



**UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO**

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**



**Mezcla asfáltica a base de residuos de construcción y  
demolición para caminos rurales de Tabasco**

**DESARROLLO TECNOLÓGICO**

para obtener el grado de:

**Maestra en Arquitectura y Ambiente**

**Presenta:**

**Ing. Diana Solís Cortazar**

**Directora:**

**Dra. Haydee Pérez Castro**

**Codirector:**

**Dr. Eddy González García**



**DIRECCIÓN**

Cunduacán, Tabasco

Marzo de 2026

## Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Cunduacán, el día 26 del mes de febrero del año 2026, el que suscribe Diana Solís Cortazar alumna del Programa de Maestría en Arquitectura y Ambiente con número de matrícula 222D28002, adscrito a la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autora del Desarrollo Tecnológico presentado para la obtención del grado de Maestra y titulada Mezcla Asfáltica a Base de Residuos de Construcción y Demolición para Caminos Rurales de Tabasco dirigida por la Dra. Haydee Pérez Castro.

### DECLARO QUE:

El Desarrollo Tecnológico es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita. Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente

Villahermosa, Tabasco a 26 de febrero 2026.

Diana Solís Cortazar

---

Nombre y Firma



UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División  
Académica  
de Ingeniería  
y Arquitectura



2026  
año de  
Margarita  
Maza

## DIRECCIÓN

**OFICIO:** DAIA/DIR/318/2026  
**FECHA:** 24 de febrero de 2026  
**ASUNTO:** Autorización de  
impresión definitiva

**ING. DIANA SOLÍS CORTAZAR**  
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN ARQUITECTURA Y AMBIENTE  
**PRESENTE**

En virtud de haber elaborado su trabajo de DESARROLLO TECNOLÓGICO denominado:

**"Mezcla asfáltica a base de residuos de construcción y demolición para caminos rurales de Tabasco"**

Para obtener el grado de **Maestría en Arquitectura y Ambiente** y en el cual ha tenido como Directora a la Dra. Haydee Pérez Castro y su Co-director el Dr. Eddy González García.

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Sin otro particular, le envió un afectuoso saludo.

**ATENTAMENTE**

**DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ**  
**DIRECTORA**

c.c.p. Archivo  
DRA'DMFM / MCA'RACT



**DIRECCIÓN**



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División  
Académica  
de Ingeniería  
y Arquitectura



**JEFATURA DE POSGRADO**

Cunduacán, Tabasco a 04 de noviembre de 2025.

**MEM/AP-DAIA/213/2025**

PARA **DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ**  
DIRECTORA DE LA DAIA  
DE: COMISIÓN SINODAL  
ASUNTO: APROBACIÓN DE IMPRESIÓN DE DESARROLLO TECNOLÓGICO

Una vez hecha la revisión detallada del Desarrollo Tecnológico denominado:

**"Mezcla asfáltica a base de residuos de construcción y demolición para caminos rurales de Tabasco"**

Desarrollado por el Ing.: **Diana Solís Cortazar**, de la **Maestría en Arquitectura y Ambiente**, le comunicamos que aceptamos la impresión del trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

**COMITÉ SINODAL**

**DR. JORGE FLORES GONZÁLEZ**  
PRESIDENTE

**DR. LUIS MANUEL PÉREZ SÁNCHEZ**  
SECRETARIO

**DRA. HAYDEE PÉREZ CASTRO**  
VOCAL 1

**DR. JUAN EDILBERTO SÁNCHEZ FALCONI**  
VOCAL 2

**DRA. AIDA LÓPEZ CERVANTES**  
VOCAL 3

## Carta de Cesión de Derechos

Cunduacán, Tabasco a 02 marzo de 2026.

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTORA y AUTORES en la producción, creación y/o realización de la obra denominada Mezcla Asfáltica a Base de Residuos de Construcción y Demolición para Caminos Rurales de Tabasco.

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

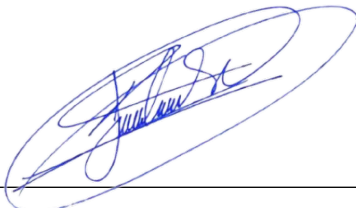
### COLABORADORES

Alumna: Diana Solís Cortazar

Directora: Haydee Pérez Castro

Codirector: Eddy González García

### TESTIGOS



Dr. Juan Carlos Solís Cortazar



Lic. Melba del Carmen Reyes Chable

**Nombre del artículo:**

Mezcla asfáltica a base de residuos de construcción y demolición para caminos rurales de tabasco

**Autores:**

Ing. Diana Solís Cortazar

Dra. Haydee Pérez Castro

Dr. Eddy González García

Dr. Juan Carlos Solís Cortazar

**Resumen:** El presente estudio analiza el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica diseñada para caminos rurales, en la cual se sustituye parcialmente la grava natural por residuos de construcción y demolición (RCD). La investigación se enfoca en evaluar los parámetros de estabilidad y flujo de la mezcla, conforme a las especificaciones de las normas mexicanas N.CMT.4.04/17 y N.CMT.04.05.003/16. Se empleó grava con tamaño nominal de  $\frac{3}{4}$ ".

La metodología incluyó el diseño de la mezcla, la fabricación de especímenes cilíndricos y su caracterización mediante el ensayo Marshall. Los especímenes presentaron un diámetro constante de 10.16 cm y espesores entre 6.16 y 6.81 cm.

Los resultados indican que la mezcla con RCD alcanzó una estabilidad de 1,953 kg, superando ampliamente el mínimo normativo de 454 kg, lo que evidencia un desempeño mecánico superior y valida el uso de RCD como sustituto parcial de agregados naturales. El flujo registrado fue de 3.1 mm, dentro del rango permitido. El contenido de vacíos en la mezcla compactada (VMC) fue de 3.0 %, en conformidad con los criterios técnicos, mientras que los vacíos entre agregados minerales (VAM) alcanzaron 13.7 %, ligeramente por encima del límite de 13 %, sin afectar negativamente el rendimiento de la mezcla.

Estos hallazgos respaldan la viabilidad técnica del uso de RCD en mezclas asfálticas para caminos rurales, al demostrar un comportamiento mecánico adecuado frente a las exigencias normativas.

**Palabras clave:** Agregado pétreo sustituto, mezcla asfáltica, camino rural, residuos de construcción y demolición.

**Institución de adscripción de cada autor:**

Ing. Diana Solís Cortazar: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Dra. Haydee Pérez Castro: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Dr. Eddy González García: Universidad Autónoma de Chiapas

Dr. Juan Carlos Solís Cortazar: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

**Enviado a:** Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability

**Nombre de la editorial:** Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

**Fecha de envío:** 28 de enero de 2026

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## Agradecimientos

La culminación de esta etapa académica representa mucho más que la finalización de un programa de estudios; simboliza un camino lleno de aprendizajes, retos superados y el acompañamiento invaluable de personas que, de distintas maneras, han contribuido a que este logro sea posible.

En primer lugar, agradezco profundamente a Dios, por darme la vida, la fortaleza, la salud y la perseverancia necesaria para recorrer este camino. Su guía ha sido fundamental en los momentos de dificultad, permitiéndome encontrar siempre la claridad y la motivación para seguir adelante.

A mis padres, les expreso mi más sincero y profundo agradecimiento. Gracias por su apoyo incondicional, por confiar en mí incluso en los momentos en los que el camino parecía más complicado, y por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo, la disciplina y la constancia. Este logro también les pertenece, pues sin su amor, sacrificio y acompañamiento constante, nada de esto habría sido posible.

A mis hermanos, gracias por su apoyo, por sus palabras de ánimo y por motivarme siempre a continuar avanzando. Su confianza en mí y su presencia en mi vida han sido una fuente permanente de fuerza e inspiración para no rendirme y seguir luchando por alcanzar mis metas.

A mis amigos, quienes han sido parte importante de este proceso, les agradezco por su compañía, comprensión y apoyo a lo largo de esta etapa.

A todas las personas que de una u otra forma formaron parte de este proceso, les expreso mi más sincero agradecimiento.

## ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	6
II. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	15
Antecedentes históricos del reciclaje de residuos de construcción.....	15
Beneficios y uso de residuos de construcción y demolición.....	17
Diseño de mezclas asfálticas.....	20
III. METODOLOGÍA.....	24
IV. RESULTADOS Y DISCUSION.....	30
Resultados.....	30
Discusión.....	51
V. CONCLUSIONES.....	55
VI. Referencias.....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Residuo de Construcción y Demolición (RCD) de Concreto Hidráulico .....	6
Figura 2. RCD Tirado sobre la Laguna de las Ilusiones .....	7
Figura 3. Banco de Materiales Pétreos .....	8
Figura 4. Carretera Rural Deteriorada.....	11
Figura 5. Dresde Alemania, 1945.....	17
Figura 6. Estructura de una Carretera hecha de Mezcla Asfáltica .....	21
Figura 7. Diagrama de la Metodología .....	25
Figura 8. RCD de Concreto Hidráulico .....	31
Figura 9. Trituración .....	31
Figura 10. Inmersión del RCD .....	32
Figura 11. Peso Sumergido.....	32
Figura 12. Peso Superficialmente Seco .....	32
Ilustración 13. Peso Seco.....	32
Figura 14. Tamizado de Grava.....	35
Figura 15. Prueba Desgaste .....	35
Figura 16. Prueba de Desgaste .....	36
Figura 17. Tamizado de Grava Artificial .....	37
Ilustración 18. Mezcla de Arena y Grava.....	38
Figura 19. Granulometría densa para material e $\frac{3}{4}$ " .....	41
Figura 20. Cálculos para obtener el número de pastillas a realizar.....	42
Figura 21. Perdida de Humedad .....	42
Figura 22. Mezcla de Agregados .....	42
Figura 23. Mezcla Asfáltica .....	44
Figura 24. Mezcla Asfáltica .....	44
Figura 25. Compactación de la Pastilla .....	45
Figura 26. Pastilla de RCD .....	46
Figura 27. Pastilla de RCD .....	46
Figura 28. Máquina Marshall.....	47

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de Carreteras de Tabasco.....	10
Tabla 2. Requisitos de Granulometría.....	30
Tabla 3. Granulometría de Agregado Grueso .....	38
Tabla 4. Granulometría del agregado fino.....	39
Tabla 5. Material Pétreo para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa .....	40
Tabla 6. Porcentaje de Cemento Asfáltico a Utilizar .....	43
Tabla 7. Resultados de Estabilidad y Flujo de cada Pastilla a través de la Máquina Marshall.....	48
Tabla 8. Resultados del Diseño de Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa por el Método Marshall.....	49
Tabla 9. N.CMT.4.04/17 Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas.....	51
Tabla 10. Comparación de los Datos Obtenidos y las Especificaciones de N.CMT.4.05.003/16 .....	52

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la contaminación ambiental se manifiesta de forma más evidente y generalizada que en décadas anteriores. Entre los factores que contribuyen significativamente a este problema se encuentran los residuos de construcción y demolición (RCD), cuya presencia se ha incrementado considerablemente en los últimos años.

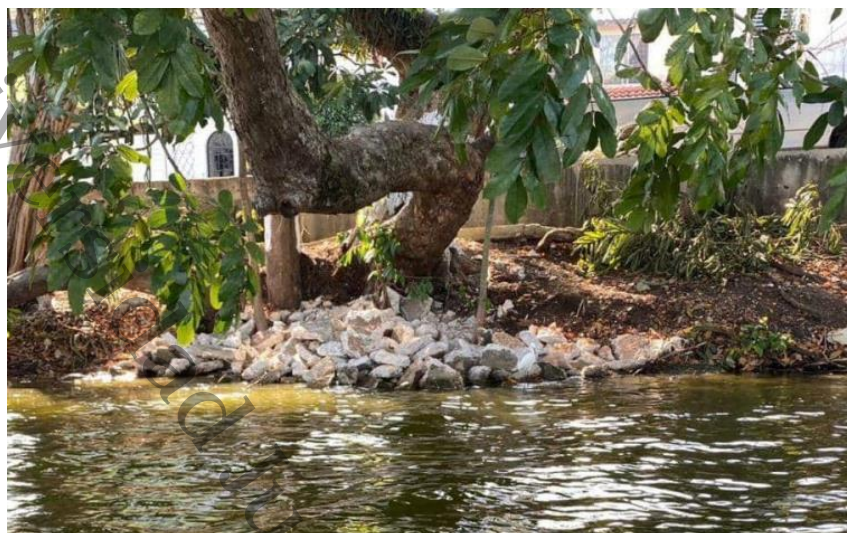
En México, la generación diaria de RCD presenta una tendencia ascendente. Lamentablemente, la mayor parte de estos residuos se maneja de manera inadecuada, ya que suelen depositarse en lotes baldíos, calles, ríos y basureros clandestinos, como se observa en las Figuras 1 y 2.

*Figura 1. Residuo de Construcción y Demolición (RCD) de Concreto Hidráulico*



*Nota. Adaptado de RCD encontrados a orillas de la carretera estatal Cunduacán-Comalcalco, Tabasco. Por Diana Solís Cortazar, 2022.*

Figura 2. RCD Tirado sobre la Laguna de las Ilusiones



*Nota.* Adaptado de *Denuncia ambientalista el relleno de la Laguna de Las Ilusiones con escombros ante obras de reparación de calles*, por Juan Román Gallegos, 2022, Diario presente (<https://www.diariopresente.mx/villahermosa/denuncia-ambientalista-el-relleno-de-la-laguna-de-las-ilusiones-con-escombros-ante-obras-de-reparacion-de-calles/326011>).

La acumulación de RCD en lugares inadecuados genera impactos negativos al medio ambiente. En el país se producen aproximadamente 17,000 toneladas diarias de residuos de construcción, de las cuales 8,330 toneladas corresponden a concreto y escombros (Expansión, 2020).

La actividad constructiva genera impactos ambientales durante todo su ciclo de vida. En la fase de eliminación de residuos, que inicia al concluir la vida útil de las obras civiles o como resultado de modificaciones y reparaciones, se producen grandes cantidades de escombros. Cuando estos residuos no se gestionan adecuadamente, contaminan el suelo, el aire y el agua, afectando la flora, la fauna y la salud humana.

Las obras civiles como carreteras, edificios, puentes o parques, pueden generar múltiples impactos ambientales desde su construcción hasta su mantenimiento. Entre los

materiales más utilizados se encuentra la grava, empleada como agregado en la fabricación de concreto. Su alta demanda ha provocado una explotación intensiva de ríos, canteras y bancos pétreos, afectando el equilibrio ecológico y el paisaje natural (Figura 3).

Figura 3. Banco de Materiales Pétreos



*Nota:* Adaptado de *extracción de tierra, piedra, o tezontle entre otros, los cuales son recursos naturales*, por José Almanza, 2019, El Sol de Irapuato (<https://www.elsoldeirapuato.com.mx/incoming/abrio-55-expedientes-a-bancos-de-materiales-3260524.html>).

De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2022), cada año se utilizan a nivel mundial cerca de 50 mil millones de toneladas de arena y grava, lo que convierte a estos materiales en el segundo recurso más consumido después del agua. Para fines de esta investigación, el material de interés es la grava, un recurso mineral no renovable (PNUMA, 2014).

En México, la grava se emplea principalmente en la elaboración de concreto hidráulico para edificaciones y pavimento asfáltico para carreteras. Las vías de comunicación, aunque esenciales para el desarrollo económico y social, implican un consumo elevado de este material.

En el caso del estado de Tabasco la red carretera cuenta con aproximadamente 10,710 km, de los cuales 5,831 km están pavimentados con mezcla asfáltica, según el Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica [INEGI] (2011), ver Tabla 1, mientras que 4,879 km están hechos de carreteras revestidas y terracería.

Las carreteras se clasifican de la siguiente manera:

Tipo de camino: ET – A: Sus características geométricas y estructurales permiten la operación de todos los vehículos autorizados con las máximas dimensiones, capacidad y peso.

Tipo de camino B: Abraca la red primaria (aquellas que prestan un servicio de comunicación interestatal, además de vincular el tránsito).

Tipo de camino C: Incluye la red secundaria, es decir carreteras dentro del ámbito estatal con longitudes medias, estableciendo conexiones con la red primaria.

Tipo de camino D: Red alimentadora, prestan servicio dentro del ámbito municipal con longitudes

relativamente cortas, la cual genera conexiones con la red secundaria (Instituto Mexicano del Transporte, 2023). Esta última es en la que se centra el presente trabajo de investigación.

Tabla 1. Clasificación de Carreteras de Tabasco

Tipos de camino		Kilómetros
Troncal federal	Pavimentada	596
	a/	
Alimentadoras estatales	Pavimentada	3390
	a/	
	Revestida	
Caminos rurales	Pavimentada	1845
	Revestida	1919
	Terracería b/	867
	Brechas mejoradas	143
Total estatal		10 710

a/ comprende caminos de dos, cuatro o más carriles

b/ se refiere a tramos en mejoramiento, ampliación o en construcción.

Nota: Adaptado de *Longitud de la red carretera, según el tipo de camino*, por INEGI, 2011, Cuéntameinegi(<https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/tab/economia/infraestructura.aspx?tema=me&>).

Cabe señalar que el 80% de las carreteras de Tabasco presentan un estado de deterioro significativo debido a fisuras, hundimientos, exudación y baches (Diario Presente, 2019), afectando principalmente a zonas rurales, ver Figura 4.

Figura 4. Carretera Rural Deteriorada



*Nota. Adaptado de El la imagen se muestra un camino ubicado en una de las rancherías del municipio de Cunduacán, donde se puede observar las malas condiciones en las que se encuentra. Por Diana Solís Cortazar, (2022).*

El presente trabajo propone una solución sustentable que atiende tanto la primera como la última fase del ciclo de vida de la edificación, es decir, al impacto ambiental provocado por el suministro de materia prima y al manejo de los RCD, para lo cual se desarrolló un procedimiento de reciclaje de RCD para sustituir los agregados naturales por agregados reciclados en la elaboración de la mezcla asfáltica para caminos rurales. Esta alternativa permitiría:

- Dar una segunda vida útil a los residuos,
- Evitar su disposición en sitios no controlados, y

- Reducir la contaminación del aire, agua y suelo, mejorando así la calidad de vida de la población.

En Tabasco, la mayoría de las carreteras están construidas con concreto asfáltico (INEGI, 2011), Aunque este material es más económico que el concreto hidráulico, tiene menor durabilidad, lo que implica mantenimiento frecuente y, por tanto, una mayor explotación de agregados naturales.

De acuerdo con la Secretaría de Comunicaciones y Transporte, la mezcla asfáltica en caliente utilizada en el estado está compuesta por 95 % de agregados pétreos y 5 % de cemento asfáltico (Rodríguez, 2004), siendo los agregados el componente de mayor volumen y valor.

Es pertinente considerar la forma de mitigar los daños ocasionados al medio ambiente por concepto de extracción de materias primas y construcción de obras civiles, al aprovechar los recursos disponibles. En este sentido la reutilización de RCD a través de mezclas de concreto asfáltico permitirá tener materia prima disponible para la construcción, dándole un segundo uso y disminuyendo el volumen de almacenamiento, generando impactos positivos al medio ambiente.

Por ello, es importante que los recursos naturales como la grava, empiecen a conservarse de una manera más segura, evitando que su explotación impacte negativamente al ambiente y con ello perder gran riqueza del ecosistema.

Este trabajo tiene por objetivo general:

Desarrollar un diseño de mezcla asfáltica a base de residuos de construcción y demolición (RCD) como sustituto de agregados naturales (grava) en la elaboración de la mezcla asfáltica para caminos rurales de Tabasco.

Asimismo, se desglosan los objetivos específicos:

- Desarrollar un diseño de mezcla asfáltica sustituyendo la grava por RCD bajo lo que dicta la norma N.CMT.4.04/17 *Materiales pétreos para mezclas asfálticas*, con el fin de cumplir con los requisitos de calidad de los agregados.
- Caracterizar el agregado pétreo propuesto (grava) mediante las pruebas de granulometría y desgaste para la elaboración de la mezcla asfáltica.
- Ejecutar las pruebas de estabilidad y flujo, a las pastillas de concreto asfáltico elaboradas con RCD para probar la factibilidad del uso de grava artificial dentro de la mezcla asfáltica convencional.

Por tanto, la hipótesis que se plantea es la siguiente:

Los valores de estabilidad y flujo de una mezcla asfáltica a base de RCD son equiparables a una mezcla elaborada con agregado natural para caminos rurales de Tabasco teniendo como referencia los criterios de la Norma N.CMT.4.04/17 *Materiales pétreos para mezclas asfálticas* apoyándose en M.MMP.4.05.034 *Método Marshall para mezclas asfálticas de granulometría densa*.

Este proceso se realizará a través de las normas N.CMT.4.04/17 *Materiales pétreos para mezclas asfálticas* y N.CMT.4.05.003/16 *Materiales asfálticos, aditivos y mezclas*, para

conocer las características que debe tener el agregado para la mezcla asfáltica, posteriormente realizar los ensayos de la mezcla asfáltica.

Dentro de la revisión de la literatura, el presente trabajo tiene una estructura que contempla 3 capítulos, en el primero se abordan los antecedentes históricos del reciclaje de RCD contemplados desde la segunda guerra mundial, en el segundo se habla de los beneficios de los residuos sólidos y como el reutilizarlo trae ventajas tanto a la infraestructura como al medio ambiente, por último en el tercer se define que es la mezcla asfáltica, sus características y los diferentes diseños por los cuales se puede realizar esta mezcla.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

El concreto sin duda alguna, trajo un sinnúmero de beneficios a la infraestructura que el ser humano realiza para acondicionar el nivel de vida de la población, lo cual conlleva al mejoramiento de obras civiles que generan comodidad tanto de traslado, así como viviendas más seguras, entre otras, pero la creación del concreto también ha aumentado un desequilibrio a los ecosistemas, con la explotación de recursos naturales que se generan para su elaboración, también contribuye a la contaminación ambiental cuando llega al final de su vida útil o bien, es reemplazado por uno nuevo convirtiéndose en RCD o escombro. La revisión de la literatura de este documento, está integrada por antecedentes históricos del reciclaje de residuos de construcción, beneficios y uso de residuos de construcción y demolición, y mezcla asfáltica, mismos que se muestran a continuación.

### **Antecedentes históricos del reciclaje de residuos de construcción**

El concreto es uno de los materiales más producido y utilizado en el mundo dentro de la construcción de obras civiles, pero también es un generador de grandes volúmenes de residuos sólidos asociados a los procesos de demolición y desperdicio (Martínez Molina W. y otros, 2015), que mal manejados impiden una adecuada gestión, produciendo emisiones perjudiciales para el medio ambiente. La idea de reciclar residuos sólidos de construcción, se ha realizado desde muchos años atrás, tal es el caso del escombro a base de concreto hidráulico como material para la edificación, esta acción a su vez representa un beneficio al medio ambiente.

En Estados Unidos y Europa surge esta idea de reciclar RCD después de la segunda guerra mundial, estos países se enfrentaron al problema de atender sus ciudades destruidas con un grave problema de acumulación de escombros, entonces se ha comprendido la importancia ecológica y económica del reciclaje.

El empleo del residuo de la construcción, concreto reciclado, viene desde tiempos de la segunda guerra mundial, en el que los europeos enfrentaban grandes conflictos con la acumulación de escombros ocasionado por las ciudades destruidas a causa de los bombardeos, ver Figura 5, que cada vez iba en aumento como resultado de la guerra, causa por la cual los europeos consideraron la manera de reutilizar todo el residuo como material de construcción para la reconstrucción de sus ciudades.

Es en este periodo cuando por primera vez se da inicio a su aprovechamiento para la reconstrucción, obteniendo resultados favorables, lo que indicó que efectivamente si era posible este reciclaje. Durante esa época los residuos se utilizaban en la fabricación del concreto para la construcción, tal es el caso de Alemania y Reino Unido, quienes fueron unos de los países más devastados; sus ciudades se encontraban destruidas casi en su totalidad debido a los bombardeos, generando grandes cantidades de escombros que fueron rescatadas para restaurar y erigir edificios. Este hecho se dio a conocer en otras ciudades, quienes replicaron esta actividad. (Martínez Molina W. y otros, 2015).

Figura 5. Dresde Alemania, 1945



*Nota.* Adaptado de *Los bombardeos destruyeron el centro de la ciudad de Dresde*, por Getty IMAGES, 2020, BBC News (<https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-51475999>).

Este hecho histórico impulsó a que muchos otros países se interesaran en reciclar este material.

### **Beneficios y uso de residuos de construcción y demolición**

Actualmente existen diversos estudios e investigaciones que amplían un poco más la vista respecto a los beneficios que se pueden obtener al reutilizar un material considerado como desecho.

Vásquez, Botero y Carvajal (2015), mencionan que la construcción es responsable del consumo del 40% de materias primas a nivel mundial, que equivale a 3000 millones de toneladas por año, además señala que para la energía mundial al menos un 20% es consumida durante los procesos constructivos de obras civiles, como elaboración de materiales y demolición de construcciones. Lo que indica que alrededor del 40% es el consumo de explotación de materias primas que se generan a consecuencias de

construcciones edilicias, por tanto, reciclar los residuos sólidos como materiales para construcción contribuiría a disminuir el consumo de materias prima como arena y grava, estudios han comprobado que es factible reutilizar el RCD o escombros para elaborar concreto hidráulico tal como se menciona a continuación:

Díaz (2018), en su investigación logró dar una nueva valoración a estos residuos de construcción conocidos como desechos, reduciendo el impacto ambiental que se genera cuando se extrae el agregado virgen y logrando un ahorro económico, concluyendo que sus resultados fueron favorables al tener la muestra propuesta hecha a base de RCD, la misma resistencia de las elaboradas a base del agregado virgen en una mezcla de concreto hidráulico.

Por otra parte, Martínez Molina W. y otros (2015), señalan que la generación de residuos sólidos de concreto hidráulico se transforma en un problema medio ambiental, es por ello que plantean aprovecharlo para generar concreto hidráulico reciclado, teniendo como consecuencias abatir los costos, disminuir la contaminación y abaratar la edificación, concluyendo que reciclar concreto resuelve la falta de agregados pétreos y la protección de las canteras.

Es importante tener un manejo de los residuos sólidos porque cada día la industria de la construcción aumenta y con ello se generan grandes volúmenes de escombros. Cabrera (2017), publica en una investigación un manual para el procedimiento de la reutilización de los residuos de construcción, en el cual se desarrolla un tema específico sobre el concreto reciclado como material de construcción de alta calidad, así como promover el reciclaje o recuperación de los residuos productos de demoliciones y reducir la utilización

de nuevos agregados, concluyendo que el reaprovechamiento de concreto demolido posee importantes atractivos frente a la utilización de materias primas naturales, solucionando paralelamente la eliminación de estos materiales y reduciendo la cantidad de recursos primarios a extraer.

En cuanto a mezclas asfálticas se tiene estudios donde ha sido probado el uso de residuos de construcción y demolición dentro de la mezcla asfáltica, algunos de estos trabajos son:

(Torres y otros, 2014), Realizaron un trabajo de investigación sobre el uso de residuos de construcción y demolición dentro de la elaboración de la mezcla asfáltica empleada para bacheo sometida a distintas pruebas de laboratorio, comprobando finalmente que efectivamente si es factible ya que los resultados obtenidos quedaron dentro del rango aceptado por la norma, aunado a esto integraron un análisis de costo por metro cúbico en donde se comprueba que esta mezcla a base de residuos es ligeramente más económica que la convencional.

La generación de residuos de construcción y demolición es considerada un problema a nivel mundial que afecta negativamente al medio ambiente. Por otra parte, el fenómeno del acuaplaneo de los pavimentos afecta negativamente la seguridad vial. Ante este escenario Bastidas Martínez, Infante Rodríguez, & Torres Daza, 2020, realizaron un trabajo donde se evaluó la aplicación de agregados reciclados de concretos para capas de pavimentos drenantes, concluyendo que la aplicación del agregado reciclado de concreto cumple con los requisitos mínimos para la fabricación de mezclas asfálticas drenantes, excepto el desgaste por la acción del sulfato de sodio y el desgaste en la

máquina de los ángeles, sin embargo, tratamientos adicionales pueden ser realizados sobre el agregado reciclado de concreto con el objetivo de minimizar el desgaste a la abrasión y a la acción química.

Estas investigaciones nos indican que la reutilización de materiales de demolición como el concreto hidráulico, son sustitutos satisfactorios dentro de la elaboración de un nuevo concreto reciclado utilizado como material para la construcción, trayendo ventajas al medio ambiente en la fase de reutilización de estos residuos productos de demolición.

### **Diseño de mezclas asfálticas**

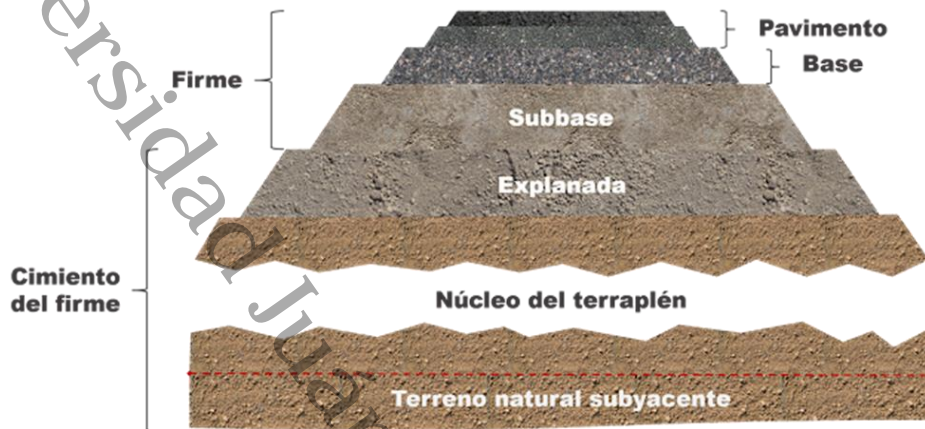
En este tema se abordan las definiciones de mezcla asfáltica en frío y caliente, diseño de mezcla asfáltica y método Marshall, con el fin de uniformizar criterios y conocimientos relativos a la terminología específica de esta investigación.

En la actualidad el asfalto tiene gran peso en materia de infraestructura como pavimentar carreteras, pistas de aeropuerto y autovías, además de también ser utilizado para impermeabilizantes de obras civiles. En lo que respecta a la pavimentación de carreteras se debe realizar previamente, un diseño de mezclas asfálticas como se describe más adelante en el marco de esta investigación.

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de firmes, pueden ser capas de rodamiento o capas inferiores, la función de estos es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de estas vías, con ello facilitar la circulación al tránsito motorizado y no motorizado, ver Figura 6. Dicho en palabras de

Alejandro Padilla Rodríguez en el año 2004 una mezcla asfáltica es la combinación de materiales pétreos como grava y arena, mezclado con cemento asfáltico.

Figura 6. Estructura de una Carretera hecha de Mezcla Asfáltica



Nota: Adaptado de *Pavimento o firmes, ¿una cuestión solo de términos?*, por Ricardo Bardasano González, 2016, PaveIng — el asombroso mundo de la ingeniería de pavimentos (<https://paveing.blogspot.com/2016/04/terminos-pavimento-o-firme-ii.html>).

La clasificación de la mezcla asfáltica se da de acuerdo a su temperatura, es decir, mezcla asfáltica en caliente y en frío, para esta investigación se utiliza la mezcla asfáltica en caliente la cual es la más predominante en el estado de Tabasco. La mezcla en frío es la elaborada con emulsión asfáltica y se coloca en obra a temperatura ambiente (Rodríguez, 2004).

La mezcla en caliente es la que se realiza a una temperatura de 150°C, utilizando cemento asfáltico y materiales pétreos en una planta mezcladora estacionaria o móvil, provista del equipo necesario para calentar los componentes de la mezcla para ser colocada en sitio a una temperatura de 110°C (Alamilla, 2020).

En su mayoría las mezclas asfálticas se utilizan principalmente para las construcciones de carreteras pavimentadas.

En el informe que realizó el Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA, 2015), se define al diseño de mezclas como una combinación ideal de agregados y contenido de asfalto, con esto se da inicio a el diseño de la mezcla, que tiene por objetivo lograr propiedades volumétricas adecuadas en la carpeta asfáltica ya que de esto depende el nivel de servicio que proporcione la carretera.

La práctica de diseño de mezclas asfálticas ha recurrido a diferentes métodos para establecer un diseño óptimo en laboratorio, existen diferentes métodos para realizarlas como lo son; The Hubbard-Field (1920), Método Marshall (1930), Método Hveem (1930), Método de la Western Association of State Highway on Transportation Officials (WASHTO) (1984), Metodo de Asphalt Aggregate Mixture Analysis System (AAMAS) (1987), Método Superpave (1993).

Los más conocidos el método Hveem, Superpave y Marshall, siendo este último uno de los más utilizados y el de interés particular para este trabajo.

El método Hveem de mezclas de pavimentación fue desarrollado por Francis N. Hveem, Ingeniero de Materiales e Investigación con la División de Carreteras de California. El propósito es el determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados, también provee información sobre las propiedades de la mezcla asfáltica final, este método solo se aplica a mezclas asfálticas en caliente de pavimentación que usan cemento asfáltico clasificado por viscosidad o penetración, y que contienen agregados con tamaños máximos de 25 mm o menos. Este procedimiento de diseño continúa siendo el principal método de diseño usando en California y en algunos otros estados de los Estados Unidos (Cueva del ingeniero civil, 2010).

El método de diseño Superpave fue establecido en 1987 por el Congreso de los Estados Unidos, representa una tecnología de tal manera provista que pueda especificar cemento asfáltico y agregado mineral, desarrollar diseños de mezclas asfálticas; analizar y establecer predicciones del desempeño del pavimento. Consiste en la evaluación los componentes de la mezcla asfáltica en forma individual (agregado mineral y asfaltos) y su interacción cuando están mezclados (Garnica Anguas y otros, 2004).

El siguiente es el método Marshall, el cual se utilizó para el desarrollo de este trabajo. Radica en el diseño de mezclas para pavimentación que fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi, es únicamente aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") (Anguas, 2004).

Los dos aspectos principales del método de diseño son, la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados. La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que un espécimen estándar desarrollará a 60 °C cuando es ensayado. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (1/100") que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad (Garnica Anguas y otros, 2004).

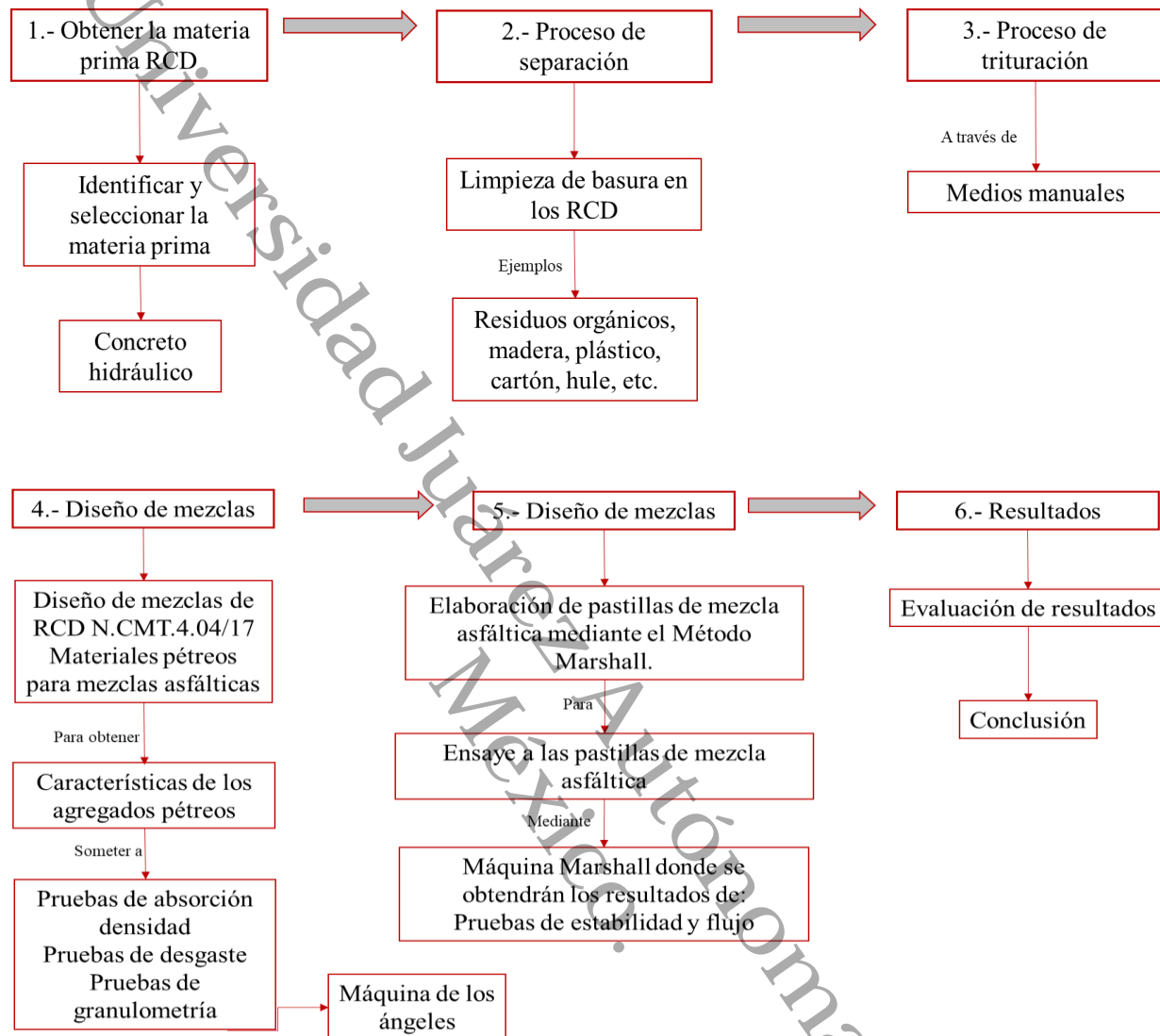
### III. METODOLOGÍA

La presente investigación es de carácter cuantitativo, es decir, se centra en la recolección y análisis de datos numéricos sobre variables, tal como lo señala (Pita Fernández, 2002), Para este trabajo, se determinaron variables específicas que fueron estudiadas a través de un desarrollo estructurado en seis pasos, los cuales se presentan de manera gráfica y textual, y fueron establecidos con base en los alcances de los objetivos de la investigación.

El estudio se realizó bajo un enfoque experimental, en el cual los residuos de construcción y demolición (RCD) fueron reciclados mediante un proceso de trituración manual, seguido de pruebas de granulometría para determinar el tamaño de la grava artificial destinada a reemplazar la grava natural. Posteriormente, se elaboraron especímenes cilíndricos de mezcla asfáltica utilizando diferentes granulometrías, ver Figura 7. Conforme a lo establecido en la norma N-CMT-4-04/17 *Materiales pétreos para mezclas asfálticas*

De acuerdo con Anguas y otros (2004), el método Marshall es el más utilizado en la práctica mexicana, por lo que el diseño de mezclas se realizó siguiendo este procedimiento.

Figura 7. Diagrama de la Metodología



## Descripción de la metodología

### Paso 1.- Obtención de agregados provenientes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

Para este punto, se establece como RCD el concreto hidráulico proveniente de banquetas, debido a que estudios realizados en EEUU, lo recomiendan como material prioritario por la facilidad de extracción comparada con el concreto armado y por no tener

contaminantes como el yeso o la pintura (Martínez Molina W. y otros, 2015). Una estrategia que se propuso para la localización del material, fue la visita al ayuntamiento de la localidad, con el fin de solicitar la ubicación de los sitios en donde se esté realizando obras de demolición.

### **Paso 2.- Proceso de depurar**

Para este paso se realizó la limpieza al RCD, retirando plásticos, papel, madera, hule, acero, etc., haciendo uso de herramientas como: escoba, guantes y pala, posteriormente se continuó con la trituración.

### **Paso 3.- Método de trituración**

En esta etapa se utilizó un método de trituración manual. Si bien este proceso también puede llevarse a cabo mediante equipos como trituradoras de mandíbulas, de cono, de impacto, entre otros (Hernández y otros, 2017), para los fines de este trabajo se optó por la trituración manual.

Es importante señalar que, en la elaboración de mezclas asfálticas, se emplean diferentes tamaños de grava, que pueden variar desde 50 mm (el tamaño máximo) hasta 0.075 mm (el tamaño mínimo). En este trabajo, el rango de tamaños obtenidos fue de 19 mm como el tamaño más grande hasta 0.075 mm como el más fino, predominando la grava de 19 mm en la mezcla.

Para llevar a cabo este paso del procedimiento, se utilizaron herramientas manuales como el marro (6 libras) y el zapapico.

Para el desarrollo de este procedimiento se utilizó la báscula digital de 100 kg.

#### **Paso 4. Diseño de la mezcla asfáltica a través del método Marshall**

La mezcla empleada se diseñó a partir de la norma N-CMT-4-04/17 (Secretaría de Comunicaciones y Transportes SCT., Instituto Mexicano del Transporte ITM., 2017), y N.CMT.04.05.003/16 (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, 2016), que describen los requisitos de calidad de los materiales pétreos que se deben utilizar en la elaboración de mezclas asfálticas, para este caso, se buscó la relativa a tránsito ligero denominada como de granulometría densa. Además, se complementa con los manuales de “Granulometría de materiales pétreos para mezclas asfálticas” M.MMP.4.04.002 (Secretaría de Comunicaciones y Transporte e Instituto Mexicano del Transporte, 2002), *Densidades relativas y absorción de materiales pétreos para mezclas asfálticas* M.MMP.4.04.003 (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, 2018), *Desgaste mediante la prueba de los Ángeles de materiales pétreos para mezclas asfálticas* M.MMP.4.04.006 (Secretaría de Comunicaciones y Transporte e Instituto Mexicano del Transporte, 2002), *método Marshall para mezclas asfálticas de granulometría densa* M.MMP.4.05.034 (Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte, Instituto Mexicano del Transporte, 2023), en donde se especifican las pruebas de absorción, densidad, desgaste y granulometría.

Para determinar el desgaste de la grava propuesta, se realizó el ensayo de abrasión utilizando la Máquina de Los Ángeles, con las siguientes características:

- Marca: Pinzuar

- Capacidad de carga: Hasta 10000 g de material y 5000 g de carga abrasiva (esferas).
- Velocidad de rotación del tambor: 30 a 33 rpm.
- Operación: 110 VAC / 60 Hz.

La muestra ensayada corresponde a grava obtenida a partir de residuos de concreto y demolición.

### **Paso 5. Elaboración de especímenes**

Para este paso se utilizó una balanza Scout analítica, 420 g x 0,1g, marca Ohaus. Los especímenes se realizaron con base en el manual (Secretaría de Comunicaciones y Transporte e Instituto Mexicano del Transporte, 2023), haciendo un total de 18 pastillas especificadas, dejándolas endurecer por 24 horas, posteriormente fueron compactadas con el Compactador Marshall manual, con las siguientes características:

- Nombre: Compactador manual de asfalto Marshall máquina de prueba de compactación.
- Modelo: MC-M101
- Tamaño de la muestra: 101mm
- Especificación: Acero inoxidable grueso.

Cada muestra fue etiquetada con el fin de evitar confusiones durante el registro y análisis de los datos.

Posteriormente, una vez realizadas las pastillas, se le hizo volumetría a cada una para enseguida continuar a ensayarlas

### **Paso 6.- Evaluación de resultados**

En este paso, una vez ensayadas las pastillas asfálticas se procede a anotar los datos de estabilidad y flujo arrojados por la máquina Marshall para ser comparados con los datos que tienen como referencia las Normas N-CMT-4-04/17 (Secretaría de Comunicaciones y Transportes SCT., Instituto Mexicano del Transporte ITM., 2017), *N.CMT.04.05.003/16* (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, 2016), apoyándose en *M.MMP.4.05.034* (Secretaría de Comunicaciones y Transporte e Instituto Mexicano del Transporte, 2023).

Se utilizó una máquina Marshall del tipo universal multivelocidad digital, modelo S215A, diseñada específicamente para ensayos en materiales asfálticos y suelos.

Especificaciones técnicas del equipo:

- Modelo del bastidor de carga: S212M
- Capacidad máxima: 50 kN
- Tipo: Bastidor universal multivelocidad
- Interfaz: Pantalla táctil integrada
- Aplicaciones compatibles: CBR, compresión sin confinar, triaxial rápido, ensayo Marshall, tracción indirecta.

A continuación, se muestra la Tabla 2, con los requisitos de granulometría del material pétreo, establecidos en la norma

Tabla 2. Requisitos de Granulometría

Granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa						
Malla		Tamaño nominal del material pétreo (in)				
Abertura mm	Designación	(3/8)	(1/2)	(3/4)	1	(1,1/2)
		Porcentaje que pasa (en masa)				
50	2 in					100
37,5	1,1/2 in				100	90 - 100
25	1 in			100	90 - 100	74 - 90
19	3/4 in		100	90 - 100	79 - 92	62 - 83
12,5	1/2 in	100	90 - 100	72 - 89	58 - 81	46 - 74
9,5	3/8 in	90 - 100	76 - 92	60 - 82	47 - 75	39 - 68
6,3	1/4 in	70 - 89	56 - 82	44 - 71	36 - 65	30 - 59
4,75	N.4	56 - 82	45 - 74	37 - 64	30 - 58	25 - 53
2	N.10	28 - 64	25 - 55	20 - 46	17 - 42	13 - 38
0,85	N.20	18 - 49	15 - 42	12 - 35	9 - 31	6 - 28
0,425	N.40	13 - 37	11 - 32	8 - 27	5 - 24	3 - 21
0,25	N.60	10 - 29	8 - 25	6 - 21	4 - 19	2 - 16
0,15	N.100	6 - 21	5 - 18	4 - 16	2 - 14	1 - 12
0,075	N.200	2 - 100	2 - 9	2 - 8	1 - 7	0 - 6

Nota. En la siguiente tabla se muestran los requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa.

En la Tabla 2 se muestran los diferentes tipos de granulometrías para cada una de las mezclas, donde la grava artificial propuesta debe quedar dentro del tamaño nominal del material pétreo.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSION

##### Resultados

En este apartado se describe los valores obtenidos de las pruebas, para iniciar se localizó la fuente del RCD con apoyo del ayuntamiento del municipio de Cunduacán, donde a

través de su base de datos, se enlistaron las obras desarrolladas en ese momento. Se recogieron los fragmentos elaborados por el personal del ayuntamiento.

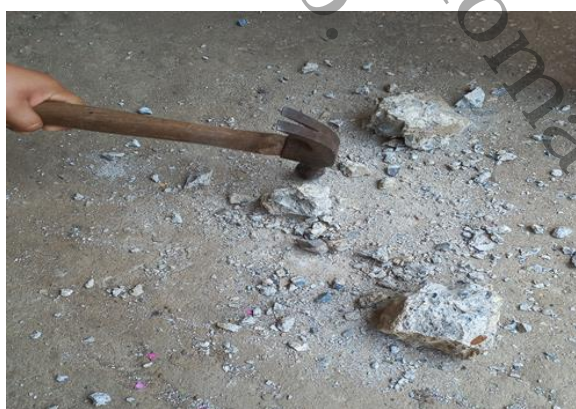
Figura 8. RCD de Concreto Hidráulico



*Nota.* El escombro que se muestra es producto de la demolición de banquetas

Se colocó el RCD en una superficie limpia, enseguida se procedió a triturar el residuo para ir obteniendo fragmentos más pequeños y poder llegar a la medida que se requiere para después iniciar con la primera prueba de densidad y absorción. Ver Figura 9.

Figura 9. Trituración



*Nota.* Trituración de forma manual del RCD.

Se tomó una parte de la muestra de grava artificial, la cual se colocó en un recipiente de

Figura 10. Inmersión del RCD



Figura 11. Peso Sumergido



aluminio con agua a temperatura ambiente cubriéndola así por 24 horas, se sacó y se sumergió nuevamente en agua a una temperatura de 23°C por 3 minutos, obteniéndose de esta manera el peso sumergido, ver Figura 10 y 11

Enseguida, se secó con una toalla y se obtuvo el peso superficialmente seco. Después, el mismo material se colocó en el horno a una temperatura de 110°C y una vez completamente seco, se pesó y se obtuvo el peso seco, ver Figura 12 y 13

Figura 12. Peso Superficialmente Seco



Nota. Secado superficial con una toalla

Ilustración 13. Peso Seco



Nota. Secado en horno a una temperatura de 110°

Seguidamente una vez obtenidos los valores, se calculó la densidad bajo la siguiente fórmula proporcionada por el manual M.MMP.4.04.003/18 (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, 2018).

$$D = \frac{P_{\text{Seco}}}{(P_{\text{ss}} - P_{\text{Sumergido}})}$$

Donde;

Donde;

P<sub>seco</sub> = Peso seco

P<sub>ss</sub> = Peso superficialmente seco

P<sub>sumergido</sub> = Peso sumergido

Una vez obtenida la densidad se calculó la absorción bajo la siguiente fórmula proporcionada por el manual M.MMP.4.04.003/18 (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, 2018).

$$A = \frac{[(P_{\text{ss}} - P_{\text{seco}})]}{P_{\text{seco}}} * 100$$

Integrando los datos obtenidos de las pruebas hechas, los resultados para densidad y absorción fueron los siguientes:

P<sub>seco</sub> = 606.3 gr

P<sub>ss</sub> = 647.1 gr

P<sub>sumergido</sub> = 376.2 gr

Sustituyendo la fórmula para obtener la densidad;

$$D = \frac{P_{\text{Seco}}}{(P_{\text{ss}} - P_{\text{Sumergico}})}$$

$$D = 606.3 / (647.1 - 376.2)$$

$$D = 606.3 / 270.9$$

$$D = 2.24$$

Ahora sustituyendo la fórmula para obtener la absorción;

$$A = \frac{[(P_{\text{ss}} - P_{\text{seco}})]}{P_{\text{seco}}} * 100$$

$$A = [(647.1 - 606.3) / 606.3] * 100$$

$$A = [(40.8) / 606.3] * 100$$

$$A = 0.0673 * 100$$

$$A = 6.72$$

### Prueba de desgaste

Siguiendo la norma antes mencionada, en esta fase se tomó una muestra de la grava artificial obtenida para ser sometidos a la prueba de desgaste mediante la máquina “De los Ángeles”, para ello se tomaron 5 kg de grava, repartidos en 2.5 kg de ½” y 2.5 kg de ¾” que fueron separados mediante las mallas de ¾”, ½”, ¾” ¼”. Una vez separado el material se definió la cantidad de esferas metálicas requeridas y se verificó que su masa total cumpliera con lo establecido, enseguida se introdujeron las esferas a la máquina de los ángeles, 5 kg de grava y se hizo funcionar a una velocidad angular de 30 a 33 rpm durante 500 revoluciones, ver Figura 14 y 15, de acuerdo al manual M.MMP.4.04.006/02 a que se refiere la norma N.CMT.4.04 Materiales petreos para mezclas asfálticas.

Figura 15. Tamizado de Grava



Nota. Separación del material a través de mallas

Figura 14. Prueba Desgaste



Nota. Máquina de los Ángeles

Se retiró el material de la máquina depositándolo en una charola, el material que quedó retenido en la malla n.12 debió ser al menos el 35 % de los 5kg depositados, ver Figura 16. El material cribado que paso la malla se desechó, después con una balanza calibrada se pesó la muestra para averiguar su masa en esta condición, los resultados fueron calculados bajo la siguiente fórmula para el desgaste proporcionada por el manual M.MMP.4.04.006/02 Desgaste Mediante la Prueba de los Ángeles de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas.

$$D = \frac{[(P_i - P_f)]}{P_f} * 100$$

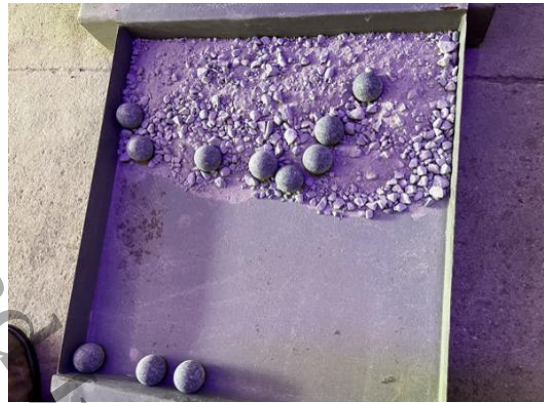
Donde;

D= Desgaste

PI= Peso inicial

PF= Peso final

Figura 16. Prueba de Desgaste



Nota. Material retirado de la máquina

Sustituyendo los valores obtenidos dentro de la fórmula

$$D = \frac{[(P_i - P_f)]}{P_f} * 100$$

$$D = [(5000 - 2956) / 5000] * 100$$

$$D = [(2044) / 5000] * 100$$

$$D = [0.4088] * 100$$

$$D = 40.88$$

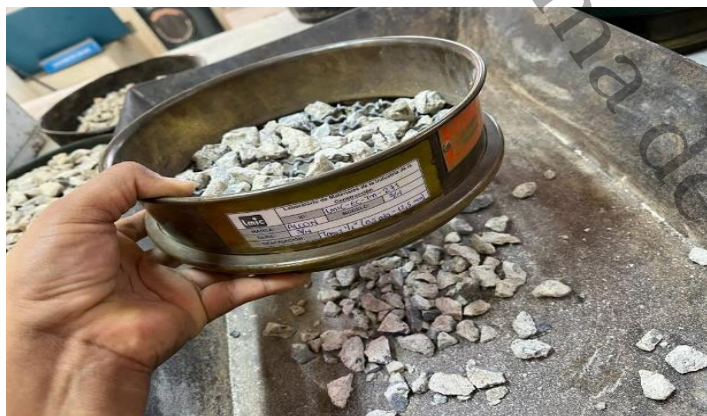
Al finalizar esta prueba se continuó con granulometría de la grava artificial.

Prueba de granulometría

Con esta prueba se obtuvo el tamaño de agregado grueso (grava) y fino requerido por la mezcla asfáltica, con base en el manual M.MMP.4.04.002/02 *Granulometría de materiales pétreos para mezclas asfálticas* que establece la norma N.CMT.4.04/17 (Secretaría de Comunicaciones y Transporte e Instituto Mexicano del Transporte, 2017) Previo a la granulometría se mezcla grava artificial y arena natural en un porcentaje de 45% y 55%.

Para iniciar la selección del agregado grueso, se armó el juego de tamices de forma descendente con las mallas 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4", y n.4, seguidamente se colocó la grava sobre cada una con el fin de clasificarla. Para este proceso se agita de forma manual para lograr filtrar el material que se retiene, luego se clasifica y se pesa. Posteriormente, se realiza lo mismo para la granulometría de finos utilizando mallas de n. 4, 10, 20, 40, 60, 100, 200, ver Figura 17 y Tabla 3 y 4.

Figura 17. Tamizado de Grava Artificial



Nota. Tamizado a través de las mallas para obtener las gravas de diferentes tamaños para la granulometría.

Previo a la granulometría se tomó grava artificial y arena natural que posteriormente se revolvió hasta lograr mezclarse y entonces se realizó la granulometría, ver Figura 18.

Ilustración 18. Mezcla de Arena y Grava



Nota. Se realizó una mezcla de agregados grueso y fino previo a la granulometría

Tabla 3. Granulometría de Agregado Grueso

Malla	Peso retenido parcial (Kg)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa la malla
		(PRP/SU MA) (100)	(%RP)+ (%RP)	100-(%RP)
3/4"	0.613	5.8	5.8	94.2
1/2"	2.088	19.9	25.7	74.3
3/8"	0.365	3.5	29.2	70.8
1/4"	0.472	4.5	33.7	66.3
N. 4	0.432	4.1	37.8	62.2
Pasa N.4	6.541	62.2	100.0	0.0
Suma	10.511	100.0		

*Nota.* En esta Tabla se puede mostrar la granulometría obtenida del agregado grueso en donde el valor a considerar es el que se encontró dentro de % que pasa la malla.

Tabla 4. Granulometría del agregado fino

Malla	Peso retenido parcial (g)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa la malla
		(PRP/SU MA)(100)	(%RP)+ (%RP)	100-(%RP)
10	101.3	12.5	12.5	49.7
20	120	14.8	27.3	34.9
40	114.9	14.2	41.5	20.7
60	76.3	9.4	51.0	11.3
100	42.9	5.3	56.3	6.0
200	20.3	2.5	58.8	3.5
Pasa N.200	28.1	3.5	62.2	0.0
Suma	503.8	62.2		

*Nota.* En la Tabla se muestra la granulometría obtenida del agregado fino en donde el valor a considerar es el que se encuentra dentro de % que pasa la malla.

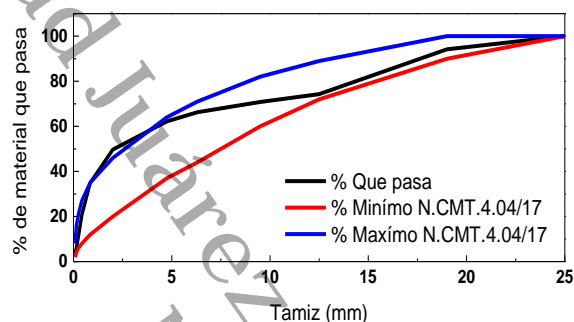
Una vez obtenidos los valores de ambos agregados se verifican en la siguiente Tabla 1 de la norma proporcionada dentro de la metodología N.CMT.4.04/17 *Materiales pétreos para mezclas asfálticas*, donde con base a los resultados se encontró que la granulometría realizada entra dentro del material de tamaño nominal de  $\frac{3}{4}$ " , como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 5. Material Pétreo para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa

GRANULOMETRÍA DENSA PARA MATERIAL DE 3/4"			
Tamiz (mm)	% Que pasa	% Mínimo que pasa según N.CMT.4.04/17	% Máximo que pasa según N.CMT.4.04/17
50			
37.5			
25	100	100	100
19	94.2	90	100
12.5	74.3	72	89
9.5	70.8	60	82
6.3	66.3	44	71
4.75	62.2	37	64
2	49.7	20	46
0.85	34.9	12	35
0.425	20.7	8	27
0.25	11.3	6	21
0.15	6	4	16
0.075	3.5	2	8

De la siguiente Tabla se toman los resultados de la granulometría del material propuesto, que es el % que pasa y se procede a graficar bajo las referencias que dicta la norma, ver Figura 19.

Figura 19. Granulometría densa para material e  $\frac{3}{4}$ "



En la gráfica se muestra los resultados de la Tabla 4, pudiéndose apreciar que efectivamente la granulometría del material propuesto cumple con lo establecido en la norma N.CMT.4.04/17, quedando dentro del rango establecido. Una vez comprobado esto, se procede a la elaboración de las pastillas de mezcla asfáltica.

### Elaboración de ensayos

Las herramientas empleadas para este paso son: un plato calentador, un mezclador, un dispositivo por calentamiento por agua, balanza electrónica, termómetro.

Para la elaboración de las pastillas se requiere utilizar 1200 g del material, esto es la mezcla de agregado grueso, fino y cemento asfáltico. Previo a esto, se realizaron cálculos que determinaron el número de pastillas para las pruebas, ver Tabla 6.

Figura 20. Cálculos para obtener el número de pastillas a realizar

Malla	Masa (Kg)	%	1200 g	N. de pastillas requeridas
3/4	2.399	5.8	69.6	34.47
1/2	8.583	19.9	238.8	35.94
3/8	1.480	3.5	42	35.24
1/4	1.695	4.5	54	31.39
4	1.124	4.1	49.2	22.85
10	2.707	12.5	150	18.05
20	3.203	14.8	177.6	18.03
40	3.069	14.2	170.4	18.01
60	2.040	9.4	112.8	18.09
100	1.153	5.3	63.6	18.13
200	1.300	6	72	18.06

Nota. En la Tabla 5 se muestra el total en kilogramos de cada material separado por tamaño que va desde la malla 3/4" a la malla n. 200, como puede observarse el total de pastillas a realizar es de 18.

Se hacen las mezclas sin cemento asfáltico y se separan en bolsas para después ser llevadas al horno y perder la humedad, ver Figura 20 y 21.

Figura 22. Mezcla de Agregados



Nota. Mezclas separadas en bolsas

Figura 21. Perdida de Humedad



Nota. Mezclas llevadas al horno para perder humedad

Una vez obtenido lo anterior se continuó con los cálculos para determinar el % de cemento a utilizar para cada mezcla, ver Tabla 7.

El tipo de cemento que se utilizó fue 64-22 y se harán las pastillas a tres puntos, es decir, se aumentó el porcentaje de cemento asfáltico en 0.5 iniciando con 4% hasta llegar a 6.5% y cubrir las 18 pastillas. Para la elaboración de las pastillas se utilizó 1200 g. de la mezcla de agregado grueso, fino y cemento asfáltico, ver Figura 22 y 23.

Tabla 6. Porcentaje de Cemento Asfáltico a Utilizar

Pastillas	% De cemento	Masa (g)	% De cemento que se agrega
1	4.0	1190.8	47.63
2	4.0	1183.5	47.34
3	4.0	1182.6	47.30
4	4.5	1184.7	53.31
5	4.5	1184.6	53.31
6	4.5	1183.8	53.27
7	5.0	1182	59.10
8	5.0	1182.8	59.14
9	5.0	1182.2	59.11
10	5.5	1182.7	65.05
11	5.5	1182.9	65.06
12	5.5	1181.8	65.00
13	6.0	1182.5	70.95
14	6.0	1182.5	70.95
15	6.0	1182	70.92
16	6.5	1181.2	76.78
17	6.5	1179.7	76.68
18	6.5	1180.9	76.76

Nota. En la tabla 6 se muestra el porcentaje de cemento que se agregara a cada pastilla.

Asimismo, se observa la masa de cada porción después de ser retirada del horno, posteriormente se procedió a realizar la mezcla asfáltica

Figura 24. Mezcla Asfáltica



Nota. Se agrega el cemento asfáltico

Figura 23. Mezcla Asfáltica



Nota. Se hace la mezcla a una temperatura de 170°

La mezcla asfáltica se hizo a una temperatura de 170° con ayuda de un termómetro, para posteriormente ser compactada a una temperatura de 150°, Aproximadamente 1200 g de mezcla se colocaron en el molde para elaborar los especímenes que es de forma cilíndrica con un diámetro de 101.6 mm y 75 mm de altura con el plato base, ambas caras son intercambiables.

La mezcla a determinada temperatura fue compactada con el martillo por medio de determinada cantidad de golpes ver Figura 24, 50 golpes de cada lado después de la compactación se dejó enfriar el molde y se extrajo de la probeta, el martillo usado en la compactación cuenta con una base circular plana con un diámetro de 98.4 mm, el peso del martillo es de 4.5 kg, se eleva a una altura de 457 mm.

Figura 25. Compactación de la Pastilla



*Nota.* Compactación de la mezcla a una temperatura de 150°

Una vez que se enfrió la mezcla se obtuvo la pastilla de mezcla asfáltica ver Figura 25, y se dejó pasar 24 hrs. para ser ensayadas, sin embargo, previo a eso se le hizo volumetría a cada una y se dejó en baño maría a una temperatura de 60°, ver Figura 26.

Figura 27. Pastilla de RCD



Nota. Pastillas de mezcla asfáltica hechas a base se RCD

Figura 26. Pastilla de RCD



Nota. Todas las pastillas se colocaron en baño maría por 30 minutos

La máquina para realizar la prueba de estabilidad Marshall consiste en una unidad de aplicación de carga con vástagos deslizantes que permitan subir y bajar el marco, un anillo de carga debidamente calibrado se coloca al centro de la máquina para medir la carga, un lector de deformación de 0 a 25 mm de recorrido con una precisión de 0.01 mm es utilizado para medir el flujo, ver Figura 27.

Figura 28. Máquina Marshall



*Nota.* Máquina Marshall donde se obtuvieron los valores de estabilidad y flujo  
Se colocó un dispositivo de medición de carga adecuado en la máquina Marshall

Se colocaron las pastillas en baño maría a una temperatura de 60°C por 30 min, posteriormente se colocó en la amordaza Marshall y esta se sitúa en la parte inferior de la prensa, se puso el dispositivo de medición de flujo y todos los marcadores de medidores en 0.

Posteriormente se empieza la aplicación de carga a una velocidad de 50.0 mm/min, y se registraron las mediciones. Ver Tabla 8.

Tabla 7. Resultados de Estabilidad y Flujo de cada Pastilla a través de la Máquina Marshall

Pastillas	Espesor (cm)	Masa con aire (g)	Masa sumergida (g)	Masa superficialmente seca (g)	Densidad	Estabilidad (kn)	Flujo(mm)
1	6.81	1122.7	587.8	1131.9	2.06	9.411	2.891
2	6.61	1090.1	568.4	1101.3	2.05	13.088	2.752
3	6.39	1069.9	563.2	1076.1	2.09	16.892	2.941
4	6.23	1060.6	558.9	1065.6	2.09	15.128	3.123
5	6.33	1069.1	566.7	1080	2.08	16.025	3.491
6	6.26	1069.4	567.1	1073.4	2.11	19.749	3.476
7	6.34	1066.6	565.2	1079.5	2.07	19.599	3.659
8	6.27	1065.8	565.5	1071.9	2.10	15.151	2.877
9	6.28	1069.1	576.2	1073.7	2.15	19.015	2.834
10	6.29	1076	572.4	1081.2	2.11	16.996	2.994
11	6.22	1079.5	577.5	1082	2.14	17.189	2.832
12	6.27	11075	576.2	1079.6	22.00	21.27	3.098
13	6.22	1074.4	573.6	1077.2	2.13	17.136	2.922
14	6.16	1073.2	576.1	1077.6	2.14	17.089	3.014
15	6.29	1080.3	577.7	1082.5	2.14	21.081	2.847
16	6.33	1074.9	571.3	1079	2.12	23.141	3.443
17	6.31	1084.9	578.8	1089.1	2.13	17.663	3.31
18	6.38	1087.4	584.2	1091.1	2.15	23.172	2.997

En la Tabla 8 se muestran los resultados de estabilidad y flujo para cada una de las pastillas que se obtuvieron a través de la máquina Marshall.

El valor máximo de la carga que se obtenga se denomina estabilidad Marshall

La deformación del espécimen que se obtuvo se denomina flujo.

Para la evaluación de los resultados anteriores de estabilidad y flujo obtenidos a través de la máquina, se les aplicó el factor de corrección proporcionados por la norma *N.CMT.04.05.003/16 Calidad de mezclas asfálticas para carreteras*, y manual *M-MMP-4-05-034 método Marshall para mezclas asfálticas de granulometría densa* los cuales se muestran en la Tabla 9 y así finalmente se comparan los resultados obtenidos con los valores de referencia que emite esta misma norma.

Tabla 8. Resultados del Diseño de Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa por el Método Marshall.

Tabla con los valores de estabilidad y flujo para cada pastilla				
Pastillas	Resultados de la máquina Marshall		Resultados que indica el método Marshall M.MMP.4.05.034	
	Estabilidad (KN)	Flujo (mm)	Estabilidad corregida (Kg)	Flujo corregido (mm)
1	9.411	2.891	858.894	2.891
2	13.088	2.752	1256.201	2.752
3	16.892	2.941	1705.286	2.941
4	15.128	3.123	1588.911	3.123
5	16.025	3.491	1642.272	3.491
6	19.749	3.476	1840.301	3.476
7	19.599	3.659	2003.546	3.659
8	15.151	2.877	1575.877	2.877
9	19.015	2.834	1972.411	2.834
10	16.996	2.994	1759.113	2.994
11	17.189	2.832	1809.763	2.832
12	21.27	3.098	2212.323	3.098

13	17.136	2.922	1804.182	2.922
14	17.089	3.014	1781.808	3.014
15	21.081	2.847	2181.917	2.847
16	23.141	3.443	1809.830	3.443
17	17.663	3.31	1819.143	3.310
18	23.172	2.997	1787.319	2.997

*Nota.* En esta tabla se observan los resultados de las pruebas, además de datos que proporciona la norma de Referencia: ASTM D6927-15-Método de prueba estándar para la estabilidad Marshall y flujo de mezclas asfálticas en donde al valor de estabilidad alcanzado en la Tabla 7, se le aplicó un factor de corrección proporcionado por dicha norma, esto es para obtener los valores de estabilidad ya corregidos y poder obtener el contenido óptimo de la mezcla asfáltica.

Asimismo, se comenta que la tabla completa de este proceso esta disponible en el Anexo “A” de este documento.

Durante el desarrollo del trabajo se obtuvieron los siguientes valores finales en las pruebas de desgaste y densidad, los cuales se verificaron con base en los establecidos por la norma N.CMT.4.04/17, ver Tabla 10 y 11, con el fin de determinar la resistencia a la trituración o abrasión de los materiales pétreos utilizados en las mezclas asfálticas.

Tabla 9. N.CMT.4.04/17 Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas

Requisitos de calidad cuando el tránsito esperado sea $\leq 1$ millón de ejes	
Características	Valor
<b>GRAVA</b>	
Densidad relativa del material pétreo seco, mínimo	2,4
Desgaste de Los Ángeles, %, máximo	35

En esta tabla se muestra que el valor de la densidad relativa requerida por la norma es de 2.4, mientras que el valor obtenido en la prueba fue 2.24, por lo tanto, el requisito no se cumple quedando por debajo de lo establecido. Por otro lado, en cuanto al desgaste de la grava, la norma indica un valor de desgaste del 35% como máximo, la prueba realizada con grava artificial fue igual a 40% demostrando que el desgaste fue mayor, lo que representa un incumplimiento, sin embargo, no influye en los resultados de estabilidad y flujo lo cual se expone a continuación.

### Discusión

Una de las metas clave de esta investigación fue comprobar si la mezcla asfáltica elaborada con agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición (RCD) es una técnica viable para su uso en caminos rurales, conforme a la norma N.CMT.4.05.003/16 [14]. La Tabla 11 sintetiza los resultados comparados con los valores establecidos por dicha norma.

Tabla 10. Comparación de los Datos Obtenidos y las Especificaciones de N.CMT.4.05.003/16

CARACTERÍSTICAS	DATOS	
	OBTENIDOS	ESPECIFICACIONES N-CMT-4-05-003/16 ( $10^6 < \Sigma L \leq x10^7$ )
CONTENIDO OPTIMO DE C.A. (%)	<b>5.50</b>	-
MASA VOLUMÉTRICA (kg/m <sup>3</sup> )	<b>2,130</b>	-
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA (kg/m <sup>3</sup> )	<b>1,712</b>	-
VACIOS (VMC), %	<b>3.0</b>	3 A 5
V.F.A (%)	<b>77.7</b>	65-78
ESTABILIDAD (kg)	<b>1,953</b>	454 MÍN
FLUJO (mm)	<b>3.1</b>	2 A 4 (mm)
V.A.M. %	<b>13.7</b>	13
NÚMERO DE GOLPES EN CADA CARA DE LA PROBETA	<b>50</b>	50

- Contenido óptimo de cemento asfáltico (C.A.) - 5.5 %

Este valor se obtuvo tras un proceso iterativo de diseño de mezcla, donde se equilibraron criterios de estabilidad, vacíos, flujo y trabajabilidad. Un contenido del 5.5% es técnicamente adecuado, ya que asegura un buen recubrimiento de los agregados sin provocar exudación, especialmente considerando la naturaleza porosa e irregular de los agregados reciclados (ASPHALT INSTITUTE, 2014).

- Masa volumétrica total y suelta

Los valores de masa volumétrica compactada ( $2130 \text{ kg/m}^3$ ) y suelta ( $1712 \text{ kg/m}^3$ ) indican una mezcla moderadamente densa, compatible con la compactación alcanzable en condiciones de campo en caminos rurales. Aunque no existen límites normativos directos para estos parámetros, su diferencia refleja un índice de compactibilidad aceptable, que podría ser utilizado para calcular el factor de abundamiento, ausente en la tabla, pero útil para estimaciones volumétricas en obra.

- Vacíos en la mezcla compactada (VMC) - 3.0 %

El valor de VMC del 3% se encuentra en el límite inferior permitido (3-5%). Esta cifra indica una mezcla altamente impermeable, lo que contribuye a una mayor durabilidad, ya que limita la infiltración de agua, factor clave en el deterioro de caminos rurales. Sin embargo, también sugiere una mezcla densa, por lo que se debe garantizar que la compactación en campo logre replicar este nivel para evitar problemas de segregación o falta de cohesión.

- Estabilidad Marshall - 1953 kg

Este valor excede ampliamente el mínimo normativo de 454 kg, lo que indica que la mezcla presenta una alta capacidad para resistir deformaciones permanentes bajo cargas de tránsito. A nivel cualitativo, esto es especialmente positivo considerando el uso de agregado reciclado, lo cual suele asociarse con una menor resistencia mecánica. Este desempeño sugiere una buena interacción entre los componentes de la mezcla, así como una posible mejora en la textura superficial que genera mayor fricción interna.

- Flujo - 3.1 mm

El flujo, con un valor dentro del rango normativo de 2 a 4 mm, refleja que la mezcla posee una buena capacidad de deformación sin fractura. En otras palabras, tiene una ductilidad adecuada para absorber tensiones térmicas o de carga sin agrietarse, lo cual es esencial para evitar fisuras prematuras en zonas rurales donde el mantenimiento suele ser limitado.

- Vacíos entre agregados minerales (V.A.M.) - 13.7 %

El VAM se encuentra ligeramente por encima del máximo permitido (13%), con una diferencia marginal del 0.7%. Aunque este pequeño exceso no compromete necesariamente el desempeño de la mezcla, es un indicador de que podría haber mayor espacio no ocupado por el ligante, lo cual, si no se controla, podría derivar en una menor durabilidad o mayor permeabilidad a largo plazo. Sin embargo, en este caso, la buena estabilidad y el flujo adecuado compensan esta leve desviación.

Desde un enfoque cualitativo, los resultados confirman que la mezcla elaborada con RCD no solo cumple los requisitos mínimos de la normativa, sino que además muestra propiedades técnicas competitivas frente a mezclas convencionales. Esto es especialmente relevante al considerar que los agregados reciclados no cumplen por sí solos con las exigencias normativas en cuanto a densidad y desgaste, según lo estipulado en la norma N.CMT.4.04/17.

El hecho de que la mezcla resultante haya alcanzado buenos niveles de estabilidad y flujo, incluso superando algunos de los valores típicos de mezclas convencionales, indica que existe un potencial significativo de reaprovechamiento del RCD en pavimentación

rural, siempre y cuando se formulen adecuadamente las proporciones de sus componentes.

A su vez, estos resultados sugieren que la sinergia entre el cemento asfáltico PG 64-22, la arena natural y el RCD puede mitigar las deficiencias individuales de cada material, logrando una mezcla homogénea, trabajable y resistente. Este aspecto es crucial en proyectos de infraestructura rural donde el acceso a materiales convencionales puede estar limitado, y donde se busca una solución técnica de bajo costo y con enfoque sustentable.

Si bien los resultados son positivos, aún existe espacio para mejorar ciertos parámetros como el VAM. Para ello, se plantean dos líneas de acción:

Optimización del diseño granulométrico: Incorporar una fracción de grava natural (por ejemplo, grava de río) podría mejorar la distribución de tamaños y reducir los vacíos, aumentando la compacidad y reduciendo el VAM sin afectar la trabajabilidad.

Selección de RCD de mayor calidad: Priorizar RCD de concreto estructural de alta resistencia o reutilización de pavimento asfáltico, ya que estos materiales suelen tener mejor comportamiento frente al desgaste y mejor adherencia al ligante, permitiendo cumplir con la norma N.CMT.4.04/17 y mejorando la vida útil del pavimento.

## V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten concluir que es viable la elaboración de una mezcla asfáltica para vialidades de bajo flujo vehicular utilizando

residuos de construcción y demolición (RCD) como material alternativo en el estado de Tabasco.

Las pruebas realizadas demostraron que la mezcla diseñada cumple con los parámetros establecidos en la norma N-CMT-4-05-003/16, particularmente en los valores de estabilidad y flujo. Los valores de estabilidad se ubicaron por encima del rango mínimo normativo, lo que indica una adecuada capacidad de la mezcla para resistir esfuerzos mecánicos sin presentar deformaciones excesivas. Asimismo, los valores de flujo obtenidos se encontraron dentro del rango permitido, lo que evidencia un comportamiento favorable frente a asentamientos graduales y reduce la probabilidad de agrietamiento prematuro.

El cumplimiento simultáneo de estos parámetros confirma la validación de la premisa planteada, al demostrar que la incorporación de RCD no compromete el desempeño mecánico de la mezcla asfáltica, sino que permite obtener resultados equiparables a los de mezclas convencionales utilizadas en caminos rurales.

Desde el punto de vista funcional, la aplicación de esta mezcla en vialidades rurales del estado de Tabasco podría proporcionar una superficie durable y segura, adecuada para las condiciones climáticas de lluvias intensas y suelos característicos de la región, contribuyendo a mejorar la conectividad entre las rancherías y las zonas urbanas.

Adicionalmente, el uso de RCD aporta beneficios ambientales y sociales relevantes, al reducir la acumulación de residuos, disminuir la extracción de agregados naturales y promover prácticas alineadas con la sostenibilidad y la economía circular, lo que resulta especialmente favorable para comunidades rurales con recursos económicos limitados.

Finalmente, se recomienda que investigaciones futuras profundicen en el análisis de la durabilidad a largo plazo, el comportamiento ante condiciones climáticas extremas y la evaluación del desempeño estructural de mezclas asfálticas con RCD en diferentes porcentajes de sustitución.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

Anexos

Anexo A

Hoja de registro y calculo para el diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa por el método Marshall

PROBETA	PORCENTAJE DE C.A. VERIFICADO			M A S A			ABSORCIÓN Y DENSIDAD					MASA			PROPORCIONES EN VOLUMEN			PORCENTAJE DE VACIOS			DETERMINACION DE LA ESTABILIDAD				
	NSAVE	C.A.	AL	A LA	ECUBRIMIENTO	SIN RECUBRIR	SIMERGIDA	SSS	COMPACTADA	RELATIVA	IMPACTAD	ESPECIMEN	ASFALTICO	PETREO	VACIOS	PETREO	OR EL ASFAL	MICROM	ESPECIMEN	SIN CORR.	CORRECCION	CORREGIDA	FLUJO		
No.	NUM.	%	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	p	q	r	s	t	u	v	w	y
1	1	4.00	3.88	3.77	0.00	1,122.7	587.8	1,131.9	1.69	2.063	2.057	2,062.79	7.51	84.83	7.66	15.17	49.52	9.41	6.81	959.66	0.895	858.89	2.89		
2	2	4.00	3.88	3.77	0.00	1,090.1	568.4	1,101.3	2.10	2.046	2.039	2,044.99	7.45	84.09	8.46	15.91	46.83	13.09	6.61	1,334.61	0.941	1,256.20	2.75		
3	3	4.00	3.88	3.77	0.00	1,069.9	563.2	1,076.1	1.21	2.086	2.080	2,085.36	7.60	85.75	6.65	14.25	53.32	16.89	6.39	1,722.51	0.990	1,705.29	2.94		
<b>ROMEDIC</b>	<b>4.00</b>	<b>3.88</b>	<b>3.77</b>	<b>0.00</b>	<b>1,094.23</b>	<b>573.13</b>	<b>1,103.10</b>	<b>1.67</b>	<b>2.06</b>	<b>2.059</b>	<b>2,064.38</b>	<b>7.52</b>	<b>84.89</b>	<b>7.59</b>	<b>15.11</b>	<b>49.89</b>	<b>13.13</b>	<b>6.60</b>	<b>1,338.93</b>	<b>0.94</b>	<b>1,273.46</b>	<b>2.86</b>			
4	4	4.50	4.37	4.25	0.00	1,060.6	558.9	1,065.6	0.99	2.093	2.087	2,092.52	8.57	85.63	5.80	14.37	59.66	15.13	62.30	1,542.63	1.030	1,588.91	3.12		
5	5	4.50	4.37	4.25	0.00	1,069.1	566.7	1,080.0	2.12	2.083	2.077	2,082.17	8.53	85.20	6.26	14.80	57.67	16.03	63.30	1,634.10	1.005	1,642.27	3.49		
6	6	4.50	4.37	4.25	0.00	1,069.4	567.1	1,073.4	0.79	2.112	2.106	2,111.55	8.65	86.41	4.94	13.59	63.65	17.65	62.60	1,799.81	1.023	1,840.30	3.48		
<b>ROMEDIC</b>	<b>4.50</b>	<b>4.37</b>	<b>4.25</b>	<b>0.00</b>	<b>1,066.37</b>	<b>564.23</b>	<b>1,073.00</b>	<b>1.30</b>	<b>2.10</b>	<b>2.090</b>	<b>2,095.42</b>	<b>8.59</b>	<b>85.75</b>	<b>5.67</b>	<b>14.25</b>	<b>60.33</b>	<b>16.27</b>	<b>62.73</b>	<b>1,658.85</b>	<b>1.02</b>	<b>1,690.49</b>	<b>3.36</b>			
7	7	5.00	4.85	4.72	0.00	1,076.6	565.2	1,079.5	0.56	2.093	2.087	2,092.70	9.53	85.21	5.26	14.79	64.44	19.60	63.40	1,998.55	1.003	2,003.55	3.66		
8	8	5.00	4.85	4.72	0.00	1,065.8	565.5	1,071.9	1.20	2.105	2.098	2,104.03	9.58	85.67	4.75	14.33	66.87	15.15	62.70	1,544.98	1.020	1,575.88	2.88		
9	9	5.00	4.85	4.72	0.00	1,069.1	576.2	1,073.7	0.92	2.149	2.142	2,148.30	9.78	87.48	2.74	12.52	78.11	19.01	62.80	1,938.49	1.018	1,972.41	2.83		
<b>ROMEDIC</b>	<b>5.00</b>	<b>4.85</b>	<b>4.72</b>	<b>0.00</b>	<b>1,070.50</b>	<b>568.97</b>	<b>1,075.03</b>	<b>0.90</b>	<b>2.12</b>	<b>2.109</b>	<b>2,115.01</b>	<b>9.63</b>	<b>86.12</b>	<b>4.25</b>	<b>13.88</b>	<b>69.81</b>	<b>17.92</b>	<b>62.97</b>	<b>1,827.34</b>	<b>1.01</b>	<b>1,850.61</b>	<b>3.12</b>			
10	10	5.50	5.34	5.19	0.00	1,076.0	572.4	1,081.2	1.02	2.115	2.108	2,114.15	10.59	85.66	3.75	14.34	73.84	17.00	62.90	1,733.12	1.015	1,759.11	2.99		
11	11	5.50	5.34	5.19	0.00	1,079.5	577.5	1,082.0	0.50	2.140	2.133	2,139.10	10.71	86.67	2.62	13.33	80.38	17.19	62.20	1,752.80	1.033	1,809.76	2.83		
12	12	5.50	5.34	5.19	0.00	1,075.0	576.2	1,079.6	0.91	2.135	2.129	2,134.84	10.69	86.50	2.81	13.50	79.19	21.27	62.70	2,168.94	1.020	2,212.32	3.10		
<b>ROMEDIC</b>	<b>5.50</b>	<b>5.34</b>	<b>5.19</b>	<b>0.00</b>	<b>1,076.83</b>	<b>575.37</b>	<b>1,080.93</b>	<b>0.81</b>	<b>2.13</b>	<b>2.124</b>	<b>2,129.36</b>	<b>10.66</b>	<b>86.28</b>	<b>3.06</b>	<b>13.72</b>	<b>77.80</b>	<b>18.49</b>	<b>62.60</b>	<b>1,884.95</b>	<b>1.02</b>	<b>1,927.07</b>	<b>2.97</b>			
13	13	6.00	5.83	5.66	0.00	1,074.4	573.6	1,077.2	0.56	2.133	2.127	2,132.80	11.65	85.99	2.36	14.01	83.15	17.14	62.20	1,747.39	1.033	1,804.18	2.92		
14	14	6.00	5.83	5.66	0.00	1,073.2	576.1	1,077.6	0.88	2.140	2.134	2,139.34	11.69	86.25	2.06	13.75	85.01	17.09	62.60	1,742.60	1.023	1,781.81	3.01		
15	15	6.00	5.83	5.66	0.00	1,080.3	577.6	1,082.5	0.44	2.140	2.133	2,138.99	11.69	86.24	2.08	13.76	84.91	21.08	62.90	2,149.67	1.015	2,181.92	2.85		
<b>ROMEDIC</b>	<b>6.00</b>	<b>5.83</b>	<b>5.66</b>	<b>0.00</b>	<b>1,075.97</b>	<b>575.77</b>	<b>1,079.10</b>	<b>0.62</b>	<b>2.14</b>	<b>2.131</b>	<b>2,137.04</b>	<b>11.68</b>	<b>86.16</b>	<b>2.17</b>	<b>13.84</b>	<b>84.36</b>	<b>18.44</b>	<b>62.57</b>	<b>1,879.89</b>	<b>1.02</b>	<b>1,922.64</b>	<b>2.93</b>			
16	16	6.50	6.31	6.13	0.00	1,074.9	571.3	1,079.0	0.81	2.117	2.111	2,116.56	12.53	84.90	2.57	15.10	82.99	17.66	63.30	1,800.83	1.005	1,809.83	3.44		
17	17	6.50	6.31	6.13	0.00	1,084.9	578.8	1,089.1	0.82	2.126	2.120	2,125.37	12.58	85.26	2.16	14.74	85.33	17.66	63.10	1,801.13	1.010	1,819.14	3.31		
18	18	6.50	6.31	6.13	0.00	1,087.9	584.2	1,091.1	0.63	2.146	2.140	2,145.54	12.70	86.07	1.23	13.93	91.15	17.66	63.80	1,800.83	0.993	1,787.32	3.00		
<b>ROMEDIC</b>	<b>6.50</b>	<b>6.31</b>	<b>6.13</b>	<b>0.00</b>	<b>1,082.57</b>	<b>578.10</b>	<b>1,086.40</b>	<b>0.75</b>	<b>2.13</b>	<b>2.123</b>	<b>2,129.16</b>	<b>12.60</b>	<b>85.41</b>	<b>1.99</b>	<b>14.59</b>	<b>86.49</b>	<b>17.66</b>	<b>63.40</b>	<b>1,800.93</b>	<b>1.00</b>	<b>1,805.43</b>	<b>3.25</b>			

## VI. Referencias

- Alamilla, D. H. (2020). *Diseño de Mezclas Asfálticas Densas en Caliente en Función del Nivel del Tránsito*. Obtenido de imt.mx: <https://imt.mx/download-archivo.html?l=YXJjaGl2b3MvUHVibGljYWNpb25lcy9QdWJsaWNhY2lublRIY25pY2EvcHQ2MDlucGRm>
- Andrea Melissa Flores Fernández, <sup>1</sup>. A. (2019). El concreto con árido reciclado: una opción de material para construcción con criterio de sostenibilidad . *INNOVARE Revista de Ciencia y Tecnología*, 120-124.
- ASPHALT INSTITUTE. (2014). *Asphalt Mix Design Methods*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Yasir\\_Jebur/post/what\\_are\\_the\\_limits\\_of\\_thicknesses\\_of\\_asphalt\\_wearing\\_or\\_surface\\_binder\\_layer\\_base\\_materials\\_asphalt\\_base\\_and\\_the\\_full\\_depth\\_asphalt\\_layer/attachment/5c13e9eccfe4a76455091d0d/AS:703793855483904@1544808](https://www.researchgate.net/profile/Yasir_Jebur/post/what_are_the_limits_of_thicknesses_of_asphalt_wearing_or_surface_binder_layer_base_materials_asphalt_base_and_the_full_depth_asphalt_layer/attachment/5c13e9eccfe4a76455091d0d/AS:703793855483904@1544808)
- Bastidas Martínez, J., Infante Rodríguez, N., & Torres Daza, H. (2020). *sci.org*. Obtenido de Aplicación de agregados reciclados de concreto RCA en mezclas asfálticas drenantes: <https://sci.org.co/wp-content/uploads/2020/02/Libro-Expresa-tu-ingenio.pdf#page=193>
- Cabrera, A. U. (2017). *Estudio de concreto reciclado como parte integral de una construcción sustentable*.
- Camacho, E. D. (2013). *Aplicación de material reciclado en la construcción*. Boca de Rio, Ver.
- Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. (2013). *Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción*. Obtenido de Publicaciones CMIC: <https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Flayer/PM%20RCD%20Completo.pdf>
- Cueva del ingeniero civil. (2010). *Cueva del ingeniero civil*. Obtenido de Método Hveem de diseño de mezclas: <https://www.cuevadelcivil.com/2011/05/contacto.html>
- Diario Presente. (28 de Febrero de 2019). 80% De las carreteras en Tabasco permanecen en mal estado. Obtenido de [https://www.diariopresente.mx/tabasco/80-de-las-carreteras-en-tabasco-permanecen-en-mal-estado/229599#:~:text=En%20Tabasco%20el%2080%20por,Estatal%20de%20Camino%20\(JEC\)](https://www.diariopresente.mx/tabasco/80-de-las-carreteras-en-tabasco-permanecen-en-mal-estado/229599#:~:text=En%20Tabasco%20el%2080%20por,Estatal%20de%20Camino%20(JEC)).
- Díaz, C. P. (2007). *Materiales para la elaboración de concreto asfáltico*.
- Díaz, L. G. (20 de Noviembre de 2018). *Aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición (RCD) en la elaboración de concretos en Colima Villa de Álvarez*". Obtenido de TecNM: <https://dspace.itcolima.edu.mx/bitstream/handle/123456789/1478/Luis%20Gerardo%20D%C3%ADaz%20C3%81lvarez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Expansión, V. C. (24 de Septiembre de 2020). *EXPOCIHAC hub*. Obtenido de <https://www.expocihachub.com/nota/ingenieria-y-construccion/reciclar-los-desperdicios-de-la-construccion#:~:text=De%20acuerdo%20con%20la%20C%C3%A1mara,12%25%20lo%20representan%20otros%20desechos.>
- Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., Gómez López, J. A., Alonso Romero, S., & Alarcon Orto, H. A. (2004). *ASPECTOS DEL DISEÑO VOLUMÉTRICO DEL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS*. Obtenido de file:///C:/Users/ana\_/Downloads/pt246.pdf
- Guzmán-Ortiz Dulce Valeria, H.-Z. J.-L.-R.-P. (2021). Use of recycled asphalt pavement aggregate for a rigid pavement. *Revista Ingeniería Investigación y Tecnología*.
- Harlem Acevedo Agudelo, A. V. (13 de 05 de 2012). *Sostenibilidad: Actualidad y necesidad en el sector de la construcción en colombia*. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/41521/30825-161804-1-PB.html?sequence=1>
- Hernández, F., Ali, S., Martínez, L., Jackson, A., Alemán, B., & Luis, A. (2017). "Diseño de un plan de mantenimiento para la planta trituradora de bolones CEMEX CONCRETOS-AGREGADOS". Managua.
- Instituto Mexicano del Transporte. (13 de Septiembre de 2023). *Actualizaciones más relevantes del manual de proyecto geométrico de carreteras 2018*. Obtenido de <https://transporte.mx/cual-es-la-clasificacion-oficial-de-las-carreteras-en-mexico/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2011). *Cuentame.INEGI*. Obtenido de <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/tab/economia/infraestructura.aspx?tema=me&>
- Martínez Molina, W., Torres Acosta, A. A., Alonso Guzmán, E. M., Chávez García, H. L., Hernández Barrios, H., Lara Gómez, C., . . . González Valdéz, F. M. (2015). Concreto reciclado: una revisión. *ALCONPAT*.
- Martínez Molina, W., Torres Acosta, A., Alonso Guzmán, E., Chávez García, H., Hernández Barrios, H., Lara Gómez, C., . . . González Valdéz, F. (2015). Concreto reciclado: una revisión. *ALCONPAT*.
- Moreno, I. J. (2014). *Reutilización de escombros de concreto hidráulico en nuevos procedimientos constructivos*. Mexicali, Baja California.
- Muñoz, D. M. (2012). *Aplicación de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición en la construcción de infraestructuras viarias*. Córdoba.
- Palomares, N. A. (2006). *La trituración en la construcción*. México, D.F. Ciudad Universitaria, .
- perez, m., & gonzalez, j. (2021). concreto. *ingenieria civil*, 6-20.
- Pita Fernández, S. P. (27 de 05 de 2002). *Investigación Cuantitativa y Cualitativa*. Obtenido de <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/355/course/section/154/Tema%25208.pdf>

- PNUMA. (2014). *Extracción de arena, un recurso no renovable*.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2022). *Nuestro uso de la arena nos pone "contra la pared", según un informe del PNUMA*.
- Rodrigo Torres, P. F. (2014). Mezclas asfálticas con materiales reciclados de construcción y demolición para la reparación de pavimentos. *Dialnet*, 93-100.
- Rodríguez, A. P. (2004). *Mezclas Asfálticas*. Obtenido de UPCommos: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-14.pdf?sequence=14&isAllowed=y>
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT). (2017). *Características de los Materiales*. Obtenido de <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-4-04-17.pdf>
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte e Instituto Mexicano del Transporte. (2002). Desgaste mediante la prueba de los ángeles de materiales pétreos para mezclas asfálticas. *Materiales pétreos para mezclas asfálticas*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte e Instituto Mexicano del Transporte. (24 de 11 de 2016). Calidad de mezclas asfálticas para carreteras. *Características de los materiales*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte e Instituto Mexicano del Transporte. (22 de 11 de 2017). Materiales pétreos para mezclas asfálticas. *Características de los materiales*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte e Instituto Mexicano del Transporte. (2018). Densidades Relativas y Absorción de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. *Materiales pétreos para mezclas asfálticas*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte e Instituto Mexicano del Transporte. (2023). Método Marshall para mezclas asfálticas de granulometría densa. *Materiales asfálticos, aditivos y mezclas*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes SCT., Instituto Mexicano del Transporte ITM. (2017). Materiales pétreos para mezclas asfálticas. *Características de los materiales*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte. (2002). Granulometría de materiales pétreos para mezclas asfálticas. *Métodos de muestreo y prueba de materiales*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte. (2016). Materiales asfálticos, aditivos y mezclas. *Características de los materiales*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte. (2018). Densidades relativas y absorción de materiales pétreos para mezclas asfálticas. *Materiales pétreos para mezclas asfálticas*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte e Instituto Mexicano del Transporte. (2002). Granulometría de materiales pétreos para mezclas asfálticas. *Materiales pétreos para mezclas asfálticas*.

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte, Instituto Mexicano del Transporte. (2023). Método Marshall para mezclas asfálticas de granulometría densa. *Metodos de muestreo y prueba de materiales*.

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT). (2023). *Métodos de muestreo y prueba de materiales*. Obtenido de <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-4-05-034-23.pdf>

Tellechea, M. J. (s.f.). diario.

Torres, R., Flores, P., Flores, M., Flores, V., & Mairon, K. (2014). *ECORFAN*. Obtenido de Mezclas asfálticas con materiales reciclados de construcción y demolición para: [https://www.ecorfan.org/bolivia/handbooks/ciencias%20tecnologicas%20I/Articulo%206.pdf\\_delete](https://www.ecorfan.org/bolivia/handbooks/ciencias%20tecnologicas%20I/Articulo%206.pdf_delete)

Unidad de Materiales y Pavimento del PITRA-LanammeUCR. (2015). *Metodología de Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente para Costa Rica*. San José, Costa Rica.

Vásquez Hernández, A., Botero Botero, L., & Carvajal Arango, D. (2015). Fabricación de bloques de tierra comprimida con adición de residuos de construcción y demolición como reemplazo del agregado pétreo convencional. *Ingeniería y Ciencia*, 197 - 220.

Ziaurriz, E. V. (2008). *Tratamiento de trituración para producir material para carpeta asfáltica a partir de material de río*. Boca del río, Ver.

## Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional

Título del Desarrollo Tecnológico	MEZCLA ASFÁLTICA A BASE DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN PARA CAMINOS RURALES DE TABASCO
Autor del Desarrollo Tecnológico	Diana Solís Cortazar
ORCID	<a href="https://orcid.org/0009-0000-7457-4152">https://orcid.org/0009-0000-7457-4152</a>
Resumen del Desarrollo tecnológico	<p>El presente estudio analiza el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica diseñada para caminos rurales, en la cual se sustituye parcialmente la grava natural por residuos de construcción y demolición (RCD). La investigación se enfoca en evaluar los parámetros de estabilidad y flujo de la mezcla, conforme a las especificaciones de las normas mexicanas N.CMT.4.04/17 y N.CMT.04.05.003/16. Se empleó grava con tamaño nominal de <math>\frac{3}{4}</math>".</p> <p>La metodología incluyó el diseño de la mezcla, la fabricación de especímenes cilíndricos y su caracterización mediante el ensayo Marshall. Los especímenes presentaron un diámetro constante de 10.16 cm y espesores entre 6.16 y 6.81 cm.</p> <p>Los resultados indican que la mezcla con RCD alcanzó una estabilidad de 1,953 kg, superando ampliamente el mínimo normativo de 454 kg, lo que evidencia un desempeño mecánico superior y valida el uso de RCD como sustituto parcial de agregados naturales. El flujo registrado fue de 3.1 mm, dentro del rango permitido. El contenido de vacíos en la mezcla compactada (VMC) fue de 3.0 %, en conformidad con los criterios técnicos, mientras que los vacíos entre agregados minerales (VAM) alcanzaron 13.7 %, ligeramente por encima del límite de 13 %, sin afectar negativamente el rendimiento de la mezcla.</p> <p>Estos hallazgos respaldan la viabilidad técnica del uso de RCD en mezclas asfálticas para caminos rurales, al demostrar un comportamiento mecánico adecuado frente a las exigencias normativas.</p>
Palabras claves del Desarrollo tecnológico	Agregado pétreo sustituto, mezcla asfáltica, camino rural, residuos de construcción y demolición.
Referencias	De la página 59 a la 62