



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

**Empleo de la prueba “ideal” para el control del agrietamiento
en mezclas asfálticas.**

AUTOR:

Navarrete Sánchez, Edmundo Francisco

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

Ing. Vila Romaní, Rolando. PhD.

Guayaquil, Ecuador

13 de Septiembre 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 **Navarrete Sánchez Edmundo Francisco** 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 13 días del mes de Septiembre del año 2021



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Navarrete Sánchez Edmundo Francisco**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, EMPLEO DE LA PRUEBA “IDEAL” PARA EL CONTROL DEL AGRIETAMIENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS, 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 13 días del mes de Septiembre del año 2021

EL AUTOR

f. _____
Navarrete Sánchez Edmundo Francisco



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, Navarrete Sánchez Edmundo Francisco

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, “EMPLEO DE LA PRUEBA “IDEAL” PARA EL CONTROL DEL AGRIETAMIENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 13 días del mes de Septiembre del año 2021

EL AUTOR:

f. _____

Navarrete Sánchez Edmundo Francisco

REPORTE URKUND



Urkund Analysis Result

Analysed Document: Navarrete Francisco.docx (D112904941)
Submitted: 9/19/2021 2:14:00 PM
Submitted By: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec
Significance: 1 %

Sources included in the report:

<http://201.159.223.180/bitstream/3317/15736/1/T-UCSG-PRE-ING-IC-366.pdf.pdf>

Instances where selected sources appear:

1

AGRADECIMIENTO

Quiero aprovechar estas líneas para agradecer a todas las personas que han estado a mi lado apoyándome a lo largo de estos prestigiosos años en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Guayaquil.

En primer lugar, agradezco a Dios por haberme dado vida y salud para llegar a este momento de mi vida, por darme fuerzas diariamente y por su infinita bondad.

En segundo lugar, agradecerle infinitamente a mi familia. A mis padres Luis Navarrete y María Sánchez, por los valores que han inculcado en mi como persona y por ser el mejor ejemplo de autosuperación y amor. A mis hermanos Luis y Amanda Navarrete, por brindarme su apoyo incondicional, fuerzas y ánimos durante mi trayectoria en la carrera.

Expreso mi profundo agradecimiento al Dr. Rolando Vila Romaní, por su paciencia y entrega a quien me ha venido apoyando e instruyendo a lo largo del presente trabajo de titulación, como mi tutor de tesis. Lo considero un excelente profesional, un gran asesor y profesor, pero sobre todo un excepcional ser humano.

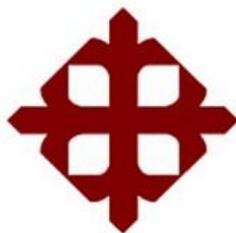
Finalmente, agradecerles a mis amigos tanto de colegio como de Universidad, aquellos que han estado en los buenos y malos momentos de mi vida y han formado parte de mi desarrollo personal.

Dedicatoria

Le dedico este trabajo a Dios y a toda mi familia, pero sobre todo quisiera dedicársela a dos personas que me hubiese gustado que estén conmigo en estos momentos.

Se la dedico a mi abuelo materno, Guillermo Sánchez, quien en vida fue ingeniero civil y pese a que nunca pude conocerlo, pude ver muchas de sus obras que se mantienen intactas hasta en la actualidad y escuchar varios relatos sobre su trabajo, siendo mi principal inspiración para seguir adelante con la carrera.

Dedico este trabajo de titulación a mi abuela paterna, Olga Bastidas, quien hace poco dejó este mundo y con su partida dejó un profundo vacío en nuestra familia. En vida nos amó tanto que todos los días rezaba por sus hijos, nietos y familiares, ahora solo me queda recordarla con cariño, sabiendo que nos cuida desde el cielo.



**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. Carlos Chon Díaz, MSc.

DECANO

f. _____

Ing. Daniel De la Pared Condo, MSc.

DOCENTE DE LA CARRERA

f. _____

Ing. Federico Von Buchwald de Janon. PhD.

OPONENTE

ÍNDICE GENERAL

Contenido

| | |
|---|-----------|
| Capítulo I..... | 2 |
| 1. Introducción..... | 2 |
| 1.1. Antecedentes | 2 |
| 1.2. Justificación e importancia del tema | 4 |
| 1.3. Objetivos..... | 6 |
| 1.3.1. Objetivo general | 6 |
| 1.3.2. Objetivos específicos | 6 |
| 1.4. Alcance..... | 7 |
| 1.5. Metodología..... | 8 |
| Capítulo II | 9 |
| 2. Marco teórico | 9 |
| 2.1. Mezclas asfálticas clasificación y propiedades..... | 9 |
| 2.2. Fenómeno de agrietamiento en mezclas asfálticas | 10 |
| 2.3. Agentes causantes de agrietamiento | 11 |
| 2.4. Tipos de agrietamientos en mezclas asfálticas | 13 |
| 2.4.1. Agrietamiento por fatiga..... | 13 |
| 2.4.2. Agrietamiento en bloques | 17 |
| 2.5. Impacto del envejecimiento de las mezclas asfálticas en su agrietamiento..... | 18 |
| 2.6. Mecanismo de fractura | 22 |

| | |
|--|-----------|
| 2.7. Caracterización de la fractura en mezclas asfálticas | 23 |
| 2.7.1. Prueba de viga con muesca en un borde | 23 |
| 2.7.2. Prueba de tracción en disco barrenado..... | 24 |
| 2.7.3. Prueba de flexión semicircular | 26 |
| 2.7.4. Prueba Fénix | 28 |
| 2.8. Nueva prueba de agrietamiento IDEAL | 31 |
| 2.8.1. Introducción..... | 31 |
| 2.8.2. Características de la prueba IDEAL | 32 |
| 2.8.3. Procedimiento para realizar la prueba..... | 34 |
| 2.8.4. Parámetro de agrietamiento CT-index | 37 |
| Capítulo III | 40 |
| 3. Características de la mezcla asfáltica empleada | 40 |
| 3.1. Generalidades..... | 40 |
| 3.2. Características del cemento asfáltico | 40 |
| 3.3. Características de los agregados minerales | 43 |
| 3.4. Gravedades específicas de los agregados..... | 51 |
| 3.4.1. AGREGADOS GRUESOS | 51 |
| 3.4.2. AGREGADOS FINOS | 52 |
| 3.5. Diseño de la mezcla asfáltica | 54 |
| 3.6. Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica | 55 |
| 3.6.1. Gravedad específica neta de los agregados (Gsb)..... | 55 |
| 3.6.2. Gravedad específica aparente de los agregados (Gsa)..... | 56 |

| | | |
|---------------------------|---|-----------|
| 3.6.3. | Gravedad específica efectiva de los agregados (Gse) | 56 |
| 3.6.4. | Gravedad específica máxima teórica de la mezcla (Gmm) | 57 |
| 3.6.5. | Porcentaje de asfalto absorbido (Pba)..... | 58 |
| 3.6.6. | Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA)..... | 58 |
| 3.6.7. | Porcentaje de vacíos de aire en mezcla compactada (Pa) | 59 |
| 3.6.8. | Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto (VFA)..... | 59 |
| 3.7. | Parámetros resistentes | 60 |
| 3.8. | Resultados obtenidos | 61 |
| Capítulo IV | | 67 |
| 4. | Trabajo experimental para la prueba IDEAL de agrietamiento .. | 67 |
| 4.1. | Introducción | 67 |
| 4.2. | Niveles de envejecimiento a emplear..... | 68 |
| 4.3. | Porcentaje de vacíos en las probetas a ensayar | 69 |
| 4.5. | Resultados obtenidos | 72 |
| 4.5.1. | Corto plazo | 73 |
| 4.5.2. | Mediano plazo..... | 76 |
| 4.5.3. | Largo plazo | 79 |
| 4.5.4. | Resumen de resultados | 82 |
| 4.6. | Realización de la prueba de módulo de rigidez | 82 |
| 4.7. | Resultados obtenidos en las pruebas de módulos de rigidez..... | 83 |
| 4.8. | Análisis de resultados..... | 85 |
| Conclusiones | | 90 |

| | |
|----------------------------------|----|
| Recomendaciones | 91 |
| Referencias Bibliográficas | 92 |
| Anexos | 97 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Ensayo IDEAL y resultados típicos..... | 3 |
| Figura 2. Metodología de estudio | 8 |
| Figura 3. Distribución de carga del neumático sobre la estructura del pavimento. | 12 |
| Figura 4. Tracción generada por variaciones en temperatura. | 13 |
| Figura 5. Diferentes niveles de severidad en deterioros por fatiga. A) Bajo. B) Moderado. C)Alto. | 14 |
| Figura 6. Agrietamiento por fatiga de tipo ascendente..... | 15 |
| Figura 7. Agrietamiento por fatiga de tipo descendente. | 16 |
| Figura 8. Diferentes niveles de severidad en deterioros por agrietamiento en bloques. A) Bajo. B) Moderado. C)Alto. | 18 |
| Figura 9. Agrietamiento por fatiga producto del envejecimiento de la mezcla asfáltica. | 19 |
| Figura 10. Agrietamiento en bloques producto del envejecimiento de la mezcla asfáltica. | 20 |
| Figura 11. Mapa mundial de radiación ultravioleta. | 22 |
| Figura 12. Esquemas de pruebas de fractura | 23 |
| Figura 13. Prueba de viga con muesca en un borde..... | 24 |
| Figura 14. Prueba de tracción en disco barrenado. | 25 |
| Figura 15. Esquema del ensayo SCB..... | 27 |
| Figura 16. Dispositivo y muestra para ensayo SCB..... | 28 |
| Figura 17. Prueba Fénix..... | 29 |
| Figura 18. Cabezal tradicional para prueba de tracción indirecta. | 33 |
| Figura 19. Máquina de tracción indirecta utilizada para la prueba IDEAL..... | 34 |
| Figura 20. Esquema del software realizando la prueba IDEAL, mostrando el proceso de agrietamiento a lo largo de la prueba. | 35 |
| Figura 21. Ilustración de los puntos de cargas y sus respectivos desplazamientos durante la prueba IDEAL. | 36 |
| Figura 22. Estructura química del cemento asfáltico | 41 |
| Figura 23. Gráfico Viscosidad-Temperatura | 42 |
| Figura 24. Gráfica granulométrica, abertura del tamiz vs porcentaje pasante .. | 45 |
| Figura 25. Gráfica % de asfalto vs % de vacíos de la mezcla | 63 |
| Figura 26. Gráfica % de asfalto vs Peso Unitario..... | 64 |
| Figura 27. Gráfica % de asfalto vs Estabilidad | 64 |
| Figura 28. Gráfica % de asfalto vs Flujo..... | 65 |
| Figura 29. Gráfica % de asfalto vs % de vacíos del agregado..... | 65 |
| Figura 30. Gráfica % de asfalto vs % de vacíos llenos de asfalto..... | 66 |
| Figura 31. Compactador automático | 67 |
| Figura 32. Bandejas con mezclas para su envejecimiento | 68 |
| Figura 33. Realización de la prueba IDEAL..... | 71 |
| Figura 34. Curva carga – desplazamiento. Probeta 1 CP..... | 73 |
| Figura 35. Curva carga – desplazamiento. Probeta 2 CP..... | 74 |

| | |
|--|----|
| Figura 36. Curva carga – desplazamiento. Probeta 3 CP..... | 75 |
| Figura 37. Curva carga – desplazamiento. Probeta 1 MP..... | 76 |
| Figura 38. Curva carga – desplazamiento. Probeta 2 MP..... | 77 |
| Figura 39. Curva carga – desplazamiento. Probeta 3 MP..... | 78 |
| Figura 40. Curva carga – desplazamiento. Probeta 1 LP..... | 79 |
| Figura 41. Curva carga – desplazamiento. Probeta 2 LP..... | 80 |
| Figura 42. Curva carga – desplazamiento. Probeta 3 LP..... | 81 |
| Figura 43. Variación del CT Index con los niveles de envejecimiento | 82 |
| Figura 44. Equipo NAT en una prueba de módulo de rigidez..... | 83 |
| Figura 45. Resultados de la prueba de módulo de rigidez en la probeta 1CP... | 84 |
| Figura 46. Variación del módulo con los niveles de envejecimiento | 85 |
| Figura 47. Variación del CTindex con los días de envejecimiento | 86 |
| Figura 48. Variación del Módulo de rigidez con los días de envejecimiento ... | 88 |
| Figura 49. Relación de los valores de CTindex y los módulos de rigidez | 89 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Resultados de ensayos por viscosidad del cemento asfáltico designado | 42 |
| Tabla 2. Exigencias para prueba de control de agregados minerales..... | 43 |
| Tabla 3. Generalidades de los agregados minerales a emplear | 44 |
| Tabla 4. Dosificación de agregados minerales para cumplir exigencias granulométricas | 45 |
| Tabla 5. Prueba de angularidad para agregados finos | 46 |
| Tabla 6. Prueba de partículas largas y aplanadas en agregados gruesos | 46 |
| Tabla 7. Prueba de caras fracturadas en agregados gruesos | 47 |
| Tabla 8. Prueba de abrasión de los ángeles a agregados minerales | 47 |
| Tabla 9. Ensayo de sulfatos para durabilidad..... | 48 |
| Tabla 10. Prueba deletéreos en agregados minerales | 49 |
| Tabla 11. Prueba Equivalente de arena en agregados minerales..... | 50 |
| Tabla 12. Resumen de las gravedades específicas de los agregados utilizados para la mezcla | 53 |
| Tabla 13. Criterios de diseño de mezclas asfálticas, metodología Marshall..... | 55 |
| Tabla 14. Resumen de las gravedades específicas de la muestra | 57 |
| Tabla 15. Factores de corrección de estabilidad..... | 61 |
| Tabla 16. Resumen de propiedades de la mezcla | 62 |
| Tabla 17. Resumen de los parámetros con su respectivo % de asfalto | 63 |
| Tabla 18. Resumen de los valores obtenidos de la mezcla con sus exigencias . | 66 |
| Tabla 19. Valores de Gmb y Pa para probetas de diámetro 150 mm..... | 69 |
| Tabla 20. Valores de Gmb y Pa para probetas de diámetro 100 mm..... | 69 |
| Tabla 21. Cuadro con procesamiento de resultados en Probeta 1 envejecida a corto plazo | 71 |
| Tabla 22. Resultados obtenidos. Probeta 1 CP..... | 73 |
| Tabla 23. Resultados obtenidos. Probeta 2 CP..... | 74 |
| Tabla 24. Resultados obtenidos. Probeta 3 CP..... | 75 |
| Tabla 25. Resultados obtenidos. Probeta 1 MP | 76 |
| Tabla 26. Resultados obtenidos. Probeta 2 MP | 77 |
| Tabla 27. Resultados obtenidos. Probeta 3 MP | 78 |
| Tabla 28. Resultados obtenidos. Probeta 1 LP | 79 |
| Tabla 29. Resultados obtenidos. Probeta 2 LP | 80 |
| Tabla 30. Resultados obtenidos. Probeta 3 LP | 81 |
| Tabla 31. Resumen de valores CT Index calculados..... | 82 |
| Tabla 32. Resumen de los módulos de rigidez medidos | 84 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|-----|
| Anexo 1. Hojas de cálculo utilizadas para determinar las curvas carga-desplazamiento de cada una de las briquetas ensayadas. | 97 |
| Anexo 2. Módulos de rigidez de todas las briquetas de 100 mm de diámetro con sus respectivos tiempos de envejecimiento, utilizando el equipo NAT..... | 101 |

Resumen

El presente trabajo de titulación exhibe la realización de una novedosa prueba para control de agrietamiento de mezclas asfálticas, cuyos primeros ensayos y publicaciones se dieron en Austin, Texas en enero del 2019. El objetivo principal y hacia dónde va orientado este trabajo es la implementación de la prueba IDEAL a mezclas asfálticas sometidas a tres niveles de envejecimiento: corto, mediano y largo plazo, con la finalidad de evaluar su resistencia al agrietamiento, basándose en la mecánica de fractura, más conocido como el índice de tolerancia al agrietamiento (CTindex), estableciendo comparaciones con los módulos de rigidez para valorar el potencial de este ensayo. Para la aplicación de los niveles de envejecimiento se utilizaron criterios actualizados partiendo de la normativa AASHTO R30 y de las recomendaciones del NCHRP Research Report 919. Todas las mezclas empleadas en este estudio respetaron las exigencias establecidas por sus respectivas normativas. La mezcla asfáltica resulto satisfactoria cumpliendo cada una de las exigencias establecidas, siendo diseñada y compactada siguiendo la metodología Marshall, para su posterior ensayo de agrietamiento. Los resultados indican que a mayores días de envejecimiento de una muestra la resistencia al agrietamiento será menor. A su vez el módulo de rigidez ira aumentado a medida incrementa los días de envejecimiento debido al endurecimiento de la muestra, restándole ductilidad. Estos resultados coherentes demuestran la sensibilidad que presenta la prueba IDEAL bajo condiciones de envejecimiento. Se recomienda profundizar el estudio de la prueba IDEAL con diferentes propuestas de trabajo para observar particularidades de la muestra ensayada.

Palabras claves: mezclas asfálticas, prueba IDEAL, módulo de rigidez, envejecimiento, AASHTO R30, NCHRP Reasearch report 919, metodología Marshall.

Abstract

This degree work exhibits the performance of a novel test for cracking control of asphalt mixtures, whose first tests and publications were given in Austin, Texas in January 2019. The main objective and direction of this work is the implementation of the IDEAL test to asphalt mixtures subjected to three aging levels: short, medium and long term, in order to evaluate their resistance to cracking, based on fracture mechanics, better known as the cracking tolerance index (CTindex), establishing comparisons with the stiffness modulus to assess the potential of this test. For the application of the aging levels, updated criteria were used based on the AASHTO R30 standard and the recommendations of NCHRP Research Report 919. All the mixes used in this study complied with the requirements established by their respective standards. The asphalt mix was satisfactory, complying with each of the established requirements, and was designed and compacted following the Marshall methodology for subsequent cracking tests. The results indicate that the longer the aging period of a sample, the lower the resistance to cracking. In turn, the modulus of rigidity will increase as the number of aging days increases due to the hardening of the specimen, reducing its ductility. These consistent results demonstrate the sensitivity of the IDEAL test under aging conditions. It is recommended to further study the IDEAL test with different work proposals to observe particularities of the tested specimen

Keywords: asphalt mixes, IDEAL test, stiffness modulus, aging, AASHTO R30, NCHRP Research report 919, Marshall methodology.

Capítulo I

1. Introducción

1.1. Antecedentes

La fisuración o el agrietamiento excesivo es considerado como uno de los grandes problemas que poseen las mezclas asfálticas para carreteras a nivel mundial, y que generan deterioros que en el Ecuador clasifican como grietas por fatiga y grietas de bloques. Las grietas por fatiga son generadas principalmente por el paso de vehículos pesados sobre capas asfálticas muy rígidas en estructuras débiles. Otras causas son el envejecimiento de las mezclas y las condiciones climáticas. Para el caso de las grietas en bloque el impacto de las cargas no cuenta, siendo las fluctuaciones diarias de temperatura y el envejecimiento de las mezclas los aspectos más importantes a considerar. Este último tipo de grietas es usual en la región sierra, mientras que la fatiga se puede observar a lo largo de todo el país.

Desde hace mucho tiempo existió el interés de muchos ingenieros de como poder aplicar una prueba de agrietamiento simple y confiable para el diseño y control de las mezclas asfálticas. Un punto de inflexión en este sentido fueron los trabajos en la Universidad de Texas en Austin con la prueba de tracción indirecta (Kennedy & Hudson, 1968). Cabe recalcar que esta prueba de tracción indirecta, por la facilidad de emplear especímenes tipo Marshall, fue muy importante y posteriormente evolucionó a pruebas dinámicas de fatiga. En la década de los noventa, la industria del asfalto en Texas, EE.UU., utilizó varias medidas para reducir la formación de grietas en las capas de asfalto, que incluían el uso de aglutinantes modificados con polímeros y el uso de contenidos de asfalto más altos. En consecuencia, el problema de la formación de grietas se minimizó significativamente en dicho estado (Taylor, 2018).

En los inicios del siglo XXI, con la cantidad de información que se contaba sobre pruebas de fatiga y los avances tecnológicos, ya era un hecho que para muchos ingenieros había la necesidad de aplicar una prueba de agrietamiento que sea simple y confiable para el diseño mezclas asfálticas, que cumpla con el control

de calidad (QC) y garantía de calidad (QA). Todos estos precedentes mencionados fueron el detonante de un estudio extenso para verificar, ensayar y/o determinar la resistencia al agrietamiento de mezclas asfálticas bajo una nueva modalidad de la prueba de tracción indirecta, considerando una forma distinta de recolección de datos y procesamiento de los mismos, conocido como la prueba de agrietamiento IDEAL.

Esta prueba se desarrolló dentro del “Innovations Deserving Exploratory Analysis Program” (IDEA), Proyecto # 195, financiado por el National Cooperative Highway Research Program de EE.UU. (Zhou, 2019). Estos programas abrieron las puertas a un estudio profundo de cómo realizar el ensayo de agrietamiento IDEAL, basado en pruebas de tracción indirecta que se ejecuta a temperatura ambiente (25°C) sobre especímenes cilíndricos de 15 cm de diámetro preparadas con el compactador giratorio del Superpave o en briquetas compactadas por impacto respetando el diámetro ya mencionado, expuestas a una velocidad de carga de 50 mm/min (en su versión más simple). El ensayo será explicado en detalle en los próximos capítulos de este trabajo de titulación. Ver Figura 1.

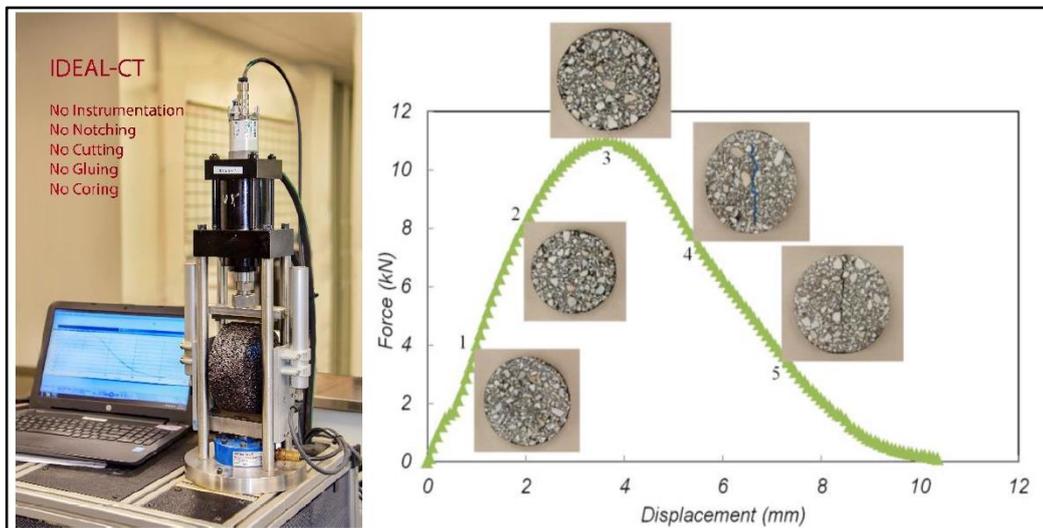


Figura 1. Ensayo IDEAL y resultados típicos.

Tomado de “Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design, Quality Control and Quality Assurance”. Por Zhou, F., 2019, Texas A&M Transportation Institute.

Tras una exhaustiva investigación por diferentes medios que brindan información, como lo son Google Académico, revistas de temas ingenieriles, publicaciones obtenidas desde la página oficial de IDEA y las memorias del XX Congreso Ibero latinoamericano del Asfalto (CILA), actualmente existe constancia de ensayos oficialmente ejecutados en EE. UU, específicamente en los estados de Texas y Virginia. Según la página oficial de IDEA, se estima que estados como Missouri, Minnesota, Nueva Jersey están interesados en la adopción de la prueba IDEAL. A nivel de Latinoamérica, específicamente en Colombia, también se hallaron registros de la realización de la prueba IDEAL para la caracterización de la resistencia a la fractura tanto de mezclas recicladas, mezclas alteradas con asfaltita, mezclas calientes, densas y también drenantes (Reyes, Useche & Álvarez, 2019).

1.2. Justificación e importancia del tema

Usualmente en el país no se realizan de manera sistemática pruebas simples para evaluar la resistencia al agrietamiento de las mezclas asfálticas, pese a que las especificaciones del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP) recomiendan la prueba de tracción indirecta, pero sin exigencias claras. Esta misma prueba se sugiere también para la evaluación del daño en agua (MTOP, 2002). En algunos casos, casi excepcionales, se han realizado pruebas de fatiga con el equipo “Nottingham Asphalt Mix Tester” (NAT) empleando la metodología de ensayo del fabricante (Cooper, 2002). Otras pruebas como tracción directa o flexo tracción en vigas tampoco se emplean por falta de equipamiento. Pruebas de tracción indirecta (TI) y de flexión semicircular (SCB) han sido empleadas a nivel experimental en investigaciones realizadas en el Laboratorio de Carreteras de la UCSG (Palacios, 2015).

La importancia de este trabajo investigativo reside en hacer precisiones respecto al empleo de una prueba para el control de agrietamiento de mezclas asfálticas sometidas bajo el fenómeno del envejecimiento a corto, mediano y largo plazo, considerando las condiciones vigentes en nuestro entorno. También vale destacar

que adquirir conocimientos de esta innovadora prueba de fatiga, es de suma relevancia, ya que el agrietamiento ha sido un problema fundamental en las carreteras de cualquier país del mundo.

La presente investigación surge de la necesidad de estudiar y realizar pruebas de agrietamiento a las mezclas asfálticas con diferentes tipos de envejecimiento, puesto que debido a este fenómeno de envejecimiento se vería afectada su rigidez y por tal motivo también su capacidad de deformación o ductilidad, haciéndose vulnerable a fisurarse al estar sometido a cargas externas. El agrietamiento de las mezclas asfálticas como tal es preocupante, es un problema de carácter internacional que enfrentan todas las agencias de vías o carreteras. En nuestro país el agrietamiento es el deterioro más importante en las vías de todas nuestras regiones geográficas, asociado en parte a la tendencia del cemento asfáltico, producido en la Refinería de Esmeraldas, de presentar un envejecimiento prematuro (Vila et al., 2019).

Esta investigación dará a conocer información que será útil a toda la comunidad ingenieril del país, vinculada con la temática del agrietamiento de las mezclas asfálticas y su relación con el envejecimiento, mediante el manejo adecuado de una prueba novedosa, en especial por el procesamiento de la información que suministra y que resume una serie de características importantes:

- Sencillez
- Practicidad
- Eficiencia
- Economía
- Repetibilidad
- Sensibilidad
- Buena correlación con el comportamiento de campo

Como ya se mencionó anteriormente, aunque no se cuenta con una gran cantidad de estudios de la prueba en investigación por su escaso tiempo en vigencia, si se han encontrado referencias sobre ensayos de la prueba IDEAL con distintos tipos de mezclas asfálticas, como asfalto de pavimento recuperado (RAP), tejas de

asfaltos reciclados (RAS), varios tipos de aglutinantes, entre otros. Por lo que es de conveniencia su estudio para afianzar una mejor comprensión a una prácticamente nueva prueba de resistencia a la fractura. Hay que destacar el hecho de que los ensayos publicados con esta nueva temática como en Texas, Virginia y Colombia fueron realizados bajo las condiciones ambientales de esas regiones, ciertos tipos de mezclas asfálticas locales y en algunos casos mezclas modificadas, por lo que se puede dar el caso de encontrar grandes diferencias entre las pruebas publicadas hasta el momento y las ejecutadas a nivel local. Por otra parte, la investigación aporta la actualización y mejoramiento de criterios sobre el impacto del envejecimiento en mezclas asfálticas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la resistencia a la fractura de una mezcla asfáltica para capa de rodadura con diferentes tiempos de envejecimiento, mediante la aplicación de la prueba IDEAL, para establecer comparaciones con los módulos de rigidez y valorar el posible potencial de este ensayo en nuestro medio.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Estudiar el procedimiento de la prueba de agrietamiento IDEAL (NCHRP IDEA Project 195, 2019).
2. Estudiar las particularidades del fenómeno del envejecimiento en las mezclas asfálticas empleando criterios actualizados (NCHRP RESEARCH REPORT 919, 2019).
3. Confeccionar los especímenes de prueba empleando una mezcla asfáltica representativa con 3 diferentes niveles de envejecimiento.

4. Determinar los parámetros volumétricos de los especímenes para garantizar los rangos de vacíos requeridos.
5. Realizar las pruebas de agrietamiento IDEAL y procesar la información adquirida en especímenes de 150 mm de diámetro.
6. Realizar pruebas de módulos de rigidez en el equipo NAT y procesar la información adquirida en especímenes de 100 mm de diámetro.
7. Establecer relaciones entre los resultados empleando criterios estadísticos.

1.4. Alcance

El presente trabajo propone, por su objeto de estudio y los objetivos planteados, ser de alcance local y nacional. Los resultados que se obtengan serán de interés y posible aplicación por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), consultores y técnicos en general vinculados a la temática. Este método abarca estudios bibliográficos, procesamiento de datos experimentales y aplicación de modelos estadísticos.

Principalmente el método en el que se va a enfocar esta prueba de agrietamiento, reside en la determinación del índice de tolerancia al agrietamiento, o CTINDEX por sus siglas en inglés, y de ciertos parámetros sujetos a la curva carga – deformación. Estos son necesarios para estimar la resistencia al agrietamiento de distintos tipos de mezclas asfálticas y poder realizar comparaciones más detalladas, en este caso con los módulos de rigidez obtenidos en especímenes de mezclas similares a las ensayadas con la prueba IDEAL.

Con la finalización de este trabajo se pretende llegar al lector y de alguna forma estimular a los futuros tesis de ingeniería de todas las provincias del Ecuador, para que se atrevan a seguir estudiando y fomentando esta nueva prueba de control de agrietamiento, utilizando distintos tipos de mezclas asfálticas acorde a las condiciones que presente las distintas zonas alrededor del país.

1.5. Metodología

La metodología propuesta para el desarrollo de la investigación se presenta en la Figura 2, que inicia con la caracterización del cemento asfáltico AC 20 de la Refinería de Esmeraldas y los agregados procedentes de cantos rodados de río triturados, que son empleados frecuentemente en muchas plantas de producción de mezclas en el país. Con estos materiales se realizará el diseño de la mezcla y la fabricación de esta.

Posteriormente se envejecerán las mezclas sueltas en horno a corto plazo, mediano plazo y largo plazo, y se confeccionarán juegos de briquetas o especímenes de diámetro 150 mm (3) y 100 mm (3) para cada nivel de envejecimiento. Luego se realizarán las pruebas IDEAL y de módulos de rigidez precisadas en los objetivos específicos y se analizarán y compararán todos los resultados ante el envejecimiento, para llegar a las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

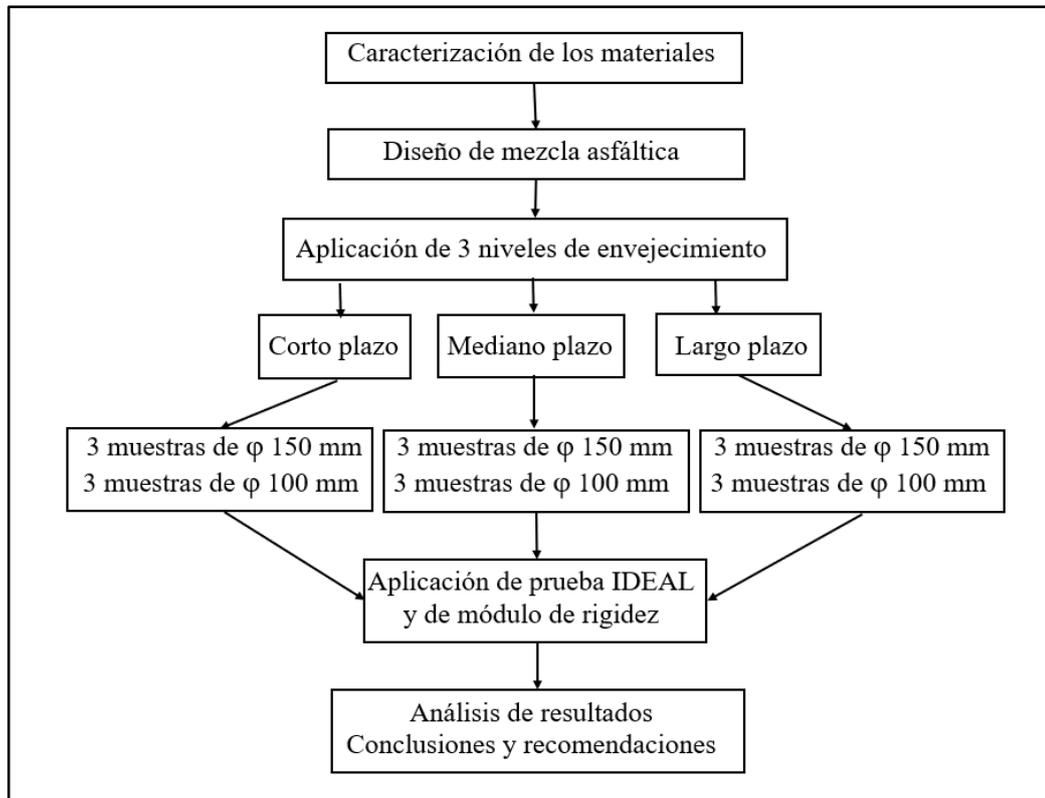


Figura 2. Metodología de estudio

Capítulo II

2. Marco teórico

2.1. Mezclas asfálticas clasificación y propiedades

Las mezclas asfálticas o también denominados aglomerados se definen como la combinación entre un ligante asfáltico y agregados minerales, dicha mezcla provoca que una película uniforme de asfalto cubra los agregados pétreos. Las proporciones de estos componentes dictan su desempeño como pavimento flexible. (Cepeda, 2002).

Según Garnica, Flores, Gómez, & Delgado (2005). La clasificación de las mezclas asfálticas depende del parámetro que se esté utilizando para categorizarla. Si su clasificación es por la temperatura, existen dos tipos de mezclas, que son en frío y caliente. Si se clasifica por el porcentaje de vacíos, se encuentran las mezclas densas, semidensas o porosas. Si se analiza por 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 caracteriza por el tamaño máximo de agregado, se encuentran las mezclas gruesas con un tamaño máximo de agregado mayor a 10mm, y las mezclas finas con un tamaño máximo de agregado inferior a 10mm.

Hay muchas propiedades que poseen las mezclas asfálticas, entre todas ellas se consideraron relevantes, desde el punto de vista estructural, las siguientes:

A. Resistencia a la fatiga:

La fatiga es el proceso por el cual un material se desgasta debido al paso de las cargas a la que este se somete. La resistencia a la fatiga indica que la mezcla debe contar con la capacidad de soportar los esfuerzos por tracción producto de las constantes repeticiones de cargas, que producen a su vez deflexiones progresivas en la mezcla, de tal modo que se forman fisuras y posteriormente se va deteriorando por fatiga.

B. Resistencia a las deformaciones plásticas:

Se debe a las características reológicas que presente la mezcla, si estas características no son satisfactorias puede producirse una fluencia del material y deformaciones longitudinales, cuya magnitud de daño está condicionada a altas temperaturas y bajas velocidades entre el contacto neumático-pavimento. Este fenómeno es conocido comúnmente como rodadera o ahuellamiento, de las cuales se destacan dos tipos de fallas que son: por fallas en la subrasante y por fallas en la mezcla asfáltica.

C. Durabilidad o resistencia a agentes externos:

Se refiere a la capacidad que posee la mezcla asfáltica para resistir agentes que provocan efectos dañinos en el mismo, claros ejemplos son: las aguas lluvias, rayos ultravioletas, cambios bruscos de temperaturas, tráfico, entre otros. El fallo a esta propiedad de las mezclas asfálticas está vinculado con: desprendimiento o comúnmente denominado como peladura y fisuras en bloques no dependientes de las cargas actuantes.

2.2. Fenómeno de agrietamiento en mezclas asfálticas

El fenómeno de fisuración o agrietamiento, objeto de este trabajo, debe ser tomado en consideración puesto que es una patología común en estos aglomerados y puede afectar tanto la estructura del pavimento como su funcionalidad en el servicio. Este fenómeno provoca la pérdida de la integridad estructural de la mezcla en sí, distorsionando su comportamiento como capa en el pavimento, disminuyendo su resistencia mecánica y tenacidad, así como su módulo elástico. El agrietamiento de hecho potencia la entrada y el impacto del agua en el pavimento, más sus efectos asociados. Elevados porcentajes de grietas generan baches y hundimientos, entre otros daños, independientemente de las causas en particular que las provocan. (Valdés et al., 2012).

La propagación de fisuras consta de tres fases principales, la primera fase, también llamada inicio de la fisura, es donde aparecen las primeras micro fisuras debido a los esfuerzos que generan las cargas del tráfico y las variaciones térmicas causando discontinuidades. La segunda fase o propagación, ocurre debido a las repeticiones constantes de los factores que causaron micro fisuras en la fase uno, solo que en esta fase dichas micro fisuras se unen formando macro fisuras. La tercera y última fase también se denomina ruptura de la capa, se da cuando la propagación finaliza y son claramente notorias las grietas en la superficie de la carpeta asfáltica.

2.3. Agentes causantes de agrietamiento

Los principales agentes que causan este tipo de fallo en mezclas asfálticas son las cargas actuantes por acción del tránsito y las condiciones ambientales en las que se encuentra expuesta la mezcla.

Las cargas actuantes producto del tránsito es un factor primordial al momento de generar daño al pavimento durante el tiempo de contacto, no solo por la cantidad de vehículos que transitan, sino también por la interacción vehículo-pavimento con sus velocidades de circulación (tiempo de aplicación de las cargas). Las cargas vehiculares y sus características, o sea, tipo de ejes y llantas, presiones de contacto y áreas de contacto, van a generar en la estructura particular del pavimento que sea, una distribución de tensiones y deformaciones que son las que inciden en el agrietamiento. Ver Figura 3.

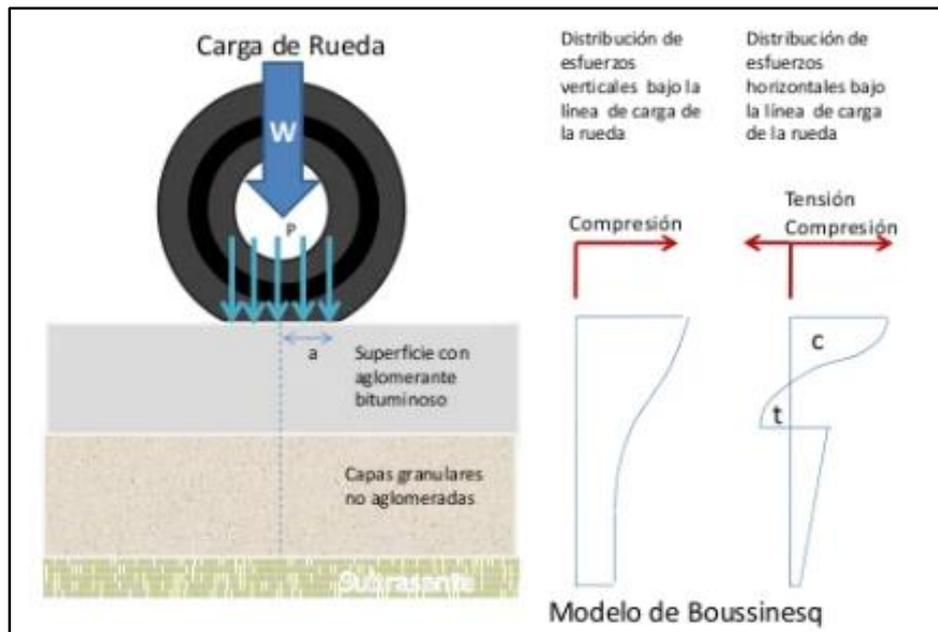


Figura 3. Distribución de carga del neumático sobre la estructura del pavimento.

Tomado de “Distribución de presiones de carga de rueda sobre estructura del pavimento” por el Ing. García, A., 2016, Folleto Pavimento 04.

Las condiciones ambientales influyen mucho en el comportamiento y funcionalidad de las mezclas asfálticas a lo largo de su vida útil. Fundamentalmente son dos las causas que inciden en las características del pavimento: la temperatura y la humedad. La temperatura afecta directamente la rigidez de la capa asfáltica dado que el asfalto es un material viscoelástico. A medida que aumenta la temperatura, la parte superficial del pavimento conformado por mezcla asfáltica se vuelve menos rígida. Cuando decrece la temperatura se incrementa la rigidez de esta mezcla, es decir, son inversamente proporcionales. La temperatura también afecta a los estados tensionales del pavimento, puesto que cuando bajan las temperaturas se generan altas tracciones superficiales de retracción en la superficie del pavimento (Valdés, Pérez, & Calabi, 2012). Ver Figura 4.

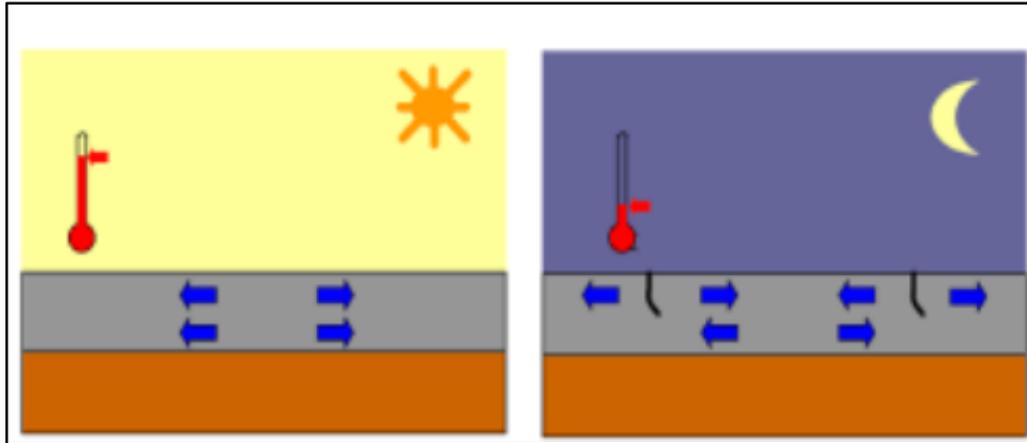


Figura 4. Tracción generada por variaciones en temperatura.

Tomado de “Fisuración en pavimentos asfálticos y sus mecanismos de deterioro” por Valdés et al., 2012, Revista RIOCI, España.

2.4. Tipos de agrietamientos en mezclas asfálticas

El fallo por agrietamiento en mezclas asfálticas es un fenómeno complejo, el cual se presenta de numerosas maneras en el medio, entre las que se destacan las siguientes tipologías:

2.4.1. Agrietamiento por fatiga

Este es un tipo de fallo que se genera por las flexiones repetidas en las capas asfálticas de los pavimentos flexibles, los cuales generan deformaciones horizontales a tracción que van fatigando el material hasta que en un momento determinado se originen fisuras. Este es un fallo clásico en la ingeniería de pavimentos considerado en todos los métodos de diseño. Este fenómeno en general está asociado a un tráfico pesado canalizado y capas débiles en la estructura. Las fisuras o grietas por fatiga, denominadas como “piel de cocodrilo” generalmente aparecen en el sentido longitudinal en tramos cortos, que irán creciendo e interconectándose hasta formar una red, por lo que pueden tener en su momento diferentes niveles de severidad, como se representa en la Figura 5.

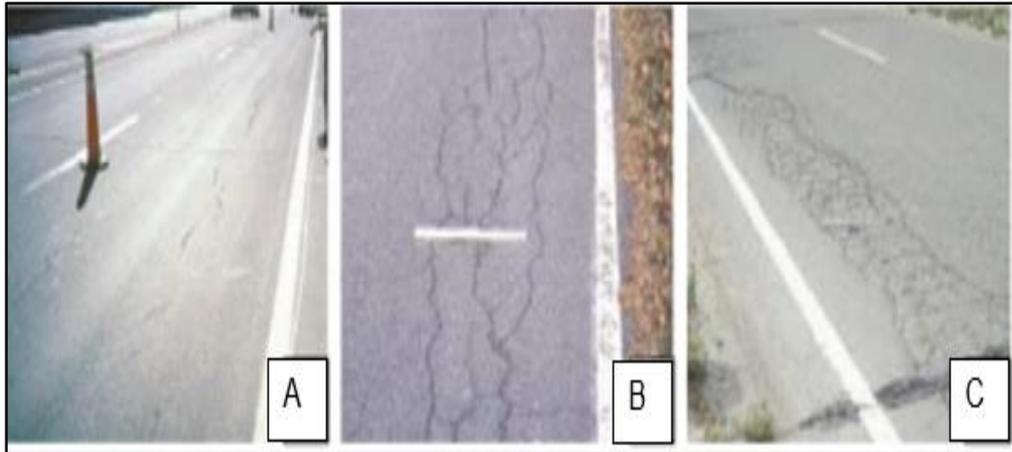


Figura 5. Diferentes niveles de severidad en deterioros por fatiga. A) Bajo. B) Moderado. C)Alto.

Fuente: Federal Highway Administration (FHWA), 2003.

Se entiende por nivel de severidad bajo cuando aparecen grietas finas longitudinales, que se desarrollan de forma paralela sin interconexión. Las grietas no están descascaradas, es decir, no presentan rotura del material a los lados de la grieta. El segundo nivel es la severidad moderada, donde se presentan grietas interconectadas en forma de red que pueden estar ligeramente descascaradas. En el último nivel de severidad, que es el más alto de todos, se observa una red o patrón de grietas que ha evolucionado de tal forma que las piezas o pedazos están bien definidos y con los bordes descascarados. Algunos pedazos pueden moverse bajo el tránsito o estar desprendidos (Sánchez, 2010).

Actualmente se pueden identificar dos mecanismos para deterioros por fatiga. El primero es el agrietamiento ascendente o bottom-up cracking (BUC), las cuales corresponden a la fatiga convencional tipo piel de cocodrilo, que se origina por el efecto de deformaciones elevadas por tracción en la parte inferior de la capa asfáltica y de ahí se propagan hacia la superficie (Valdés, Pérez, & Calabi, 2012). Este fenómeno se lo puede apreciar con mayor precisión en la Figura 6.



Figura 6. Agrietamiento por fatiga de tipo ascendente.

Tomado de las clases de la asignatura de Pavimentos. UCSG. Ing. Rolando Vila, 2020.

Según NCHRP (2002), algunas de las causas que suelen originar estas fallas por agrietamiento ascendente son:

- Capas asfálticas delgadas, no aptas para soportar las repeticiones de cargas
- Cargas por rueda de alta intensidad
- Zonas blandas en la capa de base de agregados, sub-base o subrasante.
- Capas débiles, producto de materiales inadecuados, mala compactación o incremento del contenido de humedad.

El segundo mecanismo es conocido como agrietamiento por fatiga descendente o top-down fatigue cracking (TDC), y se genera de manera opuesta al primer mecanismo de fatiga ascendente, es decir las fisuras inician en la parte superior de la capa asfáltica y se propaga hacia la base de esta. Generalmente este tipo de fallo incide en pavimentos con capas asfálticas de espesores grandes, producto de la combinación entre tracción y corte en la superficie de la capa asfáltica (Baladi et al., 2003). Si bien es usual identificar este tipo de grietas simplemente como longitudinales, en el Ecuador es conocido que las mismas terminan configurando una red similar al tipo piel de cocodrilo. Ver Figura 7.



Figura 7. Agrietamiento por fatiga de tipo descendente.

Tomado de las clases de la asignatura de Pavimentos. UCSG. Ing. Rolando Vila, 2020.

Según NCHRP (2002), las fallas por agrietamiento descendente pueden ser causadas por:

- Los esfuerzos y deformaciones por tracción provocados por las cargas actuantes que ocurren en la superficie del pavimento, causan el inicio de fisuras en esa zona y se propague hacia abajo.
- En la superficie de la capa asfáltica se generan esfuerzos cortantes causados por las llantas radiales de vehículos con alta presión de inflado, que pueden generar el inicio de fisuras. Esto indica que las grietas se inician y propagan tanto por cortante como por tracción.
- El severo envejecimiento de la mezcla asfáltica cerca de la superficie del pavimento provoca un aumento de rigidez, que cuando se combina con una elevada presión de contacto de las llantas causa el inicio y propagación de grietas.

2.4.2. Agrietamiento en bloques

Las grietas en bloques son aquellas grietas interconectadas que subdividen el pavimento en pedazos desiguales en formas de bloque, dichas grietas pueden comprender dimensiones de entre 0,1 y 10 m² aproximadamente, se encuentran en áreas no cargadas. El agrietamiento en bloques se originan principalmente por la contracción del concreto asfáltico generadas por los cambios de temperatura diarios. En mayor proporción se da en mezclas asfálticas con módulos de rigidez elevados y regiones con grandes variaciones diarias de temperatura, que en el caso del Ecuador corresponde a la región Sierra. (Corredor & Corros, 2010).

Según Ricardo Miranda (2010), posibles causas para el agrietamiento en bloque son:

- Principalmente, se da por la contracción de pavimento asfáltico (asfalto endurecido), debido al uso de un asfalto impropio para el ambiente climático de la zona en servicio.
- Capacidad limitada de soporte de la subrasante.
- Grietas de contracción en materiales utilizados como base.

El agrietamiento en bloque también consta de tres niveles de severidad. Ver Figura 8. Nivel de severidad bajo existe cuando el ancho de las grietas es menor a 10 mm. El nivel de severidad medio se la identifica cuando el ancho de grietas oscila entre los 10 y 76 mm o cuando el ancho de grietas se encuentra rodeadas por otras grietas aleatorias de menor tamaño. Finalmente, el nivel de severidad alto ocurre cuando el ancho de las grietas excede los 76 mm o también cuando el ancho de cualquier grieta se encuentre otra severamente fracturada. (Corredor & Corros, 2010).

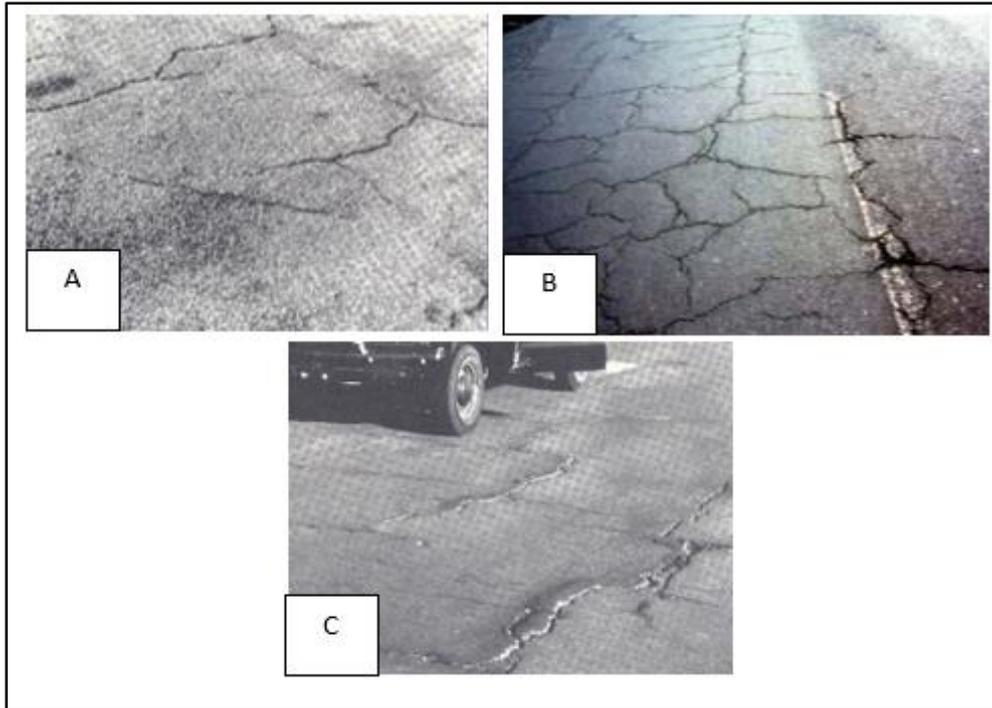


Figura 8. Diferentes niveles de severidad en deterioros por agrietamiento en bloques.
A) Bajo. B) Moderado. C)Alto.

Tomado de “Evaluación de pavimentos”. Maestría en vías terrestres, módulo III, por Corredor & Corros, 2010, Nicaragua.

2.5. Impacto del envejecimiento de las mezclas asfálticas en su agrietamiento

El envejecimiento de las mezclas asfálticas es una concentración de varios procesos a lo largo de su vida útil (Tonial, 2001), este fenómeno se puede clasificar en envejecimiento químico y envejecimiento físico o estérico (Ramond & Such, 1990). En cualquier tipo de envejecimiento, se produce un endurecimiento, que aumentan el riesgo de formación de grietas. El pavimento pierde su capacidad de relajar la tracción ante cargas de tráfico repetidas y ante procesos de enfriamiento (Isacsson & Zeng, 1997). Es decir, hay una pérdida de ductilidad de la mezcla que a su vez disminuye su capacidad de recuperación.

El envejecimiento físico o estérico es el correspondiente al agrietamiento por fatiga, ya que consiste en la reorganización molecular (estructuralmente hablando de las mezclas asfálticas), y de su lenta cristalización a temperatura

ambiente (Van der Bergh, 2011). Debido a las propiedades reológicas de la mezcla asfáltica, esta se endurece a temperatura ambiente durante su tiempo en servicio, caracterizándose por ser un proceso físico mediante el cual las propiedades reológicas de la mezcla asfáltica cambian sin alterar su composición química. En consecuencia, este proceso puede revertirse mediante exposición a calor o trabajo mecánico (Swiertz, 2010). En la Figura 9, se representa de mejor manera este fenómeno del envejecimiento por fatiga.



Figura 9. Agrietamiento por fatiga producto del envejecimiento de la mezcla asfáltica.

Tomado de “Análisis de daño por causa del envejecimiento y auscultación en estructuras de pavimentos flexibles en las ciudades de Santa marta y Barranquilla entre los años 2012-2017” por Ospino et al, 2017, Colombia.

Uno de los factores que origina el agrietamiento en bloque es el envejecimiento oxidativo que contribuye a la fragilización y endurecimiento de las mezclas asfálticas. Este fenómeno causa la aparición de reacciones químicas graduales entre la interfaz árido-ligante y el oxígeno (Lee & Huang, 1973; Lau & Bullin, 1992; Peterson & Ensley, 1993), provocando el aumento de rigidez de la mezcla, por ende, reduce su ductilidad (siendo estos parámetros inversamente proporcionales), afectando así a su resistencia al agrietamiento (Glover et al., 2005). Puesto que la oxidación es influenciada por las circunstancias ambientales da como resultado fisuras en bloques, fisuras por desprendimientos de agregados, entre otros. Ver Figura 10.



Figura 10. Agrietamiento en bloques producto del envejecimiento de la mezcla asfáltica.

Tomado de “Evaluación de pavimentos”. Maestría en vías terrestre, módulo III, por Corredor & Corros, 2010, Nicaragua.

El envejecimiento acelerado por las altas temperaturas de mezclado también puede ocurrir. Se han encontrado registros de ensayos en laboratorio de mezclas asfálticas calentadas a temperaturas de entre 150 y 170 °C aproximadamente, nivel de temperatura en la que se genera la volatilización de sus componentes, a 150 °C comienza la volatilización del ligante, considerando que si se aumenta entre 10 y 12 °C de temperatura la cantidad de volátiles podría incrementarse al doble, si se excede los valores mencionados puede producirse un envejecimiento prematuro de las mezclas lo que le resta a su vida útil en servicio. (Fernández et al., 2013).

Diferentes publicaciones de autores han expresado los efectos del fenómeno de envejecimiento para corto y largo plazo en la estructura de las mezclas asfálticas. Para la etapa a corto plazo, da a inicio en el instante que se prepara la mezcla, tal envejecimiento ocurre por la pérdida de componentes volátiles de la mezcla en caliente sometidos a altas temperaturas. De igual manera la mezcla asfáltica en contacto con el oxígeno provoca un aumento al nivel de envejecimiento y a su vez un incremento en la viscosidad de la mezcla (López & Miró, 2017). Por otro lado, el envejecimiento a largo plazo en la estructura de las mezclas asfálticas se

genera por la humedad, temperatura, radiación ultra violeta (UV), distintos factores que se encuentran en contacto con la mezcla durante su servicio. (Cubillos & Núñez, 2013). En ambos casos de envejecimiento, la mezcla asfáltica experimenta cambios de sus propiedades físicas, mecánicas y reológicas.

Un estimado de la radiación ultravioleta que alcanza nuestro planeta es de aproximadamente un 7%. Esta exposición ultravioleta altera directamente las propiedades de los asfaltos (Rondón & Reyes, 2015). La radiación ultra violeta, suele medirse con el índice UV, la cual da a conocer la intensidad que emite dicha radiación en un lugar en específico (Organización Mundial de la Salud, 2003). Los parámetros que se consideran para obtener el índice UV y que sirven para correlacionarlos con el envejecimiento del asfalto son los siguientes:

- La concentración de ozono
- Irradiancia solar
- Nubosidad

En la Figura 11, se puede visualizar un mapa mundial mostrando el índice UV promedio medido al mediodía local en un año completo, basado en la información dada por el espectrómetro “GOME” de la Agencia Espacial Europea (ESA), por sus siglas en inglés. En dicho mapa se puede apreciar que Ecuador cuenta con un alto índice de radiación ultravioleta con valores superiores a 12. Por tal motivo es un factor que debe ser tomado en cuenta en el deterioro de las mezclas asfálticas.

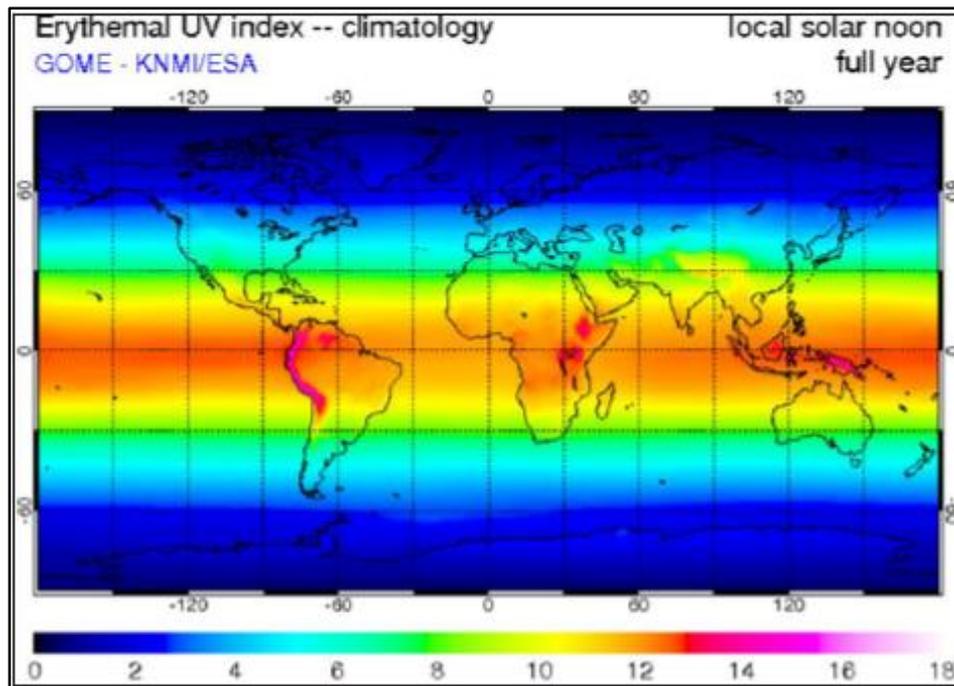


Figura 11. Mapa mundial de radiación ultravioleta.

Tomado de “Estudio del envejecimiento de mezclas asfálticas con núcleos de obras y briquetas procesadas en laboratorio” por Loor, M., 2020, Guayaquil, Ecuador.

2.6. Mecanismo de fractura

La mecánica de fracturas es una herramienta útil diseñada para caracterizar la iniciación y propagación de grietas en materiales. La fractura en materiales con muescas ocurre cuando la energía almacenada en las proximidades de una grieta es igual a la energía requerida para la formación de nuevas superficies. Es de destacar que esta hipótesis requiere una grieta/muesca preexistente para ser válida. Por lo tanto, la mayoría de las muestras de prueba de fractura incluyen una pre-grieta o muesca. Cuando el material en la vecindad de la grieta (es decir, la zona del proceso de fractura) se relaja, la energía de deformación se consume como energía superficial y la grieta crece en una cantidad infinitesimal. Si la tasa de liberación de energía de deformación es igual a la tenacidad de la fractura, entonces el crecimiento de la grieta toma lugar en condiciones de estado estacionario y la falla eventualmente ocurre.

2.7. Caracterización de la fractura en mezclas asfálticas

En un esfuerzo por caracterizar la fractura por fatiga en mezclas asfálticas, y al mismo tiempo mejorar el comportamiento estructural del pavimento, varios tipos de pruebas de fractura se han desarrollado. En la Figura 12 se muestran los más conocidos, que son la prueba de viga con muesca en un borde o viga entallada (a), tracción en disco barrenado (b), la prueba de flexión semicircular (c) y la prueba Fénix (d).

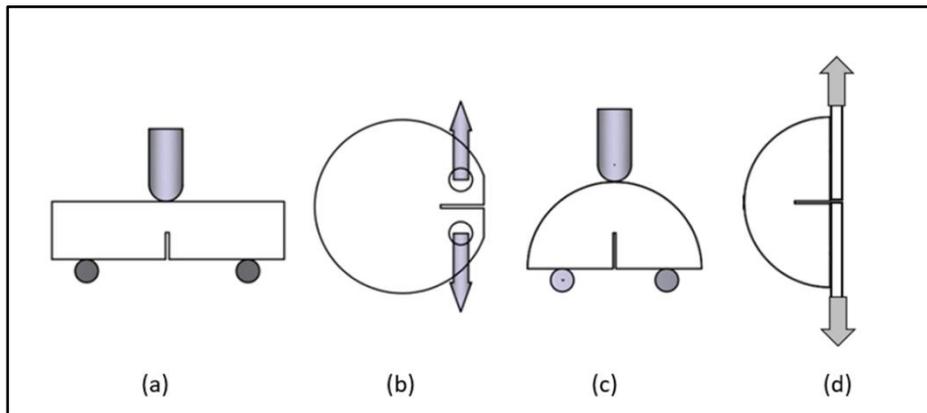


Figura 12. Esquemas de pruebas de fractura

2.7.1. Prueba de viga con muesca en un borde

Este procedimiento de ensayo para mezclas asfálticas, conocido por las siglas SEB, fue desarrollado por investigadores de la Universidad de Illinois (Wagoner, Buttlar & Paulino, 2005) y aún no se encuentra bajo norma ASTM o AASHTO.

El tamaño máximo de la viga compactada es de 375 mm de largo por 75 mm de ancho y 100 mm de alto. Luego se corta una muesca con una profundidad de 19 mm, produciendo una relación de muesca a profundidad (a/W) de 0,19. El uso de muestras con muescas profundas en vigas de hormigón asfáltico puede producir resultados de prueba no deseados, como una gran variación estadística.

La muestra se carga bajo un soporte simple para flexión en tres puntos. El accesorio tiene una longitud de 330 mm con un ancho de 100 mm. Los rodillos

tienen un diámetro de 25,4 mm y pueden girar libremente durante la prueba para reducir la fricción. El punto de carga central tiene un radio de 12,7 mm y puede girar en la dirección transversal para promover una carga más uniforme. Para aplicaciones de carga, puede emplearse un marco de carga de 100 kN con algún sistema de adquisición de datos para recoger la carga aplicada y el desplazamiento en la línea de carga. Debe medirse además con un medidor con clip la variación de la abertura de la muesca. Ver Figura 13.

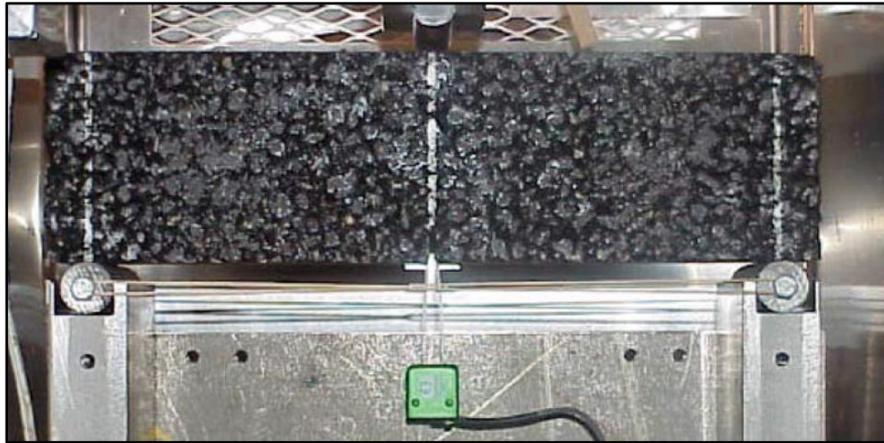


Figura 13. Prueba de viga con muesca en un borde.

Tomado de “Development og a Single-Edge Notched Beam Test for asphalt concrete mixtures” por Wagoner et al, 2005.

Las pruebas se desarrollan a una velocidad de 0,7 mm/minuto y a bajas temperaturas, empleando una cámara térmica. Hay experiencias a 0, -10 y -20 °C, aunque se reconoce que las temperaturas pueden ser mayores.

2.7.2. Prueba de tracción en disco barrenado

Esta prueba de tracción es conocida por las siglas DCT, se muestra en la Figura 14 y su procedimiento de realización se especifica en norma ASTM D7313 (07). La prueba se usa generalmente para obtener la energía de fractura en especímenes de mezclas asfálticas preparados en laboratorio o núcleos de campo, que se pueden utilizar en exigencias para el control del comportamiento ante varias

formas de agrietamiento, como el térmico, por reflexión o de bloques en pavimentos asfálticos. La prueba estándar se realiza a 10 ° C por encima del grado PG de baja temperatura.



Figura 14. Prueba de tracción en disco barrenado.

Tomado de “Disk-Shaped Compact Tension Test” por Buttlar, B. Obtenido de: <http://www.dot.state.mn.us/mnroad/projects/Low%20Temperature%20Cracking/PDF%27s%20&%20Images/Task%20Reports/SCB%20vs%20DCT%20Fracture%20Test.pdf>.

La prueba DCT se ejecuta controlando la abertura de la boca de la grieta o corte mediante un medidor adecuado, a una velocidad de 1 mm / min. Por lo general, las muestras fallan por completo en el rango de 1 a 6 mm de abertura. Aunque la prueba real tarda solo de 1 a 6 minutos en realizarse, la cantidad real de tiempo de prueba por muestra es probablemente más parecido a 15 minutos, teniendo en cuenta la estabilización de la temperatura de prueba, ubicación de las muestras en el aparato de prueba, etc.

La preparación de la muestra implica operaciones de aserrado y extracción de muestras. Primero, una sierra para mampostería enfriada por agua se utiliza para crear las caras circulares planas. A continuación, se utiliza una plantilla de marcado para indicar la ubicación de los agujeros de carga que deben ser

perforados. Posteriormente se utiliza una sierra de mesa más pequeña para producir los dos cortes finales: una cara para facilitar la colocación del medidor de abertura y una muesca.

2.7.3. Prueba de flexión semicircular

Este ensayo, conocido usualmente por las siglas SCB, fue desarrollado en el año de 1993 en Australia con el objetivo de estudiar las fracturas en las rocas. Con el paso de los años la metodología del SCB fue utilizada para estudiar y determinar la resistencia al agrietamiento de mezclas asfálticas en Estados Unidos (Molenaar et al., 2003). Actualmente el ensayo SCB se encuentra estandarizado en la norma ASTM D8044 (16).

El procedimiento para llevar a cabo el ensayo SCB consiste en conformar especímenes de forma cilíndrica mediante el compactador giratorio o el compactador Marshall para su posterior corte en dos partes exactamente iguales. De esta manera se obtienen dos semicírculos, posteriormente se procede a realizar una entalladura de 3 mm justo en la mitad de la muestra, con la finalidad de generar el plano de falla en el transcurso del ensayo (Arabani & Ferdowsi, 2009).

A continuación, se posiciona la muestra perfectamente centrada y contando con los apoyos únicamente en los extremos de la muestra, para establecer una distancia entre apoyos igual al 80 % del diámetro de la muestra (ver Figura 15). Por último, se procede a la aplicación de una carga en el centro de la luz de la muestra, hasta que la misma llegue a fallar. La aplicación de la carga se efectúa a una velocidad de 50 mm/min y a una temperatura ya establecida (Molenaar et al., 2003).

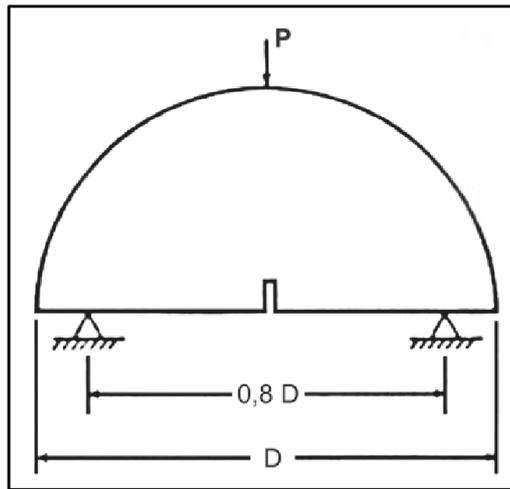


Figura 15. Esquema del ensayo SCB.

Tomado de “Comportamiento de mezclas asfálticas densas a partir del ensayo de viga semicircular simplemente apoyada” por Camacho et al., 2013, Bogotá, Colombia.

La finalidad del ensayo es determinar la curva carga-desplazamiento, de la que se obtiene la carga y el desplazamiento máximo que alcanza la muestra, así como la energía de fractura, que son justamente variables asociadas al comportamiento de las mezclas asfálticas. Según Molenaar, Scarpas & Liu (2002), el ensayo SCB puede ser de utilidad para caracterizar las fisuras y esfuerzos sufridos en mezclas asfálticas. Además, observaron que la resistencia a la tracción obtenidas en muestras con distintas pruebas no varía drásticamente, concluyendo que el ensayo SCB se le puede correlacionar con otros ensayos. En la Figura 16 se puede observar el dispositivo para el respectivo ensayo.



Figura 16. Dispositivo y muestra para ensayo SCB.

Tomado de “Análisis del comportamiento a la fisuración de mezclas asfálticas con rap mediante el ensayo SCB” por Bernal & Ramírez, XX CILA 2019.

2.7.4. Prueba Fénix

Fue desarrollada en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña y permite evaluar la resistencia a fisuración de la mezcla tanto a temperaturas bajas (rotura frágil), como a temperaturas medias (rotura dúctil), esta última más asociada a la fatiga en las mezclas. El ensayo consiste en evaluar el esfuerzo en el punto de ruptura de una probeta semicilíndrica aplicando tracción directa, realizando una pequeña abertura de 6 mm aproximadamente en la parte media de la probeta en ensayo, con la sola finalidad de facilitar el inicio de la fisura (Pérez-Jiménez et al., 2014). Ver Figura 17.



Figura 17. Prueba Fénix.

Recuperado de:

http://www.proyectorepara.com/blog/blog_caracterizacion_mezclas.php.

El esfuerzo de tracción es aplicado mediante placas metálicas pegadas a la cara plana de la probeta semicircular, y durante el transcurso del ensayo se va registrando la carga versus el desplazamiento, con el objetivo de obtener datos acerca de la rigidez de la mezcla, la energía de ruptura y su capacidad de deformación mediante un equipo de adquisición de datos. La eficiencia de este ensayo es que se puede obtener distintos parámetros que sirven para determinar el comportamiento de la mezcla asfáltica que se está ensayando (Valdés et al., 2009). El proceso de rotura de la mezcla es una combinación general de las energías liberadas durante todo su proceso de ruptura hasta la fisuración (Li et al., 2008), la evaluación de esta energía disipada es precisamente la forma que tiene esta prueba de medir el control de agrietamiento de mezclas asfálticas.

Según Valdés et al. (2009), el procedimiento para realizar paso a paso el ensayo Fénix es el siguiente:

- 1) Se fabrica una probeta cilíndrica bien sea por el procedimiento Marshall o bien por el compactador giratorio. Dicha probeta se corta a la mitad y se le introduce una pequeña fisura de 6 mm de longitud en la mitad de la misma.
- 2) Se prepara la media probeta a ensayar, fijando las secciones de la cara plana a la prensa, con la ayuda de unas placas de acero y estas de igual manera aleadas a los soportes de la prensa, lo que permite la rotación del mismo.
- 3) Un equipo de adquisición de datos es el encargado de registrar las cargas generadas en función del desplazamiento de la media probeta a lo largo de la ejecución del ensayo. Tales datos obtenidos serán de utilidad para determinar los parámetros que exige la prueba Fénix.
- 4) Algunos de esos parámetros son la energía disipada (GD), el índice de tenacidad (IT) y el índice de rigidez a tracción (IRT). Los parámetros mencionados son obtenidos mediante sus respectivas formulas con datos ya conocidos por la curva. Sin embargo, hay parámetros que pueden ser determinados por la curva carga-desplazamiento, como la carga máxima ($F_{m\acute{a}x}$), desplazamiento de la carga máxima ($\Delta F_{m\acute{a}x}$), y el desplazamiento de rotura (ΔR).

2.8. Nueva prueba de agrietamiento IDEAL

2.8.1. Introducción

En la década de 1990, la industria del asfalto en los Estados Unidos utilizó varias medidas para reducir la formación de ahuellamientos en las capas asfálticas de carreteras, que incluían el uso de ligantes modificados con polímeros, granulometrías combinadas más gruesas y el uso de contenidos de asfalto más bajos en la mezcla. En consecuencia, el problema de los ahuellamientos se minimizó significativamente, pero estas medidas, sumadas al empleo cada vez más alto de materiales asfálticos fresados (RAP), resultaron en problemas de agrietamiento prematuro, que ahora se han convertido en el modo principal de deterioros en los pavimentos en ese país.

Por esa razón, como parte de los programas denominados Innovations Deserving Exploratory Analysis (IDEA) administrados por el TRB (Transportation Research Board) norteamericano, se generó el NCHRP IDEA Project 195 “Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design, Quality Control and Quality”, que culminó con el desarrollo del procedimiento IDEAL-CT que se empleará básicamente en este trabajo.

Esta prueba es capaz de determinar la resistencia al agrietamiento de mezclas asfálticas a través del índice de tolerancia al agrietamiento (CTindex), parámetro que se basa en la mecánica de fractura. La prueba estipula que cuanto mayor sea el índice de tolerancia, la muestra contará con una mejor resistencia al agrietamiento. A su vez se conoce que IDEAL-CT es sensible a propiedades volumétricas tales como las condiciones de envejecimiento, al tipo y contenido de aglutinante de asfalto, entre otros factores que hay que tener en consideración al momento de ensayar las muestras puesto que afectan su comportamiento. Esta innovadora prueba hace posible considerar la resistencia al agrietamiento de mezclas asfálticas como un proceso rutinario, mejorando a gran escala las pruebas para el control de agrietamiento que utilizan en la actualidad las industrias de asfalto (Zhou, 2019).

2.8.2. Características de la prueba IDEAL

IDEAL-CT se asemeja al ensayo de tracción indirecta tradicional, se ejecuta a temperatura ambiente (25 °C), con probetas de forma cilíndrica bajo una velocidad de carga de 50 mm/min. Estas pruebas permiten utilizar muestras fabricadas en laboratorio o núcleos extraídos de campo. El diámetro de la muestra a ensayar debe ser de 150 mm. Sin embargo, el espesor de la misma depende del tamaño máximo nominal del agregado, si este es menor o igual a 19 mm, algo usual en Ecuador, entonces se recomienda un espesor de 62 ± 1 mm. No obstante, pequeñas variaciones del espesor podrán corregirse empleando las fórmulas adecuadas. Deben prepararse como mínimo tres muestras con un porcentaje de vacíos de aire de $7 \pm 0,5\%$ (típico porcentaje de vacíos con aire en pavimentos de carretera).

Todas las mezclas a ensayar deben ser sometidas a un proceso de acondicionamiento (envejecimiento) respetando la normativa AASHTO R30. Es decir, las mezclas fabricadas en laboratorio y compactadas en laboratorio (LMLC), deben ser calentadas a 135°C por 4 horas en horno antes de compactarse. Las mezclas fabricadas en planta y compactadas en laboratorio (PMLC), podrán ser compactadas directamente sin tiempo de calentamiento previo en horno, cuidando tener la temperatura de compactación adecuada.

Los aparatos básicos que se requieren para IDEAL-CT, son una prensa de carga con velocidad regulada, celdas de carga o anillo dinamométrico calibrado y cabezal para aplicar la tracción indirecta a la muestra de diámetro 150 mm. En la Figura 18 se muestra la configuración del cabezal.

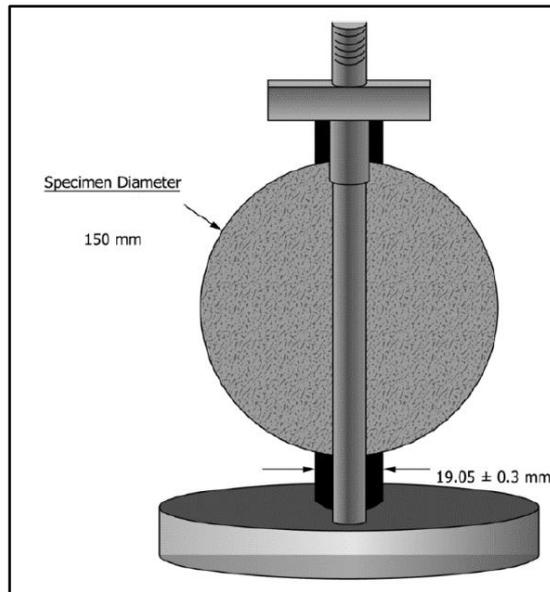


Figura 18. Cabezal tradicional para prueba de tracción indirecta.

Tomado de “Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design, Quality Control and Quality Assurance”. Por Zhou, F., 2019, Texas A&M Transportation Institute.

En la Figura 19 puede verse la máquina empleada en nuestro estudio. Como se observa, al no tener la misma un sistema de adquisición de datos automáticos, se tuvo que tomar un video de cada ensayo para de manera manual y cuidadosa determinar las lecturas de carga versus los desplazamientos y luego en una hoja de cálculo procesar la información. Se empleó una velocidad de aplicación de carga constante de 50 mm / min durante la ejecución de las pruebas.

Las muestras a ensayar pueden ser colocadas previamente en una cámara ambiental, que es de uso opcional, capaz de mantener las muestras a la temperatura de 25 °C u otra temperatura intermedia que se decida en función del clima de la región.



Figura 19. Máquina de tracción indirecta utilizada para la prueba IDEAL

2.8.3. Procedimiento para realizar la prueba

Según Zhou (2019), para realizar correctamente la prueba IDEAL se debe seguir los siguientes pasos:

- 1) Moldear de tres a cinco especímenes cilíndricos compactadas por impacto, con vacíos de aire con un $7\pm 0.5\%$. Antes de compactar la mezcla suelta, esta se envejece, puede ser a corto plazo, largo plazo y mediano plazo.
- 2) Acondicionar la muestra a temperatura de ensayo (25°C), en una cámara ambiental durante un tiempo hasta realizar la prueba.
- 3) Se inspecciona los accesorios, verificando la limpieza de estos. Para ejecutar el ensayo se coloca y alinea la muestra en el marco de carga,

después de eso se procede a cargar la probeta a una velocidad constante 50 mm/min hasta producir la ruptura. Ver Figura 20.

- 4) El sistema IDEAL-CT con su respectivo software registra, procesa y grafica la curva carga (KN) vs deformación (mm).

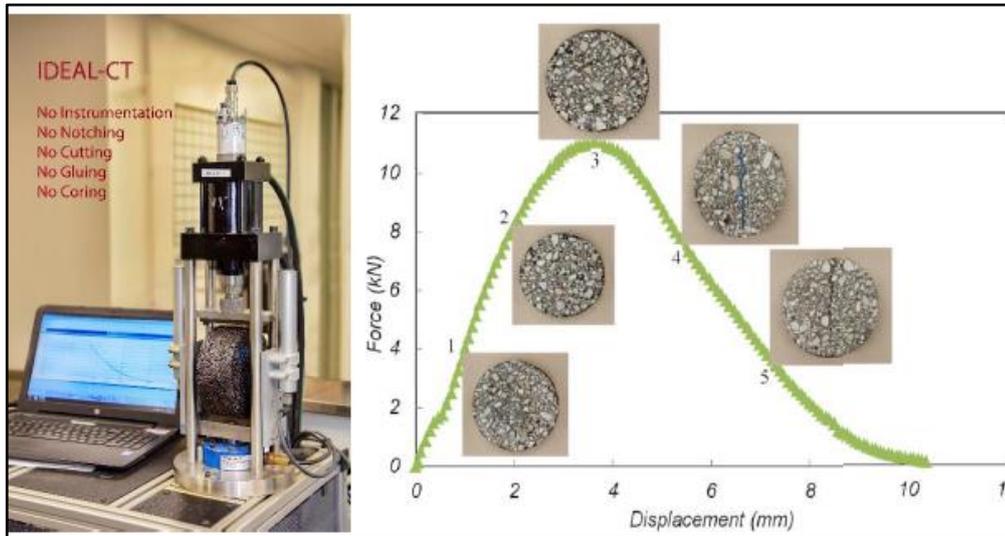


Figura 20. Esquema del software realizando la prueba IDEAL, mostrando el proceso de agrietamiento a lo largo de la prueba.

Tomado de “Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design, Quality Control and Quality Assurance”. Por Zhou, F., 2019, Texas A&M Transportation Institute.

- 5) Ya con la curva carga-deformación, se procede a determinar el trabajo de fractura (W_f), calculando el área bajo la curva que ya se obtuvo en el paso anterior o simplemente integrar la ecuación que genera dicha curva.
- 6) Una vez obtenido el trabajo de fractura, se procede a determinar la energía de fractura mediante la siguiente ecuación:

$$G_f = \frac{W_f}{D * t}$$

Donde:

G_f = energía de fractura (Joules/m²)

W_f = trabajo de fractura (Joules)

D =diámetro de la muestra o espécimen (mm)

t = espesor de la muestra o espécimen (mm)

- 7) La curva carga-deformación también da a conocer otros datos necesarios para estimar el índice de tolerancia de la prueba IDEAL C-T (Ver Figura 21), los cuales son las cargas y desplazamientos Post-pico al 65, 75 y 85% de la carga máxima (P_{max}), que se representan de la siguiente manera: cargas (PPP_{65} , PPP_{75} y PPP_{85}), desplazamientos (I_{65} , I_{75} y I_{85}), respectivamente. Con tales datos se puede precisar la pendiente en valor absoluto de la zona tangencial al 75% de la carga máxima posterior del pico (PPP_{75}), con la siguiente ecuación:

$$|m_{75}| = \frac{PPP_{85} - PPP_{65}}{I_{85} - I_{65}}$$

- 8) Ya con todos los parámetros mencionados en los pasos anteriores. Se procede a precisar el índice de tolerancia al agrietamiento (CTIndex) por medio de la siguiente ecuación:

$$CTIndex = \frac{t}{62} \times \frac{I_{75}}{D} \times \frac{Gf}{|m_{75}|} \times 10^6$$

Donde:

$t/62$ = es un factor de corrección para el espesor de la muestra

Los otros parámetros ya fueron mencionados a lo largo de esta sección.

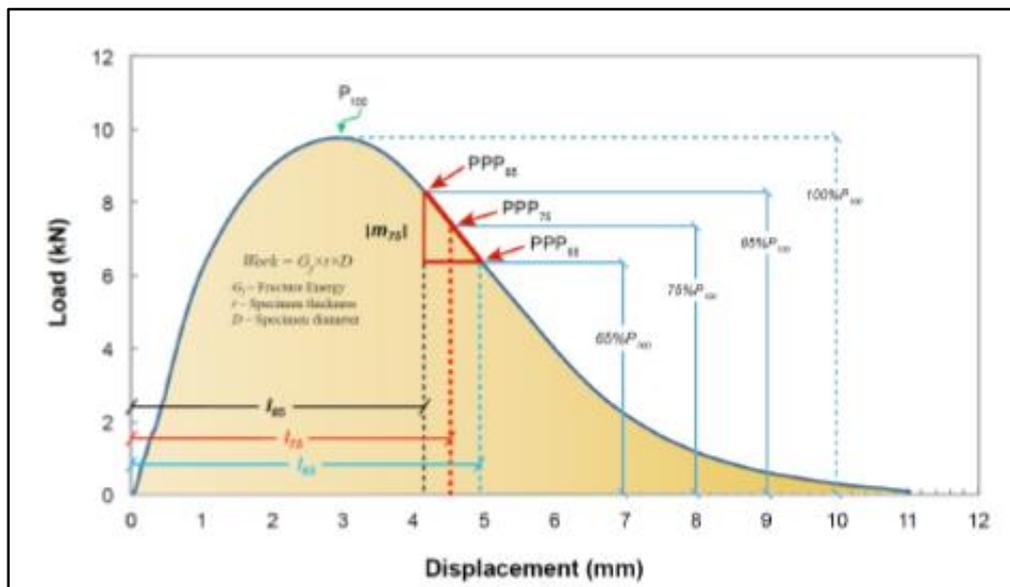


Figura 21. Ilustración de los puntos de cargas y sus respectivos desplazamientos durante la prueba IDEAL.

Tomado de “Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design, Quality Control and Quality Assurance”. Por Zhou, F., 2019, Texas A&M Transportation Institute.

2.8.4. Parámetro de agrietamiento CT-index

El nuevo parámetro de agrietamiento se basa de la conocida ley de París (Paris & Erdogan, 1963) y del trabajo que publicaron Bazant y Prat para la propagación de fisuras. Partiendo de las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dc}{dN} = A(KI)^n$$

$$\dot{c} = vc\left(\frac{G}{Gf}\right)^{n/2}$$

Donde:

- $\frac{dc}{dN}$ y \dot{c} = tasa de crecimiento de grietas
- Gf = energía de fractura.
- n = constante del material
- vc y A = constantes

Si se reemplaza G con $\frac{KI^2}{E}$, siendo KI el factor de intensidad de esfuerzo y E el módulo de elasticidad del material entonces:

$$\dot{c} = vc\left(\frac{KI^2}{GfxE}\right)^{n/2}$$

A continuación, se despeja las variables antes mencionadas por otras más conocidas llegando así a la misma ecuación con diferentes parámetros de mayor uso.

$$\dot{c} \approx vc\left(\frac{\left(\frac{2P}{\pi x D x t}\right)^2 x (f(c))^2}{Gfx \frac{P}{lxt}}\right)^{n/2}$$

Donde:

- D = diámetro de la muestra
- l = deformación vertical
- t = espesor de la muestra
- $f(c)$ = función de corte
- P = carga aplicada.

Después de una serie de simplificaciones y considerando los requisitos de una prueba de agrietamiento. Los investigadores del programa IDEA obtuvieron un nuevo parámetro de agrietamiento, considerando las ecuaciones y criterios ya mencionados e implementando en el mismo la energía de fractura de la muestra (Gf), siendo ese nuevo parámetro el CTIndex:

$$\text{CTIndex} = \frac{Gf}{P} x \frac{l}{D}$$

Para el caso de núcleos extraídos en campo, donde el espesor sea diferente a 62mm. Se utiliza un factor de corrección de espesor alterando a la fórmula de la siguiente manera:

$$\text{CTIndex} = \frac{t}{62} x \frac{Gf}{P} x \frac{l}{D}$$

Para seleccionar el punto crítico de la curva carga-desplazamiento del IDEAL-CT, generalmente se divide dicha curva en dos segmentos, tomando de base la carga pico (máxima). Conocidos como segmento de cargas antes del pico (Pre-Pico) y el segmento de cargas después del pico (Post-Pico). Donde los investigadores de la prueba IDEAL-CT examinaron varias curvas típicas cuidadosamente, en el que se llegó a la conclusión de que las macro fisuras se originan después de la carga máxima aplicada afirmando que el punto CTIndex crítico se centra en el segmento Post-Pico y que para determinar el valor promedio de las cargas en este segmento se utilizó el punto de inflexión, donde

según los estudios realizados por los investigadores, la carga se reduce al 75% de la carga máxima (PPP_{75}).

En resumen, la ecuación final para CTindex se muestra a continuación:

$$CTIndex = \frac{t}{62} \times \frac{I_{75}}{D} \times \frac{Gf}{|m_{75}|} \times 10^6$$

Capítulo III

3. Características de la mezcla asfáltica empleada

3.1. Generalidades

En este capítulo se analizará la mezcla asfáltica empleada en el estudio con la prueba de agrietamiento IDEAL, dando a conocer las características de sus componentes y el proceso de diseño de la mezcla asfáltica por el método Marshall, considerando parámetros volumétricos y resistentes. El tipo de asfalto utilizado es el AC-20 producido por la Refinería de Esmeraldas, empleado normalmente en el Ecuador. En el caso de los agregados minerales, se consideró oportuno trabajar con materiales comunes en el país, seleccionándose cantos rodados triturados y arena de río. Las pruebas a los agregados se realizaron en el laboratorio de la planta de asfalto de la empresa Hidalgo e Hidalgo S.A-Constructores, en el campamento del Km 26, y las correspondientes al asfalto y a las mezclas en el Laboratorio de Carreteras de UCSG.

3.2. Características del cemento asfáltico

El cemento asfáltico es un material con una composición muy compleja con propiedades cementantes y de naturaleza hidrocarbonada. Cuenta con un comportamiento reológico que depende de dos variables: la temperatura y el tiempo de aplicación de carga. Su estructura química se presenta en la Figura 22.

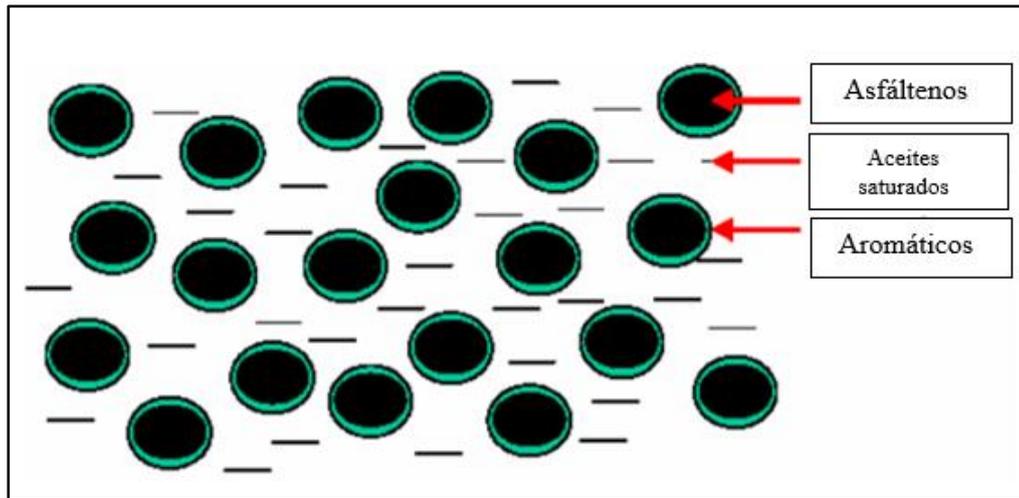


Figura 22. Estructura química del cemento asfáltico

Tomado de las clases de la asignatura de Pavimentos. UCSG. Ing. Rolando Vila, 2020.

La calidad de los cementos asfálticos se regula de acuerdo a su clasificación por viscosidad, la que se encuentra regulada por el Instituto Ecuatoriano de Normalización en la norma INEN-2015, Enmienda 1. En la Tabla 1, se pueden visualizar las exigencias y los resultados obtenidos. Se aprecia que si bien el ligante original cumple las exigencia para el asfalto AC 20, el residuo del RTFOT incumple las exigencias, mostrando una excesiva viscosidad y una baja ductilidad. Este comportamiento en general es usual en los asfaltos ecuatorianos producidos en Esmeraldas. En la Figura 23 se puede observar la gráfica Viscosidad vs Temperatura del cemento asfáltico.

Tabla 1. Resultados de ensayos por viscosidad del cemento asfáltico designado

| PROPIEDAD | UNIDAD | MÉTODO | EXIGENCIAS INEN | | RESULTADOS |
|--------------------------------------|--------------------|--------------|-----------------|-------------|---------------|
| | | | AC-20 | AC-30 | |
| LIGANTE ORIGINAL | | | | | |
| Viscosidad absoluta, 60 °C | Pa.s | ASTM D 2171 | 200 ± 40 | 300 ± 60 | 214 |
| Viscosidad cinemática, 135 °C | mm ² /s | ASTM D 2170 | 300 mín | 350 mín | 366 |
| Punto de inflamación Cleveland | °C | NTE INEN 808 | 232 mín | 232 mín | 299 |
| Solubilidad en tricloroetileno | % | NTE INEN 915 | 99,0 mín | 99,0 mín | NO |
| Gravedad específica 25°C/25°C | | ASTM D 70 | Informar | Informar | 1,012 |
| Penetración, 25 °C, 100 g, 5 s | 0,1 mm | ASTM D-5 | | | 74 |
| Punto de ablandamiento | °C | ASTM D-36 | | | 48,0 |
| Índice de penetración | | ASTM D 5/D5M | -1.5 a +1.0 | -1.5 a +1.0 | -0,8 |
| RESIDUO RTFOT (163°C, 85 min) | | | | | |
| Viscosidad absoluta, 60 °C | Pa.s | ASTM D 2171 | 800 máx | 1200 máx | 829,00 |
| Cambio de masa | % w/w | ASTM D 2872 | 1.0 máx | 1.0 máx | -0,27 |
| Ductilidad 25°C, 5 cm/min | cm | NTE INEN 916 | 50 mín | 40 mín | 38 |

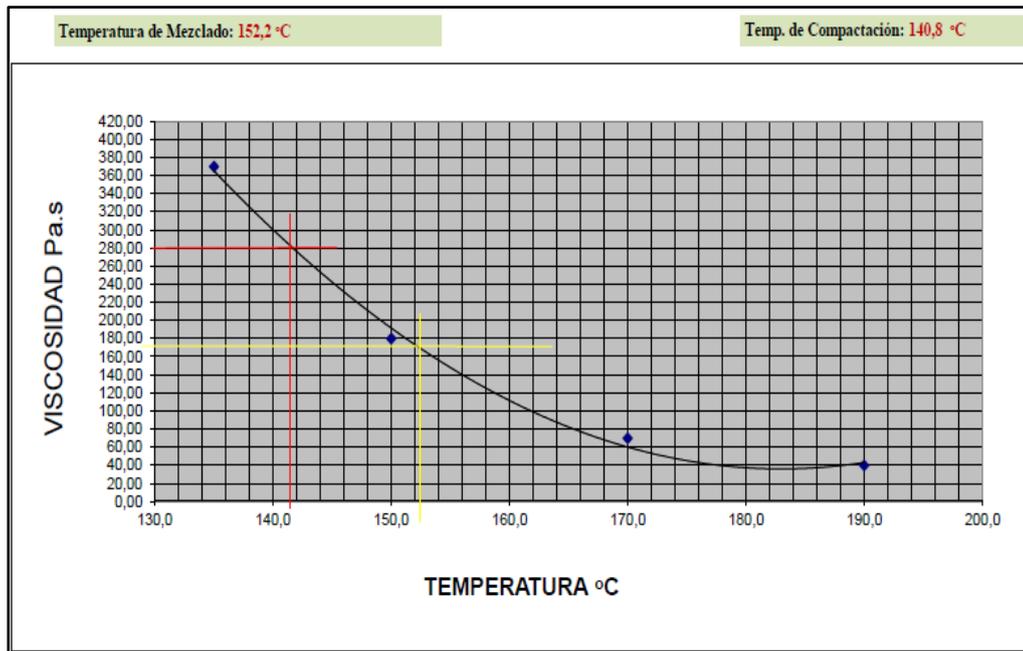


Figura 23. Gráfico Viscosidad-Temperatura

3.3. Características de los agregados minerales

Los agregados minerales son considerados como un conjunto de partículas inertes, provenientes de rocas fragmentadas que deben presentar ciertas características respecto a su tamaño, forma, dureza, limpieza, así como su adherencia con el asfalto. Las propiedades de los agregados minerales dependerán fundamentalmente de la fuente de procedencia, es decir, si es una cantera o una mina.

Los agregados son fundamentales para elaboración de las mezclas asfálticas, debido a que representan cerca del 95% del peso de la misma. Hay que mencionar que se utilizaron 3 diferentes fracciones de agregados para la posterior fabricación de la mezcla y todos cuentan con sus respectivos ensayos respetando las exigencias vigentes en el Ecuador (MTOP, 2002), que se pueden observar de manera muy resumida en la Tabla 2.

Tabla 2. Exigencias para prueba de control de agregados minerales.

Fuente: Ing. Rolando Vila, 2020. Clases de pavimentos, UCSG

| PRUEBAS | Agregados | |
|------------|--|--|
| | Gruesos | Finos |
| FORMA | Caras fracturadas (>80% -2) Planas y alargadas (<10%) | Angularidad (>45%) |
| DUREZA | Abrasión los ángeles (>40%) Sulfatos (<12%) | Sulfatos (<12%) |
| LIMPIEZA | Deletéreos (<1%) | Deletéreos (<1%) Equivalente de arena (>50%) Índice de plasticidad (<4%) |
| ADHERENCIA | Resistencia retenida ante el agua en prueba de tracción indirecta (>80%) Peladura de la mezcla en agua hirviendo (>95%) | |

Tamaño:

Los agregados minerales de las mezclas asfálticas se pueden clasificar según su tamaño de la siguiente manera:

- ✓ Agregado grueso: son aquellos agregados retenidos en el tamiz # 4, que cuentan con un diámetro superior a 4,75 mm.
- ✓ Agregado fino: al contrario que los agregados gruesos, el agregado fino pasa el tamiz # 4 (4,75 mm) pero se retienen en el tamiz # 200, alcanzado hasta los 0,075 mm de diámetro.
- ✓ Filler: son aquellos agregados pasantes del tamiz #200, contando con un bajo índice de plasticidad.

La mezcla diseñada en el presente trabajo consta de tres fracciones de agregados minerales que son: fracción de 19 mm (3/4 pulgadas), fracción de 9,5 mm (3/8 pulgadas) y arena de río. En la Tabla 3, se puede ver detalladamente los agregados minerales a emplear.

Tabla 3. Generalidades de los agregados minerales a emplear

| AGREGADO | TIPO : | CANTERA: | DOSIF: |
|----------|-------------|------------|--------|
| 1 | Piedra 3/4" | Km 26 | 25 |
| 2 | Piedra 3/8" | Km 26 | 65 |
| 3 | Arena | Río Chimbo | 10 |

100

En la Tabla 4, se podrá apreciar el cuadro de dosificación de los mismos para cumplir con la exigencia granulométrica correspondiente a una mezcla de tamaño máximo nominal de 12,5 mm (1/2 pulgada) de acuerdo al MTOP.

Tabla 4. Dosificación de agregados minerales para cumplir exigencias granulométricas

| ABERTURA DE TAMICES | | AG 1 | AG 2 | AG 3 | AG 1 | AG 2 | AG 3 | Granul. | ESPEC. 1/2" MOP 2002 | |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|--------------|----------------------|--------|
| No. | mm | 100 | 100 | 100 | 25 | 65 | 10 | combinada | Mínimo | Máximo |
| 3/4" | 19,00 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 25,0 | 65,0 | 10,0 | 100,0 | 100 | 100 |
| 1/2" | 12,70 | 74,4 | 100,0 | 100,0 | 18,6 | 65,0 | 10,0 | 93,6 | 90 | 100 |
| # 4 | 4,75 | 3,0 | 69,3 | 96,4 | 0,8 | 45,0 | 9,6 | 55,4 | 44 | 74 |
| # 8 | 2,36 | 0,0 | 50,0 | 93,4 | 0,0 | 32,5 | 9,3 | 41,8 | 28 | 58 |
| # 50 | 0,30 | 0,0 | 17,6 | 55,5 | 0,0 | 11,4 | 5,6 | 17,0 | 5 | 21 |
| # 200 | 0,10 | 0,0 | 9,0 | 4,9 | 0,0 | 5,9 | 0,5 | 6,3 | 2 | 10 |

En la Figura 24, se puede ver la curva abertura del tamiz vs el porcentaje pasante de la granulometría combinada. Considerar las líneas rojas de la gráfica como los límites superiores e inferiores que exige el MTOP, para contar con una granulometría de mezcla satisfactoria.

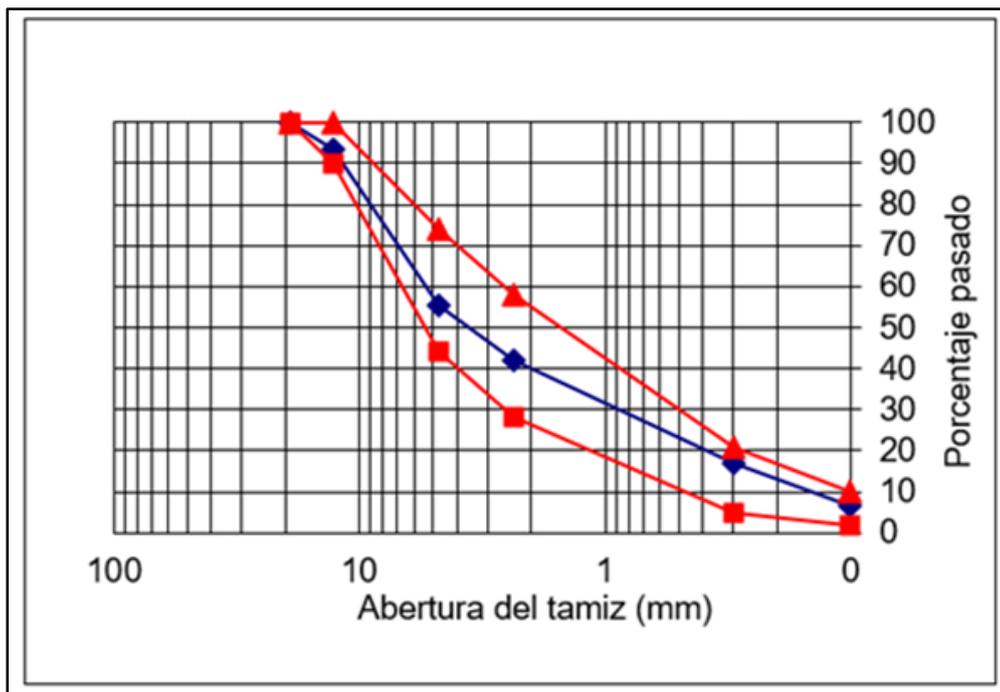


Figura 24. Gráfica granulométrica, abertura del tamiz vs porcentaje pasante

Forma:

La forma de los agregados minerales debe considerarse para la producción de mezclas debido a que es un parámetro que puede influir significativamente en la misma, en especial los procedentes de cantos rodados triturados. Los ensayos para valorar la forma son caras fracturadas, angularidad, así como planas y alargadas. En las Tablas 5, 6 y 7, se pueden observar los resultados de estas pruebas, realizadas de acuerdo a las normas ASTM. Puede apreciarse que cada una de las pruebas cumple satisfactoriamente las exigencias.

Tabla 5. Prueba de angularidad para agregados finos

| DETERMINACIÓN DE LA ANGULARIDAD AGREGADO FINO. | |
|--|---------|
| Norma ASTM C -1252 | |
| Método C | |
| | 1 |
| Peso del Cilindro. | 8,75 |
| Volumen del Cilindro. | 111,12 |
| Peso Agregado + Cilindro | 183,70 |
| Peso del Agregado | 159,32 |
| Gsb. del Agregado. | 2,669 |
| | U= 46,3 |
| Especificación: | >45 |
| Observaciones: | |

Tabla 6. Prueba de partículas largas y aplanadas en agregados gruesos

| DETERMINACION DE PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS. | | | |
|---|---------|------------|------------|
| Norma ASTM D - 4791 | | | |
| Tamiz | Masa | Masa | % |
| No. | Parcial | Plan/Alarg | Individual |
| 3/8" | 1526 | 0 | 0,00 |
| No. 4 | 1214 | 24 | 1,98 |
| Suma | | | 2,0 |

Tabla 7. Prueba de caras fracturadas en agregados gruesos

| DETERMINACIÓN DE CARAS FRACTURADAS. | | | |
|-------------------------------------|---------|-----------|------------|
| Norma ASTM D - 5821 | | | |
| Tamiz | Masa | Masa | % |
| No. | Parcial | Triturado | Individual |
| 3/8" | 1200 | 1185,00 | 98,8 |
| No. 4 | 305 | 303,60 | 99,5 |
| | | | |

Dureza:

Como ya se pudo observar en la Tabla 2, los ensayos que ayudan a determinar este parámetro de los agregados minerales son la abrasión y la durabilidad ante sulfatos. Este parámetro es fundamental para representar el rendimiento del agregado ya que un agregado con mayor dureza tendrá una mejor funcionalidad en servicio, otorgándoles un mayor tiempo de vida en cuanto a uso se refiere. En las Tablas 8 y 9, se puede notar que las pruebas para determinar la dureza de los agregados son satisfactorias.

Tabla 8. Prueba de abrasión de los ángeles a agregados minerales

| ENSAYO DE ABRASIÓN DE LOS ÁNGELES | | | |
|-----------------------------------|----------|---------------|-------|
| Norma ASTM C 131 | | Gradacion "C" | |
| TAMIZ | ORIGINAL | MASA FINAL | % |
| 1/4" | 2500 | | |
| 4" | 2500 | | |
| SUMA | 5.000 | 4.125 | 17,5% |
| Especificación | < 40 % | | |
| Observaciones: Triturado 1/2" | | | |

Tabla 9. Ensayo de sulfatos para durabilidad

| TRITURADO 3/4" | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------|-----------------------|-----------|--------|-------------------------|---------------|-------------|------------------------|-----------------|--------------|------------------|----------------|--------------|
| FRACCIÓN | TAMIZ | | GRADACIÓN DE LA MUESTRA ORIGINAL (%) | MASA ANTES DEL ENSAYO | | | MASA DESPUÉS DEL ENSAYO | | PÉRDIDA (%) | PÉRDIDA COMPENSADA (%) | ACCIÓN | | | | |
| | Pasante | Retenido | | Parcial (g) | Total (g) | Número | Tamices | Peso Ret. (g) | | | DESINTE-GRACIÓN | HENDI-MIENTO | DESMENU-ZAMIENTO | AGRIETA-MIENTO | DESCA-MACIÓN |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 90mm (3") | 63mm (2 1/2") | 0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 2 | 63mm (2 1/2") | 50mm (2") | 0,0 | 0,0 | 0 | 0 | 31,5mm (1 1/4") | 0 | | | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | 50mm (2") | 37,5mm (1 1/2") | | 0,0 | | | | | | | | | | | |
| 3 | 37,5mm (1 1/2") | 25mm (1") | 18,7 | 0,0 | 0 | 0 | 16mm (5/8") | 0 | | | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | 25mm (1") | 19mm (3/4") | | 0,0 | | | | | | | | | | | |
| 4 | 19mm (3/4") | 12,5 mm(1/2") | 25,3 | 670,0 | 1000 | - | 8mm (5/16") | 994 | 0,6 | 0,2 | - | - | - | - | |
| | 12,5 mm(1/2") | 9,5mm (3/8") | | 330,0 | | | | | | | | | | | |
| 5 | 9,5mm (3/8") | 4,75mm (N°4) | 56,0 | 300,0 | 300 | - | 4mm (N°5) | 296 | 1,3 | 0,7 | - | - | - | - | |
| TOTAL | | | 100,0 | | | | | | | 0,8 | | | | | |

| FRACCIÓN | TAMIZ | | GRADACIÓN DE LA MUESTRA ORIGINAL (%) | MASA ANTES DEL ENSAYO (g) | MASA DESPUÉS DEL ENSAYO (g) | PÉRDIDA (%) | PÉRDIDA COMPENSADA (%) | OBSERVACIONES |
|----------|---------------|---------------|--------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------|------------------------|---|
| | Pasante | Retenido | | | | | | |
| | 9,5mm (3/8") | 4,75mm (N°4) | 56,0 | 100,00 | 98,1 | 1,9 | 1,1 | La mezcla de agregados usados en este Diseño, ha perdido el 1,8 % de su consistencia causada en 5 ciclos. |
| 2 | 4,75mm (N°4) | 2,36mm (N°8) | 19,2 | 100,00 | 98,6 | 1,4 | 0,3 | |
| 3 | 2,36mm (N°8) | 1,18mm (N°16) | 13,8 | 100,00 | 97,9 | 2,1 | 0,3 | |
| 4 | 1,18mm (N°16) | ,600mm (N°30) | 12,1 | 100,00 | 98,3 | 1,7 | 0,2 | |
| 5 | ,600mm (N°30) | 300mm (N°50) | 10,5 | 100,00 | 97,7 | 2,3 | 0,2 | |
| TOTAL | | | | | | | 1,0 | |

Limpieza:

El presente parámetro se lo puede determinar mediante los ensayos deletéreos, equivalente de arena e índice de plasticidad, con la finalidad de que haya una buena interacción del agregado con el asfalto. En las Tablas 10 y 11, se puede verificar que el agregado a emplearse para la mezcla está dentro de los parámetros exigidos en limpieza. Vale destacar que los finos evaluados resultaron ser no plásticos.

Tabla 10. Prueba deletéreos en agregados minerales

| DETERMINACIÓN DE PARTÍCULAS DELETÉREAS | | | |
|---|------------|-----------------------|------|
| Norma ASTM C - 142 | | | |
| Material más fino que el Tamiz No. 200 | | | |
| Pasa Tamiz No 4 | | Partículas Deletéreas | |
| Peso seco antes | 2410 | Tamiz No 16 | 245 |
| Peso seco despues | 2225 | Peso Seco | 245 |
| % Mas fino Tamiz 200 | 7,7 | Deletereos | 0,00 |
| Partículas Friables del Agregado Grueso | | | |
| Tamiz | Peso Antes | Peso Despues | % |
| 3/4 - 3/8 | 2135 | 2135 | 0 |
| 3/8 - No 4 | 1082 | 1082 | 0 |

Tabla 11. Prueba Equivalente de arena en agregados minerales

| EQUIVALENTE DE ARENA | | |
|--|------------|------|
| Norma ASTM D-2419 | | |
| Ensayo No | 1 | 2 |
| Probeta No | 1 | 2 |
| Lectura Suspensión = A | 5,64 | 5,66 |
| Lectura Sedimento = B | 3,91 | 3,94 |
| Equivalente de Arena = $(B / A) * 100$ | 69,3 | 69,6 |
| Promedio (%) | 69,5% | |
| Especificado: | 50% Mínimo | |
| Observaciones: | | |

Adherencia:

Se define adherencia como el proceso de unión de diferentes partículas de los agregados del asfalto. Este parámetro determina la tendencia y el rendimiento de dos materiales distintos que pasaron a formar uno solo, dependiendo de propiedades físicas y químicas en el tiempo que permanezcan juntos dichos materiales (Packham, 1992). La adherencia ocurre entre el agregado mineral y el cemento asfáltico, en función de las propiedades de ambos materiales como por ejemplo su naturaleza, temperatura de mezclado, tratamientos previos, mineralogía, solicitudes aplicadas. (Gamba et al., 2004).

La adherencia consta de una capacidad de absorción la cual se requiere para proporcionar la cantidad de asfalto deseada. El agregado absorbe parte del asfalto restando partículas de ligadura en el mismo, hay que considerar que este proceso de absorción puede llevar a la mezcla a su falla, por tal motivo se hacen pruebas de resistencia retenida de tracción indirecta y ensayos de peladura de mezcla en agua hirviendo.

La prueba de daño en agua hirviendo (ASTM D 3625) realizada a la mezcla diseñada, proceso que se muestra en próximos numerales, mostró un recubrimiento del 100%, por lo que se considera que la mezcla no es susceptible al agua.

3.4. Gravedades específicas de los agregados

Para la determinación de las gravedades específicas (GE) del agregado grueso, donde se incluyen la GE “bulk” o bruta, la GE “SSS” (saturada con superficie seca), la GE aparente y la absorción de agua, se emplea la norma INEN 857, similar a la ASTM C 127. La muestra ya limpia se sumerge por aproximadamente un día en agua con el objetivo de llenar sus poros. El siguiente paso es retirar la muestra del agua y secarla superficialmente para poder pesarla. Después de eso se coloca la muestra en un horno a 110°C para secarla completamente y así poder determinar su masa.

Para la determinación de las gravedades específicas (GE) del agregado fino se emplea el procedimiento descrito en la norma INEN 856, similar a la ASTM C 128. El procedimiento es diferente al de los gruesos e involucra el empleo de un picnómetro para muestra de 500 gr de agregado fino (procedimiento gravimétrico) así como un molde y pisón para pruebas de humedad superficial (condición saturada superficialmente seca). A continuación, se muestra la determinación de las GE de los agregados empleados.

3.4.1. AGREGADOS GRUESOS

Gravedad específica para agregado de 3/4’’

Material pasante del tamiz de 1/2’’ y retenido del tamiz # 4

- A: peso en el aire de la muestra secada en el horno = 3049 g
- B: peso en el aire de la muestra saturada con superficie seca = 3084 g
- C: peso en el agua de la muestra saturada = 1937 g

$$\text{Gravedad específica de masa} = \frac{A}{(B-C)} = \frac{3049}{(3084-1937)} = 2,658$$

$$\text{Gravedad específica de S.S.S} = \frac{B}{(B-C)} = \frac{3084}{(3084-1937)} = 2,689$$

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{(A-C)} = \frac{3049}{(3049-1937)} = 2,742$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{(B-A)}{A} = \frac{(1937-3049)}{(3049)} = 1,15\%$$

Gravedad específica para agregado de 3/8''

Material pasante del tamiz de 3/8'' y retenido del tamiz # 4

- A: peso en el aire de la muestra secada en el horno = 2200 g
- B: peso en el aire de la muestra saturada con superficie seca = 2224 g
- C: peso en el agua de la muestra saturada = 1404 g

$$\text{Gravedad específica de masa} = \frac{A}{(B-C)} = \frac{2200}{(2224-1404)} = 2,683$$

$$\text{Gravedad específica de S.S.S} = \frac{B}{(B-C)} = \frac{2224}{(2224-1404)} = 2,712$$

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{(A-C)} = \frac{2200}{(2200-1404)} = 2,764$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{(B-A)}{A} = \frac{(2224-2200)}{(2200)} = 1,09\%$$

3.4.2. AGREGADOS FINOS

Gravedad específica para agregado de 3/8''

- A: peso en el aire de la muestra secada en el horno = 493,55 g
- V: peso en picnómetro = 500 g
- W: peso del agua = 313,00 g

$$\text{Gravedad específica de masa} = \frac{A}{(V-W)} = \frac{493,55}{(500-313,00)} = 2,639$$

$$\text{Gravedad específica de S.S.S} = \frac{V}{(V-W)} = \frac{500}{(500-313,00)} = 2,674$$

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{(V-W)} - (V - A) = \frac{493,55}{(500-313,00)} - (500 - 493,55) = 2,733$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{(V-A)}{A} = \frac{(500-493,55)}{(493,55)} = 1,31\%$$

Gravedad específica para arena de río

- A: peso en el aire de la muestra secada en el horno = 492,75 g
- V: peso en picnómetro = 500 g
- W: peso del agua = 308,92 g

$$\text{Gravedad específica de masa} = \frac{A}{(V-W)} = \frac{492,75}{(500-308,92)} = 2,579$$

$$\text{Gravedad específica de S.S.S} = \frac{V}{(V-W)} = \frac{500}{(500-308,92)} = 2,617$$

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{(V-W)} - (V - A) = \frac{492,75}{(500-308,92)} - (500 - 492,75) = 2,68$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{(V-A)}{A} = \frac{(500-492,75)}{(492,75)} = 1,47\%$$

En la Tabla 12, se podrá observar un resumen de las gravedades específicas mostradas anteriormente de cada uno de los agregados con sus respectivos porcentajes.

Tabla 12. Resumen de las gravedades específicas de los agregados utilizados para la mezcla

| GRAVEDADES ESPECÍFICAS | 3/4" | 3/8" | Arena |
|------------------------|-------|-------|-------|
| % | 25 | 65 | 10 |
| Bulk | 2,658 | 2,639 | 2,579 |
| S.S.S. | 2,689 | 2,674 | 2,617 |
| Aparente | 2,742 | 2,733 | 2,680 |
| % Absorción | 1,15% | 1,31 | 1,47% |

3.5. Diseño de la mezcla asfáltica

El diseño de la mezcla asfáltica a emplearse en este trabajo se llevó a cabo bajo la metodología Marshall, que es la más utilizada en el Ecuador, debido a su relativa facilidad, en especial para la confección de las probetas (denominadas usualmente briquetas), y a la gran experiencia acumulada con el método. Se respetó cada uno de los criterios de diseño que conlleva esta metodología.

El método Marshall es aplicable únicamente a mezclas asfálticas en caliente con graduación densa que cuenten con tamaños máximos en los agregados hasta 25mm (1pulgada). Esta metodología emplea probetas estandarizadas con 100 mm (4") de diámetro, las mismas que se fabrican por un procedimiento específico (ASTM D1559), para calentar, mezclar y compactar la combinación asfalto-agregados. Las probetas confeccionadas cuentan con el 100% de la densidad relativa. En nuestro estudio se aplicaron 75 golpes por cada cara con el martillo Marshall, que corresponde al tráfico pesado.

Para el diseño se parte de confeccionar juegos de probetas con diferentes contenidos de asfalto, a los que se les determinarán parámetros volumétricos y resistentes según el método. El criterio de diseño para seleccionar el porcentaje óptimo de asfalto lo establece el porcentaje que garantiza un 4 % de vacíos de aire en la mezcla, siempre que cumpla con las restantes exigencias que se muestran en la Tabla 13. De no cumplirse dichas exigencias, se deberá rediseñar la mezcla.

Tabla 13. Criterios de diseño de mezclas asfálticas, metodología Marshall

Tomado de “Diseño de Mezclas Asfálticas Mediante el Método SUPERPAVE” por Chimborazo, W., 2012. Obtenido de: <https://docplayer.es/66309813-Universidad-de-cuenca-resumen.html>.

| Método Marshall | Tráfico ligero | | Tráfico medio | | Tráfico pesado | |
|---|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|
| | Carpeta y base | | carpeta y base | | carpeta y base | |
| Criterio de mezcla | Min | Máx | Min | Máx | Min | Máx |
| Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes | 35 | | 50 | | 75 | |
| Estabilidad, (N) (lb) | 3336 | | 5338 | | 8006 | |
| | 750 | --- | 1200 | --- | 1800 | --- |
| Flujo, (0.25 mm) (0.01 in) | 8 | 18 | 8 | 16 | 8 | 14 |
| Porcentaje de vacíos | 3 | 5 | 3 | 5 | 3 | 5 |
| Porcentaje de vacíos en los agregados minerales | Ver Tabla 2.2 | | | | | |
| Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto | 70 | 80 | 65 | 78 | 65 | 75 |

3.6. Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica

Para garantizar un comportamiento adecuado de la mezcla es importante tomar en consideración las proporciones volumétricas tanto del asfalto como de los componentes de los agregados los cuales son parámetros fundamentales en la estructura general de la mezcla.

3.6.1. Gravedad específica neta de los agregados (Gsb)

Una vez obtenidas las gravedades específicas “bulk” de todos los agregados, se calcula la gravedad específica neta de los agregados combinados en la mezcla (Gsb), aplicando la expresión:

$$Gsb = \frac{100}{\sum \frac{\% \text{ del agregado}}{GE \text{ bulk individual}}} = \frac{100}{\frac{25}{2,658} + \frac{65}{2,639} + \frac{10}{2,579}} = 2,638$$

3.6.2. Gravedad específica aparente de los agregados (Gsa)

Se obtiene de manera similar al anterior.

$$Gsa = \frac{100}{\sum \frac{\% \text{ del agregado}}{Gsa \text{ individual}}} = \frac{100}{\frac{25}{2,472} + \frac{65}{2,733} + \frac{10}{2,68}} = 2,730$$

3.6.3. Gravedad específica efectiva de los agregados (Gse)

La gravedad específica efectiva del agregado toma en consideración todos aquellos espacios vacíos del agregado, con excepción de los que embeben el asfalto. Hay que considerar que este parámetro debe estar entre la gravedad específica neta y la gravedad específica aparente (Ver Tabla 14). De no darse este caso, dicho valor deberá asumirse como incorrecto por no constatar dentro de ese rango y habría que inspeccionar para verificar el error. La fórmula para estimar la gravedad específica efectiva es la siguiente:

$$Gse = \frac{100 - Pb}{\frac{100}{Gmm} - \frac{Pb}{Gb}}$$

Siendo:

Gmm = Gravedad específica máxima (se verá en el próximo numeral y corresponde a una mezcla con un contenido de asfalto conocido para su cálculo)

Pb = Contenido de asfalto

Gb = Gravedad específica del asfalto

Ejemplo. Considerando una mezcla con Pb de 6% y Gmm correspondiente de 2,438, entonces:

$$Gse = \frac{100 - Pb}{\frac{100}{Gmm} - \frac{Pb}{Gb}} = \frac{100 - 6}{\frac{100}{2,438} - \frac{6}{1,012}} = 2,679$$

Tabla 14. Resumen de las gravedades específicas de la muestra

| |
|------------------------------------|
| Gsa > Gse > Gsb |
| 2,730 > 2,679 > 2,638 |

3.6.4. Gravedad específica máxima teórica de la mezcla (Gmm)

El procedimiento para este ensayo se lo puede encontrar en la normativa ASTM D 2041. Básicamente es la relación entre el peso de una mezcla sin compactar a temperatura ambiente (25°C), y el peso de un volumen igual de agua. Este parámetro se lo obtiene mediante la prueba Rice y para determinarlo se considera la siguiente expresión:

$$Gmm = \frac{C}{A - (B - C)}$$

Siendo:

A = peso picnómetro + agua (gr)

B = peso picnómetro + agua + mezcla (gr)

C = peso de la mezcla suelta (gr)

La prueba realizada para 6% en peso de asfalto en la mezcla dio como resultado un Gmm igual a 2,438.

Otra forma de calcular Gmm es utilizar la siguiente ecuación que implica conocer previamente Gse. Por ejemplo y para Pb igual a 6%, se tendrá:

$$Gmm = \frac{100}{\frac{Ps}{Gse} + \frac{Pb}{Gb}} = \frac{100}{\frac{94}{2,679} + \frac{6}{1,012}} = 2,438$$

3.6.5. Porcentaje de asfalto absorbido (Pba)

Este parámetro se representa como un porcentaje de masa del agregado mas no del porcentaje total de masa de la mezcla a emplearse. Pba se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Pba = 100 * \frac{Gse - Gsb}{Gsb * Gse} * Gb$$

$$Pba = 100 * \frac{2,679 - 2,638}{2,638 * 2,679} * 1,011 = 0,60\%$$

3.6.6. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA)

Se lo define como aquellos espacios de aire entre las partículas del agregado en una mezcla en caliente compactada, que incluye los huecos o vacíos de aire y el volumen efectivo del asfalto, manifestado como un porcentaje total de volumen. (Asphalt Institute, 1997). Si el VMA es mas elevado quiere decir que el espacio libre entre partículas para la capa asfáltica será mayor. Sin embargo, si los valores del VMA son mínimos y mientras mayor espesor posea la capa de asfalto, la mezcla será más duradera.

El VMA, expresa un porcentaje del volumen bruto de la mezcla compactada y se representa mediante la siguiente ecuación:

$$VMA = 100 - \frac{Gmb * Ps}{Gsb}$$

Siendo:

Gsb = Gravedad específica bruta del agregado.

Gmb = Gravedad específica bruta de las briquetas compactadas.

Ps = Porcentaje o contenido de agregados.

3.6.7. Porcentaje de vacíos de aire en mezcla compactada

(Pa)

Corresponden al porcentaje total de espacios de aire en relación con el volumen total de la mezcla compactada. La metodología Marshall permite un porcentaje de vacíos que oscile entre 3% y 5% para el diseño de mezclas asfálticas fabricadas y compactadas en laboratorio, mientras que aquellas mezclas compactadas en obra se permite el 97% de la densidad en laboratorio correspondiente a la mezcla diseñada con 4% de vacíos. (Asphalt Institute, 1997).

La fórmula utilizada para el cálculo es la siguiente:

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

Siendo:

Gmm = Gravedad específica máxima teórica de la mezcla.

Gmb = Gravedad específica de una mezcla compactada.

3.6.8. Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto (VFA)

Se lo define como el porcentaje de vacíos de las partículas del agregado mineral (VMA) que este rebosante de asfalto efectivo y a su vez representa el volumen de asfalto efectivo que contiene la mezcla asfáltica (Icaza & Mera, 2018). Se la identifica con la siguiente fórmula:

$$VFA = \frac{100 * (VMA - Pa)}{VMA}$$

Siendo:

Pa = Porcentaje de vacíos con aire en mezcla asfáltica compactada.

VMA = Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

3.7. Parámetros resistentes

La prueba de estabilidad y flujo Marshall se basa en sumergir completamente las probetas previamente confeccionadas en un baño María a 60°C de temperatura, entre 20 y 30 minutos. Una vez culminado este proceso la probeta estaría lista para su ensayo entre las mordazas de la maquina Marshall, con una velocidad de aplicación de carga de 50 mm/min. Una vez que obtenga la estabilidad, usualmente en libras o kN, hay que corregir dicho valor en función de la variación de altura o volumen de la probeta ensayada, según la Tabla 15. Estas pruebas para obtener los parámetros resistentes son especificadas en la norma ASTM D6927.

La estabilidad representa la carga máxima a compresión de la probeta ensayada bajo el procedimiento Marshall. Por otro lado, el flujo o fluencia se la define como la variación del diámetro de la probeta desde la carga cero hasta la carga de rotura, medido usualmente en centésimas de pulgada. Es muy importante destacar que las exigencias para ambos parámetros dependen del tráfico que se espera circule por la capa asfáltica construida con dicha mezcla, siendo el punto de partida para esta consideración el número de golpes por cara para confeccionar las probetas, que puede variar de 35 a 75.

Puede darse el caso que las mezclas asfálticas puedan tener valores elevados de estabilidad pero inferiores en flujo, este caso en las mezclas asfálticas se conoce como mezclas rígidas o frágiles. En cambio aquellas mezclas con un valor de flujo Marshall elevado son propensas a tener problemas de deformación bajo cargas de tráfico constantes. (Asphalt Institute, 1992).

Tabla 15. Factores de corrección de estabilidad

Recuperado de: <https://es.slideshare.net/UCGcertificacionvial/diseo-de-mezclas-mtodo-marshall>

| Volumen de la briqueta cm ³ | Espesor aproximado de la briqueta en cm | Factor de corrección |
|--|---|----------------------|
| 200-213 | 2.54 | 5.56 |
| 214-225 | 2.70 | 5.00 |
| 226-237 | 2.86 | 4.55 |
| 238-250 | 3.02 | 4.17 |
| 251-264 | 3.17 | 3.85 |
| 265-276 | 3.33 | 3.57 |
| 277-289 | 3.49 | 3.33 |
| 290-301 | 3.65 | 3.03 |
| 302-316 | 3.81 | 2.78 |
| 317-328 | 3.97 | 2.50 |
| 329-340 | 4.13 | 2.27 |
| 341-353 | 4.29 | 2.08 |
| 354-367 | 4.44 | 1.92 |
| 368-379 | 4.60 | 1.79 |
| 390-392 | 4.76 | 1.67 |
| 393-405 | 4.92 | 1.56 |

| Volumen de la briqueta cm ³ | Espesor aproximado de la briqueta en cm | Factor de corrección |
|--|---|----------------------|
| 406-420 | 5.08 | 1.47 |
| 421-431 | 5.24 | 1.39 |
| 432-443 | 5.40 | 1.32 |
| 444-456 | 5.56 | 1.25 |
| 457-470 | 5.71 | 1.19 |
| 471-482 | 5.87 | 1.14 |
| 483-495 | 6.03 | 1.09 |
| 496-508 | 6.19 | 1.04 |
| 509-522 | 6.35 | 1.00 |
| 523-535 | 6.51 | 0.96 |
| 536-546 | 6.67 | 0.93 |
| 547-559 | 6.82 | 0.89 |
| 560-573 | 6.98 | 0.86 |
| 574-585 | 7.14 | 0.83 |
| 586-598 | 7.30 | 0.81 |
| 599-610 | 7.46 | 0.78 |
| 611-625 | 7.62 | 0.76 |

3.8. Resultados obtenidos

En la Tabla 16, se muestra un resumen con todos los parámetros mostrando las propiedades de la mezcla. Vale destacar que además es necesario en el procedimiento graficar la variación del porcentaje de asfalto con los respectivos parámetros resistentes y volumétricos que generen.

Tabla 16. Resumen de propiedades de la mezcla

| NUMERO DE GOLPES POR LADO: | | 75 | | GRAV. ESPEC. EFEC. AGREGADO (Gse): | | 2,679 | | ANILLO = | | 7,406613 | | 12,69187 | | | |
|-----------------------------------|--------------|----------------|---------|------------------------------------|-----------|----------|-------|---|-----------------|----------|----------|----------------------|---------|-----------|--------------|
| GRAVEDAD ESPECIFICA DE C.A. (Gb): | | 1,0110 | | C.A. ABSORBIDO POR EL AGREG (Pba): | | 0,60 | | CONSTANTE DE CALIBRACION *LECTURA* | | | | | | | |
| PESO ESPECIFICO DE LOS AGREGADOS: | | 2,638 (Gsb) | | | | | | | | | | | | | |
| Mezcla No. | % DE ASFALTO | Peso en gramos | | | VOL (cm³) | DENSIDAD | | Volumen % Total | | % V.M.A. | % V.F.A. | ESTABILIDAD EN LBS. | | | Flujo 1/100* |
| | | SECO EN AIRE | EN AGUA | S.S.S. EN AIRE | | BULK | RICE | AGREGADOS | VACIOS CON AIRE | | | FACTOR DE CORRECCION | LECTURA | CORREGIDA | |
| 1 | | 1216 | 696 | 1219 | 523 | 2,325 | | | | | | 0,96 | 380 | 2714 | 10 |
| 2 | | 1221 | 703 | 1225 | 522 | 2,339 | | | | | | 1,00 | 400 | 2975 | 10 |
| 3 | | 1200 | 692 | 1206 | 514 | 2,335 | | | | | | 1,00 | 370 | 2753 | 11 |
| % C.A. | 4,5 | | | | | 2,333 | 2,494 | 84,47 | 6,46 | 15,53 | 58,42 | | | 2814 | 10,3 |
| 4 | | 1248 | 723 | 1251 | 528 | 2,364 | | | | | | 0,96 | 445 | 3176 | 11 |
| 5 | | 1286 | 742 | 1289 | 547 | 2,351 | | | | | | 0,89 | 450 | 2978 | 12 |
| 6 | | 1212 | 695 | 1214 | 519 | 2,335 | | | | | | 1,00 | 375 | 2790 | 11 |
| % C.A. | 5,0 | | | | | 2,350 | 2,475 | 84,64 | 5,05 | 15,36 | 67,11 | | | 2981 | 11,3 |
| 7 | | 1221 | 710 | 1222 | 512 | 2,385 | | | | | | 1,00 | 425 | 3161 | 13 |
| 8 | | 1251 | 725 | 1253 | 528 | 2,369 | | | | | | 0,96 | 440 | 3141 | 14 |
| 9 | | 1224 | 706 | 1226 | 520 | 2,354 | | | | | | 1,00 | 445 | 3309 | 13 |
| % C.A. | 5,5 | | | | | 2,369 | 2,456 | 84,89 | 3,53 | 15,11 | 76,64 | | | 3203 | 13,3 |
| 10 | | 1261 | 737 | 1262 | 525 | 2,402 | | | | | | 0,96 | 550 | 3923 | 15 |
| 11 | | 1246 | 729 | 1247 | 518 | 2,405 | | | | | | 1,00 | 515 | 3827 | 16 |
| 12 | | 1235 | 719 | 1235 | 516 | 2,393 | | | | | | 1,00 | 450 | 3346 | 16 |
| % C.A. | 6,0 | | | | | 2,400 | 2,438 | 85,54 | 1,55 | 14,46 | 89,29 | | | 3699 | 15,7 |
| 13 | | 1155 | 671 | 1156 | 485 | 2,381 | | | | | | 1,09 | 440 | 3566 | 17 |
| 14 | | 1275 | 743 | 1276 | 533 | 2,392 | | | | | | 0,96 | 505 | 3603 | 18 |
| 15 | | 1243 | 722 | 1244 | 522 | 2,381 | | | | | | 1,00 | 435 | 3235 | 18 |
| % C.A. | 6,5 | | | | | 2,385 | 2,420 | 84,54 | 1,45 | 15,46 | 90,62 | | | 3468 | 17,7 |

Tabla 17. Resumen de los parámetros con su respectivo % de asfalto

| % ASFALTO | ESTABILIDAD (lbs) | FLUJO (0.01") | PESO UNITARIO (Kg/m³) | % VACÍOS EN AGREGADO | % VACIOS MEZCLA | % VACIOS RELLENOS |
|-----------|----------------------|------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------|----------------------|
| 4,5% | 2814 | 10,3 | 2333 | 15,53 | 6,46 | 58,42 |
| 5,0% | 2981 | 11,3 | 2350 | 15,36 | 5,05 | 67,11 |
| 5,5% | 3203 | 13,3 | 2369 | 15,11 | 3,53 | 76,64 |
| 6,0% | 3699 | 15,7 | 2400 | 14,46 | 1,55 | 89,29 |
| 6,5% | 3468 | 17,7 | 2385 | 15,46 | 1,45 | 90,62 |

Se toma de referencia la Tabla 17, para graficar cada uno de los distintos parámetros, los que pueden observarse en las siguientes figuras.

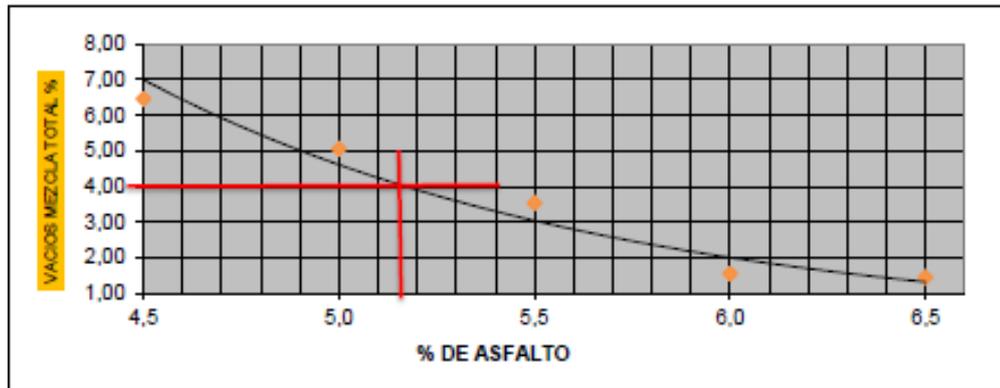


Figura 25. Gráfica % de asfalto vs % de vacíos de la mezcla

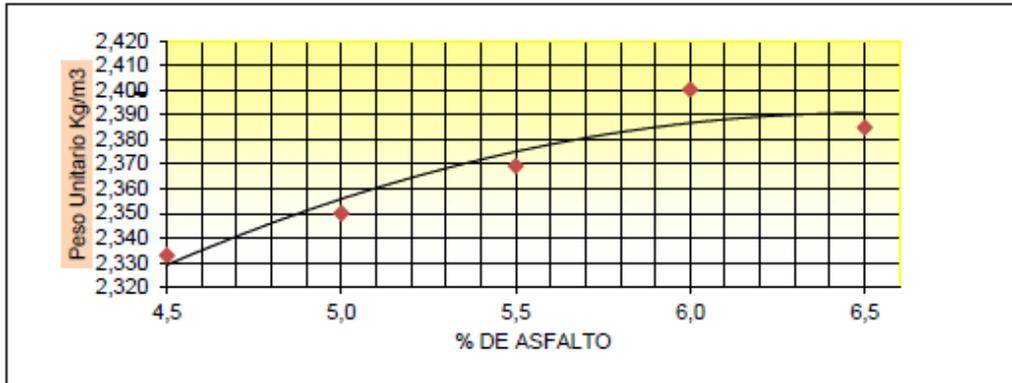


Figura 26. Gráfica % de asfalto vs Peso Unitario

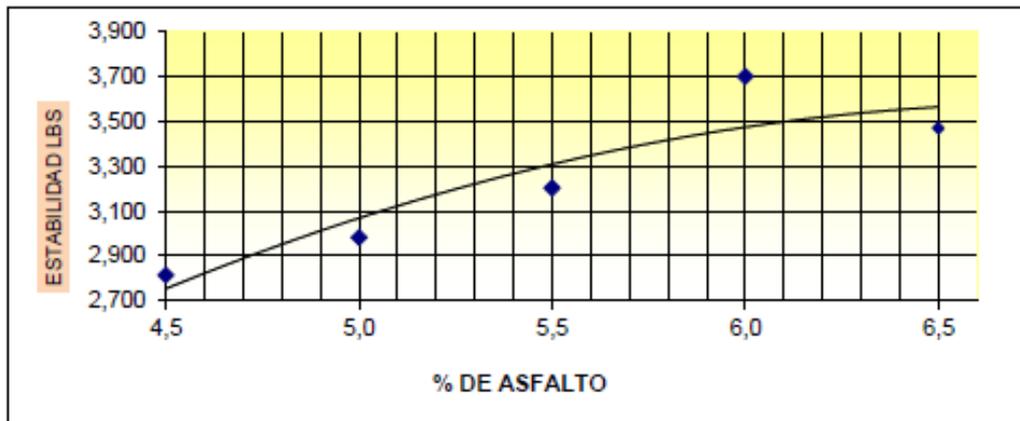


Figura 27. Gráfica % de asfalto vs Estabilidad

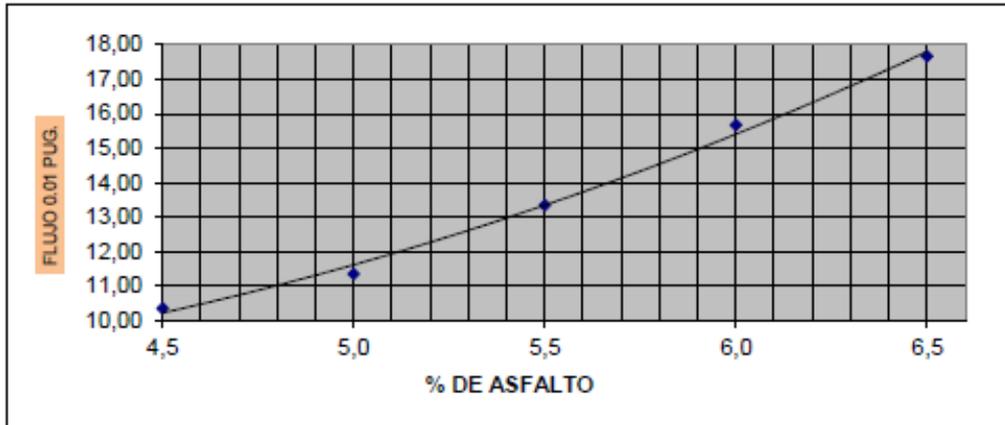


Figura 28. Gráfica % de asfalto vs Flujo

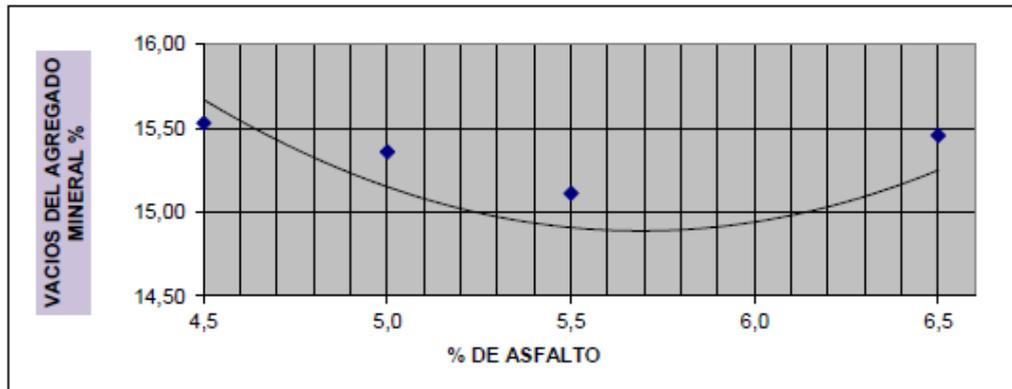


Figura 29. Gráfica % de asfalto vs % de vacíos del agregado

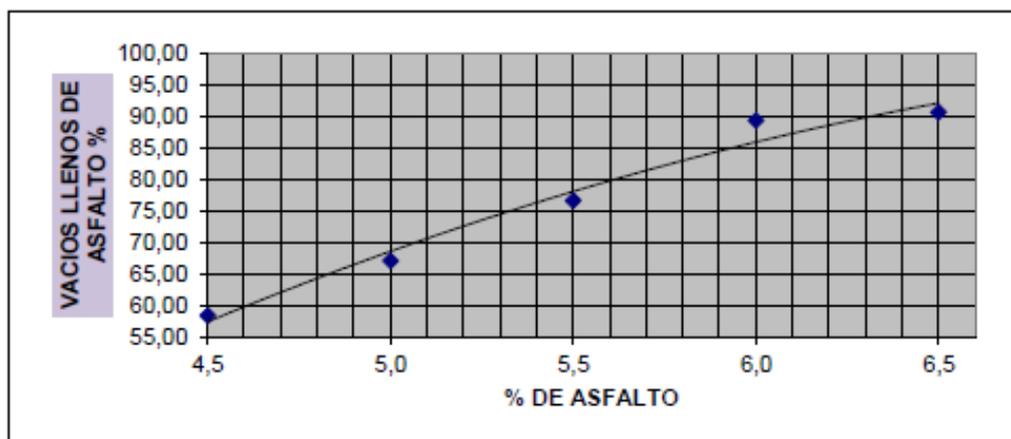


Figura 30. Gráfica % de asfalto vs % de vacíos llenos de asfalto

En la Figura 25, se puede determinar que para el 4% de vacíos, de acuerdo al procedimiento de diseño Marshall, el porcentaje de asfalto es de 5,15%. Este valor es el referente para chequear si con el mismo se cumplen las restantes exigencias, en nuestro estudio para tráfico pesado. De ser así, dicho contenido pudiera considerarse como el porcentaje óptimo de asfalto. En la Tabla 18, se muestra un resumen de todos los parámetros obtenidos en la mezcla para el contenido de asfalto de 5,15%, con sus respectivas exigencias.

Tabla 18. Resumen de los valores obtenidos de la mezcla con sus exigencias

| Propiedades | Valor obtenido | Exigencias |
|--------------------|------------------------|--------------------------|
| Estabilidad | 3150 lbs (14012 N) | > 1800 lbs (>8000 N) |
| Flujo | 12 pulg/100 (3,05 mm) | 8-14 pulg/100 (2-3,5 mm) |
| Peso Unitario | 2362 kg/m ³ | N.E |
| Vacíos en mezcla | 4% | 3 - 5 % |
| Vacíos en agregado | 15,10% | > 13% |
| Vacíos de relleno | 72% | 65 - 75 % |

Capítulo IV

4. Trabajo experimental para la prueba IDEAL de agrietamiento

4.1. Introducción

Se presentan a continuación los detalles de todo el trabajo experimental para la realización de las pruebas de agrietamiento IDEAL y de los módulos de rigidez con equipo NAT, sobre probetas de 150 y 100 mm de diámetro respectivamente. Las pruebas se desarrollaron sobre probetas compactadas por impacto en compactador automático, como se observa en la Figura 31, con los aditamentos respectivos y garantizando un porcentaje de vacíos con aire de $7 \pm 0,5\%$. Esto implicó trabajos previos para determinar el número adecuado de golpes por cara.

Previamente a la compactación, la mezcla asfáltica fue sometida a un proceso de envejecimiento, tal como se explica en el próximo numeral.



Figura 31. Compactador automático

4.2. Niveles de envejecimiento a emplear

Corto plazo: De acuerdo con la norma AASHTO R30-02 (2010) se establece para las mezclas preparadas en el laboratorio y compactadas en el laboratorio, un acondicionamiento colocando la mezcla en bandejas a 135°C por 4 horas antes de compactar y en el caso de mezclas fabricadas en planta compactar directamente, como fue precisamente nuestro caso.

Largo plazo: Si bien la norma AASHTO R30-02 (2010) establece el envejecimiento en horno de las probetas ya compactadas con mezclas tanto de planta como de laboratorio, luego de ser sometidas al acondicionamiento previo a corto plazo, por un tiempo de 120 horas (5 días) a 85°C, investigaciones posteriores han indicado que el envejecimiento térmico que se obtiene no es uniforme en las probetas. Por esta razón, se decidió emplear las recomendaciones del NCHRP Research Report 919 (2019), que establece un acondicionamiento calentando dicha mezcla en horno a 85°C por 120 horas (5 días) antes de compactar. Ver Figura 32.



Figura 32. Bandejas con mezclas para su envejecimiento

Mediano plazo: Se decidió incluir este plazo, que no está normado, buscando una mejor comprensión y análisis de los resultados. El procedimiento será similar al largo plazo, pero aplicándose para ello un tiempo de 72 horas (3 días).

4.3. Porcentaje de vacíos en las probetas a ensayar

En las Tablas 19 y 20, se muestran los resultados de las gravedades específicas brutas de las probetas confeccionadas, tanto las de 150 mm de diámetro para las pruebas IDEAL, como las de 100 mm para las pruebas de módulos.

Tabla 19. Valores de Gmb y Pa para probetas de diámetro 150 mm

| PROBETAS DE 150 mm DE DIÁMETRO | | | |
|--|--------------------|----------------------|--------------------|
| Gmm (RICE) | 2,529 | | |
| Gravedad específica bruta de la mezcla compactada (Gmb) | | | |
| NO. | Corto Plazo | Mediano Plazo | Largo Plazo |
| 1 | 2,354 | 2,347 | 2,345 |
| 2 | 2,356 | 2,348 | 2,346 |
| 3 | 2,348 | 2,350 | 2,345 |
| Promedio | 2,353 | 2,348 | 2,345 |
| Porcentaje de vacios en la mezcla compactada (Pa) | | | |
| NO. | Corto Plazo | Mediano Plazo | Largo Plazo |
| 1 | 6,92 | 7,20 | 7,28 |
| 2 | 6,84 | 7,16 | 7,24 |
| 3 | 7,16 | 7,08 | 7,28 |
| Promedio | 6,97 | 7,14 | 7,26 |

Tabla 20. Valores de Gmb y Pa para probetas de diámetro 100 mm

| PROBETAS DE 100 mm DE DIÁMETRO | | | |
|--|--------------------|----------------------|--------------------|
| Gmm (RICE) | 2,526 | | |
| Gravedad específica bruta de la mezcla compactada (Gmb) | | | |
| NO. | Corto Plazo | Mediano Plazo | Largo Plazo |
| 1 | 2,347 | 2,347 | 2,343 |
| 2 | 2,345 | 2,344 | 2,343 |
| 3 | 2,346 | 2,346 | 2,344 |
| Promedio | 2,346 | 2,346 | 2,343 |
| Porcentaje de vacios en la mezcla compactada (Pa) | | | |
| NO. | Corto Plazo | Mediano Plazo | Largo Plazo |
| 1 | 7,09 | 7,09 | 7,24 |
| 2 | 7,17 | 7,21 | 7,24 |
| 3 | 7,13 | 7,13 | 7,21 |
| Promedio | 7,13 | 7,14 | 7,23 |

El valor de Pa más pequeño evaluado fue de 6,84% y el más alto de 7,28%. Vale destacar que las probetas de cada tipo, es decir, diámetros diferentes, fueron confeccionadas en diferentes días, por lo que los valores del Rice variaron ligeramente. El promedio para Pa para las 18 mediciones fue de 7,15%, con un coeficiente de variación de 1,62%.

4.4. Realización de la prueba de agrietamiento IDEAL

Esta prueba ya fue explicada en detalle en el Capítulo 2 de este estudio, por lo que se puntualizarán los aspectos manejados en nuestro caso en particular. Lo más importante es que si bien se utilizó una prensa con velocidad de carga ajustada a 50 mm/min, con un cabezal de tracción indirecta para probetas de 150 mm, por no contarse con algún sistema electrónico para registrar la relación carga-desplazamiento, se optó por la variante de registrar en forma de video todo el ensayo y luego procesar las lecturas de tiempo y lecturas del dial del anillo dinamométrico, obtenidas de cada video, para mediante hoja de cálculo Excel, llegar a graficar la curva carga-desplazamiento. Ver Figura 33.

El procesamiento de esta información debe ser muy cuidadoso, con la ventaja de que puede repetirse el video en cuestión tantas veces como sea necesario. Debe tomarse la lectura del dial de carga en el momento exacto que aparece cada segundo en la imagen.



Figura 33. Realización de la prueba IDEAL

Un ejemplo del procesamiento de los resultados se presenta a continuación en la Tabla 21.

Tabla 21. Cuadro con procesamiento de resultados en Probeta 1 envejecida a corto plazo

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------------|------------|---------------------|--------------------|-------------------|-------------|------------|
| Muestra | Tiempo (s) | Desp. vertical (mm) | Desp. correg. (mm) | Lect. Anillo (mm) | CARGA (lbs) | CARGA (kN) |
| 1 | 8 | 6,7 | 0,0 | 0 | 0 | 0,0 |
| Corto Plazo | 9 | 7,5 | 0,8 | 0,053 | 408 | 1,8 |
| | 10 | 8,3 | 1,7 | 0,129 | 984 | 4,4 |
| | 11 | 9,2 | 2,5 | 0,184 | 1399 | 6,2 |
| | 12 | 10,0 | 3,3 | 0,217 | 1648 | 7,3 |
| | 13 | 10,8 | 4,2 | 0,224 | 1700 | 7,6 |
| | 14 | 11,7 | 5,0 | 0,199 | 1512 | 6,7 |
| | 15 | 12,5 | 5,8 | 0,128 | 976 | 4,3 |
| | 16 | 13,3 | 6,7 | 0,087 | 666 | 3,0 |
| | 17 | 14,16 | 7,5 | 0,060 | 461 | 2,1 |
| | 18 | 14,99 | 8,3 | 0,041 | 318 | 1,4 |
| | 19 | 15,83 | 9,2 | 0,026 | 204 | 0,9 |
| | 20 | 16,66 | 10,0 | 0,019 | 151 | 0,7 |
| | 21 | 17,49 | 10,8 | 0,003 | 30 | 0,1 |

Los datos obtenidos del video corresponden a las columnas 2 y 5. El primer valor de la columna 2 en segundos, corresponde al último número de segundos con lectura cero en el dial de carga. La columna 3 corresponde al cálculo del desplazamiento vertical en milímetros que provoca el tiempo medido en segundos, o sea, la columna 3 se obtiene multiplicando por 0,833 los valores de la columna 2.

La columna 4 muestra el desplazamiento corregido, es decir, se ajustará siempre el desplazamiento de partida como cero. La columna 6 es la carga calculada en libras de acuerdo con los factores de calibración de la prensa. En la columna 7 están transformados dichos valores a kilo Newtons, multiplicando la columna 6 por 0,00444823. Los resultados permiten graficar las curvas carga-desplazamiento, empleando los valores de las columnas 7 y 4.

4.5. Resultados obtenidos

En las Figuras 34 a 42, se observan las curvas obtenidas en todas las pruebas IDEAL realizadas, así como el trabajo en las mismas para calcular el Índice de Tolerancia al Agrietamiento (CT_{Index}), lo que aparece resumido en las Tablas 22 a 30.

Probeta 2

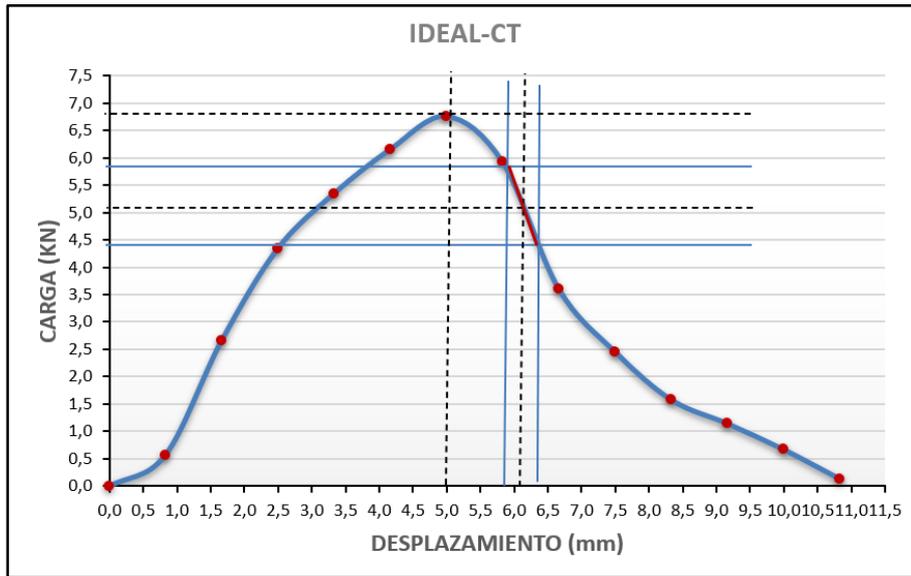


Figura 35. Curva carga – deslocamiento. Probeta 2 CP

Tabla 23. Resultados obtenidos. Probeta 2 CP

| | |
|-----------------------------|------|
| Wf (Joules) | 34,4 |
| D (mm) | 150 |
| t (mm) | 65 |
| Gf (Joules/m ²) | 3526 |

| | DESP (mm) | CARGA (kN) |
|-------------|------------|-------------|
| P100 | 5,0 | 6,80 |
| P85 | 5,8 | 5,8 |
| P65 | 6,4 | 4,4 |
| P75 | 6,1 | 5,1 |

| | |
|----------|------|
| m75 = | 2,27 |
| CTindex= | 66,3 |

Probeta 3

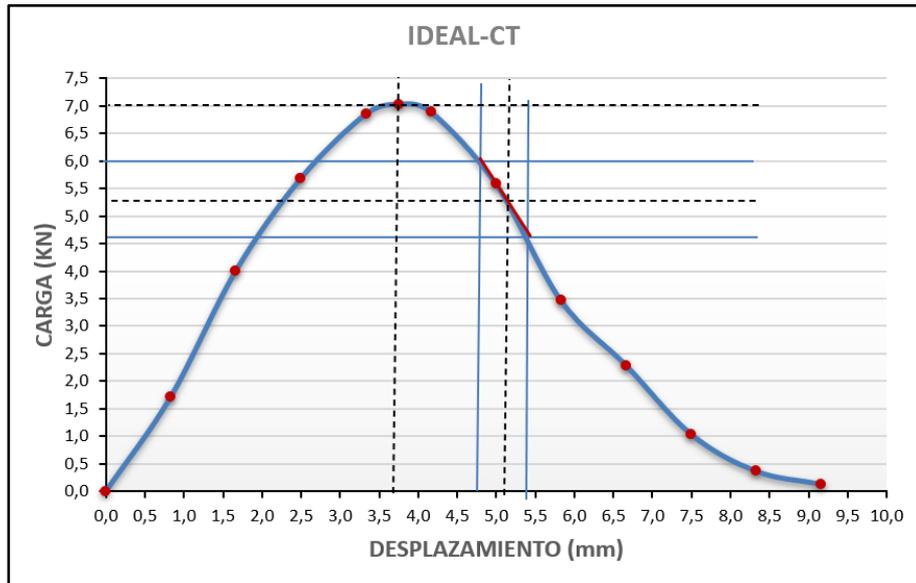


Figura 36. Curva carga – deslocamento. Probeta 3 CP

Tabla 24. Resultados obtenidos. Probeta 3 CP

| | |
|-----------------------------|------|
| Wf (Joules) | 31,7 |
| D (mm) | 150 |
| t (mm) | 65 |
| Gf (Joules/m ²) | 3250 |

| | DESP (mm) | CARGA (kN) |
|-------------|------------|-------------|
| P100 | 3,7 | 7,00 |
| P85 | 4,75 | 6,0 |
| P65 | 5,4 | 4,6 |
| P75 | 5,1 | 5,3 |

| | |
|----------|------|
| m75 = | 2,15 |
| CTindex= | 53,8 |

4.5.2. Mediano plazo

Probeta 1

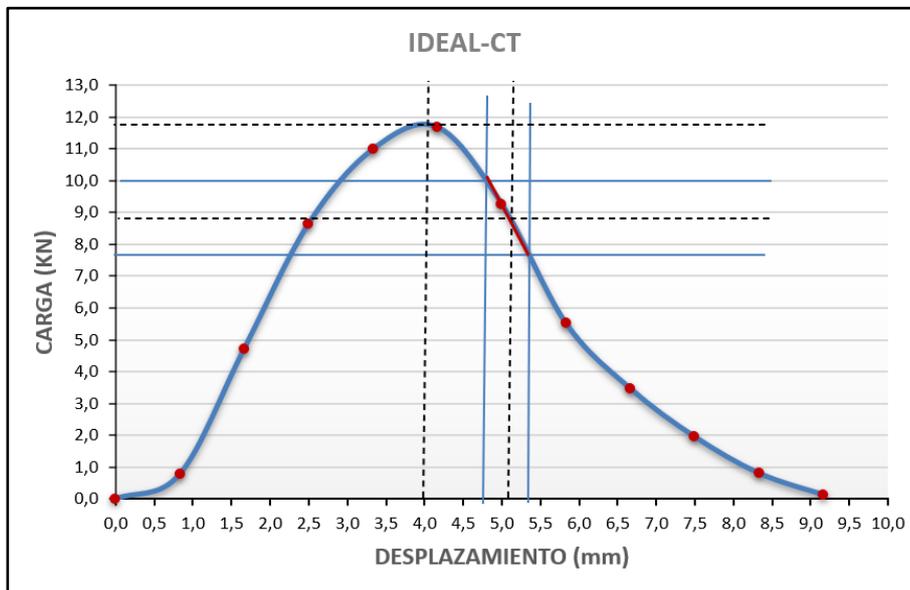


Figura 37. Curva carga – desplazamiento. Probeta 1 MP

Tabla 25. Resultados obtenidos. Probeta 1 MP

| | |
|-----------------------------|------|
| Wf (Joules) | 48,2 |
| D (mm) | 150 |
| t (mm) | 65 |
| Gf (Joules/m ²) | 4942 |

| | DESP (mm) | CARGA (kN) |
|-------------|------------|--------------|
| P100 | 4,0 | 11,80 |
| P85 | 4,75 | 10,0 |
| P65 | 5,35 | 7,7 |
| P75 | 5,1 | 8,9 |

| | |
|----------|------|
| m75 = | 3,93 |
| CTindex= | 44,8 |

Probeta 2

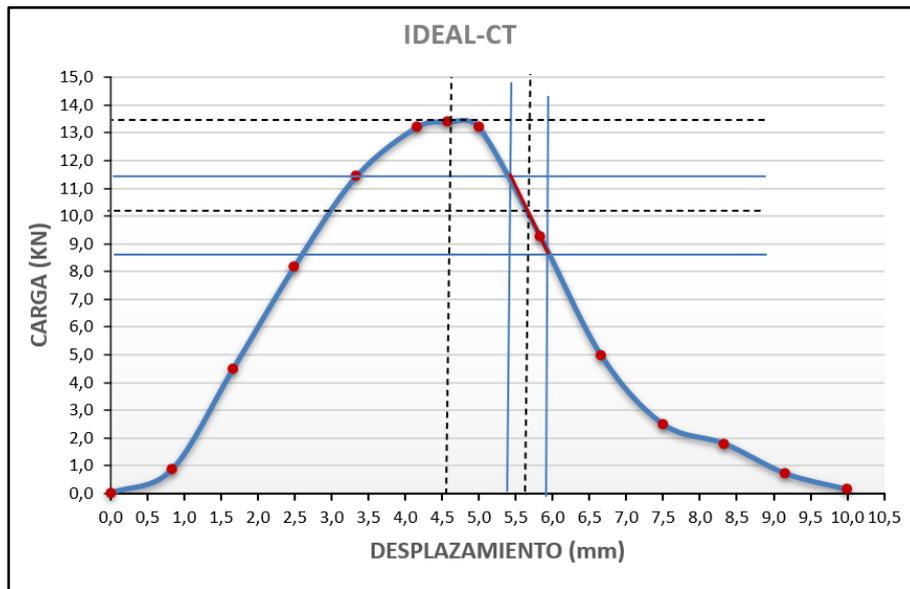


Figura 38. Curva carga – deslocamento. Probeta 2 MP

Tabla 26. Resultados obtenidos. Probeta 2 MP

| | |
|-----------------------------|------|
| Wf (Joules) | 58,9 |
| D (mm) | 150 |
| t (mm) | 63 |
| Gf (Joules/m ²) | 6229 |

| | DESP (mm) | CARGA (kN) |
|-------------|------------|--------------|
| P100 | 4,6 | 13,40 |
| P85 | 5,4 | 11,4 |
| P65 | 5,9 | 8,7 |
| P75 | 5,1 | 10,1 |

| | |
|----------|------|
| m75 = | 5,36 |
| CTindex= | 40,1 |

Probeta 3

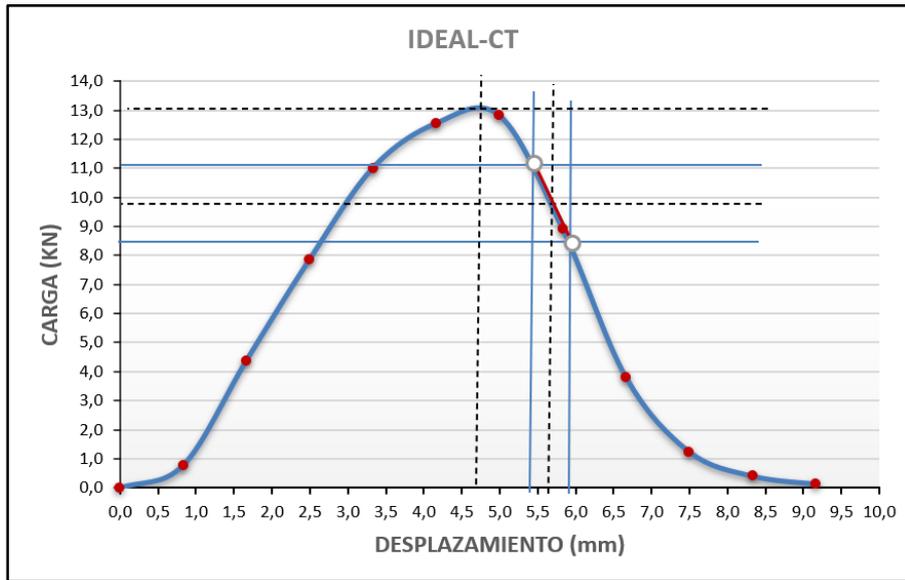


Figura 39. Curva carga – deslocamiento. Probeta 3 MP

Tabla 27. Resultados obtenidos. Probeta 3 MP

| | |
|-----------------------------|------|
| Wf (Joules) | 53,1 |
| D (mm) | 150 |
| t (mm) | 63 |
| Gf (Joules/m ²) | 5624 |

| | DESP (mm) | CARGA (kN) |
|-------------|------------|--------------|
| P100 | 4,7 | 13,00 |
| P85 | 5,4 | 11,1 |
| P65 | 5,9 | 8,5 |
| P75 | 5,6 | 9,8 |

| | |
|----------|------|
| m75 = | 5,20 |
| CTindex= | 41,0 |

4.5.3. Largo plazo

Probeta 1

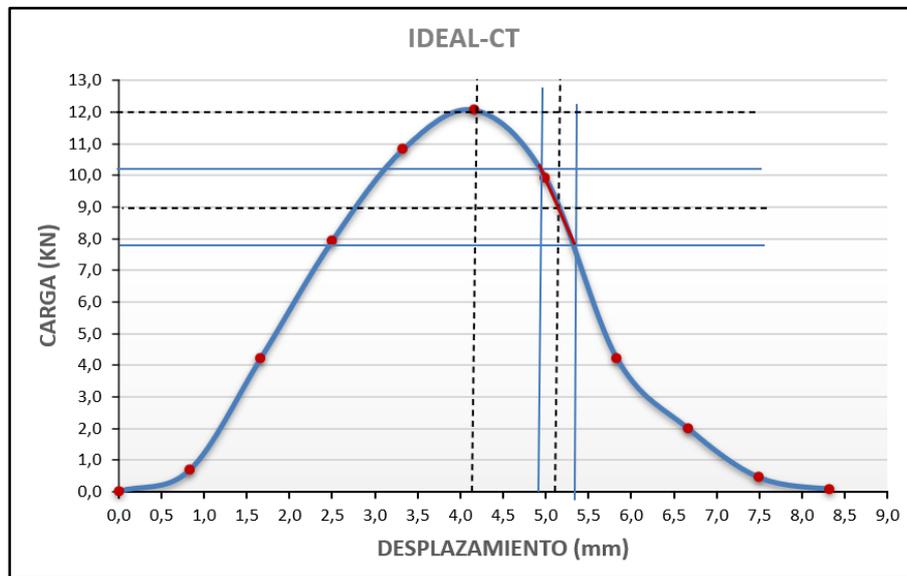


Figura 40. Curva carga – deslocamento. Probeta 1 LP

Tabla 28. Resultados obtenidos. Probeta 1 LP

| | |
|-----------------------------|------|
| Wf (Joules) | 43,5 |
| D (mm) | 150 |
| t (mm) | 65 |
| Gf (Joules/m ²) | 4460 |

| | DESP (mm) | CARGA (kN) |
|-------------|------------|--------------|
| P100 | 4,2 | 12,00 |
| P85 | 4,9 | 10,2 |
| P65 | 5,35 | 7,8 |
| P75 | 5,1 | 9,0 |

| | |
|----------|------|
| m75 = | 5,33 |
| CTindex= | 29,8 |

Probeta 2

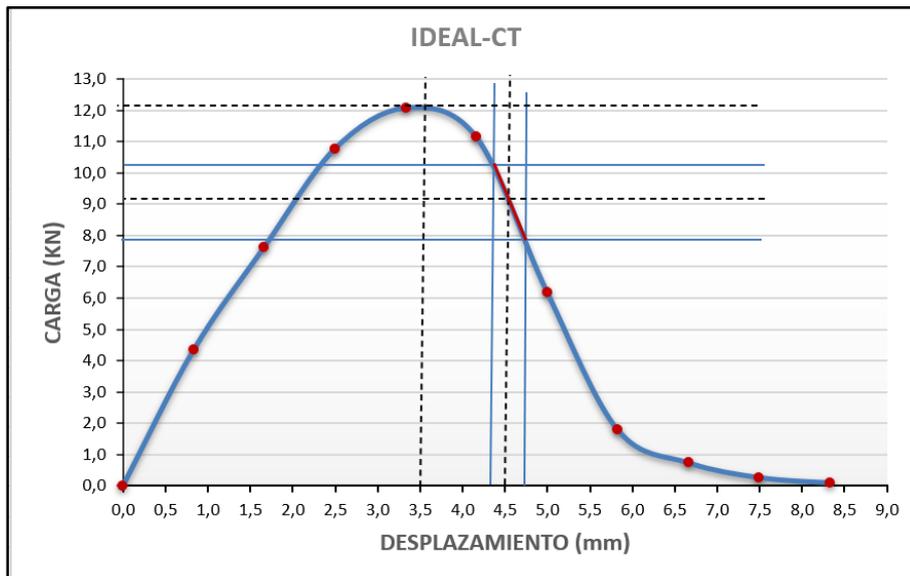


Figura 41. Curva carga – deslocamento. Probeta 2 LP

Tabla 29. Resultados obtenidos. Probeta 2 LP

| | |
|-----------------------------|------|
| Wf (Joules) | 45,8 |
| D (mm) | 150 |
| t (mm) | 65 |
| Gf (Joules/m ²) | 4699 |

| | DESP (mm) | CARGA (kN) |
|-------------|------------|--------------|
| P100 | 3,5 | 12,10 |
| P85 | 4,35 | 10,3 |
| P65 | 4,7 | 7,9 |
| P75 | 4,5 | 9,1 |

| | |
|----------|------|
| m75 = | 6,91 |
| CTindex= | 21,4 |

Probeta 3

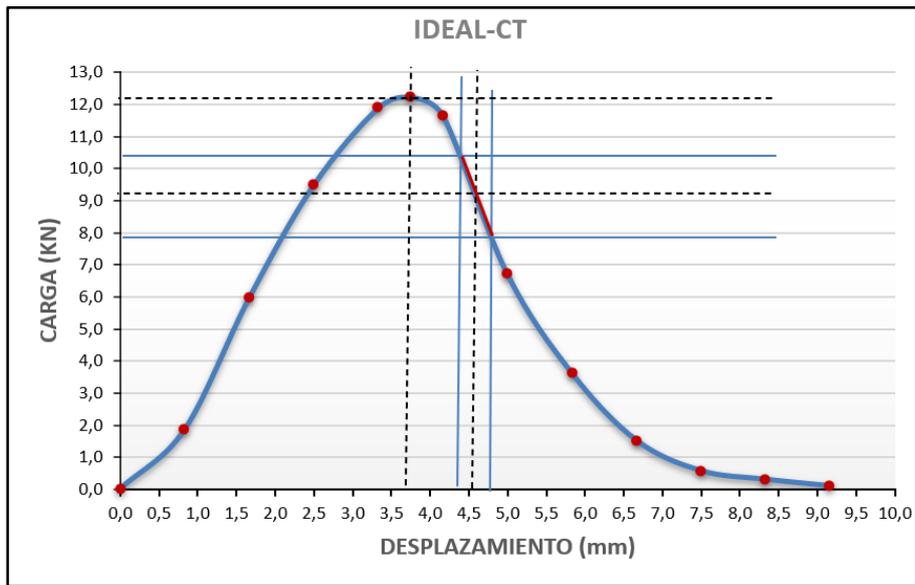


Figura 42. Curva carga – deslocamento. Probeta 3 LP

Tabla 30. Resultados obtenidos. Probeta 3 LP

| | |
|-----------------------------|------|
| Wf (Joules) | 44,8 |
| D (mm) | 150 |
| t (mm) | 65 |
| Gf (Joules/m ²) | 4592 |

| | DESP (mm) | CARGA (kN) |
|-------------|------------|--------------|
| P100 | 3,7 | 12,20 |
| P85 | 4,4 | 10,4 |
| P65 | 4,75 | 7,9 |
| P75 | 4,55 | 9,2 |

| | |
|----------|------|
| m75 = | 6,97 |
| CTindex= | 20,9 |

4.5.4. Resumen de resultados

En la Tabla 31 y en la Figura 43, se muestran todos los resultados obtenidos en la prueba IDEAL.

Tabla 31. Resumen de valores CT Index calculados

| ÍNDICE DE TOLERANCIA AL AGRIETAMIENTO (CT Index) | | | |
|--|-------------|---------------|-------------|
| NO. | Corto Plazo | Mediano Plazo | Largo Plazo |
| 1 | 54,2 | 44,8 | 29,8 |
| 2 | 66,3 | 40,1 | 21,4 |
| 3 | 53,8 | 41,0 | 20,9 |
| Promedio | 58,1 | 42,0 | 24,0 |
| Desviación Estándar | 7,1 | 2,5 | 5,0 |
| Coefficiente de variación | 12,2 | 5,9 | 20,8 |

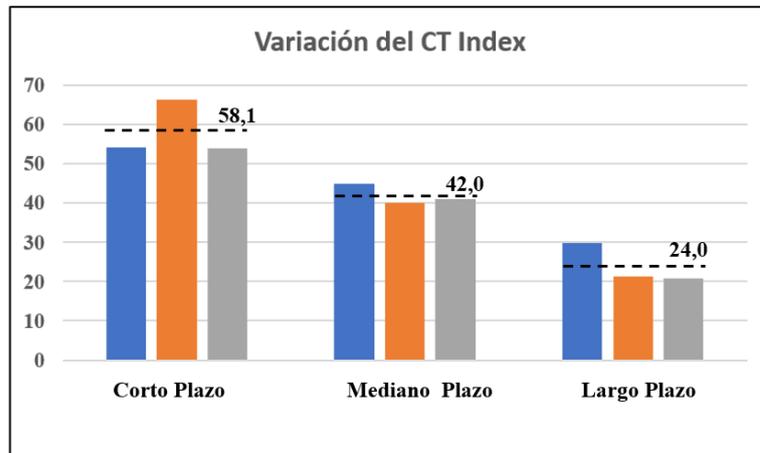


Figura 43. Variación del CT Index con los niveles de envejecimiento

4.6. Realización de la prueba de módulo de rigidez

Esta prueba se realizó con el equipo Nottingham Asphalt Mix Tester (NAT) del Laboratorio de Carreteras de la UCSG. El NAT aplica las cargas mediante un sistema neumático con servo-control, midiéndose la fuerza aplicada por el transductor de la celda de carga. El equipo utiliza una computadora junto con un sistema digital de adquisición de datos y control de sistema, que permite desarrollar la prueba y procesar la información a través de un programa específico.

Para la determinación del módulo de rigidez se empleó el procedimiento indicado por el Comité Europeo de Normalización (EN 12697-26, 2012). La evaluación del módulo con el equipo NAT se realizó a la temperatura de 20°C, empleando un nivel de deformación controlada de 5 micrones y ondas sinusoidales con intervalo de tiempo entre el inicio del pulso de carga y el punto en el que la carga es máxima, de 0,12 segundos. Ver Figura 44.



Figura 44. Equipo NAT en una prueba de módulo de rigidez

Fuente: Vila, R. Estudios y propuestas sobre la calidad de los asfaltos y de las mezclas asfálticas en Ecuador. 2017. UCSG. pp. 49.

4.7. Resultados obtenidos en las pruebas de módulos de rigidez

En la Figura 45, aparece una imagen representativa de la salida de resultados que ofrece el equipo NAT. En este caso la prueba corresponde a la Probeta 1 con envejecimiento a corto plazo. En el Anexo 2 del trabajo se incluyen las imágenes de todas las pruebas de módulos.

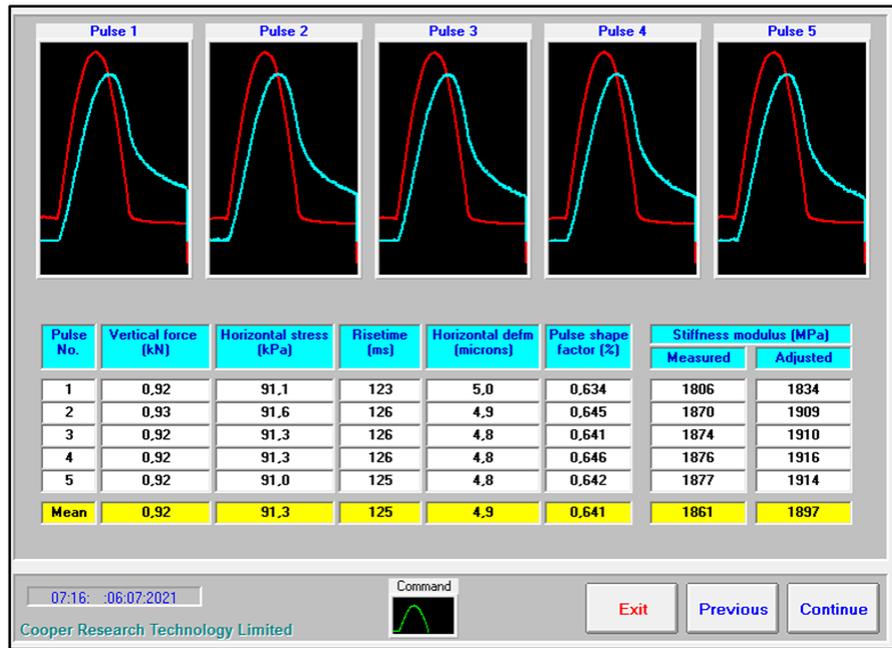


Figura 45. Resultados de la prueba de módulo de rigidez en la probeta 1CP

En la Tabla 32 y Figura 46 se muestran los módulos obtenidos.

Tabla 32. Resumen de los módulos de rigidez medidos

| MÓDULO DE RIGIDEZ (MPa) | | | |
|----------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| NO. | Corto Plazo | Mediano Plazo | Largo Plazo |
| 1 | 1897 | 3063 | 4419 |
| 2 | 2023 | 3197 | 3586 |
| 3 | 1916 | 3294 | 3709 |
| Promedio | 1945 | 3185 | 3905 |
| Desviación Estándar | 67,9 | 116,0 | 449,7 |
| Coefficiente de variación | 3,5 | 3,6 | 11,5 |

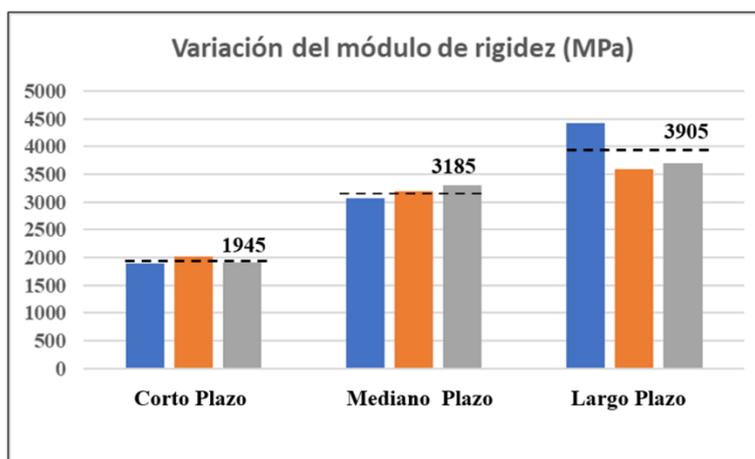


Figura 46. Variación del módulo con los niveles de envejecimiento

4.8. Análisis de resultados

En la presente sección se analizan los resultados obtenidos de las curvas carga-desplazamiento de las probetas ensayadas en el trabajo práctico experimental, así como de los módulos de rigidez correspondientes, con la finalidad de comprender las causas, relaciones y significado de estos resultados.

En general las probetas envejecidas disminuyeron el CT index en la medida que el plazo del envejecimiento se hizo mayor. Los valores promedio obtenidos para corto, mediano y largo plazo fueron de 58,1; 42,0 y 24,0 respectivamente. Por lo que se puede concluir que una probeta con más tiempo en envejecimiento presentará menos resistencia al agrietamiento.

Las gráficas que alcanzaron las cargas de rotura más elevadas no presentaron precisamente un CTindex muy alto. Esto quiere decir que las probetas que llegan a soportar cargas de rotura altas no son necesariamente las más resistentes al agrietamiento, como pudiera sobrentenderse de pruebas similares sin estos desarrollos matemáticos. Es significativo que las cargas de rotura más bajas se encontraron en los ensayos a corto plazo, siendo estos los de CTindex más altos. Un ejemplo de esto es la Probeta 2 con envejecimiento a corto plazo, que presenta $P_{100} = 6,80 \text{ kN}$ y un $CTindex = 66,3$. Por otro lado la carga de rotura más alta

se observa en la Probeta 2 con envejecimiento a mediano plazo, en la que se obtuvo un $P_{100} = 13,40 \text{ kN}$ con un $CTindex = 40,1$.

Se pudo observar que la magnitud de las pendientes $|m_{75}|$ de las muestras ensayadas, aumenta con respecto a los días de envejecimiento. El valor $|m_{75}|$ es un indicador de que tan rápido se propagan las fisuras en las muestras, pudiéndose apreciar que, a mayor pendiente, mayor será la propagación de fisuras. Por otro lado, las muestras con bajas pendientes provocan una mayor amplitud de la curva, mostrando un mayor desplazamiento de la muestra antes de llegar a la ruptura. También se destaca que $|m_{75}|$ y $CTindex$ son inversamente proporcionales, es decir a mayor pendiente, menor resistencia al agrietamiento y viceversa.

En la Figura 47 se puede ver claramente como el índice de tolerancia al agrietamiento decrece a medida que se incrementan los días de envejecimiento en las probetas, ajustándose la variación a un polinomio de segundo grado. En general el $CTindex$ varió de 58,1 hasta 24,0, lo que implica una disminución de 34,1 unidades en 5 días.

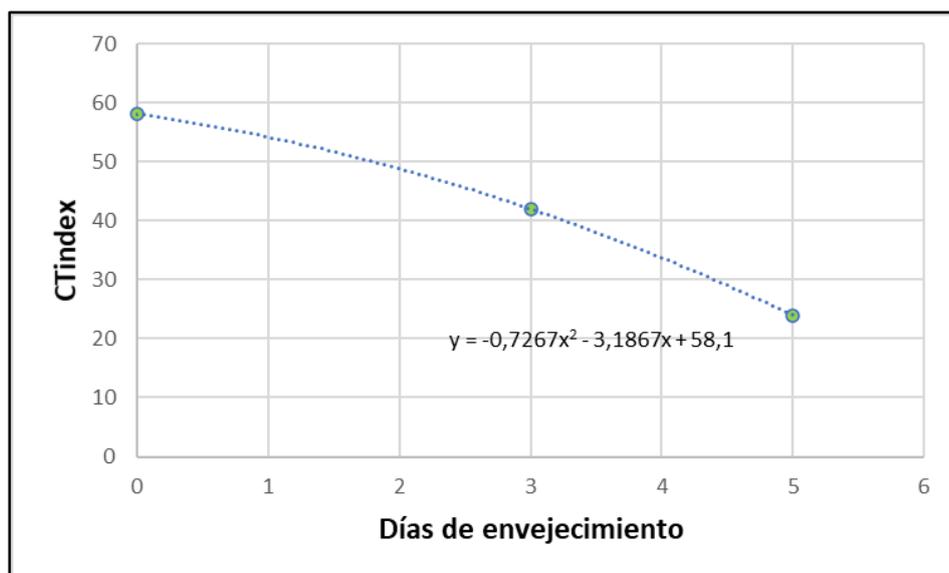


Figura 47. Variación del $CTindex$ con los días de envejecimiento

En el procesamiento de los valores de CT index se calcularon los coeficientes de variación, que son una medida estadística que nos informa acerca de la dispersión relativa de un conjunto de datos. En este caso, como se puede ver en la Tabla 31, las probetas ensayadas presentan unos coeficientes menores o muy próximos a 20 %, por lo que se consideran satisfactorios.

Respecto al módulo de rigidez, como era de esperarse, las probetas envejecidas aumentaron su módulo mientras se hizo mayor su envejecimiento. Los valores promedios obtenidos para corto, mediano y largo plazo fueron de 1945, 3185 y 3905 MPa respectivamente. Es decir, que una probeta con más tiempo en envejecimiento presentará mayor módulo.

Sin embargo, debido a que la rigidez no es una medida de la resistencia, una mezcla asfáltica con un alto valor de rigidez no necesariamente tendrá una alta resistencia (NCAT, 2009). Un alto valor de rigidez indica que bajo un esfuerzo aplicado dado existirá una baja deformación en la mezcla, pero eso aún no significa una alta resistencia. Por ejemplo, un material frágil puede tener un alto valor de rigidez, pero baja resistencia y un material muy flexible puede tener una baja rigidez, pero mayor resistencia.

Trabajos de varios investigadores han demostrado que el módulo de rigidez juega un papel predominante en el comportamiento a la fatiga. Las variables que afectan la rigidez, tales como el contenido de ligante, su tipo y el grado de compactación de la mezcla, afectarán también la fatiga. La rigidez de la capa asfáltica influye en la deformación por tracción (en la parte inferior de dicha capa) de manera opuesta que en la tensión. Es decir, al incrementarse la rigidez se reduce la deformación y aumenta la tensión en la capa. Consecuentemente, una capa rígida es deseable para prevenir el inicio de las grietas, pero acelerará su subsiguiente propagación.

En el manual de diseño AASHTO 1993 (1), sección 2.3.5, se plantea que deberán tomarse precauciones cuando los módulos a 20 °C superan 3.150 MPa, ya que, si bien la mezcla es más rígida y más resistente a la flexión, estas también serán más susceptibles a la fisuración térmica y por fatiga.

En la Figura 48 se muestra un gráfico que relaciona los módulos de rigidez promedios con los días de envejecimiento. Se observa una curva con una tendencia diferente a la del CTindex, ya que en este caso existe un aumento de rigidez a medida incrementan los días de envejecimiento. El módulo de rigidez varió de 1945 a 3905 MPa, aumentando 1960 MPa durante los 5 días de envejecimiento. Se destaca que no es posible comparar estos módulos con valores de referencia o exigencias desarrolladas en la UCSG, ya que estas últimas corresponden a probetas compactadas a 75 golpes por cara, que es lo usual en los controles rutinarios de calidad a mezclas calientes producidas en planta. O sea, probetas con porcentajes de vacíos alrededor de 4%.

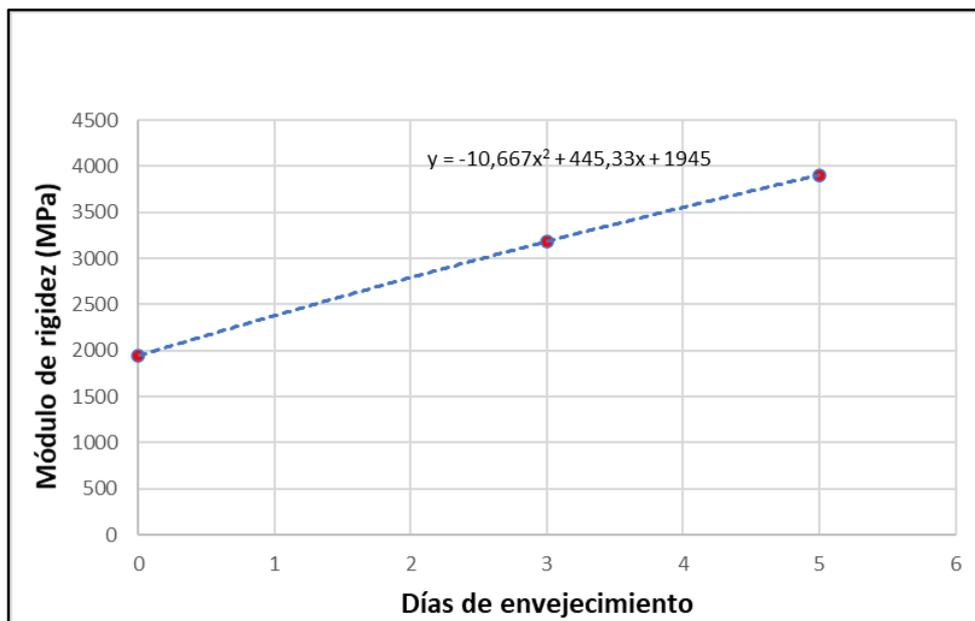


Figura 48. Variación del Módulo de rigidez con los días de envejecimiento

Considerando que el proceso de envejecimiento a largo plazo empleado debe provocar un efecto similar al de una mezcla puesta en obra por unos 7 a 10 años en climas cálidos y 12 a 14 años en climas fríos, puede considerarse que para ese período el módulo de la mezcla utilizada estaría alrededor de 3900 MPa.

En el procesamiento de los módulos evaluados en este estudio, también se calcularon los coeficientes de variación, como se aprecia en la Tabla 32. Las probetas ensayadas presentan unos coeficientes menores a 12 %, por lo que se consideran excelentes.

En la Figura 49 se compara el CTindex promedio de las probetas de 150 mm de diámetro con los módulos de rigidez promedio de las probetas de 100 mm de diámetro, con el objetivo de mostrar gráficamente su relación. Cabe recalcar que en ambos casos el porcentaje de vacíos obtenido estuvo muy próximo a 7%, cumpliéndose el criterio de la prueba IDEAL. En este caso se observa que el CTindex y el módulo de rigidez son inversamente proporcionales, es decir, que a menor CTindex mayor será el módulo de rigidez, según una relación muy bien definida por una curva de ajuste (polinomio de segundo grado).

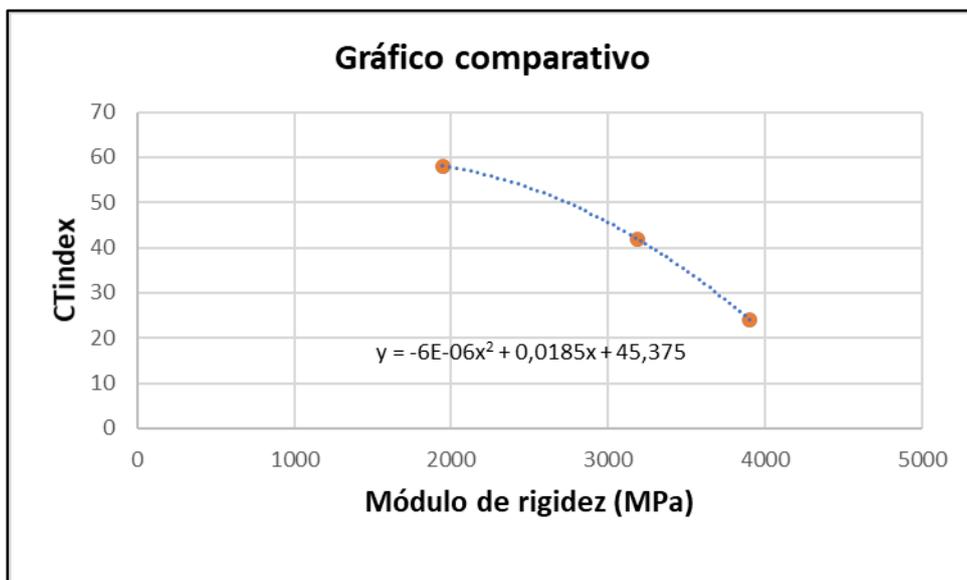


Figura 49. Relación de los valores de CTindex y los módulos de rigidez

Conclusiones

- 1) El empleo de la prueba de agrietamiento IDEAL, basada en un procesamiento muy bien fundamentado de la relación carga versus deformación obtenida por medio de un cabezal tipo Lottman (tracción indirecta) en probetas de 150 mm de diámetro, es considerado factible, con resultados precisos y con gran potencial para su empleo en el Ecuador, donde existen serios problemas de agrietamiento prematuro en las capas asfálticas. En el estudio se obtuvieron resultados coherentes y apegados al comportamiento lógico esperado.

- 2) Después de haber envejecido las mezclas sueltas utilizando los criterios de AASHTO R30 (para corto plazo) y NCHRP REPORT 919 (para largo plazo), y haberlas compactado debidamente en laboratorio para la posterior prueba IDEAL, se concluye que una probeta envejecida a largo plazo tendrá una menor resistencia al agrietamiento que una envejecida a mediano y corto plazo, ya que a medida que aumentan los días de envejecimiento la resistencia al agrietamiento va a ser menor.

- 3) Tras comparar los resultados promedios del CTindex con los módulos de rigidez de las briquetas ensayadas, se comprueba que la resistencia al agrietamiento de una mezcla no está condicionada solo al nivel de rigidez que presente la misma. Si bien la rigidez representa el nivel de endurecimiento de la mezcla asfáltica compactada, esta al ganar rigidez pierde ductilidad. Esto quiere decir que le quita capacidad de deformación al momento de estar sometida a cargas actuantes y por ende será menos resistente a las grietas.

- 4) Se considera de sumo interés en los trabajos de control de calidad de mezclas con pruebas de tracción indirecta, algo que usualmente se realiza con cabezal de 100 mm (4 pulgadas), no asociar el buen comportamiento ante el agrietamiento con un valor alto de la resistencia a la tracción indirecta.

Recomendaciones

- 1) Comprobar la validez del uso de normativas y procedimientos extranjeros para evaluar el fenómeno del envejecimiento en el medio local, ya que factores como el ambiente de la región, la radiación ultravioleta (UV) y cambios bruscos de temperatura varían en distintos países.
- 2) Realizar estudios empleando la prueba de agrietamiento IDEAL sobre probetas o núcleos de distintas mezclas producidas en el Ecuador, con agregados minerales procedentes de diferentes tipos de rocas, que permitan ganar información sobre las más convenientes y a mediano plazo ajustar alguna exigencia para la misma en el país.
- 3) Investigar las diferencias de resultados que pudieran generarse al aplicar la prueba de daño en agua evaluando la resistencia a la tracción indirecta retenida (sugerida por el MTOP) y la prueba de agrietamiento IDEAL, bajo el mismo procedimiento de acondicionamiento de las muestras sin y con inmersión en agua.

Referencias Bibliográficas

- AASHTO, R. 30-02. (2010). *Standard Procedure for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA)*.
- AASHTO. (1993). *Guide for the Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C. USA.
- Arabani, M., & Ferdowsi, B. (2009). *Evaluating the Semi-Circular Bending test for HMA Mixtures*. Journal IJE transactions A. Basics, 22(1), 47-58.
- Asphalt Institute. (1992). *Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente* MS-22.
http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf
- Asphalt Institute. (1997). *Mix Design Methods for Asphalt Concrete*. Lexington, Kentucky, Estados Unidos. Manual Series No. 2.
- ASTM D7313-20. (2020). *Standard Test Method for Determining Fracture Energy of Asphalt Mixtures Using the Disk-Shaped Compact Tension Geometry*. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D8044-16. (2016). *Standard Test Method for Evaluation of Asphalt Mixture Cracking Resistance using the Semi-Circular Bend Test (SCB) at Intermediate Temperatures*. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- Baladi, G., Schorsch, M., & Svasdisant, T. (2003). *Determining the causes of top-down cracks in bituminous Pavements*. Final Report MDOT - PRCE - MSU - 2003 - 110. Michigan Department of Transportation.
- Bernal, J., & Ramírez, L. (2019). *Análisis del comportamiento a la fisuración de mezclas asfálticas con RAP mediante el ensayo SCB*. XX Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto. Guadalajara, México.
- Brown, S. (1988). *Improved Asphalt Pavement Engineering*. 7th AAPA International Asphalt Conference. Brisbane. Australia.
- Camacho, J., Reyes, O., & Paredes, L. (2013). *Comportamiento de mezclas asfálticas densas a partir del ensayo de viga semicircular simplemente apoyada*. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- Cepeda, J. (2002). *Análisis del comportamiento de mezclas asfálticas a fisuración por fatiga mediante la aplicación de un nuevo ensayo dinámico a tracción directa*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

- Cooper Research Technology Limited. (2002). *NU-10 & NU- 5. Operation & Maintenance Manual*. United Kingdom.
- Corredor, G., & Corros, M. (2010). *Evaluación de pavimentos. Maestría en vías terrestres*. (Modulo III). Universidad Nacional de Ingeniería. Nicaragua.
- Cubillos, C., & Núñez, C. (2013). *Análisis de la susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla asfáltica para rodadura empleando asfaltos sumergidos*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Federal Highway Administration. (2003). *Distress Identification Manual for Long-Term Pavement Performance Progra*. USA.
- Fernández-Gómez, W.D., Rondón, H., & Reyes, F. (2013). *Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas*. estado del conocimiento. 33(1).
- Gamba, G., & Mercado, J. (2004). *Concepción de un Ensayo Para Establecer el Efecto de la Presión de Poro en el Deterioro por Humedad de las Mezclas Asfálticas*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Colombia.
- García, A. (2016). *Distribución de presiones de carga de rueda sobre estructura del pavimento*. Folleto Pavimentos (4). <https://www.slideshare.net/RibBrian/0400-esfuerzos-y-deformaciones-en-pavimentos-flexibles>
- Garnica, P., Flores, M., Gómez, J. A., & Delgado, H. (2005). *Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas*. Instituto mexicano del transporte.
- Glover, C., Davison, R., Domke, C., Ruan, Y., Juristyaniri, P., Knorr, D., & otros. (2005). *Development of a new method for assessing asphalt binder durability with field validation*. Texas Transportation Institute.
- Hudson, W.R., & Kennedy, T.W. (1968). *An indirect tensile test for stabilized materials*. Research Report Number 98-1. The University of Texas at Austin.
- Icaza, K., & Mera, W. (2018). *Influencia de los asfaltos mejorados con rejuvenecedores en el comportamiento de las mezclas asfálticas*. Trabajo de titulación UCSG. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/11229>.
- Isacsson, U., & Zeng, H. (1997). *Relationships between Bitumen chemistry and low temperature behavior of asphalt*. Const. Build. Mat, 11 (2),83-91.
- Lau, K., Lunsford, K., Glover, C., Davison., R., & Bullin, J. (1992). *Reaction Rates and Hardening Susceptibilities as determined from POV aging of asphalts*. Transp. Res. Rec, 50-57.

- Lee, D., & Huang, R. (1973). *Weathering of asphalts as characterized by infrared multiple internal reflection spectra*. *Appl Spectrosc*, 27 (6),435-440.
- Li, X., Braham, A., Marasteanu, M., Buttlar, W., & Williams, R. (2008). *Effect of Factors Affecting Fracture Energy of Asphalt Concrete at Low Temperature*. *Road Materials and Pavement Design*, 9 (1),397–416.
- Loor, M. (2020). *ESTUDIO DEL ENVEJECIMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON NÚCLEOS DE OBRAS Y BRIQUETAS PROCESADAS EN LABORATORIO*. Trabajo de titulación. UCSG. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/16609>.
- López-Montero, T., & Miró, R. (2017). *Ageing and temperature effect on the fatigue performance of bituminous mixtures*. *Mater Constr*, 67 (327),1-11.
- López-Montero, T., Miró, R., Botella, R., & Pérez-Jiménez, F. (2017). *Obtaining the fatigue laws of bituminous mixtures from a strain sweep test: effect of temperature and aging*. *Int Journal Fatigue*, 100,195-205.
- Miranda, R. (2010). *Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos*. Universidad Austral de Chile, Escuela de construcción civil. Chile.
- Molenaar, A., Scarpas, A., Liu, X., & Erkens, S. (2002). *Semi-circular Bending test simple but useful?* *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 71, 795-815.
- Molenaar, J., Liu, X. & Molenaar, A. (2003). *Resistance to crack-growth and fracture of asphalt mixture*. Sixth International RILEM Symposium on performance testing and Evaluation of Bituminous Materials Zurich, Switzerland, 618-625.
- MTOP, M. (2002). *Especificaciones Técnicas para la Construcción de Carreteras y Puentes*. Quito, Ecuador: MOP-001-F2002.
- National Center for Asphalt Technology. (2009). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*. Third Edition. Auburn University.
- NCHRP. (2002). *Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. 2002 Design Guide. Champaign, Illinois.
- Organización Mundial de la Salud. (2003). *Índice UV Solar Mundial: Guía práctica*. Ginebra.
- Ospino, R., Tinoco, C., & Crespo, D. (2017). *Análisis de daño por causa del envejecimiento y auscultación en estructuras de pavimentos flexibles en las ciudades de Santa marta y Barranquilla entre los años 2012-2017*. Colombia.
- Packham, D. (1992). *Handbook of Adhesion*. Longman Scientifia & Technical. New York, USA.

- Palacios, J. F. (2015). *Estudio comparativo de pruebas de fatiga dinámicas y pruebas de tracción indirecta bajo cargas monotónicas en mezclas asfálticas*. Trabajo de titulación. UCSG. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/4331>
- Paris, P., & Erdogan, F. (1963). *A critical analysis of crack propagation laws*. Journal of Basic Engineering, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 85(4), 528–534.
- Pérez-Jiménez, F., Valdés, G., Muñoz, M., Miró, R., Martínez, A., Botella, R., Amorós, J. (2014). “*Criterios y especificaciones para el uso del Ensayo Fénix en el diseño de mezclas bituminosas tipo AC*”. IX Jornada Nacional de ASEFMA, Madrid, España.
- Petersen, J., Branthaver, J., Robertson, R., Harnsberger, P., Duvall, J., & Ensley, E. (1993). *Effects of physicochemical factors on asphalt oxidation kinetics*. Transp. Res. Rec. 1391. National Research Council, Washington D.C., 1-10.
- Ramond, G., & Such, C. (1990). *Bitumes et Bitumes Modifiés - Relations Structures, Propriétés Composition*. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées. 168,65-87.
- Reyes, O. J., Useche, J. S., & Álvarez, A. E. (2019). *Implementación del Ensayo “IDEAL” para la Caracterización de la Resistencia a la Fractura en Mezclas Asfálticas Colombianas*. XX Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto. Guadalajara, México.
- Rodríguez, S., & Arguello, S. (2006). *Estado del arte en el estudio de la fatiga de materiales Bituminosos*. Trabajo de titulación. Universidad industrial de Santander. Bucaramanga.
- Rondón, H., & Reyes, F. A. (2015). *PAVIMENTOS. Materiales, Construcción y diseño*. Bogotá: Macro.
- Sánchez, M. (2010). *Evaluación integral de la vía local Cumana-Cumanacoa, de los municipios Sucre y Montes del estado Sucre*. Anzoátegui, Venezuela.
- Swiertz, D. (2010). *Asphalt aging characteristics, Rheological implications and laboratory techniques*. University of Wisconsin. Madison.
- Taylor, A. (2018). *Cracking Group Experiment-Laboratory Results*. Auburn: NCAT Test Track Conference.
- Tonial, I. (2001). *Influência do Envelhecimento do Revestimento Asfáltico na Vida da Fadiga de Pavimentos*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação de Engenharia Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

- Valdés, G., Pérez, F., & Botella, R. (2009). *Ensayo Fénix, una nueva metodología para medir la resistencia la fisuración en mezclas asfálticas*. *Revista de la Construcción*, ISSN 0717-7925, 8,114-125.
- Valdés, G., Pérez, F., & Calabi, A. (2012). *Fisuración en pavimentos asfálticos y sus mecanismos de deterioro*. *Revista Científica Tecnológica Departamento Ingeniería de Obras Civiles, Revista RIOC*, 26-36. España.
- Van der Bergh, W. (2011). *The Effect of Ageing on the Fatigue and Healing Properties of Bituminous Mortars*. The Netherlands.
- 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.
- Vila, R., García, G., Jaramillo, J., Pinargote, K., & Ramos, K. (2019). *Análisis de la Calidad del Cemento Asfáltico Ecuatoriano durante el 2018*. XX Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto. Guadalajara, México.
- Wagoner, M., Buttlar, W., & Paulino., G. (2005). *Development of a Single-Edge Notched Beam Test for Asphalt Concrete Mixtures*. Paper IDJTEI2579, 3(6), www.astm.org.
- Zhou, F. (2019). *Final Report for NCHRP IDEA Project 195: Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design, Quality Control and Quality Assurance*, Texas A&M Transportation Institute.
- Zhou, F. (2019). *Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design, Quality Control and Quality Assurance*. IDEA Program Final Report. Contract Number: NCHRP 20-30/IDEA 195. Texas A&M Transportation Institute.

Anexos

Anexo 1. Hojas de cálculo utilizadas para determinar las curvas carga-desplazamiento de cada una de las briquetas ensayadas.

Corto plazo

| Muestra | Tiempo (s) | Desp. vertical (mm) | Desp. correg. (mm) | Lect. Anillo (mm) | CARGA (lbs) | CARGA (kN) |
|---------|------------|---------------------|--------------------|-------------------|-------------|------------|
| 1 | 8 | 6,7 | 0,0 | 0 | 0 | 0,0 |
| | 9 | 7,5 | 0,8 | 0,053 | 408 | 1,8 |
| | 10 | 8,3 | 1,7 | 0,129 | 984 | 4,4 |
| | 11 | 9,2 | 2,5 | 0,184 | 1399 | 6,2 |
| | 12 | 10,0 | 3,3 | 0,217 | 1648 | 7,3 |
| | 13 | 10,8 | 4,2 | 0,224 | 1700 | 7,6 |
| | 14 | 11,7 | 5,0 | 0,199 | 1512 | 6,7 |
| | 15 | 12,5 | 5,8 | 0,128 | 976 | 4,3 |
| | 16 | 13,3 | 6,7 | 0,087 | 666 | 3,0 |
| | 17 | 14,16 | 7,5 | 0,060 | 461 | 2,1 |
| | 18 | 14,99 | 8,3 | 0,041 | 318 | 1,4 |
| | 19 | 15,83 | 9,2 | 0,026 | 204 | 0,9 |
| | 20 | 16,66 | 10,0 | 0,019 | 151 | 0,7 |
| | 21 | 17,49 | 10,8 | 0,003 | 30 | 0,1 |

| Muestra | Tiempo (s) | Desp. vertical (mm) | Desp. correg. (mm) | Lect. Anillo (mm) | CARGA (lbs) | CARGA (kN) |
|---------|------------|---------------------|--------------------|-------------------|-------------|------------|
| 2 | 3 | 2,5 | 0,0 | 0 | 0 | 0,0 |
| | 4 | 3,3 | 0,8 | 0,053 | 408 | 0,6 |
| | 5 | 4,2 | 1,7 | 0,129 | 984 | 2,7 |
| | 6 | 5,0 | 2,5 | 0,184 | 1399 | 4,9 |
| | 7 | 5,8 | 3,3 | 0,217 | 1648 | 5,4 |
| | 8 | 6,7 | 4,2 | 0,224 | 1700 | 6,2 |
| | 9 | 7,5 | 5,0 | 0,199 | 1512 | 6,8 |
| | 10 | 8,3 | 5,8 | 0,128 | 976 | 5,9 |
| | 11 | 9,2 | 6,7 | 0,087 | 666 | 3,6 |
| | 12 | 10,00 | 7,5 | 0,060 | 461 | 2,5 |
| | 13 | 10,83 | 8,3 | 0,041 | 318 | 1,6 |
| | 14 | 11,66 | 9,2 | 0,026 | 204 | 1,2 |
| | 15 | 12,50 | 10,0 | 0,019 | 151 | 0,7 |
| | 16 | 13,33 | 10,8 | 0,003 | 30 | 0,1 |

| Muestra | Tiempo (s) | Desp. vertical (mm) | Desp. correg. (mm) | Lect. Anillo (mm) | CARGA (lbs) | CARGA (kN) |
|---------|------------|---------------------|--------------------|-------------------|-------------|------------|
| 3 | 2 | 1,7 | 0,0 | 0 | 0 | 0,0 |
| | 3 | 2,5 | 0,8 | 0,05 | 386 | 1,7 |
| | 4 | 3,3 | 1,7 | 0,118 | 900 | 4,0 |
| | 5 | 4,2 | 2,5 | 0,168 | 1278 | 5,7 |
| | 6 | 5,0 | 3,3 | 0,203 | 1540 | 6,9 |
| | 6,5 | 5,4 | 3,7 | 0,208 | 1580 | 7,0 |
| | 7 | 5,8 | 4,2 | 0,204 | 1549 | 6,9 |
| | 8 | 6,7 | 5,0 | 0,165 | 1255 | 5,6 |
| | 9 | 7,5 | 5,8 | 0,102 | 779 | 3,5 |
| | 10 | 8,33 | 6,7 | 0,067 | 515 | 2,3 |
| | 11 | 9,16 | 7,5 | 0,030 | 234 | 1,0 |
| | 12 | 10,00 | 8,3 | 0,010 | 83 | 0,4 |
| | 13 | 10,83 | 9,2 | 0,003 | 30 | 0,1 |

Mediano plazo

| Muestra | Tiempo (s) | Desp. vertical (mm) | Desp. correg. (mm) | Lect. Anillo (mm) | CARGA (lbs) | CARGA (kN) |
|---------|------------|---------------------|--------------------|-------------------|-------------|------------|
| 1 | 12 | 10,0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,0 |
| | 13 | 10,8 | 0,8 | 0,022 | 174 | 0,8 |
| | 14 | 11,7 | 1,7 | 0,139 | 1058 | 4,7 |
| | 15 | 12,5 | 2,5 | 0,256 | 1941 | 8,6 |
| | 16 | 13,3 | 3,3 | 0,326 | 2468 | 11,0 |
| | 17 | 14,2 | 4,2 | 0,347 | 2625 | 11,7 |
| | 18 | 15,0 | 5,0 | 0,275 | 2084 | 9,3 |
| | 19 | 15,8 | 5,8 | 0,163 | 1240 | 5,5 |
| | 20 | 16,7 | 6,7 | 0,102 | 779 | 3,5 |
| | 21 | 17,49 | 7,5 | 0,057 | 439 | 2,0 |
| | 22 | 18,33 | 8,3 | 0,023 | 181 | 0,8 |
| | 23 | 19,16 | 9,2 | 0,003 | 30 | 0,1 |

| Muestra | Tiempo (s) | Desp. vertical (mm) | Desp. correg. (mm) | Lect. Anillo (mm) | CARGA (lbs) | CARGA (kN) |
|---------|------------|---------------------|--------------------|-------------------|-------------|------------|
| 2 | 3 | 2,5 | 0,0 | 0 | 0 | 0,0 |
| | 4 | 3,3 | 0,8 | 0,024 | 189 | 0,8 |
| | 5 | 4,2 | 1,7 | 0,132 | 1006 | 4,5 |
| | 6 | 5,0 | 2,5 | 0,242 | 1836 | 8,2 |
| | 7 | 5,8 | 3,3 | 0,339 | 2565 | 11,4 |
| | 8 | 6,7 | 4,2 | 0,393 | 2970 | 13,2 |
| | 9 | 7,1 | 4,6 | 0,398 | 3008 | 13,4 |
| | 9 | 7,5 | 5,0 | 0,393 | 2970 | 13,2 |
| | 10 | 8,3 | 5,8 | 0,275 | 2084 | 9,3 |
| | 11 | 9,16 | 6,7 | 0,146 | 1112 | 4,9 |
| | 12 | 10,00 | 7,5 | 0,073 | 560 | 2,5 |
| | 13 | 10,83 | 8,3 | 0,052 | 401 | 1,8 |
| | 14 | 11,66 | 9,2 | 0,020 | 158 | 0,7 |
| | 15 | 12,50 | 10,0 | 0,003 | 30 | 0,1 |

| Muestra | Tiempo (s) | Desp. vertical (mm) | Desp. correg. (mm) | Lect. Anillo (mm) | CARGA (lbs) | CARGA (kN) |
|---------|------------|---------------------|--------------------|-------------------|-------------|------------|
| 3 | 4 | 3,3 | 0,0 | 0 | 0 | 0,0 |
| | 5 | 4,2 | 0,8 | 0,022 | 174 | 0,8 |
| | 6 | 5,0 | 1,7 | 0,129 | 984 | 4,4 |
| | 7 | 5,8 | 2,5 | 0,233 | 1768 | 7,9 |
| | 8 | 6,7 | 3,3 | 0,327 | 2475 | 11,0 |
| | 9 | 7,5 | 4,2 | 0,373 | 2820 | 12,5 |
| | 10 | 8,3 | 5,0 | 0,381 | 2880 | 12,8 |
| | 11 | 9,2 | 5,8 | 0,264 | 2002 | 8,9 |
| | 12 | 10,0 | 6,7 | 0,112 | 855 | 3,8 |
| | 13 | 10,83 | 7,5 | 0,036 | 279 | 1,2 |
| | 14 | 11,66 | 8,3 | 0,011 | 91 | 0,4 |
| | 15 | 12,50 | 9,2 | 0,003 | 30 | 0,1 |

Largo plazo

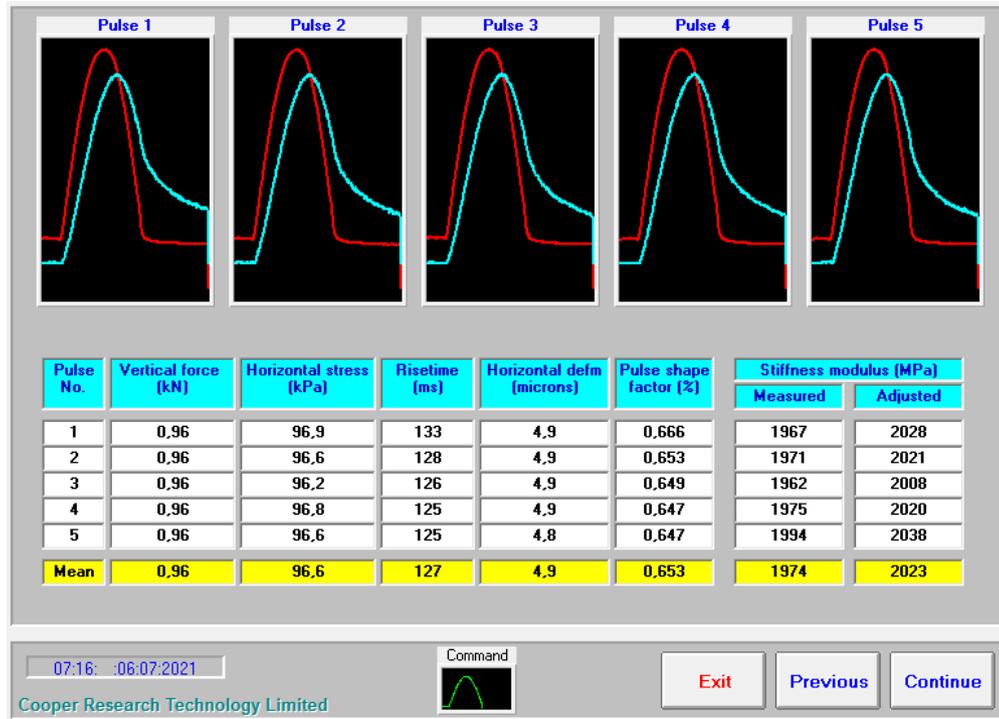
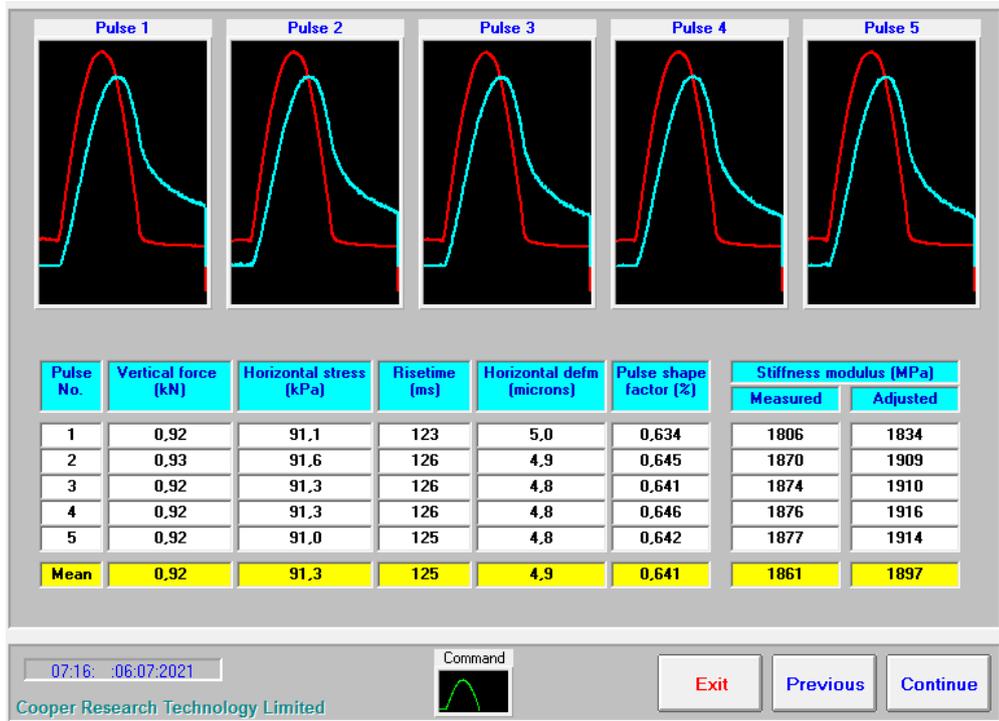
| Muestra | Tiempo (s) | Desp. vertical (mm) | Desp. correg. (mm) | Lect. Anillo (mm) | CARGA (lbs) | CARGA (kN) |
|---------|------------|---------------------|--------------------|-------------------|-------------|------------|
| 1 | 3 | 2,5 | 0,0 | 0 | 0 | 0,0 |
| | 4 | 3,3 | 0,8 | 0,019 | 151 | 0,7 |
| | 5 | 4,2 | 1,7 | 0,124 | 945 | 4,2 |
| | 6 | 5,0 | 2,5 | 0,234 | 1776 | 7,9 |
| | 7 | 5,8 | 3,3 | 0,321 | 2430 | 10,8 |
| | 8 | 6,7 | 4,2 | 0,358 | 2708 | 12,0 |
| | 9 | 7,5 | 5,0 | 0,294 | 2227 | 9,9 |
| | 10 | 8,3 | 5,8 | 0,124 | 945 | 4,2 |
| | 11 | 9,2 | 6,7 | 0,058 | 447 | 2,0 |
| | 12 | 10,00 | 7,5 | 0,012 | 98 | 0,4 |
| | 13 | 10,83 | 8,3 | 0,001 | 15 | 0,1 |

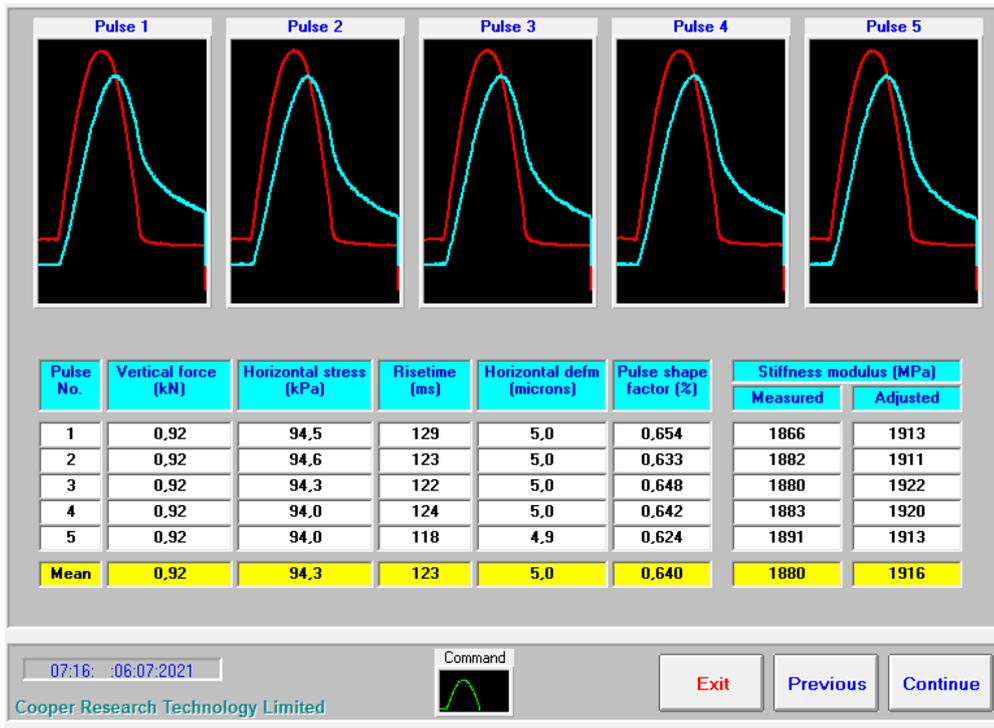
| Muestra | Tiempo (s) | Desp. vertical (mm) | Desp. correg. (mm) | Lect. Anillo (mm) | CARGA (lbs) | CARGA (kN) |
|---------|------------|---------------------|--------------------|-------------------|-------------|------------|
| 2 | 12 | 10,0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,0 |
| | 13 | 10,8 | 0,8 | 0,128 | 976 | 4,3 |
| | 14 | 11,7 | 1,7 | 0,226 | 1716 | 7,6 |
| | 15 | 12,5 | 2,5 | 0,32 | 2423 | 10,8 |
| | 16 | 13,3 | 3,3 | 0,359 | 2716 | 12,1 |
| | 17 | 14,2 | 4,2 | 0,331 | 2505 | 11,1 |
| | 18 | 15,0 | 5,0 | 0,183 | 1391 | 6,2 |
| | 19 | 15,8 | 5,8 | 0,052 | 401 | 1,8 |
| | 20 | 16,7 | 6,7 | 0,021 | 166 | 0,7 |
| | 21 | 17,49 | 7,5 | 0,007 | 60 | 0,3 |
| | 22 | 18,33 | 8,3 | 0,002 | 22 | 0,1 |

| Muestra | Tiempo (s) | Desp. vertical (mm) | Desp. correg. (mm) | Lect. Anillo (mm) | CARGA (lbs) | CARGA (kN) |
|---------|------------|---------------------|--------------------|-------------------|-------------|------------|
| 3 | 6 | 5,0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,0 |
| | 7 | 5,8 | 0,8 | 0,054 | 416 | 1,9 |
| | 8 | 6,7 | 1,7 | 0,176 | 1338 | 6,0 |
| | 9 | 7,5 | 2,5 | 0,281 | 2130 | 9,5 |
| | 10 | 8,3 | 3,3 | 0,353 | 2671 | 11,9 |
| | 11 | 8,7 | 3,7 | 0,363 | 2745 | 12,2 |
| | 11 | 9,2 | 4,2 | 0,346 | 2617 | 11,6 |
| | 12 | 10,0 | 5,0 | 0,198 | 1504 | 6,7 |
| | 13 | 10,8 | 5,8 | 0,106 | 810 | 3,6 |
| | 14 | 11,66 | 6,7 | 0,044 | 340 | 1,5 |
| | 15 | 12,50 | 7,5 | 0,016 | 128 | 0,6 |
| | 16 | 13,33 | 8,3 | 0,008 | 68 | 0,3 |
| 17 | 14,16 | 9,2 | 0,002 | 22 | 0,1 | |

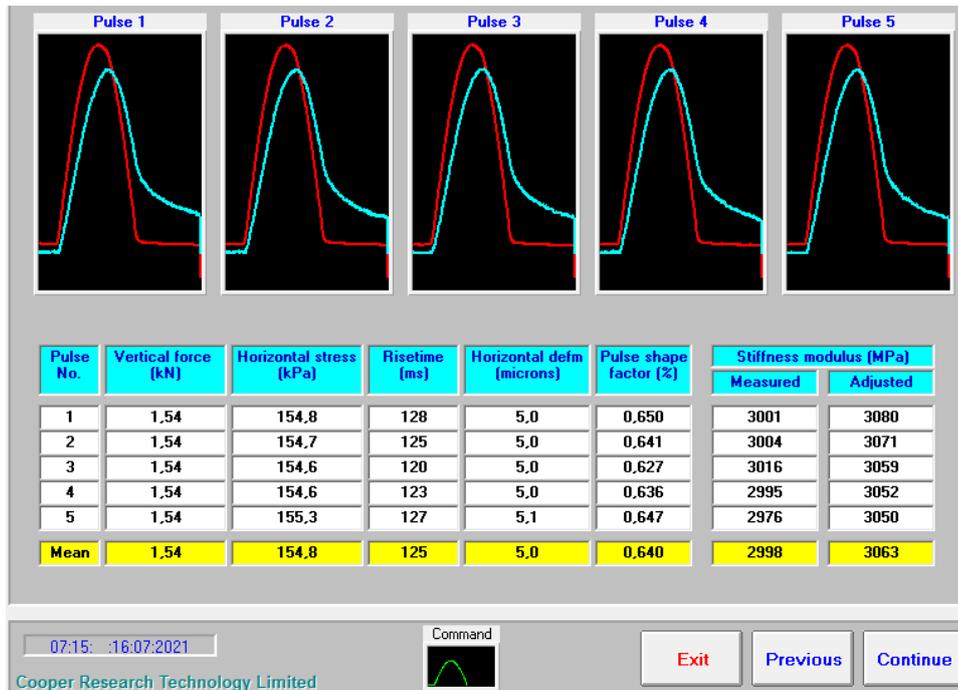
Anexo 2. Módulos de rigidez de todas las briquetas de 100 mm de diámetro con sus respectivos tiempos de envejecimiento, utilizando el equipo NAT.

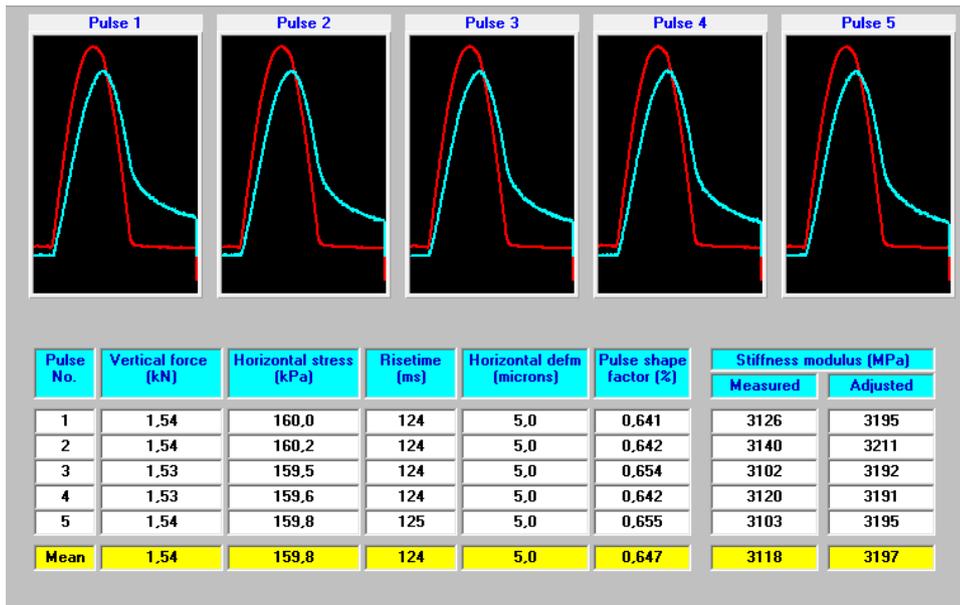
Corto plazo





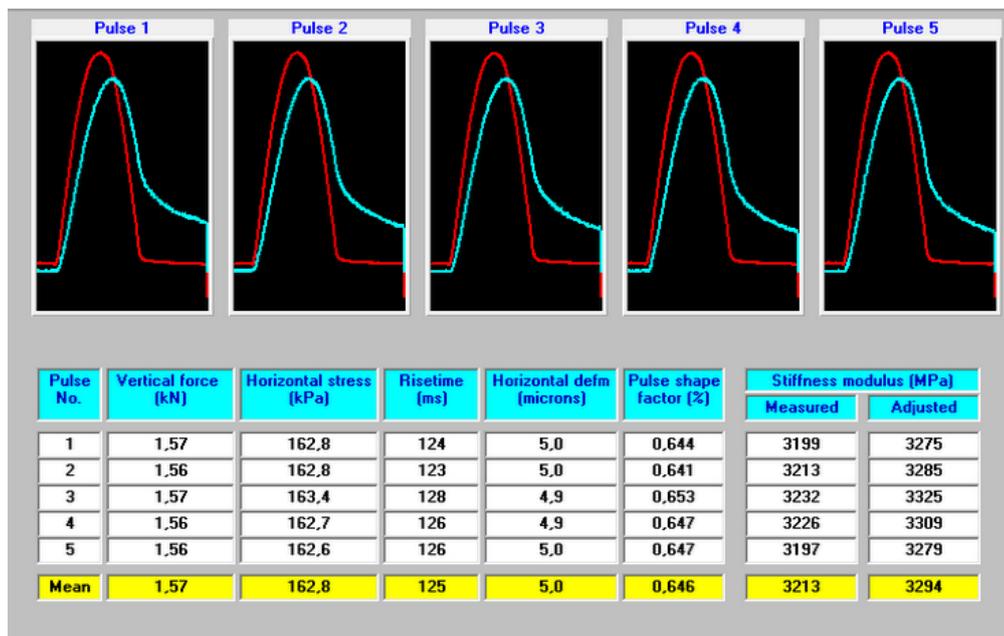
Mediano plazo





07:15 :16:07:2021 Command  Exit Previous Continue

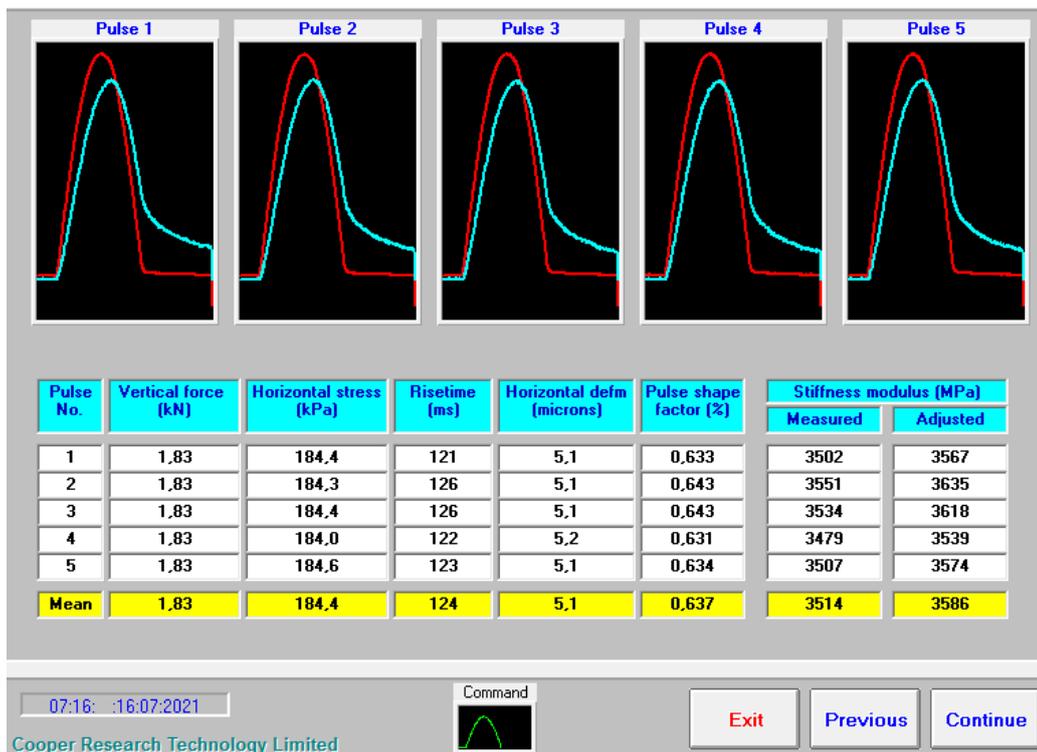
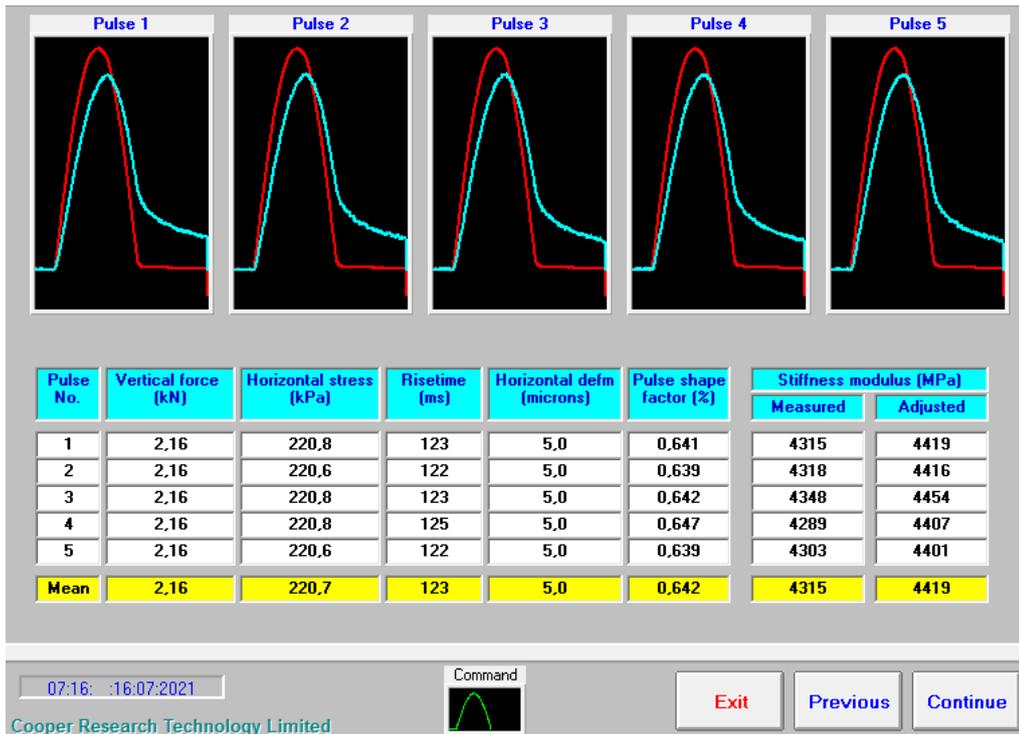
Cooper Research Technology Limited

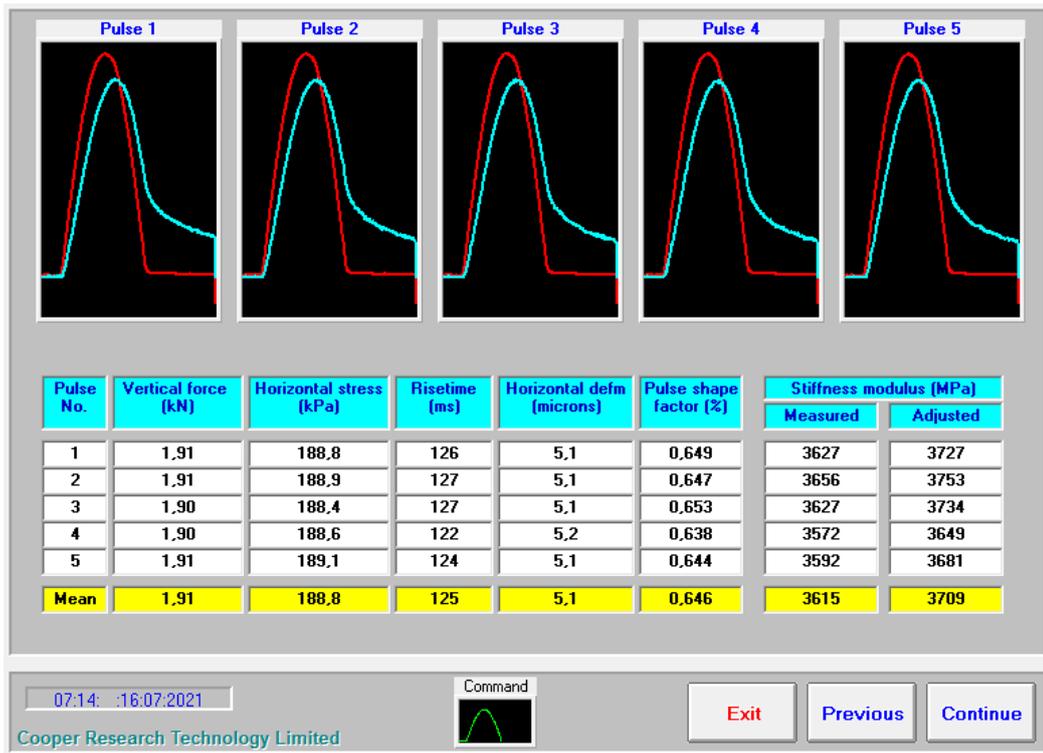


07:15 :16:07:2021 Command  Exit Previous Continue

Cooper Research Technology Limited

Largo plazo







DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Navarrete Sánchez Edmundo Francisco**, con C.C: # 0923276364 autor del trabajo de titulación: **Empleo de la prueba “ideal” para el control del agrietamiento en mezclas asfálticas**, 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, **13 de Septiembre del 2021**

f. _____

Nombre: **Navarrete Sánchez Edmundo Francisco**

C.C: **0923276364**

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TRABAJO DE TITULACIÓN

| | | | |
|---|--|---|-----|
| TEMA Y SUBTEMA: | Empleo de la prueba "ideal" para el control del agrietamiento en mezclas asfálticas. | | |
| AUTOR(ES) | Navarrete Sánchez Edmundo Francisco | | |
| REVISOR(ES)/TUTOR(ES) | Ing. Rolando Vila Romaní, PhD. | | |
| INSTITUCIÓN: | Universidad Católica de Santiago de Guayaquil | | |
| FACULTAD: | Ingeniería | | |
| CARRERA: | Ingeniería Civil | | |
| TÍTULO OBTENIDO: | Ingeniería Civil | | |
| FECHA DE PUBLICACIÓN: | 13 de Septiembre del 2021 | No. DE PÁGINAS: | 105 |
| ÁREAS TEMÁTICAS: | Pavimentos, Asfaltos | | |
| PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS: | Mezclas asfálticas, prueba IDEAL, módulo de rigidez, envejecimiento, AASHTO R30, NCHRP Reasearch report 919, metodología Marshall. | | |
| RESUMEN/ABSTRACT: | <p>El presente trabajo de titulación exhibe la realización de una novedosa prueba para control de agrietamiento de mezclas asfálticas, cuyos primeros ensayos y publicaciones se dieron en Austin, Texas en enero del 2019. El objetivo principal y hacia dónde va orientado este trabajo es la implementación de la prueba IDEAL a mezclas asfálticas sometidas a tres niveles de envejecimiento: corto, mediano y largo plazo, con la finalidad de evaluar su resistencia al agrietamiento, basándose en la mecánica de fractura, más conocido como el índice de tolerancia al agrietamiento (CTindex), estableciendo comparaciones con los módulos de rigidez para valorar el potencial de este ensayo. Para la aplicación de los niveles de envejecimiento se utilizaron criterios actualizados partiendo de la normativa AASHTO R30 y de las recomendaciones del NCHRP Research Report 919. Todas las mezclas empleadas en este estudio respetaron las exigencias establecidas por sus respectivas normativas. La mezcla asfáltica resulto satisfactoria cumpliendo cada una de las exigencias establecidas, siendo diseñada y compactada siguiendo la metodología Marshall, para su posterior ensayo de agrietamiento. Los resultados indican que a mayores días de envejecimiento de una muestra la resistencia al agrietamiento será menor. A su vez el módulo de rigidez ira aumentado a medida incrementemente los días de envejecimiento debido al endurecimiento de la muestra, restándole ductilidad. Estos resultados coherentes demuestran la sensibilidad que presenta la prueba IDEAL bajo condiciones de envejecimiento. Se recomienda profundizar el estudio de la prueba IDEAL con diferentes propuestas de trabajo para observar particularidades de la muestra ensayada.</p> | | |
| ADJUNTO PDF: | <input checked="" type="checkbox"/> SI | <input type="checkbox"/> NO | |
| CONTACTO CON AUTOR/ES: | Teléfono: +593984376717 | E-mail: franciscoedmundo_25@hotmail.com | |
| CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE): | Nombre: Clara Catalina Glas Cevallos | | |
| | Teléfono: +593-4- 2206956 | | |
| | 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): | | | |