

EVALUACIÓN A LA FATIGA DE CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO CON
RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN



JEISON CUEVAS CAMACHO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2021

EVALUACIÓN A LA FATIGA DE CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO CON
RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

JEISON CUEVAS CAMACHO

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional de ingeniero
civil

Aprobado por:

Ing. JUAN MANUEL SALGADO DÍAZ.

Especialista en Vías

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2021

Autoridades académicas

P. José Gabriel MESA ANGULO, O. P.
Rector General

P. Eduardo GONZÁLES GIL, O. P.
Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O. P.
Rector sede Villavicencio

P. Rodrigo GARCÍA JARA, O. P.
Vicerrector Académico sede Villavicencio

Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBÓN
Secretaria de División sede Villavicencio

Ing. Manuel Eduardo HERRERA PABÓN
Decano Facultad de Ingeniería civil

Agradecimientos

Agradezco en primera medida a mi familia por brindarme su tiempo y apoyo durante todo este proceso, desde el comienzo hasta el final, en segundo lugar, a mis compañeros estudiantes por la ayuda y acompañamiento prestado en el momento que fue requerido y finalmente pero no menos importante, a los ingenieros Jessica María Ramírez Cuello, Juan Manuel Salgado Díaz y Emiro Andrés Lozano Pérez, quienes me acompañaron y guiaron de forma voluntaria durante el proceso de desarrollo del proyecto.

Resumen

A principios de este siglo, la formación de residuos de construcción y de demolición, también conocido por sus siglas como RCD; ha aumentado considerablemente en todo el mundo. Debido a la falta de un plan de manejo ambiental adecuado, en muchos casos terminaron ingresando sin control a un relleno sanitario. Esto tiene un impacto negativo en el medio ambiente y pone en peligro la seguridad de los residentes aledaños a estos rellenos y sus propiedades.

El propósito de este trabajo es evaluar el comportamiento en laboratorio de la vida a fatiga del concreto asfáltico elaborado con diferentes proporciones de RCD. Por este motivo, se llevó a cabo una prueba de flexión de cuatro puntos con base a los establecimientos de la norma AASHTO T 321. Los resultados de estas pruebas se analizaron de forma tradicional (rigidez deteriorada) y utilizando el factor de cambio de Energía Disipada (RDEC). De manera consecuente, este trabajo estima el límite de endurecimiento (límite de fatiga) de todos los concretos asfálticos ensayados a fatiga.

Palabras Clave: Concreto, construcción, demolición, evaluar, fatiga, residuos.

Abstract

At the beginning of this century, the formation of construction and demolition waste, also known by its acronym as RCD; it has increased considerably around the world. Due to the lack of an adequate environmental management plan, in many cases they ended up entering a sanitary landfill without control. This has a negative impact on the environment and endangers the safety of the residents surrounding these landfills and their properties.

The purpose of this work is to evaluate the laboratory behavior of the fatigue life of asphalt concrete made with different proportions of RCD. For this reason, a four-point bending test was carried out based on the establishments of the AASHTO T 321 standard. The results of these tests were analyzed in a traditional way (deteriorated stiffness) and using the Dissipated Energy change factor. (RDEC). Consequently, this work estimates the hardening limit (fatigue limit) of all fatigue-tested asphalt concretes.

Keywords: Concrete, construction, demolition, evaluate, fatigue, waste.

Tabla de contenido

Resumen.....	6
Abstract.....	7
Introducción	12
1. Formulación del Problema.....	14
2. Objetivos.....	16
2.1. Objetivo general	16
2.2. Objetivos específicos.....	16
3. Justificación	17
4. Estado del Arte.....	18
4.1. Caracterización de materiales	18
4.1.1 Pruebas	20
4.1.2. El efecto de la mezcla en dos fases sobre las propiedades funcionales y mecánicas del concreto asfáltico poroso modificado con TPS / SBS	20
4.1.3 Conclusiones	20
4.2. Residuos de construcción y demolición (RCD)	21
5. Metodología	24
5.1. Etapa 1: Selección de las muestras	24
5.2 Etapa 2: Diseño de la mezcla	24
5.3 Etapa 3: Ensayos de laboratorio	24
5.3.1. Ensayo de Granulometría.....	24
5.3.2 Diseño de mezcla asfáltica.....	25
5.3.3 Ensayo de fatiga por flexión en cuatro puntos.....	25
5.4 Etapa 4: Resultados y conclusiones	25
6. Desarrollo.....	27
6.1 Granulometría.....	29
6.2 Diseño de la mezcla asfáltica	30
6.3. Elaboración de especímenes	31
6.4. Evaluación a fatiga por flexión del concreto asfáltico.....	32

6.4.1	Evaluación a la fatiga.....	32
6.4.2	Evaluación a fatiga bajo el enfoque de energía	33
6.4.3	Evaluación a fatiga bajo en enfoque de la rigidez	36
6.4.4	Ensayo de fatiga por flexión en cuatro puntos.....	36
6.4.5	Límite de endurecimiento a fatiga.	38
6	Resultados e impacto	46
7	Conclusiones	47
8	Referencias.....	48

Lista de tablas

Tabla 1. Propiedades físicas del cemento.	18
Tabla 2. Propiedades físicas del agregado fino.....	19
Tabla 3. Propiedades físicas del agregado grueso.	19
Tabla 4. Metodología.....	26
Tabla 5. Ficha técnica del cemento asfáltico.	27
Tabla 6. Resultados de pruebas de los agregados gruesos.....	28
Tabla 7. Resultados de pruebas de agregados de RCD.....	28
Tabla 8. Nivel 2 de compactación.....	31
Tabla 9. Relaciones volumétricas basadas en las especificaciones del instituto de asfalto.....	31
Tabla 10. Resultados AASHTO pruebas de control.	39
Tabla 11. Resultado de pruebas bajo el enfoque AASHTO.	40
Tabla 12. Resultados Carpenter pruebas de control enfoque de energía.	40
Tabla 13. Resultado de pruebas bajo el enfoque de energía, Método Carpenter.....	41
Tabla 14. Resultados.....	46
Tabla 15. Impactos.....	46

Lista de figuras

Figura 1. Tamizado de los agregados basálticos y RCD.	27
Figura 2. Tamizado de los agregados basálticos.	28
Figura 3. Preparación del material para el ensayo de desgaste de los ángeles.	29
Figura 4. y resultado ensayo de desgaste de los ángeles.	29
Figura 5. Granulometría.	30
Figura 6. Compactación en el rodillo liso.	32
Figura 7. Curva de esfuerzo-deformación (bucles de histéresis).	33
Figura 8. Ejemplo típico de RDEC versus ciclos de carga.	35
Figura 9. Energía disipada vs ciclos de carga.	36
Figura 10. Máquina de ensayos de 4 puntos.	37
Figura 11. Espécimen prismático con 5% de RCD.	41
Figura 12. Enfoque a fatiga por energía por el método AASHTO.	42
Figura 13. Enfoque a fatiga por energía por el método Carpenter.	42
Figura 14. Método AASHTO (F.E.L).	43
Figura 15. Método Carpenter (F.E.L).	44
Figura 16. Relación entre el valor PV y el nivel de deformación.	45

Introducción

El crecimiento de la población y la industrialización han generado una enorme cantidad de desechos en todo el mundo, dichos desechos producidos por la edificación de diversas estructuras, obras de viviendas y demás infraestructura que propician el desarrollo económico y social de sus habitantes. Así mismo en las zonas urbanas se generan grandes cantidades de volúmenes de residuos de construcción y demolición, que causan un grave daño al medio ambiente por la falta de sitios para la disposición y también por la falta de planificación para una adecuada gestión final.

Anualmente en Colombia se producen más de 22 millones de toneladas en residuos de construcción, según un estimativo llevado a cabo en grandes ciudades como Bogotá, Medellín y Cali. Desde el 2017 el ministerio de ambiente busca que los grandes generadores de residuos de construcción reutilicen un porcentaje no inferior al 2% del peso total de los materiales usados en obra, incrementándolo en un 2% cada año con respecto al anterior, con el fin de alcanzar un mínimo del 30%, con objeto promover la conciencia ambiental (Ministerio de Ambiente y desarrollo, 2017).

Ante esta situación puede decirse que reutilizar materiales tales como los agregados de concreto reciclado (RCD) se convierte en algo no solo innovador, sino necesario a fin de mitigar los daños ambientales al tiempo en que se aumenta la economía, se genera empleo y se reducen costos en la construcción de infraestructura. Dentro de sus aplicaciones, Los agregados de concreto reciclado (RCD) suelen ser usados como base o subbase para la construcción de carreteras, y en la rehabilitación de estructuras existentes, entre otras de las cuales se mencionan. Su función es reemplazar algunos aditivos naturales de la mezcla tradicional (grava y la arena), para obtener características físicas y mecánicas relativamente apropiadas. Ante este panorama, algunos investigadores han llevado a cabo la sustitución obteniendo resultados estructuralmente viables (Thomas, et al, 2018).

Por consiguiente, en esta investigación lo que se pretende es experimentar el comportamiento a fatiga de los concretos asfálticos que contienen agregados de residuos de

construcción. Así mismo evaluar la vida a fatiga bajo los enfoques de deterioro de rigidez y el enfoque de energía.

1. Formulación del Problema

La generación de escombros derivados de la demolición estructura representa una problemática medio ambiental que afecta a gran parte del mundo. En las grandes urbes colombianas se producen más de 22 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición (RCD), de las cuales se tiene previsto reutilizar por lo menos el 30% según resolución 472 de 2017 del Ministerio del medio ambiente y desarrollo sostenible, gran parte de este material reciclado es utilizado como bases y subbases para estructuras de pavimentos, lo cual limita ostensiblemente su reutilización en la industria de la construcción; lo cual genera efectos desfavorables en los suelos puesto que el material restante es dispuesto en rellenos sanitarios. (Martínez, et al, 2015)

¿Es viable sustituir una fracción de los agregados naturales de la mezcla de concreto asfáltico por residuos de construcción y demolición?

Los agregados naturales constituyen entre el 40 – 50% de una mezcla de concreto, mientras que el cemento apenas alcanza el 10%, por lo que el uso del concreto reciclado, presenta un enorme potencial de reemplazar parcialmente los agregados naturales en una construcción futura. Existe una reducción del impacto ambiental aproximadamente del 50% si se considera una muestra de concreto reciclado cuando se compara con una muestra de concreto tradicional. (McGinnis, et al, 2017)

Un estudio realizado en la Universidad de Cochin (Estados Unidos) muestra que los desechos provenientes del concreto son una alternativa sostenible a los agregados de piedra natural triturada en lo que se refiera aspectos tales como la resistencia y durabilidad. Dichos estudios concluyeron que resulta posible un reemplazo hasta del 25% de los agregados de piedra natural triturada por agregados provenientes de RCD, con objeto de no impactar significativamente en pérdida de resistencia del concreto resultante, según la ASTM C2102 (Standard test method for Electrical Indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration). (Thomas, et al, 2018)

Por otra parte, un estudio realizado por el Instituto técnico superior en Lisboa, Portugal, arrojó el siguiente resultado. Una reducción de la resistencia a la compresión hasta el 72% cuando el 20% de los agregados naturales fueron sustituidos, las reducciones en los valores de resistencia a la compresión se deben a las diferencias en el tipo de desechos sólidos que se utilizan, su tamaño, forma y las diferencias en el comportamiento de trabajabilidad de la mezcla de concreto (Saikia; De Brito, 2012).

En los estudios mencionados anteriormente, los RCD son una gran amenaza al medio ambiente, porque generan problemas de contaminación que repercuten en el deterioro de ecosistemas y de la salud humana. Por lo que la implementación de la reutilización de los residuos de construcción y demolición como medida de ayuda para el medio ambiente es atractiva.

También se busca la optimización a través del uso de nuevas técnicas de construcción en las obras de concreto particularmente con objeto de reducir los costos tanto de construcción, explotación de recursos (agregado natural) y al tiempo incrementando la calidad de vida del ser humano.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Evaluar la fatiga por flexión del concreto asfáltico con diferentes combinaciones de RCD.

2.2. Objetivos específicos

- Diseñar la mezcla adecuada de concreto asfáltico con RCD, que permita un diseño favorable para su uso en vías bajo condiciones reales.
- Determinar mediante ensayos de laboratorio, la fatiga que experimenta el concreto asfáltico con RCD.
- Determinar las ventajas de utilizar RCD en el concreto asfáltico.

3. **Justificación**

El desarrollo sostenible es un tema que preocupa a todo el mundo, de ahí que la reutilización de materiales que ya cumplieron su vida útil genere una economía sostenible. En Ingeniería Civil en lo posible es importante reutilizar la mayor cantidad de recursos posibles, pues la industria de la construcción utiliza el 60% de los materiales proveniente de la tierra y en compensación produce el 30% del CO₂, consumiendo un 40% de energía, así reutilizar evitará un colapso futuro bien sea económico o ambiental. (Ministerio de Ambiente y desarrollo, 2017)

La industria de la construcción actualmente sólo utiliza los agregados de concreto reciclado como material para bases y sub-bases, lo que limita la reutilización del material, por lo que es importante buscar nuevas maneras de implementar materiales como el RCD en áreas diferentes a la de pavimentos, con la finalidad de reducir la cantidad de material que ingresa a los rellenos sanitarios.

En distintos lugares del mundo como lo son Estados Unidos y Portugal, han implementado el RCD en la mezcla de concreto tradicional obteniéndose resultados bastante aceptables lo que pone de manifiesto que a nivel de protección medio ambiental y del presupuesto de obra resulta viable la sustitución lo cual es una justificación más que suficiente para el desarrollo de la presente investigación.

4. Estado del Arte

4.1. Caracterización de materiales

En el estudio se usó cemento Portland normal (OPC) conforme a IS: 12269. Las propiedades físicas del cemento se determinaron mediante pruebas de laboratorio y se muestran en la Tabla 1. Se utilizó arena manufacturada conforme a la Zona II de IS: 383 (2016) como agregado fino. Las propiedades físicas del agregado fino se dan en la Tabla 2. Se utilizaron agregados de piedra triturada (CSA) de un tamaño máximo de 20 mm según IS: 383 como agregado grueso. La gravedad específica de los agregados de piedra natural se encontró que era 2.72. Tabla 3. (Thomas, et al, 2018)

Tabla 1. Propiedades físicas del cemento.

No.	Propiedad	Magnitud
1	Gravedad específica	3.15
2	Consistencia estándar (%)	31.5
3	Tiempo de fraguado inicial (min)	130
4	Tiempo de fraguado final (min)	279
5	Resistencia a la compresión- 28 días (MPa)	59

Nota. Adaptado de (Thomas, et al, 2018)

Tabla 2. Propiedades físicas del agregado fino.

No	Propiedad	Magnitud
1	Gravedad específica	2.7
2	Absorción de agua (%)	1.5
3	Humedad de la superficie	0.5
4	Densidad a granel - compactada (kg / m ³)	1948

Nota. Adaptado de (Thomas, et al, 2018)

Tabla 3. Propiedades físicas del agregado grueso.

Sl. No.	Propiedad	Magnitud	
		CSA	RCA
1	Gravedad específica	2.72	2,34
2	Absorción de agua (%)	0.7	6.4
3	Densidad aparente compactada (kg / m ³)	1832	1487
4	Valor de trituración agregado (%)	26	29
5	Humedad de la superficie	Nulo	Nulo

Nota. Adaptado de (Thomas, et al, 2018)

El agregado de concreto reciclado se produjo a partir de desechos de concreto provenientes del sitio de demolición de un tanque de agua. La resistencia del núcleo del concreto original se encontró que era de 25 MPa.

Los residuos de concreto recogidos se sometieron a trituración primaria y se tamizaron para controlar los tamaños de partículas del agregado de concreto reciclado. El agregado así obtenido se lavó con agua a presión para eliminar el mortero suelto y las impurezas. Los tamaños agregados se proporcionaron para cumplir con los requisitos de calificación según IS: 383. Se encontró que la absorción de agua de RCA era del 6,4%. (Thomas, et al, 2018)

4.1.1 Pruebas

La viabilidad del concreto fresco se determinó mediante la prueba de asentamiento. También se determinó la densidad de las mezclas de control y el concreto que contiene RCA en estado fresco. Para determinar las propiedades del concreto endurecido, se probaron tres muestras para cada prueba y se informaron los valores promedio. La resistencia a la compresión de 28 días de muestras de concreto que contienen agregados naturales y muestras que contienen agregados de concreto reciclado se determinó probando cubos de tamaño 150 mm x 150 mm x 150 mm según IS: 516 en una prueba de compresión Máquina de capacidad 2000 kN.

La resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad se determinaron mediante la realización de pruebas en muestras de cilindros de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura según IS: 516. La resistencia a la flexión del concreto se determinó analizando muestras prismáticas de tamaño 150 mm x 150 mm x 700 mm en un tramo de 600 mm según IS: 516. (Thomas, et al, 2018)

4.1.2. El efecto de la mezcla en dos fases sobre las propiedades funcionales y mecánicas del concreto asfáltico poroso modificado con TPS / SBS

En este trabajo, se consideró un nuevo método de mezcla para mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente (HMA). El agregado grueso se recubre previamente con una cantidad óptima de aglutinante para obtener una capa intermedia entre el agregado y el relleno (Kiselev, et al, 2021)

4.1.3 Conclusiones

Se ha estudiado el efecto del modificador TPM sobre las propiedades de las mezclas adhesivas de PA y SBS. Saque las siguientes conclusiones:

- Agregar un modificador de TPS a un adhesivo SBS puede mejorar la resistencia a altas temperaturas, la viscosidad y la consistencia del adhesivo.

- Los resultados de las pruebas de penetración, punto de reblandecimiento y plasticidad muestran la aplicabilidad de los modificadores SBS (4%) y TPS (10%).

Se propone un método para crear adhesivos (asfalto modificado). Las investigaciones futuras deberían minimizar la subjetividad asociada con la determinación del contenido óptimo de aglutinante.

4.2. Residuos de construcción y demolición (RCD)

Toda construcción por pequeña que sea genera un impacto positivo y negativo, tal es el caso de la industria de la construcción que consume la mayor parte de las materias primas extraídas de la litosfera y produce una gran cantidad de CO₂ (Lara, 2016).

Según un artículo realizado por la revista Ingenierías de la universidad de Medellín, las sociedades en desarrollo tienen un efecto consumista en lo que respecta a la demanda de cemento y los insumos utilizados para obras civiles, debido a que en el 2012 se manejaron tasas de 300kg/habitante-año de cemento y en el 2005 se reportaron tasas de 170 kg/habitante-año de cemento reflejando la alta tasa de construcción generada por el desarrollo económico llevando a desarrollar un nuevo contexto universal orientado a reutilizar, reciclar y reducir. (Chávez Porras et al, 2009)

El artículo de la revista Ingenierías menciona que los RCD son una mezcla de varios elementos como ladrillo, cemento, arena, grava, gravilla, recebo, acero, madera entre otros; Los cuales están constituidos por un 20 % de concreto, 50% de material de albañilería, 10% asfalto y 20% de otros materiales como maderas y partes metálicas (Chávez Porras et al, 2009).

Los agregados de concreto reciclado (RCD) provenientes de concreto de desecho son una alternativa sostenible a los agregados de piedra natural triturada. Las propiedades de resistencia y durabilidad del concreto que contiene RCD se evaluaron mediante una investigación experimental exhaustiva que incluyó nueve mezclas de control. Las variables consideradas en el estudio experimental son la proporción de cemento en agua, el contenido de cemento en el concreto y el

porcentaje de reemplazo del agregado grueso. Se estudian las propiedades de resistencia tales como la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, la resistencia a la tensión de división y la resistencia a la flexión.

Propiedades de durabilidad tales como absorción de agua, sorptividad, Ataque ácido resistencia y permeabilidad cloruro también se determinan. Los resultados de las pruebas mostraron que hasta el 25% de los agregados de piedra triturada natural en el concreto pueden reemplazarse con RCD, sin afectar significativamente la resistencia del concreto y que se puede recomendar el reemplazo parcial de los agregados naturales con RCD en áreas con condiciones de exposición moderadas. Los modelos matemáticos desarrollados en el estudio pueden usarse para la predicción a priori de los parámetros de resistencia del concreto RCD. Se propone una metodología de diseño de mezcla que utiliza los modelos desarrollados para ayudar a los ingenieros en ejercicio a determinar las proporciones de mezcla del concreto RCD. (Thomas, et al, 2018)

Los programas de Silva et al y Knaack y Kurama han propuesto un sistema para la clasificación del concreto reciclado según su densidad, absorción y pérdida de abrasión y otros componentes de investigación importantes como lo son la resistencia a la compresión, la tracción, deformación y rigidez, los cuales los estudios previos se sacaron de 16 fuentes en el medio oeste de EE.UU.

Al aplastar el concreto viejo para hacer agregados de concreto reciclado (RCD) para uso en concreto nuevo, se reducen los impactos ambientales generales del concreto. Sin embargo, es necesario comprender mejor el uso de RCD en el concreto nuevo antes de poder realizar una amplia implementación de las aplicaciones de concreto estructural.

En particular, la resistencia, la rigidez (módulo de elasticidad), la capacidad de trabajo y la durabilidad del concreto con RCD pueden ser diferentes al concreto que usa agregado natural. (N/A). La variabilidad en las propiedades de RCD de una fuente a otra también debe abordarse si se adoptan pautas para el uso de RCD.

La variabilidad en las propiedades agregadas y las relaciones entre ellas se abordan en el documento. Ecuaciones que permiten a los diseñadores para predecir la resistencia y la rigidez de las mezclas se muestran aplicables en una gama mucho más amplia de propiedades de RCD que las conocidas anteriormente. Al igual que el concreto con agregados naturales, la resistencia y rigidez de RCD se ve afectada por la gradación de los agregados gruesos: los agregados más pequeños hacen que el concreto sea más resistente y rígido. (McGinnis, et al, 2017)

5. Metodología

El tipo de investigación es **CUANTITATIVA**

5.1. Etapa 1: Selección de las muestras

Para identificar las propiedades físico-mecánicas de una mezcla de concreto con agregados de concreto reciclado, por lo que esta se divide en dos gregados de concreto Reciclado

Para esto es necesario adquirir escombros de alguna obra que este en proceso de demolición, no es necesario ser específico sólo se tomará una muestra necesaria para realizar los ensayos, añadido a esto se molerá y se realizará un laboratorio de granulometría

5.2 Etapa 2: Diseño de la mezcla

De acuerdo con los marcos teóricos, en estudios previos que se han realizado se han reemplazado en la mezcla de concreto asfáltico hasta un 25% con agregados naturales, con resultados prometedores, por lo que, para unir estos dos materiales, será necesario tener en cuenta estos datos y verificar que tanto puede ser reemplazado y si es viable realizar esto. Para esto es necesario tener asesoría del director del proyecto.

5.3 Etapa 3: Ensayos de laboratorio

Para esto se mencionarán los más importantes:

5.3.1. *Ensayo de Granulometría*

Se realizará este ensayo para separar la muestra de concreto reciclado e identificar el porcentaje que se usará.

5.3.2 *Diseño de mezcla asfáltica*

Con este ensayo se pretende determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico, con respecto a las proporciones de RCD.

5.3.3 *Ensayo de fatiga por flexión en cuatro puntos*

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia a la fatiga de las vigas de concreto asfáltico extraídas de las secciones de capa asfáltica analizada o de muestras elaboradas en el laboratorio. Los ciclos de aplicación de carga sobre la muestra hasta la falla obtenidos por este ensayo son usados para determinar la resistencia a la fatiga de las capas de concreto asfáltico afectadas con cargas de tráfico real.

5.4 Etapa 4: Resultados y conclusiones

Esta etapa está prevista para socializar los resultados y mostrar la mezcla o el diseño más favorable para usar en obras.

Con esto se pretende elaborar o desarrollar las siguientes evaluaciones:

- Evaluación por fatiga.
- Evaluación por fatiga bajo el enfoque de energía.
- Evaluación a fatiga bajo el enfoque de la rigidez.

Tabla 4. Metodología.

Objetivo	Actividad	Descripción	Actores
1	ETAPA 2	Mediante un diseño previo se pretende llevar los resultados teóricos a la practica con la finalidad de obtener resultados prometedores.	Estudiante-docente
2	ETAPA 3	Con los ensayos descritos en la etapa, se obtendrá fatiga que experimenta el concreto asfáltico.	Estudiante
3	ETAPA 1 Y 3	Durante la selección de la muestra se prevee determinar las cantidades a reemplazar en la mezcla de concreto asfáltico	Estudiante- Docente

6. Desarrollo

Para comenzar es necesario tener en cuenta las características de cemento asfáltico, las cuales son las siguientes:

Tabla 5. Ficha técnica del cemento asfáltico.

Ensayos	Resultado	Especificación	Método de ensayo ASTM
Ligante original			
Viscosidad dinámica a 60 °C (Pa-s)	232	200 ± 40	D 2171
Viscosidad cinemática a 135 °C	375	300 mínimo	D 2170
Peso específico a 25 °C	1.025	-	D 70
Pérdida por calentamiento en la prueba de RTFOT (%)	0.53	1 máximo	D 2872
Residuo de la prueba a la película fina			
Penetración en décimos de mm a 25 °C, 100 g, 5 s	40	-	D 5
Prueba anillo y esfera (°C)	55.2	-	D 36
Ductilidad a 25 °C	51	50 mínimo	D 113

Los agregados reciclados provienen de la demolición y desechos de la industria de la construcción de escombros de las obras para estructuras residenciales, estas contienen como agregado mineral de diferentes (41%) y yeso, concreto hidráulico y mortero (39%) y cerámica y ladrillo (20%), ver Figura 1.

Figura 1. Tamizado de los agregados basálticos y RCD.



Tabla 6. Resultados de pruebas de los agregados gruesos.

Ensayo	Control	90/10	80/20	70/30	60 /40	Especificación	Norma
Angularidad del agregado grueso (%)	100 / 100	100 / 100	100 / 100	100 / 100	100 / 100	95 / 90 mínimo	ASTM D 5821
Equivalente de arena (%)	64	61	59	55	54	50 mínimo	ASTM D 2419

Figura 2. Tamizado de los agregados basálticos.



Tabla 7. Resultados de pruebas de agregados de RCD.

Ensayo	Control	90/10	80/20	70/30	60/40	Límite	Norma
Desgaste de Los Ángeles (%)	4	24	26	26	28	30 máximo	ASTM C 131
Prueba de sanidad del agregado grueso (%)	1	-	-	-	-	15 máximo	ASTM C 88

Figura 3. Preparación del material para el ensayo de desgaste de los ángeles.



Figura 4. y resultado ensayo de desgaste de los ángeles

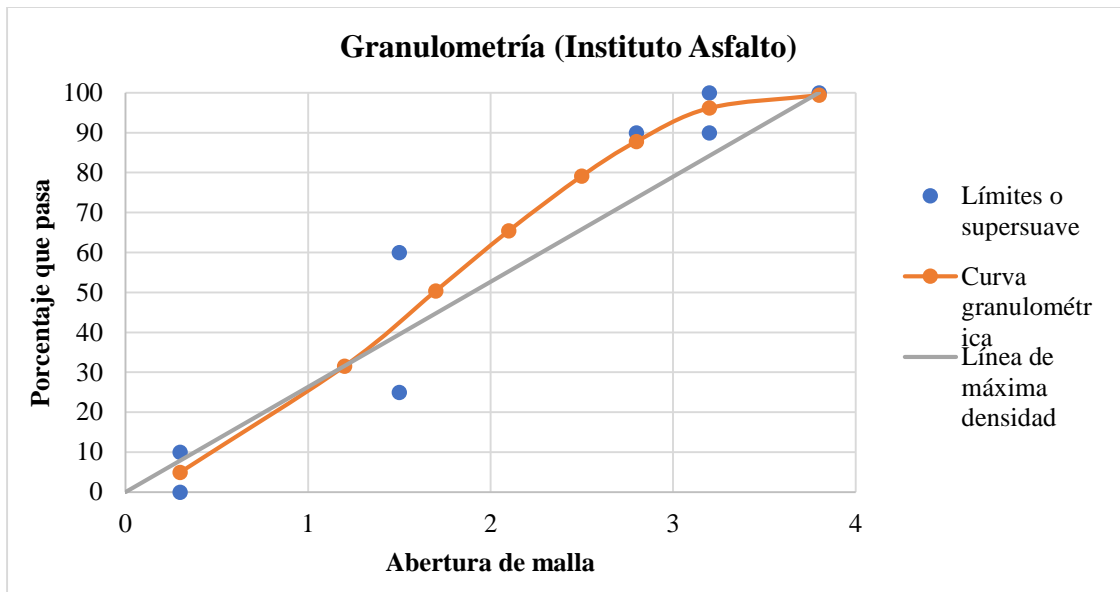


Para los resultados de las pruebas de la tabla 7, debido a que el compuesto químico reacciona con el cemento portland adherido a los agregados de RCD, desintegrando rápidamente las partículas, por lo que esto no es una muestra representativa.

6.1 Granulometría

En la Figura 5, se muestra la granulometría empleada para la fabricación de los especímenes de concreto asfáltico para ello se utilizaron diferentes combinaciones. El ensayo abarca un tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ " y un tamaño máximo nominal de $\frac{1}{2}$ ".

Figura 5. Granulometría.



6.2 Diseño de la mezcla asfáltica

Para la ejecución de esta investigación, se utilizó el diseño de la mezcla asfáltica definido por (Ossa & García, 2014), quien utilizando los mismos materiales pétreos y asfálticos, así como iguales características granulométricas, determinó un contenido óptimo de cemento asfáltico de 6.8% medido con respecto a la masa del agregado y un valor de TSR (*Tensile Strength Ratio*) de 85%.

Dicho diseño se basó en la metodología *Superpave* establecida en la *Strategic Highway Research Program* (SHRP) (Instituto de asfalto, 2001), se llevó a cabo para un tránsito (ESAL's) de 9.5×10^6 el cual corresponde al Nivel 2 de dicha metodología y es representativo de vialidades urbanas. En las Tablas 8 y 9, se presentan las especificaciones de compactación y de propiedades volumétricas que fueron tomadas en cuenta durante el diseño volumétrico de la mezcla asfáltica.

Tabla 8. Nivel 2 de compactación.

ESAL diseño (UND Mill)	# de giros		
	Inicial	Diseño	Máximo
3-30	9	100	160

Nota. Adaptado de Instituto de asfalto (2001).

Tabla 9. Relaciones volumétricas basadas en las especificaciones del instituto de asfalto.

ESAL diseño (UND Mill)	Densidad req			VMA* %mín (TMN (mm))					VFA** %mín	Proporción del polvo (Filler)
	NInicial	NDiseño	NMáximo	37.5	35	19	12.5	9.5		
3-30	<89.0	96	<98.0	11	12	13	14	15	65-75	0.6-1.2

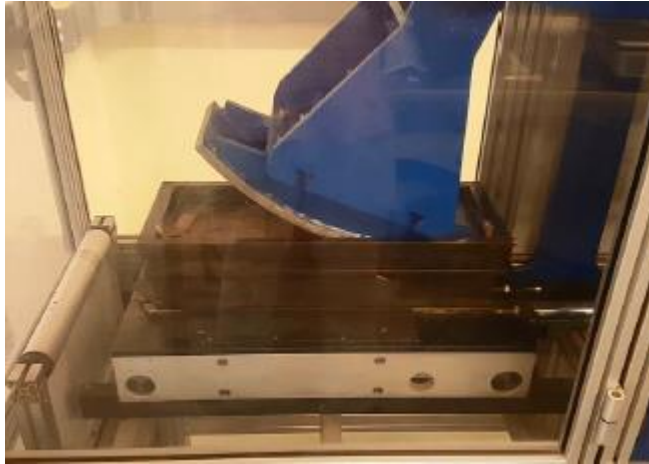
Nota. Adaptado de Instituto de asfalto (2001).

6.3. Elaboración de especímenes

Para tratar vigas de asfalto con agregados RCD, primero coloque estos agregados en un horno de convección con una temperatura máxima de 170 ° C. Al elegir esta temperatura, se debe tener cuidado de no exceder la temperatura de mezcla de 28 ° C., Duró aproximadamente 16 horas. Al determinar la temperatura de mezcla, se deben considerar las recomendaciones de las normas INV 450-07 y Art 442P.

Para el concreto asfáltico PG 64-22, la temperatura es de 143 ° C. Cabe señalar que esto no se puede lograr sin la ayuda de otros laboratorios de terceros, porque la prueba es costosa para el autor, por lo que esto se hace con la ayuda de un amigo. Después de mezclar, el curado de la mezcla también debe realizarse a la temperatura de compactación (135 ± 2 ° C) durante 240 ± 10 minutos, y el material se mueve periódicamente cada 25 minutos. Una vez finalizado el curado, saque la mezcla del horno mientras coloca el material en una prensa de rodillo suave, como se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Compactación en el rodillo liso.



6.4. Evaluación a fatiga por flexión del concreto asfáltico

6.4.1 Evaluación a la fatiga

“En pavimentos el número de ciclos de carga, las grietas se propagan a la superficie manifestándose de manera longitudinal y transversal, formando un patrón comúnmente llamado agrietamiento tipo piel de cocodrilo. Entre los factores que influyen para provocar el deterioro por fatiga son: las cargas de los vehículos (sobrecargas), incremento en el volumen del tránsito y las presiones de inflado de los neumáticos. Por consiguiente, para tratar esta deficiencia la literatura técnica recomienda la utilización de asfaltos modificados.” (Fatemi; Yang, 1998)

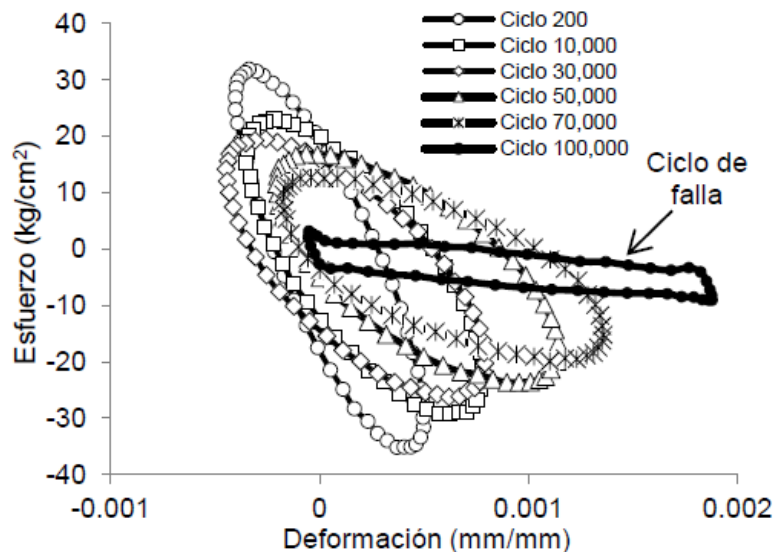
De acuerdo a (Souliman, et al, 2012), La literatura técnica se refiere a dos conceptos principales para la definición de falla por fatiga que se utilizan para la interpretación de ensayos de flexión cíclica en el dispositivo de cuatro puntos, el primero de los cuales se basa en el concepto de energía disipada y el segundo en el concepto de degradación del módulo de rigidez del material.

6.4.2 Evaluación a fatiga bajo el enfoque de energía

“Cuando se aplica una carga al material, se genera una fuerza interna que hace que el material se deforme. Sin embargo, descargar el material puede eliminar la tensión y restaurar total o parcialmente la deformación. El área bajo la curva tensión-deformación representa la energía del material. De manera similar, el proceso de carga y descarga también se denomina "bucle de histéresis". Por lo tanto, si las áreas que describen las curvas de carga y descarga se superponen en sus trayectorias, toda la energía aplicada al material se recuperará después de que se elimine la carga. (Carpenter, et al, 2003).

Si el área bajo la curva producida por el ciclo de carga y descarga no coincide, la pérdida de energía se registrará en el material, como se muestra en la Figura 7. Esta energía se convierte en trabajo mecánico, generando calor, o daños al material evaluado. Por tanto, la diferencia de energía se denomina energía disipada del material provocada por las pisadas de los vehículos (Carpenter, et al, 2003).

Figura 7. Curva de esfuerzo-deformación (bucles de histéresis).



Nota. Adaptado de (Carpenter, et al, 2003)

El método de Carpenter utiliza el cambio de la energía disipada para relacionar el daño acumulado y la vida a fatiga. Éste método define que la falla a fatiga ocurre en el ciclo de carga en el cual los valores de la relación del cambio de energía (RDEC) definida por la ecuación 1, deja de ser constante (Carpenter, et al, 2003). El parámetro RDEC es considerado por algunos autores como un parámetro apropiado para el análisis del comportamiento a fatiga de concretos asfálticos.

$$RDEC = \frac{DE_{n+1} - DE_n}{DE_n} \quad (1)$$

Donde:

DE_n = energía disipada en el ciclo de carga n

DE_{n+1} = energía disipada en el ciclo de carga n+1.

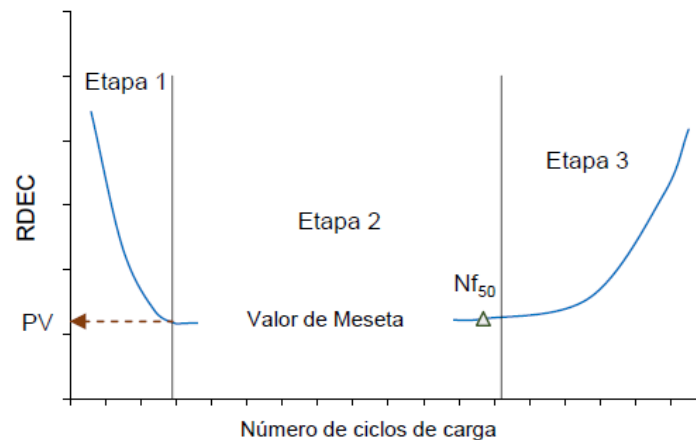
La representación gráfica del valor RDEC en función del número de ciclos de carga muestra una curva característica de falla en forma de U. Según (Carpenter, et al, 2003), la curva se divide en tres etapas, mostrando cómo se convierte o disipa la energía.

Fase 1: La curva desciende de repente. Esta disminución en el valor de RDEC se atribuye en parte a la orientación de las moléculas y la tixotropía del material.

Etapas 2: En el ciclo de carga de largo plazo, la trayectoria de la curva de fractura tiende a ser horizontal, reflejando el daño interno al material causado por cargas repetidas, que se manifiesta en la aparición de microgrietas. El significado de RDEC en esta etapa se denomina PV en la palabra inglesa "plateau value".

Etapas 3: El valor RDEC aumenta, lo que indica que el material comienza a mostrar daño por fatiga. Con este método, el punto de falla (N_f) se define como el número de ciclos de carga en los que los cambios en el factor de energía comienzan a aumentar repentinamente, como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Ejemplo típico de RDEC versus ciclos de carga.



Nota. Adaptado de (Carpenter, et al, 2003)

De acuerdo a (Carpenter, et al, 2003), el parámetro PV, puede representarse con el valor de RDEC que corresponde al ciclo de carga donde se presenta un 50% de degradación de la rigidez inicial del material (Nf_{50}) y es por ello que para determinar el valor de PV, pueden emplearse las Ecuaciones 2 y 3.

Para las pruebas de fatiga por deformación y daño, estas ecuaciones son muy similares. Sin embargo, estas dependen de la pendiente exponencial k , de la curva ajustada energía disipada versus ciclos de carga, como se muestra en la Figura 9. Usando pruebas de fatiga, el punto de dalla Nf_{50} se puede obtener fácilmente.

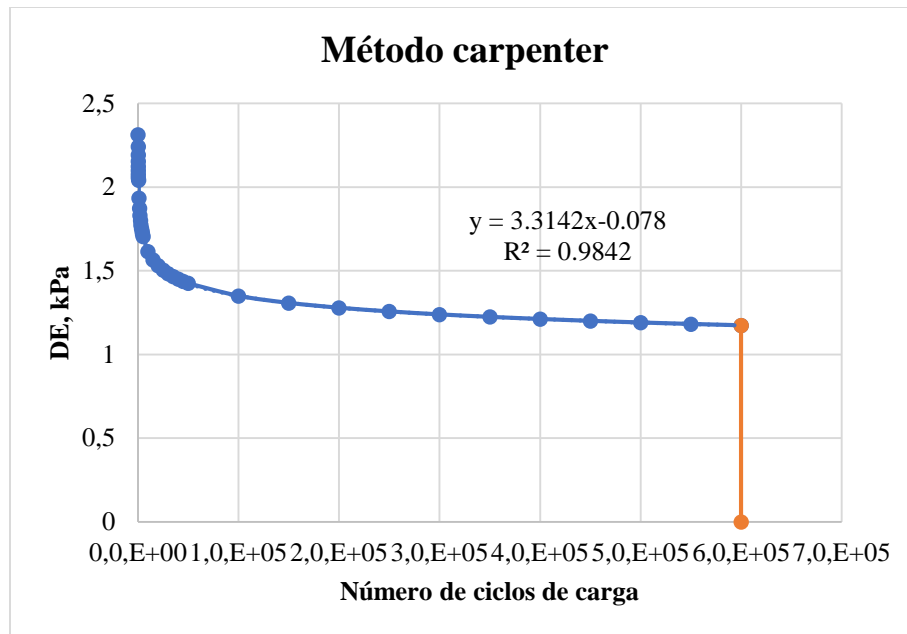
Ecuación 2:

$$PV = \frac{1 - \left(1 + \frac{100}{Nf_{50}}\right)^k}{100}$$

Ecuación 3:

$$PV = \frac{k}{Nf_{50}}$$

Figura 9. Energía disipada vs ciclos de carga.



6.4.3 Evaluación a fatiga bajo en enfoque de la rigidez

Norma AASHTO T 321

La norma AASHTO T 321 usa el concepto de degradación de rigidez para la definición de la falla por fatiga del material. Esta tiene en cuenta el número de ciclos a la falla es el que muestra que la rigidez del material representa el 50% del valor inicial.

6.4.4 Ensayo de fatiga por flexión en cuatro puntos

El ciclo de carga de la muestra fallada es obtenido de esta prueba, se utiliza para determinar la resistencia a la fatiga de la capa de concreto asfáltico sometida a la carga de tráfico real. La prueba se puede realizar bajo condiciones controladas de tensión o deformación. Durante la prueba, la viga se apoyó en 4 puntos y se cargó en dos puntos centrales. Hay una restricción de movimiento vertical en los dos puntos exteriores, lo que hace que la viga se doble. El comportamiento resultante es equivalente al de una viga isostática sometida a flexión pura (momento puro) entre estos dos puntos intermedios.

Figura 10. Máquina de ensayos de 4 puntos.



A partir del ensayo experimental se pueden determinar los siguientes parámetros:

Esfuerzo a la tensión máxima

Ecuación 4:

$$\sigma_{\tau} = \frac{3aP}{bh^2}$$

Donde:

σ_{τ} = esfuerzo a la tensión máxima, en Pa.

a = espaciamiento centro a centro entre las abrazaderas.

P = carga aplicada por actuador, en N.

b = promedio del ancho de la muestra, en m.

h = promedio de la altura de la muestra, en m.

Deformación máxima a la tensión (5):

$$\varepsilon_{\tau} = \frac{12\delta h}{3L^2 - 4a^2}$$

Dónde:

ε_{τ} = deformación máxima a la tensión, en m/m.

δ = máxima deflexión en el centro de la viga, en m.

a = el espacio entre las abrazaderas de su interior

L = longitud de la barra entre las abrazaderas exteriores.

Rigidez a la flexión (6):

$$S = \frac{\sigma_{\tau}}{\varepsilon_{\tau}}$$

6.4.5 Límite de endurecimiento a fatiga.

El límite de endurecimiento se define como la extensión de la deformación en la que el concreto asfáltico no causará fallas por fatiga significativas bajo un número ilimitado de ciclos de carga (NCHRP, 2010). Según el informe NCHRP 2010 646, el modelo expresado en la Ecuación 7 se utiliza para determinar el límite de resistencia a la fatiga del laboratorio:

$$FEL = \hat{y}_0 - t_{\alpha} S \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_o - \tilde{x})^2}{S_{xx}}}$$

Dónde:

\hat{y}_0 = log de la predicción del nivel de deformación ($\mu\varepsilon$).

t_{α} = valor de la distribución; t para $n - 2$ grados de libertad = 1.9432.

$n = 8$ con $\alpha = 0.05$.

s = estimación de la desviación estándar.

n = número de muestras = 8.

$x_0 = \log 50,000,000 = 7.69897$.

\bar{x} = promedio del *log* de los resultados a la vida a fatiga.

$S_{xx} = \sum(x_0 - \bar{x})^2 / (n - 1) = 1$.

Las tablas 10 y 11 muestran el ciclo de carga en el que el estado de daño de las muestras de asfalto utilizando materiales de RCD es tan alto como 40%, lo que es consistente con el método de degradación de la rigidez (AASHTO T 321) y la concentración de energía. Como puede ver, (Carpenter S.H.), los resultados de estos métodos son muy similares. Nuevamente, estas tablas no muestran todos los resultados obtenidos para diferentes amplitudes de deformación. Porque las muestras producidas no cumplen con los requisitos reglamentarios.

Tabla 10. Resultados AASHTO pruebas de control.

ID	Nivel de def.	VA	Aashto CF
	(ue)	%	Mezcla control
VG-1	400	3.61	834779
VG-2	400	4.32	982228
VG-3	500	3.64	771967
VG-4	500	3.64	305962
VG-5	600	3.80	269875
VG-6	600	4.07	172635
VG-7	750	4.60	114519
VG-8	750	4.17	37698

Tabla 11. Resultado de pruebas bajo el enfoque AASHTO.

VA	AASHTO CF	VA	AASHTO CF	VA	AASHTO CF	VA	AASHTO CF
%	90/10	%	80/20	%	70/30	%	60/40
4.11	848090	5.50	412365	4.09	281010	4.4	165010
3.36	643146	4.80	584014				
3.80	428764			4.47	177010	3.96	136658
				3.94	138010		
3.50	206292	6.17	81009	3.51	51010	3.74	51010
						4.37	33003
4.48	37753	3.21	60000	3.78	29050	3.69	18598
		6.09	24000			3.96	18010

Tabla 12. Resultados Carpenter pruebas de control enfoque de energía.

ID	Nivel de deformación	VA	Carpenter CF
	(ue)	%	Mezcla control
VG-1	400	3.61	951998
VG-2	400	4.32	1030497
VG-3	500	3.64	804790
VG-4	500	3.64	342105
VG-5	600	3.80	311218
VG-6	600	4.07	179592
VG-7	750	4.60	118315
VG-8	750	4.17	46523

Tabla 13. Resultado de pruebas bajo el enfoque de energía, Método Carpenter.

ID	VA	AASHTO CF	VA	AASHTO CF	VA	AASHTO CF	VA	AASHTO CF
	%	90/10	%	80/20	%	70/30	%	60/40
VG-1	4.11	872596	5.50	448939	4.09	297762	4.4	173052
VG-2	3.36	679952	4.80	629192				
VG-3	3.80	497101			4.47	188693	3.96	141752
VG-4					3.94	154424		
VG-5	3.50	214844	6.17	104231	3.51	56357	3.74	59293
VG-6							4.37	39778
VG-7	4.48	46029	3.21	80157	3.78	36185	3.69	21562
VG-8			6.09	32692			3.96	22295

Las Figuras 12 y 13 muestran el período promedio de falla del concreto asfáltico utilizando materiales de construcción reciclados y agregados de demolición, y el control de cuatro niveles de deformación (400, 500, 600 y 750 $\mu\epsilon$) de acuerdo con los estándares de falla y los métodos de energía establecidos por la mezcla AASHTO. (Carpenter S.H.). El gráfico muestra que a medida que aumenta el porcentaje de RCD, la vida a fatiga del material disminuye.

Figura 11. Espécimen prismático con 5% de RCD.



Figura 12. Enfoque a fatiga por energía por el método AASHTO.

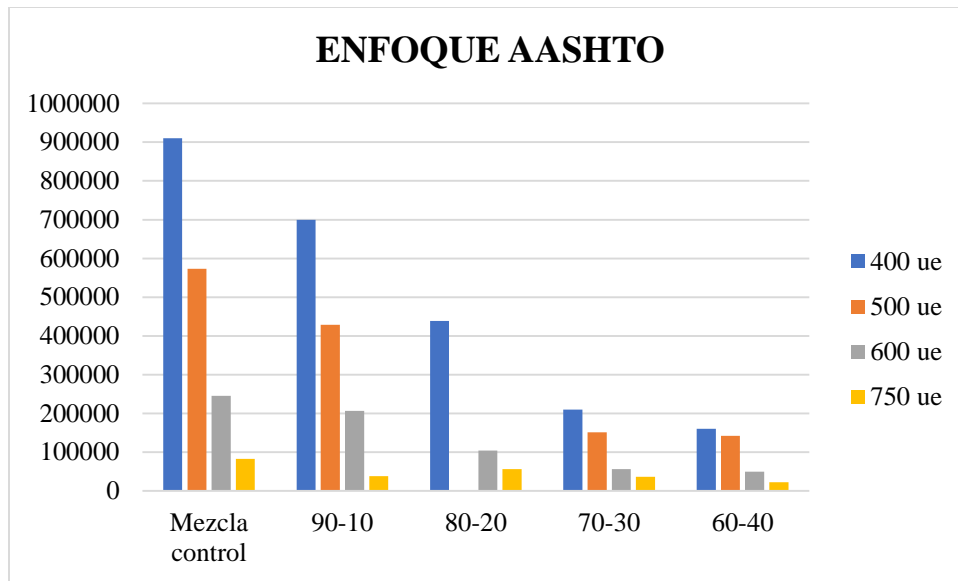
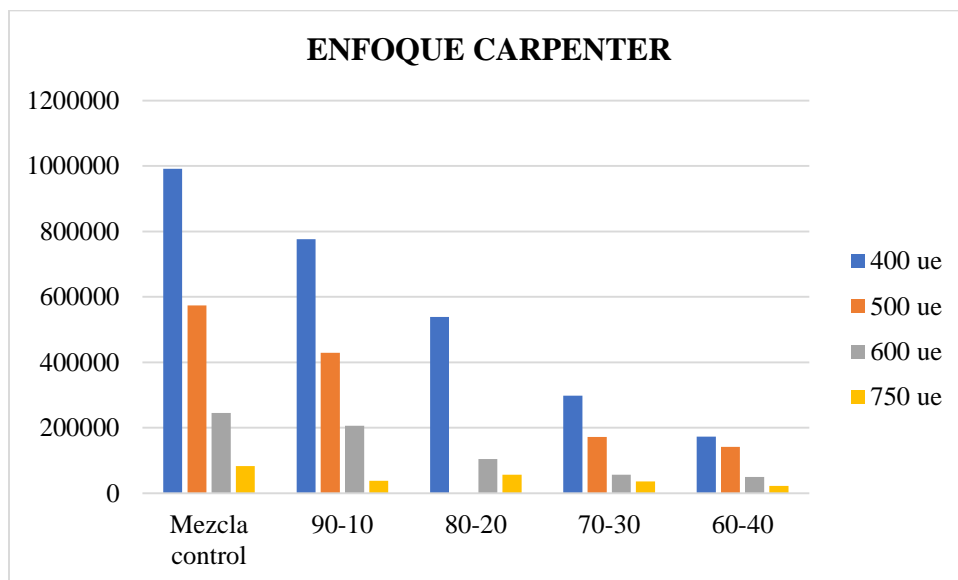


Figura 13. Enfoque a fatiga por energía por el método Carpenter.



Los valores del límite de endurecimiento a fatiga (FEL) del método de rigidez y energía se muestran en las Figuras 14 y 15. Estos valores se determinan usando la Ecuación 7. A medida que el valor límite de endurecimiento del concreto asfáltico aumenta el porcentaje de RCD, el valor de FEL disminuye. Como se mencionó anteriormente, esta es la cantidad de tensión de deformación a la que el concreto asfáltico tendrá una alta resistencia a la fatiga.

Estos resultados muestran que, si la tensión y la deformación en la parte inferior de la capa se limitan a un valor cercano al valor del pavimento durante el proceso de diseño del pavimento, se pueden usar diferentes porcentajes de RCD para construir el cojín de asfalto y su vida de fatiga puede ser muy alto. FEL. Cabe mencionar que al determinar el porcentaje de RCD para la construcción de concreto asfáltico, se deben evaluar otros aspectos básicos, como la susceptibilidad al daño por humedad y la resistencia a la deformación permanente del concreto asfáltico.

Figura 14. Método AASHTO (F.E.L).

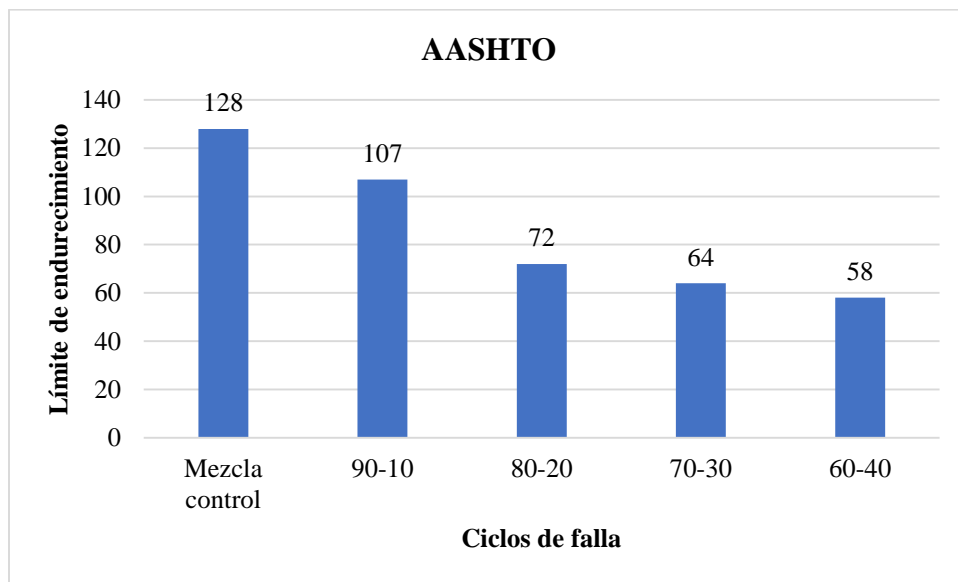
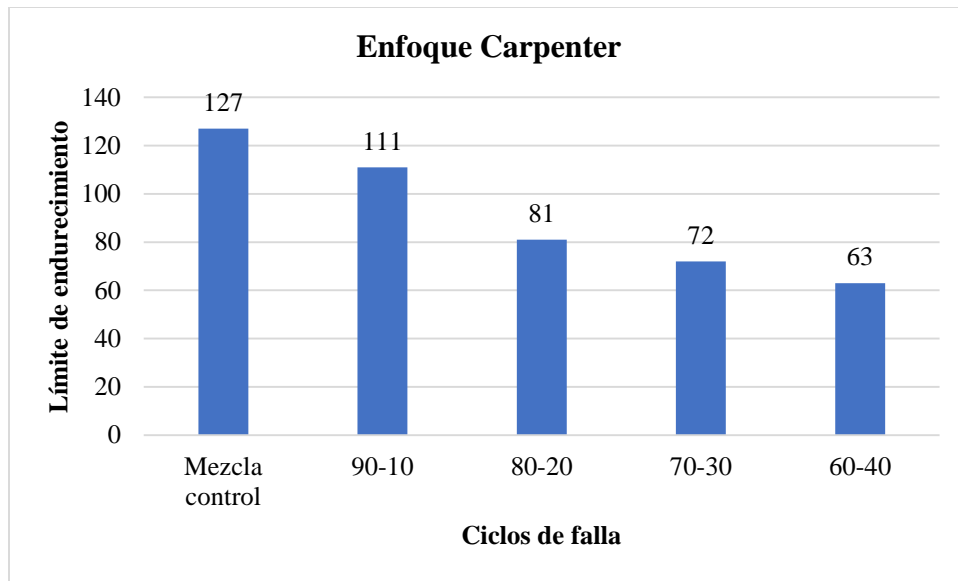
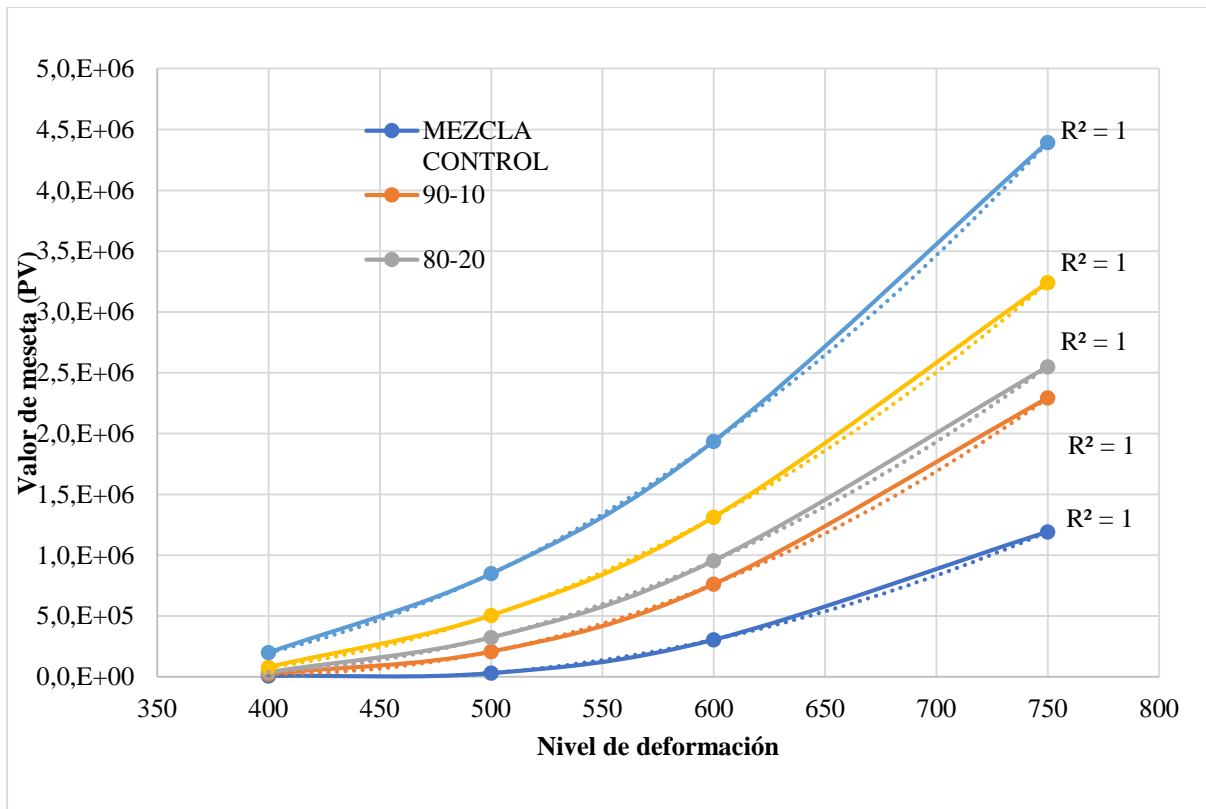


Figura 15. Método Carpenter (F.E.L).



La Figura 16 compara los valores de PV de diferentes hormigones asfálticos usando diferentes porcentajes de agregado RCD. Según el gráfico, el valor de PV tiende a incrementar el porcentaje de RCD, lo que muestra que, según el método energético, a medida que aumenta el porcentaje de RCD, el concreto asfáltico producido se vuelve más susceptible al daño por fatiga. Además, dado que se obtiene un ajuste de curva suficiente, se usa una función potencial para correlacionar la amplitud de la deformación y el valor de PV.

Figura 16. Relación entre el valor PV y el nivel de deformación.



6 Resultados e impacto

Tabla 14. Resultados.

Resultado	Indicador	Objetivo Relacionado
Diseño de mezcla	Diseño de mezcla asfáltica	Objetivo específico 1
Evaluación de la fatiga	Evaluación a la fatiga bajo el enfoque de energía, Método carpenter, bajo el enfoque de rigidez, por flexión en cuatro puntos y límite de endurecimiento a fatiga.	Objetivo específico 2
Ventajas de usar RCD	Conclusiones	Objetivo específico 3

Tabla 15. Impactos.

Aspecto	Impacto	Plazo
Social	Aumento de la concientización del reciclaje de RCD.	Mediano
Económico	Generación de empleo a recicladores en el sector de la construcción.	Largo
Académico	Mejora significativa en el conocimiento sobre el uso de RCD.	Largo
Técnico o científico	Mejora en las técnicas para evaluaciones futuras del uso del RCD.	Corto

7 Conclusiones

Con base en los conceptos de rigidez y disipación de energía (DE), este estudio evaluó el comportamiento a la fatiga del concreto asfáltico para residuos de construcción y demolición que contienen hasta un 40% de áridos y asfalto convencional. A partir de los resultados obtenidos y del análisis realizado, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El concreto asfáltico contiene agregados de desechos y escombros de construcción que reducirán la resistencia a la fatiga del material.
- Los resultados también muestran que el límite de endurecimiento del concreto asfáltico depende del contenido de RCD del material. Sin embargo, si el esfuerzo y la deformación de la parte inferior de la capa se limitan a un valor cercano al valor durante el diseño del pavimento, se pueden usar diferentes porcentajes de RCD para construir el relleno asfáltico para proporcionar una mayor vida a la fatiga. Cerca de FEL.
- Cabe mencionar que al determinar el porcentaje de RCD para la construcción de concreto asfáltico, se deben evaluar otros aspectos básicos, como la susceptibilidad al daño por humedad y la resistencia a la deformación permanente del concreto asfáltico.
- El valor de la meseta aumenta significativamente a medida que aumenta la proporción de agregados en los desechos de construcción y demolición.

8 Referencias

- Alonso, F. P. (2007). Reciclaje de escombros de la construcción: una alternativa ecologica para México. *Revista de Ingenieria Sanitaria y Ambiental*, 93, 94-101.
- Carpenter, S., Ghuzlan, K., & Shen, S. (2003). Fatigue Endurance Limit for Highway and Airport Pavements. *Transportation Research Record: Journal No. 1832*, 131-138. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/245560915_Fatigue_Endurance_Limit_for_Highway_and_Airport_Pavements
- Chávez Porras, Á., Guarín Cortes, N. L., & Cortes Duarte, M. C. (2009). Determinación de propiedades físico-químicas de los materiales agregados en muestra de escombros en la ciudad de Bogotá D. C. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 12(22), 45-58. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v12n22/v12n22a05.pdf>
- Fatemi, A., & Yang, L. (1998). Cumulative Fatigue Damage and Life Prediction Theories: a Survey of The State of The Art for Homogeneous Materials. *Int. J. Fatigue*, 9-34. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112397000819>
- Instituto de asfalto. (2001). *Superpave Mix Design*. Lexington: Asphalt institute.
- Kiselev, A., Zhang, H., & Liu, Z. (2021). El efecto de la mezcla en dos fases sobre las propiedades funcionales y mecánicas del hormigón asfáltico poroso modificado con TPS / SBS. *Materiales de construcción y edificación*, 59-74.
- Lara, D. A. (2016). *Nota. Adaptado de J. Thomas, et al.* Quito- Ecuador.
- Martínez Molina, W., Torres Acosta, A. A., Alonso Guzmán, E. E., Chávez García, H. L., Hernández Barrios, H., Lara Gómez, C., . . . González Valdéz, F. M. (2015). Concreto reciclado: una revisión. *ALCONPAT*, 5(3), 234-247. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/alconpat/v5n3/2007-6835-alconpat-5-03-00235.pdf>
- McGinnis, M., Davis, M., de la Rosa, A., Weldon , B., & Kurama, Y. (2017). Strength and stiffness of concrete with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 154, 258-269. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181731351X>
- Ministerio de Ambiente y desarrollo. (3 de Marzo de 2017). *Minambiente reglamenta manejo y disposición de residuos de construcción y escombros*. (Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible) Recuperado el 26 de Febrero de 2019, de

- <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/2681-minambiente-reglamenta-manejo-y-disposicion-de-residuos-de-construccion-y-escombros>
- Ossa, A., & García, J. (2014). *Residuos de construcción y demolición (RCD)*. Obtenido de <http://www.ii.unam.mx/es-mx/Investigacion/Proyecto/Paginas/Residuosdeconstruccionydemolicion.aspx>
- Saikia, N., & De Brito, J. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, 34, 385-401. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066
- Souliman, W., Zeiada, K., Kaloush, & Mamlouk, M. (2012). *Assessment of different flexural fatigue failure analysis methods to estimate the number of cycles to failure of asphalt mixtures*. Arizona: Taylor & Francis Group, London,. Obtenido de <https://asu.pure.elsevier.com/en/publications/assessment-of-different-flexure-fatigue-failure-analysis-methods->
- Thomas, J., Nazeer, N., & Wilson, P. M. (2018). Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. *Jornual of Building Engineering*, 19, 349-365. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710218302511>