



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas



**Aprovechamiento de hidrocarburos intemperizados
para la preparación de mezclas asfálticas de
granulometría densa**

TESIS

Que para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería y Protección Ambiental

Presenta
Liliana Hernández Acosta

Directores
Dr. Randy Howard Adams Schroeder
MIPA Sergio Ramos Herrera

Villahermosa, Tabasco, Enero 2018



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**



ENERO 18 DE 2018

**C. LILIANA HERNÁNDEZ ACOSTA
PAS. DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y PROTECCIÓN
AMBIENTAL
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Maestría en Ingeniería y Protección Ambiental titulado: **"APROVECHAMIENTO DE HIDROCARBUROS INTEMPERIZADOS PARA LA PREPARACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA"**, asesorado por el Dr. Randy Howard Adams Schroeder y MIPA. Sergio Ramos Herrera sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado está integrado por el Dr. Raúl German Bautista Margulis, Dr. Emmanuel Munguía Balvanera, Dr. Randy Howard Adams Schroeder, MIPA. Sergio Ramos Herrera y Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez.

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE

**M. EN C. ROSA MARTHA PADRON LOPEZ
DIRECTORA**

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



C.c.p.- Expediente del Alumno.
C.c.p.- Archivo

Miembro CUMEX desde 2008
Consortio de
Universidades
Mexicanas
UNA ALIANZA DE CALIDAD POR LA EDUCACIÓN SUPERIOR

KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 y 6401, 337-9611, 337-9706, Fax (993) 354-4308 y 358-1579

Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda a conservar los bosques

www.ujat.mx

CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de Maestría denominado: **"APROVECHAMIENTO DE HIDROCARBUROS INTEMPERIZADOS PARA LA PREPARACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA"**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en este documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el Día 18 de Enero de 2018

AUTORIZO



LILIANA HERNÁNDEZ ACOSTA

Atiende a mi mandato de que seas esforzado y valiente, no temas, no te desalientes; porque el señor tu Dios estará contigo en cualquier lugar a donde vayas (Josué 1, 9).

Dedicatoria

A las dos personas que más quiero y me quieren; papá y mamá. Gracias por siempre esperar por mí, su amor, paciencia y empeño han hecho la persona que soy.

A mis hermanos y sobrinos, que son mi pequeña y gran familia.

Agradecimientos

- *Al Dios todopoderoso por su inmensa misericordia para conmigo.*
- *Al Sr. Víctor Hernández Córdoba y la Sra. Rosa Acosta Mayo, son magníficos padres y excelentes amigos.*
- *Al Dr. Randy Howard Adams Schroeder agradezco su tiempo, conocimientos y paciencia. Muchas gracias!*
- *A la Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez, gracias por su apoyo, su amistad, por ser desde hace muchos años mi maestra y por darme la oportunidad de estar cerca de la pequeña y dulce Toni.*
- *Al Ing. Eugenio por su apoyo invaluable para mis pruebas, las facilidades a su laboratorio, recomendaciones, gracias.*
- *Al MIPA Sergio Ramos Herrera, por su apoyo para este trabajo.*
- *Al comité sinodal, Dr. Raúl Germán Bautista Margullis y M.C. Emmanuel Munguía Balvanera por sus observaciones y seguimiento a mis revisiones.*
- *Agradezco el apoyo de los compañeros del LAB-REM por todo lo que he experimentado en este tiempo; aunque lo duden han hecho de mí una mejor persona.*
- *Mención especial a unas personitas que fueron fundamentales para la elaboración experimental de esta tesis colaboradores; Kristell del Carmen Jiménez Zapata (mi amistuki), Luis Fernando Martínez Salas y José de los Santos Pascual.*

MIPA

Hace dos años subí a un tren llamado MIPA, con dudas, desconfianza y temor, pasando ratos agradables, desagradables, tristes, bonitos, chistosos. Hoy pasado el tiempo agradezco infinitamente al creador por esta oportunidad.

Independientemente de la experiencia y conocimientos adquiridos me llevo las vivencias con ustedes compañeros: Rosa, Gaby, Paty y Chan, aunque lo duden los estimo, pido al Dios misericordioso que los cinco MIPA 2015-2017 salgamos triunfantes de este proceso, ¡éxito compañeros!

ÍNDICE GENERAL

1.- INTRODUCCIÓN	1
2.- JUSTIFICACIÓN	2
2.1.- Particularidad del sitio.....	2
2.2.- Con base en la normatividad Mexicana.....	2
2.3.- Tecnologías de remediación propuestas	3
2.4.- Enfoque de la investigación	3
3.- ANTECEDENTES.....	4
3.1.- Nivel internacional.....	4
3.2.- Nivel nacional.....	6
4.- OBJETIVOS.....	7
4.1.- Objetivo general	7
4.2.- Objetivos particulares	7
5.- ÁREA DE ESTUDIO	8
6.- MÉTODO.....	10
6.1.- Planteamiento del problema	11
6.2.- Visita al sitio y Colecta de muestras.....	11
6.3.- Etapa 1: Caracterización del área afectada y material contaminante	12
6.3.1.- Textura	12
6.3.2.- pH:.....	13
6.3.3.- Densidad aparente (DA).....	13
6.3.4.- Densidad real (DR).....	13
6.3.5.- Grados API.....	14
6.3.6.- Porcentaje de asfáltenos	14
6.3.7.- Caracterización de la arena y grava a utilizar	14
6.4.- Etapa 2: Experimentación iterativa.....	15
6.4.1.- Iteración 1	16
6.4.2.- Iteración 2.....	16
6.4.3.- Iteración 3.....	17
6.5.- Etapa 3: Evaluación de la factibilidad	18
6.5.1.- Técnica.....	18
6.5.1.1.- Estabilidad y flujo	18
6.5.2.- Factibilidad ambiental.....	19
6.5.2.1.- Hidrocarburos totales de petróleo (HTP) en lixiviados del extracto PECT	19
6.5.2.2.- HTP en lixiviados del extracto PECT modificado (prueba estática)	19
6.5.2.3.- Toxicidad Aguda	20
6.6.- Análisis de resultados	20
7.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
7.1.- Etapa 1: Caracterización del área afectada y material contaminante	21
7.1.1.- Área afectada	21
7.1.2.- Material contaminante.....	22
7.2.- Etapa 2: Experimentación iterativa.....	23

7.2.1.- Iteración 1	23
7.2.2.- Iteración 2.....	24
7.2.3.- Iteración 3.....	26
7.3.- Etapa 3: Evaluación de la factibilidad	30
7.3.1.- Factibilidad técnica	30
7.3.2.- Factibilidad ambiental.....	31
7.3.3.- Factibilidad económica	34
8.- CONCLUSIONES	38
9.- RECOMENDACIONES	39
10.- REFERENCIAS	40
ANEXO 1: GLOSARIO	46
ANEXO 2: TABLA NORMATIVA	50
ANEXO 3: CARACTERIZACIÓN DE LA ARENA	51
ANEXO 4: CARACTERIZACIÓN DE LA GRAVA	52
ANEXO 5: EVIDENCIA DE CALIBRACIÓN DE EQUIPO MARSHALL	53

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.- Caracterización del sitio.....	21
Cuadro 2.- Porcentajes de partículas en el suelo.....	22
Cuadro 3.- Caracterización de material contaminante.....	22
Cuadro 4.- Mezclas diseñadas en función de relación HC/arena	27
Cuadro 5.- Resumen de análisis estadístico <i>t student</i> en resultados de estabilización	28
Cuadro 6.- Resumen de análisis estadístico <i>t student</i> de resultados de flujo	29
Cuadro 7.- Caracterización de mezcla asfáltica seleccionada.....	30
Cuadro 8.- Caracterización ambiental de la mezcla asfáltica.....	32
Cuadro 9.- Costos de producción estimados usando HC intemperizados.....	35
Cuadro 10.- Costos de producción estimados usando asfalto comercial.	36
Cuadro 11.- Costo de remediación con base en disposición final de HC.	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Representación conceptual; elaborada con referencias de (Bunge, 1971).	4
Figura 2.- Ubicación del sitio contaminado, editada en software ArcGIS 10.3.....	9
Figura 3.- Método utilizado en el proyecto.....	10
Figura 4.- Vista del CPGA y delimitación de zona afectada.	11
Figura 5.- Colecta de muestra	11
Figura 6.- Muestra de suelo e HC.	12
Figura 7.- Análisis de textura.....	12
Figura 8.- Evaluación de la DA.	13
Figura 9.- Análisis de DR.....	13
Figura 10.- Análisis de gravedad API.	14
Figura 11.- Componentes de la mezcla asfáltica.....	15
Figura 12.- Proceso de elaboración de mezcla. a) Agregados de la mezcla, b) Calentamiento y mezclado, c) Mezcla colocada en molde Marshall, d) Compactador Marshall, e) Proceso de fraguado y f) Pruebas de estabilidad y flujo.	16
Figura 13.- Algoritmo para resumir experimentación iterativa	17
Figura 14.- Muestras antes y después de la prueba de estabilidad y flujo.....	18
Figura 15.- Análisis de lixiviados.....	19
Figura 16.- Prueba de lixiviación estática.....	19
Figura 17.- Extracto para prueba de toxicidad.....	20
Figura 18.- Área afectada.	21
Figura 19.- Preparación de mezclas a diferentes porcentajes de HC.	23
Figura 20.- Mezclas con 19% de HC a diferentes porcentajes de grava.....	24
Figura 21.- Mezclas con 18% de HC a diferentes porcentajes de grava.....	25
Figura 22.- Deformación y quiebre de muestras.....	25
Figura 23.- Muestras diseñadas en relación HC/arena de 0.28.	27
Figura 24.- Representación gráfica de la evaluación estadística de estabilidad.....	28
Figura 25.- Representación gráfica de la evaluación estadística del flujo.....	29
Figura 26.- Pérdida de peso de organismos expuestos a la mezcla asfáltica.....	33

RESUMEN

El exceso de residuos generados por la demanda de combustible, alimentos y servicios representa un grave problema a nivel mundial. Los residuos deben ser tratados de manera estratégica para evitar su efecto sobre el ambiente y las personas. Una estrategia novedosa para el tratamiento y revalorización de residuos particularmente industriales, así como una remediación integral permitiendo la recuperación de la capacidad de uso del sitio que es afectado por este residuo, es la solidificación. Además involucra la fabricación de un producto que mantiene constantemente su oferta y demanda. El Hidrocarburo (HC) intemperizado es combinado con agregados de grava, arena y cemento, calentado, compactado y fraguado hasta obtener mezcla asfáltica de granulometría densa.

Cabe resaltar que cualquier propuesta de remediación es elaborada de acuerdo a las condiciones propias del sitio afectado y características del contaminante. Para llevar a cabo el proyecto se realizaron análisis de caracterización inicial del material contaminante a través de su gravedad API y el porcentaje de asfáltenos, mientras que en el suelo fue textura, pH, densidad real y aparente de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000. Se diseñaron y prepararon alrededor de 50 diferentes combinaciones de HC y agregados pétreos, mediante un proceso iterativo. Cada mezcla se evaluó la factibilidad técnica por medio de análisis de estabilidad y flujo de acuerdo a la metodología Marshall. Las iteraciones finalizaron hasta obtener una combinación que cumpliera con la factibilidad técnica considerando dos condicionantes: mayor porcentaje de HC posible y menor cantidad de grava. Se evaluó la factibilidad ambiental mediante un análisis de lixiviados en el extracto PECT, los cuales se obtuvieron de acuerdo a la NOM-053-SEMARNAT-1993. Estos mismos lixiviados se les realizó una prueba de toxicidad por el método (Guideline for Testing of Chemicals, No. 207, Earthworm Acute Toxicity) de la OECD 1984 y también la concentración de HC lixiviables. La factibilidad económica se realizó mediante un análisis de precios unitarios.

Los valores óptimos que se encontraron son una estabilidad >700 kgf y flujo >2 mm, usando 16.70 % HC, 60.17 % arena, 20.00 % grava y 3.13 % cemento. En cuanto al aspecto ambiental, la mezcla asfáltica caracterizada presentó 3.39 miligramos de hidrocarburo por litro del extracto PECT en los lixiviados expuestos 48 horas, por su parte los lixiviados estáticos durante 28 días tienen una concentración de 3.80 mg/L. De igual manera, estas concentraciones en lixiviados indicando poca movilidad del HC intemperizado ya solidificado en la mezcla y la toxicidad evaluada a la mezcla resulto nula, sobre organismos de *Eisenia foetida*.

La evaluación del material contaminante definió la cantidad de asfáltenos presente en el HC, así como su aprovechamiento en las mezclas asfálticas, con lo cual se planifica la recuperación del área afectada. Por medio de las iteraciones dirigidas se redujo el número de muestras a elaborar, minimizando gasto de agregados y análisis. El alto contenido de HC en una mezcla permitirá ocupar mayor cantidad de contaminante y por lo tanto la recuperación del área afectada. Asimismo se efectúa un confinamiento permanente que elimina la posibilidad de dispersión.

Palabras clave: Hidrocarburos intemperizados, mezcla asfáltica, estabilidad, flujo, lixiviación, granulometría densa

ABSTRACT

The excess waste generated by the demand for fuel, food and services represents a serious problem worldwide. Waste must be treated strategically to avoid its effect on the environment and people. A novel strategy for the treatment and revaluation of industrial waste in particular, as well as an integral remediation allowing for the recovery of the capacity of use of the site that is affected by this waste is solidification. Furthermore, it involves the manufacture of a product that constantly maintains its supply and demand. The weathered hydrocarbon (HC) is combined with aggregates of gravel, sand and cement, heated, compacted and set to obtain an asphalt mix of dense granulometry.

It should be noted that any remediation proposal is made according to the conditions of the affected site and characteristics of the pollutant. To carry out the project, initial characterization analysis of the contaminant material was carried out through API gravity and the percentage of asphaltenes, while in the soil, texture, pH, solid and bulk density were analyzed according to NOM-021-RECNAT -2000. We About 50 different combinations of HC and stone aggregates were prepared through an iterative process. In each mixture the technical feasibility was evaluated by means of stability and flow (deformation) analysis according to the Marshall methodology. The iterations were carried out until a combination was obtained that fulfilled the technical feasibility considering two conditions: highest percentage of possible HC and lowest amount of gravel. The environmental feasibility was evaluated by means of a leachate analysis in the PECT extract, which were obtained according to NOM-053-SEMARNAT-1993. These leachates were analyzed for toxicity by the Guideline for Testing of chemicals (Guideline for Testing of Chemicals, No. 207, Earthworm Acute Toxicity) de la OECD 1984 method and also for leachable HC. The economic feasibility was carried out through a unit price analysis.

The optimal values found were stability > 700 kgf and flow > 2 mm, using 16.70% HC, 60.17% sand, 20.00% gravel and 3.13% cement. Regarding the environmental aspect, the asphalt mixture showed 3.39 milligrams of hydrocarbon per liter (mg/L) of the PECT extract in the static leachates during 28 days. This concentration in leachates indicated little mobility of the weathered HC already solidified in the mixture. Likewise, the toxicity of the leachate in the earthworm bioassay (*Eisenia foetida*) was null.

The evaluation of the contaminating material defined the amount of asphaltenes present in the HC, as well as its use in the asphalt mixtures, with which the recovery of the affected area is planned. Through the directed iterations, the number of samples to be processed was reduced, minimizing aggregate expenditure and analysis. The high content of HC in a mixture will allow occupying a greater amount of contaminant and therefore the recovery of the affected area. Also, a permanent confinement is made that eliminates the possibility of dispersion.

Key words: Weathered hydrocarbons, asphalt mix, stability, flow, leaching, dense granulometry

1.- INTRODUCCIÓN

El problema asociado con la gestión de residuos industriales está en aumento tanto en ciudades urbanas y rurales. En los Estados Unidos de América, Asia y Europa, existen cientos de instalaciones de combustión donde se incineran residuos sólidos (Oba *et al.*, 2015).

El manejo de los residuos industriales en el mundo es una realidad con la cual conviven todos los países. No obstante, no todos tienen la misma conciencia y las herramientas para su tratamiento correcto. El continente europeo tiene experiencia por décadas en la industrialización sustentable y desarrollo de modelos de gestión de los residuos. Asimismo, tienen los recursos para contribuir con la reutilización de estos. Sin embargo en Latinoamérica aún queda mucho trabajo por hacer. Algunos países aún carecen de legislación clara respecto al tratamiento y gestión de residuos industriales, otros no cuentan con plantas de tratamiento para evitar el daño a los ecosistema (FISO, 2014).

Los impactos ambientales ocasionados por un mal manejo de los residuos se manifiestan principalmente en la contaminación de suelos, aire, aguas superficiales y subterráneas, incluso por afectaciones a la salud pública, consecuencia de la emisión de contaminantes, productos de la combustión inadecuada de los residuos (SEMARNAT, 2006; INE, 2006).

En México existen un gran número de sitios contaminados por diversas fuentes, estos se atribuyen a la explotación de industria petrolera, química y minera. La industria petrolera representa una de las mayores fuentes de ingreso en el país, pero así mismo impactos negativos en materia ambiental debido a su amplia gama de productos derivados de sus procesos: exploración, extracción, transporte, refinado, disposición de sus residuos, entre otras. Por su parte el problema de los suelos contaminados con hidrocarburo (HC) radica en que existe poca conciencia de la dificultad y costo que representa la remediación de estos (Saval, 1995). Debido a lo anterior es importante conocer las características del material contaminante, y las del área afectada; de esta

manera se podrán plantear estrategias de remediación que cumplan con los requerimientos normativos pero sobre todo ambientales.

En este estudio se plantearon diversas combinaciones de HC y agregados (arena, grava) para la elaboración de mezclas asfálticas, se evaluó su respuesta con base en la metodología Marshall (estabilidad y flujo). Después de varias iteraciones se obtuvo una mezcla idónea, que contiene la máxima cantidad posible de HC intemperizado y la mínima de agregado grueso. Además se determinó su factibilidad técnica, ambiental y económica (Anexo 1).

2.- JUSTIFICACIÓN

2.1.- Particularidad del sitio

El Complejo Procesador de Gas Arenque (CPGA) es un complejo relativamente nuevo, cuya función principal es el endulzamiento de gas amargo de la zona marina. El sitio fue recuperado de terrenos de Pemex Refinación, y aparentemente contiene áreas en donde, por prácticas históricas, se depositaban fondos de tanques de almacenamiento. Se perciben áreas de suelo manchado y emanaciones de HC, que son parecidas a los "geiseres asfálticos" (Smith et al., 1977).

Estos HC son de fracción pesada intemperizados, se encuentran sobre la superficie del suelo, afectando la capacidad de uso del sitio y a profundidades de hasta 6 metros. Se propone recuperar el material de manera física e incorporarlo como un subproducto, para elaborar de una mezcla asfáltica.

2.2.- Con base en la normatividad Mexicana

Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (LGPGIR, 2014), en su artículo quinto párrafo XL define un sitio contaminado como: "Lugar, espacio, suelo, cuerpo de agua, instalación o cualquier combinación de éstos que ha sido contaminado con materiales o residuos que, por sus cantidades y características, pueden representar un riesgo para la salud humana, a los organismos vivos y el aprovechamiento de los bienes o propiedades de las personas" (LGPGIR, 2015).

Por otra parte la Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, que muestra los límites máximos permisibles de HC en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación, en el numeral 8.2.1 establece que la remediación de un sitio contaminado con HC “Se efectuará hasta alcanzar los límites máximos permisibles establecidos en esta norma o hasta cumplir con las acciones y niveles específicos de remediación producto del estudio de evaluación de riesgo ambiental, que en su caso se realice” (SEMARNAT, 2012).

De acuerdo a lo anterior este proyecto se considera como un sitio contaminado que debe ser sometido a un proceso de remediación, considerando sus características ambientales y económicas (Anexo 2).

2.3.- Tecnologías de remediación propuestas

Cada sitio contaminado tendría que evaluarse en términos de un juego limitado de características propias y fundamentales, para proponer una solución que sea efectiva en cuanto a los resultados esperados y a la relación costo-beneficio. Muchas veces la tecnología de remediación utilizada depende de varios aspectos: el tipo de contaminante y sus características fisicoquímicas, la localización y las características del sitio, tipo de suelo, sedimentos y cuerpos de agua, también algo importante de tomar en cuenta es la capacidad de la tecnología de remediación que se pretende aplicar (Sellers, 1999).

La remediación de este sitio se basa en la recuperación y aprovechamiento del contaminante como materia prima. Para esto se plantea un tratamiento que consiste en una combinación de tecnologías de Estabilización-Solidificación. La primera limita la solubilidad o movilidad del contaminante, asegurando que los constituyentes peligrosos se mantengan en forma menos móvil o tóxica. Por su parte, la solidificación encapsula el contaminante formando un material sólido (EPA, 2001).

2.4.- Enfoque de la investigación

El carácter de la investigación es diverso y responde a las necesidades que el mundo reclama, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, 2015) define dos

tipos de investigación: básica y aplicada (Figura 1). La investigación básica tiene como objetivo la generación de nuevo conocimiento partiendo de antecedentes teóricos, mientras que la investigación aplicada, fundamentada por los conocimientos y experiencias ya generados, trata de adaptarlos y enfocar esfuerzos a la resolución de problemas específicos.

Con base en lo anterior este estudio podemos plantearlo en un plano de investigación aplicada ya que se trabajó con un esquema particular tanto del sitio como del contaminante. Además las estrategias de recuperación están basadas en alternativas factibles a la zona.

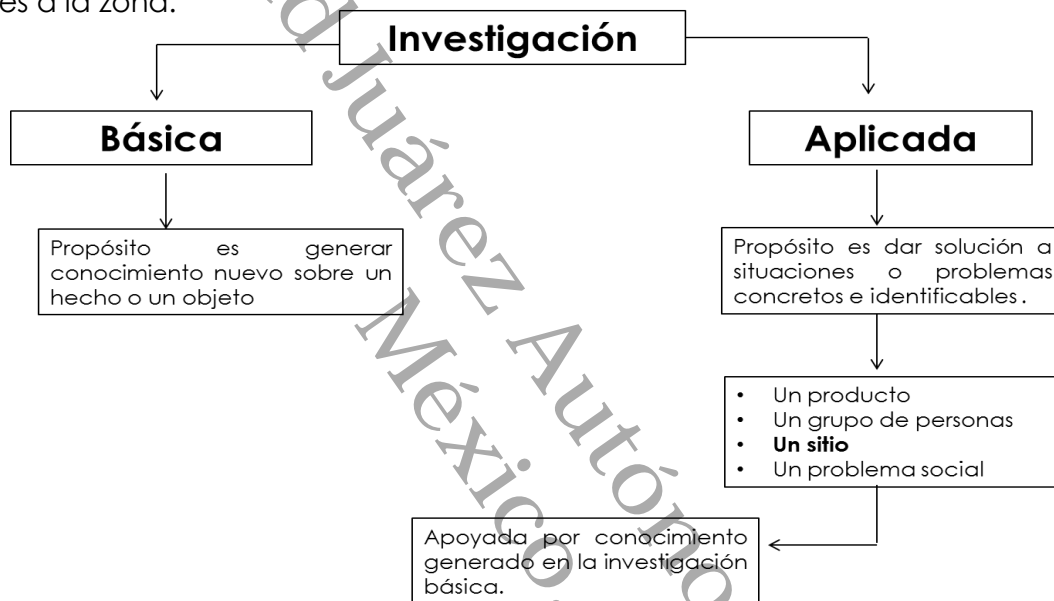


Figura 1.- Representación conceptual; elaborada con referencias de (Bunge, 1971).

3.- ANTECEDENTES

3.1.- Nivel internacional

Pérez *et al.* (2007) diseñaron mezclas asfálticas fabricadas con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición. Realizaron una serie de ensayos que permitieron caracterizar el comportamiento mecánico de estas mezclas. Los parámetros mecánicos de las mezclas con áridos reciclados son similares a los de las mezclas fabricadas únicamente con áridos naturales de cantera. Sin embargo, las mezclas con áridos reciclados tuvieron un mal comportamiento frente a la disminución de la resistencia por pérdida de cohesión por la acción del agua.

En 2012 Pérez *et al.* evaluaron la posibilidad de diseñar mezcla asfálticas en caliente usando los áridos gruesos residuos de construcción y demolición. Los porcentajes de material reciclado utilizados en las mezclas fueron: 0, 20, 40 y 60. Cemento y cal, se utilizaron como materiales de relleno. Las mezclas a base de áridos gruesos reciclados cumplieron con las especificaciones técnicas Marshall para caminos de bajo volumen. Las mezclas mostraron buena resistencia a la deformación permanente evaluado por ensayos de seguimiento de rueda.

Taher *et al.*, (2013) utilizaron residuos de botellas de tereftalato de polietileno (PET), como material complementario en la preparación de mezclas asfálticas, con el objetivo de encontrar un uso a este tipo de material, probaron los siguientes porcentajes 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1.0 en peso a partir de Kajang (residuos de cantera en Malasia). Encontrando que con su adición, se requieren valores inferiores de contenido de asfalto en comparación con la mezcla convencional, y mostraron significativamente mayor resistencia a la fatiga.

En el 2015 Oba *et al.* reciclaron neumáticos obtenido del Estado Cross River, Nigeria, usándolos para preparar mezclas asfálticas agregando áridos de 9.5 mm astillado de granito y arena de 0.5 mm. Para su uso los neumáticos fueron lavados a fondo, secados y desmenuzados en secciones para liberarlo de residuos de acero. La cantidad de caucho utilizado en las mezclas varió de 2 %-10 %. El método adoptado en la preparación de las muestras de ensayo fue el método de ensayo Marshall, encontrando que porcentajes de 4-10 son recomendables para mezclas que soportan tráfico medio.

Abreu *et al.* (2015) realizaron un estudio en Portugal para utilizar asfalto reciclado y otros materiales en la producción de mezclas asfálticas con el fin de mejorar su desempeño mecánico, ambiental y económico. Se realizaron mezclas con 50% de asfalto reciclado combinado con otros residuos (aceite de motor usado y polietileno de alta densidad), como modificadores de ligante, además se prepararon mezclas sin aditivos. Concluyeron que hasta un 7.5 % de aceite de motor usado y un 4 % de residuos de polietileno pueden ser utilizados con mezclas de 50 % asfalto reciclado.

3.2.- Nivel nacional

Álvarez-Coronel (2010) realizó pruebas de estabilización/solidificación de material contaminado con 60 % costra aceitosa y 40 % sedimento, determinó los HC en lixiviado, toxicidad y resistencia a la compresión. Las concentraciones de aglomerante y puzolana probadas fueron 3.75–15 % de CaO y 1.25–5.0 % de tierra diatomea. En todos los tratamientos de estabilización la toxicidad aguda resultó nula o indeterminada. La estabilización fue factible para este sitio usando concentraciones bajas de reactivos. Para materiales solidificados, se utilizaron dos tratamientos (3.75 y 7.5 % CaO y 1.25 y 3.75 % tierra diatomea; terracería a 1:1), y una resistencia a la compresión no confinada ($> 17.6 \text{ t/m}^2$).

En el 2014 Soberano-Álvarez evaluó el proceso de neutralización/solidificación para el tratamiento integral de residuos de terracería ácida y sedimentos contaminados con HC intemperizados. En el proceso integrado la terracería ácida fue combinada con los sedimentos contaminados y la mezcla fue homogenizada completamente antes de agregar los reactivos (5.15 % CaO y 1.25 % tierra diatomea). Al finalizar su fase experimental evaluó aspectos de resistencia a la compresión, toxicidad y lixiviación. Encontrando valor de resistencia de 16.70 kg/cm^2 , toxicidad aguda por debajo del nivel umbral y concentraciones de HC lixiviables de 22.63 mg/kg .

4.- OBJETIVOS

4.1.- Objetivo general

Determinar una mezcla asfáltica de granulometría densa con el mayor porcentaje de HC intemperizados y la menor cantidad de grava, que cumpla con factibilidad técnica, ambiental y económica.

4.2.- Objetivos particulares

- Caracterizar en laboratorio el suelo afectado y el material contaminante presente en el sitio.
- Elaborar mezclas asfálticas, mediante diversas combinaciones de HC intemperizados y agregados, de acuerdo a la metodología Marshall, hasta encontrar una que cumpla los requerimientos de estabilidad y flujo.
- Evaluar la factibilidad técnica, ambiental y económica de la combinación que cumpla con los valores de estabilidad y flujo.

5.- ÁREA DE ESTUDIO

El CPGA se localiza en una área anexa a la refinería Francisco I. Madero, dentro del corredor industrial Tampico-Madero-Altamira, al sur del estado de Tamaulipas, en el municipio de Ciudad Madero con coordenadas UTM 622310.09 m E y 2464330.80 m N (Figura 2). El complejo se construyó con el fin de aprovechar el gas producido en los campos de Arenque y Tamaulipas-Constituciones. Este comprende plantas de endulzamiento de gas húmedo amargo, así como de recuperación de licuables y azufre, iniciando sus operaciones en 2003 (Pemex Gas y Petroquímica Básica, 2015).

Sus actividades principales son el tratamiento del gas húmedo amargo, para eliminar los contaminantes, y la separación de sus componentes, mediante los procesos industriales de endulzamiento de gas, recuperación de azufre y los licuables del gas natural.

El gas residual seco es entregado en la estación de regulación y medición "El Blanco", situada a 2 km del CPGA aproximadamente. Los licuables del gas natural (propano + pesados) son entregados en el límite de batería de la refinería Francisco I. Madero, para su fraccionamiento; la gasolina natural se incorpora al proceso de Pemex Refinación. Los condensados y líquidos amargos del gas natural, provenientes del tanque separador de entrada de la planta endulzadora de gas, son retornados a la batería de Arenque de Pemex Exploración y Producción. Actualmente, se estudia un proyecto para fraccionar los líquidos (etano + pesados) y obtener gas licuado y gasolinas naturales (Pemex Gas y Petroquímica Básica, 2015).

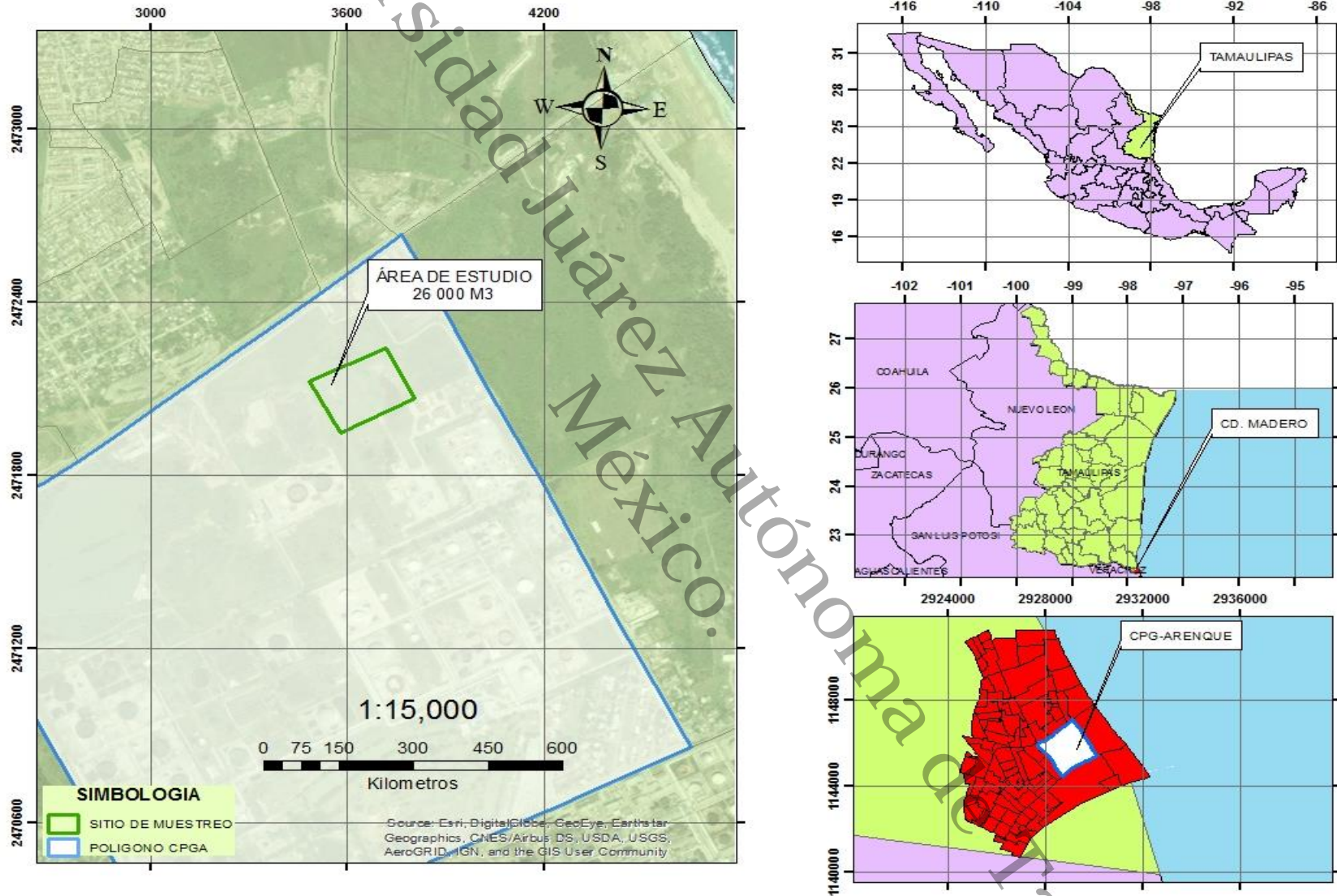


Figura 2.- Ubicación del sitio contaminado, editada en software ArcGIS 10.3.

6.-MÉTODO

En la Figura 3 se muestra un diagrama de la metodología empleada durante el proyecto.

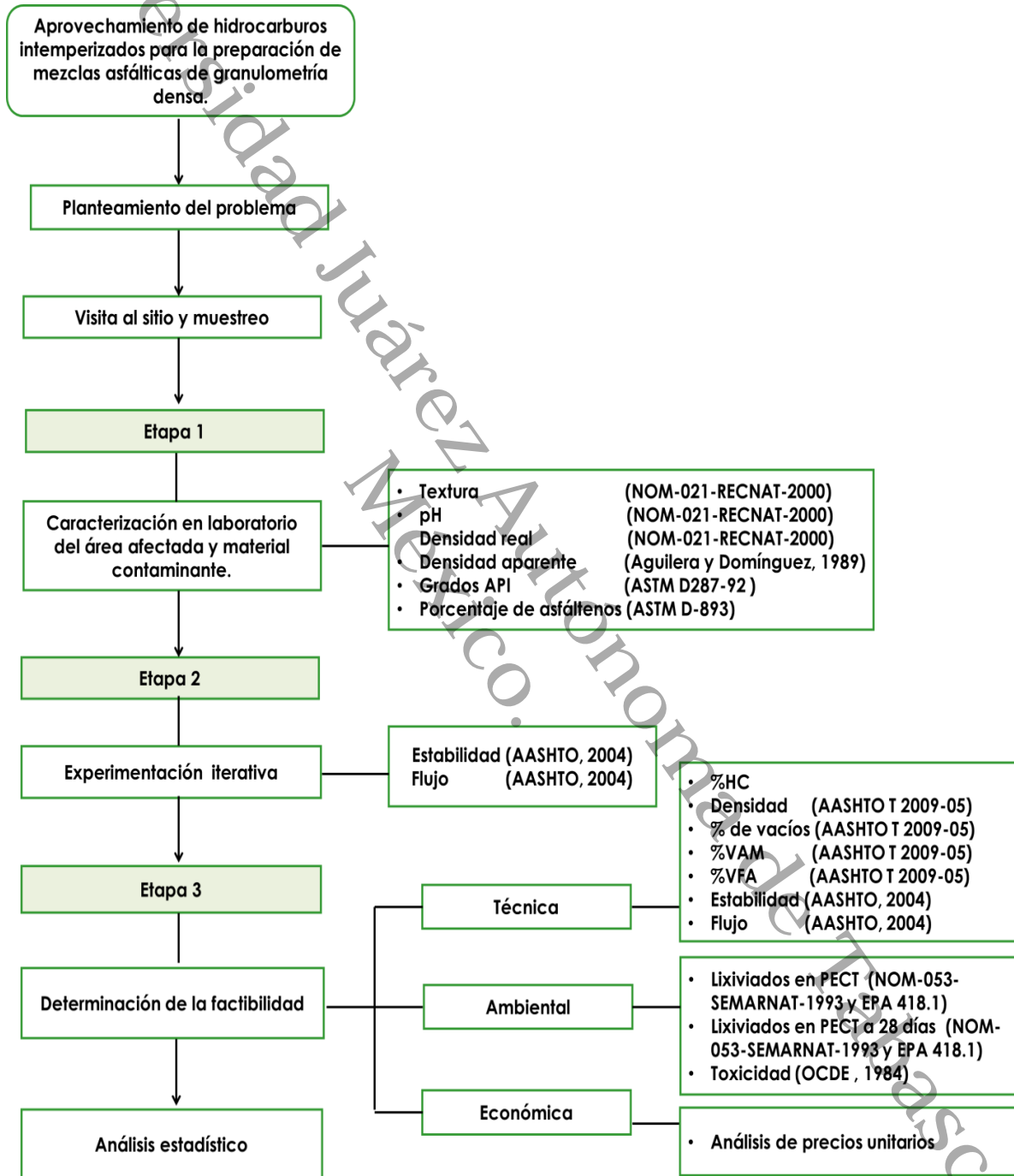


Figura 3.- Método utilizado en el proyecto.

6.1.- Planteamiento del problema

Se reconoció el sitio (26 000 m³), el material contaminante y las propuestas de remediación. Posteriormente se identifican las características técnicas y ambientales que deben cumplir las mezclas asfálticas para su uso potencial dentro de la zona afectada. Inmediatamente se diseña una estrategia de remediación (Figura 4).



Figura 4.- Vista del CPGA y delimitación de zona afectada.

6.2.-Visita al sitio y Colecta de muestras

Al visitar el área de estudio se colectaron aproximadamente 50 kg de HC, de manera manual (Figura 5), colocándose en cubetas de 20 L. También se colectaron muestras de suelo (6 kg), las cuales se guardaron en bolsas de plástico. El transporte se realizó en vehículo particular, hasta su llegada al Laboratorio de Remediación de la División Académica de Ciencias Biológicas de la UJAT, en Villahermosa, Tabasco.



Figura 5.- Colecta de muestra.

6.3.- Etapa 1: Caracterización del área afectada y material contaminante

Para la caracterización del sitio se realizaron los siguientes análisis: textura, pH, densidad aparente y densidad real. Respecto a las características del HC se analizaron grados API y porcentaje de asfaltenos presentes en los HC (Figura 6).



Figura 6.- Muestra de suelo e HC.

6.3.1.-Textura

De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 método AS-09 (SEMARNAT, 2000), se utilizó peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 3 % para eliminar la agregación de la materia orgánica y la floculación debido a los cationes de calcio y magnesio. El tiempo de lectura mediante el densímetro de Bouyucos fue de 40 segundos para la separación de partículas mayores de 0.05 mm (arena) y de 2 horas para partículas de diámetro menores de 0.002 mm (limo y arcilla) (Figura 7).



Figura 7.- Análisis de textura.

6.3.2.- pH:

Se basó en la determinación de la actividad del ion H^+ mediante el uso de un electrodo cuya membrana es sensitiva al H^+ . En el caso de los suelos, el pH se mide potenciométricamente en la suspensión sobrenadante de una mezcla de relación suelo-agua de 1:2.5 respectivamente, esto basado en la NOM-021-RECNAT-2000 método AS-02 (SEMARNAT, 2000).

6.3.3.- Densidad aparente (DA)

De acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (AS-03) se midió la masa y volumen total del suelo, se consideró el volumen macizo de las partículas, más el volumen de los poros y huecos, esto reflejó el contenido total de la porosidad, la compactación así la como facilidad de la circulación del agua y aire (Figura 8).



Figura 8.- Evaluación de la DA.

6.3.4.- Densidad real (DR)

El método establece una relación de masa y volumen; para esto se pesaron 5 gramos de suelo y se obtuvo el volumen de los componentes minerales y materia orgánica (Aguilera & Domínguez, 1989) (Figura 9).



Figura 9.- Análisis de DR.

6.3.5.- Grados API

La gravedad API del petróleo (Figura 10) Se determinó tomando el método propuesto por Morales *et al.* en 2015 en el cual se realizó una medición indirecta por medio de extrapolación para HC intemperizado, para esto se requiere preparar una mezcla con diésel y aceite lubricante



Figura 10.- Análisis de gravedad API.

multigrado API SL SAE 20W-50W (Bardahl) que se utiliza como solvente en una proporción 1:1 , complementado por el método API (ASTM D287-92) utilizando un densímetro bajo el principio de que la gravedad de un líquido varía directamente con la profundidad de inmersión que sufre un cuerpo al flotar en él.

6.3.6.- Porcentaje de asfaltenos

De acuerdo a la ASTM D-893 para este análisis se ocupó como solvente hexano. La muestra se centrifugó a 600-700 rpm durante 20 minutos. Posteriormente se filtraron los sólidos y se decantó hasta obtener sólo 3 ml de extracto y de nuevo se disolvió en 150 ml de hexano centrifugándose por segunda vez a la misma temperatura.

6.3.7.- Caracterización de la arena y grava a utilizar

La arena del sitio fue caracterizada a través de una curva granulométrica, donde se indica la cantidad que pasa por mallas de diferentes diámetros (Anexo 3), ya que esta será usada como parte de los agregados de la mezcla asfáltica. La grava caracterizada (Anexo 4), fue tomada de un banco cercano al sitio, esto para reducir costos de transporte y buscando diámetros entre 37.5-9.5 mm.

6.4.- Etapa 2: Experimentación iterativa

Cuando se desarrolla el diseño de una mezcla asfáltica, es necesario hacer varias mezclas preliminares o exploratorias para encontrar una que cumpla con todos los criterios de diseño. Para la elaboración de estas mezclas, es aconsejable comenzar con una graduación de agregado que se acerque a la media de los límites establecidos (granulometría densa, semiabierta o abierta). Las pruebas iniciales sirvieron para establecer porcentajes y graduación de agregados, así como verificar que la estuviera dentro de los límites especificados, esto para que la mezcla pueda ser reproducida en planta (Figura 11).

Para elaborar una mezcla asfáltica se prepararon los agregados de grava y arena secados previamente en un horno a 105 °C por 24 horas. Se pesaron las proporciones correspondiente a cada agregado, HC y filler.

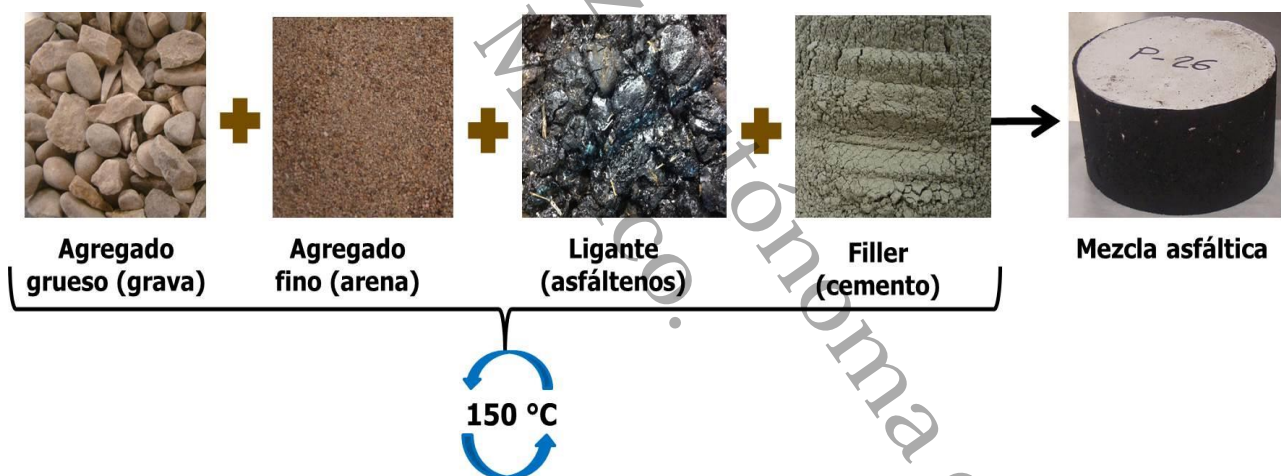


Figura 11.- Componentes de la mezcla asfáltica.

Posteriormente se mezclaron todos los componentes y aproximadamente 5 ml de agua en una charola, con ayuda de una Parrilla de inducción Kooker marca Royal Prestige a 180 °C, durante 15 minutos.

Después de la homogenización, la mezcla caliente se depositó sobre el molde y se aseguró con ayuda del sujetador (Figura 12). Inmediatamente se aplicaron 50 golpes con ayuda del martillo, se retiró el molde colocando el extremo opuesto y se aplicó la misma cantidad de golpes (AASHTO, 2004).



El diseño bajo el cual se realizaron las diferentes combinaciones de mezclas asfálticas se basa en una serie de repeticiones iterativas, que permitan una optimización de tiempo, recursos y esfuerzo. Las iteraciones explican muchas las podríamos citar en dos extremos: un enfoque que busca un algoritmo de optimización y generar parámetros estructurales, en el otro cubrir necesidades de mercado o producción. En recientes investigaciones la iteración se ha utilizado para construir modelos para gestión de toma de decisiones (Smith & Tjandra, 1998). Por su parte (Blackburn (1991), Clark & Fujimoto (1991) y Nevins & Whitney (1989), coinciden en que un proceso iterativo es una herramienta fundamental para llevar a cabo investigación dirigida a crear modelos y procesos de diseño capaces de reducir el tiempo necesario para completar el desarrollo de un producto, es decir procesos exitosos.

6.4.1.- Iteración 1

La combinación de diferentes porcentajes de HC en la mezcla. Se seleccionaron aquellas que respondían a los valores de estabilidad mayores a 700 kgf.

6.4.2.- Iteración 2

Con las mezclas seleccionadas en la iteración 1, se realizó una segunda iteración a tres diferentes porcentajes de grava. En esta parte de la iteración las combinaciones

satisfacción valores óptimos de estabilidad. Pero flujo menor a 2 mm, por lo que requirió una nueva formulación de mezclas (Iteración 3).

6.4.3.- Iteración 3

La cual estuvo basada en la relación HC-arena, y porcentajes de grava en rangos de 11-20 %. En estas mezclas se repitieron las pruebas de estabilidad y flujo, y se definieron los porcentajes óptimos de ligante (HC), agregados (arena y grava) y filler (cemento) (Figura 13).

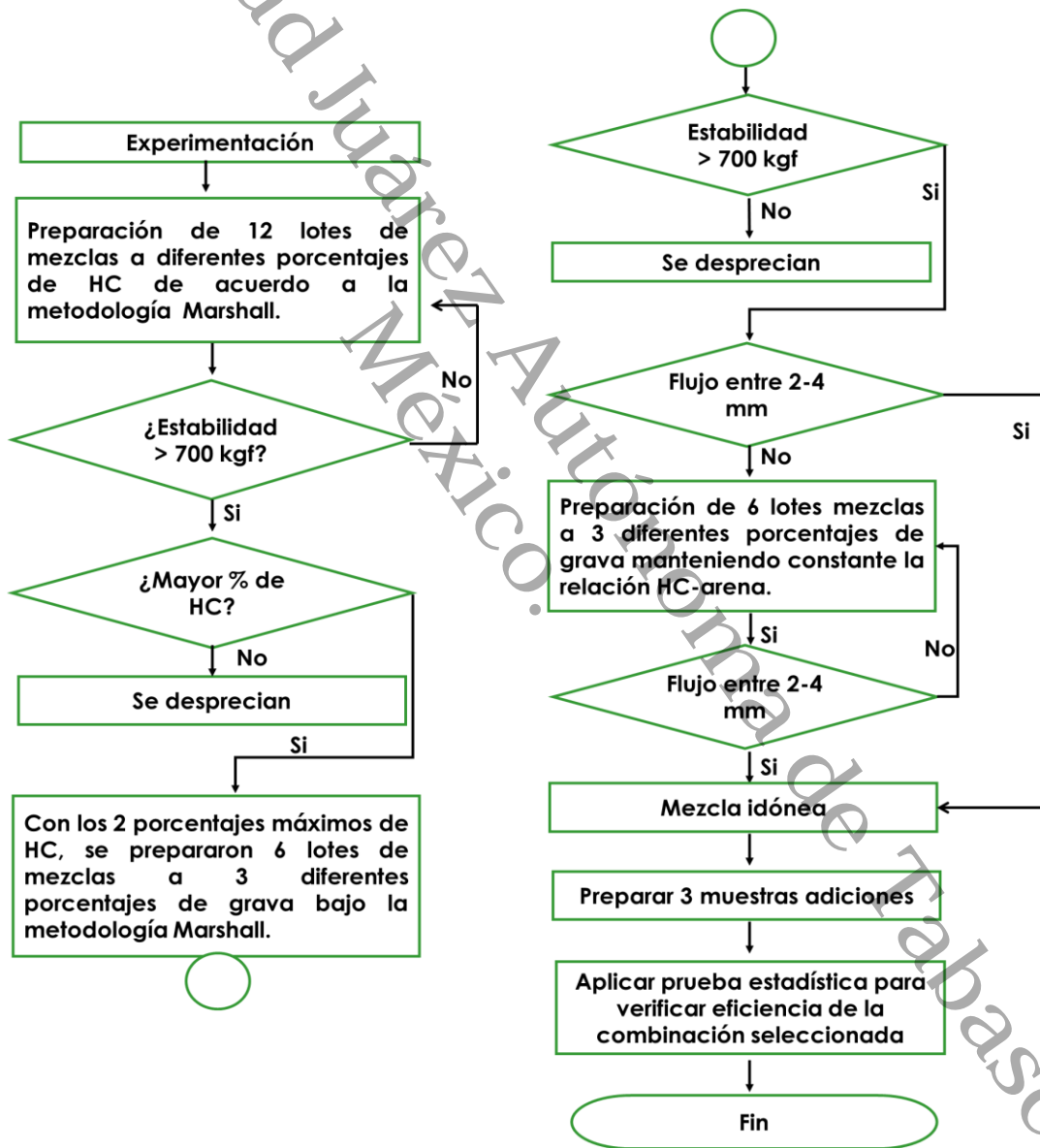


Figura 13.- Algoritmo para resumir experimentación iterativa.

6.5.- Etapa 3: Evaluación de la factibilidad

6.5.1.- Técnica

6.5.1.1.- Estabilidad y flujo

Usando el equipo Marshall (Anexo 6), la mezcla sólida (bloque) se coloca en un baño de agua durante 30 minutos a 60 °C. La temperatura de las mordazas Marshall permanecieron entre 21 y 37 °C. Pasado el tiempo se retiró el bloque y fue colocada sobre la mordaza inferior, se colocó la mordaza superior y se montó con el medidor de deformación centrado en la prensa (Figura 14). El medidor de flujo en posición mantuvo su vástago firmemente contra la mordaza superior mientras se aplicó la carga de ensayo a una deformación constante de 50.8 mm (2") por minuto, hasta que ocurrió la falla (cuando se alcanzó la máxima carga y luego disminuyó). Se registró la lectura de estabilidad del dial indicador la cual se convirtió a carga (multiplicándola por la constante del anillo). Los resultados se expresan en kilogramos fuerza (kgf) (AASHTO, 2004).

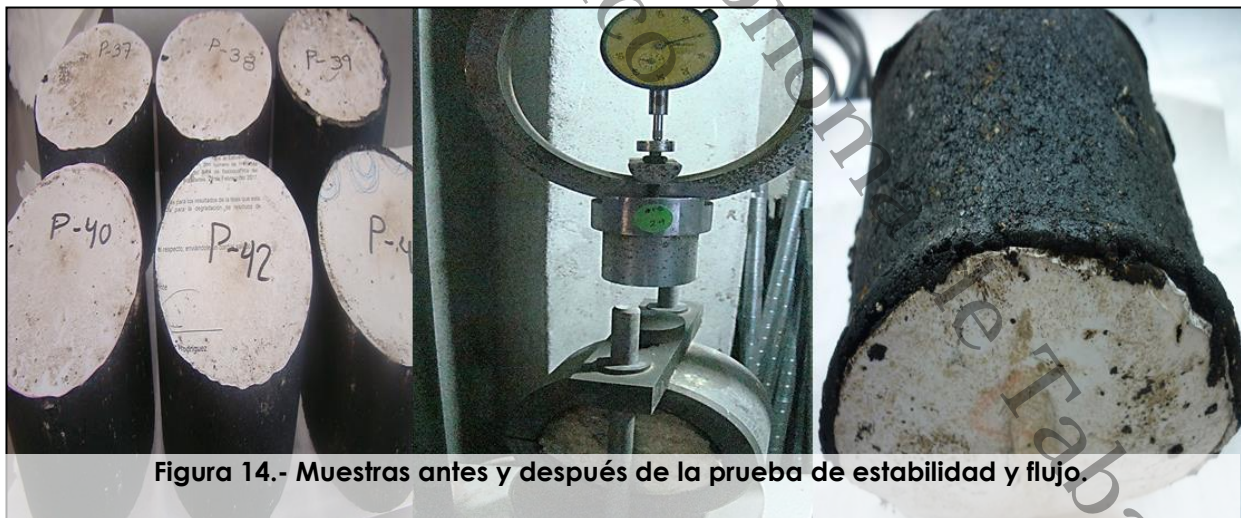


Figura 14.- Muestras antes y después de la prueba de estabilidad y flujo.

6.5.2.- Factibilidad ambiental

6.5.2.1.- Hidrocarburos totales de petróleo (HTP) en lixiviados del extracto PECT

De acuerdo a la NOM-053-SEMARNAT-1993, la muestra sólida se expuso a solución ácida pH 4.93, durante 18 (\pm 2) horas (Figura 15), posteriormente se filtró, obteniendo un extracto al cual se determinó HTP; por el método EPA 418.1.

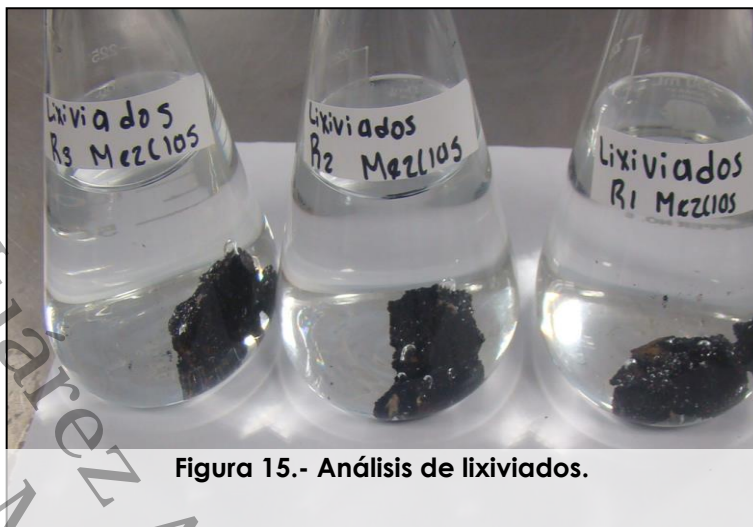


Figura 15.- Análisis de lixiviados.

6.5.2.2.- HTP en lixiviados del extracto PECT modificado (prueba estática)

Para esta determinación se tomó como referencia el análisis de lixiviados según la NOM-053-SEMARNAT-1993, modificado por Álvarez-Coronel en 2010. Se colocó el bloque completo a la solución ácida pH 4.93, en proporción 1:5 peso-volumen, durante 28 días (Figura 16). Pasado el tiempo de exposición se retiró el bloque y al extracto obtenido se le determinaron los HTP extraíbles con percloroetileno, en proporción 1:1 (extracto-solvente).

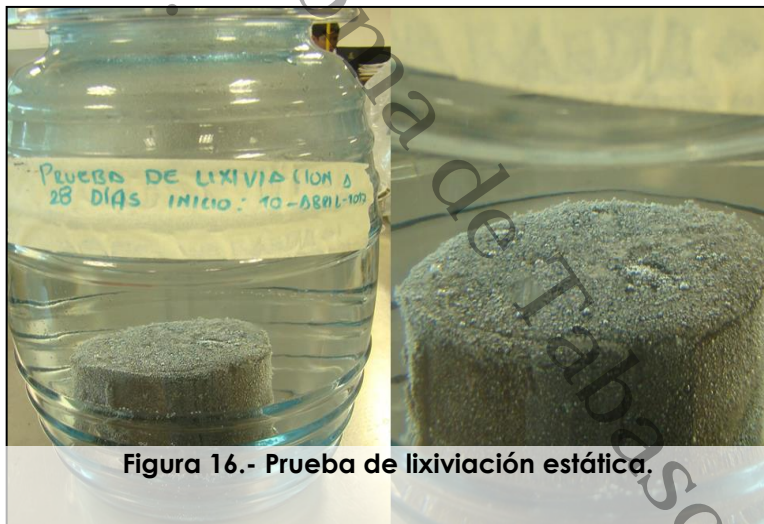


Figura 16.- Prueba de lixiviación estática.

6.5.2.3.- Toxicidad Aguda

Se utilizó un extracto, obtenido de exponer la mezcla asfáltica a solución ácida (Figura 17), de acuerdo a la NOM-053-SEMARNAT-1993. Posteriormente se realizó el método del papel filtro propuesto por la OCDE (1984), se expusieron organismos *Eisenia foetida*, durante un periodo de 2 días, realizando observaciones a las 24 y 48 horas respectivamente.

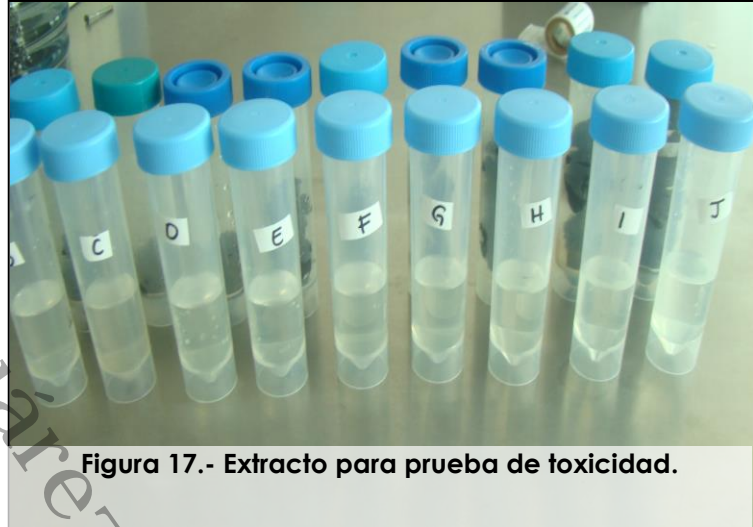


Figura 17.- Extracto para prueba de toxicidad.

6.6.- Análisis de resultados

El análisis de los resultados se hizo usando el paquete estadístico *R* y consistió en comparar los resultados de estabilidad y flujo de la mezcla ideal mediante una prueba *t student* de una cola.

La factibilidad técnica y ambiental se presentó a través de gráficas y tablas en software Excel 2007 y una prueba de Kruskal-Wallis a la prueba de toxicidad en el paquete estadístico *R*.

Los costos del proyecto (Cuadros 10,11 y 12) fueron estimados tomando en cuenta precios del mercado actual en la zona de referencia, el precio total presentado es exento de costos por las gestiones, con base a la normatividad vigente (Manifestación de impacto ambiental y evaluación de riesgo), que en su caso se requiera para la realización del proyecto.

7.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1.- Etapa 1: Caracterización del área afectada y material contaminante

7.1.1.- Área afectada

Se observa en el Cuadro 1 la caracterización realizada a muestras de suelo, éstas indican las condiciones en las que se encuentra el sitio, el pH es prácticamente neutro y la densidad es propia de suelos arenosos. No encontramos alteraciones en cuanto a estos indicativos en el suelo a causa de la presencia del HC.

Cuadro 1.- Caracterización del sitio.

Muestra	pH	DR (g/cm ³)	DA (g/cm ³)
S-1	7.14 (±0.27)	2.75 (±0.01)	1.22 (±0.01)
S-2	7.32 (±0.06)	2.58 (±0.01)	1.33 (±0.01)
S-3	7.66 (±0.08)	2.60 (±0.08)	1.35 (±0.01)
S-4	7.35 (±0.03)	2.59 (±0.02)	1.36 (±0.01)

* Cada uno de los análisis se realizó por triplicado.

El suelo corresponde a una clase textural arenosa, la cual proporciona características minerales poco meteorizables (Porta *et al.*, 2013). La evaluación de las diferentes partículas presentes en el suelo que se presenta en el Cuadro 2, con una cantidad promedio de arenas de 90.70% (Figura 18) dan una característica particular, por ser partículas gruesas que estando limpias no se contraen al secarse, no son plásticas, son mucho menos compresibles que las arcillas. Si se aplica carga en su superficie, se comprimen casi de manera inmediata (Crespo, 2004).



Figura 18.- Área afectada.

Cuadro 2.- Porcentajes de partículas en el suelo.

Muestra	Arenas (%)	Arcillas (%)	Limos (%)	Clase textural
S-1	93.20	4.00	2.80	Arena
S-2	85.20	10.00	4.80	Arena
S-3	91.20	6.00	2.80	Arena
S-4	93.20	4.00	2.80	Arena

7.1.2.- Material contaminante

En el Cuadro 3 se observan los resultados de los grados API del HC, estos corresponden a valores negativos, a causa de la intemperización del material, correspondiente a una fracción pesada (< 10), su estado físico es sólido.

El porcentaje de asfáltenos medidos tienen un promedio de 69.31%, demuestra que este material es óptimo como ligante para las mezclas asfálticas. Según el documento técnico No. 23 publicado por IMT y SCT en el 2001, porcentajes de asfáltenos arriba de 71 se consideran excesivos dentro de la composición HC.

Cuadro 3.- Caracterización de material contaminante.

Muestra	°API	GE	Asfáltenos (%)
HC1	-29.7	1.38	75.63
HC2	-12.2	1.18	78.29
HC3	-7.7	1.14	60.33
HC4	-7.5	1.14	62.99

La gravedad específica promedio del HC es 1.21, esta característica se debe al peso molecular elevado de los asfáltenos presentes en su estructura. Este valor obtenido es aproximado al del ligante (1.016) que utilizaron Zahedi *et al.* (2014), para elaborar una mezcla asfáltica modificada con 0.5 % de polipropileno, con temperaturas de 148-154 °C obteniendo mejoras en la estabilidad respecto a mezclas estándar.

7.2.- Etapa 2: Experimentación Iterativa

7.2.1.- Iteración 1

Se determinó la concentración máxima de HC que cumple con el criterio de estabilidad (>700 kgf), manteniendo constantes las proporciones de arena y grava (2:1).

En la Figura 19 se observa la respuesta a la estabilidad de mezclas a diferentes cantidades de HC. En rangos de 16, 18 y 19 % se satisfacen la estabilidad de 700 kgf. Al superar 20 % de HC empezamos a notar una reducción de estabilidad, considerando esta disminución debido al exceso de ligante respecto a la cantidad de agregados.

La otra variable de evaluación (flujo > 2 mm), no es suficiente para este grupo de muestras. Para rangos con HC elevado el flujo aumenta pero el exceso de ligante produce deformación rápida por lo que la estabilidad disminuye drásticamente.

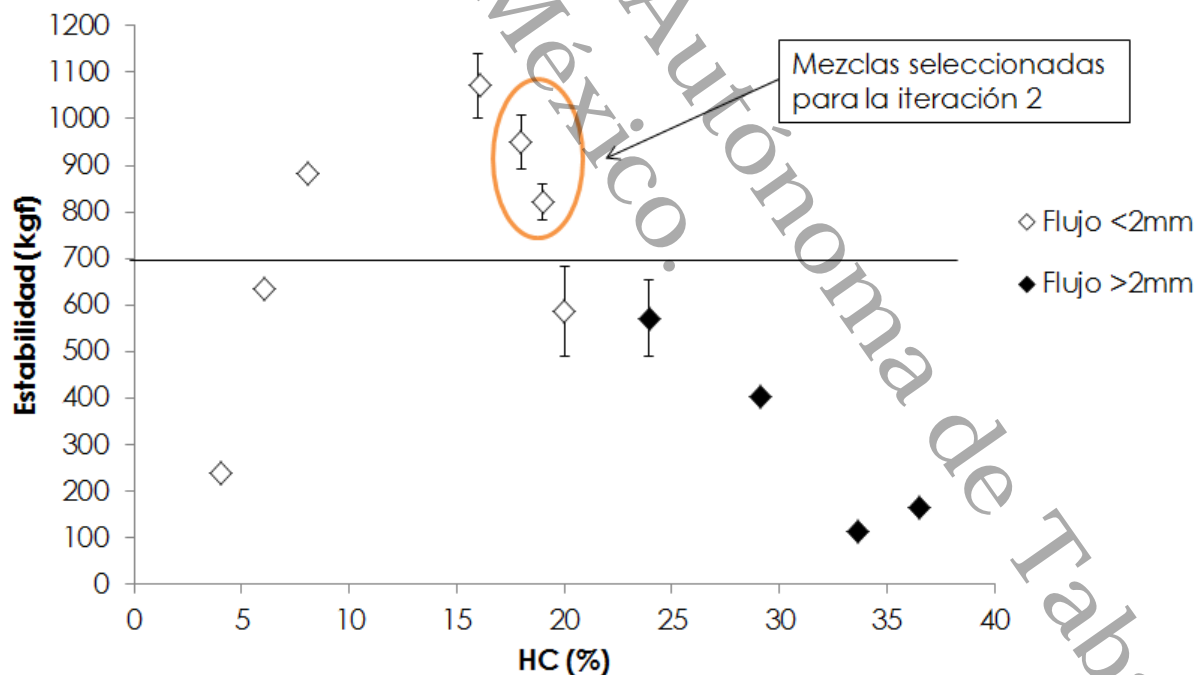


Figura 19.- Preparación de mezclas a diferentes porcentajes de HC.

Utilizando las concentraciones máximas de HC que cumple el criterio de estabilidad, se determinó la proporción mínima de grava necesaria.

7.2.2.- Iteración 2

Empleando las máximas concentraciones de HC establecidas en la iteración 1, se realizaron pruebas con 18 y 19 % HC, y diferentes porcentajes de grava (15, 20 y 25 %), buscando utilizar la menor cantidad de grava posible.

La cantidad mínima de grava necesaria para cumplir con el criterio de estabilidad cuando se emplea 19 % de HC fue entre (20–25 %). Es decir al combinar 19 % HC con 15 % grava la estabilidad promedio es de 681 (± 14.83), esto por debajo de lo esperado. A las mezclas con 20 % de grava y la misma cantidad de HC rebasó ligeramente los 707 (± 21.67) kgf. La combinación contiene 19 % HC y 25 % grava supera los 800 kgf (Figura 20), resultando el mejor tratamiento, estas muestra no cumple el criterio de flujo puesto que no superó los 2 mm en ningún tratamiento.

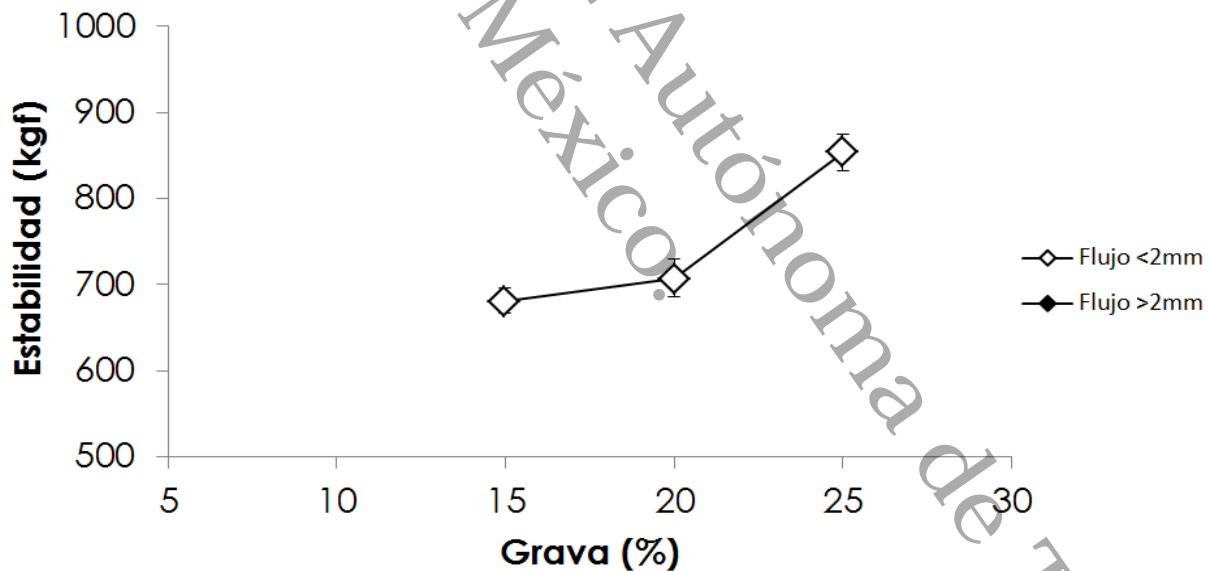


Figura 20.- Mezclas con 19% de HC a diferentes porcentajes de grava.

Otra serie de combinaciones en este iteración 2 fue 18 % HC y (15, 20 y 25 %) grava. Se encontró que cuando se combinan 18 % HC y 15 % grava, se obtiene valores promedio de estabilidad de 733 (± 91.65) esto es un poco más de lo requerido.

Esta misma cantidad de HC y 20 % de grava alcanza 743 (± 69.45), al igual que el tratamiento anterior supera los 700 kgf (Figura 21), por su parte la última combinación con 25 % grava no alcanza la suficiente resistencia. Hasta esta etapa el flujo medido es < 2 mm.



Figura 21.- Mezclas con 18% de HC a diferentes porcentajes de grava.

Los valores obtenidos respecto al flujo, trabajando a 18 y 19 % de HC, fue menor a 2 mm con esto obtenemos mezclas que satisfacen requerimientos de estabilidad pero insuficientes valores de flujo. Dentro de una mezcla asfáltica este es un parámetro importante, según la SCT el rango adecuado es de 2-4 mm, para evitar que presente desgaste por fricción. Las dificultades para encontrar valores óptimos de flujo en las muestras tratadas (Figura 22), lo podemos atribuir a los porcentajes de HC agregados, es decir, la característica de intemperización aporta condiciones de resistencia y plasticidad al material, lo que hace que la rigidez aumente. Por lo tanto, la estabilidad se ve favorecida pero el flujo afectado.

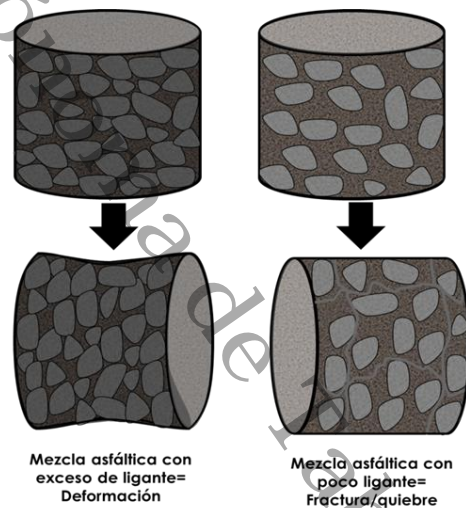


Figura 22.- Deformación y quiebre de muestras.

En este punto de la experimentación y después de realizar las combinaciones con las mayores cantidades de HC posible, se determinó hacer un análisis de la relación que existe entre el ligante y el agregado fino, en el Cuadro 4 observamos la influencia de esta para resultados de flujo.

A partir de este análisis se determinó dirigir el diseño de la mezcla a mantener fija una relación HC/arena de 0.27-0.28, esto por considerar que bajo dicha proporción se garantiza buena estabilidad y siguiendo expectativas de nuestro objetivo 2, realizar una mezcla que contenga la mínima cantidad de grava que sea posible, garantizando su factibilidad técnica.

Manteniendo la proporción de HC y arena cerca de 0.27-0.28, y modificando la proporción relativas de grava, se determinó una proporción mínima de grava necesaria para cumplir con los dos criterios técnicos (estabilidad y flujo).

7.2.3.- Iteración 3

Se determinó la mínima proporción relativa de grava que cumple con los criterios de estabilidad y flujo, siempre manteniendo la proporción relativa de HC y arena cerca de 0.27-0.28.

A una proporción de 20 % de grava (16.7 % de HC y 60.17 % de arena) se cumplen los criterios de estabilidad y flujo con un 95 % de confianza. Al mantener constante la relación de 0.28 HC/arena (la cantidad de arena por cada gramo de HC dentro de la mezcla), se diseñan mezclas a diferentes porcentaje de grava, observamos que este lote presenta resultados de estabilidad superiores a 700 kgf, por lo que nos enfocamos en trabajar en función de la respuesta a la segunda variable de importancia (flujo).

Cuadro 4.- Mezclas diseñadas en función de relación HC/arena.

HC (%)	Arena (%)	Grava (%)	Cemento (%)	Estabilidad (kgf)	Flujo (mm)	Relación HC/Arena
18	53.87	25	3.13	653	1.57	0.334
18	58.87	20	3.13	743	1.35	0.306
18	63.87	15	3.13	733	1.59	0.282
19	52.87	25	3.13	853	1.73	0.359
19	57.87	20	3.13	707	1.34	0.328
19	62.87	15	3.13	681	1.44	0.302

Se trabajó en rangos de 11-20 % grava; durante la evaluación mecánica encontramos que la combinación de 16.70 % HC, 60.17 % arena, 20.00 % grava y 3.13 % cemento ofrece resultados satisfactorios en nuestros parámetros control (estabilidad y flujo) (Figura 23). Con esta combinación ligante-agregado se realizaron las pruebas de factibilidad.

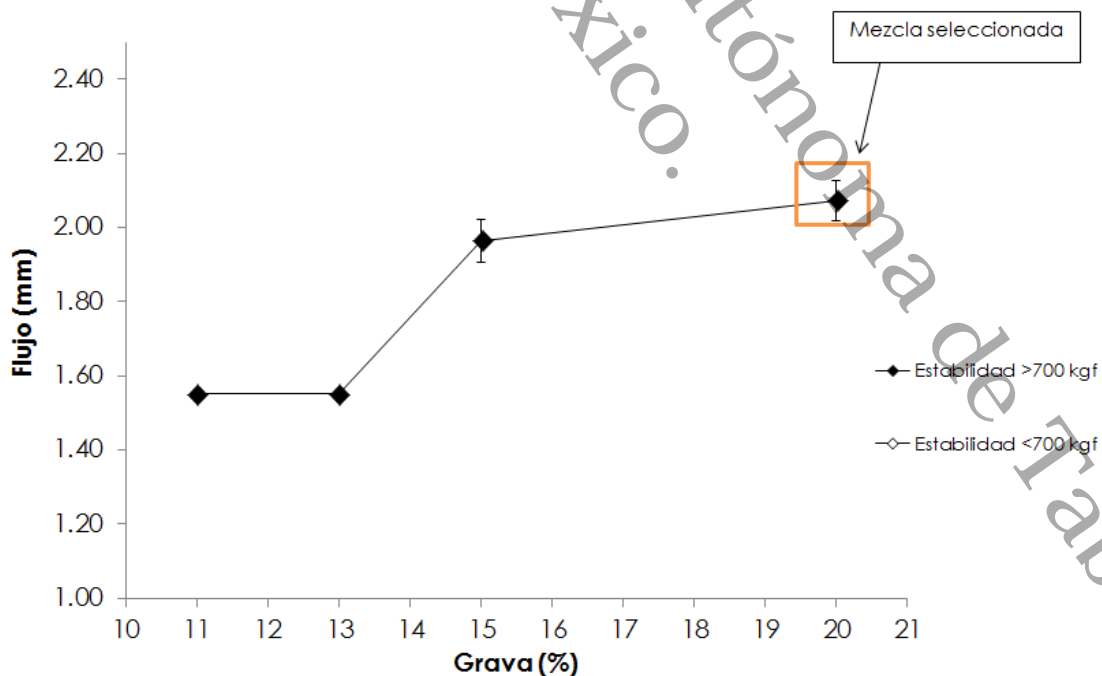


Figura 23.- Muestras diseñadas en relación HC/arena de 0.28.

La combinación (ligante-agregado) que obtiene mejores resultados, logra un equilibrio entre los dos parámetros. A partir de esto se realizaron réplicas de dicha combinación para la confiabilidad de valores encontrados a través de una prueba de *t student* de una cola, aplicada sobre resultados de la estabilidad obtenidos en dichas réplicas (Figura 24 y Cuadro 5).

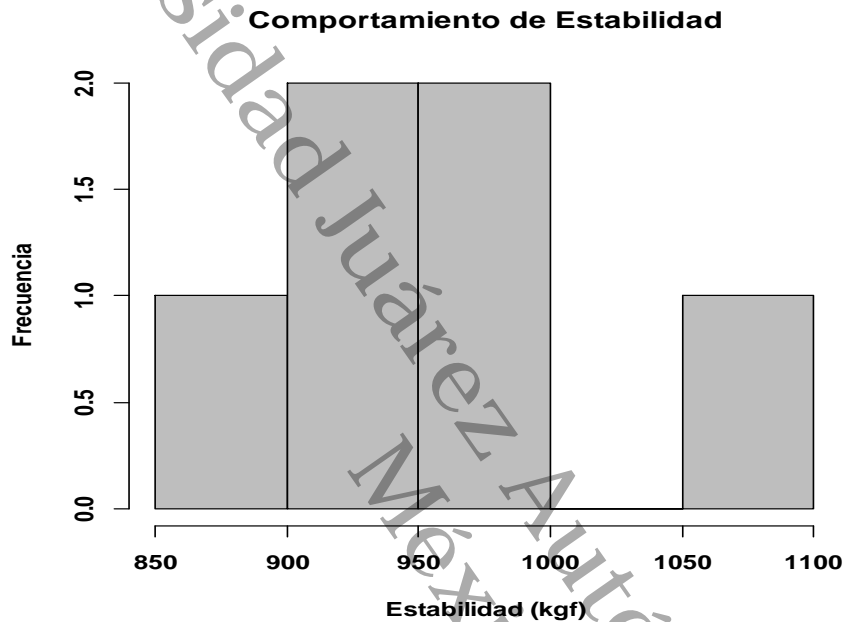


Figura 24.- Representación gráfica de la evaluación estadística de estabilidad.

Cuadro 5.- Resumen de análisis estadístico *t student* en resultados de estabilización.

Variable	Estabilidad (kgf)
Ho:	Estabilidad= 700 (kgf)
Hi:	Estabilidad > 700 (kgf)
No. de muestras	6
Intervalo de confianza	95 %
<i>t</i> (Evaluada)	10.723
Media calculada	970.500
Desviación Estándar	61.739
Error estándar	25.205
Grados de libertad	5
P(significancia)	0.000061

Por otra parte necesitábamos evaluar los resultados del flujo por encima de los 2 mm (Figura 25 y Cuadro 6). La confiabilidad de los datos en esta variable es importante asegurarla, ya que durante la fase de iteraciones el comportamiento de esta se complicó al modificar la cantidad de HC respecto a los agregados. Asegurando la cantidad óptima de cada componente y su respuesta frente a las respuestas estabilidad-flujo, se afirma que es posible elaborar una mezcla asfáltica con este material, es decir la estimación de la factibilidad técnica.

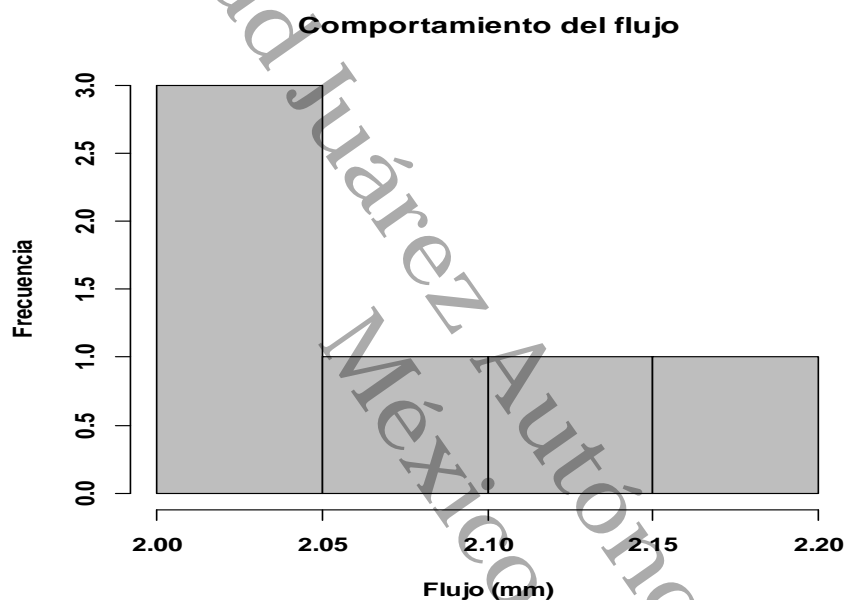


Figura 25.- Representación gráfica de la evaluación estadística del flujo.

Cuadro 6.- Resumen de análisis estadístico *t student* de resultados de flujo.

Variable	Flujo (mm)
Ho:	Flujo=2 (mm)
Hi:	Flujo>2 (mm)
No. de muestras	6
Intervalo de confianza	95 %
<i>t</i> (Evaluada)	3.33180
Media calculada	2.07333
Desviación Estándar	0.05246
Error estándar	0.02141
Grados de libertad	5
P(significancia)	0.01037

7.3.- Etapa 3: Evaluación de la factibilidad

7.3.1.- Factibilidad técnica

En el Cuadro 7 se muestran los resultados de las características de diseño de la mezcla asfáltica seleccionada. El porcentaje de vacíos llenos de aire es menor a 2 %, esto se puede asociar a la distribución del ligante entre los agregados gruesos y finos, además de la facilidad de mezclado por el calentamiento al que es sometido y por el que es fluidizado el ligante.

La estabilidad promedio fue de 970 kgf (± 61.74) y el flujo de 2.07 (± 0.05) usando hasta 16.70 % de HC con asfáltenos, esto similar lo obtenido por Taher *et al.* en 2013, en su caso ellos utilizan botellas de polietileno como parte de los agregados, encontrando estabilidad de 917.7 kgf y flujo de 3.5 mm, con hasta 6 % de asfalto comercial.

Parámetros como Vacíos en el Agregado Mineral (VAM), Vacíos Llenos con Asfalto (VFA) y densidad fueron presentados para mostrar características complementarias de diseño, que además proporcionan fiabilidad para las variables de respuesta citadas anteriormente.

Cuadro 7.- Caracterización de mezcla asfáltica seleccionada.

Parámetro	Valor	Método
Contenido de HC (%)	16.70 (± 0.010)	
Densidad (kg/m ³)	2009 (± 32.58)	AASHTO T 209-05
Vacíos (%)	0.328 (± 0.18)	AASHTO T 209-05
VMA (%)	19.835 (± 0.31)	AASHTO T 209-05
VFA (%)	98.338 (± 0.95)	AASHTO T 209-05
Estabilidad (kgf)	970 (± 61.74)	AASHTO T 245-97 2004
Flujo (mm)	2.07 (± 0.05)	AASHTO T 245-97 2004

7.3.2.- Factibilidad ambiental

La factibilidad ambiental fue evaluada con respecto a la lixiviación y toxicidad, a fin de asegurar que la aplicación de este proyecto en campo, no represente riesgo al ambiente.

La lixiviación de la mezcla mediante el extracto PECT realizado según el procedimiento normado (NOM-053-SEMARNAT-1993), tiene 3.39 mg/L PECT (Cuadro 8), esta concentración es mucho menor al límite máximo permisible, especificado en la NOM-143-SEMARNAT-2003, que establece 15 mg/L para descarga de aguas que contengan HC (aguas congénitas) a cuerpos receptores de agua dulce.

Por otra parte si la descarga es en aguas costeras, la misma norma antes citada, establece 40 mg/L como límite máximo, es decir la concentración obtenida en el extracto es 91 % menos que la fijada en dicha norma. Lo anterior planteado sobre escenarios extremos, en los que el sitio se vea afectado por infiltraciones o inundaciones. Por las características de las mezclas y su impermeabilidad la probabilidad de lixiviación al manto freático es nula.

Además de los lixiviados evaluados según la NOM-053-SEMARNAT-1993, las mezclas también se evaluaron por el método modificado en 2010 por Álvarez-Coronel, dejando un bloque sin triturar con agua ácida, durante 28 días, pasado el tiempo se evaluó la cantidad de HC solubilizados en dicha agua. La concentración de los lixiviados se presenta menor concentración (3.80 mg/L PECT), a los reportados por Álvarez-Coronel en su tratamiento de estabilización de costras de HC con 7.5 % CaO (6.61 mg/L PECT) tratando material contaminado (costra aceitosa y sedimento).

Cuadro 8.- Caracterización ambiental de la mezcla asfáltica.

Lixiviados en PECT (NOM-053) (mg/L PECT)	Lixiviados en PECT (Modificado, Álvarez-Coronel 2010) (mg/L PECT)
3.39 (± 0.21)	3.80 (± 0.03)

La toxicidad de la mezcla asfáltica fue evaluada, sometiéndola a una extracción peso – volumen por el método del extracto PECT, en una proporción 1:20. Al extracto obtenido se le evaluó la toxicidad por medio del método de la OCDE (1984), con organismos *Eisenia foetida*. Los resultados de esta evaluación, muestran que la mezcla asfáltica no es tóxica para los organismos expuestos, ya que no se presentó mortalidad de organismos durante el periodo de prueba (48 horas).

Otro aspecto evaluado durante el periodo de la prueba fue la disminución en el peso de los organismos, es decir se calculó el porcentaje de pérdida de peso. Observamos en (Figura 26) que la disminución del peso en los organismos expuesto a la mezcla asfáltica, no tiene una diferencia significativa respecto a los testigos que acompañaron la prueba. Al someterlas a una prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis bajo un nivel de significancia de 0.05, la hipótesis nula: las muestras son igual al testigo en la pérdida de peso. Con un valor de $p = 0.4373$, esta hipótesis se acepta.

En la muestra identificada como "T" (sin exposición a extracto de la mezcla) la reducción es de 20.31%, mientras que en las réplicas de extractos expuestos presentan reducciones que van de 18-20 %. Esta característica de los organismos no se vio afectada por la exposición.

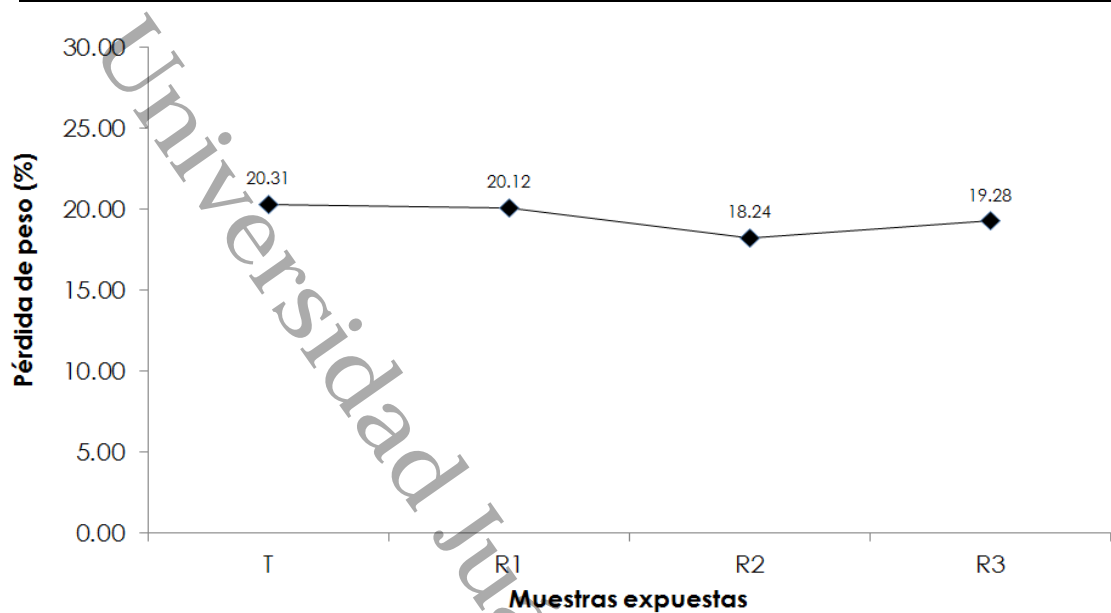


Figura 26.- Pérdida de peso de organismos expuestos a la mezcla asfáltica.

La evaluación del lixiviado de la mezcla, no se limitó a la mortandad y reducción de peso de los organismos, también se observaron reacciones fisiológicas como: respuesta al estímulo, movimiento y cambio de color; de acuerdo a Domínguez *et al.*, (1997).

Los organismos *Eisenia foetida* al estar expuestos a pH elevado y salinidad, presentan la respuestas antes mencionadas, por efecto de estrés que incide negativamente; en este caso ninguna de las lombrices expuestas se mostró afectada, es decir pasadas las 48 horas de exposición no percibimos efecto y se mantuvieron con buena respuesta al estímulo, movimiento y ningún cambio en su coloración.

7.3.3.- Factibilidad económica

Los costos que se presentan en el Cuadro 9, se realizaron tomando en cuenta la producción de 1200 m³ de mezcla asfáltica, con una densidad de 1.34 t/m³, utilizando HC intemperizado y arena del sitio, esta estimación (597 364.74 pesos) comparada con el Cuadro 10, que son los costos para preparar la misma cantidad de mezcla, pero utilizando asfalto comercial (3 723 665.84 pesos) en lugar de HC intemperizado.

Al hacer comparación de ambas estimaciones observamos que los costos de producir mezcla con HC y arena del sitio reduce alrededor de un 83 %, los precios de inversión lo cual reafirma la factibilidad económica de la propuesta. Acerca del aprovechamiento del material contaminante. Lo anterior indica que además de recuperar la capacidad de uso del sitio, y el aprovechamiento de un residuo contaminante, se plantea un proyecto económicamente redituable.

Al comparar los costos producción de mezcla asfáltica con el HC intemperizado del sitio igual a 597 364.74 pesos (Cuadro 10) y costos para de confinamiento del mismo material de 1 435 539.74 pesos (Cuadro 11), observamos una diferencia de alrededor del 42 % sobre el precio de la estabilización por medio de la mezcla.

Cabe mencionar que el confinamiento del material representa una recuperación de la capacidad de uso del sitio, pero al disponer este HC se desaprovecharía su revalorización como materia prima aunado a una inversión mayor a causa de esta forma de remediación.

La proyección en las estimaciones se elaboró sobre la cantidad de ligante, agregados y maquinaria, de la mezcla asfáltica diseñada y caracterizada en laboratorio durante éste estudio.

Cuadro 9.- Costos de producción estimados usando HC intemperizados.

Costos directos			
Concepto	Precio unitario	Presentación	Total
Agregados			
HC	0	T	\$0.00
Grava	25.29	M ³	\$3,127.89
Arena	0.00	M ³	\$0.00
Cemento	2341.20	T	\$78,304.71
Renta de maquinaria			
Retroexcavadora cat con martillo 325 CL	9012.93	8 h	\$90,129.30
Retroexcavadora cat con bote 325 CL	9327.59	8 h	\$93,275.90
Generador eléctrico 70 kw motor diesel	1300	8 h	\$13,000.00
Vibrocompactador Raygo 400A de 10 t	1844.83	8 h	\$18,448.30
Camión pipa 11000 L	2400	8 h	\$24,000.00
Planta asfaltadora con 2 tolvas 110 t/h	2700	8 h	\$8,100.00
Insumos			
Diesel	3000	Litro	\$52,110.00
Personal			
Encargado de proyecto	700	Día	\$21,000.00
Ingeniero	600	Día	\$18,000.00
Técnico	500	Día	\$15,000.00
Auxiliar	300	Día	\$9,000.00
Auxiliar	300	día	\$9,000.00
Operador de retroexcavadora	469.09	día	\$14,072.70
Operador de retroexcavadora	469.09	día	\$14,072.70
Operador de planta asfaltadora	469.09	día	\$14,072.70
Ayudante de operador	215.18	día	\$6,455.40
Costos indirectos			
Papelería	3000		\$3,000.00
Equipo de seguridad	4000		\$4,000.00
Renta de baños	600		\$1,800.00
Otros gasto	5000		\$5,000.00
		Subtotal	\$514,969.60
		IVA	16 %
		Total	\$597,364.74

* Costos de producción estimados usando HC intemperizado.

Cuadro 10.- Costos de producción estimados usando asfalto comercial.

Costos directos			
Concepto	Precio unitario	Presentación	Total
Agregados			
HC	9976.86	t	\$2,679,146.08
Grava	25.29	m ³	\$3,127.89
Arena	41.19	m ³	\$15,941.07
Cemento	2341.20	t	\$78,304.71
Renta de maquinaria			
Retroexcavadora cat con martillo 325 CL	9012.93	8 h	\$90,129.30
Retroexcavadora cat con bote 325 CL	9327.59	8 h	\$93,275.90
Generador eléctrico 70 kw motor diésel	1300	8 h	\$13,000.00
Vibrocompactador Raygo 400A de 10 t	1844.83	8 h	\$18,448.30
Camión pipa 11000 L	2400	8 h	\$24,000.00
Planta asfaltadora con 2 tolvas 110 t/h	2700	8 h	\$8,100.00
Insumos			
Diesel	3000	L	\$52,110.00
Personal			
Encargado de proyecto	700	día	\$21,000.00
Ingeniero	600	día	\$18,000.00
Técnico	500	día	\$15,000.00
Auxiliar	300	día	\$9,000.00
Auxiliar	300	día	\$9,000.00
Operador de retroexcavadora	469.09	día	\$14,072.70
Operador de retroexcavadora	469.09	día	\$14,072.70
Operador de planta asfaltadora	469.09	día	\$14,072.70
Ayudante de operador	215.18	día	\$6,455.40
Costos indirectos			
Papelería	3000		\$3,000.00
Equipo de seguridad	4000		\$4,000.00
Renta de baños	600		\$1,800.00
Otros gasto	5000		\$5,000.00
		Subtotal	\$3,210,056.76
		IVA	16 %
		Total	\$3,723,665.84

Nota: Los costos estimados están sujetos a modificación por variación en los precios.

Cuadro 11.- Costo de remediación con base en disposición final de HC.

Costos directos			
Nombre	Precio unitario	Presentación	Total
Excavación del material			
Retroexcavadora cat con martillo 325 CL	9012.93	8 h	\$27,038.79
Retroexcavadora cat con bote 325 CL	9327.59	8 h	\$27,982.77
Generador eléctrico 70 kw motor diésel	1300	8 h	\$3,900.00
Insumos			
Diésel	2000	L	\$34,740.00
Personal			
Encargado de proyecto	700	día	\$10,500.00
Ingeniero	600	día	\$9,000.00
Técnico	500	día	\$7,500.00
Auxiliar	300	día	\$4,500.00
Auxiliar	300	día	\$4,500.00
Operador de retroexcavadora	469.09	día	\$7,036.35
Operador de retroexcavadora	469.09	día	\$7,036.35
Costos de transporte y disposición final			
Empresa de transporte y confinamiento	900	m ³	\$1,080,000.00
Costos indirectos			
Papelería	3000		\$3,000.00
Equipo de seguridad	4000		\$4,000.00
Renta de baños	600		\$1,800.00
Otros gasto	5000		\$5,000.00
Subtotal			\$1,237,534.26
IVA			16 %
Total			\$1,435,539.74

Nota: Los costos estimados están sujetos a modificación por variación en los precios.

8.- CONCLUSIONES

Características del material

- Las características del sitio favoreció el uso del agregado fino presente y la identificación de las condiciones actuales del suelo.
- La evaluación del material contaminante definió la cantidad de asfaltenos presente en el HC, así como su aprovechamiento en las mezclas asfálticas, con lo cual se plantea la recuperación del área afectada.
- El HC del sitio contaminado por su alto nivel de intemperización es plastificante, tiene una función de sellador dentro de la mezcla y al enfriarse da un aspecto de estructura firme, bastante apto para ser ligante.

Proceso iterativo

- Usar diferentes iteraciones nos permitió tomar decisiones dirigidas cada vez que se obtuvieron resultados.
- Por medio de las iteraciones dirigidas se redujo el número de muestras a elaborar, minimizando gasto de agregados y análisis.

Diseño de mezcla idónea

- El alto contenido de HC en una mezcla, permite ocupar mayor cantidad de contaminante y por lo tanto dejar recuperar el área afectada. Al mismo tiempo un confinamiento permanente, que elimina la posibilidad de dispersión.

Evaluación de la factibilidad

- La estabilidad y flujo obtenidos demuestran que la combinación de ligante-agregado es favorable para lograr una mezcla asfáltica de granulometría densa.
- La evaluación ambiental confirmó que no existe riesgo de lixiviación y toxicidad al realizar la mezcla asfáltica seleccionada, es decir se minimizan los riesgos ambientales.
- La reducción de costos en el proceso de elaboración al ocupar arena del sitio mejora la factibilidad ambiental del proyecto, reduciendo costos hasta en 80%.

9.- RECOMENDACIONES

- Evaluar tamaños diferentes de agregados gruesos, para favorecer el flujo y la estabilidad. Ya que las características de tamaño y forma en las gravas influyen de manera directa en la cantidad de HC a utilizar.
- Realizar combinaciones de agregado e hidrocarburo variando porcentajes de filler (cemento), probablemente adicionar una poco más favorezca que el HC se fije al agregado fino formando una estructura firme con buena estabilidad, lo que se manifestaría en reducción de grava.
- Probar la estabilización solidificación para realizar mezclas asfálticas en el tratamiento de residuos de la industria petrolera, por ejemplo recortes de perforaciones.

Las limitantes que se pueden considerar para el desarrollo de proyectos futuros son el tamaño del agregado grueso, este no se puede variar cuando se está trabajando con porcentaje alto de ligante, otro aspecto que debe tomarse en cuenta es la intemperización que presenta el hidrocarburo que lo convierte en un material de difícil manejo y mezclado con los agregados, al determinar el porcentaje de asfaltenos presentes en el HC se puede evaluar el material para ser aprovechado en una mezcla asfáltica.

10.- REFERENCIAS

- Abreu, L. P., Oliveira, J. R., Silva, H. M. y Fonseca, P. V. (2015). Recycled asphalt mixtures produced with high percentage of different waste materials. *Construction and Building Materials* 84, 230-238 p.
- Adams, S. R. H. (2012). *Remediación de suelos y acuíferos contaminados en México, Bases teóricas y experiencias reales*. México, Editorial; Universidad de Querétaro, 13-25 p.
- Aguilera, N. y Domínguez I. (1989). *Metodología de análisis físico-químicos de suelos*. México, D.F. Facultad de Ciencia de la UNAM.
- Alexander, M. (1994). *Biodegradation and Bioremediation*, Academic Press.
- Álvarez-Coronel, G. (2010). *Estabilización-Solidificación para tratar suelos contaminados con desechos aceitosos de la Presa Agua de Mina, Unidad Minera, Texistepec, Veracruz* (tesis de Maestría), Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Tabasco, México.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (ASHTO). (2014). Standar AASHTO T 245, Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2006). Stándard Test Method for API Gravity of Crude Petroleum and Petroleum Products (Hidrometer Method), D287-92.
- Awwad, M. T. y Shbeeb, L. (2007). The use of polyethylene in hot asphalt mixtures. *American Journal of Applied Sciences*, 4(6), 390-396 p.
- Blackburn, J. D. (1991). Time-based Competition: the Next Battleground in American Manufacturing, *Business One Irwin*, Homewood, IL. 1990, 61-66 p.
- Bouwer, E.J. y Zehnder, A.J.B. (1993). Bioremediation of organic compounds - putting microbial metabolism to work. *Trends Biotechnol.* 11: 360-367.
- Bunge, M. (1971). *La investigación científica: su estrategia y su filosofía*, Barcelona, España, Editorial Siglo Veinte, 159 p.

- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2001). Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México: Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana. Secretaría de Gobernación, México.
- Clark, K. B. y Fujimom, T. (1991). Product Development Performance: Strategy, Organization, and Management in the World Auto Industry, Harvard Business School Press, Boston, MA.
- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). (2015). Glosario de Términos y Conceptos, Relevamiento de datos para la construcción de Estadísticas e Indicadores sobre Actividades de Ciencia y Tecnología de Paraguay Año Base 2014/2015. Consultada 05 julio 2017 en http://www.conacyt.gov.py/sites/default/files/Glosario-de-terminos-y-conceptos-2015_1.pdf
- Crespo-Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*, quinta edición, México, editorial Limusa.
- Delgado L., Catarino, A., Eder, P., Litten, D., Luo, Z. y Villanueva A. (2009). End of Waste Criteria. Final Report. EC-JRC-IPTS. EUR 23990EN-2009.
- Domínguez J., Briones J., Mato M.J.I. (1997). Effect of the diet on growth and reproduction of *Eisenia Andrei*. *Pedobiología* (41):566-576.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2001. Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report. 10th Edition. Office of Solid Waste and Emergency. <http://www.epa.gov/TIO>.
- Fundación Iberoamericana de Seguridad y Salud Ocupacional (FISO). 2014. Artículo profesional; Gestión de residuos industriales, Consultada 20 de abril 2016. <http://www.fiso-web.org/Content/files/articulos-profesionales/GESTI%C3%93N-DE-RESIDUOS-INDUSTRIALES.pdf>
- Guzmán, Osorio F. J. (2011). *Escalamiento industrial de la técnica de estabilización Químico-Biológica para la remediación de suelo contaminado con hidrocarburo* (tesis de Maestría), Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Tabasco, México.
- Huang, C. M., Chiu, C. T., Li, K. C., y Yang, W. F. (2006). Physical and environmental properties of asphalt mixtures containing incinerator bottom ash. *Journal of hazardous materials*, 137(3), 1742-1749 p.
-

- Jiménez, Rojas J. W. Consoli N. C. y Salvagni Heineck K. (1996). Durabilidad de un suelo contaminado y tratado con cemento portland. Universidad Federal do Rio.
- La Grega, M., Buckingham, P. y Evans, J. (1996). "Gestión de Residuos Tóxicos: Tratamiento, Eliminación y Recuperación de Suelos", Vol. II. McGraw Hill. España S.A de C.V; 743-744.g.
- Ley General Para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR). 2015. Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de octubre de 2003 texto vigente Última reforma publicada DOF 22-05-2015.
- Morales-Bautista, C. M., Adams, R.H., Guzmán, O. F. y Marín, G. D. (2013) Dilution-extrapolation hydrometer method for easy determination of API gravity of heavily weathered hydrocarbons in petroleum contaminated soil. *Energy Environ Res* 3:115–124 p.
- Nevins, J. L. y Whitney, D. E. (1989). *Concurrent Design of Products and Processes: a Strategy for the Next Generation in Manufacturing*, New York, McGraw-Hill.
- Oba, A. L., Onungwe, I., George, A. G., Amgbara, T. O. y Akpan P. P. (2015). Waste to Wealth; The Utilization of Scrap Tyre as Aggregate in Bituminous Mixes for Road, Construction Department of Civil Engineering, Rivers State Polytechnic, Bori. Rivers State, Nigeria, West Africa Int. *Journal of Engineering Research and Applications* ISSN: 2248-9622, Vol. 5, Issue 11, (Part - 1) november 2015, .06-11 p.
- OECD, 1984. OECD Guideline for Testing of Chemicals, No. 207, Earthworm Acute Toxicity. OECD, París, France.
- Olán, C. D. (2000). *Estimación de Niveles de Hidrocarburos Totales de Petróleo, Poliaromaticos Carcinogénicos y Metales, en el Activo Cinco Presidentes Tabasco* (Tesis de Licenciatura), Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Tabasco, México.
- Pérez, I., Pasandín A. R., y Medina L. (2012). Hot mix asphalt using C&D waste as coarse aggregates, *Rev. Materials & Design* Volume 36, April, Pages 840–846, *Sustainable Materials, Design and Applications*. Editorial Elsevier.
- Pérez, I., Toledano M., Gallego, J. y Taibo, J. (2007). Mechanical properties of hot mix asphalt made with recycled aggregates from reclaimed construction and demolition debris. *Rev. Materiales de Construcción* Vol. 57, 285, enero-marzo 2007, ISSN: 0465-2746, 17-29 p.
-

- Pemex. (2015). Petróleos Mexicanos, Dirección General Pemex gas y petroquímica básica.
<http://www.gas.pemex.com/PGPB/Conozca+Pemex+Gas/Infraestructura/Complejos+procesadores+de+gas+%28CPG%29/>
- Porta, J., López-Acevedo M., y Poch R. M. (2013). *Edafología; uso y protección de suelo*, 3ra Edición, Cataluña, España, editorial mundi-prensa 153 p.
- Primo, Y. E. (1996). *Química Orgánica Básica y Aplicada, de la molécula a la industria*. Universidad Politécnica de Valencia, Ed. Reverté, S. A. 113-114 p.
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA). (2002). Dirección General de Inspección de Fuentes de Contaminación, México. <http://www.profepa.gob.mx/>
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) y Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2011). Informe Triannual, Industria y política ambiental. Periódico El Nacional, sábado 18 de junio, México.
- Romero-Esquivel L. G., Vargas-Camareno M. y Padilla-Barrantes F. (2007) Desarrollo de la tecnología de inmovilización: estabilización/solidificación de desechos peligrosos en Costa Rica. Estudio de caso en lodo de electrodeposición. Avances en Química, Universidad de los Andes Venezuela, vol. 2, núm. 3, 2007, 9-14 pp. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93320303>
- Saval, B. S. (1995). Acciones para la Remediación de Suelos en México. Segundo Minisimposio Internacional sobre Contaminantes del Agua y Suelo. Instituto de Ingeniería. UNAM, México.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) e Instituto Mexicano de Transporte (IMT). (2001). Documento emulsión asfáltica. No. 23, Sanfandila Qro. México, ISSN 0188-7114, 48 p.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) e Instituto Mexicano de Transporte (IMT) (2004). Documento Aspectos de diseño volumétrico de mezclas asfálticas. Doc. ISSN 0188-7297, No. 246, Sanfandila Qro. México, 67 p.
- Secretaría de Comunicaciones y transporte (SCT) e Instituto Mexicano del Transporte (IMT). (2012). Norma N.CMT.4.04, Materiales Pétreos Para Mezclas Asfálticas. Documento N-CMT-4-05-003-02, 16 p.

- Secretaría de Comunicaciones y transporte (SCT). (2000). Norma N.CMT.4.05.001/00: libro: Características de los materiales, parte 4: Materiales para pavimentos, título 05: Materiales asfálticos, aditivos y mezclas, capítulo 001: Calidad de materiales.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (1993). Norma Oficial Mexicana NOM-053-SEMARNAT-1993, Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Diario Oficial de la Federación, 23 de abril de 1993. México, D.F. 24 p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación 23 de abril de 2003, Ciudad de México, 85 p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2013). Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación, Diario Oficial de la Federación Martes 10 de septiembre de 2013, México, Distrito Federal, 16 p.
- Secretaría de Medio ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) e Instituto Nacional de Ecología (INE). (2006). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. ISBN: 968-817-803-9, impreso y hecho en México, 12 p.
- Sellers, K., (1999). *Fundamentals of hazardous waste site remediation*. Lewis Publishers, 326 p.
- Smith, J. S., y Brooks, G. R. (1977). The Southwest expedition of Jedediah. His personal account of the *Journey to California, 1826-1827*. Glendale, Calif: A. H. Clark, 239 p, ISBN 0-8706-2123-8
- Smith, R. P., y Tjandra, P. (1998). Experimental observation of iteration in engineering design. *Research in Engineering Design*, 10(2), 107-117 p.
- Soberano, Álvarez B. G. (2014). *Tratamiento integral de terracería ácida y sedimentos Contaminados con hidrocarburos para construcción de base De caminos en la unidad minera Texistepec, Veracruz*. (Tesis de licenciatura). Tabasco, México: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
-

- Taher, B. M., Rehan K. M. y Mehrtash S. (2013). Utilization of waste plastic bottles in asphalt mixture *Journal of Engineering Science and Technology* Vol. 8, No. 3, 264 – 271 p.
- Volke, S. T. y Velasco, T. J. A. (2002). Tecnologías de remediación para suelos contaminados México, México, editado por INE-SEMARNAT, 2002, 64 p.
- Zahedi, M., Bayat, R., y Nazemi Jalal, M. (2014). The most appropriate mixing method of polypropylene fiber with aggregates and bitumen based on binder mix design. *International Journal of Engineering & Technology*, 3(3), 333-336. doi:<http://dx.doi.org/10.14419/ijet.v3i3.2959>
<https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/2959>. Date accessed: 30 enero 2017.

ANEXO 1: GLOSARIO

Asfalto: Es un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por asfáltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales. Al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida (SCT, 2000).

Árido: Es un material granular que se destina a diversos usos en la construcción, en algunos se contempla su aplicación conjunta con ligantes (betún o cemento) mientras que en otros el material se emplea suelto. En función de su origen se conocen tres tipos: naturales, secundarios (derivados de procesos industriales) y reciclados, los derivados del procesamiento de materiales que previamente se han empleado en la construcción (Delgado *et al.*, 2009).

Cementos asfálticos: Son asfaltos obtenidos del proceso de destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites. Su viscosidad varía con la temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelentes ligantes, pues al ser calentados se licúan, lo que les permite cubrir totalmente las partículas del material pétreo (SCT, 2000).

Densidad de hidrocarburos: Determina la tendencia de la fase inmisible a flotar o sumergirse en la superficie del suelo, y por consiguiente el lugar en donde éste quedará concentrado (Bouwer y Zehnder, 1993).

Disposición final: Acción de depositar o confinar de manera permanente residuos en instalaciones que permitan prevenir su liberación al ambiente y las consecuentes acciones a la salud de la población y a los ecosistemas y sus elementos (LGPGIR, 2015).

Diseño de mezcla asfáltica: Es un procedimiento que tiene como finalidad definir una mezcla que muestre un buen desempeño del pavimento durante la operación de la

carretera, por lo que este debe estar conforme con las condiciones previstas de tránsito, clima, entre otras, a las cuales va a estar expuesta la carpeta asfáltica (SCT y IMT, 2004).

Diseño iterativo: Son ciclos de propuestas, prueba y modificación en evolución. Además las iteraciones pueden ocurrir de muchas maneras. (Smith y Tjandra, 1998)

Extracto PECT: Procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente (SEMARNAT, 1993).

Estabilidad Marshall: Indica la resistencia de una mezcla a la deformación existe una tendencia a pensar que si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mucho mejor (SCT, IMT, 2004).

Evaluación del riesgo ambiental: Proceso metodológico para determinar la probabilidad o posibilidad de que se produzcan efectos adversos, como consecuencias de la exposición de los seres vivos a las sustancias contenidas en los residuos peligrosos o agentes infecciosos que los forman (LGPGIR, 2015).

Filler: El filler o polvo mineral de aportación es un producto comercial de naturaleza pulverulenta (cemento normalmente o cenizas volantes de central térmica) o un polvo en general calizo, especialmente preparado para utilizarlo en mástico para mezclas asfálticas. Cuando se trata de un producto comercial, se garantiza perfectamente su control y se conocen sus propiedades tanto físicas como químicas y su futuro comportamiento en la mezcla. Cuando se utiliza el otro tipo de filler, (de recuperación), que es aquel que se obtiene de las plantas asfálticas

Flujo Marshall: En centésimas de pulgada representa la deformación de la briqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta (SCT, IMT, 2004).

Iteración: Ciclos de propuesta, prueba y modificación de un diseño en evolución. La iteración es ampliamente aspecto aceptado del diseño, pero que no ha sido sujeto a un extenso estudio por derecho propio (Smith y Tjandra, 1998).

Lixiviado: Líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos (LGPGIR, 2015).

Mezclas asfáltica de granulometría densa: Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre 37.5 milímetros (1 ½ pulgadas) y 9.5 milímetros (3/8 de pulgada), de acuerdo a la Norma N.CMT.4.04.

Prueba Marshall: Se basa en la compactación de las muestras usando un martillo estándar gota en un intervalo de contenido de aglutinante de asfalto. El contenido de aglutinante se selecciona para producir adecuado contenido de aire y vacíos en el agregado mineral (VMA). Una parte esencial del método de diseño Marshall es la estabilidad y la prueba de flujo, que es un procedimiento empírico usado para evaluar la fuerza y flexibilidad de la mezcla de la mezcla asfáltica en caliente (HMA).

Remediación: Conjunto de medidas a las que se someten los sitios contaminados para eliminar o reducir los contaminantes hasta un nivel seguro para la salud y el ambiente o prevenir su dispersión en el ambiente sin modificarlos (LGPGIR, 2015).

Reciclado: Transformación de los residuos a través de distintos procesos que permiten resustituir su valor económico, evitando así su disposición final, siempre y cuando esta restitución favorezca un ahorro de energía y materias primas sin perjuicio para la salud, los ecosistemas o sus elementos (LGPGIR, 2015).

Residuo: Material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final (LGPGIR, 2015).

Sitio Contaminado: Lugar, espacio, suelo, cuerpo de agua, instalación o cualquier combinación de éstos que ha sido contaminado con materiales o residuos que, por sus cantidades y características, pueden representar un riesgo para la salud humana, a los organismos vivos y el aprovechamiento de los bienes o propiedades de las personas (LGPGIR, 2015).

Tecnología de tratamiento: Implica cualquier operación unitaria o serie de operaciones unitarias que alteran la composición de una sustancia peligrosa o contaminante a través de acciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzcan su toxicidad, movilidad o volumen de material contaminado (EPA, 2001).

Toxicidad: El factor clave para decidir la remediación de un sitio contaminado, es la toxicidad para los seres vivos. La descarga de químicos tóxicos a un suelo implica, entre muchos otros problemas, que son generalmente resistentes a la biodegradación. Si el contaminante como tal no es tóxico, algunos de sus componentes pueden ser tóxicos o inhibitorios para ciertos microorganismos, retardando o impidiendo la biodegradación de otros contaminantes degradables (Alexander, 1994).

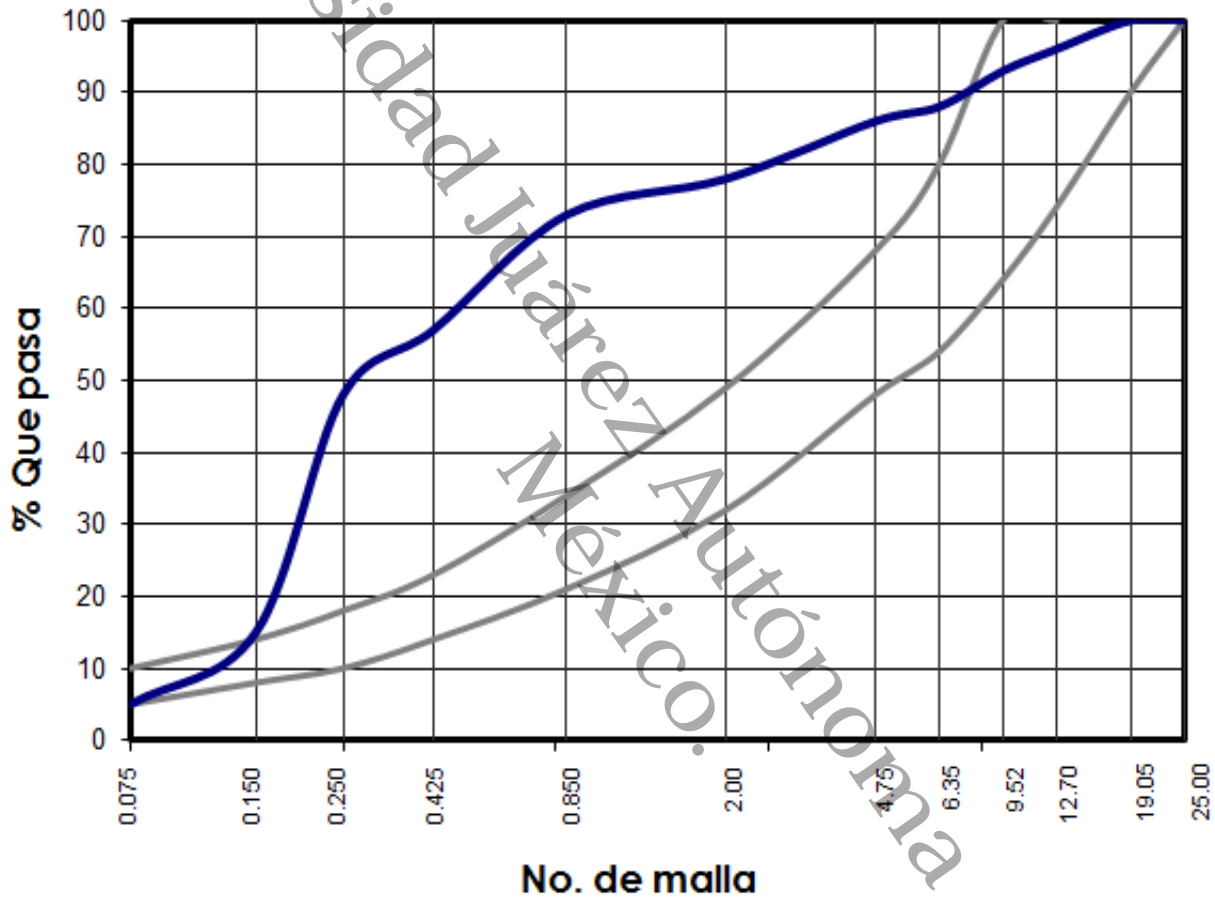
Valorización: Principio y conjunto de acciones asociadas cuyo objetivo es recuperar el valor remanente o el poder calorífico de los materiales que componen los residuos, mediante su reincorporación en procesos productivos, bajo criterios de responsabilidad compartida, manejo integral y eficiencia ambiental, tecnológica y económica. (LGPGIR, 2015)

ANEXO 2: TABLA NORMATIVA

LEGISLACIÓN APLICABLE	APLICABILIDAD (Artículos)	OBSERVACIONES
Constitución política de los estados unidos Mexicanos	4°, Transitorio décimo noveno.	El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley.
Ley General de Equilibrio y Protección al ambiente	3°, 134°, 135°, 136°, 140°, 150°, 151°, 151 bis, 152 y 153.	Es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; incorporar técnicas y procedimientos para su reusó y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes.
Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos	57°, 67°, 70°, 73° y 79°.	Los propietarios o poseedores de predios de dominio privado y los titulares de áreas concesionadas, cuyos suelos se encuentren contaminados, serán responsables solidarios de llevar a cabo las acciones de remediación que resulten necesarias, sin perjuicio del derecho a repetir en contra del causante de la contaminación.
Ley Federal de Responsabilidad Ambiental	13° y 77°.	Las acciones en materia de remediación de sitios, y de reparación y compensación de daños ocasionados al ambiente, previstas en este capítulo, se llevarán a cabo de conformidad con lo que señale el Reglamento, y a lo previsto por la Ley Federal de Responsabilidad Ambiental.
NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012.	Numeral 7	Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.
NOM-053-SEMARNAT-1993.	Procedimiento para determinar los constituyentes no volátiles	Que Establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los Constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
NOM-021-SEMARNAT-2000	AS-02 pH medido en agua. AS-03 Densidad aparente. AS-04 Densidad real. AS-09 Textura del suelo por el procedimiento de Bouyoucos.	Que establece las especificaciones de Fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, Estudio, muestreo y análisis.
N·CMT·4·05·003/02	Capítulo 003	Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas, Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras.

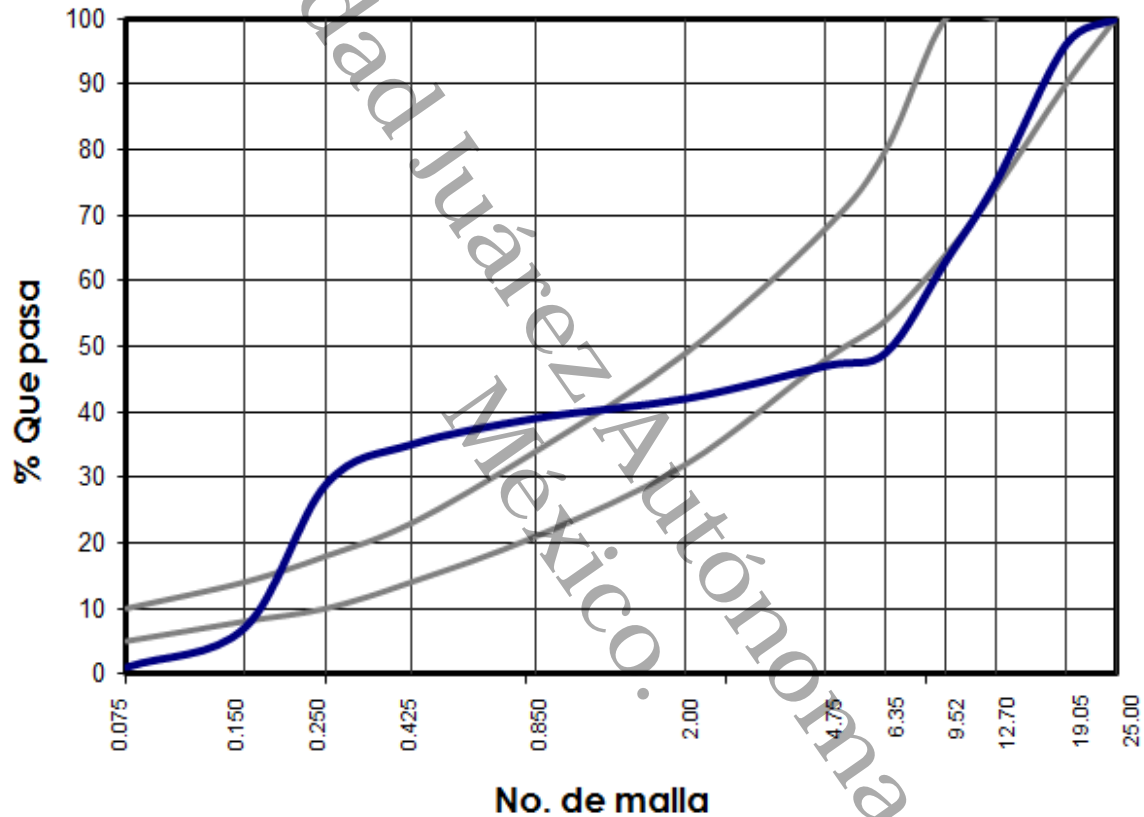
ANEXO 3: CARACTERIZACIÓN DE LA ARENA

Grafica de composición granulométrica de arena



ANEXO 4: CARACTERIZACIÓN DE LA GRAVA

Grafica de composición granulométrica de grava



ANEXO 5: EVIDENCIA DE CALIBRACIÓN DE EQUIPO MARSHALL



DAVI
Equipo de Laboratorio para Construcción
S.A. de C.V.

FABRICANTES Y DISTRIBUIDORES DE MÁQUINAS PARA:
TENSION, COMPRESION, PENETRACION, FLEXION, UNIVERSALES Y
PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.

OPERADAS CON SISTEMA:
MECANICA, HIDRAULICA, MANUAL, ELÉCTRICA, DIGITAL, ANALÓGICA,
COMPUTADORA, IMPRESORA, GRAFICADORA Y CONTROL DE
VELOCIDAD.

Laboratorio de Metrología
ACREDITACION No. F-24
Vigencia a partir de 2011-11-24

PV- 10138

Informe No. 6596

Magnitud: Fuerza

Pág. 1 de 4



INFORME DE CALIBRACIÓN



ADAMS, RANY HOWARD
ANACLETO CALLE 1° DE MAYO, VILLAHERMOSA, TABASCO.

LOCALIZACIÓN DE LA MAQUINA CALIBRADA:

MISMO DOMICILIO

Fecha de emisión: 2016-10-10

Clave: DMIF-09,16-6596



DATOS DEL INSTRUMENTO

Instrumento: PRENSA MARSHALL

Marca: ELVEC

Modelo: 3 t

No. de Serie: E-002379

Alcance de medición: 3 000 kgf

División Mínima: 29 kgf

Resolución: 14,5 kgf

Identificación del cliente: E-002379



DATOS DEL INSTRUMENTO CON TRAZABILIDAD AL CENAM

Patrón: CELDA DE CARGA

Marca: HBM

Modelo: C9B

No. de Serie: 94210634

Alcance: 49 kN

Clave: DMPF-011

Incertidumbre del Patrón: Ver Pág. 3 de 4

Fecha de Calibración: 2015-10-23



DATOS DE LA CALIBRACIÓN

Fecha de Calibración: 2016-09-22

Procedimiento Utilizado: DT-3-02

Método: Comparación Directa

Temperatura inicial: 33 °C

Temperatura Final: 33 °C



EL PRESENTE INFORME NO PODRA SER PARCIALMENTE REPRODUCIDO SIN PREVIA AUTORIZACION DE DAVI EQUIPO DE LABORATORIO PARA LA CONSTRUCCION, S.A. DE C.V.

DT-2-01-02A

La más alta Tecnología Nacional y con Servicio de Calibración para la mejor Calidad y Control en su Laboratorio.

Laboratorio acreditado por emma para las calibraciones indicadas en el escrito con número de acreditación N° F-24. Acreditado a partir de 2007-09-26

OFICINAS CORPORATIVAS / MÉXICO
CIPRES No. 26 COL. VIVEROS DE XALOSTOC,
C.P. 55340, ECATEPEC, EDO. DE MEX.
TEL.: 5569.4888 / 5569.4085
e-mail: metrologiadavi@gmail.com



OFICINAS ADMINISTRATIVAS:
PRIMAVERA No. 72 VIVEROS DE XALOSTOC
C.P. 07300 ECATEPEC, EDO. DE MEX.
TEL.: 5569.4901
e-mail: metrologiadavi@gmail.com



FABRICANTES Y DISTRIBUIDORES DE MÁQUINAS PARA: TENSION, COMPRESION, PENETRACION, FLEXION, UNIVERSALES Y PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.

OPERADAS CON SISTEMA: MECÁNICA, HIDRÁULICA, MANUAL, ELÉCTRICA, DIGITAL, ANALÓGICA, COMPUTADORA, IMPRESORA, GRAFICADORA Y CONTROL DE VELOCIDAD.

Laboratorio de Metrología
ACREDITACION No. F-24
Vigencia a partir de 2011-11-24

Informe No. 6596
Pág. 2 de 4



ADAMS, RANY HOWARD
ANACLETO CALLE 1° DE MAYO, VILLAHERMOSA, TABASCO.



- A. Tablas
- B. Gráficas
- C. Incertidumbre del instrumento
- D. Referencia normativa

RESULTADOS

NMX-EC-17025-IMNC-2006
NMX-CH-7500-1-IMNC-2008



Estas mediciones son trazables a los patrones nacionales mantenidos por el CENAM.



Calibró: TEC. ELIAS BELTRAN ROSAS

Aprobó: TEC. RODOLFO NAVARRETE SILVA



JOAQUIN MARTIN GOMEZ

Davi Equipo de Laboratorio para Construcción S.A. de C.V.



EL PRESENTE INFORME NO PODRA SER REPRODUCIDO PARCIALMENTE SIN PREVIA AUTORIZACION DE DAVI EQUIPO DE LABORATORIO PARA CONSTRUCCION S.A. DE C.V.

DT-2-01-02B

La más alta Tecnología Nacional y con Servicio de Calibración para la mejor Calidad y Control en su Laboratorio.

Laboratorio acreditado por ema para las calibraciones indicadas en el escrito con número de acreditación N° F-24. Acreditado a partir de 2007-09-26

OFICINAS CORPORATIVAS / MÉXICO
CIPRES No. 26 COL. VIVEROS DE XALOSTOC,
C.P. 55340, ECATEPEC, EDO. DE MEX.
TEL.: 5569.4888 / 5569.4085
e-mail: metrologiadavi@gmail.com



OFICINAS ADMINISTRATIVAS:
PRIMAVERA No. 72 VIVEROS DE XALOSTOC
C.P. 07300 ECATEPEC, EDO. DE MEX.
TEL.: 5569.4901
e-mail: metrologiadavi@gmail.com



DAVI
Equipo de Laboratorio para Construcción
S.A. de C.V.

FABRICANTES Y DISTRIBUIDORES DE MÁQUINAS PARA:
TENSION, COMPRESION, PENETRACION, FLEXION, UNIVERSALES Y
PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.

OPERADAS CON SISTEMA:
MECANICA, HIDRAULICA, MANUAL, ELECTRICA, DIGITAL, ANALOGICA,
COMPUTADORA, IMPRESORA, GRAFICADORA Y CONTROL DE
VELOCIDAD.

LABORATORIO DE METROLOGIA		No. de informe 6596				
ACREDITACION No. F-24		Pag. 3 de 4				
Vigencia a partir de 2011-11-24		Temperatura inicial °C	Temperatura final °C			
Lecturas obtenidas en el equipo bajo prueba		33	33			
Fuerza Patron	Serie 1 (0°)	Serie 2 (0°)	Serie 3 (120°)	Serie 4 (240°)	Lectura promedio	
kgf	kgf	kgf	kgf	kgf	kgf	kN
0	0	0	0	0	0,0	0,00
498	493	493	493	508	497	4,87
997	1 001	1 001	1 001	986	997	9,78
1 495	1 494	1 494	1 494	1 508	1 498	14,69
1 994	1 987	1 987	2 001	2 001	1 994	19,55
2 492	2 494	2 494	2 494	2 494	2 494	24,46
2 991	2 987	2 987	2 987	2 987	2 987	29,29

Fuerza Patron	Mejor valor de lectura	q Error	Error	U Reproducibilidad	u Resolución	u Patrón	U Expandida
kN	kgf	kN	% L	% L	% L	% L	% L
0,00	0	0,00	-----	K=1	K=1	K=1	K=2
4,89	497	4,87	-0,36	0,97	± 0,00	± 0,00	±2,6E-1
9,78	997	9,78	0,03	1,50	± 0,84	± 0,07	±2,6E+0
14,67	1 498	14,69	0,14	0,50	± 0,42	± 0,04	±1,3E+0
19,55	1 994	19,55	0,01	0,31	± 0,28	± 0,03	±8,4E-1
24,44	2 494	24,46	0,08	0,70	± 0,21	± 0,02	±6,3E-1
29,33	2 987	29,29	-0,12	0,00	± 0,17	± 0,02	±3,4E-1
				0,00	± 0,14	± 0,02	±2,8E-1

SE CALIBRÓ CON UN FACTOR DE 29 kgf POR 1 UNIDAD



La más alta Tecnología Nacional y con Servicio de Calibración para la mejor Calidad y Control en su Laboratorio.

Laboratorio acreditado por ema para las calibraciones indicadas en el escrito con número de acreditación N° F-24. Acreditado a partir de 2007-09-26

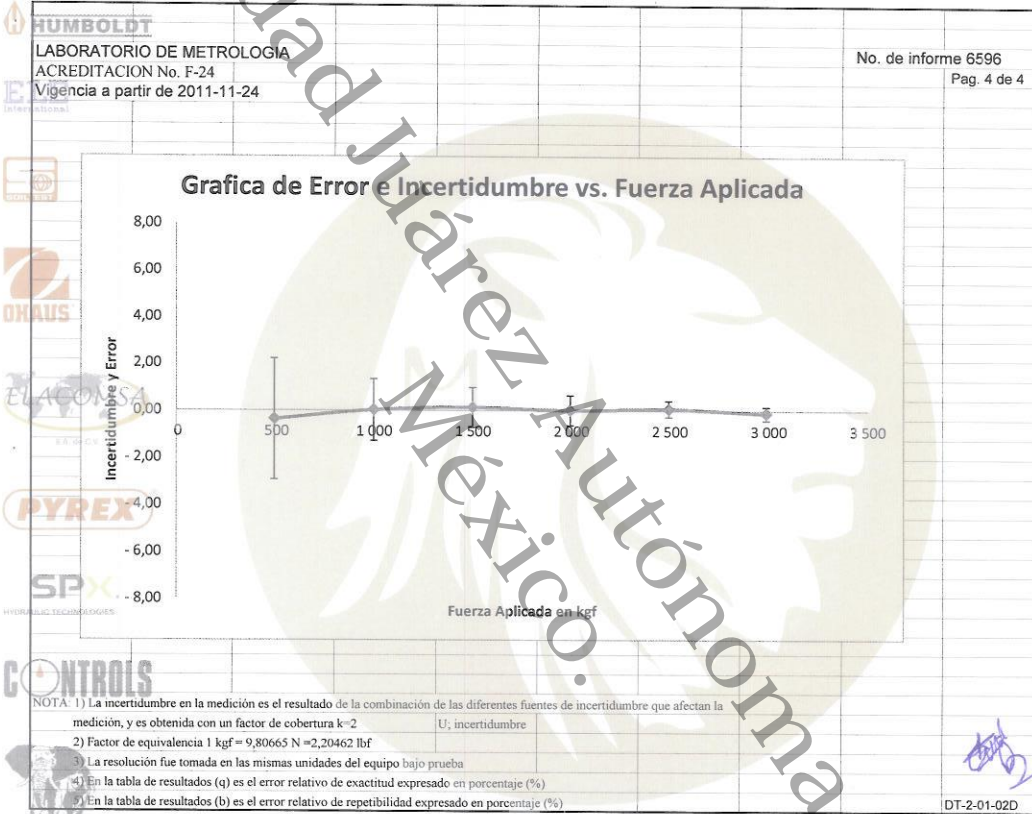
OFICINAS CORPORATIVAS / MÉXICO
CIPRES No. 26 COL. VIVEROS DE XALOSTOC,
C.P. 55340, ECATEPEC, EDO. DE MEX.
TEL.: 5569.4888 / 5569.4085
e-mail: metrologiadavi@gmail.com



OFICINAS ADMINISTRATIVAS:
PRIMAVERA No. 72 VIVEROS DE XALOSTOC
C.P. 07300 ECATEPEC, EDO. DE MEX.
TEL.: 5569.4901
e-mail: metrologiadavi@gmail.com

FABRICANTES Y DISTRIBUIDORES DE MÁQUINAS PARA:
 TENSIÓN, COMPRESIÓN, PENETRACIÓN, FLEXIÓN, UNIVERSALES Y
 PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.

OPERADAS CON SISTEMA:
 MECÁNICA, HIDRÁULICA, MANUAL, ELÉCTRICA, DIGITAL, ANALÓGICA,
 COMPUTADORA, IMPRESORA, GRAFICADORA Y CONTROL DE
 VELOCIDAD.



La más alta Tecnología Nacional y con Servicio de Calibración para la mejor Calidad y Control en su Laboratorio.
 Laboratorio acreditado por ema para las calibraciones indicadas en el escrito con número de acreditación N° F-24. Acreditado a partir de 2007-09-26

OFICINAS CORPORATIVAS / MÉXICO
 CIPRES No. 26 COL. VIVEROS DE XALOSTOC,
 C.P. 55340, ECATEPEC, EDO. DE MEX.
 TEL.: 5569.4888 / 5569.4085
 e-mail: metrologiadavi@gmail.com



OFICINAS ADMINISTRATIVAS:
 PRIMAVERA No. 72 VIVEROS DE XALOSTOC
 C.P. 07300 ECATEPEC, EDO. DE MEX.
 TEL.: 5569.4901
 e-mail: metrologiadavi@gmail.com



FABRICANTES Y DISTRIBUIDORES DE MÁQUINAS PARA:
TENSIÓN, COMPRESIÓN, PENETRACIÓN, FLEXIÓN, UNIVERSALES Y
PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.

OPERADAS CON SISTEMA:
MECÁNICA, HIDRÁULICA, MANUAL, ELÉCTRICA, DIGITAL, ANALÓGICA,
COMPUTADORA, IMPRESORA, GRAFICADORA Y CONTROL DE
VELOCIDAD.

NIT
JAMES INSTRUMENTS INC.

Laboratorio de Metrología 2016-09-22

HUMBOLDT

ELF
INSTRUMENTATION

PRENSA MARSHALL 6596

OHAUS

LECTURA

No.	Unidades	FUERZA (kgf)	CONSTANTE PROM.
1	17,0	493	29
2	34,5	1 001	
3	51,5	1 494	
4	68,5	1 987	
5	86,0	2 494	
6	103,0	2 987	

ELACOMSA

PYREX

SPX
HYDRAULIC TECHNOLOGIES

CONTROLS

FORNEY

DEWALT

La más alta Tecnología Nacional y con Servicio de Calibración para la mejor Calidad y Control en su Laboratorio.

Laboratorio acreditado por ema para las calibraciones indicadas en el escrito con número de acreditación N° F-24. Acreditado a partir de 2007-09-26

OFICINAS CORPORATIVAS / MÉXICO
CIPRES No. 26 COL. VIVEROS DE XALOSTOC,
C.P. 55340, ECATEPEC, EDO. DE MEX.
TEL.: 5569.4888 / 5569.4085
e-mail: metrologiadavi@gmail.com



OFICINAS ADMINISTRATIVAS:
PRIMAVERA No. 72 VIVEROS DE XALOSTOC
C.P. 07300 ECATEPEC, EDO. DE MEX.
TEL.: 5569.4901
e-mail: metrologiadavi@gmail.com