



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

Estudio del envejecimiento de mezclas asfálticas con núcleos de
obras y briquetas procesadas en laboratorio

AUTOR:

Loor Torres, Mario Andrés

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
Ingeniero Civil**

TUTOR:

Ing. Vila Romaní, Rolando. PhD.

Guayaquil, Ecuador

10 de Marzo del 2021



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Mario Andrés Loor Torres**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

f. _____
Ing. Rolando Vila Romani, PhD.

DIRECTORA DE LA CARRERA

f. _____
Ing. Stefany Alcívar Bastidas, MSc.

Guayaquil, a los 10 días del mes de Marzo del 2021



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Loor Torres Mario Andrés**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Estudio del envejecimiento de mezclas asfálticas con núcleos de obras y briquetas procesadas en laboratorio**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 10 días del mes de Marzo del año 2021

EL AUTOR:

f. _____
Loor Torres Mario Andrés



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

AUTORIZACIÓN

Yo, **Loor Torres Mario Andrés**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Estudio del envejecimiento de mezclas asfálticas con núcleos de obras y briquetas procesadas en laboratorio**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva autoría.

Guayaquil, a los 10 días del mes de Marzo del año 2021

EL AUTOR:

f. _____
Loor Torres Mario Andrés

Urkund Analysis Result

Analysed Document: Mario_loor_final.docx (D96705869)
Submitted: 2/27/2021 6:26:00 AM
Submitted By: claglas@hotmail.com
Significance: 4 %

Sources included in the report:

TESIS HIDALGO-RIERA (versión URKUND).docx (D18241567)
TESIS WALTER MERA INTRIAGO Y KEVIN ICAZA PRECIADO.docx (D41018981)
Caracterización de mezclas asfálticas en caliente mediante la obtención de curvas maestras de módulo dinámico-Cuerpo.pdf (D19106850)
<http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/15819/CORNEJO%20%2526%20LAMI%20C3%91A%20DISERTACION%20FINAL.docx?sequence=1&isAllowed=y>
<https://docplayer.es/amp/147057181-Facultad-de-ingenieria-carrera-de-ingenieria-civil.html>
<https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/760/1/ti887.pdf>
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/1422/1/T-UCSG-PRE-ING-IC-89.pdf>
<https://docplayer.es/76689562-Facultad-de-ingenieria-carrera-de-ingenieria-civil-tema-evaluacion-del-dano-por-humedad-en-tres-mezclas-asfalticas-producidas-en-la-region-sierra.html>
https://www.ptcarretera.es/wp-content/uploads/2017/07/05_UP-catalun%CC%83a_CT-2015_Final.pdf
<https://docplayer.es/amp/130191089-Creative-commons-atribucion-nocomercial-sinderivadas-2-5-peru.html>
<https://core.ac.uk/download/pdf/11051661.pdf>
<http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/14153/1/COMPARATIVA%20ENTRE%20EL%20M%20C3%93DULO%20DE%20RESILIENCIA%20Y%20EL%20M%20C3%93DULO%20DIN%20C3%81MICO%20DE%20MEZCLAS%20ASF%20C3%81LTICAS%20EN%20CALIENTE.pdf>
<https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/13928/3560900231399UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/107978/Rares_Cimpeanu.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Instances where selected sources appear:

- -

AGRADECIMIENTO

En primer lugar le agradezco a Dios por haberme permitido llegar a este momento de mi vida. Por escucharme y darme todas las fuerzas necesarias diariamente. Le agradezco por las personas y circunstancias que ha puesto en mi camino, que ha permitido desarrollarme como persona y por su infinita bondad.

En segundo lugar le agradezco a mi familia, que ha sido mi motor inmóvil. A mi papá por inculcarme los valores de trabajo, responsabilidad, honestidad y bondad. A mi mamá por ser mi apoyo incondicional y el mejor ejemplo de entrega y amor. A mis dos hermanos, por su continuo acompañamiento y apoyo, y ser un fiel reflejo de autosuperación.

A mis amigos y todas las personas que me han acompañado a lo largo de todos estos años. Quienes han estado en los buenos y malos momentos y han formado una parte fundamental de mi desarrollo personal.

Finalmente a mis profesores que han sido una pieza clave en mi formación académica y humana. En especial al Ing. Vila, por su paciencia y entrega tanto dentro del salón de clases, como en la realización de este trabajo de titulación.

DEDICATORIA

Le dedico este trabajo a Dios, a mis padres y a mis abuelos.



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

f. _____
Ing. Rolando Vila Romaní, PhD.
TUTOR

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____
Ing. Stefany Alcívar Bastidas, MSc.
DIRECTORA DE CARRERA

f. _____
Ing. Nancy Varela Terreros, MSc.
DELEGADA

f. _____
Ing. Federico von Buchwald de Janon, MSc.
OPONENTE

ÍNDICE GENERAL

Contenido

Capítulo I	2
1. Introducción	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Justificación e importancia del tema	3
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos	5
1.4. Alcance	5
1.5. Metodología	6
Capítulo II	9
2. Marco teórico	9
2.1. Mezclas asfálticas y sus propiedades.....	9
2.1.1. Parámetros volumétricos.....	11
2.1.1.1. Gravedad específica bruta o “bulk” (Gmb).....	12
2.1.1.2. Gravedad específica máxima teórica (Gmm).....	12
2.1.1.3. Porcentaje de vacíos con aire (Pa).....	13
2.2. Impacto del envejecimiento del asfalto en las mezclas	14
2.2.1. Introducción.....	14
2.2.2. Causas principales del envejecimiento del asfalto	15
2.2.2.1. Oxidación.....	15
2.2.2.2. Volatización	18
2.2.2.3. Radiación solar	18
2.2.3. Pruebas de envejecimiento en laboratorio	21

2.2.3.1.	Ensayo de película delgada en horno (TFOT)	22
2.2.3.2.	Ensayo de película delgada rotatoria en horno (RTFOT)	23
2.2.3.3.	Cámara de envejecimiento a presión (PAV)	24
2.2.3.4.	Envejecimiento de mezclas asfálticas en caliente (AASHTO R30) 25	
2.2.4.	Estudios previos de envejecimiento de asfaltos y mezclas	26
Capítulo III.....		31
3.	Trabajo experimental	31
3.1.	Precisiones sobre metodología empleada	31
3.1.1.	Núcleos extraídos en vías de la región costa	31
3.1.2.	Briquetas envejecidas en laboratorio	34
3.2.	Evaluación del envejecimiento en laboratorio.....	36
3.2.1.	Módulo de rigidez	36
3.2.2.	Prueba de fatiga con el Nottingham Asphalt Tester (NAT).....	37
3.3.	Resultados obtenidos	40
3.3.1.	Pruebas realizadas a los núcleos.....	40
3.3.2.	Análisis de los resultados de los núcleos	44
3.3.3.	Pruebas realizadas a las briquetas envejecidas	46
3.3.4.	Análisis de los resultados de las briquetas.....	48
3.3.4.1.	Comparación entre briquetas compactadas al 97 y 100% de su densidad relativa.....	50
3.3.5.	Comparación entre núcleos y briquetas	51
3.3.6.	Comparación de módulos de rigidez en briquetas envejecidas confeccionadas con distintas mezclas y DR 97%.....	54
Capítulo IV		56
4.	Conclusiones y recomendaciones	56

4.1. Conclusiones	56
4.2. Recomendaciones	58
Referencias.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Flujograma del trabajo	8
Figura 2. Equipamiento para prueba Rice.....	13
Figura 3. a) Compuestos aromáticos b) Enlaces dobles carbono – carbono...	16
Figura 4. Cinética de oxidación del ligante.....	17
Figura 5. Mapa mundial de la radiación UV.	20
Figura 6. Duración de envejecimiento térmico requerido a 95°C para simular 8 años en campo a los 6 mm de la superficie del pavimento.....	21
Figura 7. Horno TFOT.....	22
Figura 8. Horno para prueba RTFOT.	23
Figura 9. Botellas para pruebas antes y después de colocada la muestra.	24
Figura 10. Cámara de envejecimiento a presión.....	25
Figura 11. Ubicación de las vías de donde se extrajeron los núcleos.....	32
Figura 12. Extracción de núcleos de la vía Milagro- Naranjito- Bucay con 8 años de colocación	32
Figura 13. Extracción de núcleos de la avenida Lapentti con 15 años de colocación.....	33
Figura 14. Flujograma de trabajo	35
Figura 15. Nottingham Asphalt Mix Tester.	36
Figura 16. Gráficas de pruebas de fatiga para Sm1> Sm2> Sm3.....	39
Figura 17. Gráfico de fatiga de núcleos con 0 años	40
Figura 18. Gráfico de fatiga de núcleos con 4 años	41
Figura 19. Gráfico de fatiga de núcleos con 8 años	42
Figura 20. Gráfico de fatiga de núcleos con 15 años	43
Figura 21. Curva de módulo de rigidez versus tiempo de colocación	44
Figura 22. Fatiga de núcleos envejecidos en campo	45

Figura 23. Módulo de rigidez versus días de envejecimiento para DR 97%	48
Figura 24. Módulo de rigidez versus días de envejecimiento para DR 100 % .	48
Figura 25. Fatiga de briquetas envejecidas en laboratorio para DR 97%	49
Figura 26. Comparación del envejecimiento de briquetas al 97% y 100% de la densidad relativa.....	50
Figura 27. Comparación de módulos de rigidez de núcleos y briquetas envejecidas con DR 97%.....	51
Figura 28. Días de envejecimiento versus años de envejecimiento en campo	53
Figura 29. Comparación de pruebas de fatiga entre núcleos extraídos y briquetas envejecidas en laboratorio, ambas con DR 97%	54
Figura 30. Comparación de envejecimiento para diferentes tipos de mezclas	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales investigaciones sobre el envejecimiento de las mezclas asfálticas.....	30
Tabla 2. Resultados de vía Puerto Inca - Naranjal con 0 años.....	40
Tabla 3. Resultados de vía Milagro- Naranjito- Bucay con 4 años	41
Tabla 4. Resultados de vía Milagro- Naranjito- Bucay con 8 años	42
Tabla 5. Resultados de vía ampliación por paso de Durán	43
Tabla 6. Pruebas de módulo de rigidez realizadas a briquetas con DR 97% ...	46
Tabla 7. Pruebas de fatiga realizada a briquetas con DR 97%	47
Tabla 8. Pruebas de módulo de rigidez realizadas a briquetas con DR 100% .	47

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar el envejecimiento de las mezclas asfálticas, a través de la evaluación de su módulo de rigidez en el equipo NAT, utilizando núcleos extraídos en obras con diferentes años de colocación en la región costa del Ecuador y briquetas de mezcla con similar composición, producidas en planta y envejecidas en laboratorio. Partiendo de la normativa AASHTO R30, se realizó el envejecimiento a corto plazo de la mezcla suelta por 4 horas a 135°C y luego se envejeció a largo plazo la mezcla compactada a 85°C durante los siguientes tiempos: 0, 2.5, 5, 7.5 y 10 días. Estos valores se los escogieron para contrastar los resultados de los núcleos de vías. Todas las mezclas usadas en este estudio fueron producidas con una misma exigencia granulométrica y empleando materiales aluviales triturados con un mismo tipo de asfalto. Además, se realizaron pruebas de fatiga. Los resultados indican que dentro del rango de tiempo de envejecimiento acelerado empleado, cada día en el horno a 85°C equivale a 0.47 años. Por este motivo, se considera que el envejecimiento térmico por sí solo no es capaz de reproducir adecuadamente el envejecimiento en vías de la costa del Ecuador. Un parámetro que se conoce que tiene gran influencia en nuestro ambiente es la radiación UV, la cual no está incluida en los procedimientos utilizados en nuestro país. Se recomienda profundizar el estudio del envejecimiento para la elaboración de normas que contemple las particularidades de nuestras mezclas asfálticas y su entorno.

Palabras claves: Mezclas asfálticas, envejecimiento, módulo de rigidez, AASHTO R30, fatiga, radiación UV.

ABSTRACT

This work's objective is to analyze asphalt mixtures aging, through its stiffness modulus evaluation with the NAT equipment, using extracted cores from highways with different years from the coast of Ecuador and specimens with similar composition, elaborated in an asphalt plant and aged through accelerated aging tests. Taking as reference AASHTO R30 procedure, the loose mixture was short-term aged for 4 hours at 135°C and then long-term aged for the next periods: 0, 2.5, 5, 7.5 and 10 days at 85°C. These time periods were chosen to contrast the results of highway cores. All the fabricated mixtures, both the extracted from highways and the laboratory aged, were produced with the same granulometric requirements using crushed alluvial materials with the same type of national asphalt product. In addition, indirect tensile fatigue test was performed. The results indicated that within this range of aging periods, each day in the oven at 85°C is equivalent to 0.47 years. For this reason, it is considered that thermic aging by itself is not capable of adequately reproduce Ecuadorian coast highway aging. Although the UV radiation is a well-known parameter that has a lot of influence in our environment, it is not included in any procedures applied in our country. It is recommended to deepen in the study of aging for the development of standards that includes our asphalt and environment particularities.

Keywords: Asphalt mixtures, aging, AASHTO 30, stiffness modulus, fatigue, UV radiation.

Capítulo I

1. Introducción

1.1. Antecedentes

El asfalto procedente del refinamiento del petróleo es un material bituminoso de color negro con propiedades adhesivas que se comenzó a utilizar a inicios del siglo XX. Desde esta época se convirtió en un material muy interesante por sus diversas aplicaciones y por lo tanto se lo comenzó a investigar más extensamente. Su utilización aumentó rápidamente por todas las ventajas que éste presenta, aunque se observaron ciertos comportamientos que a un plazo determinado podrían traer ciertos daños.

Entre una de las propiedades más importantes que se encontraron, y hacia donde este trabajo está orientado, es su comportamiento al envejecimiento. El ligante asfáltico está sometido a distintas etapas de envejecimiento que son:

- Durante el transporte y almacenamiento en los tanque de la planta
- Durante la fabricación y colocación de la mezcla
- Durante el período de servicio

Este envejecimiento también se lo puede entender como endurecimiento o rigidización y se caracteriza por una mayor viscosidad y fragilidad. (Bell, Wieder & Fellin, 1994). La primeras dos etapas ocurren en un tiempo muy corto después de la obtención del ligante y la última ocurre a largo plazo. Esto incentivó a muchos ingenieros investigar a fondo sobre el envejecimiento del cemento asfáltico e inventar varios ensayos que pudieran simular estas condiciones de una forma acelerada.

La mayoría de los estudios y ensayos han sido dirigidos solo al asfalto como tal, mientras que en menor medida a las mezclas asfálticas como un conjunto. Si bien el asfalto se considera el elemento fundamental en las mezclas, ciertas propiedades pueden cambiar debido a la interacción con el agregado. Por lo tanto, se considera que la determinación de la rigidez de la mezcla asfáltica

puede ser un parámetro clave para entender adecuadamente los procesos y tiempos del envejecimiento que ocurren en nuestras carreteras.

Uno de los primeros estudios a profundidad de este fenómeno en las mezclas asfálticas se realizó en el marco del Programa Estratégico de Investigación de Carreteras de los Estados Unidos, o SHRP por sus siglas en Inglés, en el año 1994. Como resultado de este estudio apareció unos años más tarde el procedimiento AASHTO R30, el cual propone envejecer la mezcla por métodos acelerados. Para lograr este objetivo se introduce las briquetas en un horno a una temperatura y tiempo determinado para simular el corto y largo plazo de envejecimiento.

Las investigaciones posteriores se han basado principalmente en determinar temperaturas y tiempos adecuados que funcionen en un determinado lugar. Esto último es un aspecto de suma relevancia, ya que no todos los lugares comparten las mismas condiciones del entorno.

1.2. Justificación e importancia del tema

La infraestructura vial de un país es una pieza clave para que éste se pueda desarrollar productiva y eficazmente. Estas obras son capaces de mejorar la calidad de vida de poblaciones enteras y mejorar relaciones comerciales entre ciudades y provincias. Al mismo tiempo, durante la construcción del proyecto es una gran fuente de empleo directo e indirecto para centenas de personas. Sin embargo, representan también una gran inversión para el estado, municipios y directamente a los ciudadanos en casos de concesiones.

Lo que realmente preocupa de esta situación es el rápido deterioro de las vías (refiriéndose a pavimentos flexibles), una de cuyas causas principales es el envejecimiento de las mezclas asfálticas. Cabe señalar que este pronto deterioro es independiente del tráfico, aunque en presencia de éste podría acelerar su ritmo. El envejecimiento se debe principalmente a la reacción química entre el

asfalto y el oxígeno que se encuentra en el ambiente, también denominado proceso de oxidación. Existen otras causas importantes que se las explicará en el presente trabajo. Es por esta razón que países desarrollados han invertido inmensas cantidades de dinero en investigaciones para mitigar y resolver este problema.

De la misma manera que en otras ramas de la Ingeniería Civil, nuestro país ha adoptado diversos procedimientos y ensayos elaborados en otros países en sus normas, cuyas bases e hipótesis no refleja adecuadamente nuestro medio, donde las condiciones de los materiales y del ambiente varían. Esto quiere decir que cuando seguimos los procedimientos de la norma, podría existir un deterioro significativamente más acelerado en el campo del que se ha determinado en laboratorio.

La importancia de este trabajo reside en hacer precisiones respecto al envejecimiento de las mezclas asfálticas, tomando en cuenta las condiciones reales de nuestro medio. Mediante ensayos realizados a los núcleos extraídos de varias vías de la costa del Ecuador, que responden a capas asfálticas colocadas entre 0 y 15 años, se pueden establecer importantes comparaciones con briquetas elaboradas en planta con el mismo tipo de asfalto y materiales, envejecidas aceleradamente en laboratorio. De esta manera se intenta establecer procedimientos en el laboratorio que representen de una forma más cercana la realidad de nuestras mezclas asfálticas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo de este trabajo de titulación es de analizar el envejecimiento de las mezclas asfálticas, a través de la evaluación de su rigidez, utilizando núcleos extraídos en obras con diferentes años de colocación en la región costa del Ecuador y briquetas de mezclas con similar composición, producidas en planta y

envejecidas por procedimientos acelerados en el laboratorio; para establecer comparaciones que posibiliten estudios proyectivos.

1.3.2. Objetivos específicos

- Estudiar las particularidades del fenómeno del envejecimiento en las mezclas asfálticas empleando bibliografía actualizada.
- Procesar los resultados de los parámetros volumétricos y ensayos de módulos de rigidez y fatiga realizados en núcleos extraídos en vías con diferentes años de colocación.
- Procesar los resultados de los ensayos realizados en briquetas de mezclas con similar composición producidas en planta y envejecidas por procedimientos acelerados en el laboratorio.
- Establecer relaciones entre los resultados procesados en ambas condiciones y realizar precisiones para la región costa.

1.4. Alcance

El presente trabajo pretende determinar los tiempos y temperaturas a las que se deban someter las briquetas realizadas en planta o laboratorio para simular de forma más aproximada el envejecimiento de las mezclas asfálticas mediante el uso de ensayos acelerados. La selección de los intervalos de tiempos y la temperatura a los cuales se va a experimentar con las briquetas ha sido seleccionada a partir del estudio bibliográfico y sugerencias más actualizadas.

Se utilizará principalmente el ensayo de módulo de rigidez para establecer esta comparación entre los núcleos extraídos de diversas vías de la costa ecuatoriana y las briquetas con similar composición elaboradas en planta y envejecidas aceleradamente. Además, se realizarán pruebas de fatiga y la imprescindible determinación de propiedades volumétricas en ambas variantes, para poder realizar comparaciones más detalladas.

1.5. Metodología

El Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil pudo realizar la extracción de núcleos en vías de la región costa ecuatoriana previo al inicio de este trabajo, en las vías que se mencionan a continuación:

- Vía Puerto Inca- Naranjal, en la abscisa 31+000 con 0 años de colocación
- Vía Milagro– Naranjito- Bucay en la abscisa 19+240 con 4 años de colocación
- Vía Milagro– Naranjito- Bucay en la abscisa 33+240 con 8 años de colocación
- Ampliación del paso por la ciudad de Durán (actual Avenida Lapentti) en la abscisa 1+400 con 15 años de colocación

Cabe mencionar que todas las mezclas extraídas fueron producidas en su momento en la planta asfáltica del contratista H e H, ubicada en el campamento del km 26 de la vía Durán- El Triunfo. Dicho contratista tiene bajo concesión las vías estudiadas con la empresa CONCEGUA.

Luego se determinaron las propiedades volumétricas de estos núcleos, es decir, la gravedad específica bruta (Gmb), la gravedad específica máxima (Gmm) y el porcentaje de vacíos con aire en la mezcla compactada (Pa), que permiten evaluar la uniformidad de la mezcla producida y la efectividad de la compactación. Posteriormente se realizaron pruebas para evaluar los módulos de rigidez y la fatiga de los núcleos extraídos.

Por otro lado, para la confección de briquetas con el 97 y 100% de su densidad relativa, se emplearon primeramente métodos acelerados de envejecimiento a corto plazo. Para ello se procedió a colocar la mezcla suelta en una bandeja dentro de un horno de convección durante 4 horas a una temperatura de 135°C, como recomienda el procedimiento AASHTO R 30 (AASHTO, R. 30-02, 2010).

Luego se realizó el proceso de compactación de las briquetas en los moldes Marshall, para lo cual se tuvo que determinar previamente que el 97% de la

densidad relativa se obtenía aplicando 40 golpes/cara y el 100% de la densidad relativa aplicando 75 golpes/cara (suponiendo tráfico pesado).

Para el envejecimiento a largo plazo se consideró también la normativa AASHTO R 30, es decir, envejecer las briquetas ya confeccionadas en el horno de convección a 85°C por 120 horas (5 días), pero para poder contrastar los resultados de los núcleos de vías con este envejecimiento a briquetas, se decidió aplicar el envejecimiento a cada una de las briquetas durante los siguientes tiempos: 0, 2.5 ,5 ,7.5 y 10 días. Se aclara que si bien el procedimiento a largo plazo de AASHTO R30 se aplica solo a briquetas con un 7 % aproximado de vacíos (97% de densidad relativa), con fines de comparación dicho procedimiento también se aplicó a las briquetas con un 4% aproximado de vacíos (100% de densidad relativa).

Por lo antes mencionado, la determinación del módulo de rigidez de las briquetas envejecidas en el laboratorio se realizó sobre las mismas para cada uno de los tiempos mencionados, lo que permite obtener gráficas que relacionan la rigidez con el tiempo. De la misma forma como en los núcleos extraídos, se les realizaron pruebas de fatiga. Finalmente se comparan los resultados de los núcleos extraídos de las vías y las briquetas confeccionadas en laboratorio, para determinar el punto en el que el valor de su rigidez coincide. Por lo tanto, se podría decir que el valor de horas correspondiente a ese punto es el que realmente simula una cantidad determinada de años de colocación en el sitio.

A continuación, en la Figura 1, se muestra el diagrama de flujo de cada tarea realizada para este trabajo.

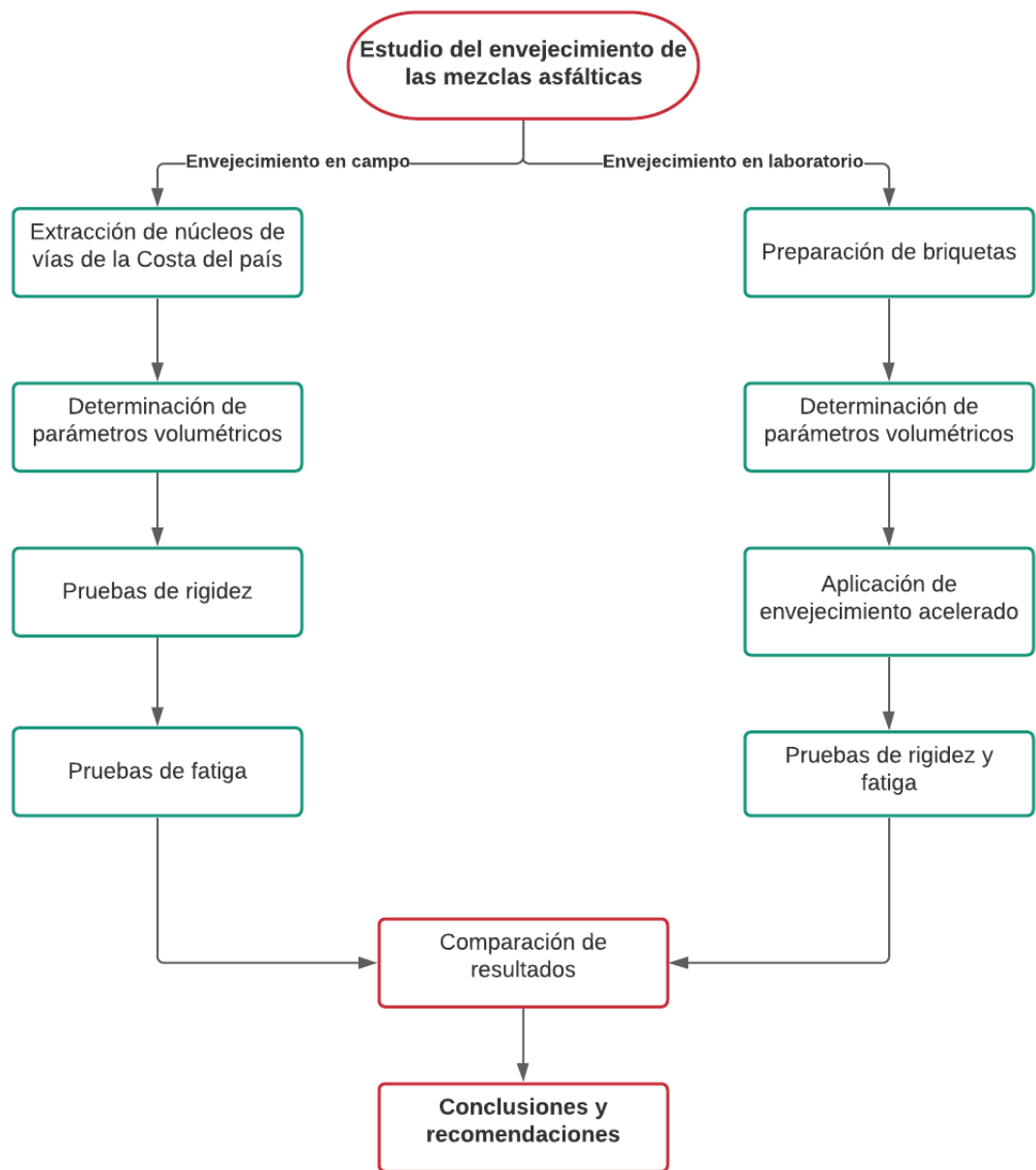


Figura 1. Flujograma del trabajo

Capítulo II

2. Marco teórico

2.1. Mezclas asfálticas y sus propiedades

Las mezclas asfálticas son la combinación de agregados minerales, unidos por un ligante asfáltico de tal forma que los agregados pétreos queden cubiertos por una película uniforme de asfalto. Las proporciones que existen entre estos componentes dictan sus propiedades físicas y su desempeño como pavimento flexible.

Su clasificación es amplia y depende del parámetro que se esté utilizando para categorizarla. Si su criterio es la temperatura, se dividen en mezclas en frío y caliente. Si se analiza el porcentaje de vacíos, se pueden encontrar las mezclas densas, semidensas o porosas. Si la variable es la granulometría, existen las mezclas continuas si se emplean una amplia distribución de tamaños de agregados, o las mezclas discontinuas si esta distribución es muy reducida. O también si se refiere al tamaño máximo de agregado, se encuentran las mezclas gruesas con un tamaño máximo de agregado por encima de 10mm, y las mezclas finas con un tamaño máximo de agregado por debajo de 10mm. (Garnica, Flores, Gómez, & Delgado, 2005)

Entre las propiedades más importantes de las mezclas asfálticas para pavimentos flexibles están:

- a) Estabilidad
- b) Resistencia a las deformaciones plásticas
- c) Resistencia a la fatiga
- d) Resistencia al deslizamiento
- e) Resistencia a los agentes externos.

- a) Estabilidad: se refiere a la capacidad que tiene un pavimento para resistir los desplazamientos y deformaciones debido a las cargas del tráfico. Por lo tanto una mezcla estable es aquella que presenta deformaciones razonables sin formar ondulaciones que puedan afectar al pavimento.

Los requerimientos de estabilidad deben ser lo suficientemente altos para soportar las cargas previstas de los estudios de tráfico, sin exceder cierto límite que podría indicar que la mezcla es muy rígida y frágil.

- b) Resistencia a deformaciones plásticas: comprende las características reológicas que debe de poseer la mezcla para evitar las deformaciones longitudinales provocadas por el paso de los neumáticos, que se ven agravadas en condiciones de altas temperaturas y velocidades bajas de tráfico (Padilla, 2004).

Existen dos tipos de roderas o ahuellamientos que deben ser consideradas, las que responden a fallas en la capa de asfalto o en la subrasante o capas de agregados. Entre las causas principales se encuentran la baja resistencia al corte de las mezclas y los altos esfuerzos cortantes generados en estructuras particulares de pavimentos.

- c) Resistencia a la fatiga: la mezcla debe ser capaz de resistir los esfuerzos y deformaciones por tracción generadas por las repeticiones de carga, que son agravadas por condiciones de temperatura y velocidad. Este fenómeno genera que cargas que están muy por debajo de su resistencia afecten progresivamente la mezcla y le produzca flexiones que al final se puedan convertir en agrietamientos.

Los dos principales mecanismos de falla de la fatiga son los agrietamientos de abajo hacia arriba en la capa asfáltica o piel de cocodrilo y los agrietamientos de arriba hacia abajo o grietas longitudinales.

- d) Resistencia al deslizamiento: se refiere a una propiedad de tipo funcional que consiste en garantizar una fricción adecuada entre el neumático y superficie del pavimento, que debe de mantenerse en rangos adecuados durante toda su vida útil. Para asegurar la resistencia al deslizamiento la mezcla debe de contar con un coeficiente de fricción apropiado y los agregados deben de tener un alto coeficiente de pulido acelerado.

Entre los factores que afectan el coeficiente de fricción están la macrotextura, la microtextura, la presencia de agua en la superficie, la naturaleza del agregado y el ligante, la presión de inflado del neumático y la velocidad del vehículo (Leiva, 2005). La resistencia al deslizamiento se la puede considerar determinando el llamado Índice de Regularidad Internacional (IRI) y el Índice de Fricción Internacional (IFI), que son indicadores reconocidos que permiten la comparación de sus valores entre pavimentos de cualquier parte del mundo.

- e) Resistencia a los agentes externos: capacidad de la mezcla para soportar los efectos dañinos del agua, los rayos ultravioletas, variaciones de temperatura, entre otros. Se busca que la mezcla no se envejezca bruscamente a corto plazo y que se mantenga en condiciones aceptables durante su periodo de diseño.

2.1.1. Parámetros volumétricos

El punto de partida para obtener un comportamiento adecuado en una mezcla es garantizar en la misma adecuados parámetros volumétricos según el tipo de mezcla que se desee fabricar. Es decir, dichos parámetros son mediciones fundamentales de la estructura de la mezcla. Por esta razón se describen los principales parámetros que se midieron en el presente trabajo investigativo.

2.1.1.1. Gravedad específica bruta o “bulk” (Gmb)

Es la relación entre el peso de un determinado volumen de mezcla caliente y compactada con respecto al peso de un volumen igual de agua. El procedimiento de este ensayo se muestra en diferentes normativas (AASHTO T166, 2016; ASTM D1188, 2015; ASTM D2726, 2019). Se utiliza este parámetro volumétrico para medir el grado de compactación de las carpetas asfálticas.

Para obtener la gravedad específica “bulk” se debe de utilizar la siguiente fórmula

$$Gmb = \frac{Wa}{W_{ss} - Ww}$$

Donde:

Gmb: gravedad específica bulk

Wa: masa del espécimen seco en el aire (gr)

Wss: masa del espécimen superficialmente seco en el aire (gr)

Ww: masa del espécimen en el agua (gr)

2.1.1.2. Gravedad específica máxima teórica (Gmm)

Es la relación entre el peso de un determinado volumen de mezcla sin compactar a 25°C con respecto al peso de un volumen igual de agua. El procedimiento de este ensayo se puede encontrar en distintas normativas (AASHTO T 209, 2020; ASTM D 2041, 2019). La prueba Rice es la comúnmente utilizada para la determinación de este parámetro y se realiza con el equipo mostrado en la Figura 2.



Figura 2. Equipamiento para prueba Rice.
Vila, R. (2020) Material no publicado.

Para obtener la densidad específica máxima de la mezcla se debe de utilizar la siguiente fórmula

$$Gmm = \frac{A}{A + B - C}$$

Donde:

Gmm: gravedad específica máxima teórica

A: masa de la muestra de mezcla seca en el aire (gr)

B: masa del recipiente lleno con agua a 25°C (gr)

C: masa del recipiente lleno con la muestra de mezcla y agua a 25°C (gr)

2.1.1.3. Porcentaje de vacíos con aire (Pa)

Es el porcentaje en volumen de los vacíos de aire en una mezcla compactada. Por un lado este porcentaje se debe encontrar en un rango en el que el asfalto

se pueda expandir y por otro lado evite la aparición de conductos por los que puedan entrar agua o cualquier otro líquido que pueda alterar la mezcla (Asphalt Institute , 2014).

Este parámetro está estrechamente vinculado a la densidad ya que guardan una relación inversa. El Instituto del Asfalto recomienda que este valor se encuentre en un 4% para el diseño. Para su cálculo se puede utilizar la siguiente fórmula

$$Pa = 100 - \frac{100 \times Gmb}{Gmm}$$

Donde:

Pa: porcentaje de vacíos con aire en la mezcla compactada.

Gmm: gravedad específica máxima teórica

Gmb: gravedad específica bulk

2.2. Impacto del envejecimiento del asfalto en las mezclas

2.2.1. Introducción

Una de las causas que más contribuyen al deterioro de las mezclas asfálticas es el envejecimiento, que consiste en el endurecimiento o rigidización del ligante asfáltico desde el momento en que éste es transportado de la refinería y almacenado en las diferentes plantas de fabricación de mezclas. Por esta razón resulta muy conveniente estudiar el cemento asfáltico individualmente, así como su efecto en el desempeño de las mezclas asfálticas.

Como se lo mencionó anteriormente, el envejecimiento ocurre principalmente en dos etapas: a corto y largo plazo. En estas dos etapas ocurren cambios de tipo químico, mecánico y reológico. Estas alteraciones pueden ocurrir bien por parámetros internos o propias de la mezcla y por parámetros externos que dependen del ambiente y los procesos constructivos (Teresa & Miró, 2015).

El envejecimiento del asfalto posee dos aspectos importantes de analizar. Por una parte aumenta la capacidad de carga y por otra parte disminuye su flexibilidad. A pesar de que las deformaciones ahora son menores, aumentan las fisuras por fatiga. A partir de este punto, la infiltración de agua se convierte en un riesgo potencial que puede debilitar la adherencia entre el ligante y los agregados haciendo fallar a la mezcla tempranamente.

En resumen, el envejecimiento de las mezclas asfálticas se debe a la rigidización del ligante asfáltico, las mezclas reducen su capacidad de deformación y pierden elasticidad, comportamiento muy relacionado con la vida útil del pavimento flexible. Por lo tanto, no tendría sentido referirse directamente a las mezclas asfálticas sin antes describir el comportamiento del ligante asfáltico bajo efectos del envejecimiento.

2.2.2. Causas principales del envejecimiento del asfalto

Es importante destacar que las causas que se analizan a continuación actúan de forma conjunta, causando ciertos efectos negativos en la mezcla. Aunque no todas ocurren necesariamente al mismo tiempo, no hay que analizarlas estrictamente de forma individual ya que unas alteran a las otras.

2.2.2.1. Oxidación

La oxidación es el proceso en el que las moléculas del asfalto se oxigenan, produciendo una serie de reacciones químicas que termina alterando su respuesta reológica y mecánica. Se ha identificado a este fenómeno como contribuyente principal de fragilidad y pérdida de la resistencia a la fractura de los pavimentos flexibles. Además es una de las causas de envejecimiento del asfalto que nunca deja de alterar al ligante desde el momento de su obtención. Por estos motivos se le ha dedicado casi un siglo de investigación a este fenómeno.

Para describir los cambios que ocurren en los asfaltos de una forma más objetiva, investigaciones recientes han utilizado la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR por sus siglas en inglés). Este procedimiento permite cuantificar los grupos funcionales que intervienen en el proceso oxidativo del ligante. Es decir, se pueden determinar las concentraciones de los grupos de carbonilos, sulfóxidos, hidroxilos, compuestos aromáticos, compuestos saturados e insaturados, entre otros.

En un estudio realizado en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) en la Universidad de Costa Rica, se aplicó FTIR en muestras de asfalto sometidos a la intemperie por 6 meses.

Los datos muestran un aumento en los grupos funcionales oxigenados tales como hidroxilo, carbonilo y sulfóxido. Adicionalmente, se observó un aumento en los enlaces dobles carbono-carbono y la aromaticidad, acompañado por la consecuente disminución de enlaces carbono-hidrógeno. Estos cambios podrían aumentar la rigidez del betún, puesto que los enlaces dobles y las moléculas aromáticas son estructuras con menor flexibilidad que aquellas compuestas por enlaces carbono-carbono simples. (Villegas, Baldi, Aguiar & Loría, 2018, pg.24)

Por lo tanto, el significativo aumento de los enlaces dobles de carbono y de los compuestos aromáticos (ver Figura 3) conllevan un efecto extra de rigidización que es muy importante tomarlo en cuenta al momento de aplicarle pruebas de envejecimiento acelerados a los asfaltos.

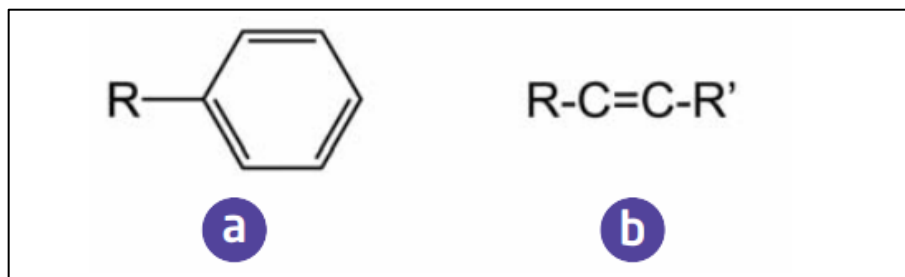


Figura 3. a) Compuestos aromáticos b) Enlaces dobles carbono – carbono.

Tomado de “Estudio físico químico de la oxidación del betún asfáltico y su relación con la fatiga a temperaturas intermedias de servicio”, por Villegas et al., 2018, San Pedro, Costa Rica.

Aparte de la concentración de los grupos funcionales, se ha observado que la cinética de la reacción entre el ligante y el oxígeno muestra una velocidad inicial alta de reacción también denominada “Spurt”, seguida por una velocidad de reacción más lenta casi constante. Durante el “Spurt”, los sulfóxidos son el principal producto de la oxidación que incrementa la viscosidad y durante el periodo de la reacción más lenta las cetonas producen el mismo efecto (Elwardany, 2017). En la Figura 4 se muestra la producción de cetonas y sulfóxidos en la cinética de oxidación del asfalto.

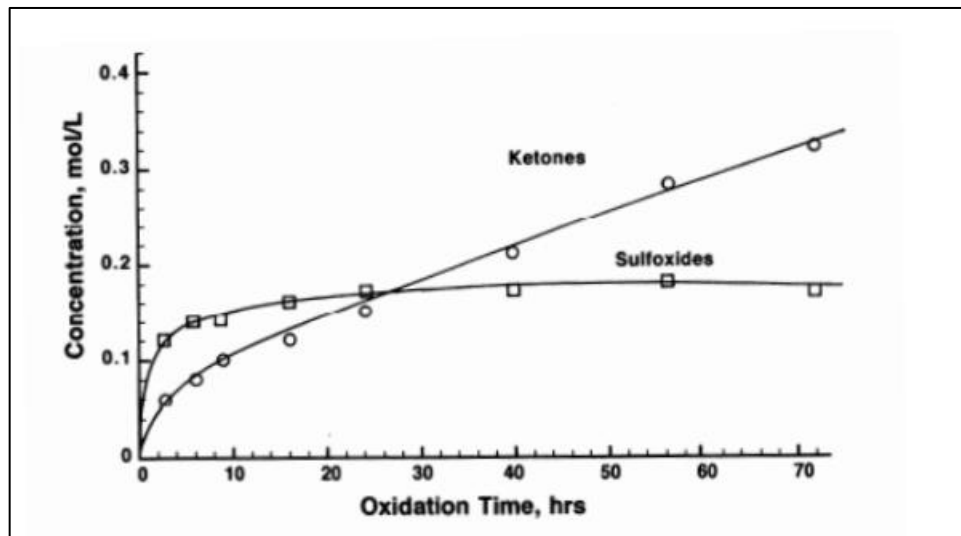


Figura 4. Cinética de oxidación del ligante.

Tomado de “Phenomenological Modeling and Laboratory Simulation of Long-Term Aging of Asphalt Mixtures”, por M. Elwardany, 2017, Raleigh, Estados Unidos.

La cinética de oxidación del ligante se la ha modelado típicamente utilizando la expresión de Arrhenius en la que depende de la temperatura y presión, que se muestra a continuación

$$r = A P^{\alpha} e^{\left(\frac{-Ea}{RT}\right)}$$

- r = tasa de la reacción (s^{-1})
- A = factor de frecuencia pre exponencial (s^{-1})
- P = presión absoluta de oxígeno
- α = constante con respecto a la presión del oxígeno

- E_a = Energía de activación (kJ/mol)
- R = constante universal de los gases (KJ/mol.K)
- T = temperatura (K)

Si estos parámetros de Arrhenius se pueden aplicar universalmente, se puede realizar una única prueba de envejecimiento a una sola temperatura para caracterizar la cinética de oxidación de ligantes no modificados.

2.2.2.2. Volatización

El incremento de temperatura que se genera durante la mezcla, almacenamiento, transporte y colocación en sitio conlleva que los constituyentes volátiles del ligante se puedan evaporar. Este mecanismo de envejecimiento se lo denomina como de corto plazo ya que ocurre principalmente en la mezcla de los agregados y el asfalto, cuando las temperaturas superan los 150°C. Un aumento de temperatura en 10 a 12°C por encima de los 150°C podría duplicar la emisión de volátiles. Por esto la viscosidad puede aumentar de 150 a 400%, lo cual afecta a las propiedades de flujo (Fernández, Rondón, & Reyes, 2013).

Durante la mezcla en caliente el asfalto cubre a los agregados con una pequeña capa que varía de 6 a 19 micrómetros. Cuando esta capa delgada tiene contacto con el agregado a temperaturas tan altas, las fracciones de aromáticos se evaporan rápidamente mientras que los asfaltenos aumentan entre 1% y 4% en peso (Fernández et al., 2013).

2.2.2.3. Radiación solar

El sol emite energía mediante radiación electromagnética con longitudes de onda entre 200 y 3000 nanómetros. Se estima que el 7% de esta radiación que alcanza nuestro planeta es radiación ultravioleta, 42% está dentro del campo visible y 51% es radiación infrarroja. Además, se ha determinado que la exposición a

radiación ultravioleta es la más eficiente en términos de las alteraciones en las propiedades físicas de los asfaltos analizados (Rondón & Reyes, 2015).

A pesar que se conoce hace mucho tiempo que la radiación solar interviene en el deterioro de las mezclas asfálticas, ha sido ignorada en los métodos de envejecimiento acelerado. La radiación UV se la considera como un catalizador del proceso de oxidación y por este motivo existen varios estudios que proponen el uso de la radiación ultravioleta para mejorar las simulaciones oxidativas de los betunes.

Según Villegas et al. (2018), ligantes asfálticos que ha sido expuestos por un corto tiempo a la intemperie (6 meses) experimenta una oxidación más fuerte que aquellos tratados por procesos térmicos acelerados, que buscan simular un envejecimiento de 10 años aproximadamente. El resultado de este estudio tiene una gran importancia en nuestro medio debido a la proximidad de Costa Rica a la línea ecuatorial.

Las referencias a la radiación UV suelen comúnmente indicarse como un índice UV, que es una medida estandarizada de la intensidad de dicha radiación en un tiempo y lugar determinado (Organización Mundial de la Salud, 2003) . A pesar de que este índice está ligado a la concienciación colectiva sobre las enfermedades cutáneas, los parámetros que intervienen en la formulación del índice (como la irradiancia espectral solar, la concentración de ozono, nubosidad, entre otros) indican que podría servir para realizar correlaciones con el envejecimiento del asfalto.

En la Figura 5 se observa un mapa mundial con el promedio del índice UV del mediodía solar para 1996-2002, basado en datos del espectrómetro GOME del satélite ERS-2 de la Agencia Espacial Europea (ESA), según lo publicado por KNMI (Real Instituto Meteorológico de los Países Bajos). En el mismo llama la atención a que en la zona de la cordillera andina cerca del eje ecuatorial, los valores de este índice son los más altos del planeta, pudiendo estar por encima de 14.

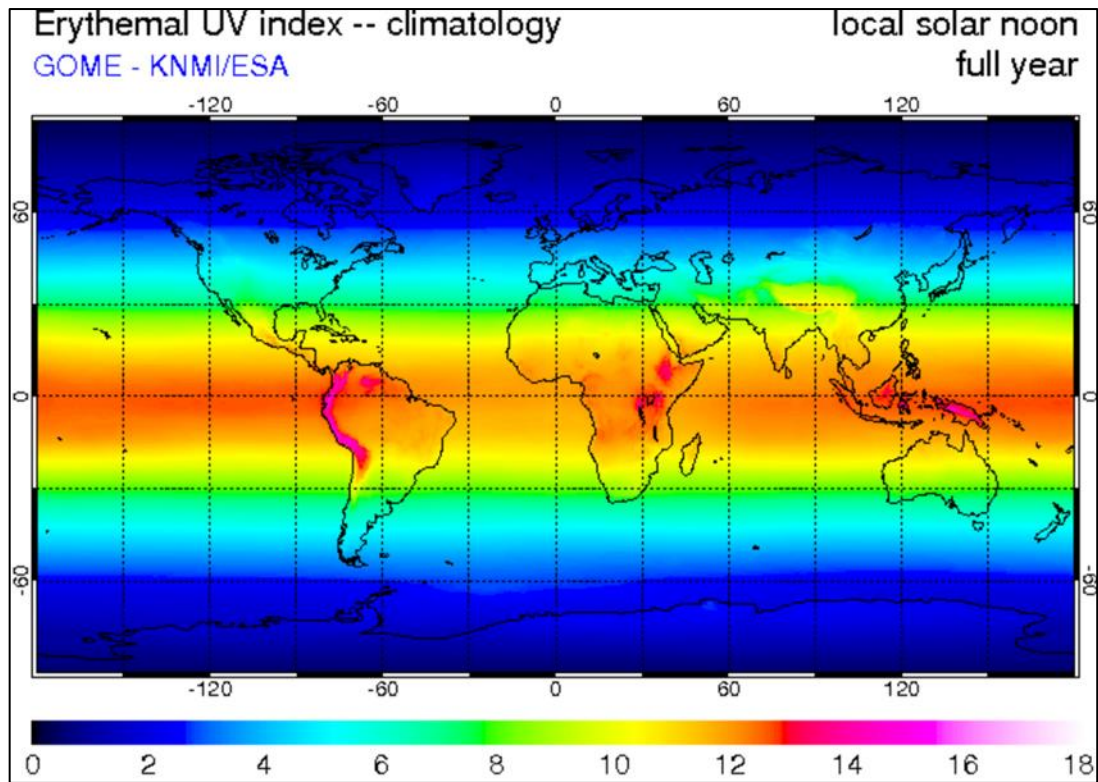


Figura 5. Mapa mundial de la radiación UV.

Recuperado de: https://da.wikipedia.org/wiki/Uv-indeks#/media/Fil:GOME.uviecclimyear_lr.gif

Por otro lado, en la Figura 6 se recoge el resultado de un estudio sobre envejecimiento (Kim et al., 2018), en el cual se muestran los días necesarios a los que se deben de calentar las mezclas asfálticas sueltas a 95°C en distintos estados de Estados Unidos, para producir un envejecimiento equivalente a 8 años.

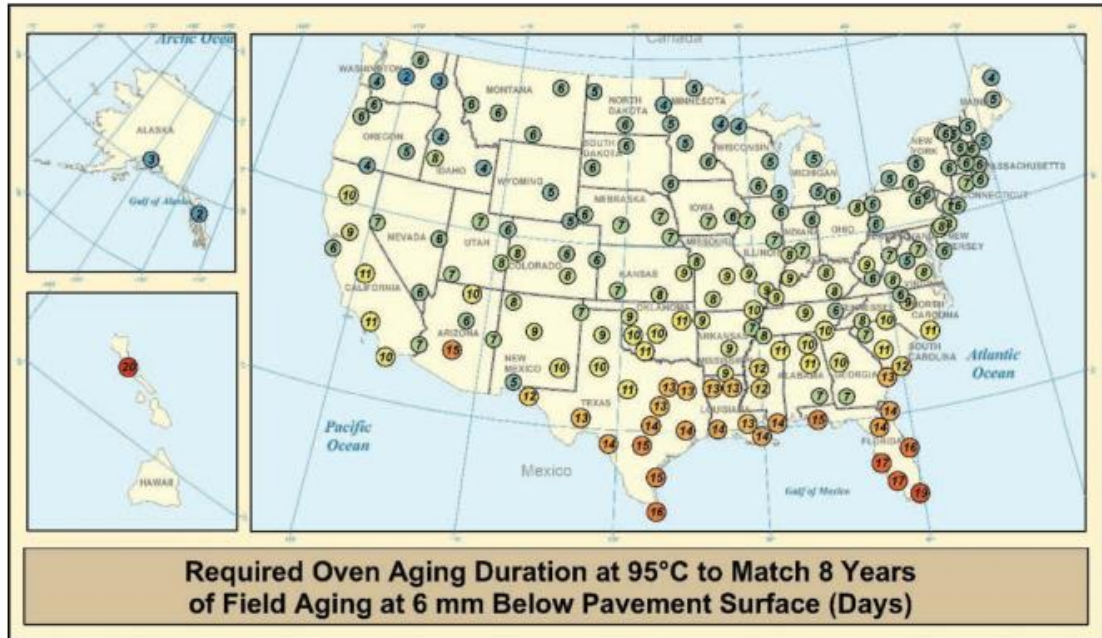


Figura 6. Duración de envejecimiento térmico requerido a 95°C para simular 8 años en campo a los 6 mm de la superficie del pavimento.

Tomado de “ Long- Term Aging of Asphalt Mixtures for Performance Testing and Prediction” por Kim et al., 2018, Washington DC. Estados Unidos.

Puede observarse que en ciertos estados como Washington, Dakota del Norte y Minnesota bastarían 4 días para simular este envejecimiento, mientras que en estados como Texas y Florida se necesitarían 16 días, teniendo como diferencia 25° de latitud. Por lo tanto, se podría inferir que los estados que se encuentran más cerca de la línea ecuatorial poseen un envejecimiento significativamente mayor.

2.2.3. Pruebas de envejecimiento en laboratorio

Debido a todos los procesos de envejecimiento a los que el asfalto está sometido a lo largo de su vida, se han desarrollado métodos acelerados en laboratorio para simular estas condiciones y poder aceptar el uso de un determinado asfalto. Aunque existan una gran variedad de ensayos utilizados en todo el mundo, se

procederá describir las pruebas más conocidas y que son afines al presente trabajo investigativo.

2.2.3.1. Ensayo de película delgada en horno (TFOT)

En su forma original este ensayo fue introducido en el año 1940 para diferenciar y evaluar a los asfaltos por su viscosidad. Se colocaba el ligante en una capa de 3.2 mm y 140 mm de diámetro en un recipiente cilíndrico a 163°C durante 5 horas. Debido a su efectividad para simular el envejecimiento a corto plazo, fue adoptado por la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO) y la Asociación Americana de Ensayo de Materiales (ASTM) en 1959 y 1969 respectivamente (Bell et al., 1994).

El principal inconveniente de este ensayo es que ocurre una mayor pérdida de volátiles en la parte superficial de los platos y así como su tiempo de duración prolongado. Por esta razón se buscaron otras opciones de ensayos a partir del TFOT. En la Figura 7 se muestra el horno TFOT con sus componentes señaladas.

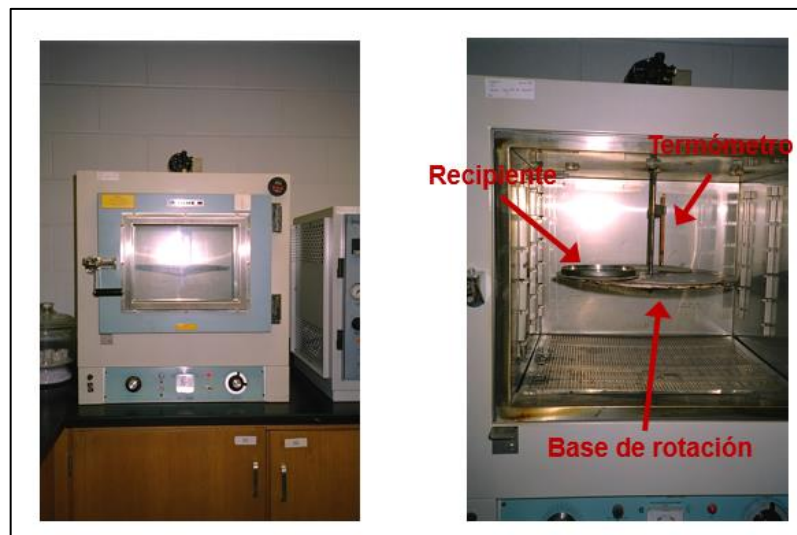


Figura 7. Horno TFOT.

Tomado de “Ligantes Bituminosos”, por F. Sánchez, 2016. Obtenido de <https://www.slideshare.net/castilloaroni/mdulo-8-ligantes-bituminosos-fernando-snchez-sabogal>.

2.2.3.2. Ensayo de película delgada rotatoria en horno (RTFOT)

Con esta prueba se simula el envejecimiento del ligante durante el mezclado con los agregados en planta, el transporte a obra, la extensión y la compactación, es decir, a corto plazo. Este procedimiento se encuentra descrito en la normativa ASTM D2872.

Para realizar este ensayo se debe colocar 35 gramos del ligante en un recipiente de cristal y a su vez dentro del horno a 163°C por 85 minutos. Dentro del horno, el recipiente gira alrededor de un eje que asegura la presencia de oxígeno. Una vez transcurrido el tiempo, a este asfalto se lo conoce como residuo del RTFOT al cual se le pueden realizar determinadas pruebas para clasificarlo por viscosidad y por grado de desempeño. Ver Figuras 8 y 9.



Figura 8. Horno para prueba RTFOT.
Vila, R. (2020) Material no publicado.



Figura 9. Botellas para pruebas antes y después de colocada la muestra.
Vila, R. (2020) Material no publicado.

2.2.3.3. Cámara de envejecimiento a presión (PAV)

Este ensayo está establecido en la normativa ASTM 6521 y pretende simular el envejecimiento que sufre el asfalto luego de 7 a 10 años, es decir a largo plazo. Para representar esta condición se somete al asfalto ya envejecido previamente en el horno de película delgada rotatoria RTFO a una presión y temperatura determinada según el clima donde se está trabajando.

Se coloca 50 gramos del ligante asfáltico por 20 horas en un plato de 14cm de diámetro a una temperatura usual de 90°C o 100°C con una presión de aire sintético de 2 MPa. Luego de este ensayo se le realizan las debidas pruebas para clasificar al asfalto según su grado de desempeño. Ver Figura 10.



Figura 10. Cámara de envejecimiento a presión.
Vila, R. (2020) Material no publicado.

2.2.3.4. Envejecimiento de mezclas asfálticas en caliente (AASHTO R30)

El procedimiento AASHTO R30 surgió pocos años después de finalizar el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras de los Estados Unidos (conocido como SHRP), en la década de los años noventa, donde el envejecimiento en laboratorio de las mezclas asfálticas también fue tratado. Antes que se realizara el estudio mencionado, solo existían procedimientos estandarizados para medir el envejecimiento en el asfalto en particular y no a la mezcla asfáltica como un conjunto.

Los procedimientos de laboratorio que se describen en la normativa consisten en colocar la mezcla asfáltica preparada primero en estado suelto y luego como briquetas compactadas (al nivel de compactación que se establezca) en un horno de convección a determinadas temperaturas y tiempos para simular el envejecimiento a corto y largo plazo. Concretamente el ensayo establece introducir el espécimen en el horno a $135\pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 4 horas para simular el envejecimiento a corto plazo. Por otro lado, para simular el envejecimiento a largo

plazo plantea someter al espécimen a una temperatura de $85\pm 3^{\circ}\text{C}$ por 120 ± 0.5 horas. A partir de este momento no se debe de tocar la mezcla hasta en unas 16 horas que toma en promedio volver a la temperatura ambiente.

En el presente trabajo investigativo se colocarán en el horno las briquetas elaboradas en planta a distintos tiempos y temperaturas para compararlas con núcleos extraídos de vías de la costa del país para determinar qué condiciones simulan realmente el envejecimiento en nuestro medio.

2.2.4. Estudios previos de envejecimiento de asfaltos y mezclas

Las primeras investigaciones consistieron en someter a la mezcla a algún tipo de tratamiento para su envejecimiento, principalmente térmico, luego medir su efecto mediante un parámetro mecánico o reológico, y finalmente comparar los resultados con muestras no envejecidas.

Pauls & Welborn (1952) expusieron cilindros de 50x50mm de una mezcla con arena de Ottawa a 163°C por varios periodos de tiempo. Luego se compararon los resultados de la resistencia a compresión y la consistencia del ligante recuperado. Los resultados indicaron que la prueba de TFOT puede ser usada para evaluar el envejecimiento, aunque no se determinó un valor para el largo plazo.

Hveem, Zube & Skog (1963) realizaron una prueba en la que sometió a la mezcla a radiación infrarroja a una temperatura de 60°C y una corriente de aire a 41°C a través del espécimen. Concluyeron que 1000 horas de exposición en estas condiciones equivaldrían a 5 años en el campo. Por otro lado Kemp & Predoehl (1981) usaron luz actínica (400-480nm) a una temperatura de 35°C por 18 horas, sin embargo notaron que solo se produjo endurecimiento en los 5 micrómetros más superficiales indiferentemente del grosor de la capa.

La mayoría de los ensayos realizados hasta esta fecha se los desarrollaron en la mezcla compacta. Von Quintus, Scherocman & Hughes (1989) sometieron a la mezcla suelta al horno a una temperatura de 135°C por 8, 16, 24 y 36 horas para simular un envejecimiento a corto plazo. Aunque se mostraron niveles de envejecimiento considerables, hubo una gran dispersión en los resultados.

Bell et al. (1994) en el marco del Programa Estratégico de Investigación de Carreteras de los Estados Unidos, o SHRP por sus siglas en inglés, condujo una investigación en la que se compararon briquetas extraídas de vías del país con briquetas de igual composición y envejecidas por procedimientos acelerados a corto y largo plazo. En cuanto al envejecimiento a corto plazo, se basaron en la metodología utilizada por Von Quintus, Scherocman y Hughes al envejecer la mezcla suelta. De este proyecto se concluyó principalmente que 4 horas a una temperatura de 135°C era representativo del envejecimiento a corto plazo y que 4 días a 100°C u 8 días a 85°C puede reproducir el envejecimiento a largo plazo.

Unos años más tardes después de esta investigación apareció el procedimiento de acondicionamiento de mezclas asfálticas en caliente AASHTO R30, el cual simula el envejecimiento a corto plazo calentando la mezcla a 135°C por 4 horas y el envejecimiento a largo plazo a 85°C por 120 horas.

En una investigación de Rolt (2000), se estudió el efecto del envejecimiento en campo. Para esto se construyeron 32 secciones de vías a escala real con parámetros variados como la temperatura a exposición, el grosor de capa, densidades y contenido de asfalto. Por otro lado, se obtuvieron núcleos de vías en servicio y se extrajo su asfalto para comparar y evaluar el efecto de cada variable. Se concluyó que los factores que más afectan al envejecimiento son el tiempo y la temperatura de exposición. Se determinó también que ciertos parámetros como el grosor de capa, la densidad del pavimento o el contenido de asfalto influyen poco en el proceso.

Según Airey (2003), en general las investigaciones realizadas respecto al envejecimiento se pueden dividir esencialmente en cuatro categorías y son:

- Procedimientos térmicos
- Pruebas de oxidación
- Tratamientos con radiación ultravioleta e infrarroja
- Endurecimiento estérico

Harrigan (2007) describe que en un estudio llevado por la Universidad Estatal de Arizona, se compararon briquetas envejecidas en laboratorio y núcleos extraídos de vías que contaban con 7 a 10 años en servicio. Los especímenes fueron elaborados en las mismas plantas de los núcleos extraídos y se les aplicó un envejecimiento a largo plazo de 120 horas a 80°C, 85°C y 90°C. El asfalto fue extraído de las mezclas y se les determinó la viscosidad mediante el reómetro de corte dinámico. Los resultados indicaron que la temperatura en el campo y el contenido de vacíos de aire son los parámetros que más envejecimiento generan en las mezclas. Más específicamente se determinó que el procedimiento AASHTO R30 produce un envejecimiento de más de 7 a 10 años cuando los contenidos de vacíos están por debajo del 8%, y simula un envejecimiento menor cuando supera el 8%.

Newcomb et al. (2015) presentó en el marco del Programa Nacional de Investigación Cooperativa de Carreteras (NCHRP) el reporte 815, en el que se evaluó el procedimiento de envejecimiento a corto plazo según AASHTO R30. Luego de todos los ensayos realizados, se propuso calentar a la mezcla suelta por dos horas a 135°C previo a su compactación. Esta temperatura se la fijó tanto para diseños volumétricos o para realizarle pruebas de desempeño.

Kim et al. (2018) señala en el reporte 871 del NCHRP las conclusiones de una investigación acerca del envejecimiento a largo plazo en la que buscó ser considerada para reemplazar el actual procedimiento AASHTO R30. En este proyecto se llegaron a establecer 4 puntos muy relevantes. En primer lugar, se afirmó que el uso de mezclas compactas de 100 mm de diámetro produce un gradiente de oxidación desde el centro hacia sus extremos. Esto provoca una falta de uniformidad que afecta a los ensayos posteriormente aplicados, siendo demostrado en pruebas cíclicas de fatiga. Este efecto de gradiente de oxidación

fue eliminado en gran parte mediante el uso de especímenes de 38 mm de diámetro y 100 mm de altura. Esto produce resultados más prometedores ya que no existen problemas con la integridad de la mezcla.

En segundo lugar, se propuso que el envejecimiento a largo plazo se lo aplique a la mezcla suelta ya que esto estimula la oxidación, agregando que el esfuerzo de compactación es comparable con el requerido por las mezclas envejecidas a corto plazo. En tercer lugar, se determinó que la temperatura óptima de envejecimiento a largo plazo es de 95°C ya que un aumento a 135°C puede implicar cambios en las relaciones de la reología y la química del asfalto, y por lo tanto en su cinética de oxidación. Y finalmente se concluyó la duración de este acondicionamiento debe ser elegida dependiendo del clima, el tiempo, el grosor de capa utilizando el índice de envejecimiento climático de los Estados Unidos.

Newcomb et al. (2019) presentó en el reporte NCHRP 919 los resultados de una verificación extendida en campo que propone cambios en el procedimiento de envejecimiento a largo plazo del AASHTO R30. Se trabajaron con vías de 8 estados de Estados Unidos y se estableció que para presentar los resultados de forma coherente fue fundamental separar los estados por climas cálidos y fríos, ya que al juntarlos la línea de tendencia poseía un coeficiente de determinación (R^2) muy bajo, lo que representa una alta variabilidad en los resultados. Aunque la magnitud del envejecimiento en los climas cálidos era mayor que en los fríos, la tasa de envejecimiento fue prácticamente la misma. La conclusión de esta investigación indica que el envejecimiento a largo plazo se lo debe realizar a la mezcla suelta a 85°C por 5 días

A continuación se presenta la Tabla 1, que resume algunas de las principales investigaciones acerca del envejecimiento de las mezclas asfálticas mencionadas.

Tabla 1. Principales investigaciones sobre el envejecimiento de las mezclas asfálticas

Referencia	Descubrimientos importantes
Pauls & Welborn 1952	La prueba TFOT simula correctamente el ECP
Hveem, Zube, & Skog, (1963)	Mezcla sometida a 1000h de exposición infrarroja a 60°C, equivaldría envejecimiento de 5 años en campo
Kemp and Predoehl 1981	Uso de luz actínica por 18h a 35°C produce un endurecimiento en los 5µm más superficiales
Von Quintus, Scherocman, & Hughes (1989)	Tratamiento térmico de la mezcla suelta produce un mayor envejecimiento
Bell et al. 1994	<ul style="list-style-type: none"> •ECP de 4h a 135°=envejecimiento en campo durante la construcción •En ELP de 4 días a 100°C u 8 días a 85°C
Rolt 2000	El contenido de asfalto, los vacíos de la mezcla y el contenido de filler no influyen mucho en el envejecimiento
Harrigan 2007	Contenido de vacíos y temperatura con los factores que más afectan el envejecimiento en campo
Newcomb et al. 2015	Propone cambiar ECP de AASHTO R30, de 4 a 2 horas a 135°C
Kim et al. 2018	<ul style="list-style-type: none"> •Ensayos realizados a briquetas envejecidas de 10mm de diámetro no reflejan el comportamiento real por la formación de un gradiente de oxidación •ELP se lo debe realizar a la mezcla suelta para estimular la oxidación •Temperatura óptima de ELP de 95°C •Duración de ELP en una zona debe ser escogida dependiendo de las condiciones del entorno
Newcomb et al. 2019	<ul style="list-style-type: none"> •Alta variabilidad en resultados de envejecimiento entre vías de climas cálidos y fríos •Tasa de envejecimiento entre estos dos tipos de climas no difiere mucho •Se propone cambiar ELP de AASHTO R30, calentando a la mezcla suelta en lugar de compacta

*ECP: envejecimiento a corto plazo

*ELP: envejecimiento a largo plazo

Capítulo III

3. Trabajo experimental

3.1. Precisiones sobre metodología empleada

El presente trabajo de titulación es parte de un proyecto de investigación del Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil (UCSG), el cual pretende evaluar el envejecimiento de las mezclas asfálticas en las distintas regiones del país. En este trabajo se estudió el fenómeno del envejecimiento en vías de la costa ecuatoriana, comparando núcleos extraídos y briquetas elaboradas en planta y envejecidas en laboratorio.

3.1.1. Núcleos extraídos en vías de la región costa

El Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil realizó la extracción de núcleos previo al inicio de este trabajo, en las vías que se mencionan a continuación:

- 1) Vía Puerto Inca- Naranjal, en la abscisa 31+000 con 0 años de colocación
- 2) Vía Milagro- Naranjito- Bucay en la abscisa 19+240 con 4 años de colocación
- 3) Vía Milagro- Naranjito- Bucay en la abscisa 33+240 con 8 años de colocación
- 4) Ampliación del paso por la ciudad de Durán (actual Avenida Lapentti) en la abscisa 1+400 con 15 años de colocación

En la Figura 11 se muestra en el mapa la ubicación de las vías de donde se extrajeron los núcleos, respetando la numeración previa indicada.

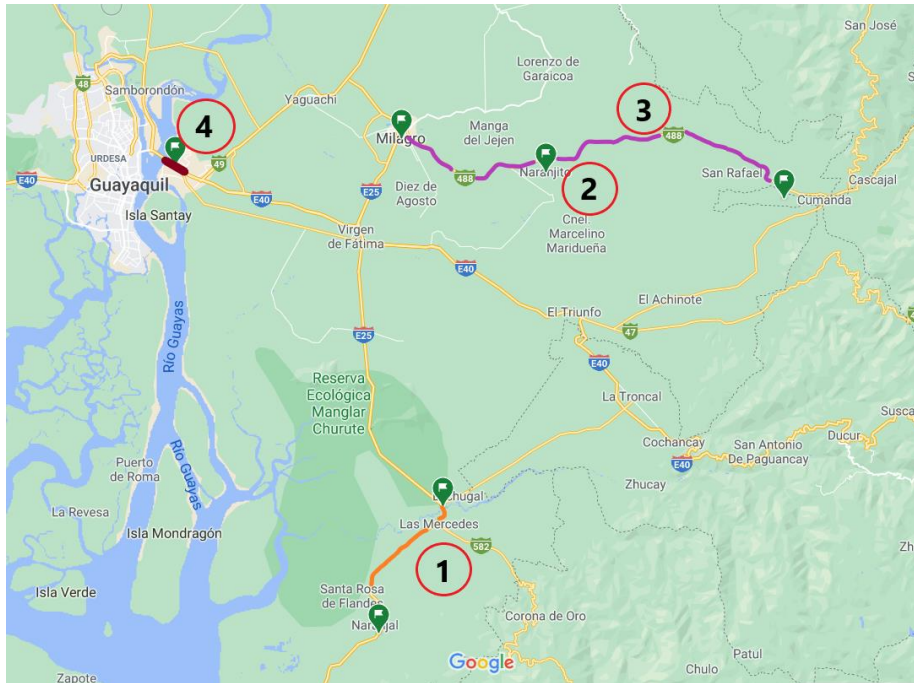


Figura 11. Ubicación de las vías de donde se extrajeron los núcleos.
Recuperado de: <https://www.google.com/maps/@-2.4200656,-79.6805645,10.83z>

En las Figuras 12 y 13 se muestra la extracción de los núcleos de las vías Milagro-Naranjito- Bucay con 8 años de colocación y avenida Lapentti con 15 años de colocación respectivamente.



Figura 12. Extracción de núcleos de la vía Milagro- Naranjito- Bucay con 8 años de colocación



Figura 13. Extracción de núcleos de la avenida Lapentti con 15 años de colocación

Cabe mencionar que todas las mezclas extraídas fueron producidas en su momento en la planta asfáltica del contratista H e H, ubicada en el campamento del km 26 de la vía Durán- El Triunfo. Todas las mezclas fueron producidas con una misma exigencia granulométrica y empleando materiales aluviales (cantos rodados) triturados con un mismo tipo de asfalto de producción nacional. Dicho contratista tiene bajo concesión las vías estudiadas con la empresa CONCEGUA. Por cada vía se extrajeron 3 núcleos para realizarle ciertas pruebas de desempeño que se detallan a continuación, además de otros núcleos para recuperación de asfaltos.

También se determinaron las propiedades volumétricas de estos núcleos, es decir, la gravedad específica bruta (Gmb), la gravedad específica máxima (Gmm) y el porcentaje de vacíos con aire en la mezcla compactada (Pa), que permiten evaluar la uniformidad de la mezcla producida y la efectividad de la compactación.

3.1.2. Briquetas envejecidas en laboratorio

Por otro lado, para el caso de las briquetas, se confeccionaron con una compactación al 97 y 100% de su densidad relativa, para lo cual se tuvo que determinar previamente que el 97% de la densidad relativa (DR) se obtenía aplicando 40 golpes/cara y el 100% de la densidad relativa aplicando 75 golpes/cara (suponiendo tráfico pesado).

Es importante señalar que todas las briquetas se las fabricaron también en la planta del contratista H e H , ubicada en el campamento del km 26 de la vía Durán- El Triunfo, con el mismo tipo de agregado y asfalto, lo cual favorece al análisis comparativo.

Para considerar el envejecimiento a corto plazo se colocó la mezcla suelta en una bandeja dentro de un horno de convección durante 4 horas a una temperatura de 135°C, como se establece en el procedimiento AASHTO R 30.

Para el envejecimiento a largo plazo se partió también de esta normativa, es decir, envejecer las briquetas ya confeccionadas en el horno de convección a 85°C por 120 horas (5 días), pero para poder contrastar de mejor forma los resultados de los núcleos de vías con este envejecimiento a briquetas, se decidió aplicar el envejecimiento en las mismas briquetas durante los siguientes tiempos: 0, 2.5 ,5 ,7.5 y 10 días.

Se determinó el módulo de rigidez de las briquetas envejecidas en laboratorio para los tiempo mencionados, lo que permite obtener gráficas que relacionan la rigidez con el tiempo. De la misma forma, se les realizaron pruebas de fatiga bajo esfuerzo controlado a las briquetas con 97% de densidad relativa. Finalmente se compararon los resultados de los núcleos extraídos de las vías y las briquetas envejecidas en laboratorio, para determinar el punto en el que el valor de su rigidez coincide. Por lo tanto se podría decir que el valor de horas correspondiente a ese punto es el que realmente simula una cantidad determinada de años de colocación en el sitio.

A continuación, en la Figura 14, se muestra el diagrama de flujo de cada tarea realizada para este trabajo.

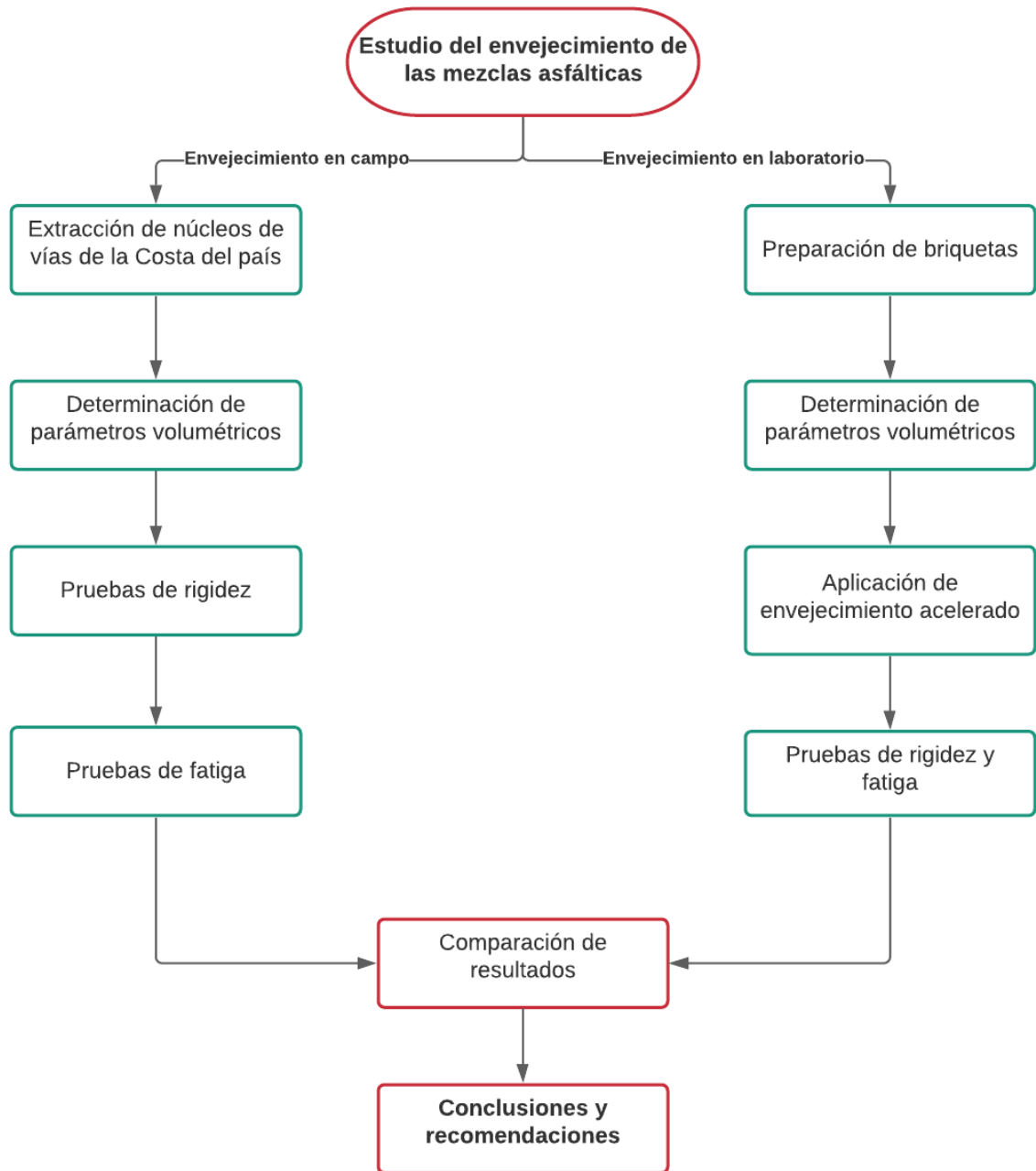


Figura 14. Flujograma de trabajo

3.2. Evaluación del envejecimiento en laboratorio

3.2.1. Módulo de rigidez

El módulo de rigidez es un parámetro de gran utilidad para caracterizar a la mezcla ya que brinda una guía del comportamiento relativo de la misma. Según Newcomb (2015) la prueba de módulo de rigidez es efectiva para evaluar los efectos del envejecimiento ya que las propiedades del ligante gobiernan el módulo y porque se la puede usar para establecer comparaciones directas entre núcleos extraídos de vías y briquetas elaboradas en laboratorio.

En el presente trabajo, el módulo de rigidez se lo obtuvo utilizando la Norma Europea EN 12697-26, en la cual en su Apéndice C describe el procedimiento del módulo de rigidez aplicando tensión indirecta a especímenes cilíndricos. Para relizar este ensayo se utilizó el Nottingham Asphalt Mix Tester, conocido por sus siglas en inglés como NAT. Ver Figura 15



Figura 15. Nottingham Asphalt Mix Tester.
Vila, R. (2020) Material no publicado.

El ensayo consiste en la aplicación de pulsos de carga senoidales de 0,12 segundos hasta llegar a una carga que provoque una deformación horizontal transitoria de 0,005% del diámetro del espécimen, que es medido mediante dos transductores diferenciales lineales variables, LVDTs por sus siglas en inglés (The British Standards Institute, 2012). Se aplican pulsos de carga y se calcula el módulo con la siguiente fórmula:

$$E = \frac{F \times (v + 0,27)}{(z \times h)}$$

Donde:

E: módulo de rigidez (MPa)

F: valor máximo de la carga aplicada (N)

z: amplitud de la deformación horizontal (mm)

h: espesor del espécimen (mm)

v: razón de Poisson

3.2.2. Prueba de fatiga con el Nottingham Asphalt Tester (NAT)

La falla por fatiga se debe a la aplicación repetitiva de esfuerzos y deformaciones por tensión. Existe un considerable número de formas de realizar ensayos de fatigas y en el presente trabajo se utilizó el equipo NAT empleando el procedimiento de prueba mediante tracción indirecta, es decir, se aplica una fuerza de compresión a lo largo del diámetro del espécimen cilíndrico en posición vertical, la cual se traduce en una tracción “indirecta” a lo largo del diámetro horizontal.

Con el equipo NAT se realiza una prueba de fatiga a esfuerzo controlado, esto es, que la magnitud de esfuerzo aplicado se mantiene hasta que el espécimen

falle o alcance un nivel de deformación de 5mm. Con el NAT, este ensayo se realizó a núcleos con 100mm de diámetro y es recomendable que tenga un espesor de 40mm para que tenga una buena distribución de esfuerzos. La prueba se realiza usualmente a 20°C (Cooper Research Technology Limited, 2002).

Se debe ajustar el rango de esfuerzos que se les aplicará a las probetas. De esta forma, para cada nivel de esfuerzo seleccionado se determinará previamente el módulo de rigidez bajo ese mismo nivel de esfuerzo, información que permitirá determinar la deformación unitaria inicial (como lo muestra la siguiente ecuación), y luego en la prueba de fatiga para cada esfuerzo se determinará el número de aplicaciones de cargas para el fallo. Con los valores de deformación unitaria y repeticiones para el fallo se pueden confeccionar los conocidos gráficos de fatiga. Ver Figura 16.

$$\varepsilon = \frac{\sigma(1 + 3\mu)}{S_m}$$

Donde:

ε : deformación unitaria inicial

σ : esfuerzo aplicado (kPa)

S_m : módulo de rigidez (kPa)

μ : coeficiente de Poisson (se asume 0,35)

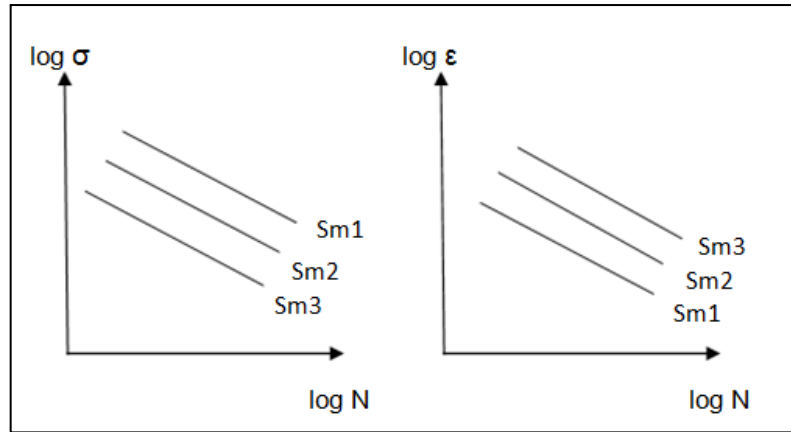


Figura 16. Gráficas de pruebas de fatiga para $S_{m1} > S_{m2} > S_{m3}$.

Tomado de "Estudios y propuestas sobre la calidad de los asfaltos y las mezclas asfálticas en Ecuador", por R. Vila, 2017, Guayaquil, Ecuador.

Para realizar este ensayo se consideró el procedimiento recomendado por el fabricante del equipo, Cooper Technology, que coincide parcialmente con el criterio de la normativa europea.

3.3. Resultados obtenidos

3.3.1. Pruebas realizadas a los núcleos

A continuación se presentarán en las tablas 2, 3, 4 y 5 así como en las figuras 17, 18, 19 y 20, los resultados obtenidos de los parámetros volumétricos, módulo de rigidez y pruebas de fatiga realizadas a los núcleos extraídos. Cabe indicar que para cada vía se ensayaron 3 núcleos y se trabajó con los resultados promedios.

Tabla 2. Resultados de vía Puerto Inca - Naranjal con 0 años

Vía	Km 26 - Puerto Inca - Naranjal
Tiempo de colocación	0 Años
Abscisa	31+000

NÚCLEOS	1	2	3	Promedio
Parámetros Volumétricos:				
Gmm (Rice)				2.536
Peso muestra en aire, gr.	1213.8	1272.6	1208.5	
Peso muestra en agua, gr.	700.6	739.9	696.6	
Peso s.s. s. en aire, gr.	1216.6	1275.3	1209.8	
Volumen (cm ³)	516.0	535.4	513.2	
Gmb	2.352	2.377	2.355	2.361
Vacíos en la mezcla (%)	7.24	6.27	7.14	6.89
Módulo de rigidez en NAT				
Módulo en A-A' (MPa)	2582	2561	2653	
Módulo en B-B' (MPa)	2765	2558	2802	
Módulo final (MPa)	2674	2560	2728	2654
(*) Módulo bajo deformación controlada.				
Prueba de fatiga en NAT				
Coefficiente de Poisson				0.35
Esfuerzo aplicado (kPa)	250	300	400	
Módulo de rigidez (**) (MPa)	2083	2018	1629	
Repeticiones para el fallo	6391	1851	511	
Deformación (µm/m)	246	305	503	
(**) Módulo bajo esfuerzo controlado.				

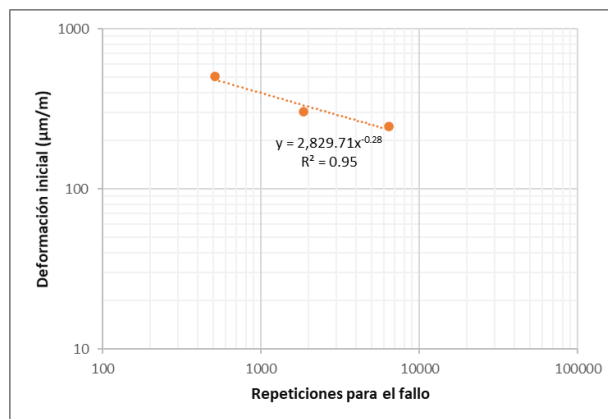


Figura 17. Gráfico de fatiga de núcleos con 0 años

Tabla 3. Resultados de vía Milagro- Naranjito- Bucay con 4 años

Vía	Milagro- Naranjito - Bucay
Tiempo de colocación	4 años
Abscisa	19+240

NÚCLEOS	1	2	3	Promedio
Parámetros Volumétricos:				
Gmm (Rice)				2.543
Peso muestra en aire, gr.	834.2	867.3	676.0	
Peso muestra en agua, gr.	483.6	499.6	387.9	
Peso s.s. s. en aire, gr.	834.7	867.9	676.3	
Volumen (cm3)	351.1	368.3	288.4	
Gmb	2.376	2.355	2.344	2.358
Vacíos en la mezcla (%)	6.31	7.14	7.57	7.01
Módulo de rigidez en NAT				
Módulo en A-A' (MPa)	7520	7317	6243	
Módulo en B-B' (MPa)	7340	7803	6050	
Módulo final (MPa)	7430	7560	6147	7046
(*) Módulo bajo deformación controlada.				
Prueba de fatiga en NAT				
Coefficiente de Poisson				0.35
Esfuerzo aplicado (kPa)	350	400	450	
Módulo de rigidez (**) (MPa)	8065	7862	7581	
Repeticiones para el fallo	29911	11041	5051	
Deformación (µm/m)	89	104	122	
(**) Módulo bajo esfuerzo controlado.				

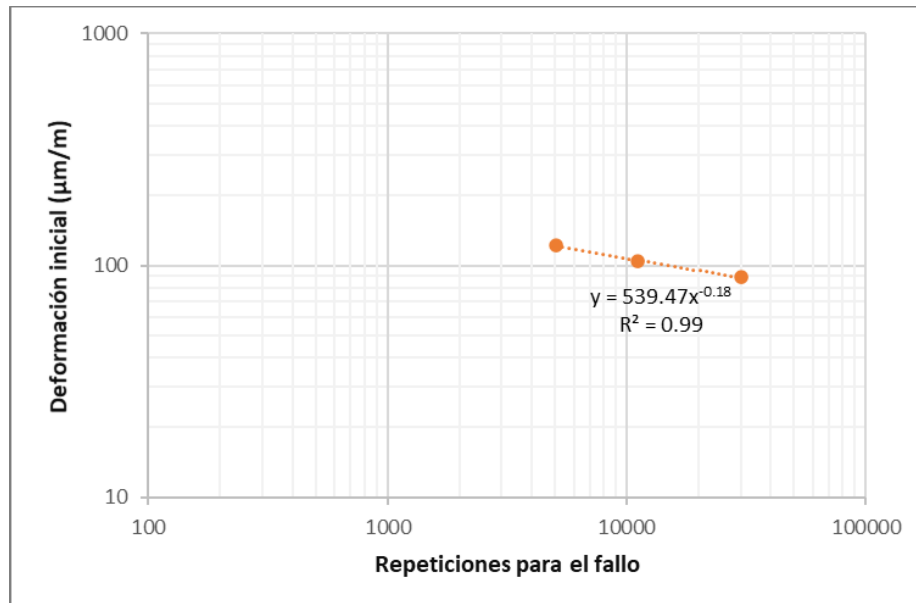


Figura 18. Gráfico de fatiga de núcleos con 4 años

Tabla 4. Resultados de vía Milagro- Naranjito- Bucay con 8 años

Vía	Milagro- Naranjito - Bucay
Tiempo de colocación	8 años
Abscisa	33+240

NÚCLEOS	1	2	3	Promedio
Parámetros Volumétricos:				
Gmm (Rice)				2.538
Peso muestra en aire, gr.	696.0	647.3	621.2	
Peso muestra en agua, gr.	396.4	368.7	357.4	
Peso s.s. s. en aire, gr.	696.9	644.8	622.0	
Volumen (cm3)	300.5	276.1	264.6	
Gmb	2.316	2.344	2.348	2.336
Vacíos en la mezcla (%)	8.67	7.55	7.43	7.88
Módulo de rigidez en NAT				
Módulo en A-A' (MPa)	5020	8785	8591	
Módulo en B-B' (MPa)	4256	7874	8512	
Módulo final (MPa)	4638	8330	8552	8441
(*) Módulo bajo deformación controlada.	Desechados			
Prueba de fatiga en NAT				
Coefficiente de Poisson				0.35
Esfuerzo aplicado (kPa)		400	450	
Módulo de rigidez (**) (MPa)		7683	6750	
Repeticiones para el fallo		8111	2200	
Deformación (µm/m)		107	137	
(**) Módulo bajo esfuerzo controlado.				

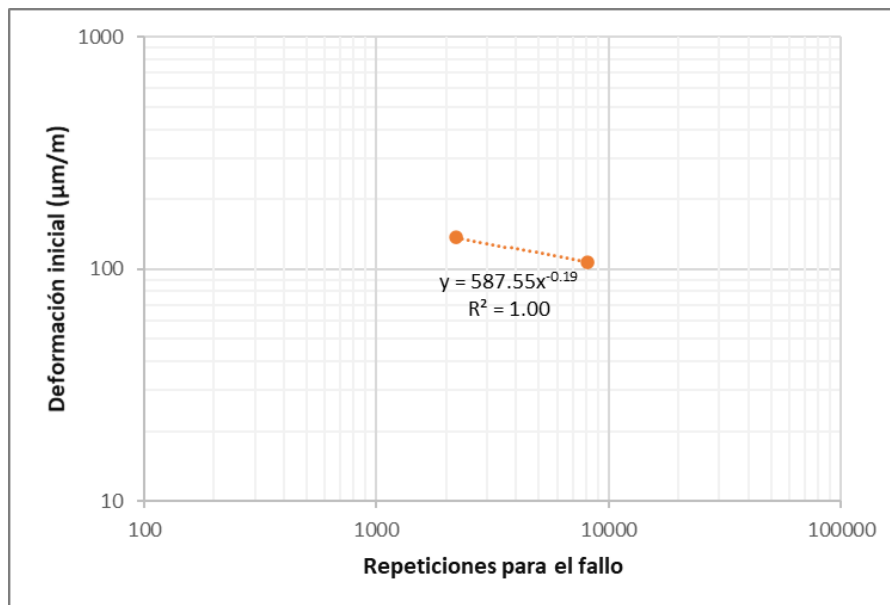


Figura 19. Gráfico de fatiga de núcleos con 8 años

Tabla 5. Resultados de vía ampliación por paso de Durán

Vía	Ampliación paso por Durán
Tiempo de colocación	15 años
Abscisa	1+400

NÚCLEOS	1	2	3	Promedio
Parámetros Volumétricos:				
Gmm (Rice)				2.577
Peso muestra en aire, gr.	852.5	695.6	777.1	
Peso muestra en agua, gr.	497.1	408.5	455.5	
Peso s.s. s. en aire, gr.	853.0	696.1	777.6	
Volumen (cm ³)	355.9	287.6	322.1	
Gmb	2.395	2.419	2.413	2.409
Vacíos en la mezcla (%)	5.55	4.63	4.87	5.01
Módulo de rigidez en NAT				
Módulo en A-A' (MPa)	9824	8989	10868	
Módulo en B-B' (MPa)	10797	8194	10719	
Módulo final (MPa)	10311	8592	10794	9899
(*) Módulo bajo deformación controlada.				
Prueba de fatiga en NAT				
Coefficiente de Poisson				0.35
Esfuerzo aplicado (kPa)	300	400	450	
Módulo de rigidez (**) (MPa)	10895	9946	9642	
Repeticiones para el fallo	105287	86751	11351	
Deformación (µm/m)	56	82	96	
(**) Módulo bajo esfuerzo controlado.				

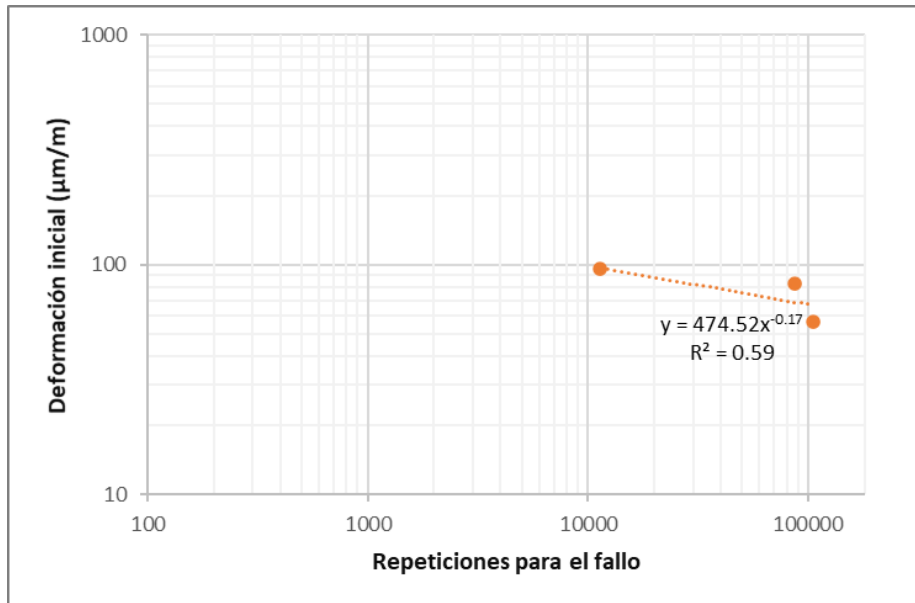


Figura 20. Gráfico de fatiga de núcleos con 15 años

3.3.2. Análisis de los resultados de los núcleos

Con los valores promedios de los módulos de las tablas anteriores, se procedió a graficar una curva que relaciona los módulos de rigidez con el tiempo en campo, como se muestra en la Figura 21.

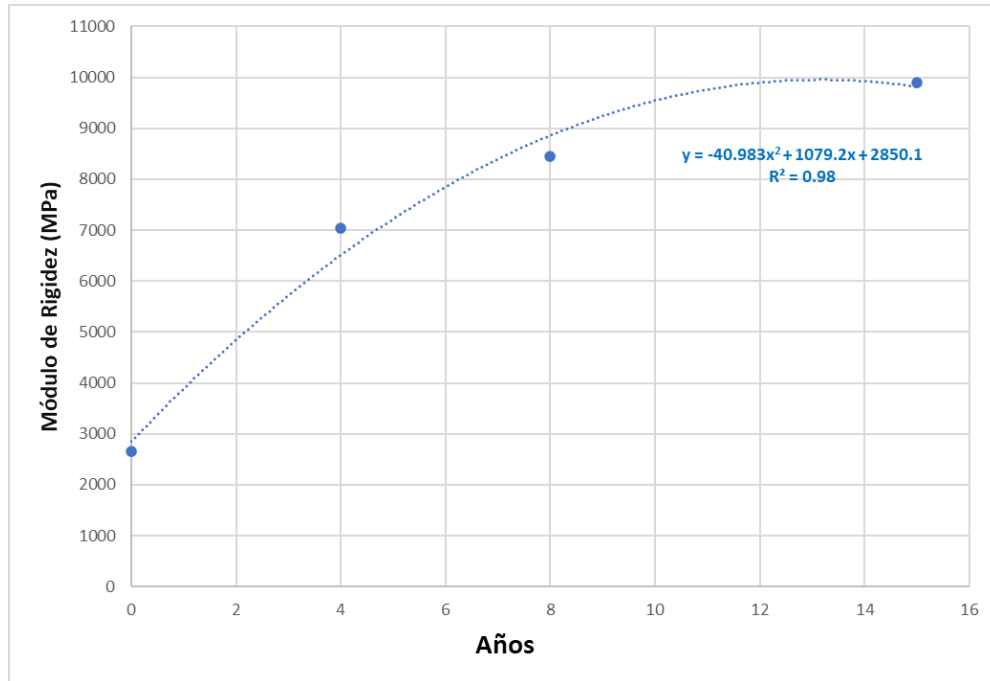


Figura 21. Curva de módulo de rigidez versus tiempo de colocación

La línea de tendencia más adecuada obtenida para los puntos graficados corresponde a un polinomio de segundo grado con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.98, lo cual indica un excelente ajuste de la variable que se pretende describir.

Desde el año 0 hasta el año 15, el módulo de rigidez aumentó en 7245 MPa. A partir de realizar cálculos muy simples, puede determinarse que en los primeros 4 años la mezcla se rigidizó aproximadamente el 60% del valor total, mientras que en los 11 años posteriores se rigidizó el 40%. Estos resultados concuerdan con las tendencias clásicas correspondientes al envejecimiento de los asfaltos en pavimentos flexibles, que son determinantes en el comportamiento de la mezcla en obra.

Por otro lado, en la Figura 22 se agruparon todos los gráficos de fatiga de los núcleos, que relacionan deformación inicial con las repeticiones para el fallo. Mediante al gráfico de una línea potencial de tendencia se obtuvieron sus respectivas ecuaciones y sus coeficientes de determinación.

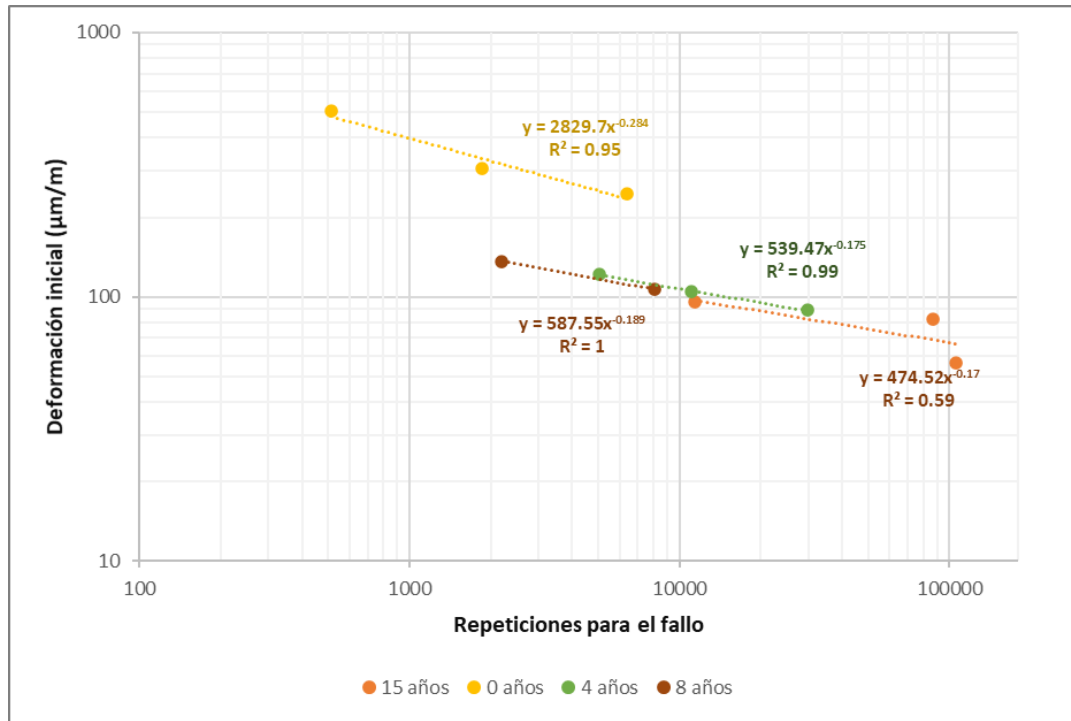


Figura 22. Fatiga de núcleos envejecidos en campo

Analizando la Figura 22 se puede observar de manera muy llamativa que las líneas de fatiga correspondientes a 4, 8 y 15 años son muy aproximadas y generarían un comportamiento mucho más desfavorable que para la mezcla recién colocada (0 años). Nótese que, para cualquier deformación unitaria, las repeticiones necesarias para el fallo serían mucho menores en esas mezclas envejecidas que en la recién colocada. A manera de ejemplo: en un pavimento flexible convencional los niveles de deformación usuales están en el orden de 200 a 400 microstrain. Por otra parte, las repeticiones obtenidas en dichos gráficos directamente en el laboratorio deben ser relacionadas con su desempeño en obra empleando un factor de ajuste (Shift Factor).

Si se relacionan los resultados antes comentados con la Figura 21, se aprecia que para módulos de rigidez por encima de 6500 MPa correspondientes a 4 años (por la curva de ajuste), el comportamiento a la fatiga estará en condiciones de peligro.

3.3.3. Pruebas realizadas a las briquetas envejecidas

A continuación, en las Tablas 6, 7 y 8 se presentan los resultados tabulados de los parámetros volumétricos, módulo de rigidez y pruebas de fatiga realizadas a las briquetas elaboradas en planta y envejecidas en laboratorio. Cabe indicar que las briquetas se las dividieron en 2 grupos: el primero compactadas al 97% de su densidad relativa (con un Pa promedio de 7.0%) y el segundo compactadas al 100% de su densidad relativa (con un Pa promedio de 3.8%).

Este último grupo se lo realizó para establecer comparaciones entre las mismas briquetas envejecidas en laboratorio, y no para compararlo con los núcleos extraídos de las vías, ya que la densidad relativa (DR) de estos últimos rara vez alcanza el 100% y mayormente está entre 97 y 98%.

Tabla 6. Pruebas de módulo de rigidez realizadas a briquetas con DR 97%

Densidad relativa	97%
Densidad máxima teórica (Gmm)	2.498
Densidad Bulk promedio (Gmb)	2.324
Vacíos con aire (Pa)	6.98%

TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO \ BRIQUETA	BRIQUETA			
	1	2	3	Promedio
0 días	2775	2769	2401	2648 MPa
2,5 días	4835	4874	4523	4744 MPa
5 días	5534	5524	5216	5425 MPa
7,5 días	6441	6131	6083	6218 MPa
10 días	7472	7213	6658	7114 MPa

Tabla 7. Pruebas de fatiga realizada a briquetas con DR 97%

Densidad relativa	97%
Densidad máxima teórica (Gmm)	2.498
Densidad Bulk promedio (Gmb)	2.324
Vacíos con aire promedio (Pa)	6.98%
Coefficiente de Poisson	0.35

BRIQUETA	1	2	3
Prueba de fatiga. 0 día			
Esfuerzo aplicado (kPa)	250	300	400
Módulo de rigidez (**) (MPa)	1725	1319	1385
Repeticiones para el fallo	3161	621	371
Deformación (μm/m)	297	466	592
Prueba de fatiga. 10 días			
Esfuerzo aplicado (kPa)	350	400	450
Módulo de rigidez (**) (MPa)	6244	4995	4732
Repeticiones para el fallo	17941	4432	2984
Deformación (μm/m)	115	164	195

Tabla 8. Pruebas de módulo de rigidez realizadas a briquetas con DR 100%

Densidad relativa	100%	Coefficiente de Poisson	0.35
Densidad máxima teórica (Gmm)	2.498		
Densidad Bulk promedio (Gmb)	2.402		
Vacíos con aire (Pa)	3.84%		

TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO \ BRIQUETAS	1	2	3	Promedio
	0 días	3856	3978	4026
2,5 días	5188	5473	5480	5380 MPa
5 días	5295	5570	5524	5463 MPa
7,5 días	5621	5707	6195	5841 MPa
10 días	5844	5916	6219	5993 MPa

3.3.4. Análisis de los resultados de las briquetas

En las Figuras 23 y 24 se muestran los gráficos que relacionan los módulos de rigidez con los días de envejecimiento térmico a 85° C para las briquetas con 97% y 100% de densidad relativa respectivamente.

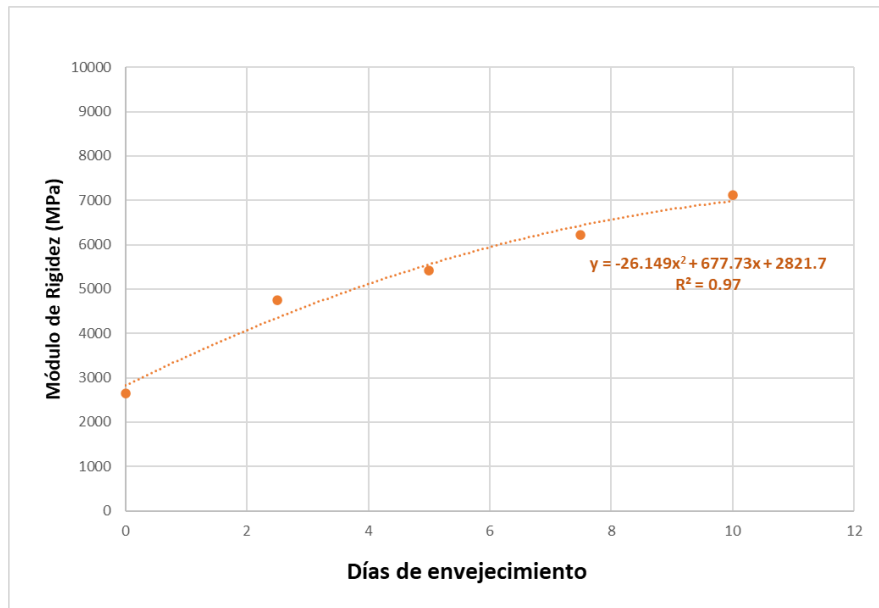


Figura 23. Módulo de rigidez versus días de envejecimiento para DR 97%

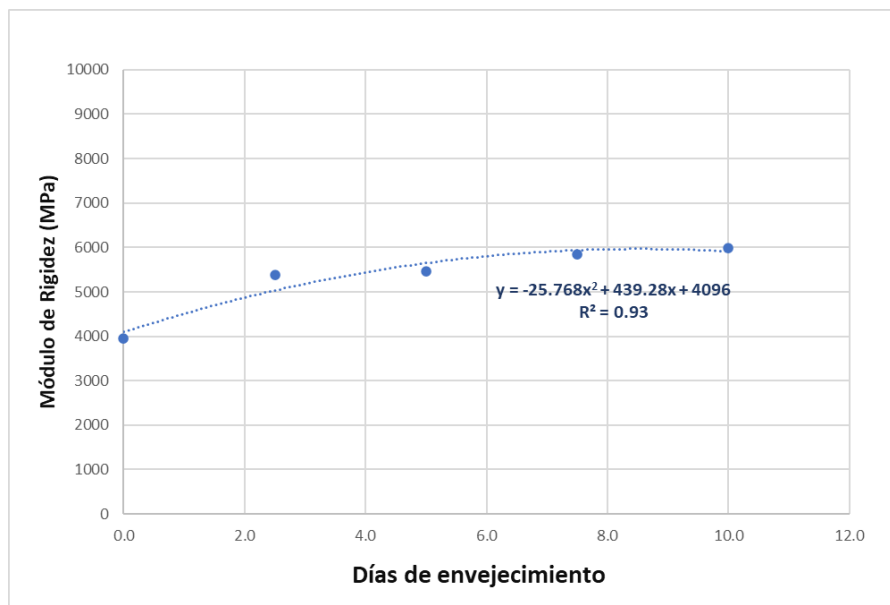


Figura 24. Módulo de rigidez versus días de envejecimiento para DR 100 %

En la Figura 23 se puede apreciar que existe un aumento de rigidez en la mezcla en la medida que aumentan los días de envejecimiento, que se ajusta de manera muy adecuada con un polinomio de segundo grado. En general, el módulo varió de 2648 a 7114 MPa, con un incremento de 4466 MPa. En los primeros 5 días de envejecimiento, las briquetas se rigidizaron en 2777 MPa, es decir un 62% del aumento total de rigidez.

En la Figura 24 se observa un comportamiento con la misma tendencia pero menos agresivo, variando el módulo de 3953 a 5993 MPa, con un incremento de apenas 2039 MPa. Esto se puede explicar debido al grado de compactación (100% de su densidad relativa), ya que menos parte de la mezcla estará en contacto con el aire que circula (Harrigan, 2007). Sin embargo, para situaciones prácticas no resulta eficaz.

Por otro lado, se muestra en la Figura 25 los resultados de las pruebas de fatiga para 0 y 10 días de envejecimiento de las briquetas compactadas al 97% de su densidad relativa.

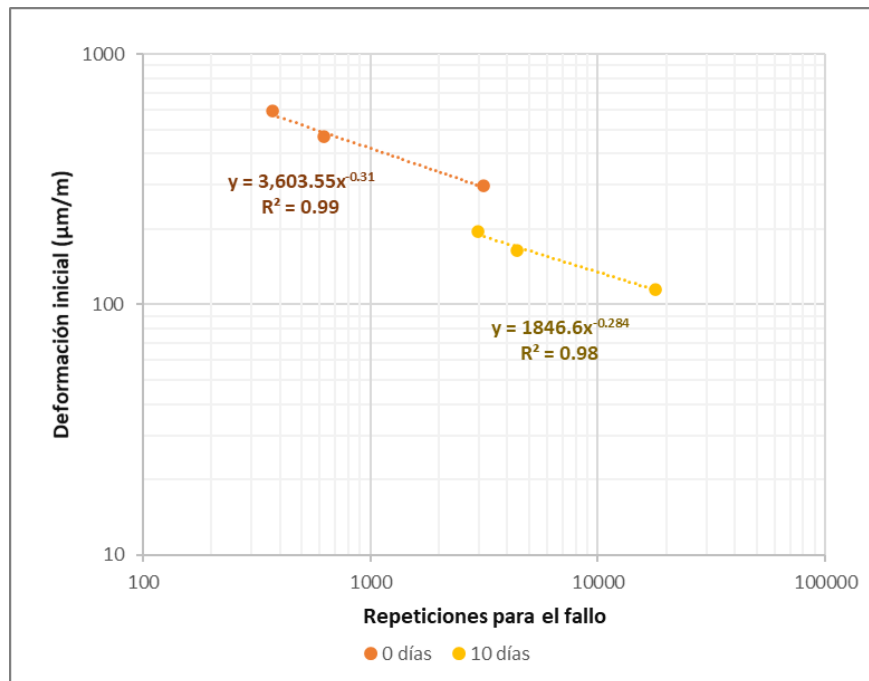


Figura 25. Fatiga de briquetas envejecidas en laboratorio para DR 97%

En la Figura 25 se puede observar claramente la rigidización de las briquetas envejecidas aceleradamente por 10 días. Las deformaciones que se encontraban en el rango de 300 a 500 microstrain, pasaron al rango de 100 a 200 microstrain, lo cual indica claramente una pérdida de ductilidad.

3.3.4.1. Comparación entre briquetas compactadas al 97 y 100% de su densidad relativa

En la Figura 26 se muestra una comparación del efecto en el módulo de rigidez del envejecimiento generado en estos dos tipos de mezclas debido al cambio en su DR (97 y 100%) y por ende en los Pa.

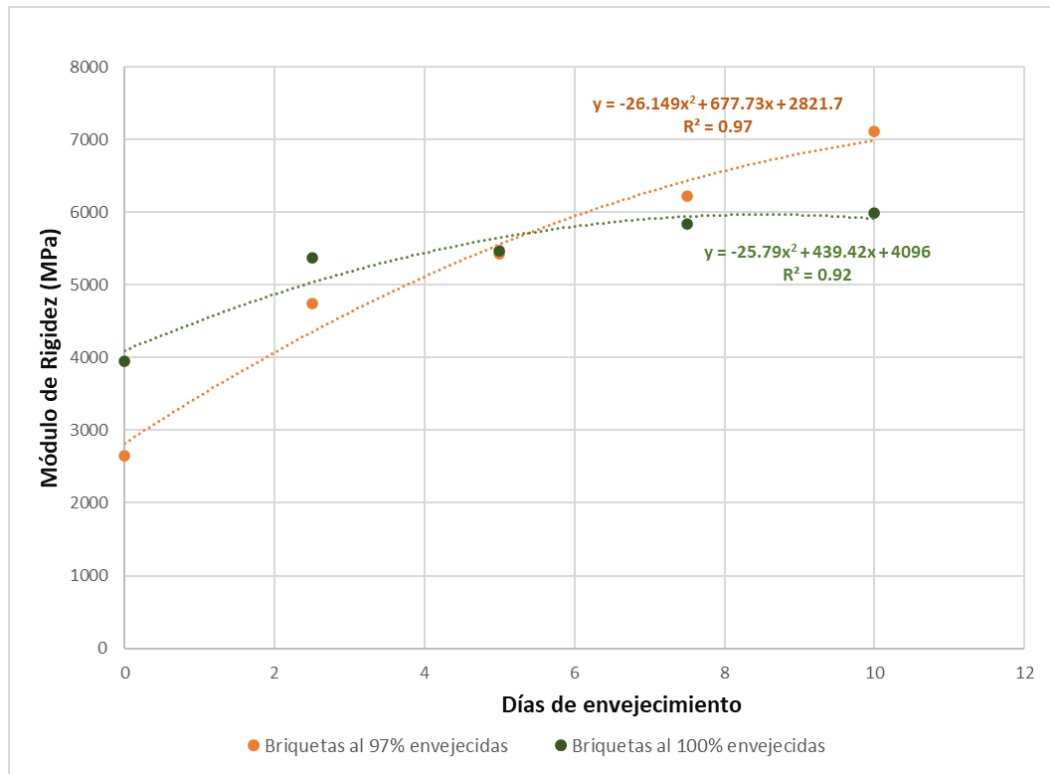


Figura 26. Comparación del envejecimiento de briquetas al 97% y 100% de la densidad relativa

Inicialmente las briquetas al 100% de su densidad relativa tienen mayor rigidez debido a intensidad a la que fueron compactadas y por lo tanto poseen una mayor

resistencia a la deformación. A los 5.4 días las curvas se intersecan y las briquetas al 97% de su densidad relativa empiezan a tener mayor rigidez. Esto último se puede explicar ya que al tener un porcentaje de vacíos mayor, las oxidación es más agresiva y por lo tanto hace que la mezcla se endurezca.

3.3.5. Comparación entre núcleos y briquetas

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo principal el establecimiento de comparaciones entre de mezclas envejecidas en campo y briquetas de similar composición envejecidas en laboratorio, mediante la evaluación de su rigidez. En la Figura 27 se muestran las dos curvas de envejecimiento de los dos escenarios mencionados. Es necesario señalar que la escalas de tiempo en el eje x, que corresponden a cada tipo de envejecimiento son notablemente distintas. Para favorecer el análisis visual, se han colocado las dos curvas en un mismo gráfico, aunque se debe respetar la correspondencia entre las curvas y las escalas de tiempo mediante su color asignado.

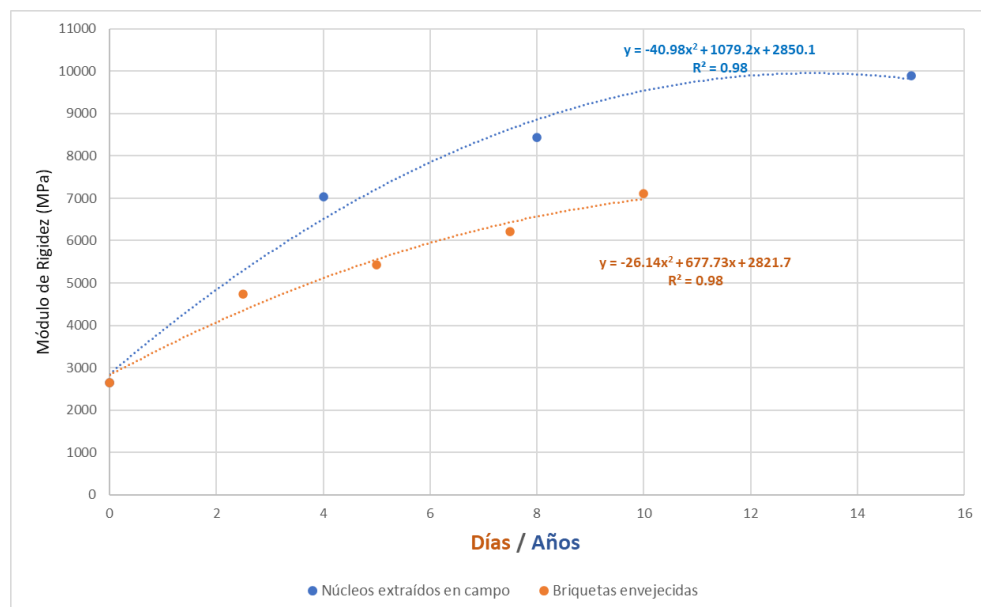


Figura 27. Comparación de módulos de rigidez de núcleos y briquetas envejecidas con DR 97%

Una de las primeras conclusiones que se pueden realizar de la Figura 27 es el punto de inicio y fin de cada curva. Como se tratan de mezclas de similar composición, en el tiempo 0, ambas poseen un valor similar de rigidez. Por otro lado, con un envejecimiento térmico acelerado a largo plazo de 10 días a 85°C, el valor máximo de rigidez de las briquetas alcanza un valor de 6980 MPa, mientras que los núcleos, luego de 15 años de envejecimiento en campo poseen un módulo de rigidez de 9817MPa. Estos resultados llaman la atención ya que la normativa AASHTO R30, con tan solo 5 días del mismo envejecimiento térmico, pretende simular de 7 a 10 años de envejecimiento en campo (AASHTO, R. 30-02, 2010).

También se puede notar que la razón de cambio del envejecimiento en laboratorio con respecto al tiempo tiene un patrón más lineal que el envejecimiento que se da en campo. Realizando los respectivos cálculos con las ecuaciones de las curvas de ajuste se pueden establecer las siguientes correlaciones para los módulos entre el envejecimiento de briquetas en el laboratorio, según el procedimiento empleado, y los núcleos extraídos, considerando un mismo tipo de mezcla:

- 2.5 días de envejecimiento equivalen 1.5 años en campo
- 5 días de envejecimiento equivalen 2.8 años en campo
- 7.5 días de envejecimiento equivalen 3.9 años en campo
- 10 días de envejecimiento equivalen 4.7 años en campo

Empleando de manera adecuada las ecuaciones, se puede obtener un gráfico que relacione directamente los días de envejecimiento acelerado a 85°C con los años de colocación en las vías, como lo muestra la Figura 28.

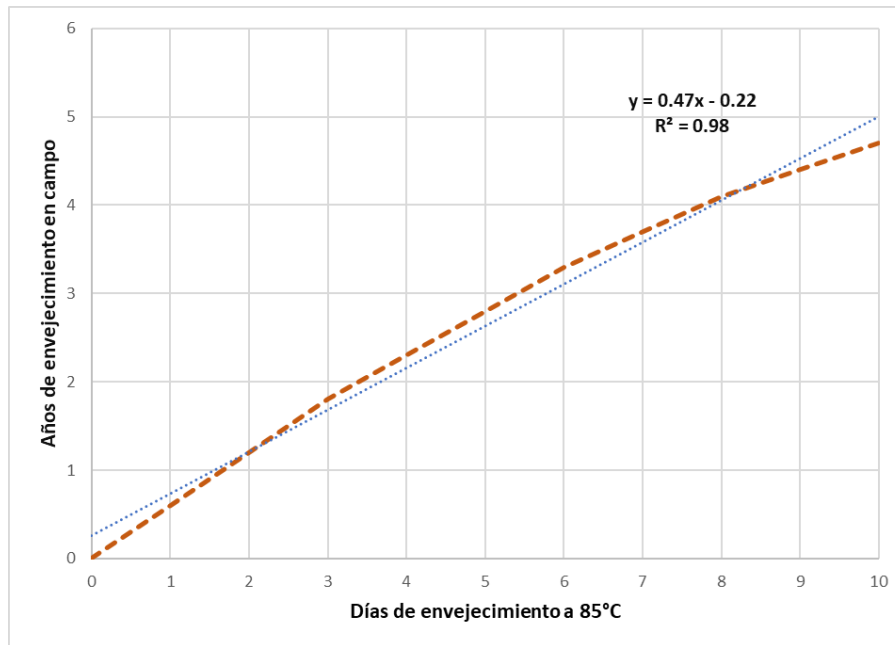


Figura 28. Días de envejecimiento versus años de envejecimiento en campo

El gráfico de la Figura 28 se asemeja a una recta con una pendiente promedio de 0.47. Esto quiere decir que cada día de envejecimiento simula un envejecimiento de 0.47 años (casi 6 meses). Cabe señalar que esta conclusión es válida para el rango de valores con los que se ha trabajado.

Por último se puede inferir que para la región costa del Ecuador, el tratamiento térmico de las mezclas compactadas podría ser ineficiente, ya que se necesitan 10 días de calentamiento para apenas provocar una rigidización de la mezcla de 4.7 años. Esto podría indicar además, que existe otra variable que no se está incluyendo en el envejecimiento, como la radiación UV, que si nos impacta seriamente en nuestras vías.

Por otro lado, en la Figura 29, se muestran los gráficos de fatiga tanto de los núcleos extraídos como de las briquetas envejecidas. Es importante señalar que aquellas líneas que tiene una etiqueta de año se refieren al tiempo de colocación de las vías de donde se extrajeron los núcleos, mientras que las líneas que tienen una etiqueta de días se refieren a las briquetas que han sido envejecidas en laboratorio

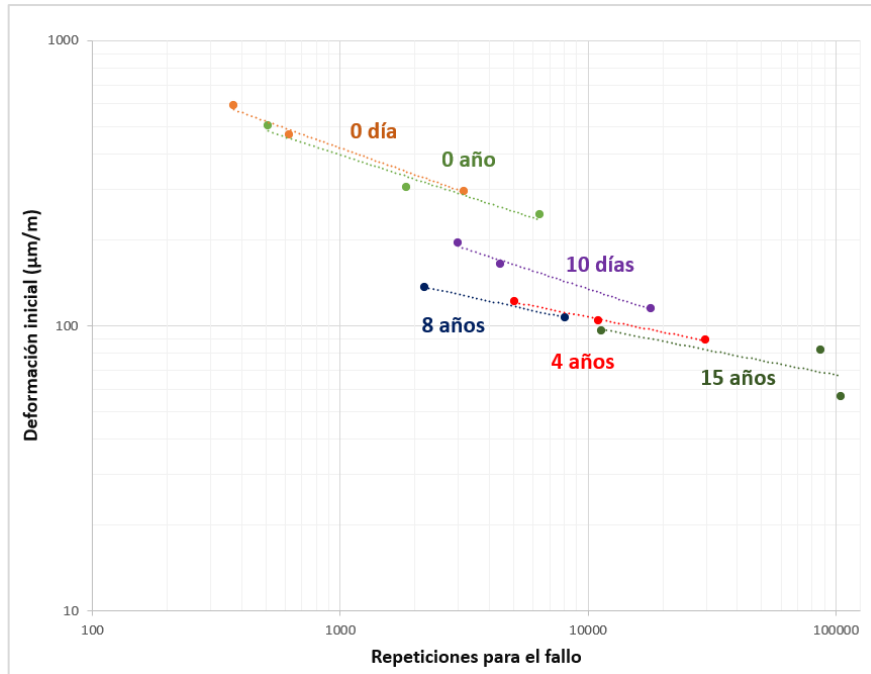


Figura 29. Comparación de pruebas de fatiga entre núcleos extraídos y briquetas envejecidas en laboratorio, ambas con DR 97%

Como se puede apreciar en la Figura 29, los pruebas de fatiga para 0 día y 0 año originan comportamientos similares. Sin embargo, la línea de fatiga para 10 días de envejecimiento acelerado no alcanza las correspondientes a 4, 8 ni 15 años, las cuales son muy parecidas entre sí; esto quiere decir que no se llega a tener un comportamiento tan crítico. Esto subraya nuevamente las diferencias entre el envejecimiento puramente térmico y el que ocurre en el medio ambiente de la región en cuestión.

3.3.6. Comparación de módulos de rigidez en briquetas envejecidas confeccionadas con distintas mezclas y DR 97%

En general, el presente trabajo de investigación se ha desarrollado empleando un único tipo de mezcla, la cual utiliza como agregado materiales aluviales triturados con baja absorción. Por esta razón, en la Figura 30 se establece una comparación con otro tipo de mezcla envejecida y estudiada en la Universidad

Católica Santiago de Guayaquil que utiliza como agregado materiales de estratos heterogéneos de pizarras con alta absorción (Cedeño, 2015).

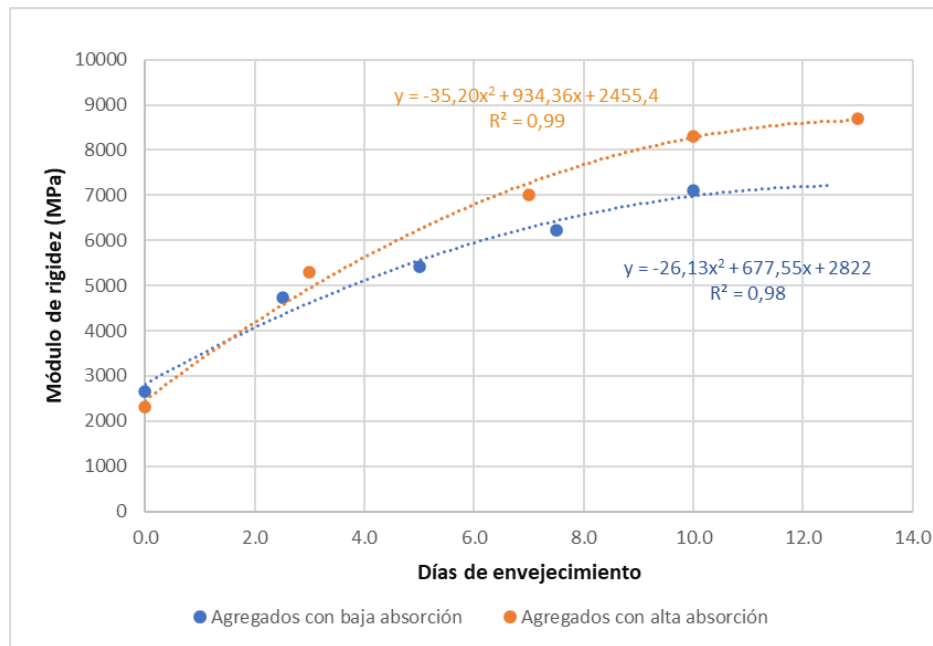


Figura 30. Comparación de envejecimiento para diferentes tipos de mezclas

A pesar que las dos mezclas poseen el mismo nivel de compactación y utilizan el mismo tipo de asfalto AC-20, la mezcla con el agregado con mayor absorción muestra un mayor impacto del envejecimiento, dado por unos módulos finales mucho más elevados que los obtenidos con la mezcla que utiliza materiales aluviales triturados.

Más allá de que la mezcla con pizarras trituradas emplea un contenido de asfalto de 7,0%, mayor a la del estudio ($\approx 6,0\%$), la absorción del asfalto por parte de los agregados es selectiva, es decir, el agregado absorbe principalmente las fracciones más ligeras del asfalto, quedando en la película que rodea las partículas las fracciones más pesadas, que generan mayores módulos al envejecerse y más problemas respecto a la fatiga esperada.

Capítulo IV

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

- 1) Entre uno de los factores que intervienen en el envejecimiento de las mezclas asfálticas, existe un componente clave que es intrínseco al ambiente. Esto quiere decir que es imprescindible que cada país, región o ciudad, según convenga, investigue este fenómeno para elaborar sus propios estándares de diseño. El uso de normativas y procedimientos extranjeros sirven de guía, pero no deben de ser utilizados en nuestro medio, sin antes comprobar su validez .

Aplicando el procedimiento AASHTO R30 a la mezcla utilizada en el presente trabajo y empleando como referente el módulo de rigidez, se lograría tan solo un envejecimiento de 2.8 años en el campo, mientras que su propósito original es simular un envejecimiento en las vías entre 7 a 10 años.

- 2) Luego de haber envejecido a corto plazo la mezcla suelta por 4 horas y a largo plazo la mezcla compactada por 0, 2.5 ,5 ,7.5 y 10 días, se concluye que el envejecimiento térmico no es capaz de reproducir de manera correcta el fenómeno de envejecimiento en las vías de la costa.

A pesar de que se conoce que la radiación UV es un serio problema en relación al envejecimiento, no se la ha incluido en las normativas de ensayos. Este problema se agrava al tomar en cuenta que el Ecuador está ubicado geográficamente en una de las zonas de mayor UV del planeta.

3) Luego del estudio del envejecimiento de briquetas a largo plazo en laboratorio y de comparar los resultados de los módulos de rigidez con los de núcleos en vías con capas asfálticas colocadas en diferentes años (en la región costa), se obtuvieron las siguientes equivalencias:

- 2.5 días de envejecimiento a largo plazo equivalen 1.5 años en obra
- 5 días de envejecimiento a largo plazo equivalen 2.8 años en obra
- 7.5 días de envejecimiento a largo plazo equivalen 3.9 años en obra
- 10 días de envejecimiento a largo plazo equivalen 4.7 años en obra

Realizando una curva que relacione directamente los días de envejecimiento acelerado con los años equivalentes en campo, se obtiene una línea recta de tendencia con pendiente aproximada de 0.47. Esto indica que, luego de aplicarle el envejecimiento a corto plazo descrito en este trabajo, cada día de tratamiento térmico a 85°C simula un envejecimiento de 0.47 años, aproximadamente 6 meses. Es importante señalar que esta conclusión es válida dentro del rango de tiempo descrito en este trabajo y para este tipo de mezclas.

4) Tras comparar los gráficos de fatiga de los núcleos extraídos y las briquetas envejecidas, se observa que 10 días de envejecimiento acelerado a largo plazo no alcanzan las líneas correspondientes a 4, 8, ni 15 años de colocación en sitio. Esto corrobora la idea que el tratamiento puramente térmico no es adecuado para envejecer las mezclas en nuestro medio.

5) Al comparar el envejecimiento de briquetas con el 97% y el 100% de la densidad relativa, utilizando como referente el módulo de rigidez, se comprueba que las mezclas más compactas se envejecen menos. Esto se deben en parte a que al existir menor porcentaje de vacíos, el proceso oxidativo es menos agresivo.

- 6) Tras comparar el envejecimiento de mezcla utilizada en este trabajo, cuyo agregado se compone de materiales aluviales triturados con baja absorción con el envejecimiento de otra mezcla cuyo agregado se compone de materiales procedentes de estratos heterogéneos de pizarras con alta absorción, se observa un envejecimiento muy diferente. Esto consolida la idea que, para cada tipo de mezcla, existen distintas curvas de envejecimiento que no deben de ser generalizadas.

4.2. Recomendaciones

- 1) Profundizar el estudio del fenómeno el envejecimiento en las mezclas asfálticas en las distintas regiones del Ecuador para elaborar una normativa que contemple las particularidades de nuestras mezclas y su entorno.
- 2) Investigar el efecto de la radiación UV en las mezclas asfálticas ecuatorianas para elaborar procedimientos o ensayos que incluyan este factor.

Referencias

- AASHTO T 166. (2016). *Standard Method of Test for Bulk Specific Gravity of Compacted Asphalt Mixtures Using Saturated-Dry Specimens*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.
- AASHTO T 209. (2020). *Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.
- AASHTO, P. (2002). *Standard practice for mixture conditioning of hot-mix asphalt (HMA)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.
- AASHTO, R. 30-02. (2010). *Standard Procedure for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA)*.
- Acosta, A. K. (2014). *Análisis de la correlación entre estabilidad y módulo de rigidez para mezclas asfálticas en caliente, empleando agregados pétreos del Distrito Metropolitano de Quito*. Quito.
- Airey, G. (2003). *State Of The Art Report on Ageing Test Methods*. Nottingham.
- Asphalt Institute . (2014). *Asphalt Mix Design Methods*.
- ASTM D1188-07. (2015). *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Coated Samples*. ASTM International, West Conshohocken, PA. Retrieved from www.astm.org
- ASTM D2041/ D2041M- 19. (2019). *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures*. ASTM International, West Conshohocken, PA. Retrieved from www.astm.org
- ASTM D2726/ D2726M. (2019). *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures*. ASTM International, West Conshohocken, PA. Retrieved from www.astm.org
- Bell, C. A., Wieder, A. J., & Fellin, M. J. (1994). *SHRP-A-390: Laboratory Aging of Asphalt- Aggregate Mixtures: Field Validation*. National Research Council, Washington, D.C.
- Cedeño, D. (2015). *Variación de la resistencia a la fatiga en las mezclas asfálticas con el incremento en el módulo resiliente (por envejecimiento)*. Guayaquil.
- Cooper Research Technology Limited. (2002). *NU-10 & NU-5. Operation & Maintenance Manual*. Nottingham, United Kingdom.
- Elwardany, M. D. (2017). *Phenomenological Modeling and Laboratory Simulation of Long-Term Aging of Asphalt*. Raleigh.

- Fernández, W. D., Rondón, H., & Reyes, F. (2013). *El fenómeno de envejecimiento en asfaltos y mezclas asfálticas*.
- Garnica, P., Flores, M., Gómez, J. A., & Delgado, H. (2005). *Caracterización gomecánica de mezclas asfálticas*.
- Google. (s.f). *Mapa de región costa, Ecuador en Google Maps*. Retrieved from <https://www.google.com/maps/@-2.4200656,-79.6805645,10.83z>
- Harrigan, E. (2007). *Simulating the effects of hot mix asphalt aging for performance testing and pavement structural design*. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Hveem, F. N., Zube, E., & Skog, J. (1963). *Proposed new tests and specifications for paving grade asphalts*. Association of Asphalt Paving Technologists, Minnesota.
- Kemp, G. R., & Predoehl, N. H. (1981). *A comparison of field and laboratory environments on asphalt durability*.
- Kim, R., Castorena, C., Elwardany, M., Yousefi, F., Underwrod, S., Gundla, A., . . . Glasser, R. (2018). *NCHRP report 871: Long-Term Aging of Asphalt Mixtures for Performance Testing and Prediction*. Transportation Research Board, Washington, DC.
- Leiva, F. (2005). *Normativa para evaluar la resistencia al deslizamiento superficial de los pavimentos*. San Pedro.
- Newcomb, D., Arámbula Mercado, E., Epps Martin, A., Yuan, M., Tran, N., & Yin, F. (2019). *NCHRP report 919: Field verification of proposed changes to the AASTHO R30 procedures for laboratory conditioning of asphalt mixtures*. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- Newcomb, D., Epps Martin, A., Yin, F., Arambula, E., Sug Park, E., Chowdhury, A., . . . Signore, J. (2015). *NCHRP report 815: Short-Term Laboratory Conditioning of Asphalt Mixtures*. Transportation Research Board, Washington, DC.
- Organización Mundial de la Salud. (2003). *Índice UV Solar Mundial: Guía práctica*. Ginebra.
- Padilla, A. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista*. Barcelona.
- Pauls, J. T., & Welborn, J. Y. (1952). *Studies of the hardening properties of asphaltic materials*.

- Rolt, J. (2000). *Top-Down Cracking: Myth or Reality?*
- Rondón, H., & Reyes, F. A. (2015). *PAVIMENTOS. Materiales, Construcción y diseño*. Bogotá: Macro.
- Sanchez, F. (2016). *Ligantes Bituminosos*. Retrieved from <https://www.slideshare.net/castilloaroni/mdulo-8-ligantes-bituminosos-fernando-sanchez-sabogal>
- Teresa, L., & Miró, R. (2015). *El Envejecimiento en Mezclas Asfálticas*. Barcelona.
- The British Standards Institute. (2012). *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt. Part 26: Stiffness*.
- Uv- Indeks. (n.d.). *Wikipedia*. Retrieved febrero 15, 2021, from https://da.wikipedia.org/wiki/Uv-indeks#/media/Fil:GOME.uviecclimyyear_lr.gif
- Vila, R. (2017). *Estudios y propuestas sobre la calidad de los asfaltos y las mezclas asfálticas en Ecuador*. Universidad Católica Santiago de Guayaquil: Dirección de Publicaciones.
- Vila, R. (2020). *Conferencias sobre Asfaltos de la Asignatura Pavimentos para la Carrera de Ingeniería Civil. Material no publicado*. Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Guayaquil. Ecuador.
- Villegas, R. E., Baldi, A., Aguiar, J. P., & Loría, L. G. (2018). *Estudio físico químico de la oxidación del Betún asfáltico y su relación con la fatiga a temperaturas intermedias de servicio*. San Pedro.
- Von Quintus, H., Scherocman, J., & Hughes, C. (1989). *Asphalt-Aggregate Mixtures Analysis System: Philosophy of the Concept*. West Conshohocken.



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT

Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Loor Torres Mario Andrés**, con C.C: # **0922439385** autor del trabajo de titulación: **Estudio del envejecimiento de mezclas asfálticas con núcleos de obras y briquetas procesadas en laboratorio** previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 10 de Marzo de 2021

f. _____

Nombre: **Loor Torres Mario Andrés**

C.C: **0922439385**



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Estudio del envejecimiento de mezclas asfálticas con núcleos de obras y briquetas procesadas en laboratorio		
AUTOR(ES)	Loor Torres Mario Andrés		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Rolando Vila Romaní		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería Civil		
TITULO OBTENIDO:	Ingeniería Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	10 de Marzo de 2021	No. DE PÁGINAS:	61
ÁREAS TEMÁTICAS:	Pavimentos, Asfaltos		
PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:	Mezclas asfálticas, envejecimiento, módulo de rigidez, AASHTO R30, fatiga, radiación UV.		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras): El objetivo de este trabajo es analizar el envejecimiento de las mezclas asfálticas, a través de la evaluación de su módulo de rigidez en el equipo NAT, utilizando núcleos extraídos en obras con diferentes años de colocación en la región costa del Ecuador y briquetas de mezcla con similar composición, producidas en planta y envejecidas en laboratorio. Partiendo de la normativa AASHTO R30, se realizó el envejecimiento a corto plazo de la mezcla suelta por 4 horas a 135°C y luego se envejeció a largo plazo la mezcla compactada a 85°C durante los siguientes tiempos: 0, 2.5, 5, 7.5 y 10 días. Estos valores se los escogieron para contrastar los resultados de los núcleos de vías. Todas las mezclas usadas en este estudio fueron producidas con una misma exigencia granulométrica y empleando materiales aluviales triturados con un mismo tipo de asfalto. Además, se realizaron pruebas de fatiga. Los resultados indican que dentro del rango de tiempo de envejecimiento acelerado empleado, cada día en el horno a 85°C equivale a 0.47 años. Por este motivo, se considera que el envejecimiento térmico por sí solo no es capaz de reproducir adecuadamente el envejecimiento en vías de la costa del Ecuador. Un parámetro que se conoce que tiene gran influencia en nuestro ambiente es la radiación UV, la cual no está incluida en los procedimientos utilizados en nuestro país. Se recomienda profundizar el estudio del envejecimiento para la elaboración de normas que contemple las particularidades de nuestras mezclas asfálticas y su entorno.			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-993237256	E-mail: Mario_lt460@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::	Nombre: Clara Glas Cevallos		
	Teléfono: +593-984616792		
	E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			