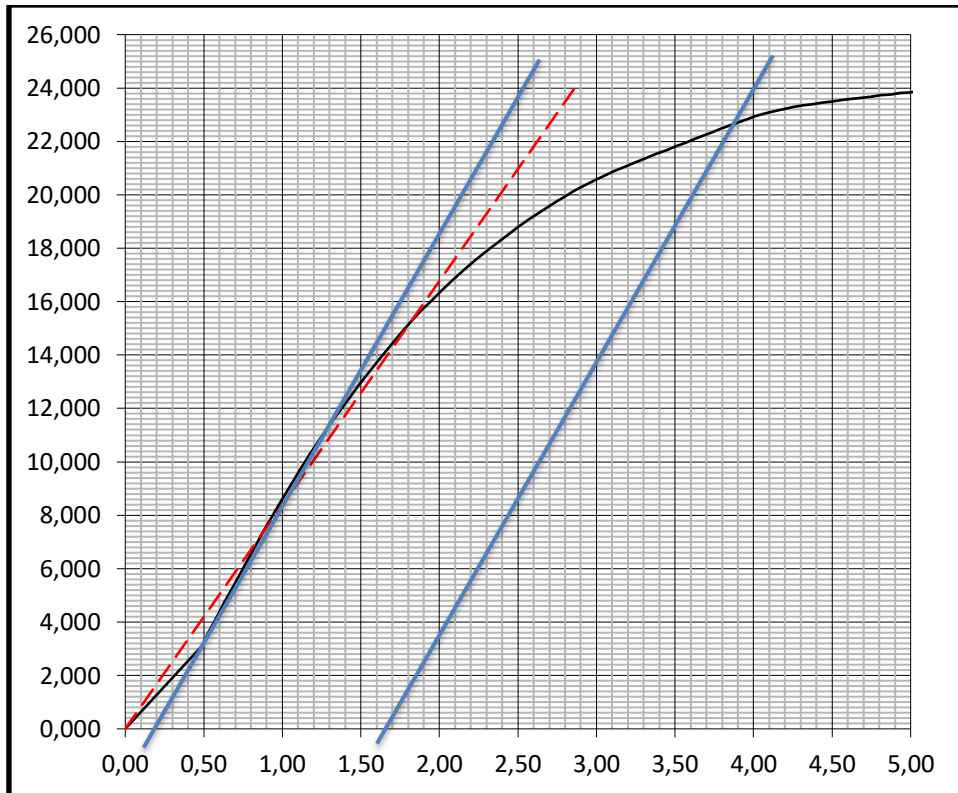


Figura 12. Gráfico 12. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,0%.

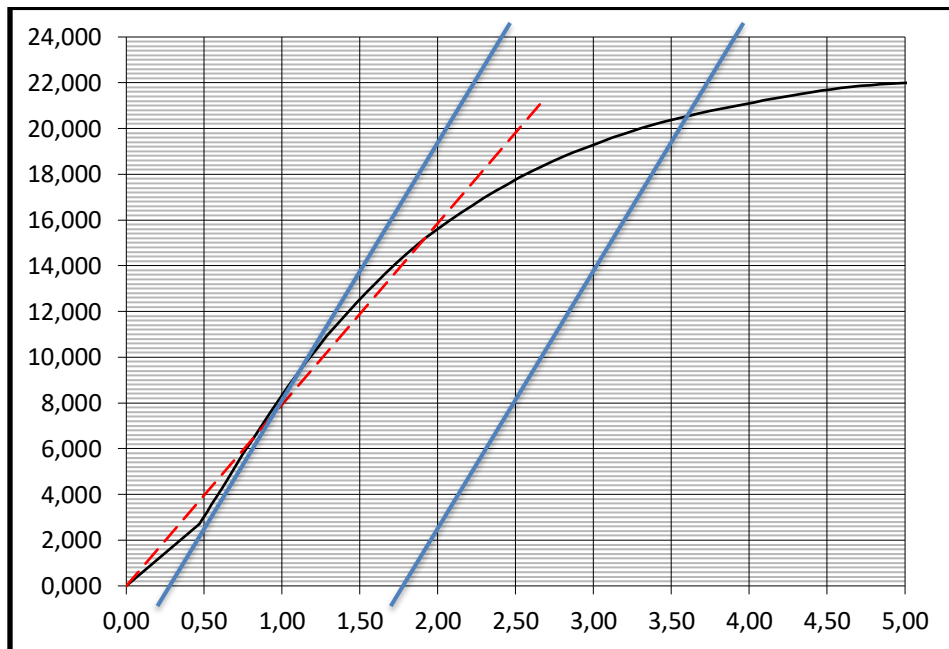


Figura 13. Gráfico 13. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,5%.

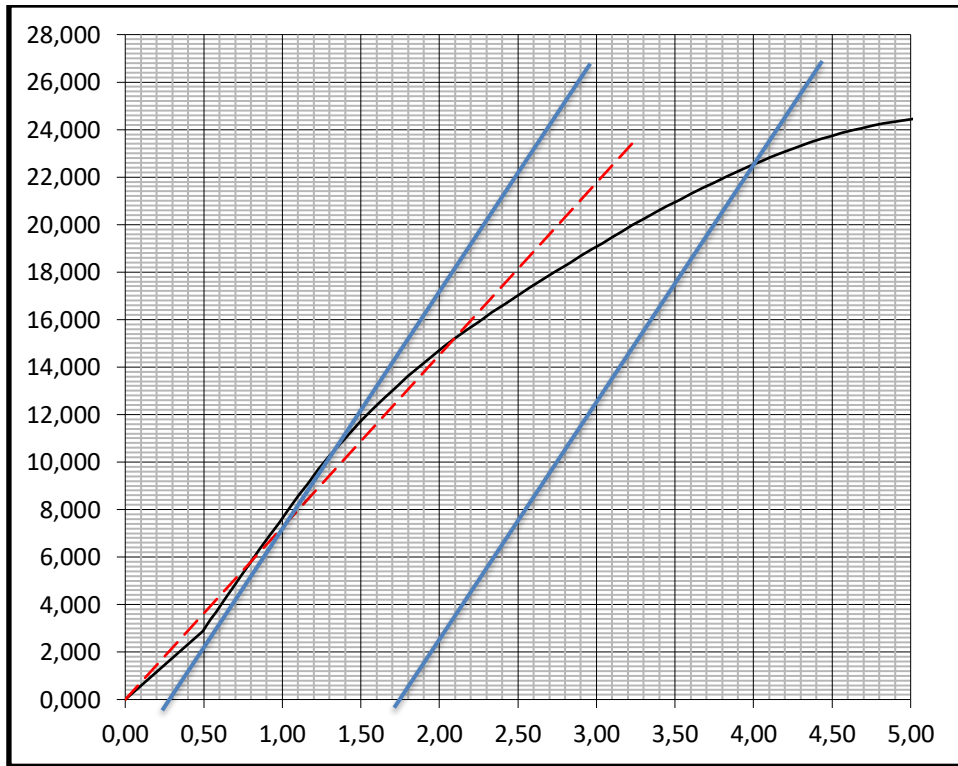


Figura 14. Gráfico 14. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,5%.

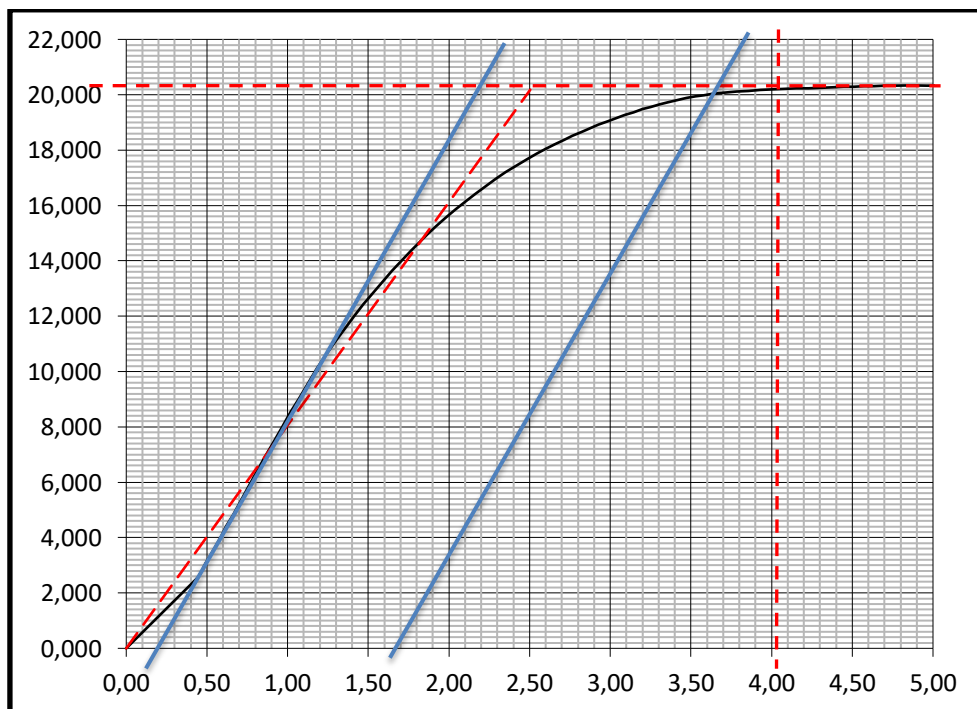


Figura 15. Gráfico 15. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,5%.

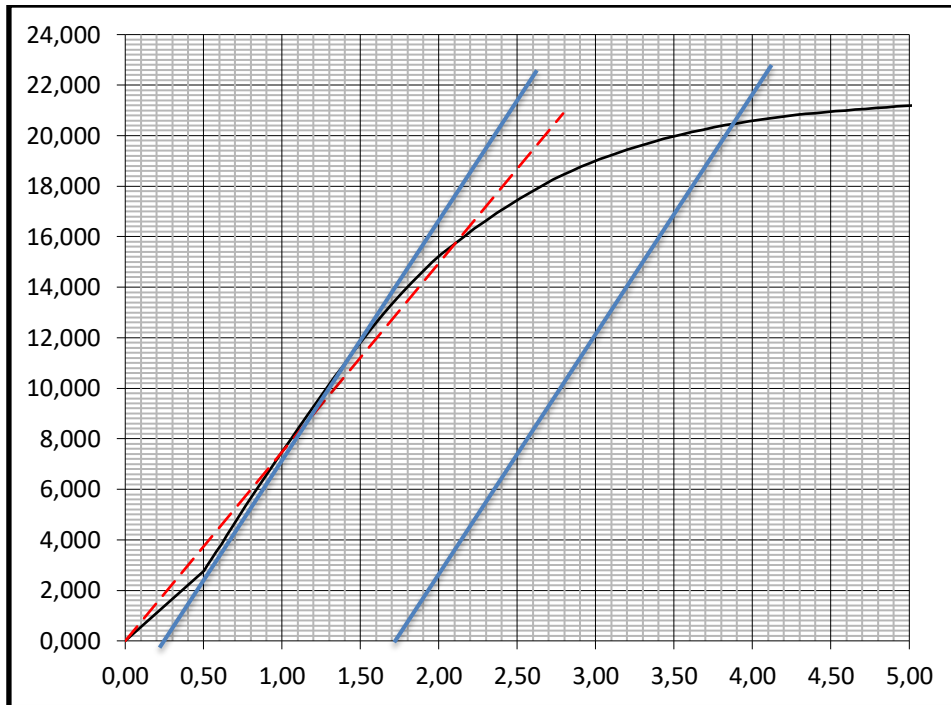


Figura 16. Gráfico 16. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,5%.

Diseño mezcla experimental para un contenido de 15% de RAP.

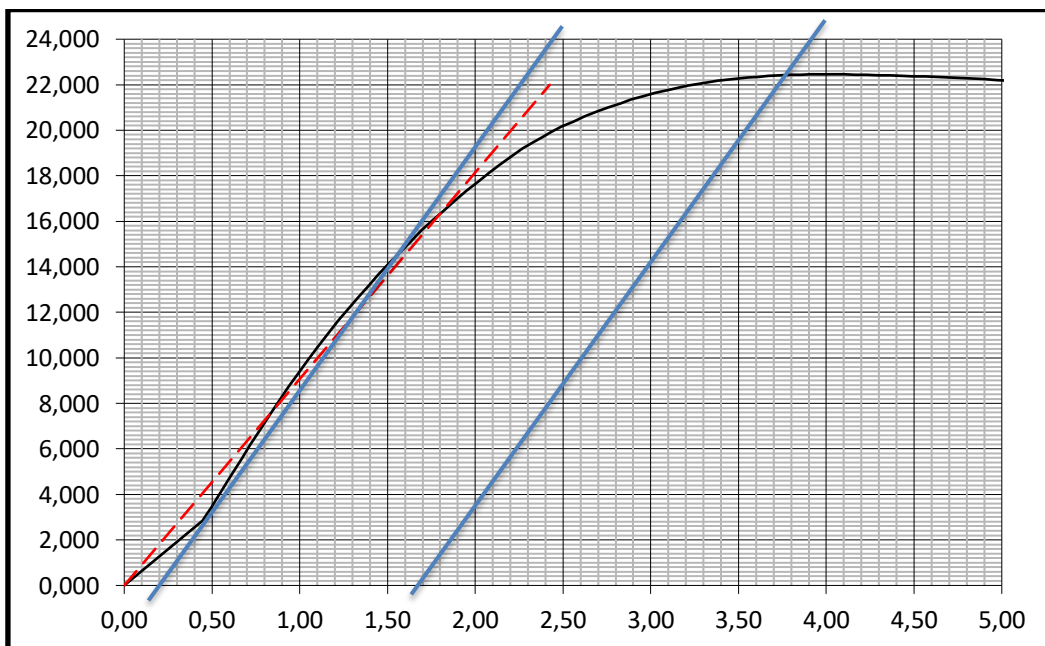


Figura 17. Gráfico 17. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,0%.

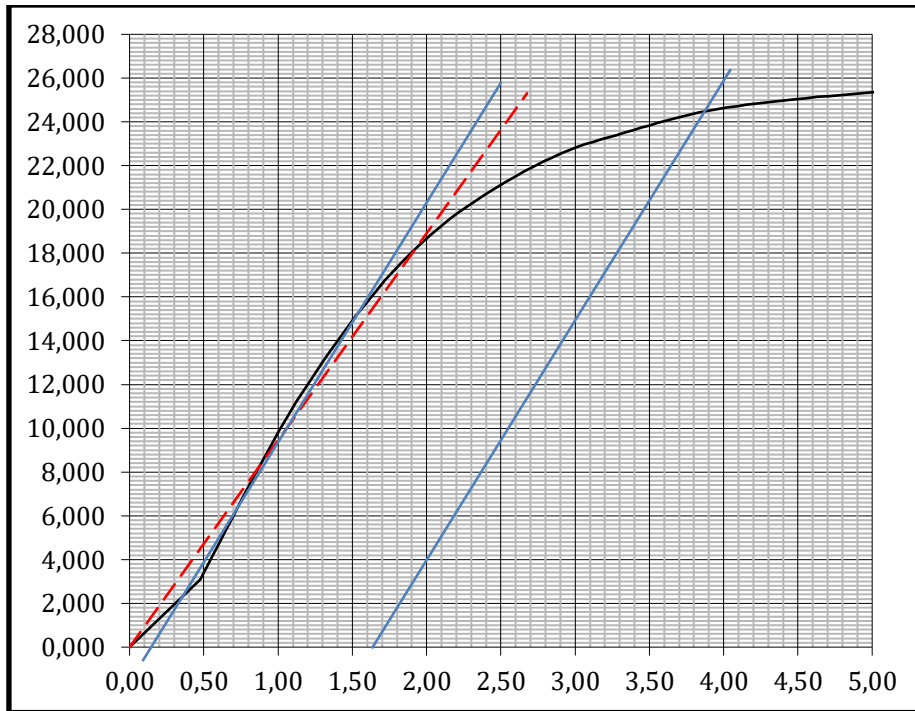


Figura 18. Gráfico 18. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,0%.

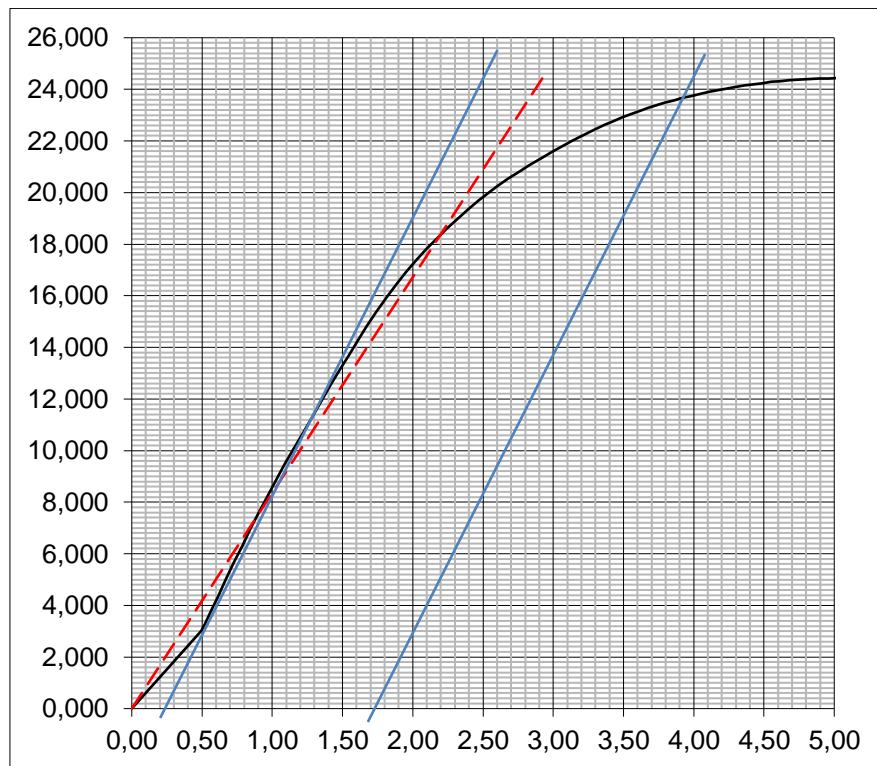


Figura 19. Gráfico 19. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,0%.

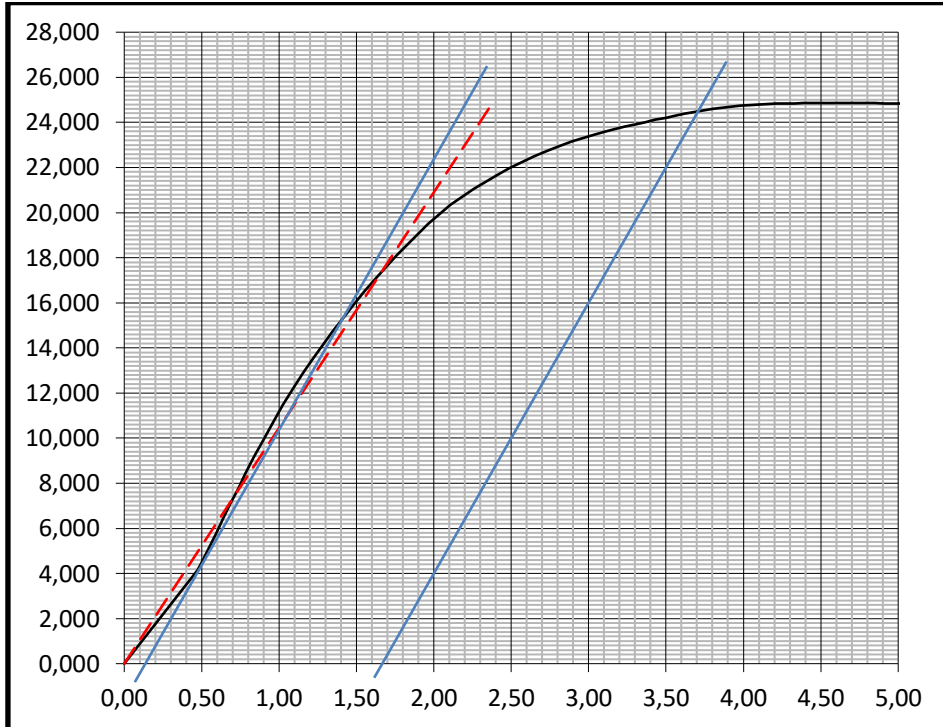


Figura 20. Gráfico 20. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,0%.

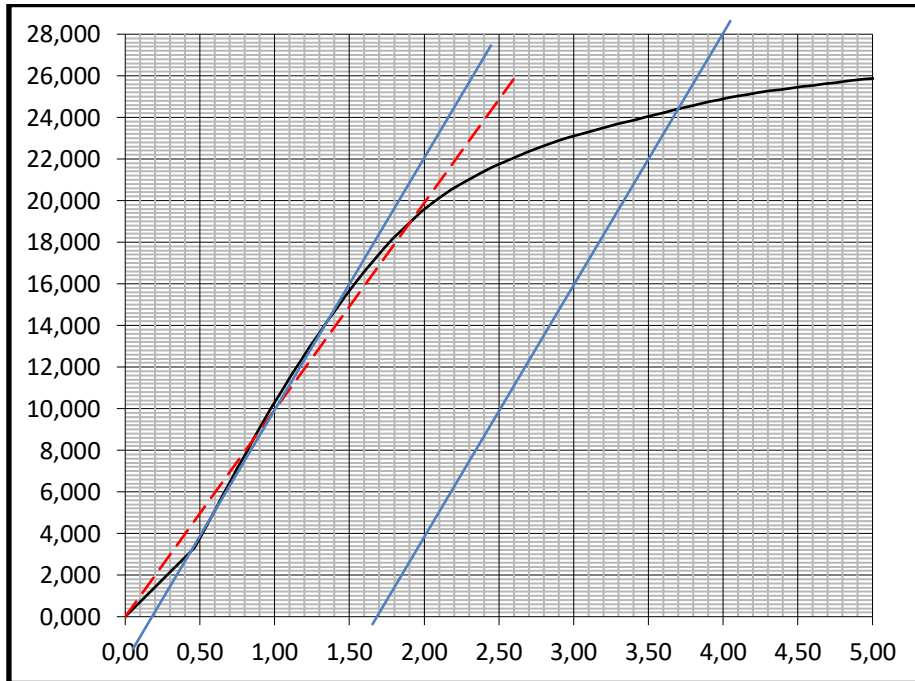


Figura 21. Gráfico 21. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,5%.

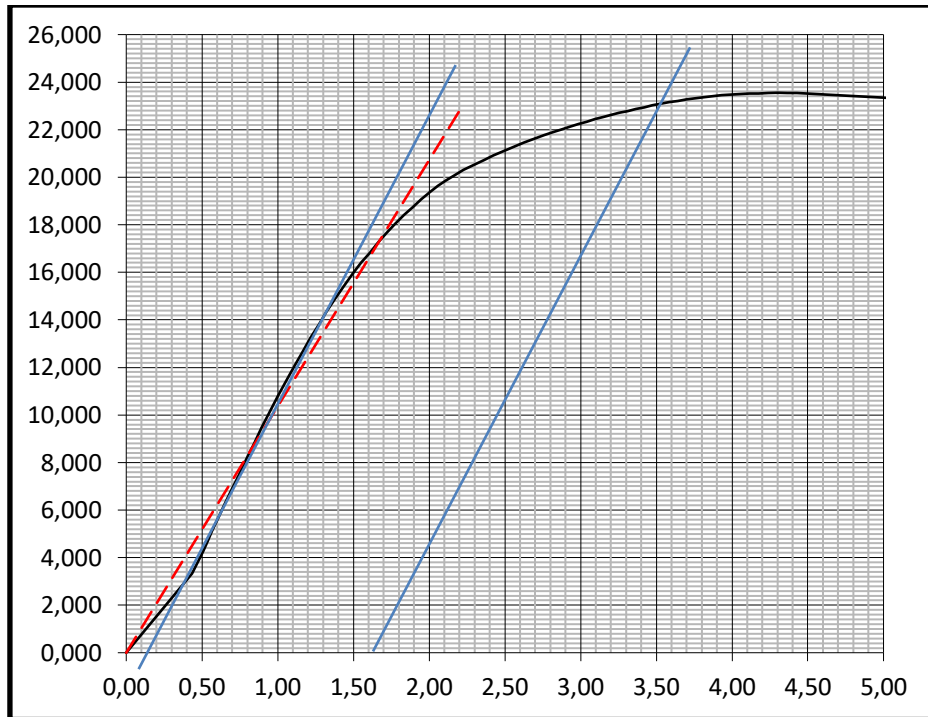


Figura 22. Gráfico 22. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,5%.

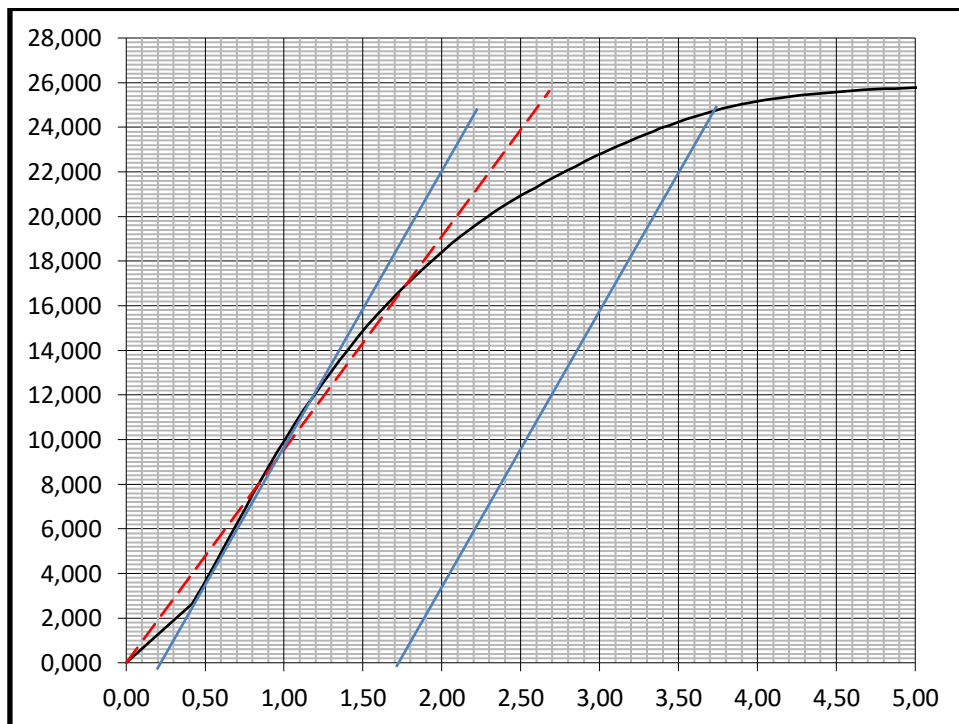


Figura 23. Gráfico 23. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,5%.

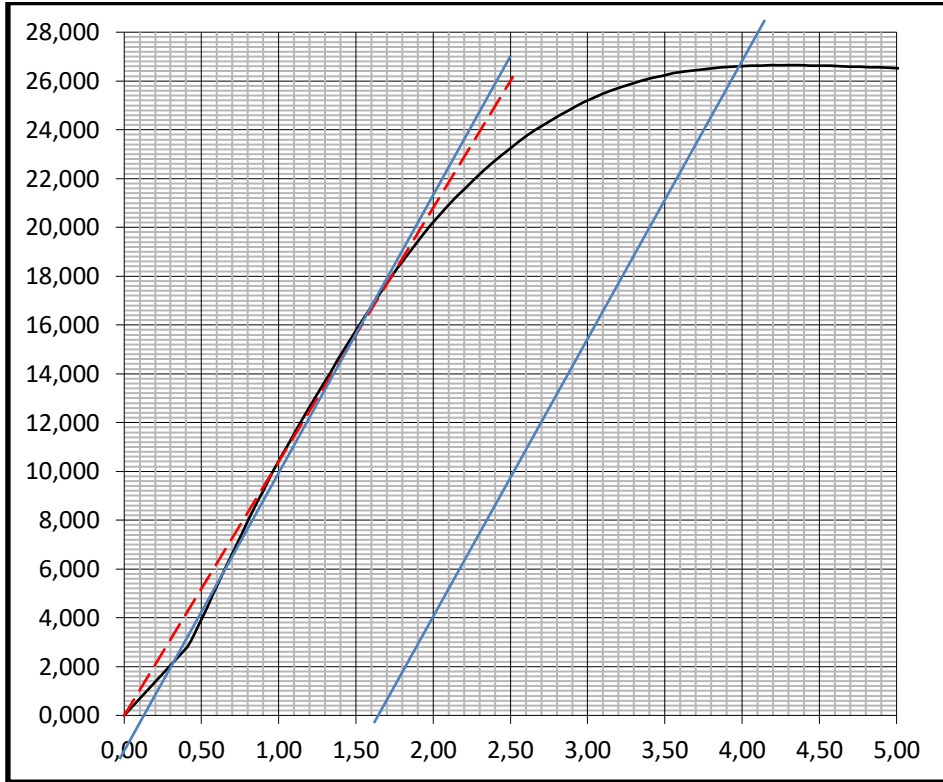


Figura 24. Gráfico 24. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,5%.

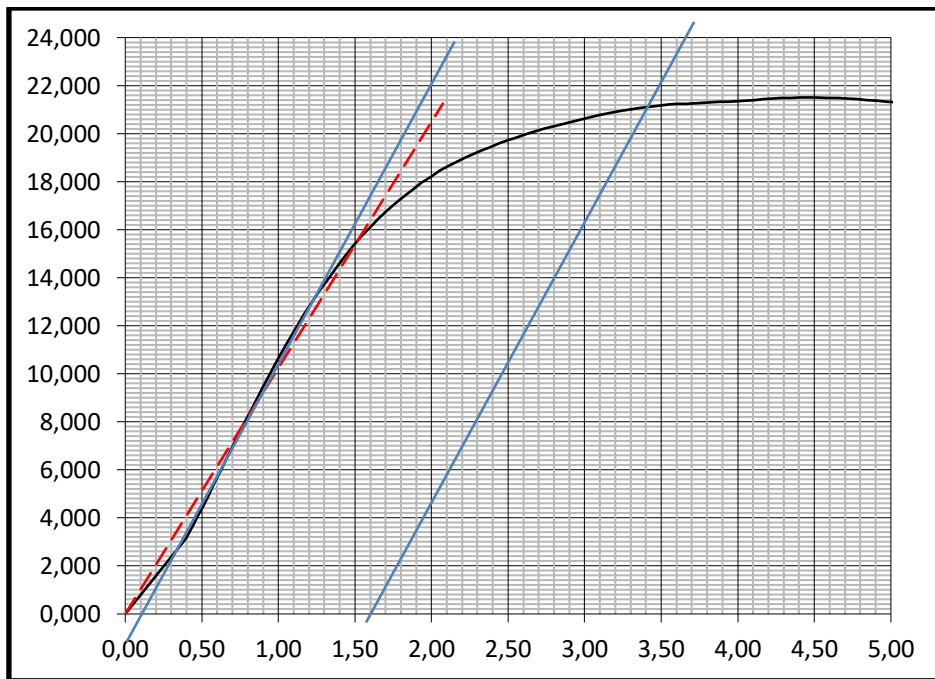


Figura 25. Gráfico 25. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,0%.

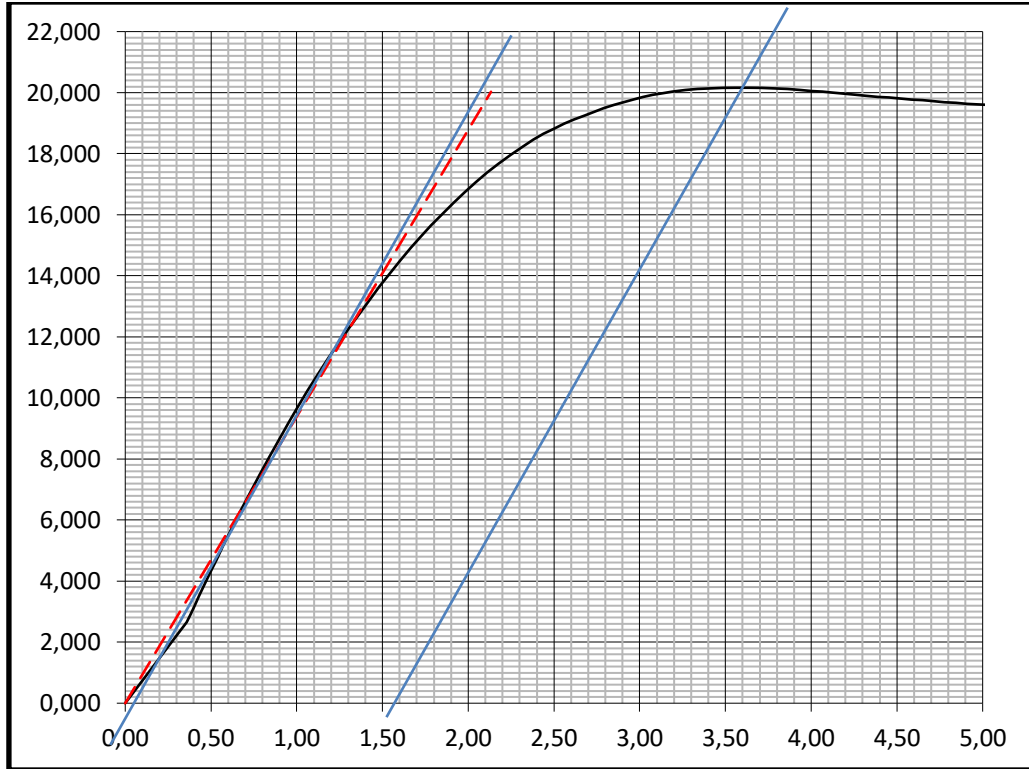


Figura 26. Gráfico 26. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,0%.

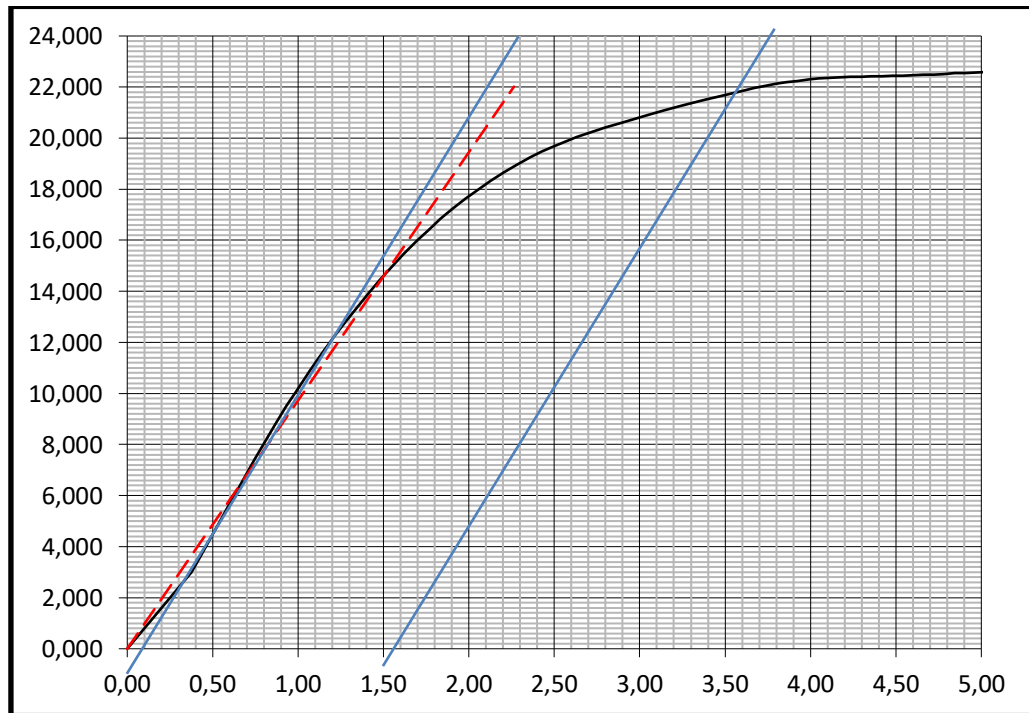


Figura 27. Gráfico 27. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,0%.

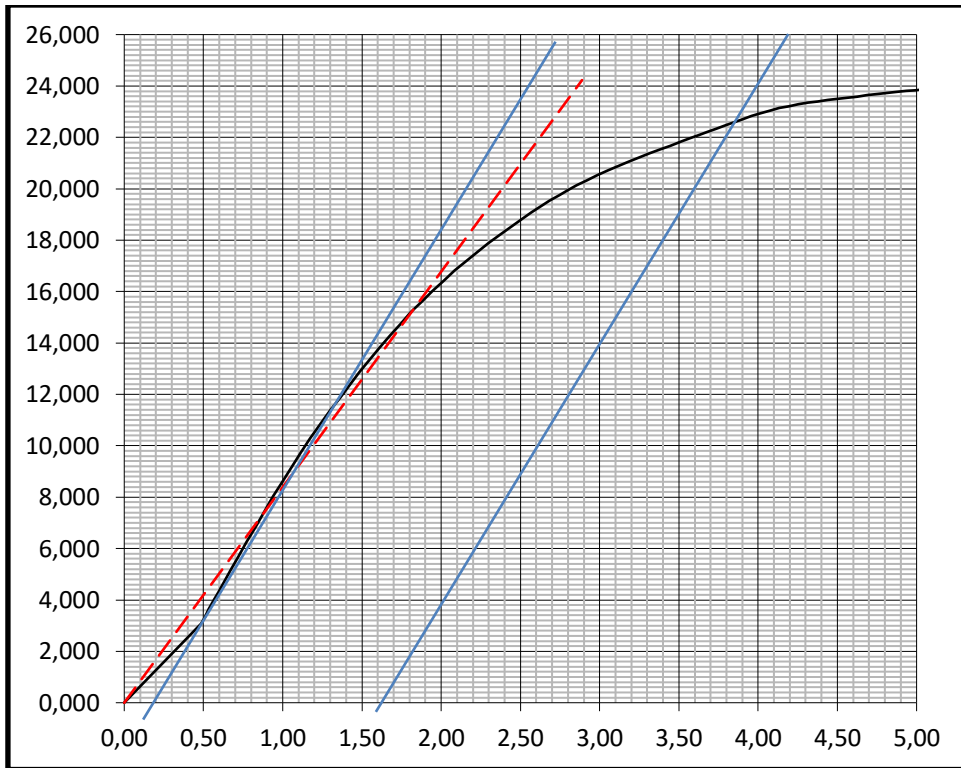


Figura 28. Gráfico 28. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,0%.

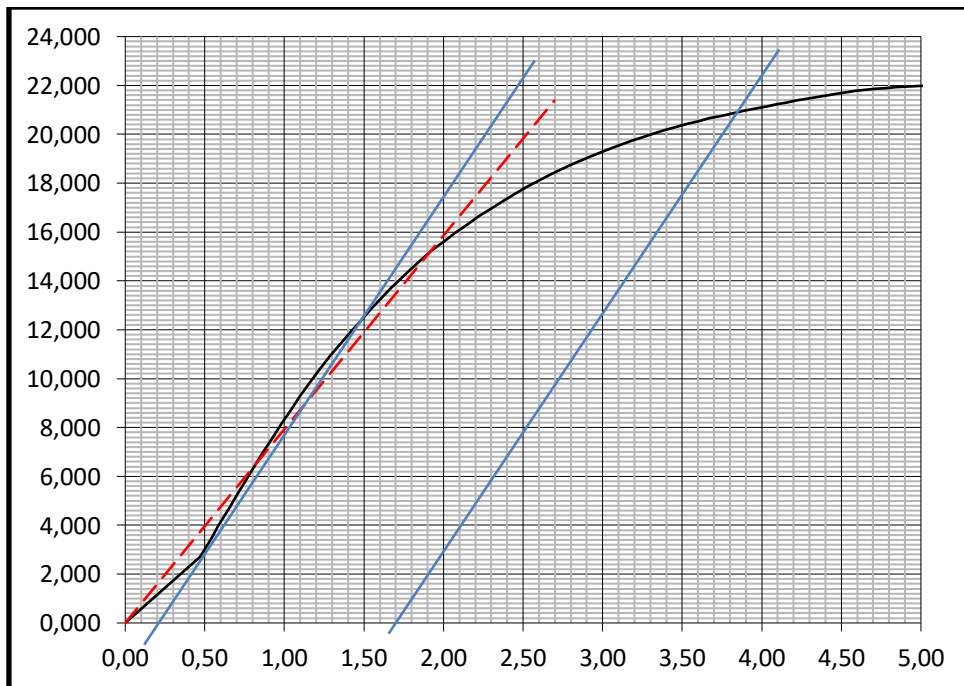


Figura 29. Gráfico 29. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,5%.

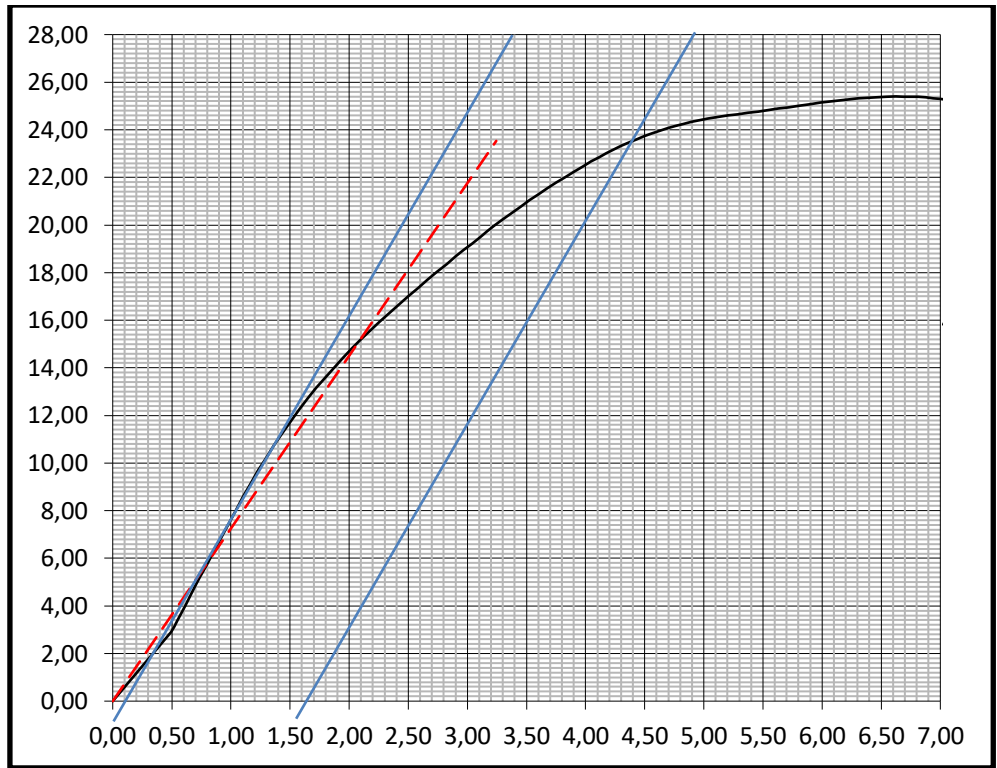


Figura 30. Gráfico 30. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,5%.

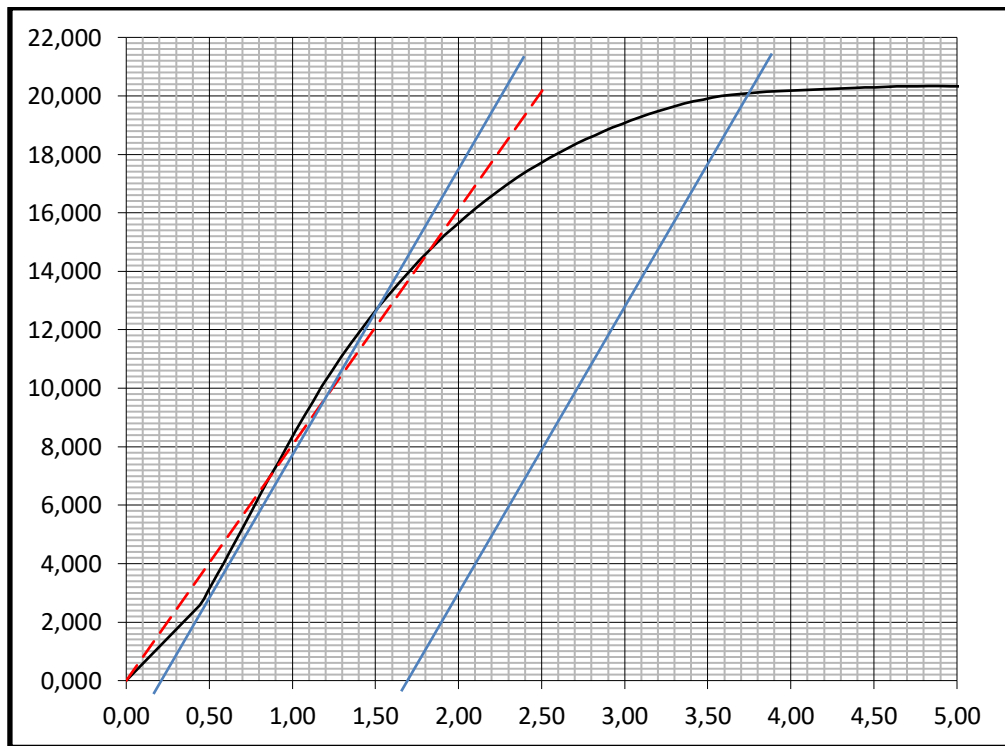


Figura 31. Gráfico 31. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,5%.

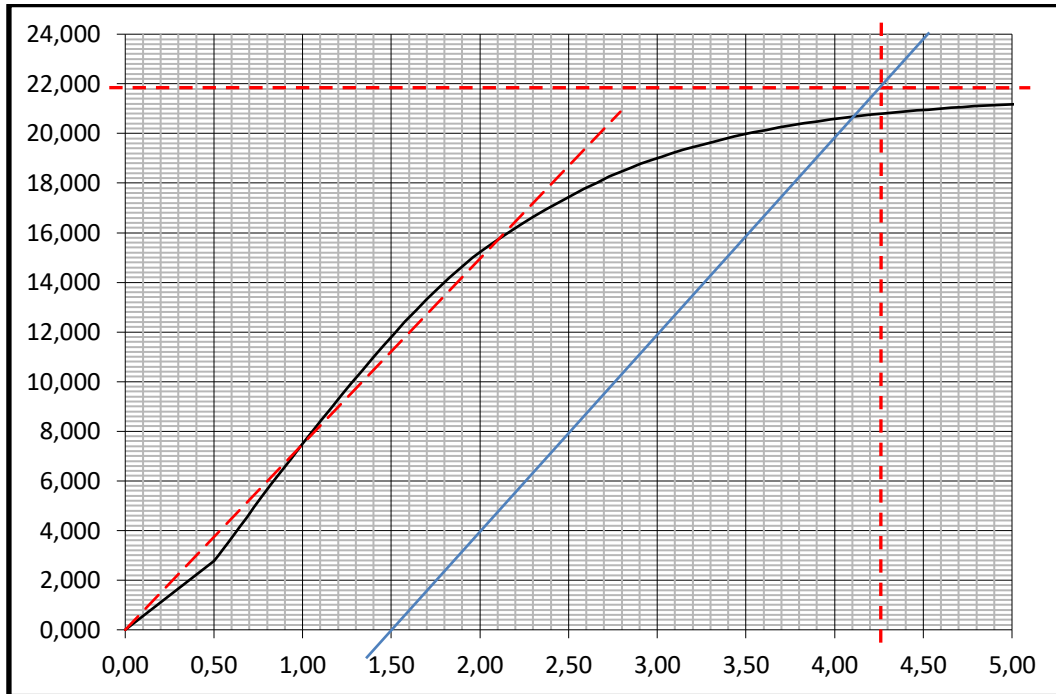


Figura 32. Gráfico 32. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,5%.

Diseño mezcla experimenta para un contenido de 45% de RAP.

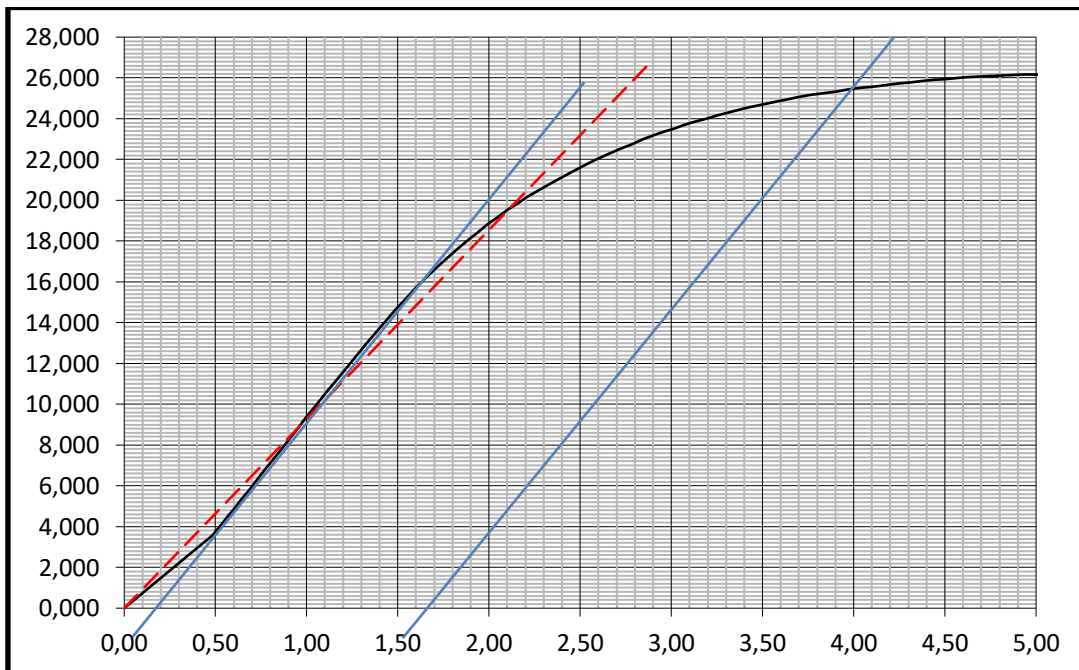


Figura 33. Gráfico 33. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,0%.

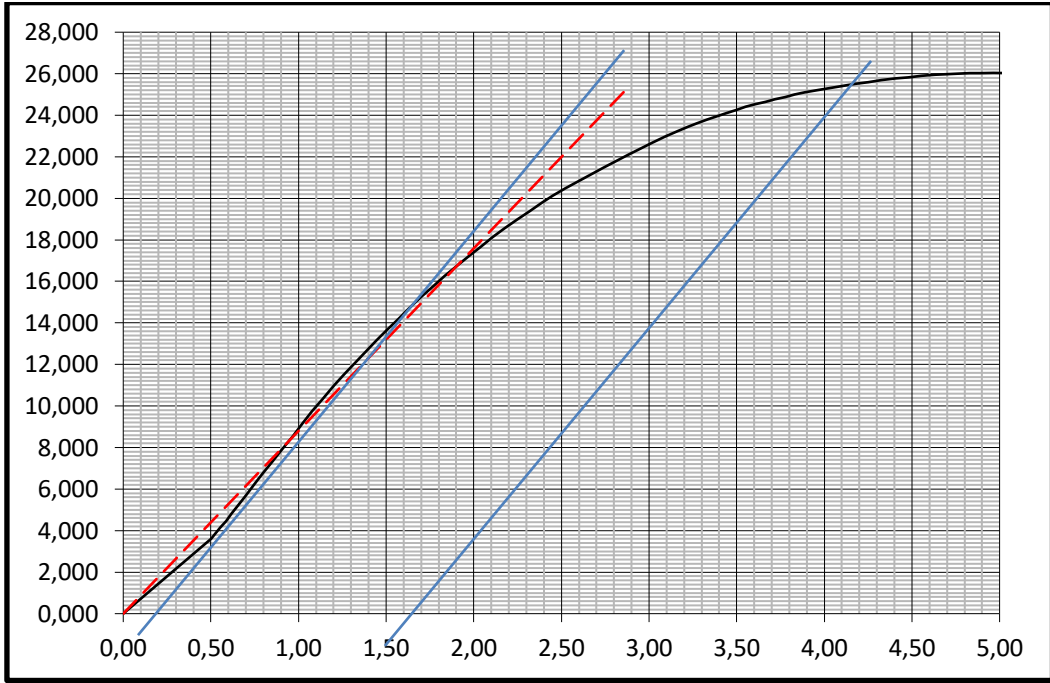


Figura 34. Gráfico 34. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,0%.

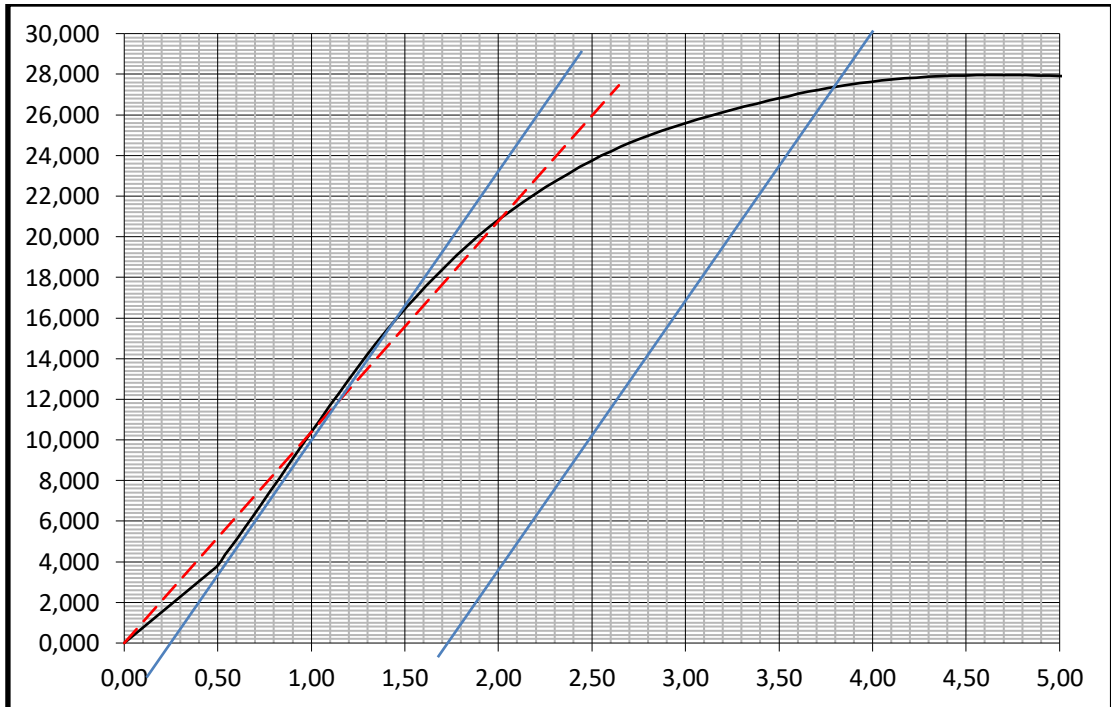


Figura 35. Gráfico 35. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,0%.

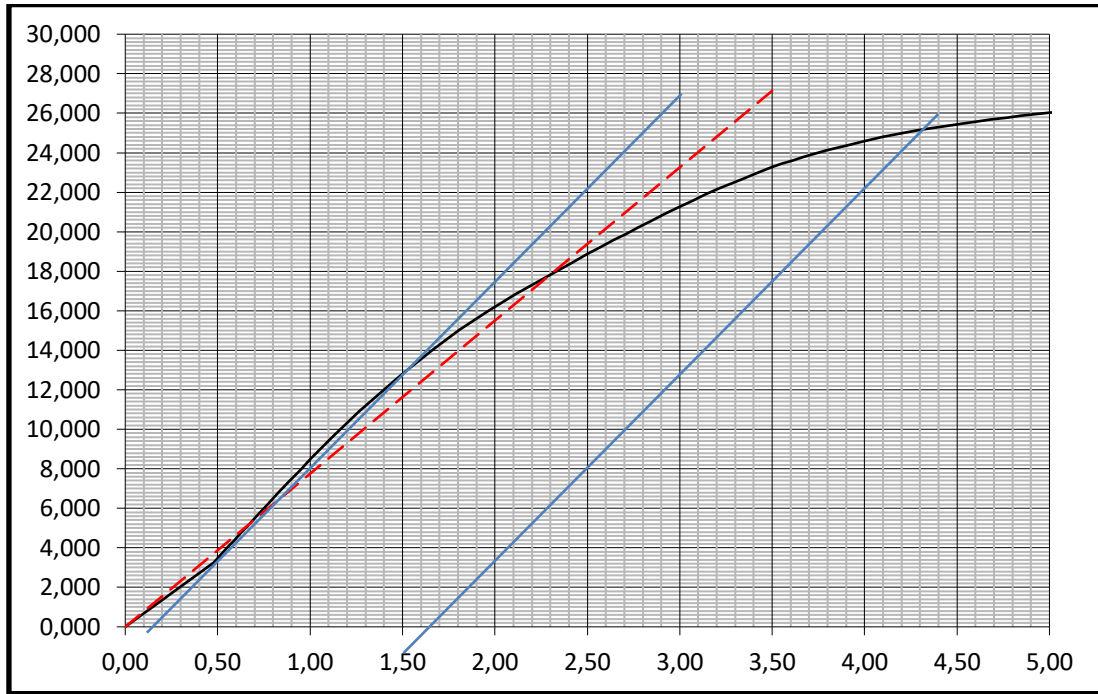


Figura 36. Gráfico 36. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,0%.

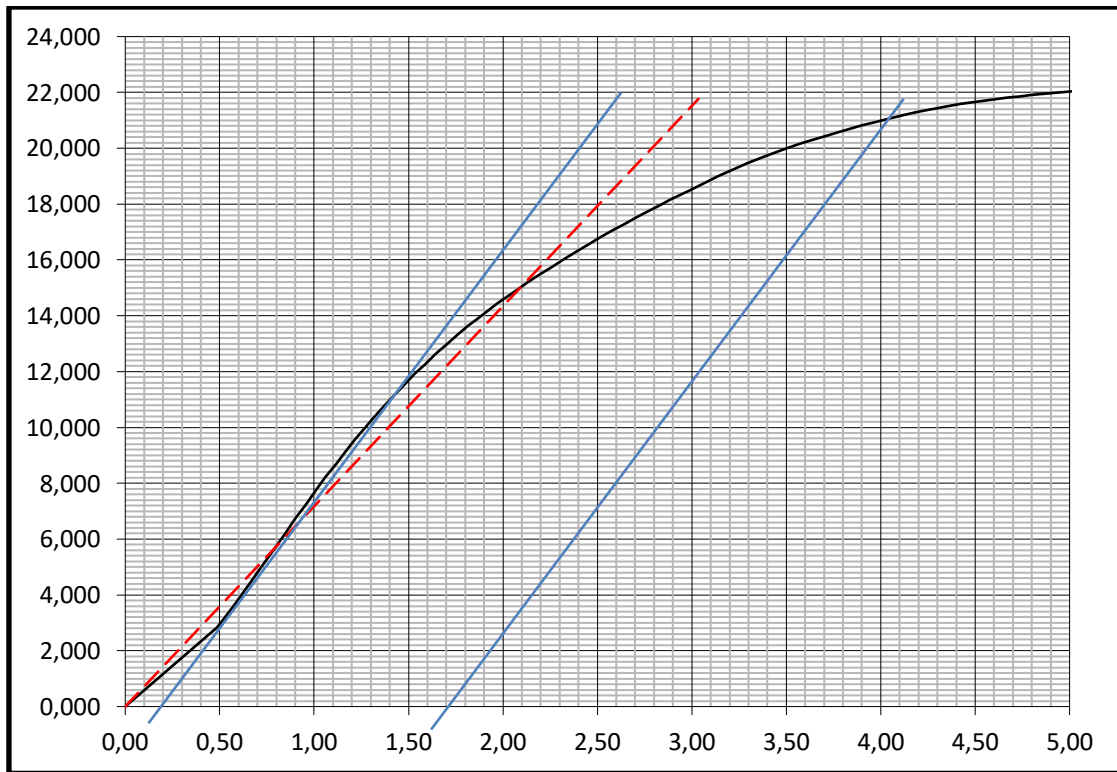


Figura 37. Gráfico 37. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,5%.

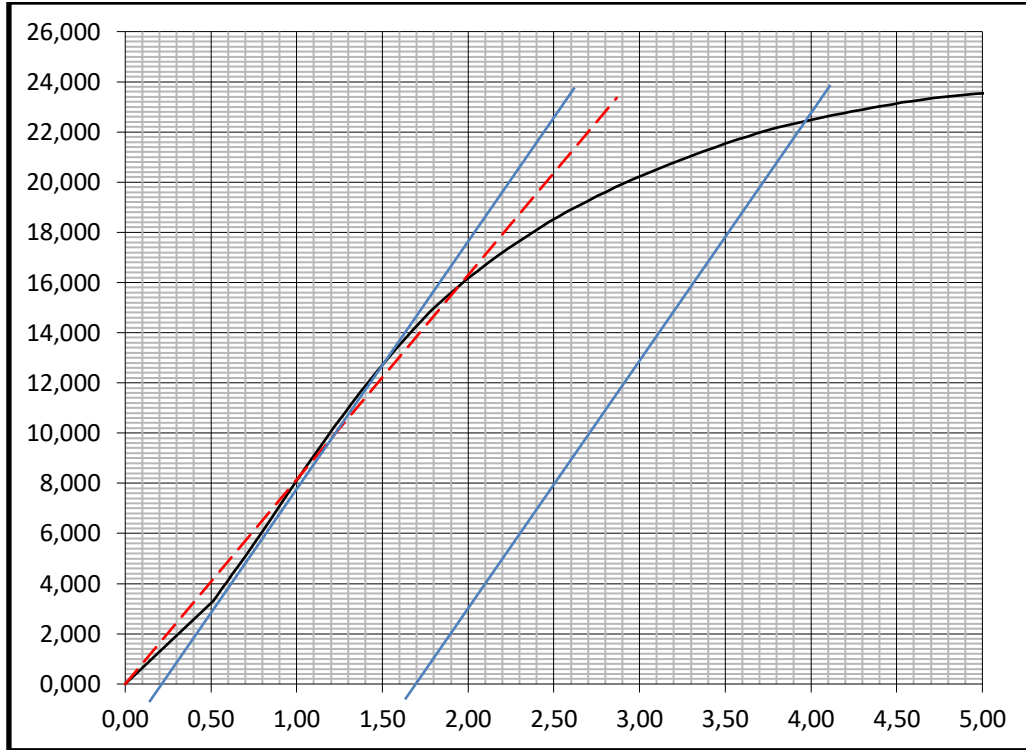


Figura 38. Gráfico 38. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,5%.

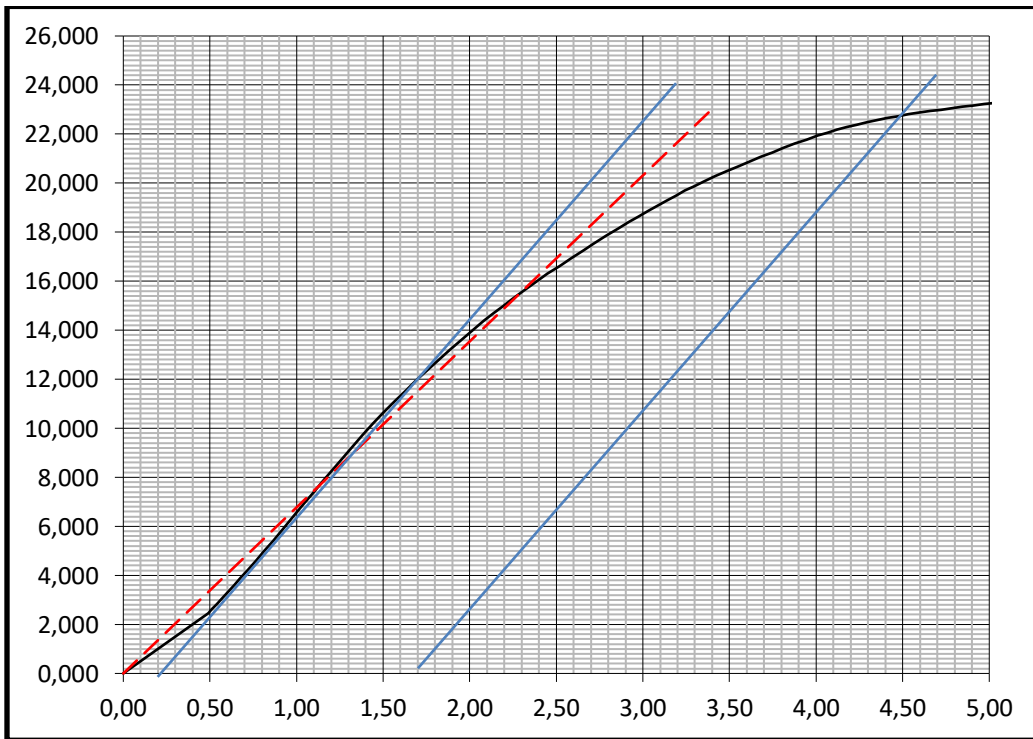


Figura 39. Gráfico 39. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,5%.

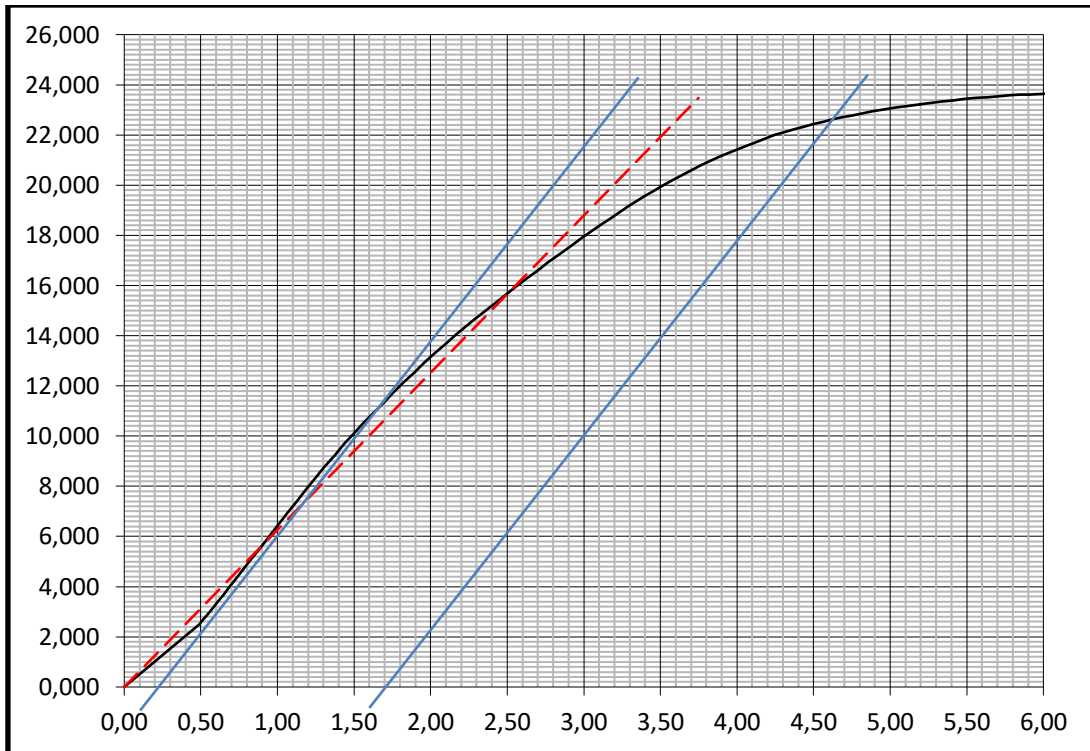


Figura 40. Gráfico 40. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 4,5%.

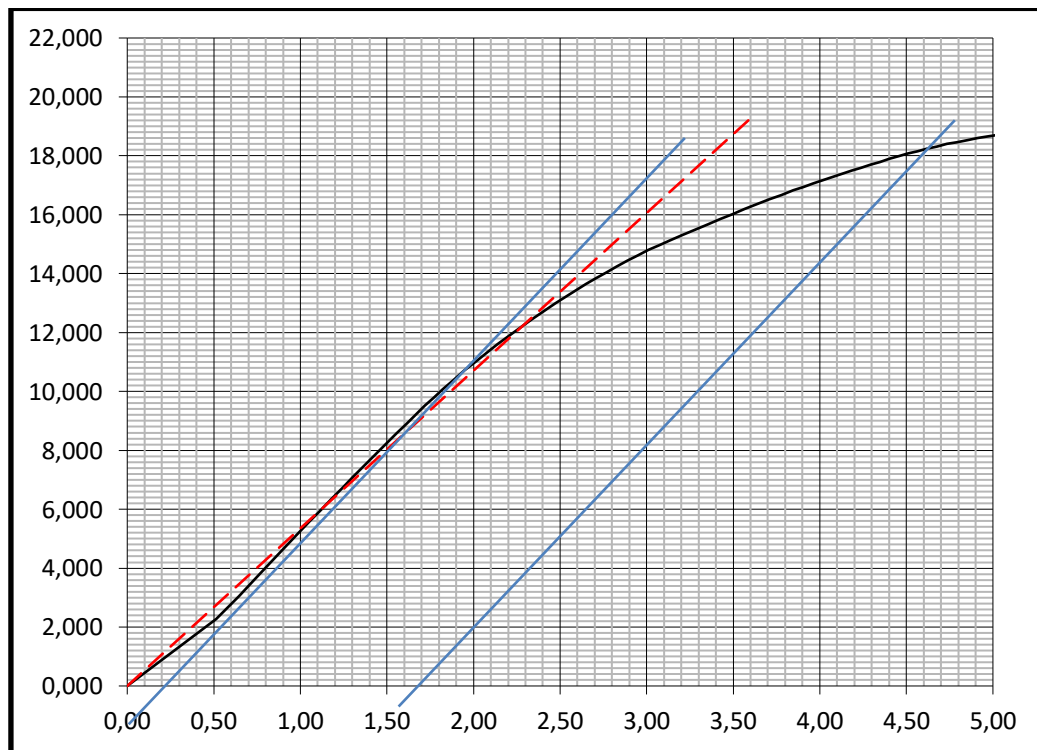


Figura 41. Gráfico 41. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,0%

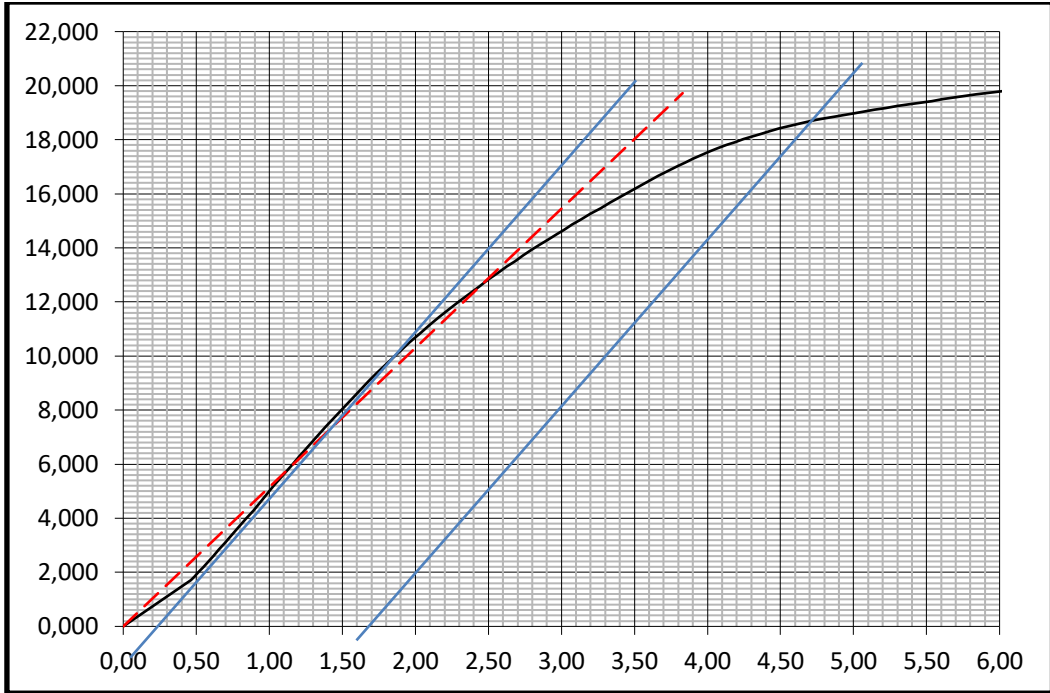


Figura 42. Gráfico 42. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,0%.

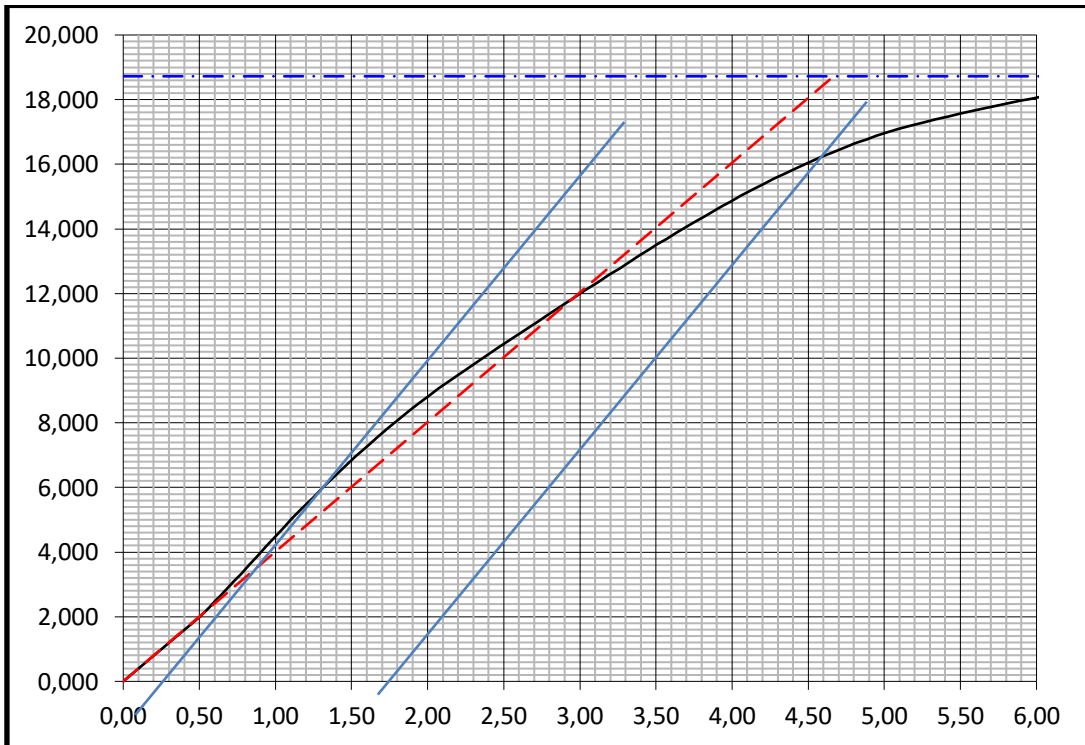


Figura 43. Gráfico 43. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,0%.

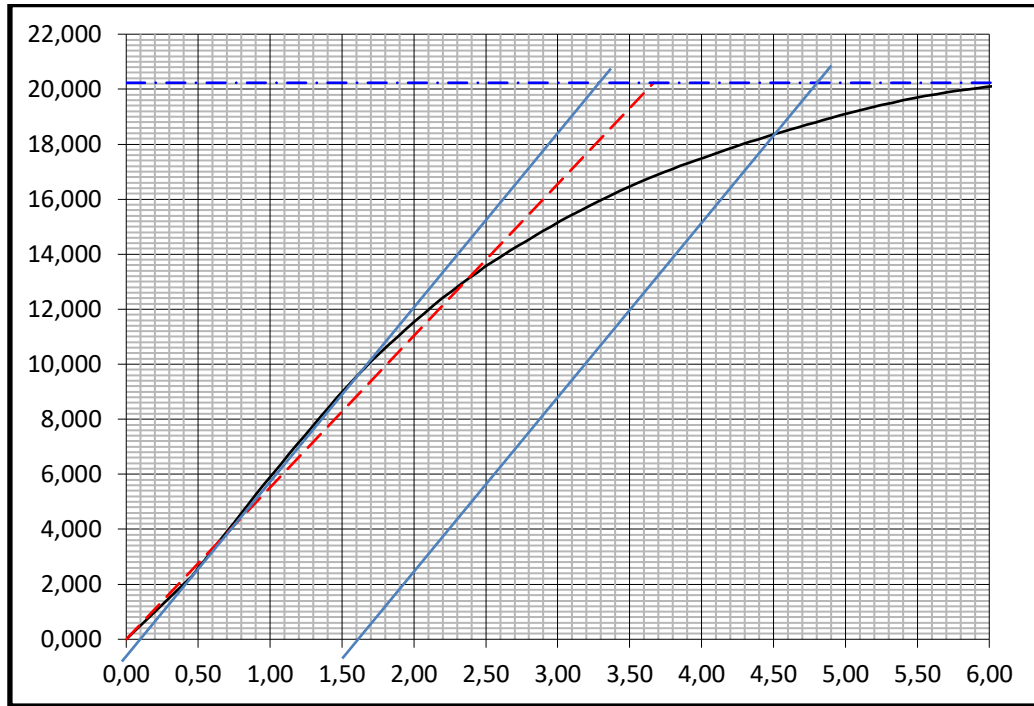


Figura 44. Gráfico 44. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,0%.

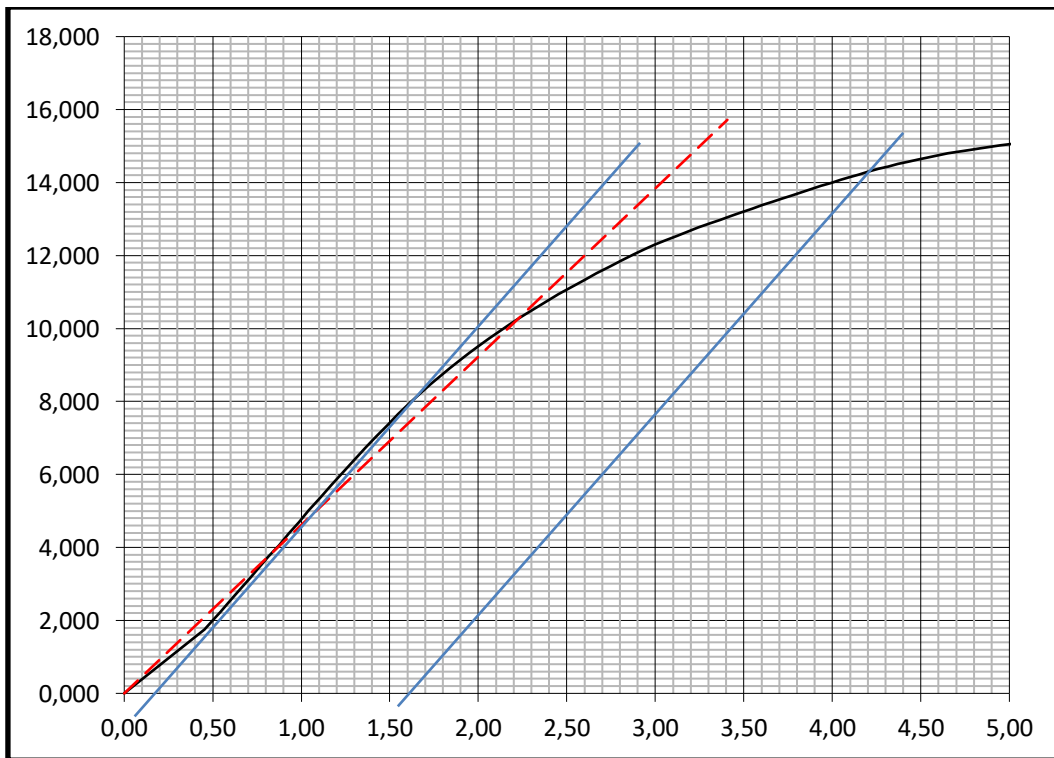


Figura 45. Gráfico 45. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,5%.

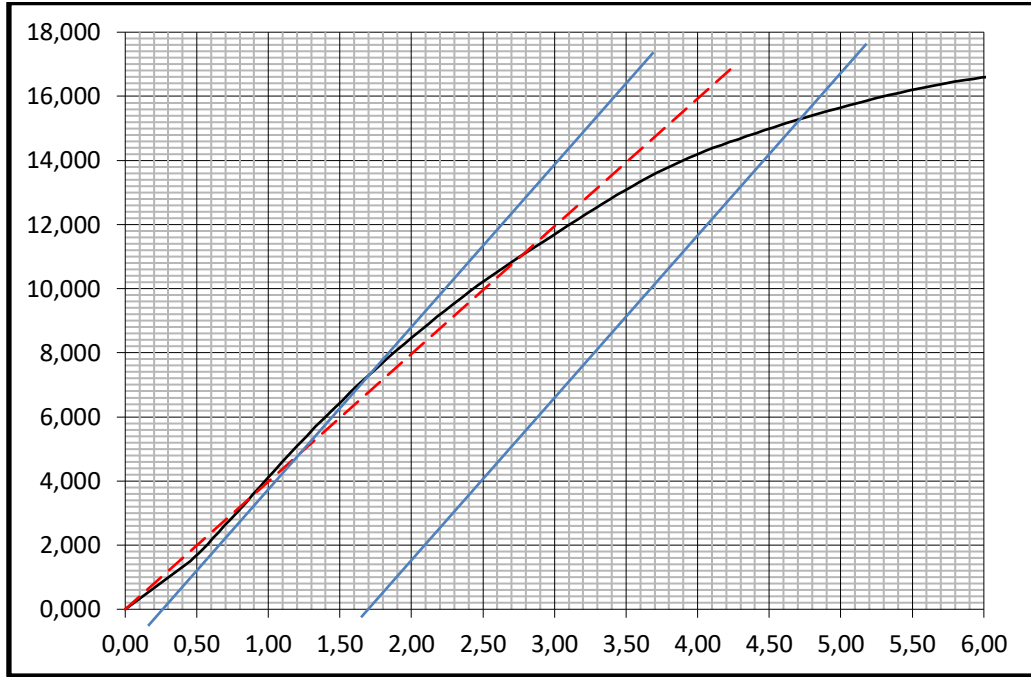


Figura 46. Gráfico 46. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,5%.

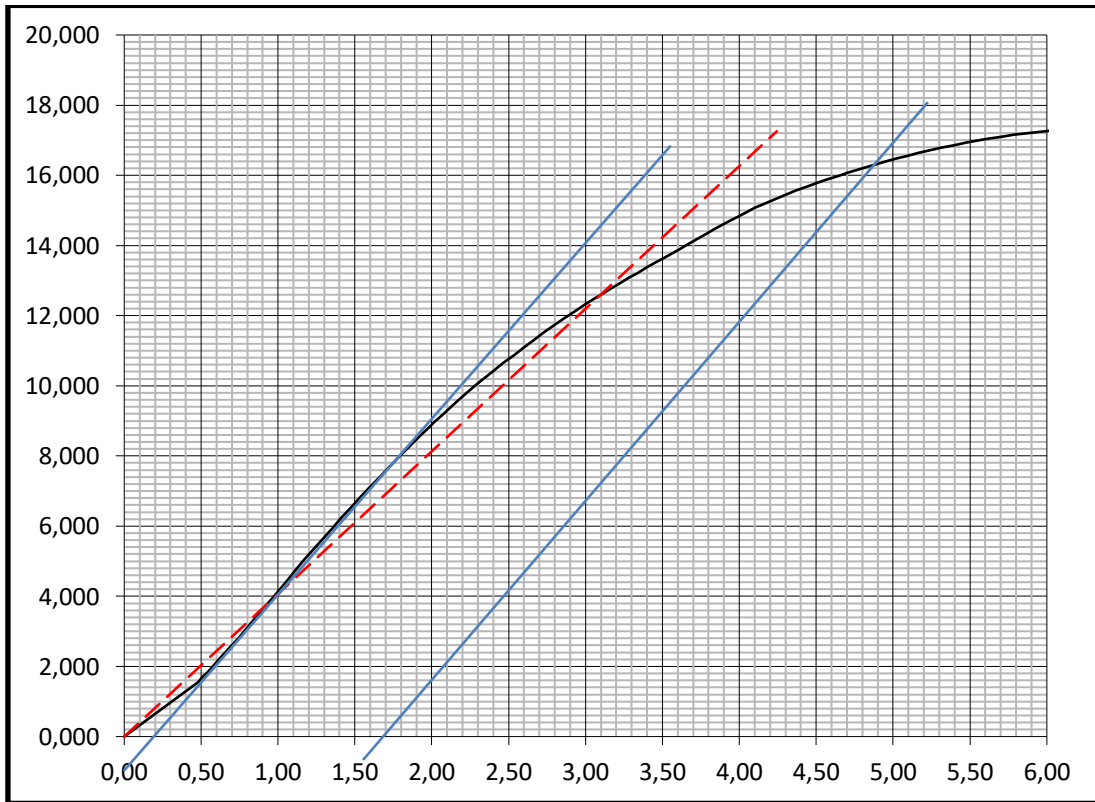


Figura 47. Gráfico 47. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,5%.

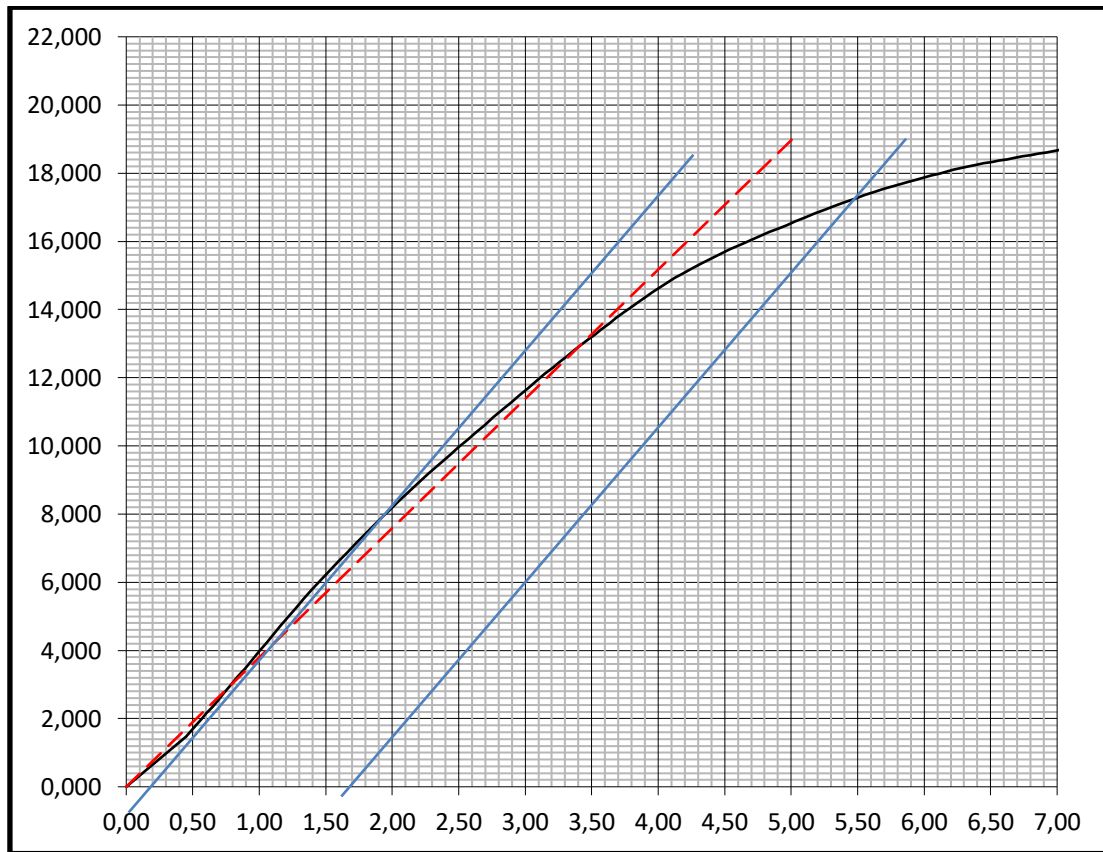


Figura 48. Gráfico 48. Valores de esfuerzo-deformación para un contenido de asfalto de 5,5%.

Anexos

- 1. Ficha técnica del asfalto AC-30.**
- 2. Ficha técnica de los agregados vírgenes**

ANEXO 1. Ficha técnica del asfalto AC-30.

RECOPE
Seguridad energética

Laboratorio Moín
Informe de Pruebas de Laboratorio
AS-08-06-008

No. 444M19

Rige a partir de
2013-06-12
Versión B

Solicitado por: Depto. Proceso
No. registro: 0654
Tipo de muestra: ASFALTO AC-30

Procedencia: Plantal Moín
Fecha Muestreo: 2019-02-03
Fecha de Recepción: 2019-02-03

Lote No.: A:(11)2019-0203-7511
Tanque No.: 7511
Volumen (en m³): 1 540,00

Método de ensayo (1)	Prueba	Resultado	Límites de especificación	Analista y fecha
**ISO 12145	Densidad a 15 °C	(1033,8 ± 1,5) kg/m ³	No Aplica	C.W.W. 2019-02-03
*ASTM D-92	Temperatura de inflamación	(354,0 ± 1,4) °C	Mínimo 232 °C	C.W.W. 2019-02-03
**ASTM D-2170	Viscosidad a 135 °C	(492 ± 47) mm ² /s	Mínimo 350 mm ² /s	RBS 2019-02-03
**ASTM D-2170	Viscosidad a 165 °C	(124 ± 13) mm ² /s	No aplica	F.W.J. 2019-01-24
*ASTM D-2171	Viscosidad a 60 °C	(280 ± 18) Pa s	(300 ± 60) Pa s	RBS 2019-02-03
*ASTM D-5	Penetración (a 25 °C, carga 100 g 5 s)	(56 ± 1,2) 1/10 mm	Mínimo 50 1/10 mm	RBS 2019-02-03
**ASTM D-2042	Solubilidad en triclorostileno expresado como fracción masa de asfalto	(99,8 ± 0,3) %	Mínimo 99,0 %	C.W.W. 2019-02-03
*ASTM D-1754	Cambio en fracción masa por efecto del calor y aire	(-0,18 ± 0,048) %	Máximo 1,0 %	RBS/POB 2019-02-04
**ASTM D-2171	Viscosidad post-pérdida 60 °C	(560 ± 50) Pa s	Máximo 1500 Pa s	F.O.B. 2019-02-04
**ASTM D-113	Ductilidad post-pérdida a 25 °C	(140 ± 20) cm	Mínimo 40 cm	WPM 2019-02-04
**Cálculo	Índice de Susceptibilidad Térmica, VTS	3,5 unidades	(3,3 a 3,9) unidades	RBS 2019-02-03
**Cálculo	Relación de Viscosidades Absolutas	2 unidades	Máximo 3 unidades	2019-02-03
*ASTM D4057	Manual de Muestreo para petróleo y Derivados	No Aplica	No Aplica	JCJ 2019-02-03

REGULACIÓN: RTCA 75.01.22-04, 26501-MEIC-MOPT, 30911-MEIC-MOPT, Tabla 1B, Decreto N° 32812-COMEX-MINAB-MEIC.O
Los resultados de los análisis efectuados cumplen con el Reglamento Técnico Centroamericano
OBSERVACIONES: *Ensayo acreditado bajo norma. **Ensayo no acreditado. Acreditación de acuerdo a la norma INTE-ISO/IEC 17025:2005. Ver alcance en www.eca.or.cr. Los valores de punto de inflamación son corregidos a 101,3 kPa. El plan de muestreo se ejecuta de acuerdo al "Instructivo para la recepción de muestras" AS-08-03-017. Resultado de Viscosidad a 165 °C fue tomado del informe 316M19.
Cálculo de temperaturas de trabajo

	Compacción	Mezcla
Máxima	149	161
Mínima	144	155

Las temperaturas se calcularon de acuerdo a ASTM 1558, se informan como referencia para aplicaciones en diseños de mezcla

RANDAL
CENTENO
DÍAZ (FIRMA)

Digitally signed by
RANDAL CENTENO
DÍAZ (FIRMA)
Date: 2019.02.04
06:46:01 -06'00'

Responsable Técnico: B.Q. Randal Centeno Díaz
Nombre

2019-02-04

Fecha finalización de análisis

Dirección: km 150 Pista 32 San José, Moín Limón

Los resultados de los análisis no podrán ser reproducidos parcialmente sin previa autorización del laboratorio
Se informa la disponibilidad expandida, con un factor de cobertura 90% para un 95% de confianza

Original Solicitante
Apartado: 1315-Limon

Copie: Laboratorio, Departamento Control de Calidad

Tel/Fax: (506) 2650-5737

e-mail: CalCenter.Recope@recope.gu.gt

RECOPE
Departamento de Facturación - Moín
* 04 FEB. 2019 *
RECIBIDO

Página 1 de 1

ANEXO 2. Ficha técnica de los agregados vírgenes

- **Quintilla**

LC-004-19	Peso Volumétrico (AG-04/AG-05)	Suelto	1413 kg/m ³ *
		Envarillado	1528 kg/m ³ *
	Gravedad Especifica Bruta Seca (Gbs)(AG-09/AG-10)	2,633	
	Gravedad Especifica Saturada Seca (Gsss)(AG-09/AG-10)	2,687	
	% de Absorción (AG-09/AG-10)	1,96 %	
	Abrasión en máquina Los Ángeles (AG-06)	18,6 %	
	Partículas Friables y Arcillosas (AG-03)	0,30 %	
	Método normalizado de ensayo para Residuos Insolubles en Agregados Carbonatados (AG-21)	100 %	
	Índice de durabilidad (AG-14)	93 %	
	Sanidad con Sulfato de Sodio (AG-08)	2,70 %	
	Caras fracturadas (AG-12)	Al menos una cara fracturada	100 %
		Más de una cara fracturada	100 %
	Partículas Planas y Elongadas (AG-11)	Método "A" Relación 3:1	
		% Partículas Planas	2,4 %
% Partículas Elongadas		0,1 %	
% Partículas ni Planas ni Elongadas		97,5 %	
Método "B" Relación 3:1			
% Partículas Planas y Elongadas		0,0 %	
% Partículas ni Planas ni Elongadas		100 %	

- Cuartilla

LC-004-19	Peso Volumétrico (AG-04/AG-05)	Suelto	1410 kg/m ³ *
		Envarillado	1547 kg/m ³ *
	Gravedad Especifica Bruta Seca (Gbs)(AG-09/AG-10)	2,658	
	Gravedad Especifica Saturada Seca (Gsss)(AG-09/AG-10)	2,687	
	% de Absorción (AG-09/AG-10)	1,96 %	
	Abrasión en máquina Los Ángeles (AG-06)	19,0 %	
	Partículas Friables y Arcillosas (AG-03)	0,30 %	
	Método normalizado de ensayo para Residuos Insolubles en Agregados Carbonatados (AG-21)	100 %	
	Índice de durabilidad (AG-14)	93 %	
	Sanidad con Sulfato de Sodio (AG-08)	2,70 %	
	Caras fracturadas (AG-12)	Al menos una cara fracturada 100 %	
		Más de una cara fracturada 100 %	
	Partículas Planas y Elongadas (AG-11)	Método "A" Relación 3:1	
		% Partículas Planas	1,2 %
		% Partículas Elongadas	0,0 %
% Partículas ni Planas ni Elongadas		98,8 %	
Método "B" Relación 3:1			
% Partículas Planas y Elongadas		0,0 %	
% Partículas ni Planas ni Elongadas		100 %	

- **Polvo de Piedra**

LC-004+-19	Peso Volumétrico (AG-04/AG-05)	Suelto	1617 kg/m ³ *
		Envarillado	1804 kg/m ³ *
	Gravedad Especifica Bruta Seca (Gbs)(AG-09/AG-10)	2,675	
	Gravedad Especifica Saturada Seca (Gsss)(AG-09/AG-10)	1,71	
	% de Absorción (AG-09/AG-10)	1,75 %	
	Equivalente de Arena (AG-13)	72 %	
	Colorimetria (AG-17)	Color más claro que patrón #1	
	Índice de durabilidad (AG-14)	87 %	
	Contenido de vacíos en agregado fino no compactado (AG-16)	48,3 %	
	Sanidad con Sulfato de Sodio (AG-08)	3,6 %	
	Abrasión en máquina Los Ángeles (AG-06)	25,6 %	
	Particulas Friables y Arcillosas (AG-03)	0,4%	