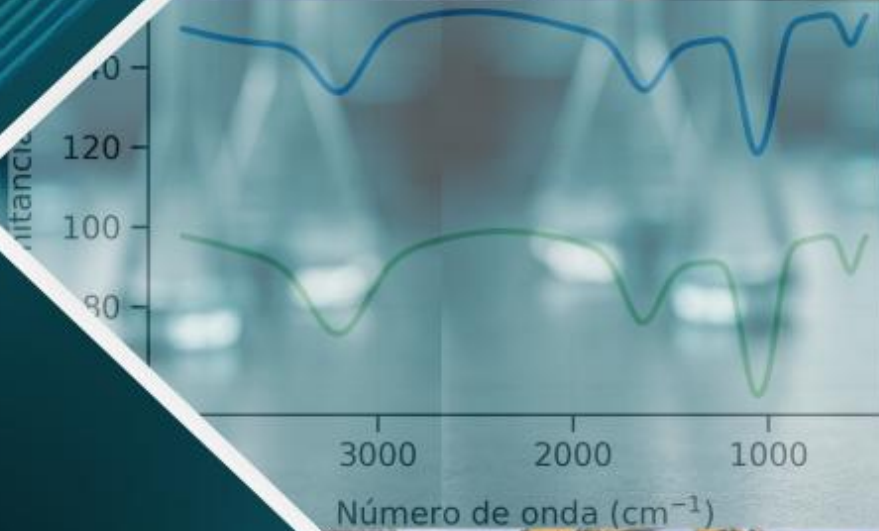


JEEOS

JOURNAL OF ENERGY, ENGINEERING
OPTIMIZATION AND SUSTAINABILITY

2026



Vol. 10 Núm. 1 (2026)

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo

No. 01-2016-050908471400-203. ISSN: 2448-8186





DIRECTORIO

L.D. GUILLERMO NARVÁEZ OSORIO

Rector

DR. WILFRIDO MIGUEL CONTRERAS SÁNCHEZ
Secretario de Investigación, Posgrado y Vinculación

DR. LUIS MANUEL HERNÁNDEZ GOVEA
Secretario de Servicios Académicos

LIC. ALEJANDRINO BASTAR CORDERO
Encargado del Despacho de la Secretaría de
Servicios Administrativos

Esta revista está citada en:

Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal LATINDEX.<http://www.latinindex.unam.mx/> JOURNAL OF ENERGY, ENGINEERING OPTIMIZATION AND SUSTAINABILITY, Vol 10, No. 1, Año 2026, es una publicación continua editada por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, C.P. 86040, Villahermosa, Tabasco, México. Tel. (+52) (933) 358 1500 Ext. 5040, <https://revistajeeos.ujat.mx/JEEOS/es/>, Email: jeeos@ujat.mx. Indizada en LATINDEX. Editora responsable: Laura Lorena Díaz Flores. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2016-050908471400-203, ISSN: 2448-8186, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Pauly González Mayo, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, Centro, Tabasco. C.P. 86040. Fecha de última actualización, 30 de abril 2026.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution- NonCommercialShareAlike 4.0 International License.

Dra. Laura Lorena Díaz Flores
EDITORA EN JEFE

MSI. Alva del Rocío Pulido Téllez
GESTORA

M.A. Pauly González Mayo Dra. Antonia del Rocío López Guemez
ASISTENTE EDITORIAL Y MAQUETADO

MIS Dalia Exaltación Medina Mandujano MAEE. Mary Cruz Valenzuela Jiménez
ASISTENTE DE DISEÑO Y ESTILO

MC Sulma Guadalupe Gómez Jiménez MC Sirleni Ordóñez Frías
ASISTENTE DE TRADUCCION

EDITORES ASOCIADOS POR ÁREA

Dra. Angélica del Carmen Lizardo Pérez

M en C en Arq. Margarita del Carmen Noguera Miceli

Dra. Haydee Pérez Castro

Dr. Luis Manuel López Manrique

Dra. Karla María Aguilar Castro

Dr. Edgar Vicente Macias Melo

Dr. José de los Santos López Lázaro

Dra. Lizeth Rojas Blanco

Dr. Erik Ramírez Morales

M. C. Cristina Ponce Parra

Dr. Reymundo Ramírez Betancour

Dr. Emmanuel Munguía Balvanera

Dr. René Sebastián Mora Ortiz

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Bassam Ali, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán

Dr. Fabricio Nápoles Rivera, **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**

Dr. Francisco López Villareal, **Instituto Tecnológico de Villahermosa.**

Dr. Fernando Israel Gómez Castro, **Universidad de Guanajuato**

Dr. Juan Serrano Arellano, **Instituto Tecnológico de Pachuca**

Dra. Isabel María Valdivia Fernández, **Universidad de la Habana- Facultad de Geografía**

Dra. Ivett Zavala Guillén, **Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California**

Dr. Luis Alfonso García Cerda, **Centro de Investigación de Química Aplicada**

Dra. Nancy del Pilar Medina Herrera, **Universidad Autónoma de Nuevo León**

Dra. Ma. Guadalupe Garnica Romo, **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.**

Dra. María Guadalupe Alpuche Cruz, **Universidad de Sonora**

Dr. Pedro Cruz Alcantar, **Universidad Autónoma de San Luis Potosí**

Dr. Salvador Tututi Ávila, **Universidad Autónoma de Nuevo León**

Dra. Santa del Carmen Herrera Sánchez, **Universidad Autónoma del Carmen**

Índice Vol. 10 Núm. 1 (2026)

- Mezcla asfáltica a base de residuos de construcción y demolición para caminos rurales de Tabasco** **1-22**
Solis-Cortazar D.¹, González-García E.², Solis-Cortazar JC.¹, Pérez-Castro H.^{1*}
- Estrategia educativa: prototipo de microgasificador para el aprovechamiento de residuos sólidos y biomasa** **23-30**
Venegas-Sánchez J.A.¹, Muñoz-Barron B.², Jiménez-Hernández G.¹
- Avances en el desarrollo en recubrimientos autorreparable** **31-46**
Domínguez-De Los Santos F.J.¹, Gómez-Álvarez F.J.¹, Rojas-Blanco L.¹, Escalante-Pérez M.E.¹,
Ramírez-Morales E.^{1*}
- Sustratos de oro en el desarrollo de biosensores para la seguridad alimentaria: avances y perspectivas** **47-62**
Sánchez-Rangel D.C.¹, De León-Santillán A.², Barrera-Martínez C.L.³, Arredondo-Valdés R.¹,
Laredo-Alcalá E.I.^{1*}
- Valorización de residuos: $\text{FeSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ obtenido de alambre de neumáticos fuera de uso para el tratamiento fenton de agua con diclofenaco** **63-74**
González-Ybarra J.¹, Martínez-Sánchez C.², Alanís-Navarro J.A.³, Alarcón-Hernández F.B.⁴, Albarrán-Fuentes M.C.⁴, Morales-Hernández J.⁵, Sandoval-González A.^{2*}

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

Asphalt mixture based on construction and demolition waste for rural roads in Tabasco

Solis-Cortazar D.¹, González-García E.², Solis-Cortazar JC.¹, Pérez-Castro H.^{1*}

¹Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Avenida Universidad s/n Zona de la Cultura, Colonia Magisterial CP 86690 Villahermosa Centro Tabasco México

²Universidad Autónoma de Chiapas, Boulevard Belisario Domínguez, Km. 1081, sin número, Terán, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, 29050.

*haperezcastro@gmail.com

Artículo Científico

Publicado: 30 de abril 2026

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 ¾".

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.

ABSTRACT

This study investigates the mechanical performance of an asphalt mixture intended for rural roads, in which natural gravel is partially replaced by construction and demolition waste (CDW). The research focuses on evaluating the stability and flow parameters of the mixture, in accordance with the Mexican standards N.CMT.4.04/17 and N.CMT.04.05.003/16. The aggregate used had a nominal size of $\frac{3}{4}$ ".

The methodology comprised the asphalt mix design, fabrication of cylindrical specimens, and subsequent evaluation using the Marshall test. The specimens had a consistent diameter of 10.16 cm and thicknesses ranging from 6.16 to 6.81 cm.

Results show that the CDW-modified mixture achieved a stability of 1,953 kg, exceeding the minimum standard requirement of 454 kg by more than threefold. This indicates superior mechanical performance and confirms the effectiveness of CDW as a partial substitute for natural aggregates. The recorded flow was 3.1 mm, within the regulatory range. The voids in the compacted mixture (VMC) were 3.0%, meeting technical specifications, while the voids in mineral aggregates (VMA) reached 13.7%, slightly above the 13% limit, yet without compromising the mixture's performance.

These findings support the technical feasibility of incorporating CDW into asphalt mixtures for rural road construction, demonstrating adequate mechanical behavior under current regulatory standards.

Keywords Stone aggregate, asphalt mix, rural road, construction and demolition waste.

INTRODUCCIÓN

El concreto sin duda alguna trajo un sinfín de beneficios, dentro de ellos la infraestructura que el ser humano ha erigido para obtener el nivel de vida que la población requiere, lo cual conlleva a la construcción de obras civiles como carreteras, puentes, edificios, parques, etc., que facilitan el traslado a diferentes lugares, así como viviendas seguras, entre otros. Sin embargo, el uso del concreto también ha contribuido al desequilibrio de los ecosistemas [1], ya que los materiales necesarios para su producción, como la arena y la grava, requieren la explotación de recursos naturales [2]. Además, su demolición contribuye a la contaminación ambiental. No obstante, se han encontrado modos de reciclarlo.

Históricamente, la idea de reciclar residuos de construcción se dio por primera vez en Europa, al finalizar la segunda guerra mundial [3], tras la acumulación de escombros que se generaron con los bombardeos durante la guerra, Alemania y Gran Bretaña fueron de los primeros países que se enfrentaron al problema de reconstruir las ciudades con estos residuos sólidos y de atender un grave problema de acumulación de escombros, esto aportó a la economía y propició que otros países replicaran este hecho.

Existe diversas investigaciones que muestran los beneficios obtenidos al reutilizar este material de desecho. Vásquez y otros (2015), [4], 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.

Por otra parte, Martínez y otros (2020), [5], 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 derribar los costos, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y disminuir los precios de la edificación, concluyendo que reutilizar concreto ayuda a la conservación de agregados pétreos reduciendo las explotaciones de las mismas.

En cuanto a mezclas asfálticas se tienen estudios en donde se ha incluido el RCD, tal como lo plantean Torres y otros (2014) [6], quienes recolectaron residuos de demolición de obra, consiguiendo materiales triturados que fueron empleados como agregados pétreos a la mezcla para reparación o bacheo de pavimento, sometiéndola a pruebas de campo y laboratorio para determinar su comportamiento mecánico. Los resultados de los ensayos demostraron su factibilidad al quedar dentro del rango de referencia que establece la norma; con respecto al costo, observaron un ahorro del 14% por metro cúbico, en relación a una mezcla tradicional.

Por otra parte, Batidas y otros (2020) [7], realizaron un trabajo donde se evaluó la aplicación de los agregados reciclados de concreto en mezclas asfálticas drenantes para pavimentos, obteniendo una alternativa viable tanto técnica como ambiental, presentando similitud en el comportamiento físico-mecánico del material convencional y el reciclado, concluyeron que la aplicación del agregado cumple con los requisitos para la elaboración de mezclas asfálticas drenantes.

Estas investigaciones nos indican que la reutilización de materiales de demolición como el concreto hidráulico, son sustitutos satisfactorios dentro de la elaboración de asfalto, utilizándolo como material para la construcción de caminos.

En México se generan diariamente grandes volúmenes de residuos de construcción y demolición (RCD), una proporción significativa de los cuales corresponde a concreto y escombros [8]. Este tipo de residuos representa una problemática ambiental relevante y, al mismo tiempo, una oportunidad para su aprovechamiento como material alternativo en la construcción.

La industria de la infraestructura vial demanda un alto consumo de agregados pétreos, particularmente grava, material no renovable ampliamente utilizado en la elaboración de mezclas asfálticas. A nivel mundial, la extracción de arena y grava constituye una de las principales

presiones sobre los recursos naturales [2], situación que se intensifica en pavimentos asfálticos debido a su frecuente mantenimiento y rehabilitación.

En el estado de Tabasco, donde predomina la red de caminos revestidos y pavimentados con mezcla asfáltica [9], el uso intensivo de agregados naturales incrementa la necesidad de explorar alternativas sustentables que reduzcan la explotación de bancos pétreos. En este contexto, la reutilización de RCD como sustituto parcial de la grava natural en mezclas asfálticas surge como una opción viable para caminos rurales, permitiendo disminuir el consumo de materiales vírgenes y el volumen de residuos dispuestos.

El presente estudio analiza el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica diseñada para caminos rurales, en la cual se sustituye parcialmente la grava natural de tamaño nominal $\frac{3}{4}$ " por RCD. La evaluación se centró en los parámetros de estabilidad y flujo, de acuerdo con las especificaciones establecidas en las normas mexicanas N.CMT.4.04/17 y N.CMT.04.05.003/16, encontrándose que esta alternativa es viable para su aplicación en la infraestructura vial de bajo volumen de tránsito.

METODOLOGÍA

La presente investigación es de carácter cuantitativo. Se desglosa a través de 6 pasos los cuales se describen a continuación.

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 [3]. 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 [10], 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 “*Materiales pétreos para mezclas asfálticas*” [11] y N.CMT.04.05.003/16 “*Calidad de mezclas asfálticas para carreteras*” [12], 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 [13], “*Densidades relativas y absorción de materiales pétreos para mezclas asfálticas*” M.MMP.4.04.003 [14], “*Desgaste mediante la prueba de los Ángeles de materiales pétreos para mezclas asfálticas*” M.MMP.4.04.006 [15] y “*Método Marshall para mezclas asfálticas de granulometría densa*” M.MMP.4.05.034 [16], 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 [16] 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 [11] y N.CMT.04.05.003/16 [12], apoyándose en el manual M.MMP.4.05.034 [16].

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 1**, con los requisitos de granulometría del material pétreo, establecidos en la norma [11].

RESULTADOS

Se localizó la fuente del RCD y se trituró de forma manual como se muestra en la **Figura 1**, para después iniciar con la primera prueba de densidad y absorción.

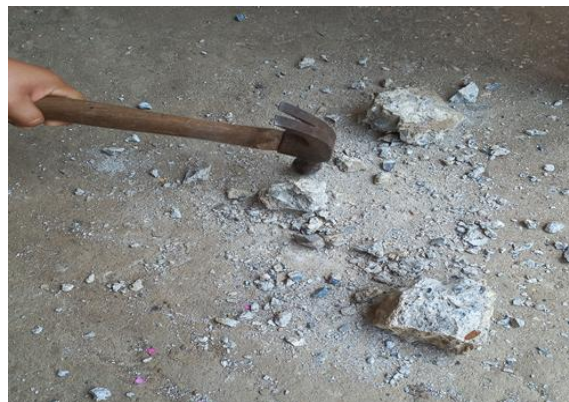


Figura 1. Trituración manual.

Prueba de densidad y absorción. Se tomó una parte de la muestra de grava artificial, que fue colocada en un recipiente de aluminio y cubierta con agua a temperatura ambiente, dejándola así

por 24 horas. Posteriormente, se sacó y se sumergió nuevamente en agua a una temperatura de 23°C por 3 minutos, obteniéndose de esta manera el peso sumergido, (**Figura 2**).



Figura 2. Inmersión del RCD en agua.

Tabla 1. Requisitos de granulometría
Requisitos de 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

En la Tabla 1 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.

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. Seguidamente una vez obtenidos los valores, se calculó la densidad bajo la siguiente fórmula conforme al manual M.MMP.4.04.003/18 *Densidades relativas y absorción de materiales pétreos para mezclas asfálticas*:

$$D = \frac{P_{\text{seco}}}{(P_{\text{ss}} - P_{\text{sumergido}})}$$

Donde;

P_{seco} = Peso seco

P_{ss} = Peso superficialmente seco

P_{sumergido} = Peso sumergido

Una vez obtenida la densidad se calculó la absorción bajo la siguiente fórmula:

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

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

P_{seco} = 606.3 g

P_{ss} = 647.1 g

P_{sumergido} = 376.2 g

Sustituyendo la fórmula para obtener la densidad:

$$D = \frac{P_{\text{seco}}}{(P_{\text{ss}} - P_{\text{sumergido}})}$$

$$D = 2.24$$

Ahora sustituyendo la fórmula para obtener la absorción;

$$A = \frac{[(P_{\text{ss}} - P_{\text{seco}})]}{P_{\text{seco}}} * 100$$
$$A = 6.72$$

Prueba de desgaste. Siguiendo la norma antes mencionada, en esta fase se toma una muestra de la grava artificial para ser sometida a la prueba de desgaste mediante la *Máquina de los Ángeles* [15], para ello se tomaron 5 kg de grava repartidos en 2.5 kg de ½” y 2.5 de ¾”, se introducen a la máquina, junto con las esferas que forman parte de la prueba a una velocidad angular de 30 a 33 rpm durante 500 revoluciones, **Figura 3.**



Figura 3. Máquina de los Ángeles.

El material que resultó se hace pasar por la malla n.12 y debe retenerse al menos el 35 % de los 5kg depositados, **Figura 4.**

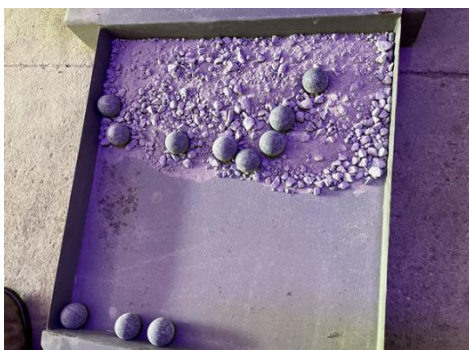


Figura 4. Prueba de desgaste.

El agregado fino que pasa a través de la malla se desecha, después con una balanza calibrada se pesó la muestra para averiguar su masa en esta condición, los resultados serán calculados bajo la siguiente fórmula para el desgaste:

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

Donde;

D= Desgaste
P_i= Peso inicial
P_f= Peso final

Sustituyendo los valores obtenidos dentro de la fórmula:

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

D = 40.88 %

Al finalizar esta prueba se continua 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 [11] 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, (**Figura 5, Tabla 2 y 3**).



Figura 5. Tamizado de grava artificial.

Tabla 2. Granulometría del agregado grueso

Malla	Peso retenido parcial (Kg)	% Retenido parcial (PRP/SU MA) (100)	% Retenido acumulado (%RP) + (%RP)	% Que pasa la malla 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		

En esta Tabla se puede mostrar la granulometría obtenida del agregado grueso, en donde el valor a considerar es el que se encuentra dentro de la comuna denominada “% que pasa la malla”.

Tabla 3. 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		

En la **Tabla 3** se muestra la granulometría obtenida del agregado fino, el valor resultante se observa en la última columna.

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 [11], donde con base en los resultados se encontró que la granulometría realizada entra dentro del material de tamaño nominal de 3/4”, como se muestra en la **Tabla 4**.

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, (**Figura 6**).

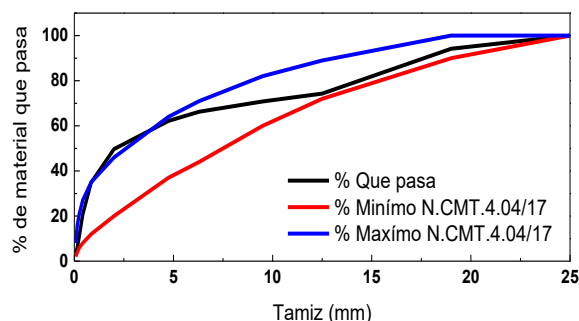


Figura 6. Granulometría densa para material de 3/4"

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 [11],

quedando dentro del rango establecido. Una vez comprobado esto, se procede a la elaboración de las pastillas de mezcla asfáltica.

Tabla 4. 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

Elaboración de ensayos. 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, (**Tabla 5**).

Tabla 5. 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

En la Tabla 5, se muestra el total en kilogramos de cada material separado por tamaño que va desde la malla $\frac{3}{4}$ 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, **Figura 7**.



Figura 7. Mezcla de agregados.

Una vez obtenido lo anterior se procedió con los cálculos para determinar el porcentaje de cemento a utilizar, **Tabla 6**.

El tipo de cemento a utilizar fue 64-22 y se realizaron las 18 pastillas a tres puntos, es decir, se aumentó el porcentaje de cemento asfáltico en 0.5 iniciando con 4% hasta llegar a 6.5%.

En la Tabla 6, se muestra el porcentaje de cemento que se agregó 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 8 y 9**.



Figura 8. Inicio de mezcla asfáltica.



Figura 9. Mezcla asfáltica.

Tabla 6. Porcentaje de cemento a utilizar.

Pastillas	% De cemento	Masa (g)	% De cemento que se agrega
1	4	1190.8	47.63
2	4	1183.5	47.34
3	4	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	1182	59.10
8	5	1182.8	59.14
9	5	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	1182.5	70.95
14	6	1182.5	70.95
15	6	1182	70.92
16	6.5	1181.2	76.78
17	6.5	1179.7	76.68
18	6.5	1180.9	76.76

La mezcla asfáltica se hizo a una temperatura de 170° con ayuda de un termómetro, se colocó en el molde y se compactó a una temperatura de 150°. El molde es de forma cilíndrica con un diámetro de 101.6 mm y 75 mm de altura, incluye el plato base.

La mezcla fue compactada con 50 golpes en la cara superior e inferior, con un martillo que pesa, 4.5 kg, que fue elevado a una altura de 457 mm, (Figura 10).



Figura 10. Compactación de la pastilla.

Acto seguido se extrajeron las pastillas que se dejaron enfriar por 23 horas y media ver **Figura 11**. Se obtuvieron los datos volumétricos de cada una y se dejaron en baño maría a una temperatura de 60° por 30 minutos, (**Figura 12**).



Figura 11. Pastilla de RCD.



Figura 12. Pastillas en baño maría.

La máquina donde se realizó la prueba de estabilidad Marshall se puede observar en la **Figura 13**.



Figura 13. Máquina Marshall.

Después las pastillas fueron colocadas en la mordaza Marshall y se inició la aplicación de carga a una velocidad de 50.0 mm/min, y se registraron las mediciones, Tabla 7.

Tabla 7. Resultados de estabilidad y flujo de cada pastilla a través de la máquina Marshall.

Pastillas	Esesor (cm)	Masa con aire (g)	Masa sumergida (g)	Masa superficialment e seca (ρ)	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 7 se muestran los resultados de estabilidad y flujo para cada una de las pastillas, las cuales fueron referenciados con los parámetros que dicta el manual *M.MMP.4.05.034* [16].

Para evaluar los datos obtenidos se aplicó el factor de corrección proporcionado por las normas *N.CMT.04.05.003/16 Calidad de mezclas asfálticas para carreteras* [12], la *ASTM D6927-15-Método de prueba estándar para la estabilidad Marshall y flujo de mezclas asfálticas*, y el manual *M-MMP-4-05-034 método Marshall para mezclas asfálticas de granulometría densa* [16] y con ellos se elabora la **Tabla 8**.

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

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 [11], **Tabla 9** y **10**, 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 ≤ 1 millón de ejes	
Grava	Valor
Densidad relativa del material pétreo seco, mínimo	2,4
Desgaste de Los Angeles, %, 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 [12]. La Tabla 10 sintetiza los resultados comparados con los valores establecidos por dicha norma.

Tabla 10. Comparación entre los datos obtenidos y las especificaciones de N.CMT.4.05.003/16.

Datos del proyecto		
Características	Resultados	Especificaciones N-CMT-4-05-003/16 ($106 < \Sigma L \leq x107$)
Contenido óptimo de C.A. (%)	5.5	
Masa volumétrica (kg/m ³)	2130	-
Masa volumétrica suelta (kg/m ³)	1712	-
Factor de abundamiento, %	--	-
vacíos (VMC), %	3.0	3 A 5
Estabilidad (kg)	1953	454 min
Flujo (mm)	3.1	2 A 4 (mm)
V.A.M. %	13.7	13
Número de golpes en cada cara de la probeta	50	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 [17].

- Masa volumétrica total y suelta

Los valores de masa volumétrica compactada (2130 kg/m^3) y suelta (1712 kg/m^3) indican una mezcla moderadamente densa, compatible con la compactación alcanzable en condiciones de campo en caminos rurales [12]. 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%) [12]. 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 [12], 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 [12], 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%) [12], 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 compactación 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.

CONCLUSIÓN

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.

REFERENCIAS

- [1] A. C. d. C. Filho, Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento - Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento, Barcelona España, 2001.
- [2] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, «Nuestro uso de la arena nos pone "contra la pared", según un informe del PNUMA,» 2022.
- [3] W. Martínez Molina, A. A. Torres Acosta, E. M. Alonso Guzmán, H. L. Chávez García, H. Hernández Barrios, C. Lara Gómez, W. Martínez Alonso, J. T. Pérez Quiroz, J. A. Bedolla Arroyo y F. M. González Valdéz, «Concreto reciclado: una revisión,» *ALCONPAT*, 2015.
- [4] A. Vásquez Hernandez, L. F. Botero Botero y D. Carvajal Arango, «Fabricación de bloques de tierra comprimida con adición de residuos de construcción y demolición como reemplazo del agregado pétreo convencional,» *Ingeniería y Ciencia*, vol. 11, nº 21, pp. 197-220, 2015.
- [5] W. Martínez-Molina, A. A. Torres-Acosta, E. M. Alonso-Guzmán, H. L. Chávez-García, H. Hernández-Barrios, C. Lara-Gómez, W. Martínez-Alonso, J. T. Pérez-Quiroz, J. A. Bedolla-Arroyo y F. M. González-Valdéz, «Concreto reciclado: una revisión,» *ALCONPAT*, vol. 5, nº 3, 2015.
- [6] R. Torres, P. Flores , M. Flores, V. Flores y K. Mairon, «ECORFAN,» 2014. [En línea]. Available: https://www.ecorfan.org/bolivia/handbooks/ciencias%20tecnologicas%20I/Articulo%206.pdf_del_ete.

- [7] J. G. Bastidas Martínez, N. Infante Rodríguez y H. D. Torres Daza, «sci.org,» 2020. [En línea]. Available: <https://sci.org.co/wp-content/uploads/2020/02/Libro-Expresa-tu-ingenio.pdf#page=193>.
- [8] V. Cervantes, *El desafío de reciclar los desperdicios de la construcción*, 2020.
- [9] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, «Cuentame.INEGI,» 2011. [En línea]. Available: <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/tab/economia/infraestructura.aspx?tema=me&>.
- [10] A. S. Fonseca Hernández, J. A. Martínez López. y L. A. Alemán Blas, “Diseño de un plan de mantenimiento para la planta trituradora de bolones CEMEX CONCRETOS-AGREGADOS”, Managua, 2017.
- [11] Secretaría de Comunicaciones y Transporte e Instituto Mexicano del Transporte, *Materiales pétreos para mezclas asfálticas*, 2017.
- [12] Secretaría de Comunicaciones y Transporte e Instituto Mexicano del Transporte, *Calidad de mezclas asfálticas para carreteras*, 2016.
- [13] Secretaría de comunicaciones y Transporte e Instituto Mexicano del Transporte, *Granulometría de materiales Pétreos para mezclas asfálticas*, 2002.
- [14] Secretaría de Comunicaciones y Transporte e Instituto Mexicano del Transporte, *Densidades relativas y absorción de materiales pétreos para mezclas asfálticas*, 2018.
- [15] Secretaría de Comunicaciones y Transporte e Instituto Mexicano del Transporte, *Desgaste mediante la prueba de los ángeles de materiales pétreos para mezclas asfálticas*, 2002.
- [16] Secretaría de Comunicaciones y Transporte e Instituto Mexicano del Transporte, *Método Marshall para mezclas asfálticas de granulometría densa*, 2023.
- [17] ASPHALT INSTITUTE, *Asphalt Mix Design Methods*, 2014.