

**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TEMA:

**Comparación del índice de agrietamiento en mezclas de diferentes
plantas asfálticas**

AUTOR:

Rodríguez De la Cruz, Christopher Alejandro

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de

INGENIERO CIVIL

TUTOR:

Ing. Vila Romaní, Rolando. PhD.

Guayaquil, Ecuador

9 de marzo del 2022



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 **Rodríguez De la Cruz, Cristopher Alejandro**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

f. _____

Ing. Vila Romaní, Rolando. PhD.

DIRECTORA DE LA CARRERA

f. _____

Ing. Alcívar Bastidas, Stefany Esther. MSc.

Guayaquil, a los 9 del mes de marzo del año 2022



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Rodríguez De la Cruz, Cristopher Alejandro**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación: **Comparación del índice de agrietamiento en mezclas de diferentes plantas 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 9 del mes de marzo del año 2022

EL AUTOR

f. _____

Rodríguez De la Cruz Cristopher Alejandro



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **Rodríguez De la Cruz, Cristopher Alejandro**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Comparación del índice de agrietamiento en mezclas de diferentes plantas asfálticas**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 9 del mes de marzo del año 2022

EL AUTOR:

f. _____

Rodríguez De la Cruz, Cristopher Alejandro

REPORTE URKUND

The screenshot displays the URKUND report interface. At the top left, the URKUND logo is visible. The main content area is divided into two columns. The left column lists document details, and the right column shows the analysis results.

Documento	Trabajo Titulación FINAL Rodriguez Christopher.docx (D128166642)
Presentado	2022-02-17 11:24 (-05:00)
Presentado por	Clara Glas (claglas@hotmail.com)
Recibido	clara.glas.ucsg@analysis.arkund.com
Mensaje	Trabajo de título Cristopher Mostrar el mensaje completo

6% de estas 32 páginas, se componen de texto presente en 10 fuentes.

At the bottom of the interface, there is a navigation bar with icons for home, search, and navigation arrows.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a Dios, por ser mi principal guía para poder culminar esta carrera universitaria, por mostrarme el lado bueno y malo de la vida y sobre todo por darme fuerzas en los momentos más difíciles, los cuales me han ayudado a crecer como persona y a no rendirme a pesar de los obstáculos.

En segundo lugar, quiero agradecer a mi familia, principalmente a mis padres Cristóbal y Mónica, por brindarme todo su apoyo y consejos en todos los ámbitos de la vida, gracias a ellos pude cumplir este objetivo y espero poder seguir teniéndolos a mi lado para poder cumplir muchos más.

Agradezco también a mi hermana Kristhel, por ser mi principal motivo para seguir adelante y por darme los momentos más alegres y bonitos de mi vida.

A mi tutor de tesis el Dr. Rolando Vila Romaní, excelente profesional y persona, agradezco por todas sus enseñanzas y su gran paciencia durante todo el trayecto del presente trabajo.

Por último, quiero agradecer a todos mis amigos y compañeros dentro y fuera de la universidad, por todos esos momentos de alegría y convivencia que te hacen olvidar de los problemas.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a mi mamá, por ser mi gran apoyo, por estar siempre conmigo y creer en mí. Sin ella y sin su amor y enseñanzas, esto no hubiera sido posible. Todo lo que sé y lo que soy es gracias a ella.

Quiero dedicar también este trabajo a mis tres abuelos en el cielo Yolanda, Carlos y Bárbara, estoy seguro que donde estén, ellos se sienten muy felices y orgullosos de mí, cada uno de ellos me dio grandes enseñanzas de vida. Y, por último, dedico este trabajo a mi abuelito Alfredo que gracias a Dios aún está conmigo en este gran momento de mi vida.



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

f. _____

Ing. Vila Romaní, Rolando PhD.

TUTOR

f. _____

Ing. Alcívar Bastidas, Stefany M.Sc.

DIRECTORA DE LA CARRERA

f. _____

Ing. Varela Terreros, Nancy M.Sc.

DOCENTE DE LA CARRERA

f. _____

Ing. Von Buchwald de Janon, Federico PhD.

OPONENTE

ÍNDICE GENERAL

Capítulo I.....	2
1. Introducción.....	2
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Justificación e importancia del tema.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Alcance.....	5
1.5 Metodología.....	5
Capítulo II.....	7
2. Marco teórico.....	7
2.1 Mezclas asfálticas. Propiedades para su empleo en carreteras.....	7
2.2 Pruebas básicas relacionadas con su diseño y control rutinario.....	8
2.2.1 Parámetros resistentes.....	9
2.2.2 Parámetros volumétricos.....	10
2.3 Problemas que presentan las mezclas asfálticas en el Ecuador.....	14
2.3.1 Agrietamiento por fatiga.....	14
2.3.2 Agrietamiento por bloques.....	18
2.3.3. Desintegraciones.....	19
2.4 Impacto del envejecimiento en los deterioros.....	20
2.4.1 Causas principales del envejecimiento.....	21
2.4.2. Procesos de envejecimiento en el laboratorio.....	22
2.5 Pruebas simples de control del agrietamiento.....	23
2.5.1 Prueba de tracción indirecta.....	23
2.5.2 Prueba de flexión semicircular.....	24

2.5.3 Prueba Ideal.....	26
Capítulo III.....	30
3. Trabajo experimental.....	30
3.1 Selección de plantas.....	30
3.2 Características constitutivas de las mezclas de plantas seleccionadas	32
3.2.1. Generalidades	32
3.2.2. Pruebas rutinarias	32
3.3 Proceso de confección de briquetas de 150 mm de diámetro	36
3.4 Proceso de envejecimiento aplicado	38
3.5 Procedimiento de prueba IDEAL y forma práctica de aplicación	39
3.5.1 Resumen de resultados	41
3.6. Análisis de resultados	43
3.6.1. CTindex.....	43
3.6.2. Pendiente /m75/.....	44
3.6.3. Parámetro I ₇₅ /D	46
3.6.4. Energía de falla G _f	47
3.6.5. Carga máxima	48
3.7. Observaciones adicionales	49
Capítulo IV.....	51
4. Conclusiones y Recomendaciones.....	51
4.1. Conclusiones.....	51
4.2. Recomendaciones	53
Referencias Bibliográficas	54
Anexos.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Contenido de asfalto por extracción en centrífuga. Planta 1.	32
Tabla 2. Granulometría de los agregados minerales extraídos. Planta 1.	32
Tabla 3. Determinación de Gmm. Planta 1.	33
Tabla 4. Parámetros volumétricos evaluados. Planta 1.	33
Tabla 5. Contenido de asfalto por extracción con centrífuga. Planta 2.	33
Tabla 6. Granulometría de los agregados minerales extraídos. Planta 2.	34
Tabla 7. Determinación de Gmm. Planta 2.	34
Tabla 8. Parámetros volumétricos evaluados. Planta 2.	34
Tabla 9. Contenido de asfalto por extracción con centrífuga. Planta 3.	35
Tabla 10. Granulometría de los agregados minerales extraídos. Planta 3.	35
Tabla 11. Determinación de Gmm. Planta 3.	35
Tabla 12. Parámetros volumétricos evaluados. Planta 3.	36
Tabla 13. Procesamiento de resultados de la Muestra 3 de Planta 1 a corto plazo.	40
Tabla 14. Determinación del CTindex. Muestra 3. Basalto. 0 días.	41
Tabla 15. Resumen de resultados. Planta 1. Agregado: Basalto.	42
Tabla 16. Resumen de resultados. Planta 2. Agregado: Caliza.	42
Tabla 17. Resumen de resultados. Planta 3. Agregado: Pizarra.	42
Tabla 18. Resumen de valores promedios CT index.	43
Tabla 19. Resumen de valores promedios /m75/.	45
Tabla 20. Resumen de valores promedios I ₇₅ /D.	46
Tabla 21. Resumen de valores promedios Gf.	47
Tabla 22. Resumen de valores promedios de carga máxima.	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metodología de trabajo	6
Figura 2. Ensayo de estabilidad Marshall.....	9
Figura 3. Equipo para prueba Rice	11
Figura 4. Tipos de severidad en grietas por fatiga.....	15
Figura 5. Agrietamiento por fatiga tipo piel de cocodrilo	16
Figura 6. Agrietamiento por fatiga descendente en la vía Playas Posorja.....	17
Figura 7. Agrietamiento por bloque.	18
Figura 8. Pavimento antiguo con desintegraciones superficiales.	20
Figura 9. Impacto del envejecimiento en vía Alóag Santo Domingo, sector de la sierra.	21
Figura 10. Configuración e carga y rotura del ensayo de tracción indirecta.....	23
Figura 11. Configuración para la prueba SCB.	25
Figura 12. Prensa utilizada para la prueba IDEAL.....	26
Figura 13. Esquema de la prueba IDEAL y el proceso de agrietamiento generado.....	27
Figura 14. Puntos de carga con sus respectivos desplazamientos durante la prueba. ...	29
Figura 15. Roca basáltica.	30
Figura 16. Roca caliza.	31
Figura 17. Roca Pizarra.	31
Figura 18. Granulometría de la mezcla. Planta 1.	33
Figura 19. Granulometría de la mezcla. Planta 2.	34
Figura 20. Granulometría de la mezcla. Planta 3.	35
Figura 21. Toma de mezcla en la Planta 1.....	36
Figura 22. Pesado de muestra para elaboración de briquetas.	37
Figura 23. Briquetas compactadas de la Planta 2 (agregados calizos).	38
Figura 24. Horno utilizado para envejecimiento de las briquetas.	38
Figura 25. Prueba IDEAL.....	39
Figura 26. Curva Carga vs Desplazamiento. Muestra 3. Basalto. 0 días.	41
Figura 27. Variación de CT index con el envejecimiento.	43
Figura 28. Variación de CTindex en las diferentes mezclas.	44
Figura 29. Variación de la pendiente /m75/ en las diferentes mezclas.	45
Figura 30. Variación del parámetro I_{75}/D en las diferentes mezclas.....	46
Figura 31. Variación del parámetro G_f en las diferentes mezclas.....	47
Figura 32. Variación de la carga máxima en las diferentes mezclas.....	48
Figura 33. Incidencia de la variación del contenido de asfalto.	49

Resumen

Los agrietamientos son el principal deterioro de las mezclas asfálticas en el Ecuador y deben ser tomados en cuenta en los controles de calidad, ya que actualmente no existen pruebas ni exigencias establecidas al respecto. El objetivo de este trabajo es evaluar la resistencia a la fractura de diferentes mezclas asfálticas procedentes de plantas ubicadas en la ciudad de Guayaquil o sus alrededores, mediante la prueba IDEAL sobre probetas envejecidas a corto, mediano y a largo plazo, para establecer comparaciones y valorar sus posibles comportamientos.

Para el proceso de envejecimiento se consideraron en general los criterios de la normativa AASHTO R30. Se seleccionaron en total 3 plantas que emplean distintos agregados, procedentes de rocas basálticas, calizas y pizarras, confeccionándose 9 briquetas de 150 mm de diámetro de las mezclas de cada planta, con 7% de vacíos aproximadamente. Luego se aplica el proceso de envejecimiento en horno, se realiza la prueba IDEAL a 25 °C y la determinación del CT index.

En los tres tipos de mezclas al incrementar el tiempo de envejecimiento los valores de CT index disminuyen, por lo que la resistencia al agrietamiento es menor en mezclas más envejecidas. Las mezclas con agregados provenientes de roca caliza y basalto presentaron una mejor resistencia al agrietamiento, luego del envejecimiento, que la mezcla con pizarra. No obstante, al comparar con otros resultados internacionales puede concluirse que todos nuestros valores fueron bajos. Esta situación puede ser consecuencia de la calidad del asfalto producido en Esmeraldas.

Palabras claves: mezclas asfálticas, agrietamientos, envejecimiento, prueba IDEAL, AASHTO R30, CT index.

Abstract

Cracking is the main deterioration of asphalt mixtures in Ecuador and should be taken into account in quality controls, since there are currently no established test or requirements in this regard. The objective of this work is to evaluate the fracture resistance of different asphalt mixtures from plants located in the city of Guayaquil or its surroundings, by means of the IDEAL test on specimens aged in the short, medium and long term, in order to establish comparisons and evaluate their possible behaviors.

For the aging process, the criteria of the AASHTO R30 standard were generally considered. A total of 3 plants using different aggregates from basaltic rocks, limestone and shale were selected, making 9 briquettes of 150 mm diameter from the mixtures of each plant, with approximately 7% voids. Then the oven aging process is applied, the IDEAL test is performed at 25 °C and the CT index is determined.

In the three types of mixes, as the aging time increases, the CT index values decrease, so the cracking resistance is lower in older mixes. The mixes with aggregates from limestone and basalt showed better cracking resistance after aging than the mix with slate. However, when comparing with other international results, it can be concluded that all our values were low. This situation may be a consequence of the quality of the asphalt produced in Esmeraldas.

Keywords: asphalt mixes, cracking, aging, IDEAL test, AASHTO R30, CT index.

Capítulo I

1. Introducción

1.1 Antecedentes

Las mezclas asfálticas han sido desde sus inicios, la parte fundamental en el diseño de pavimentos flexibles debido a que conforman la superficie donde transitan a diario los vehículos. Además, las mezclas se encargan de definir las propiedades principales del pavimento como son la rigidez y la resistencia al agrietamiento. Esta última es de gran importancia debido a que el agrietamiento es uno de los mayores problemas que presentan las carreteras en todo el mundo, incluyendo nuestro país, donde comúnmente suelen presentarse deterioros asociados a grietas por fatiga y en bloques.

Este trabajo se relaciona con el empleo de la prueba de agrietamiento IDEAL en mezclas asfálticas desarrollada originalmente en EE.UU. y publicadas en el Reporte Final del NCHRP IDEA Project 195 en enero 2019. Esta prueba tiene un origen remoto en el ensayo de tracción indirecta desarrollado en la Universidad de Texas en Austin (Kennedy & Hudson, 1968). Vale destacar que, en el pasado año 2021, se desarrolló en la Facultad de Ingeniería de la UCSG el trabajo de titulación “Empleo de la prueba IDEAL para el control del agrietamiento en mezclas asfálticas” (Navarrete, 2021), donde se explican en detalle los pasos realizados para desarrollar esta prueba, así como sus beneficios y su importancia. En dicho trabajo se empleó un solo tipo de mezcla asfáltica representativa.

Las primeras experiencias con la prueba IDEAL se dieron en EE.UU. debido a la necesidad originada desde hace mucho tiempo de como poder aplicar una prueba de agrietamiento simple y confiable para un correcto diseño y control en las diferentes mezclas asfálticas (Navarrete, 2021). En el año 2019 en Colombia se comenzó también a realizar la prueba IDEAL para identificar la resistencia a la fractura de mezclas recicladas, mezclas alteradas con asfaltitas, mezclas calientes, densas y drenantes (Reyes, Useche & Álvarez, 2019). Ahora se buscará emplear esta prueba en mezclas de diferentes plantas asfálticas para establecer comparaciones y valorar sus posibles comportamientos en los pavimentos.

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). Esta serie de programas consistió en tomar la prueba de tracción indirecta realizada sobre especímenes de 150 mm de diámetro a una temperatura de 25°C y velocidad de carga de 50 mm/min y considerar para dicha prueba una variación en la recolección de datos necesarios para clasificar la resistencia al agrietamiento de las mezclas y obtener un mejoramiento en el diseño de las mismas, tomando el nombre de esta nueva prueba como prueba de agrietamiento IDEAL

1.2 Justificación e importancia del tema

Las grietas en las mezclas asfálticas son originadas comúnmente por el efecto de las cargas que ejercen los vehículos, así como también por las condiciones climáticas, el envejecimiento de las mezclas y los cambios de temperatura más aun con la tendencia de emplear mezclas recicladas en caliente.

Pese a que el fenómeno del agrietamiento es muy importante, en nuestro país no se realiza de manera rutinaria una prueba para determinar la resistencia de las mezclas al agrietamiento. En las Especificaciones Técnicas para la Construcción de Carreteras y Puentes del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO, 2002) no hay especificaciones al respecto y el empleo de la prueba de tracción indirecta está asociada a la evaluación del daño en la mezcla por el agua. Sin embargo, en nuestro país el agrietamiento es el deterioro más importante, estando asociado a la tendencia del cemento asfáltico, producido en la Refinería de Esmeraldas, de presentar envejecimiento prematuro (Vila, 2019).

La importancia de este trabajo de tipo investigativo reside en aplicar la prueba de agrietamiento IDEAL con envejecimiento a corto, mediano y largo plazo en diferentes mezclas asfálticas producidas en plantas en Guayaquil o sus alrededores, con diferentes tipos de agregados, debido a que su envejecimiento podría modificar tanto la rigidez como la capacidad de deformación en las mezclas volviéndolas más vulnerables a la fisuración. Con los datos recolectados en esta prueba se puede obtener información sobre cuáles agregados serían los más convenientes, lo que permitiría tener un elemento importante a considerar para obtener pavimentos más duraderos en la ciudad de Guayaquil y en un futuro poder ajustar nuevas exigencias en lo que respecta al diseño de mezclas asfálticas.

El trabajo aportará:

- a) Conocimientos sobre una nueva prueba de resistencia a la fractura de mezclas asfálticas, problema fundamental en las vías del país.
- b) Una comparación entre resultados de la resistencia a la fractura de diferentes plantas ubicadas en la ciudad de Guayaquil o sus alrededores, que permitirá conocer las de mejor calidad respecto al comportamiento ante el agrietamiento.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la resistencia a la fractura de diferentes mezclas asfálticas procedentes de plantas ubicadas en la ciudad de Guayaquil o sus alrededores, mediante la prueba IDEAL sobre probetas envejecidas a corto, mediano y a largo plazo, para establecer comparaciones y valorar sus posibles comportamientos.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Estudiar el procedimiento de la prueba de agrietamiento IDEAL.
2. Seleccionar al menos 3 plantas asfálticas que empleen agregados de diferentes composiciones mineralógicas.
3. Estudiar las particularidades de las mezclas producidas, es decir, sus parámetros constitutivos, volumétricos y resistentes.
4. Confeccionar los especímenes de 150 mm de diámetro con 7% de vacíos aproximadamente y someterlos a un proceso de envejecimiento acelerado en horno a corto y largo plazo. Como ayuda al procesamiento e interpretación de resultados se incluyó un mediano plazo.
5. Realizar las pruebas de agrietamiento IDEAL y procesar la información adquirida.
6. Establecer relaciones entre los resultados empleando criterios estadísticos.

1.4 Alcance

El trabajo que se propone, por su objeto de estudio y los objetivos planteados, es de alcance local y nacional. Los resultados que se obtengan del mismo serán de interés y posible aplicación por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), además de consultores y técnicos en general vinculados a esta temática. Este trabajo abarca principalmente procesamientos de datos experimentales y estudios bibliográficos.

Se tomarán muestras de mezclas asfálticas de 3 plantas que empleen agregados con diferente composición mineralógica. Con dichas muestras se confeccionarán los especímenes que serán sometidos a diferentes niveles de envejecimiento acelerado y luego, a los mismos se les determinarán el índice de tolerancia al agrietamiento (CTINDEX), a partir de parámetros que se obtendrán de la curva carga-deformación.

Más allá de los resultados obtenidos en este trabajo, se espera que a futuro se continúe introduciendo esta prueba en el Ecuador y se sigan recolectando datos que permitan mejorar el control del agrietamiento con la prueba IDEAL y a futuro establecer alguna exigencia al respecto en nuestra norma de calidad a las mezclas.

1.5 Metodología

Se realizará con la aplicación del método general de análisis y síntesis. Se hará estudio bibliográfico, procesamiento de datos experimentales y aplicación de modelos estadísticos.

El trabajo inicia con seleccionar 3 plantas asfálticas con ubicación cercana a la ciudad de Guayaquil las cuales empleen agregados con diferentes composiciones mineralógicas. A las mezclas muestreadas en las plantas se les realizará su respectiva caracterización obteniendo sus parámetros volumétricos y resistentes.

Luego se procederá a confeccionar muestras cilíndricas denominadas briquetas, de dimensiones 150 mm de diámetro y espesores aproximados de 65 mm, compactadas por impacto para alcanzar un porcentaje de vacíos cercano a 7%. Posteriormente las briquetas serán sometidas a un envejecimiento en horno a corto, mediano y largo plazo, y para finalizar se realizará la prueba de agrietamiento IDEAL, que permitirá realizar

una comparación mediante el valor del índice de tolerancia al agrietamiento de cada una de las plantas y establecer conclusiones. Todo el procedimiento experimental se lo realizará en el Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Ver Figura 1.

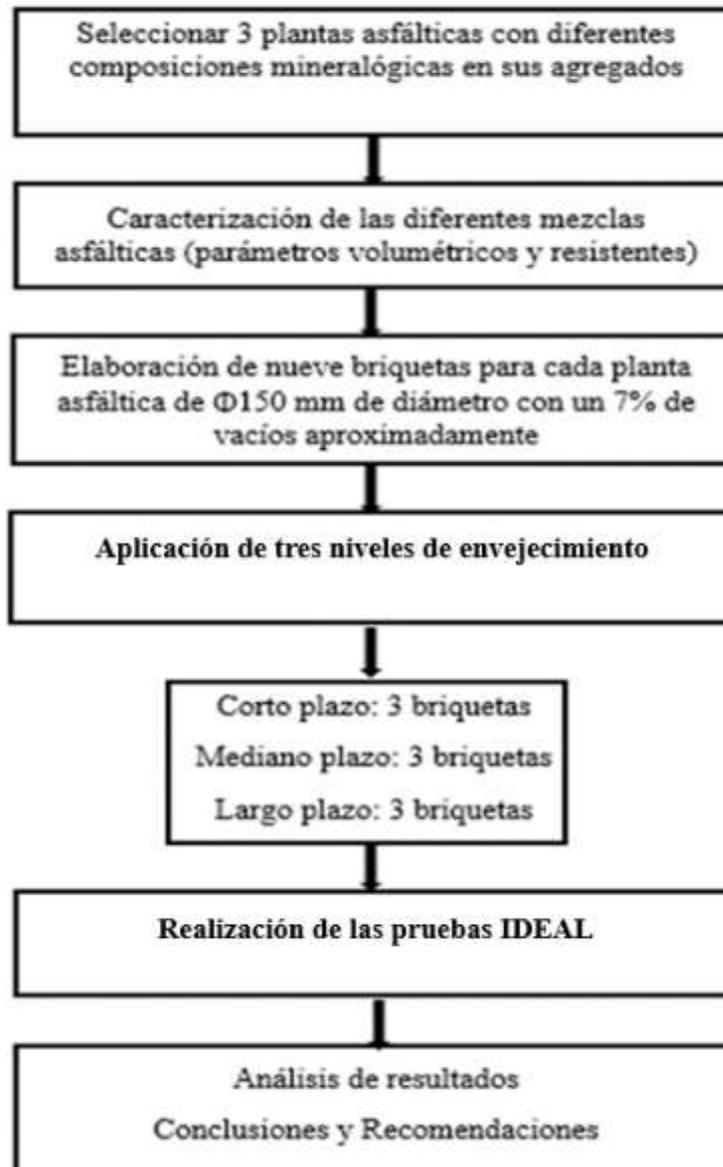


Figura 1. Metodología de trabajo

Capítulo II

2. Marco teórico

2.1 Mezclas asfálticas. Propiedades para su empleo en carreteras

La mezcla asfáltica se define como una combinación de agregados minerales y un ligante asfáltico, mezclado de tal forma que los agregados pétreos queden cubiertos por una película uniforme de asfalto. Las propiedades relativas de estos materiales son los que determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el comportamiento funcional de la misma como pavimento (Cepeda, 2002).

Para un correcto diseño de la mezcla asfáltica y, posteriormente su empleo en carreteras se requiere los conocimientos de las propiedades más relevantes de la misma ya que estas son las que definen el comportamiento del pavimento y son las siguientes:

- a) Estabilidad y resistencia a las deformaciones plásticas.
- b) Resistencia a la fatiga.
- c) Durabilidad o resistencia a los agentes externos.
- d) Resistencia al deslizamiento.

- a) **Estabilidad y resistencia a las deformaciones plásticas:** Capacidad de la mezcla para resistir los desplazamientos y deformaciones ocasionados por las cargas del tráfico vehicular. La mezcla es estable cuando no presenta deformaciones permanentes luego de haber recibido una serie de cargas.

La resistencia a las deformaciones plásticas depende de las características reológicas de la muestra que evitan las deformaciones longitudinales cuya magnitud aumenta en condiciones de altas temperaturas y velocidades bajas de tráfico, fenómeno conocido como rodadera o ahuellamiento (Padilla, 2004).

Puede incidir en una baja estabilidad un contenido de asfalto y una granulometría en los agregados inadecuada, así como esfuerzos cortantes elevados.

- b) **Resistencia a la fatiga:** Capacidad de soportar las cargas provocadas por el tránsito. Estas cargas generan esfuerzos de tracción que van deteriorando la

mezcla formando grietas debido a las deflexiones progresivas que se presentan por el paso constante de vehículos. El agrietamiento por fatiga depende principalmente de la rigidez de la mezcla y de la estructura del pavimento donde se ubica la capa asfáltica.

c) **Durabilidad o resistencia a los agentes externos:** Capacidad de la mezcla para resistir el desgaste provocado por distintos agentes como: el agua de lluvia, aire, cambios de temperatura, rayos ultravioletas, tráfico, entre otros. Estos agentes conllevan al envejecimiento de la mezcla, al desprendimiento de la película de asfalto y a desintegraciones de la mezcla que inician con la pérdida de finos. Para tener un buen diseño de la mezcla asfáltica se busca que no se presente un envejecimiento excesivo durante el periodo de diseño. La durabilidad se afecta por contenidos bajos de asfalto, asfaltos muy rígidos, bajas temperaturas y mezclas poco resistentes al daño por el agua.

d) **Resistencia al deslizamiento:** Capacidad de la mezcla para evitar la pérdida de adherencia entre el neumático y la superficie del pavimento. Para que exista una buena resistencia al deslizamiento la mezcla debe tener un coeficiente de fricción adecuado.

Entre los factores principales que afectan el coeficiente de fricción están la macrotextura y microtextura, la presencia de agua en la superficie, la naturaleza del agregado y el ligante, la presión de inflado del neumático y la velocidad del vehículo (Leiva, 2005).

2.2 Pruebas básicas relacionadas con su diseño y control rutinario

Para un correcto diseño de la mezcla asfáltica es necesario cumplir ciertos requisitos obtenidos de pruebas de control tanto para la mezcla como para los componentes que la forman. Se debe verificar que exista una correcta dosificación de los agregados, que las temperaturas de mezclado y compactación sean las correctas y encontrar el porcentaje ideal de cemento asfáltico que se necesitará para elaborar la muestra. Para esto, se debe cumplir todos los parámetros resistentes y volumétricos siguiendo las exigencias del

Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO, 2002). Se detallarán a continuación los diversos parámetros relacionados al diseño de mezclas.

2.2.1 Parámetros resistentes

Para evaluar los parámetros resistentes de la mezcla asfáltica se suele emplear el ensayo de estabilidad y flujo Marshall. El ensayo consiste en elaborar previamente las muestras o briquetas siguiendo la metodología Marshall (ASTM D1559). Una vez confeccionadas las muestras se las sumerge a un baño María con una temperatura de 60 °C, las muestras deben mantenerse sumergidas durante 25 a 30 minutos. Luego de haber sumergido la muestra se la seca cuidadosamente para luego colocarla entre las mordazas de la máquina de estabilidad Marshall. Ver Figura 2.



Figura 2. Ensayo de estabilidad Marshall.

Luego de haber colocado la muestra entre las mordazas de la máquina, se procede a realizar la aplicación de la carga a una velocidad de 50 mm/min hasta la rotura de la briqueta. Se toma la lectura del anillo, parámetro necesario para calcular la estabilidad Marshall junto con un factor de calibración del anillo y un factor de corrección en función del espesor o del volumen de la briqueta. La ecuación de estabilidad Marshall se presenta a continuación:

EM (libras) = lectura del anillo x factor de calibración del anillo x factor de corrección por altura o volumen

Si bien es usual internacionalmente expresar la estabilidad en libras, puede convertirse a kN.

La estabilidad Marshall representa la carga máxima de rotura a compresión que presenta la muestra, mientras que el flujo representa la variación del diámetro desde que inicia la carga hasta el valor máximo de carga de rotura. Las mezclas pueden tener valores elevados de estabilidad, pero pequeños de flujo, lo que las identifica como mezclas rígidas. Las mezclas con valor de estabilidad bajo y flujo elevado son propensas a tener problemas de deformación bajo las cargas del tráfico. (Asphalt Institute, 1992).

2.2.2 Parámetros volumétricos

Los parámetros volumétricos comprenden el análisis de las proporciones volumétricas tanto de la mezcla asfáltica como de los agregados, así como también los porcentajes de asfalto y los porcentajes de vacíos de la mezcla. Los parámetros volumétricos son los siguientes:

- a) Gravedad específica bulk de los agregados (Gsb).
- b) Gravedad específica máxima teórica (Gmm).
- c) Gravedad específica efectiva de los agregados (Gse).
- d) Porcentaje de absorción de asfalto (Pba).
- e) Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).
- f) Porcentaje de vacíos en la mezcla compactada (Pa).
- g) Porcentaje de vacíos rellenos con asfalto (VFA).

- a) Gravedad específica bulk de los agregados (Gsb):** Se define como gravedad específica bulk del agregado a la relación entre la masa en el aire de un determinado volumen del agregado permeable (tomando los poros permeables e

impermeables en el agua), y la masa de un volumen igual de agua, ambos componentes a la misma temperatura. Una vez obtenido la gravedad específica bulk de cada agregado, se calcula la gravedad específica bulk total de los agregados con la siguiente ecuación:

$$Gsb = \frac{\sum \% \text{ En peso del agregado}}{\sum \frac{\% \text{ En peso del agregado}}{GE \text{ bulk del agregado}}}$$

b) Gravedad específica máxima teórica (Gmm): Es la relación entre la masa en el aire de un volumen de mezcla sin compactar a una temperatura de 25 °C con respecto a la masa de un volumen igual de agua. Representa la gravedad específica de una mezcla con porcentaje de vacíos igual a cero. Este valor se lo puede obtener mediante la prueba Rice que se realiza con ayuda del equipo con recipiente o picnómetro que se muestra en la Figura 3. La gravedad específica máxima teórica mediante la prueba Rice se obtiene con la siguiente ecuación:

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

Donde:

A = masa de la mezcla seca en el aire (gr).

B = masa del picnómetro + agua (gr).

C = masa del picnómetro + agua + mezcla (gr)



Figura 3. Equipo para prueba Rice

c) **Gravedad específica efectiva de los agregados (Gse):** La gravedad específica efectiva del agregado se define como la relación entre la masa en el aire de un volumen del agregado permeable (excluyendo los poros permeables al asfalto), y la masa de un volumen igual de agua, ambos componentes a la misma temperatura. Este parámetro se lo puede obtener con la siguiente ecuación una vez conocida la gravedad específica máxima teórica (Gmm) obtenida en la prueba Rice, y el porcentaje y gravedad específica del asfalto:

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

Donde:

Gmm = Gravedad específica máxima.

Pb = Porcentaje de asfalto.

Gb = Gravedad específica del asfalto.

d) **Porcentaje de absorción de asfalto (Pba):** Representa el porcentaje de asfalto absorbido, en peso del agregado. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

Gse = Gravedad específica efectiva de los agregados.

Gsb = Gravedad específica bulk de los agregados.

Gb = Gravedad específica del asfalto.

e) **Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA):** Representa los vacíos de aire entre las partículas del agregado en una mezcla compactada, incluye los vacíos de aire y el volumen efectivo del asfalto, expresado en porcentaje del

volumen bruto de la mezcla (Asphalt Institute, 1997). Se obtiene mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

Gmb = Gravedad específica bruta de la mezcla compactada.

Ps = Porcentaje total en peso de los agregados.

Gsb = Gravedad específica bulk de los agregados.

f) Porcentaje de vacíos en la mezcla compactada (Pa): Representa los vacíos de aire en porcentaje del volumen total de la mezcla compactada. Se determina con la siguiente ecuación:

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

Donde:

Gmm = Gravedad específica máxima de la mezcla.

Gmb = Gravedad específica bruta de la mezcla compactada.

g) Porcentaje de vacíos rellenos con asfalto (VFA): Representa el porcentaje de vacíos de las partículas del agregado mineral que están rellenos con asfalto. Se obtiene con la ecuación:

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

Donde:

VMA = Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

Pa = Porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

2.3 Problemas que presentan las mezclas asfálticas en el Ecuador

Las mezclas asfálticas como parte del pavimento están sujetas a deterioros a lo largo de su vida útil causados principalmente por el paso de vehículos y la exposición al medio ambiente. Los principales problemas o deterioros que se presentan en el Ecuador están relacionados con los agrietamientos, incluyéndose aquí las grietas por fatiga tanto ascendentes como descendentes y las grietas en bloque, éstas últimas más comunes en la región sierra, al igual que las desintegraciones.

2.3.1 Agrietamiento por fatiga

La fatiga ha sido definida como el fenómeno de fractura bajo tensiones repetidas cuyo valor máximo es generalmente menor a la resistencia a la tracción del material. Bajo la acción de las cargas de tránsito las mezclas asfálticas son sometidas a tensiones repetidas y la posibilidad de daño por fatiga siempre estará presente. Existe un nivel de deformación por tracción en la capa asfáltica el cual establece cuando la grieta se inicia, pero la tensión por tracción controla la propagación subsiguiente de la misma.

Trabajos de varios investigadores (Shook et al., 1982) 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 (Brown, 1988), una capa rígida es deseable para prevenir el inicio de las grietas, pero acelerará su subsiguiente propagación.

El agrietamiento por fatiga convencional, ascendente, tipo piel de cocodrilo, se inicia en el fondo de la capa asfáltica. Inicialmente, las grietas se propagan a la superficie como una serie de grietas longitudinales paralelas. Después de repetidas cargas de tránsito, las grietas se conectan formando polígonos con ángulos agudos que desarrollan un patrón que se asemeja a una malla de gallinero o a la piel de cocodrilo. Generalmente, el lado más grande de las piezas no supera los 0.30 m.

Debido a los diferentes factores que pueden provocar el agrietamiento por fatiga y al crecimiento constante de las fisuras, se definen tres niveles de severidad: baja, moderada y alta (Vila, 2019). Ver Figura 4.

- Baja: Fisuras muy finas, menores de 1.5mm de ancho, paralelas con escasa interconexión; las fisuras no están desportilladas o descascaradas.

- Medio: Fisuras muy finas a moderadas, de ancho menor de 5 mm, interconectadas formando polígonos pequeños, y angulosos, que pueden presentar un moderado desportillado.

- Alta: La red de fisura ha progresado de manera de constituir una malla cerrada de pequeños polígonos bien definidos, con desportillados en sus bordes; algunas de estas piezas pueden tener movimiento al ser sometidas al tráfico y/o pueden haber sido removidos por el mismo.



Figura 4. Tipos de severidad en grietas por fatiga.

Tomado de Downloads/SVPU-2014-RFP-14104_Sección%208%20Manual%20de%20Evaluación%20de%20Pavimentos%202014.pdf

Existen en general dos mecanismos del agrietamiento de fatiga: agrietamiento ascendente o bottom-up cracking (BUC) y agrietamiento descendente o top-down cracking (TDC). El primero, el agrietamiento ascendente, en general ha sido tratado con mayor frecuencia por los diferentes investigadores a lo largo de los años, inicia en el fondo de la capa asfáltica donde las deformaciones unitarias de tracción pueden ser mayores, lo que puede ocurrir, por ejemplo, en capas asfálticas delgadas. Ver Figura 5.

Según NCHRP (2002), las causas que generan agrietamiento por fatiga ascendente son:

- Capas asfálticas delgadas que no son capaces de soportar las repeticiones de las cargas por rueda.
- Cargas por rueda de magnitudes muy elevadas.
- Zonas blandas en la capa de base de agregados, sub-base o subrasante.
- Capas débiles de base o sub-base, debido a mala compactación o incremento del contenido de humedad.

Podría añadirse a estas el caso usual en el país de colocar capas asfálticas (muy rígidas) sobre estructuras pétreas débiles, bajo presiones políticas o sociales.



Figura 5. Agrietamiento por fatiga tipo piel de cocodrilo

Tomado de: Manual para el tratamiento de fallas en pavimentos. Parte 1. Pavimentos flexibles. Ing. Rolando Vila. Octubre 2019. Confeccionado para el M.I. Municipio de Guayaquil.

En el agrietamiento descendente las fisuras se inician en la superficie o a una profundidad muy cercana a esta y se propagan hacia abajo, mediante un mecanismo de propagación distinto a los criterios convencionales aplicados en el agrietamiento ascendente (Pellinen, Rowe, & Biswas, 2004), (Roque, et al., 2010).

Dicho agrietamiento descendente, en las primeras etapas, suele presentarse como fisuras longitudinales, aunque con ciertas sinuosidades que las diferencian de las fisuras formadas en las juntas constructivas mal ejecutadas. Dichas fisuras longitudinales se generan a lo largo de las zonas donde se canaliza el paso de las ruedas cargadas. Ver Figura 6. En una etapa más avanzada suelen aparecer fisuras paralelas y oblicuas que parten de anteriores y generan redes de grietas muy parecidas a la fatiga ascendente.



Figura 6. Agrietamiento por fatiga descendente en la vía Playas Posorja.

Las mezclas asfálticas con altos contenidos de vacíos de aire sufren de agrietamiento descendente de forma más severa que las mezclas más compactadas. Además, permite que más aire se difunda en la capa asfáltica con mayor contenido de vacíos, reaccionando con el ligante e incrementando la fragilidad de la mezcla en la parte superficial (Glover et al., 2014).

Las grietas por este tipo de fatiga TDC no afectan en sus primeras etapas de forma significativa la capacidad estructural del pavimento asfáltico. No obstante, a lo largo del tiempo y con el constante tráfico, las grietas secundarias pueden aumentar e interconectarse, pudiendo permitir la filtración del agua y generar daños por humedad (Naranjo, 2020). Las superficies con agrietamiento descendente sometidas a camiones sobrecargados, si no se mitigan pronto podrían afectar la integridad estructural del pavimento (Emery, 2007).

Según NCHRP (2002), las causas que generan agrietamiento por fatiga descendente son:

- Esfuerzos y deformaciones por tracción que ocurren en la superficie debido a la carga por rueda y que se propagan hacia abajo debido a las tracciones.
- Esfuerzos cortantes que ocurren en la superficie de la capa asfáltica causadas por las llantas con alta presión de contacto cerca de los bordes, propagándose las grietas tanto por cortante como tracción.
- El envejecimiento severo de la mezcla asfáltica cerca de la superficie provocando una alta rigidez, que cuando se combina con una elevada presión de contacto con las llantas, causa el inicio y propagación de las grietas.

2.3.2 Agrietamiento por bloques

Las fisuras en bloque son aquellas que están interconectadas y dividen la superficie del pavimento en polígonos aproximadamente rectangulares. El tamaño de los bloques varía entre 1 y 9 m². A mayor tamaño son identificados como fisuras longitudinales y transversales. Se origina mayormente por la excesiva contracción de la mezcla asfáltica inducida por cambios de temperatura o humedad. Las fisuras en bloques se miden en metros cuadrados de superficie total afectada en la sección de pavimento evaluada. (MOPC, 2016). En este tipo de falla la superficie del asfalto es dividida en bloques de forma rectangular. Ver Figura 7. Difiere de la de tipo piel de cocodrilo ya que el agrietamiento en bloque aparece usualmente en áreas no cargadas (Miranda, 2010).



Figura 7. Agrietamiento por bloque.

Tomado de: "Evaluación de Pavimentos" por Corredor & Corros, Nicaragua, 2010.

Según Vila (2020), las causas del agrietamiento en bloque son:

- Excesiva contracción de la mezcla asfáltica generada por cambios diarios de temperatura y humedad.
- Excesivo endurecimiento del bitumen por deficiencia durante la manipulación y elaboración de la mezcla asfáltica o debido a una prolongada exposición y oxidación durante el servicio.
- Mezcla asfáltica muy rígida, debido a un exceso de filler o asfalto de comportamiento inadecuado.

En el agrietamiento por bloque también existen 3 niveles de severidad dependiendo del ancho de las grietas. En el nivel de severidad baja las grietas tienen un ancho menor a 10 mm. El ancho de grietas en la severidad moderada oscila entre los 10 y 76 mm. En el nivel de severidad alta en cambio, las grietas superan un ancho de 76 mm. (Corredor & Corros, 2010).

2.3.3. Desintegraciones

Son las disgregaciones y desmoronamiento de la superficie de rodamiento del pavimento, debido a la acción del tráfico y del intemperismo, o sea, también de los agentes climáticos con sus impactos físicos y químicos sobre la capa asfáltica. Estas incluyen desprendimiento de agregados y baches. Primero ocurre la pérdida del mástico (ligante + agregados finos) alrededor de la matriz de agregados gruesos, dejando a estos cada vez más expuestos a la acción abrasiva del tránsito y del clima. La superficie toma una textura más abierta y rugosa. Ver Figura 8. Usualmente este deterioro se conoce en Ecuador como “peladura”.

Estos son defectos asociados en general a una pérdida de las propiedades ligantes del asfalto que pueden vincularse o no a la acción del tráfico, lo que sin dudas aceleraría los deterioros. De acuerdo con Vila (2019) las afectaciones pueden ser causadas por:

- Excesivo endurecimiento del bitumen debido a inadecuada calidad, inapropiado manipuleo durante la elaboración de la mezcla asfáltica, o insuficiente cantidad;
- Pérdida de adhesión entre el bitumen y el agregado en presencia de agua;
- Mala compactación de las mezclas o problemas de segregación;

- Oxidación del bitumen luego de un prolongado periodo de servicio, particularmente en a condiciones climáticas desfavorables (altas temperatura – alta radiación solar- precipitaciones intensas);
- Importantes solicitaciones tangenciales (curvas, rampas, etc.) en combinación con algunos de los factores mencionados.



Figura 8. Pavimento antiguo con desintegraciones superficiales.

2.4 Impacto del envejecimiento en los deterioros

Uno de los principales fenómenos que contribuyen al deterioro de las mezclas asfálticas es el envejecimiento. Conocer su efecto y los diversos factores que influyen en el mismo es muy importante para evaluar el comportamiento de las mezclas asfálticas. Una mezcla asfáltica debe ser diseñada y construida no sólo para que resista las cargas de tráfico, sino también la acción del envejecimiento (López & Miró, 2015).

Precisamente en el numeral anterior, puede observarse que todos los grandes problemas de las capas asfálticas en el Ecuador: grietas por fatiga (ascendente y descendente), grietas de bloques y desintegraciones, están relacionados de alguna forma con el envejecimiento elevado del asfalto y por ende de las mezclas. El impacto del envejecimiento en los deterioros se puede observar en la Figura 9.



Figura 9. Impacto del envejecimiento en vía Alóag Santo Domingo, sector de la sierra.

2.4.1 Causas principales del envejecimiento

Las causas que provocan el envejecimiento actúan de forma conjunta, causando efectos negativos en la mezcla. Aunque no es necesario que todas ocurran al mismo tiempo, no hay que analizarlas estrictamente de forma individual ya que unas alteran a las otras (Loor, 2021). Entre las causas principales están la oxidación, la volatización y la radiación ultravioleta.

Oxidación: Proceso en el que las moléculas de asfalto se oxigenan, produciendo una serie de reacciones químicas que termina alterando su respuesta reológica y mecánica. Este fenómeno es el principal contribuyente de fragilidad y pérdida de resistencia a la fractura de los pavimentos. Además de que es una de las causas del envejecimiento que nunca deja de alterar al ligante desde el momento de su obtención (Loor, 2021).

Volatización: Se denomina volatización a la evaporación de los constituyentes volátiles del ligante debido al incremento de temperatura generado durante la mezcla, transporte y colocación en sitio. Este mecanismo de envejecimiento se lo denomina como de corto plazo ya que ocurre en la mezcla de los agregados y el asfalto, cuando las temperaturas superan los 150°C. Cuando esto sucede, la viscosidad puede aumentar de 150 a 400%, lo cual afecta a las propiedades de flujo (Fernández, Rondón & Reyes, 2013).

Radiación ultravioleta: La radiación ultravioleta que alcanza nuestro planeta es de aproximadamente 7%. Esta exposición altera directamente las propiedades de los asfaltos (Rondón & Reyes, 2015). La radiación ultravioleta, suele medirse con el índice UV que representa la intensidad que emite dicha radiación en un lugar en específico (Organización Mundial de la Salud, 2003). Ecuador debido a su ubicación geográfica, tiene un índice UV de aproximadamente 13 lo que representa un valor muy alto y que por este motivo debe considerarse la radiación ultravioleta en el estudio de envejecimiento de mezclas asfálticas.

2.4.2. Procesos de envejecimiento en el laboratorio

Algunos autores describen dos tipos de envejecimiento: a corto plazo y a largo plazo, aunque de requerirse en estudios, se puede aplicar un envejecimiento a mediano plazo. El envejecimiento a corto plazo en mezclas asfálticas ocurre durante la fabricación, mezclado, compactación y colocación en obra (Villegas et al., 2018). Mientras que el envejecimiento a largo plazo ocurre durante varios años de servicio como pavimento.

El fenómeno del envejecimiento se ha estudiado y analizado en laboratorios desde hace muchos años, aunque los resultados obtenidos de los envejecimientos en laboratorio no son exactamente iguales a los presentados en campo debido a las condiciones externas del ambiente y la acción de los rayos ultravioletas. No obstante, estas investigaciones ayudan a conocer más sobre este fenómeno y poder aplicar diversos métodos para poder controlar el envejecimiento y reducir sus daños.

Existen algunas pruebas de laboratorio que simulan el proceso del envejecimiento del asfalto. Las más comunes empleadas son:

- Prueba en horno rotatorio de película delgada o RTFOT (ASTM D2872), usual para la clasificación de asfaltos por viscosidad.
- Prueba de envejecimiento en cámara a presión o PAV (ASTM D6521), usual para la clasificación por grados de comportamiento Superpave.

Por otra, parte las pruebas de envejecimiento a mezclas asfálticas se recogen en la normativa AASHTO R30, la cual se aplicará en el presente trabajo de investigación.

2.5 Pruebas simples de control del agrietamiento

A lo largo del tiempo se han desarrollado algunas pruebas simples para un control primario o básico de la tendencia al agrietamiento de las mezclas asfálticas, fundamentalmente basadas en el análisis de una carga o esfuerzo de rotura a la tracción. Entre las de mayor trascendencia internacional se encuentran: la prueba de tracción indirecta, la prueba de flexión semicircular y la más reciente, la prueba IDEAL.

2.5.1 Prueba de tracción indirecta

La prueba de tracción indirecta consiste en someter a compresión diametral una probeta de forma cilíndrica aplicando la carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas opuestas hasta alcanzar la rotura como se muestra en la Figura 10. Esta configuración provoca un esfuerzo de tracción uniforme hasta alcanzar la rotura en el plano diametral (Moreno, 2005).

Al momento de cargar la muestra se utilizan unas placas de apoyo curvo para que no se altere de manera significativa la distribución de tensiones y para que los cálculos de relación de Poisson y módulo de elasticidad se faciliten manteniendo constante el ancho de la carga en vez de un ancho de carga variable que ocurriría con una placa de carga plana (Garrote, 2006).

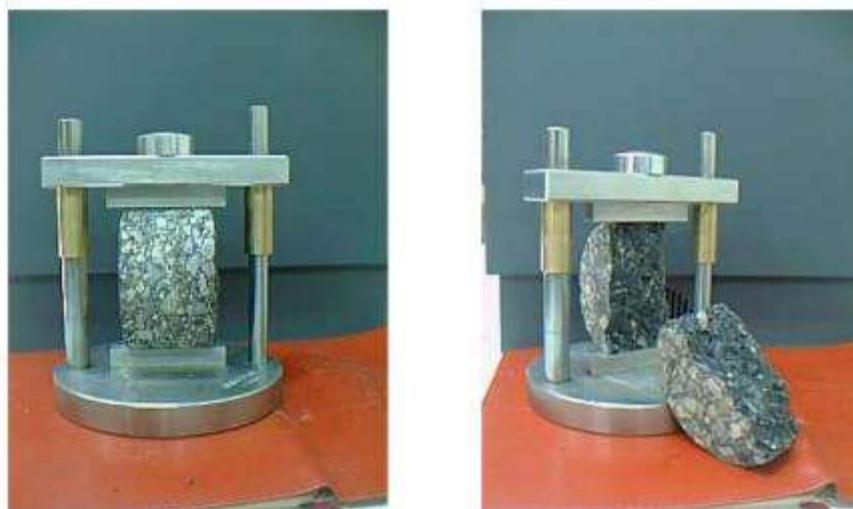


Figura 10. Configuración e carga y rotura del ensayo de tracción indirecta.

Tomado de:

http://www2.udec.cl/~provincial/trabajos_pdf/05CarlosWahrControldecalidaddemezclas.pdf

Según Kennedy (1977), las principales ventajas del ensayo de tracción indirecta son:

- Ensayo relativamente sencillo.
- Presenta similitud con otro tipo de ensayos, además de que también se utiliza mismo tipo de muestra y equipo en otros ensayos.
- La rotura no se ve afectada por las condiciones de la superficie de la probeta.
- La rotura se inicia en una región uniforme de tensiones de tracción.
- El coeficiente de variación de los resultados es relativamente bajo en comparación con otros métodos de ensayo.
- Puede utilizarse bajo carga estática o carga dinámica, modificando la prensa según el tipo de estudio que se realice.

La velocidad de aplicación de carga es de 50 mm/min y debe realizarse a una temperatura entre 5 y 25 °C siendo 25 °C la mayor recomendada. Temperaturas más elevadas pueden provocar dispersiones en los resultados. Otra de las principales ventajas de esta prueba es que puede realizarse tanto para mezclas creadas en laboratorio como para núcleos extraídos del pavimento.

La expresión de cálculo en este ensayo es:

$$T = Q / (H * D * \pi)$$

Donde:

T: resistencia a tracción indirecta, kg/cm²

Q: carga de falla de la probeta, kg

H: altura de la probeta, cm

D: diámetro de la probeta, cm

2.5.2 Prueba de flexión semicircular

Inicialmente el ensayo de flexión semicircular o SCB por sus siglas en inglés (Semi Circular Bending) era empleado para evaluar la resistencia a la fractura en rocas (Lim & Johnston, 1993). Algunos años más tarde y luego de diferentes investigaciones, Molenaar et al., (2002) concluyeron que el ensayo SCB es un ensayo simple y de bajo

costo para el estudio de la resistencia al agrietamiento y la fractura de mezclas asfálticas y que puede realizarse con muestras obtenidas mediante el compactador giratorio o muestras obtenidas en campo (Cauhape et al., 2020).

El espécimen se carga a una velocidad constante de 50 mm/min hasta la falla por fractura con una configuración de flexión en tres puntos. Si se registran continuamente la carga y la deformación, pueden calcularse la energía de deformación y la tasa de liberación de energía (Jiménez, 2020). La configuración del ensayo SCB se lo puede observar en la Figura 11.

En los inicios de este ensayo solo se tendía a cortar la briqueta en forma semi-circular, luego surgió la idea de realizar una pequeña “ranura” en la parte central inferior, la cual induciría un plano de falla. Según estudios (Arabani et al, 2009) la longitud de la ranura es de 6.35mm (1/4”), ellos también definieron la siguiente ecuación basada en estudios de elementos finitos, la que indica el máximo esfuerzo de tracción que produce el fallo:

$$\sigma_{\text{máx}} = 4.263 * P_{\text{máx}} / (d * t)$$

Donde:

$\sigma_{\text{máx}}$: Resistencia a la tracción (MPa)

$P_{\text{máx}}$: carga máxima (N)

t: espesor de la muestra (mm)

d: diámetro de la muestra (mm)



Figura 11. Configuración para la prueba SCB.

Tomado de: <https://www.controls-group.com/usa/dynamic-testing-accessories/semi-circular-bend-scb-test-for-utm-asphaltqube-ampt-pro-and-amptqube.php>

2.5.3 Prueba Ideal

Esta prueba tuvo su origen en EE.UU. y fue publicada en el NCHRP IDEA Project 105 en el 2019. La prueba IDEAL parte de la prueba de tracción indirecta que consiste en extraer núcleos de campo o ensayar cilindros hechos en laboratorio de 150 mm de diámetro compactados por impacto a una temperatura de 135° C (temperatura recomendada de compactación) de manera que se tenga un porcentaje de vacíos de 7% aproximadamente. Se recomienda el uso de 3 a 5 muestras a las que pueden aplicárseles cierto tiempo de envejecimiento.

Esta prueba se debe realizar a una temperatura de 25° C y a una velocidad de aplicación de carga de 50 mm/min con la ayuda de una prensa de velocidad variable que se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Prensa utilizada para la prueba IDEAL.

Tomado de “Empleo de la prueba IDEAL para el control del agrietamiento en mezclas asfálticas” por Navarrete, 2021, Ecuador.

Según Zhou (2019), para emplear correctamente la prueba IDEAL debe aplicarse el siguiente procedimiento:

- 1) Moldear de tres a cinco especímenes cilíndricos compactados por impacto, con un porcentaje aproximado de vacíos de aire de 7%. Adicionalmente, se debe aplicar un envejecimiento a corto, mediano y largo plazo.
- 2) Acondicionar las muestras a 25°C en una cámara ambiental hasta realizar la prueba.
- 3) Se debe inspeccionar los accesorios, verificando la limpieza de los mismos. Para ejecutar el ensayo se coloca y se alinea la muestra en el marco de carga para luego proceder a cargar la probeta a una velocidad constante de 50 mm/min hasta la ruptura.
- 4) El sistema IDEAL-CT con su respectivo software registra y grafica la curva carga (kN) vs deformación (mm). Ver Figura 13. Pueden emplearse otros sistemas de adquisición de datos.

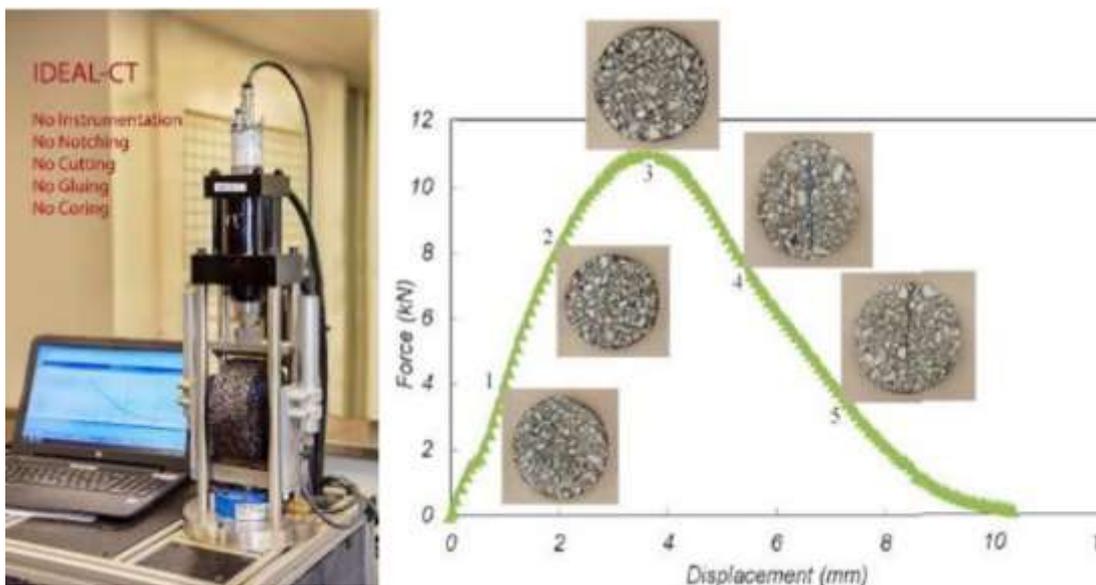


Figura 13. Esquema de la prueba IDEAL y el proceso de agrietamiento generado.

Tomado de "Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design, Quality Control and Quality Assurance" por Zhou, 2019, Texas.

5) Con la curva carga vs deformación, se procede a determinar el trabajo de fractura (W_f), calculando el área bajo la curva.

6) Luego de obtener el trabajo de fractura, se determina la energía de fractura mediante la ecuación:

$$Gf = \frac{Wf}{D \times t} \times 10^6$$

Donde:

Gf = Energía de fractura (Joules/m²)

Wf = 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 muestra otros datos necesarios para mostrar el índice de tolerancia de la prueba IDEAL C-T, los cuales son las cargas y los desplazamientos post-pico al 65, 75 y 85% de la carga máxima (P_{max}), cargas (PPP_{65} , PPP_{75} , PPP_{85}) y desplazamientos (I_{65} , I_{75} , I_{85}) respectivamente. Ver Figura 14. Luego, 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:

$$|m_{75}| = \frac{PPP_{85} - PPP_{65}}{I_{85} - I_{65}} \quad (\text{N/m})$$

8) Con todos los parámetros obtenidos, se procede a precisar el índice de tolerancia al agrietamiento ($CTindex$) por medio de la siguiente ecuación:

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

Siendo: $t / 62$ = factor de corrección para el espesor de la muestra.

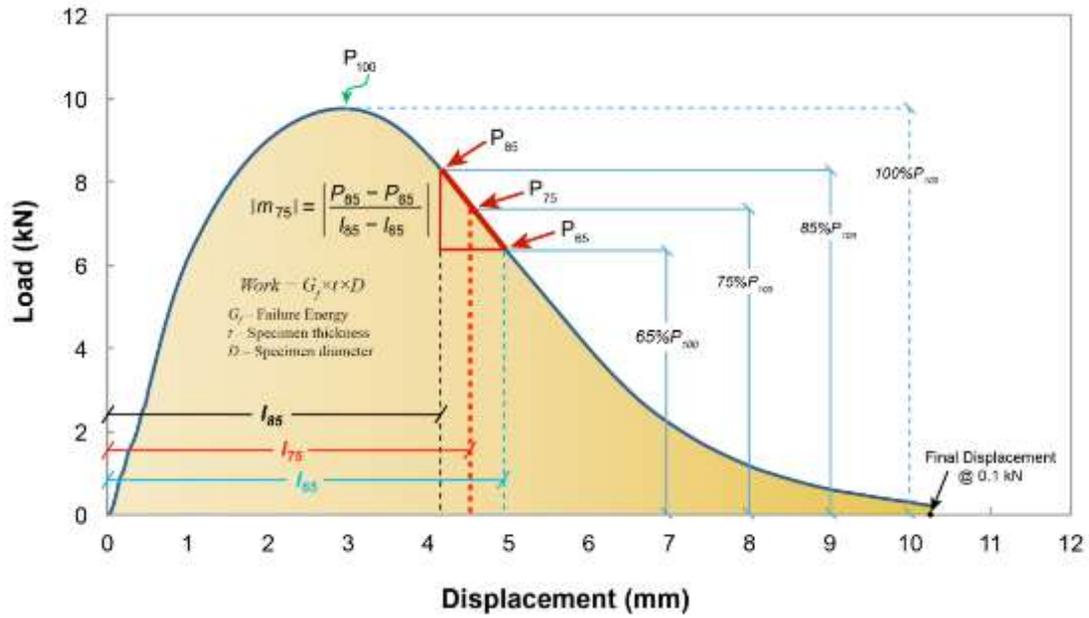


Figura 14. Puntos de carga con sus respectivos desplazamientos durante la prueba.

Tomado de "Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design, Quality Control and Quality Assurance" por Zhou, 2019, Texas.

Capítulo III

3. Trabajo experimental

3.1 Selección de plantas

Para la realización del presente trabajo de investigación se seleccionaron 3 plantas de producción de mezclas asfálticas en caliente ubicadas en los alrededores de la ciudad de Guayaquil, cada una de ellas utiliza agregados provenientes de diferentes tipos de roca para la elaboración de la mezcla. Esto es de gran importancia debido a que, al tener diferente composición mineralógica en sus agregados, las mezclas de las tres plantas pueden presentar variaciones en su resistencia al agrietamiento, obteniendo así resultados sobre cuál o cuáles tipos de roca son más convenientes frente a este fenómeno que actualmente es considerado uno de los problemas fundamentales que presentan las carreteras de nuestro país. Las plantas escogidas, que se denominarán Planta 1, 2 y 3 trabajan con las siguientes rocas respectivamente:

- **Basalto:** Corresponde al tipo de rocas ígneas extrusivas, formado por el rápido enfriamiento del magma producto de erupciones volcánicas y generalmente presenta un color gris oscuro o negro. Ver Figura 15.



Figura 15. Roca basáltica.

Tomado de: https://es.123rf.com/photo_7647923_basalto-una-roca-volc%C3%A1nica-extrusivo-de-composici%C3%B3n-m%C3%A1fica-.html

- **Caliza:** Corresponde al tipo de roca sedimentaria, compuesta mayormente por carbonato de calcio se forman comúnmente por sedimentos procedentes de residuos de animales u otros organismos. Esta roca se muestra en la Figura 16.



Figura 16. Roca caliza.

Tomado de:

<https://es.dreamstime.com/foto-de-archivo-rocas-grandes-de-la-piedra-caliza-image4512570>

- **Pizarra:** Corresponde al tipo de roca metamórfica formada a partir de rocas sedimentarias arcillosas y en algunas ocasiones de rocas ígneas. Es una roca densa de grano fino y color opaco azulado oscuro y con estructura laminares. Ver Figura 17.



Figura 17. Roca Pizarra.

Tomado de: <https://sites.google.com/site/tecnomaterialesite/home/1-materiales-petresos/1-3-pizarra>

3.2 Características constitutivas de las mezclas de plantas seleccionadas

3.2.1. Generalidades

Para el trabajo experimental se utilizaron mezclas de tres plantas. Cada mezcla está conformada por agregados minerales procedentes de diferentes canteras de rocas más un 15% aproximadamente de arena de río. El agregado mineral de la Planta 1 es basáltico, de la Planta 2 es caliza y de la Planta 3 es pizarra. El asfalto empleado en todos los casos es el AC 20 procedente de la refinería de Esmeraldas.

3.2.2. Pruebas rutinarias

Planta 1. Agregados: Basaltos

Las características evaluadas se muestran en las tablas 1,2,3 y 4, así como en la Figura 18.

Tabla 1. Contenido de asfalto por extracción en centrífuga. Planta 1.

W1. PESO DE LA MUESTRA DE MEZCLA ASFÁLTICA (g)	1200,00
F1. PESO DEL FILTRO ANTES DE LA EXTRACCIÓN (g)	14,20
W2. CONTENIDO DE HUMEDAD (g)	0,00
W3A. PESO DE AGREG. LAVADOS EN CENTRIFUGA (g)	1124,50
F2. PESO DEL FILTRO DESPUES DE LA EXTRACCIÓN (g)	15,70
W3B = F2 - F1 (g)	1,50
W3. PESO AGREG. INCLUYENDO FILTRO (g) (W3A+W3B)	1126,00
W4. PESO DE MATERIAL MINERAL EN EXTRACTO (g)	3,00
% DE ASFALTO = $\frac{[(W1-W2) - (W3+W4)]}{(W1-W2)} * 100$	5,92

Tabla 2. Granulometría de los agregados minerales extraídos. Planta 1.

ABERTURA DE TAMICES		PESO RET. ACUM. (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASADO ACUMULADO	ESPEC. 1/2" MTOP 2002	
No.	mm				Mínimo	Máximo
3/4"	19,00	0,0	0,0	100,0	100	100
1/2"	12,70	53,4	4,7	95,3	90	100
# 4	4,75	436,2	38,6	61,4	44	74
# 8	2,36	632,4	56,0	44,0	28	58
# 50	0,30	945,3	83,7	16,3	5	21
# 200	0,10	1077,2	95,4	4,6	2	10
FONDO	FONDO	1129,0				

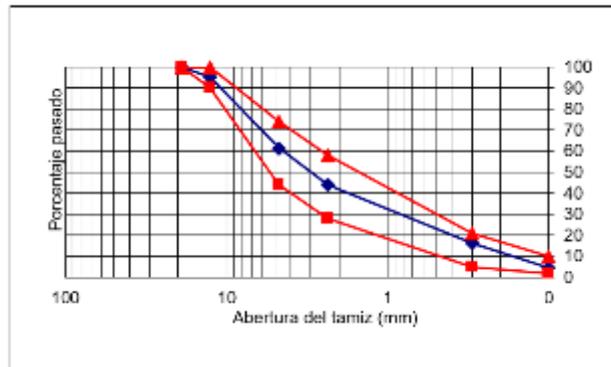


Figura 18. Granulometría de la mezcla. Planta 1.

Tabla 3. Determinación de Gmm. Planta 1.

A: PESO DEL FRASCO + AGUA (g)	7103,3
B: PESO DEL FRASCO + AGUA + MATERIAL (g)	8021,0
C: PESO DE LA MEZCLA SUELTA (g)	1500,0
$RICE = C / [A - (B - C)] =$	2,576

Tabla 4. Parámetros volumétricos evaluados. Planta 1.

CORTO PLAZO			MEDIANO PLAZO			LARGO PLAZO		
No.	Gmb	Pa, %	No.	Gmb	Pa, %	No.	Gmb	Pa, %
1	2,408	6,5	1	2,414	6,3	1	2,374	7,8
2	2,406	6,6	2	2,412	6,4	2	2,398	6,9
3	2,386	7,4	3	2,400	6,8	3	2,365	8,2
PROM	2,400	6,8	PROM	2,409	6,5	PROM	2,379	7,6

Planta 2. Agregados: Calizas

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 5,6,7 y 8, así como en la Figura 19.

Tabla 5. Contenido de asfalto por extracción con centrífuga. Planta 2.

W1. PESO DE LA MUESTRA DE MEZCLA ASFÁLTICA (g)	1163,00
F1. PESO DEL FILTRO ANTES DE LA EXTRACCIÓN (g)	18,65
W2. CONTENIDO DE HUMEDAD (g)	0,00
W3A. PESO DE AGREG. LAVADOS EN CENTRÍFUGA (g)	1088,00
F2. PESO DEL FILTRO DESPUES DE LA EXTRACCIÓN (g)	23,31
W3B = F2 - F1 (g)	4,66
W3. PESO AGREG. INCLUYENDO FILTRO (g) (W3A+W3B)	1092,66
W4. PESO DE MATERIAL MINERAL EN EXTRACTO (g)	3,00
$\% \text{ DE ASFALTO} = \{[(W1-W2) - (W3+W4)] / (W1-W2)\} * 100$	5,79

Tabla 6. Granulometría de los agregados minerales extraídos. Planta 2.

ABERTURA DE TAMICES		PESO RET.	% RETENIDO	% PASADO	ESPEC. 1/2" MTOP 2002	
No.	mm	ACUM. (g)	ACUMULADO	ACUMULADO	Mínimo	Máximo
3/4"	19,00	0,0	0,0	100,0	100	100
1/2"	12,70	58,7	5,2	94,8	90	100
# 4	4,75	397,8	36,8	64,2	44	74
# 8	2,36	578,4	52,8	47,2	28	58
# 60	0,30	968,1	88,3	11,7	5	21
# 200	0,10	1054,3	96,2	3,8	2	10
FONDO	FONDO	1098,1				

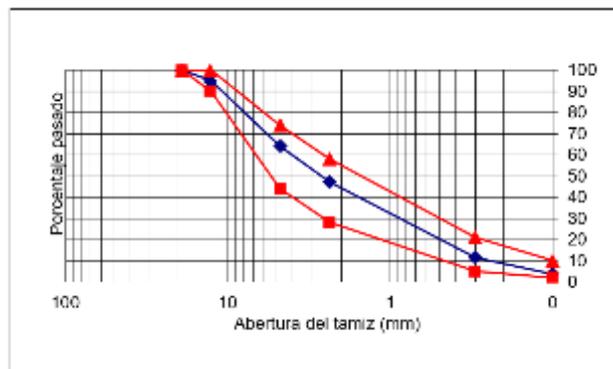


Figura 19. Granulometría de la mezcla. Planta 2.

Tabla 7. Determinación de Gmm. Planta 2.

A: PESO DEL FRASCO + AGUA (g)	7191,0
B: PESO DEL FRASCO + AGUA + MATERIAL (g)	7875,0
C: PESO DE LA MEZCLA SUELTA (g)	1197,8
$RICE = C / [A - (B - C)] =$	2,331

Tabla 8. Parámetros volumétricos evaluados. Planta 2.

CORTO PLAZO			MEDIANO PLAZO			LARGO PLAZO		
No.	Gmb	Pa, %	No.	Gmb	Pa, %	No.	Gmb	Pa, %
1	2,180	6,5	1	2,151	7,7	1	2,164	7,2
2	2,158	7,4	2	2,156	7,5	2	2,141	8,2
3	2,164	7,2	3	2,152	7,7	3	2,163	7,2
PROM	2,167	7,0	PROM	2,153	7,6	PROM	2,156	7,5

Planta 3. Agregados: Pizarras.

Las características evaluadas se aprecian en las tablas 9,10, 11 y 12, así como en la Figura 20.

Tabla 9. Contenido de asfalto por extracción con centrífuga. Planta 3.

W1. PESO DE LA MUESTRA DE MEZCLA ASFÁLTICA (g)	1129,00
F1. PESO DEL FILTRO ANTES DE LA EXTRACCIÓN (g)	18,95
W2. CONTENIDO DE HUMEDAD (g)	0,00
W3A. PESO DE AGREG. LAVADOS EN CENTRÍFUGA (g)	1041,00
F2. PESO DEL FILTRO DESPUES DE LA EXTRACCIÓN (g)	23,03
W3B = F2 - F1 (g)	4,08
W3. PESO AGREG. INCLUYENDO FILTRO (g) (W3A+W3B)	1045,08
W4. PESO DE MATERIAL MINERAL EN EXTRACTO (g)	3,00
% DE ASFALTO = $\frac{[(W1-W2) - (W3+W4)]}{(W1-W2)} \cdot 100$	7,17

Tabla 10. Granulometría de los agregados minerales extraídos. Planta 3.

ABERTURA DE TAMICES No.	mm	PESO RET.	% RETENIDO	% PASADO	ESPEC. 1/2" MTOP 2002	
		ACUM. (g)	ACUMULADO	ACUMULADO	Mínimo	Máximo
3/4"	19,00	0,0	0,0	100,0	100	100
1/2"	12,70	23,2	2,2	97,8	90	100
# 4	4,75	345,8	33,0	67,0	44	74
# 8	2,36	525,2	50,1	49,9	28	58
# 30	0,60	877,4	83,7	16,3	5	21
# 200	0,10	1004,4	95,6	4,2	2	10
FONDO	FONDO	1048,1				

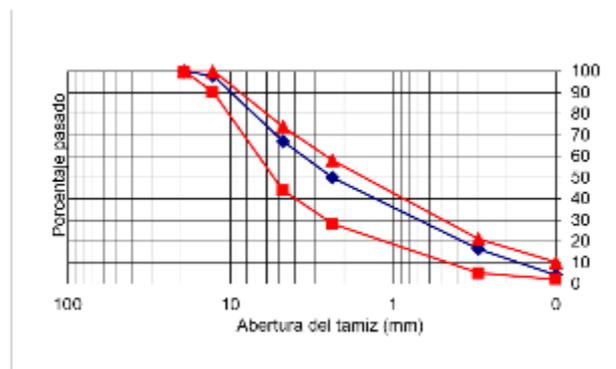


Figura 20. Granulometría de la mezcla. Planta 3.

Tabla 11. Determinación de Gmm. Planta 3.

A: PESO DEL FRASCO + AGUA (g)	7191,0
B: PESO DEL FRASCO + AGUA + MATERIAL (g)	7783,2
C: PESO DE LA MEZCLA SUELTA (g)	1100,0
RICE = $C / [A - (B - C)] =$	2,166

Tabla 12. Parámetros volumétricos evaluados. Planta 3.

CORTO PLAZO			MEDIANO PLAZO			LARGO PLAZO		
No.	Gmb	Pa, %	No.	Gmb	Pa, %	No.	Gmb	Pa, %
1	2,018	6,8	1	2,019	6,8	1	2,017	6,9
2	2,012	7,1	2	2,015	7,0	2	2,008	7,3
3	2,006	7,4	3	1,989	8,2	3	2,008	7,3
PROM	2,012	7,1	PROM	2,008	7,3	PROM	2,011	7,1

3.3 Proceso de confección de briquetas de 150 mm de diámetro

Luego de seleccionar las plantas asfálticas, se realizaron las coordinaciones pertinentes para muestrear las mezclas producidas en planta. Se empleó un recipiente metálico con tapa con un volumen suficiente que permitiera acomodar la cantidad de mezcla necesaria para la confección de briquetas. En la Figura 21 se observa la toma de mezcla en la Planta 1. Las mezclas fueron transportadas al Laboratorio de Carreteras de la UCSG para poder confeccionar las briquetas de 150 mm de diámetro.



Figura 21. Toma de mezcla en la Planta 1.

Una vez llevada la mezcla al laboratorio se debe asegurar que esta se encuentre a la temperatura adecuada de compactación de 135 °C. En caso de no tener la temperatura correcta, se debe calentar la mezcla al horno en bandejas de aluminio hasta llegar a la

temperatura deseada. Las briquetas fueron compactadas por impacto, se utilizaron moldes de 150 mm de diámetro y con la ayuda de una balanza se tomaron muestras de 2500 gr aproximadamente por briqueta, tratando de mantener una altura en estas ya compactadas entre 60 y 65 mm. Ver Figura 22. Se confeccionaron 9 briquetas por cada planta seleccionada.



Figura 22. Pesado de muestra para elaboración de briquetas.

Previamente a la confección de dichas briquetas se realizaron pruebas iniciales, para las mezclas de cada planta, para determinar el número de golpes por cara necesarios para asegurar un porcentaje de vacíos de $7 \pm 0,5\%$ como se mencionó en capítulos anteriores. Una vez confeccionadas las briquetas y extraídas de los moldes, se dejaron enfriar para luego ser sometidas a envejecimiento a corto, mediano y largo plazo, proceso que se explicará en el próximo numeral. En la Figura 23 se muestran algunas briquetas ya compactadas y desmoldadas correspondientes a la Planta 2.



Figura 23. Briquetas compactadas de la Planta 2 (agregados calizos).

3.4 Proceso de envejecimiento aplicado

Luego de compactar y desmoldar las briquetas se aplicaron diferentes niveles de envejecimiento de acuerdo con la normativa AASHTO R30 (2010).

Corto plazo: Para mezclas fabricadas en planta, como las empleadas en el estudio, no se requiere de este tipo de envejecimiento.

Largo plazo: Para el envejecimiento a largo plazo se deben colocar las briquetas en un horno para su acondicionamiento por $120 \pm 0,5$ horas (5 días) a 85 ± 3 °C. Ver Figura 24.



Figura 24. Horno utilizado para envejecimiento de las briquetas.

Mediano plazo: Para poder realizar una mejor interpretación del proceso de envejecimiento en las plantas, se decidió aplicar un plazo intermedio de envejecimiento, mediante la colocación de las briquetas en el horno durante 72 horas (3 días) a una

temperatura de 85 °C. O sea, se colocaron en el horno 6 briquetas por planta, sacándose 3 para ensayar a los 3 días y las restantes a los 5 días.

3.5 Procedimiento de prueba IDEAL y forma práctica de aplicación

Una vez aplicado el respectivo envejecimiento a todas las briquetas, estas son colocadas en la cámara de temperatura ajustable del equipo NAT, para poder acondicionarlas a 25 °C, que es la temperatura común para realizar la prueba IDEAL. Luego de tener las briquetas a la temperatura deseada se procede a ensayar las muestras en la máquina de tracción indirecta del Laboratorio de Carreteras de la UCSG. En la Figura 25 se muestra la realización de la prueba.



Figura 25. Prueba IDEAL.

Para poder calcular el índice de agrietamiento de la prueba IDEAL, es necesario obtener la curva carga versus desplazamiento para cada briqueta. Sin embargo, al no contar con el sistema de adquisición de datos ni el software del sistema IDEAL-CT, que grafica esta curva, se decidió grabar en vídeos cada uno de los ensayos para posteriormente registrar para cada segundo de la prueba (lo que está relacionado con la velocidad de desplazamiento aplicada de 50 mm-minuto), la carga asociada a través de la lectura que indica el dial del anillo dinamométrico. Para procesar esta información se preparó una hoja de cálculo EXCEL, que permite ajustar el desplazamiento a partir del segundo en que comienza a generarse carga, graficar la curva y facilitar el cálculo de los parámetros involucrados en el CT index. En la Tabla 13 se muestra el procesamiento de los datos

tomados de la Muestra 3 de la Planta 1 (basaltos) a los 0 días de envejecimiento (corto plazo).

Tabla 13. Procesamiento de resultados de la Muestra 3 de Planta 1 a corto plazo.

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo [s]	Disp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
	7	0,0	0	0	0	0,0
AGREGADO:	8	0,8	0,072	56,7	553	2,5
BASALTOS	9	1,7	0,153	120,5	1167	5,2
	10	2,5	0,195	153,5	1486	6,6
TIEMPO ENVEJ:	11	3,3	0,214	168,5	1630	7,3
0 días	12	4,2	0,205	161,4	1562	6,9
	13	5,0	0,170	133,9	1296	5,8
MUESTRA:	14	5,8	0,116	91,3	887	3,9
3	15	6,7	0,081	63,8	621	2,8
	16	7,5	0,043	33,9	333	1,5
	17	8,3	0,011	8,7	90	0,4
	18	9,2	0,003	2,1	30	0,1

Las columnas 2 y 4 corresponden a las obtenidas a partir del video. El primer valor de la columna 2 corresponde al último segundo donde la lectura del anillo es 0. Luego se registran cada segundo con su respectiva lectura. La columna 3 representa el desplazamiento vertical en milímetros obtenido del tiempo, pero comenzando desde 0 y con un valor de 0,833 por cada segundo transcurrido.

Los valores de la columna 4 (mm) son ajustados en la columna 5 (pulgadas) para poder aplicar la ecuación de calibración del anillo de la prensa. Los resultados de la carga obtenidos en libras que se muestran en la columna 6 se convierten a kilo Newtons en la columna 7. Para obtener la gráfica carga vs desplazamiento se utilizan los valores de las columnas 3 y 7.

Luego de obtener la curva carga vs desplazamiento para cada muestra de las 3 plantas asfálticas, se calcularon el resto de los parámetros para obtener el índice de agrietamiento CTindex y realizar el respectivo análisis de los valores obtenidos en las 3 plantas. En la Figura 26 y en la Tabla 14 se muestran como ejemplos, la curva carga vs desplazamiento y el procedimiento de cálculo del CTindex respectivamente. Estos datos corresponden a la misma Muestra 3 con basaltos y envejecimiento a corto plazo.

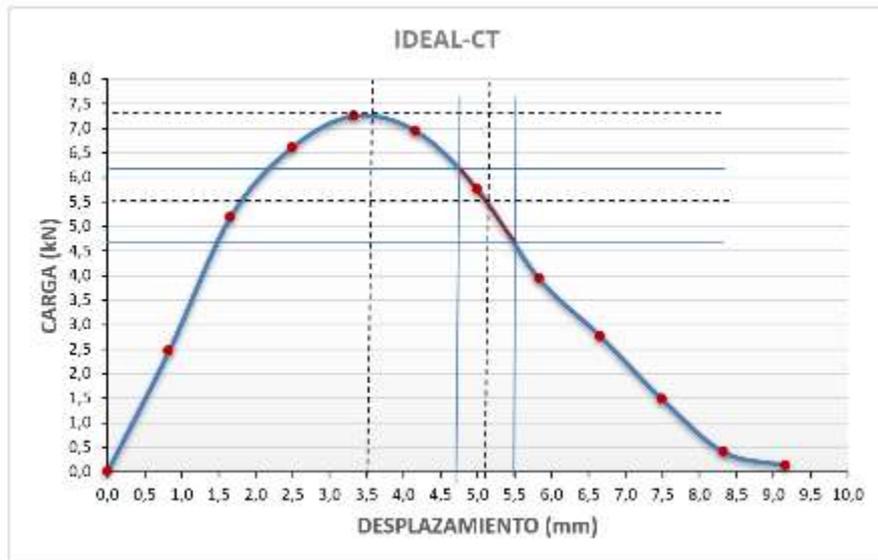


Figura 26. Curva Carga vs Desplazamiento. Muestra 3. Basalto. 0 días.

Tabla 14. Determinación del CTindex. Muestra 3. Basalto. 0 días.

Wf (Joules)	35,7	
D (mm)	150	
t (mm)	60	
Gf (Joules/m ²)	3969	
% CARGA MÁX	DESP, mm	CARGA, kN
P100	3,5	7,3
P85	4,7	6,2
P65	5,5	4,7
P75	5,1	5,5
I75/D	0,034	
m75 (N/m)	1,83	
Ctindex	71,6	

3.5.1 Resumen de resultados

En las Tablas 15, 16 y 17 se muestran los parámetros obtenidos de todas las muestras de cada una de las plantas con su tipo de roca y sus tres niveles de envejecimiento.

Tabla 15. Resumen de resultados. Planta 1. Agregado: Basalto.

TIPO DE ROCA TRITURADA	ENVEJECIMIENTO	MUESTRA	Gf (Joules/m ²)	/m75/ (kN/mm)	I75/D	Ctindex	Carga máx (kN)
BASALTO	CORTO PLAZO	1	3368	1,520	0,038	80,1	5,7
		2	3299	1,771	0,037	68,4	6,2
		3	3969	1,825	0,034	71,6	7,3
		PROMEDIO	3545	1,705	0,036	73,4	6,4
		DESV. ESTANDAR	369	0,163	0,002	6,0	0,8
		COEF. VARIACIÓN	10,4	9,5	5,7	8,2	12,8
	MEDIANO PLAZO	1	4737	2,657	0,032	55,2	9,3
		2	4266	2,213	0,036	69,4	8,3
		3	5013	3,500	0,032	43,6	10,5
		PROMEDIO	4672	2,790	0,033	56,1	9,4
		DESV. ESTANDAR	378	0,654	0,002	12,9	1,1
		COEF. VARIACIÓN	8,1	23,4	6,9	23,0	11,8
	LARGO PLAZO	1	4600	5,150	0,030	25,5	10,3
		2	4380	3,600	0,031	37,1	9,0
		3	4218	4,320	0,029	30,0	10,8
		PROMEDIO	4399	4,357	0,030	30,9	10,0
		DESV. ESTANDAR	192	0,776	0,001	5,8	0,9
		COEF. VARIACIÓN	4,4	17,8	3,3	18,9	9,3

Tabla 16. Resumen de resultados. Planta 2. Agregado: Caliza.

TIPO DE ROCA TRITURADA	ENVEJECIMIENTO	MUESTRA	Gf (Joules/m ²)	/m75/ (kN/mm)	I75/D	Ctindex	Carga máx (kN)
CALIZA	CORTO PLAZO	1	4220	2,800	0,037	59,0	8,4
		2	4031	1,694	0,035	85,1	7,2
		3	4209	2,567	0,037	62,1	7,7
		PROMEDIO	4153	2,354	0,036	68,7	7,8
		DESV. ESTANDAR	106	0,583	0,001	14,3	0,6
		COEF. VARIACIÓN	2,6	24,8	3,2	20,7	7,8
	MEDIANO PLAZO	1	4438	2,738	0,033	54,6	8,9
		2	4196	3,018	0,031	45,0	8,3
		3	4378	2,900	0,035	55,9	8,7
		PROMEDIO	4337	2,885	0,033	51,8	8,6
		DESV. ESTANDAR	126	0,141	0,002	6,0	0,3
		COEF. VARIACIÓN	2,9	4,9	6,1	11,5	3,5
	LARGO PLAZO	1	3934	4,229	0,034	32,7	7,4
		2	4144	4,500	0,030	28,5	9,0
		3	4223	3,345	0,031	40,8	9,2
		PROMEDIO	4100	4,025	0,032	34,0	8,5
		DESV. ESTANDAR	149	0,604	0,002	6,3	1,0
		COEF. VARIACIÓN	3,6	15,0	6,6	18,4	11,6

Tabla 17. Resumen de resultados. Planta 3. Agregado: Pizarra.

TIPO DE ROCA TRITURADA	ENVEJECIMIENTO	MUESTRA	Gf (Joules/m ²)	/m75/ (kN/mm)	I75/D	Ctindex	Carga máx (kN)
PIZARRA	CORTO PLAZO	1	4633	4,667	0,037	38,8	10,5
		2	4498	3,000	0,037	60,5	9,0
		3	5222	3,500	0,037	58,8	10,5
		PROMEDIO	4784	3,722	0,037	52,7	10,0
		DESV. ESTANDAR	385	0,855	0,000	12,1	0,9
		COEF. VARIACIÓN	8,0	23,0	0,0	22,9	8,7
	MEDIANO PLAZO	1	5211	4,833	0,028	31,7	14,5
		2	5263	5,840	0,026	25,6	14,6
		3	4944	7,000	0,030	22,9	14,0
		PROMEDIO	5139	5,891	0,028	26,7	14,4
		DESV. ESTANDAR	171	1,084	0,002	4,5	0,3
		COEF. VARIACIÓN	3,3	18,4	7,1	16,9	2,2
	LARGO PLAZO	1	4620	5,880	0,027	22,2	14,7
		2	4492	7,650	0,025	16,1	15,3
		3	4795	14,080	0,029	11,0	17,6
		PROMEDIO	4636	9,203	0,027	16,4	15,9
		DESV. ESTANDAR	152	4,315	0,002	5,6	1,5
		COEF. VARIACIÓN	3,3	46,9	7,4	34,1	9,6

3.6. Análisis de resultados

En la siguiente sección se analizarán los resultados de los principales parámetros obtenidos de la prueba Ideal realizadas en todas las muestras de los tres tipos de roca, para comparar y valorar sus posibles comportamientos, así como determinar la calidad del agregado mineral (tipo de roca) que en las mezclas asfálticas nos ofrece la mejor respuesta ante el agrietamiento, considerando el envejecimiento.

3.6.1. CTindex

En la Tabla 18 se muestra un resumen de los valores promedios obtenidos con las diferentes mezclas en los distintos plazos de envejecimiento.

Tabla 18. Resumen de valores promedios CT index.

TIPO DE AGREGADOS	CTindex		
	ENVEJECIMIENTO		
	CORTO	MEDIANO	LARGO
BASALTO	73,4	56,1	30,9
CALIZA	68,7	51,8	34,0
PIZARRA	52,7	26,7	16,4

Los valores del CT index de todas las plantas muestran una tendencia muy uniforme cuando las mezclas se envejecen. Al incrementarse el tiempo de envejecimiento de las mezclas, con cualquier tipo de agregado, el CT index disminuye, lo que implica que peor será la resistencia al agrietamiento. Ver Figura 27. Si bien el comportamiento con las mezclas de basalto y de caliza son muy parecidos, no ocurre lo mismo con la pizarra, donde los valores de CT index son mucho más bajos, con una diferencia aproximadamente constante de 20 respecto a los dos primeros.

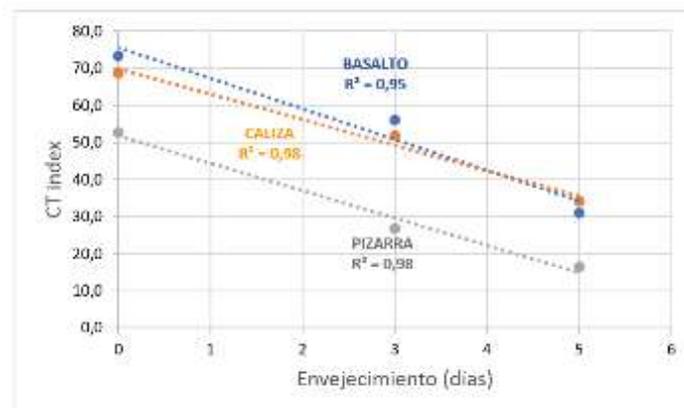


Figura 27. Variación de CT index con el envejecimiento.

Por esta razón, el envejecimiento es un fenómeno que se debe tomar muy en cuenta ya que afecta la resistencia al agrietamiento de la mezcla sin importar del tipo de roca de la que esté compuesta. En la Figura 28 se muestran en diagramas de barras los valores de CT index.

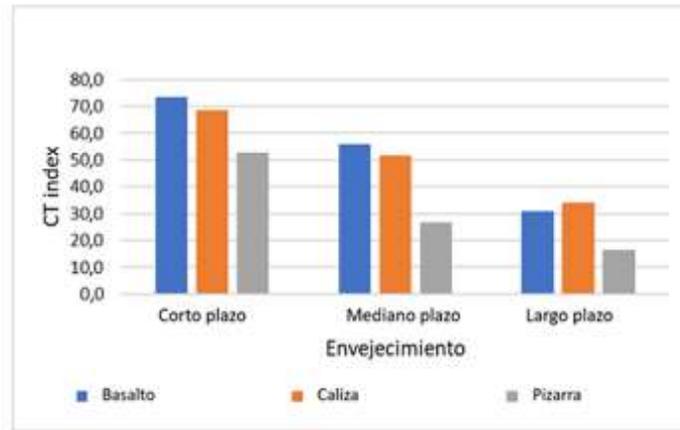


Figura 28. Variación de CTindex en las diferentes mezclas.

Puede observarse que la mezcla de roca basalto presentó los mayores valores de CTindex en envejecimiento a corto y mediano plazo, con valores promedios de 73,4 y 56,1 respectivamente. Sin embargo, en el envejecimiento a largo plazo, la roca caliza fue la que presentó el valor más alto de índice de agrietamiento con un valor de 34,0 en comparación al de basalto de 30,9 y al de pizarra de 16,4. Por lo que se podría pensar que las mezclas con agregados de roca basalto presentan mayor resistencia al agrietamiento a corto y mediano plazo, mientras que la caliza presenta mayor resistencia a largo plazo. En realidad, como se mostró en la Figura 27, el basalto y la caliza tuvieron comportamientos muy parecidos.

3.6.2. Pendiente /m75/

En la Tabla 19 y en la Figura 29 se muestran de manera resumida los valores de la pendiente /m75/, que puede interpretarse como la magnitud de un módulo dentro del proceso de agrietamiento, para los tres tipos de roca utilizada en sus tres niveles de envejecimiento. El valor de la pendiente /m75/ es un parámetro que representa la propagación de las fisuras. A mayores valores de pendiente /m75/, mayor será la propagación de grietas, por esta razón, mientras mayor sea el valor |m75| se tendrá menor resistencia al agrietamiento en la mezcla.

Tabla 19. Resumen de valores promedios /m75/.

TIPO DE AGREGADOS	/m75/ (N/m)		
	ENVEJECIMIENTO		
	CORTO	MEDIANO	LARGO
BASALTO	1,705	2,790	4,357
CALIZA	2,354	2,885	4,025
PIZARRA	3,722	5,891	9,203

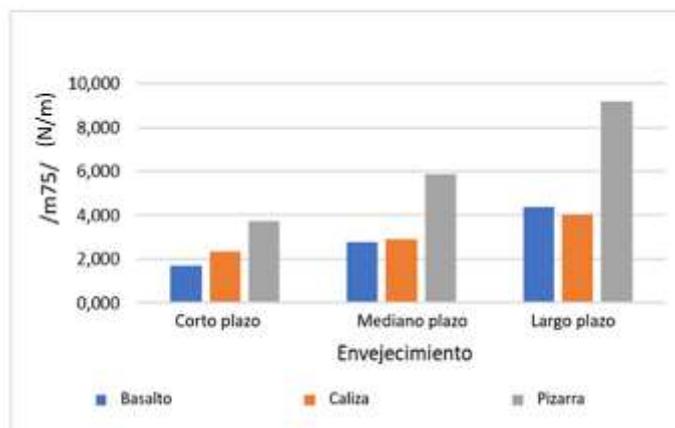


Figura 29. Variación de la pendiente /m75/ en las diferentes mezclas.

Puede apreciarse de esta información que en todos los casos en la medida que avanza el proceso de envejecimiento aumentan los valores de /m75/, lo que implica que será mayor la velocidad de propagación de las grietas, lo que ayuda a disminuir el CT index y la resistencia al agrietamiento.

De los tres tipos de roca, se puede observar que la roca pizarra presenta los mayores valores de pendiente /m75/. Esto significa que, para este tipo de roca, las fisuras se propagarán mucho más rápido en comparación a los otros dos obteniendo su máximo valor de 9,203 en envejecimiento a largo plazo.

La roca caliza y basalto presentan valores similares en pendiente. A corto y mediano plazo, el basalto presenta menor pendiente, mientras que, a largo plazo, la caliza presenta una pendiente menor lo que muestra que presenta un mayor desplazamiento antes de llegar al agrietamiento.

3.6.3. Parámetro I_{75}/D

En la Tabla 20 y en la Figura 30 pueden apreciarse los valores del parámetro I_{75}/D , que puede interpretarse como la tolerancia a la deformación de la mezcla con la carga reducida al 75% de la máxima. Es decir, que a mayor I_{75}/D la mezcla tendrá mayor CT index y mayor resistencia al agrietamiento.

Tabla 20. Resumen de valores promedios I_{75}/D .

TIPO DE AGREGADOS	I_{75}/D		
	ENVEJECIMIENTO		
	CORTO	MEDIANO	LARGO
BASALTO	0,036	0,033	0,030
CALIZA	0,036	0,033	0,032
PIZARRA	0,037	0,028	0,027

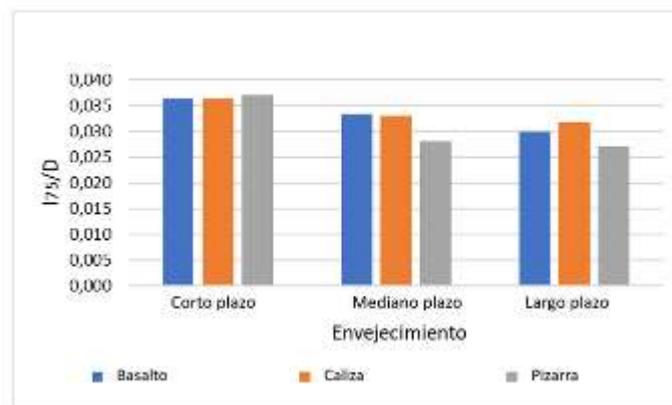


Figura 30. Variación del parámetro I_{75}/D en las diferentes mezclas.

Si bien este parámetro inicialmente tuvo valores muy similares en todas las mezclas, disminuyó en mayor medida con el envejecimiento en el caso de las pizarras. En estas también llama la atención que a mediano y largo plazo los valores de I_{75}/D son similares. A su vez, en las mezclas con basalto y caliza los valores obtenidos respecto a los tiempos de envejecimiento fueron muy parecidos.

3.6.4. Energía de falla G_f

Se muestran en la Tabla 21 y en la Figura 31 los valores correspondientes a la energía para la fractura total de la briqueta. Matemáticamente, de acuerdo con la fórmula de cálculo de CT_{index} , a mayor energía mayor CT_{index} y mejor resistencia al agrietamiento. G_f depende en gran parte del área bajo la curva carga versus deformación, que se verá influenciada por la pendiente y configuración general de la rama de caída de dicha curva.

Tabla 21. Resumen de valores promedios G_f .

TIPO DE AGREGADOS	G_f (Joules/m ²)		
	ENVEJECIMIENTO		
	CORTO	MEDIANO	LARGO
BASALTO	3545	4672	4399
CALIZA	4153	4337	4100
PIZARRA	4784	5139	4636

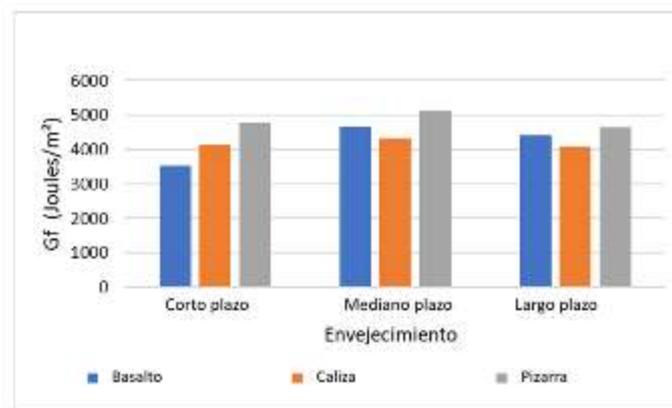


Figura 31. Variación del parámetro G_f en las diferentes mezclas.

El comportamiento obtenido en general es un tanto variable, en general con el envejecimiento G_f presenta un pequeño incremento a mediano plazo y luego una leve disminución de sus valores. La menor variación la muestra la mezcla con caliza.

3.6.5. Carga máxima

Se decidió analizar también el comportamiento de la carga máxima obtenida de las curvas, aunque en realidad este parámetro no forma parte directa del cálculo de CT index. Esto se hace con el objetivo de contrastar su comportamiento respecto a los CT index evaluados. En la Tabla 22 y en la Figura 32, se muestra un resumen de los valores de carga máxima que presentaron las briquetas de los tres tipos de roca en sus tres niveles de envejecimiento.

Tabla 22. Resumen de valores promedios de carga máxima.

TIPO DE AGREGADOS	CARGA MÁXIMA (kN)		
	ENVEJECIMIENTO		
	CORTO	MEDIANO	LARGO
BASALTO	6,4	9,4	10,0
CALIZA	7,8	8,6	8,5
PIZARRA	10,0	14,4	15,9

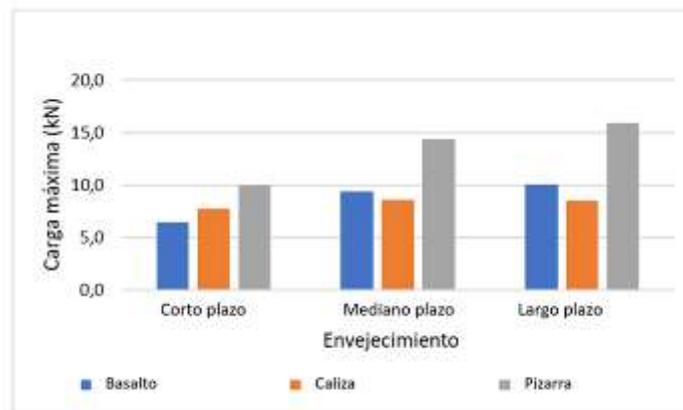


Figura 32. Variación de la carga máxima en las diferentes mezclas.

Puede observarse que en general todas las mezclas incrementaron la carga máxima de fractura en la medida que se envejecen. El incremento más notorio se observa en la mezcla con pizarra, de 10 a 15,9 kN, mientras que en las mezclas restantes la variación fluctuó entre 6,4 y 10 kN.

Para algunos profesionales es común el criterio de que una mayor carga de rotura en una briketa es reflejo de una mayor resistencia al agrietamiento. Esto en realidad no es

cierto. Luego de esa carga máxima pueden existir distribuciones de esfuerzos y deformaciones que permitan retardar o no el agrietamiento. Notar que, si bien en todas las mezclas con el tiempo de envejecimiento hubo mayor carga de falla, también hubo menor CT index, lo que implica menor resistencia al agrietamiento. Con los años la mezcla se vuelve más rígida, aumentando la capacidad de soportar cargas más altas, pero en cambio disminuye su resistencia al agrietamiento.

3.7. Observaciones adicionales

Es importante destacar que las mezclas analizadas presentan diseños aprobados para una misma faja granulométrica. Los contenidos óptimos de asfalto son muy similares para las mezclas con basaltos y calizas, 5,9 y 5,8% respectivamente. Sin embargo, para la mezcla con pizarra este contenido es de 7,2%, dada la alta absorción de la piedra. En la práctica, para los 3 tipos de mezclas el *contenido efectivo de asfalto* se acerca a 5%.

De acuerdo con el estudio de Zhou (2019), para mezclas confeccionadas en el laboratorio con envejecimiento a corto plazo, asfalto tipo PG 64-22 y contenido óptimo de asfalto de 5%, con temperatura de prueba de 25 °C, el CT index es 173. Menor cantidad hizo disminuir el CTindex a 66 y más cantidad lo incrementó hasta 251. Ver Figura 33.

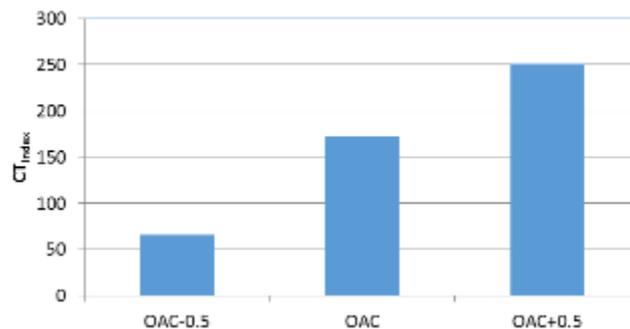


Figura 33. Incidencia de la variación del contenido de asfalto.

Tomado de: "Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design, Quality Control and Quality Assurance". Zhou, F. IDEA Program Final Report. NCHRP 20-30/IDEA 195. Texas A&M Transportation Institute. 2019

Mezclas confeccionadas con un contenido óptimo de asfalto de 6,3%, asfalto PG 70-22, envejecimiento a corto plazo y temperatura de prueba de 25 °C, dieron un valor de CT index de 375. Debe notarse que el CT index puede variar entre 1 y 1000, indicando los números mayores mejor resistencia al agrietamiento.

Si comparamos esos resultados con los obtenidos en este trabajo, donde a corto plazo el valor mayor de CT index es de 73.4 (basalto), se observa que se tiene en general una baja resistencia al agrietamiento en nuestras mezclas, que se hace en extremo crítica en la mezcla con pizarra.

Otro interesante estudio con la prueba IDEAL fue desarrollado en Colombia (Reyes, Useche y Álvarez, 2019), empleando mezclas densas, drenantes, con RAP y modificadas con asfaltitas. Lamentablemente la temperatura empleada en dicho estudio fue de 15 °C, que genera una mezcla muy rígida, por lo que todos los resultados son muy bajos y no permiten una comparación con los obtenidos en este estudio.

Capítulo IV

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

- 1) Luego de haber aplicado la prueba de agrietamiento IDEAL a las 3 mezclas asfálticas estudiadas, con resultados coherentes respecto a los comportamientos que en la práctica presentan dichas mezclas, se concluye que esta prueba es factible para cualquier tipo de mezcla independientemente de la procedencia de sus agregados minerales.
- 2) En los tres tipos de mezclas al incrementar el tiempo de envejecimiento los valores de CT index disminuyen, por lo que la resistencia al agrietamiento es menor en mezclas más envejecidas. Esto demuestra que el envejecimiento es un fenómeno que influye de manera significativa al agrietamiento sin importar la procedencia de los agregados que se utilice en la elaboración de la mezcla.
- 3) Las mezclas asfálticas con agregados provenientes de roca caliza y basalto presentaron una mejor resistencia al agrietamiento luego del envejecimiento que la mezcla con agregados provenientes de pizarra. Además, los resultados entre las mezclas de caliza y basalto no presentan entre ellas una gran variación, por lo que se concluye que es más conveniente el uso de las dos primeras mencionadas a corto, mediano y largo plazo que el uso de mezclas con roca pizarra.
- 4) Después de haber analizado los valores de carga máxima de todas las curvas de carga versus desplazamiento y comparando los resultados con el CT index, se concluye que una mayor carga de rotura no genera de por sí una mayor resistencia al agrietamiento. Esta sin dudas está más asociada al trabajo y a la energía derivada, para producir la fractura, en donde impacta de manera importante la pendiente de la rama de caída donde se desarrolla la grieta. Con el envejecimiento las mezclas tienden a ser más rígidas, lo que indica que bajo un esfuerzo aplicado existirá una baja deformación en la mezcla, pero eso aún no

significa una alta resistencia a la fractura. Por ejemplo, un material frágil puede tener un alto valor de rigidez, pero baja resistencia.

- 5) Al analizar los resultados de este trabajo, donde el valor mayor de CT index fue tan solo de 73.4, para la mezcla con basalto y envejecimiento a corto plazo, y compararlo con otros estudios generados a la misma temperatura de 25 °C (donde los valores pueden superar índices de 173), se observa que en general los CT index obtenidos son bajos. Esto indica una baja resistencia al agrietamiento en nuestras mezclas, aunque más crítica en la mezcla con pizarra. Esta situación podría ser consecuencia de la tendencia existente en el asfalto producido en la Refinería de Esmeraldas al envejecimiento prematuro, aunque se requieren estudios adicionales en esta dirección.

4.2. Recomendaciones

- 1) Aplicar nuevas tecnologías que brinden una mayor facilidad en la recolección de datos, la elaboración de gráficas carga vs desplazamiento y en el cálculo de los parámetros del CT index, para así poder realizar la prueba IDEAL en un menor tiempo y de manera más precisa.
- 2) Aplicar la prueba IDEAL a mezclas asfálticas producidas en las distintas regiones del Ecuador con diferentes agregados minerales, y comparar los resultados con los obtenidos en el presente trabajo. De esta forma se podrá incrementar la información necesaria para ajustar exigencias a dicha prueba, priorizar el empleo de algunos tipos de agregados, ajustar criterios granulométricos y mejorar el comportamiento frente al agrietamiento.
- 3) Realizar estudios sobre el empleo de la prueba IDEAL en mezclas confeccionadas en laboratorio, utilizando diferentes contenidos y tipos de asfalto, para analizar su influencia en el agrietamiento, de manera que pueda mejorarse la calidad de las mezclas aumentando el CT index. Se considera muy importante esta prueba como criterio de comparación al emplear aditivos para el cemento asfáltico.

Referencias Bibliográficas

- AASHTO, R. 30-02. (2010). *Standard Procedure for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA)*.
- Arabani, M., & Ferdowsi, B. (2009). *Evaluating the semi-circular bending test for HMA mixtures*. IJE. Vol.22, No. 1.
- 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 D1559. (1998). *Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus*. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D2872-04. (2012). *Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt*. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D6521-13. (2018). *Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)*. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- Brown, S.F. (1988). *Improved Asphalt Pavemente Engineering*. 7th AAPA International Asphalt Conference. Brisbane, Australia.
- Cauhape, M., Martínez, F., & Angelone, S. (2020). *Ensayo de viga semicircular dinámico: Su aplicación para la caracterización reológica de mezclas asfálticas*. Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA). Maquetación 1. España.
- 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.

- Corredor, G., & Corros, M. (2010). *Evaluación de pavimentos. Maestría en vías terrestres. (Módulo III)*. Universidad Nacional de Ingeniería. Nicaragua.
- Emery, J.J. (2007). *Mitigation of Asphalt Pavement Top-down Cracking. The Assessment and Rehabilitation of the Condition of Materials Session*. The 85 Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Charlottetown, Canada.
- Fernández, G.W., Rondón Q.H., & Reyes, L.F. (2013). *El fenómeno del envejecimiento en asfaltos y mezclas asfálticas*. Una revisión. *Revista Colombiana De Materiales*.
- Garrote, E. (2006). *Efecto de la temperatura en la tenacidad de diferentes mezclas bituminosas*. Trabajo de Titulación. Universidad Politécnica de Cataluña. <http://hdl.handle.net/2099.1/3324>.
- Glover, C.J., Martin, A.E., Han, R., Prapaitrakul, N., Chowdhury, A., Xin, J., & Lawrence, J. (2014). *Evaluation of binder aging and its influence in aging of hot mix asphalt concrete. Technical report*. Texas A&M Transportation Institute, College Station. Austin, Texas.
- 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.
- Jiménez, M. (2020). *Ensayo de resistencia al agrietamiento con especímenes semicirculares a flexión de mezclas asfálticas en caliente ASTM*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. Universidad de Costa Rica.
- Kennedy, T.W. (1977). *Characterization of Asphalt Pavement Materials Using the Indirect Tensile Test*. Asphalt paving technology 1977. Proceedings Association of Asphalt Paving Technical Sessions. Vol 46, 132-149. San Antonio, Texas.
- Leiva, F. (2005). *Normativa para evaluar la resistencia al deslizamiento superficial de los pavimentos*. San Pedro.

- Lim, I.L., & Johnston, I.W. (1993). *Stress intensity factors for semi-circular specimens under Three-Point Bending*. Engineering Fracture Mechanics, Vol.44, No.3,363-382.
- 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, M.T., & Miró, R. (2015). *El envejecimiento en mezclas asfálticas (1st ed)*. Plataforma Tecnológica Española de la Carretera.
- Miranda, R. (2010). *Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos*. Universidad Austral de Chile, Escuela de construcción civil. Chile.
- MOPC. (2016). *Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (Catálogo de fallas)*. Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos. Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, República Dominicana.
- 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.
- Moreno Rubio, J. (2005). *Efecto de equipo y procedimiento de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a tracción indirecta de las mezclas biruminosas*. Tesina de especialidad ETSECCPB-UPC.
- MTOP, M. (2002). *Especificaciones Técnicas para la Construcción de Carreteras y Puentes*. Quito, Ecuador: MOP-001-F2002.
- Navarrete, E.F. (2021). *Empleo de la prueba "IDEAL" para el control del agrietamiento en mezclas asfálticas*. Trabajo de titulación. UCSG. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/17465>.
- Naranjo, W. (2020). *Agrietamiento por fatiga Top-Down en pavimentos asfálticos*. Trabajo de titulación. UCSG. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/15736>.
- 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.
- Padilla, A. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista*. Barcelona.
- Pellinen, T.K., Rowe, G., & Biswas, K. (2004). *Evaluation of Surface (Top Down) Longitudinal Wheel Path Cracking*. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University. West Lafayette, Indiana.
- 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.
- Rondón, Q.H., & Reyes, L.F. (2015). *Pavimentos. Materiales, Construcción y diseño*. ECOE Ediciones. Bogotá, Colombia.
- Roque, R., Zou, J., Kim, Y., Baek, C., Thirunavukkarasu, S., Underwood, B., & Guddati, M. (2010). *Top-Down Cracking of Hot-Mix Asphalt Layers: Models for Initiation and Propagation*. NCHRP Project 1-42A.
- Shook, J.F., Finn, F.N., Witczak, M.W., & Monismith, C.L. (1982). *Thickness Design of Asphalt Pavements – The Asphalt Institute Method*. Fifth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements Vol. 1. University of Michigan and the Delf University of Technology.
- Vila, R. (2020). *Conferencias sobre Asfaltos de la Asignatura Pavimentos para la Carrera de Ingeniería Civil*. Material no publicado. Universidad Católica de 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.

- Villegas, R., Baldi, A., Aguiar, J., & Loria, L. (2018). *Estudio físico-químico de la oxidación del betún asfáltico y su relación con la fatiga a temperaturas intermedias de servicio*. Trabajo premiado. Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo. VII Edición 2017-2018. Madrid, España.
- 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. Procesamiento de resultados de prueba IDEAL de las 3 plantas asfálticas para determinar las curvas carga vs desplazamiento.

Planta 1: Basaltos

0 días

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
	7	0,0	0	0	0	0,0
AGREGADO:	8	0,8	0,024	18,9	189	0,8
BASALTOS	9	1,7	0,095	74,8	727	3,2
	10	2,5	0,134	105,5	1023	4,6
TIEMPO ENVEJ:	11	3,3	0,158	124,4	1205	5,4
0 días	12	4,2	0,167	131,5	1273	5,7
	13	5,0	0,158	124,4	1205	5,4
MUESTRA:	14	5,8	0,124	97,6	947	4,2
1	15	6,7	0,083	65,4	636	2,8
OA	16	7,5	0,055	43,3	424	1,9
	17	8,3	0,034	26,8	265	1,2
	18	9,2	0,017	13,4	136	0,6
	19	10,0	0,002	1,6	22	0,1

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
	6	0,0	0	0	0	0,0
AGREGADO:	7	0,8	0,031	24,4	242	1,1
BASALTOS	8	1,7	0,095	74,8	727	3,2
	9	2,5	0,143	112,6	1091	4,9
TIEMPO ENVEJ:	10	3,3	0,173	136,2	1319	5,9
0 días	11	4,2	0,182	143,3	1387	6,2
	12	5,0	0,171	134,6	1304	5,8
MUESTRA:	13	5,8	0,121	95,3	925	4,1
2	14	6,7	0,072	56,7	553	2,5
OB	15	7,5	0,041	32,3	318	1,4
	16	8,3	0,023	18,1	181	0,8
	17	9,2	0,010	7,9	83	0,4
	18	10,0	0,003	2,4	30	0,1

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
	7	0,0	0	0	0	0,0
AGREGADO:	8	0,8	0,072	56,7	553	2,5
BASALTOS	9	1,7	0,153	120,5	1167	5,2
	10	2,5	0,195	153,5	1486	6,6
TIEMPO ENVEJ:	11	3,3	0,214	168,5	1630	7,3
0 días	12	4,2	0,205	161,4	1562	6,9
	13	5,0	0,170	133,9	1296	5,8
MUESTRA:	14	5,8	0,116	91,3	887	3,9
3	15	6,7	0,081	63,8	621	2,8
OC	16	7,5	0,043	33,9	333	1,5
	17	8,3	0,011	8,7	90	0,4
	18	9,2	0,003	2,4	30	0,1

3 días

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
	7	0,0	0	0	0	0,0
AGREGADO:	8	0,8	0,071	55,9	545	2,4
BASALTOS	9	1,7	0,182	143,3	1387	6,2
	10	2,5	0,241	189,8	1835	8,2
TIEMPO ENVEJ:	11	3,3	0,275	216,5	2093	9,3
3 días	12	4,2	0,262	206,3	1994	8,9
	13	5,0	0,193	152,0	1471	6,5
MUESTRA:	14	5,8	0,125	98,4	955	4,2
1	15	6,7	0,077	60,6	591	2,6
	16	7,5	0,044	34,6	341	1,5
	17	8,3	0,025	19,7	197	0,9
	18	9,2	0,010	7,9	83	0,4
	19	10,0	0,003	2,4	30	0,1

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
	6	0,0	0	0	0	0,0
AGREGADO:	7	0,8	0,046	36,2	356	1,6
BASALTOS	8	1,7	0,153	120,5	1167	5,2
	9	2,5	0,219	172,4	1668	7,4
TIEMPO ENVEJ:	10	3,3	0,240	189,0	1827	8,1
3 días	10,5	3,7	0,245	192,9	1865	8,3
	11	4,2	0,243	191,3	1850	8,2
MUESTRA:	12	5,0	0,211	166,1	1607	7,1
2	13	5,8	0,155	122,0	1182	5,3
	14	6,7	0,091	71,7	697	3,1
	15	7,5	0,033	26,0	257	1,1
	16	8,3	0,008	6,3	68	0,3
	17	9,2	0,003	2,4	30	0,1

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
AGREGADO: BASALTOS	9	0,0	0	0	0	0,0
	10	0,8	0,05	39,4	386	1,7
	11	1,7	0,182	143,3	1387	6,2
TIEMPO ENVEJ: 3 días	12	2,5	0,273	215,0	2077	9,2
	13	3,3	0,307	241,7	2335	10,4
	13,5	3,7	0,311	244,9	2366	10,5
MUESTRA: 3	14	4,2	0,300	236,2	2282	10,2
	15	5,0	0,215	169,3	1638	7,3
	16	5,8	0,113	89,0	864	3,8
	17	6,7	0,058	45,7	447	2,0
	18	7,5	0,034	26,8	265	1,2
	19	8,3	0,020	15,7	159	0,7
	20	9,2	0,010	7,9	83	0,4
	21	10,0	0,005	3,9	45	0,2

5 días

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
AGREGADO: BASALTOS	11	0,0	0	0	0	0,0
	12	0,8	0,055	43,3	424	1,9
	13	1,7	0,185	145,7	1410	6,3
TIEMPO ENVEJ: 5 días	14	2,5	0,271	213,4	2062	9,2
	15	3,3	0,303	238,6	2305	10,3
	16	4,2	0,284	223,6	2161	9,6
MUESTRA: 1	17	5,0	0,161	126,8	1228	5,5
	18	5,8	0,093	73,2	712	3,2
	19	6,7	0,052	40,9	401	1,8
	20	7,5	0,021	16,5	166	0,7
	21	8,3	0,011	8,7	90	0,4
	22	9,2	0,006	4,7	52	0,2

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
AGREGADO: BASALTOS	6	0,0	0	0	0	0,0
	7	0,8	0,082	64,6	629	2,8
	8	1,7	0,18	141,7	1372	6,1
TIEMPO ENVEJ: 5 días	9	2,5	0,245	192,9	1865	8,3
	10	3,3	0,262	206,3	1994	8,9
	10,5	3,7	0,265	208,7	2017	9,0
MUESTRA: 2	11	4,2	0,262	206,3	1994	8,9
	12	5,0	0,165	129,9	1258	5,6
	13	5,8	0,097	76,4	743	3,3
	14	6,7	0,053	41,7	409	1,8
	15	7,5	0,037	29,1	288	1,3
	16	8,3	0,022	17,3	174	0,8
	17	9,2	0,008	6,3	68	0,3
	18	10,0	0,002	1,6	22	0,1

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
AGREGADO: BASALTOS	7	0,0	0	0	0	0,0
	8	0,8	0,082	64,6	629	2,8
	9	1,7	0,218	171,7	1660	7,4
TIEMPO ENVEJ: 5 días	10	2,5	0,295	232,3	2244	10,0
	11	3,3	0,320	252,0	2434	10,8
	12	4,2	0,273	215,0	2077	9,2
MUESTRA: 3	13	5,0	0,162	127,6	1236	5,5
	14	5,8	0,082	64,6	629	2,8
	15	6,7	0,022	17,3	174	0,8
	16	7,5	0,003	2,4	30	0,1

Planta 2: Caliza

0 días

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
AGREGADO: CALIZA	7	0,0	0	0	0	0,0
	8	0,8	0,013	10,2	105	0,5
	9	1,7	0,113	89,0	863	3,8
TIEMPO ENVEJ: 0 días	10	2,5	0,189	148,8	1436	6,4
	11	3,3	0,229	180,3	1738	7,7
	12	4,2	0,248	195,3	1881	8,4
MUESTRA: 1	13	5,0	0,238	187,4	1806	8,0
	14	5,8	0,177	139,4	1346	6,0
	15	6,7	0,113	89,0	863	3,8
	16	7,5	0,067	52,8	515	2,3
	17	8,3	0,036	28,3	279	1,2
	18	9,2	0,021	16,5	166	0,7
	19	10,0	0,011	8,7	91	0,4
	20	10,8	0,003	2,4	30	0,1

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
AGREGADO: CALIZA	7	0,0	0	0	0	0,0
	8	0,8	0,072	56,7	553	2,5
	9	1,7	0,143	112,6	1089	4,8
TIEMPO ENVEJ: 0 días	10	2,5	0,183	144,1	1391	6,2
	11	3,3	0,209	164,6	1588	7,1
	12	4,2	0,205	161,4	1557	6,9
MUESTRA: 2	13	5,0	0,171	134,6	1300	5,8
	14	5,8	0,128	100,8	976	4,3
	15	6,7	0,090	70,9	689	3,1
	16	7,5	0,067	52,8	515	2,3
	17	8,3	0,050	39,4	386	1,7
	18	9,2	0,030	23,6	234	1,0
	19	10,0	0,017	13,4	136	0,6
	20	10,8	0,007	5,5	60	0,3

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
AGREGADO: CALIZA	7	0,0	0	0	0	0,0
	8	0,8	0,023	18,1	181	0,8
	9	1,7	0,129	101,6	984	4,4
TIEMPO ENVEJ: 0 días	10	2,5	0,187	147,2	1421	6,3
	11	3,3	0,217	170,9	1648	7,3
	12	4,2	0,229	180,3	1738	7,7
MUESTRA: 3	13	5,0	0,208	163,8	1580	7,0
	14	5,8	0,148	116,5	1127	5,0
	15	6,7	0,104	81,9	795	3,5
	16	7,5	0,081	63,8	621	2,8
	17	8,3	0,052	40,9	401	1,8
	18	9,2	0,033	26,0	257	1,1
	19	10,0	0,017	13,4	136	0,6
	20	10,8	0,003	2,4	30	0,1

3 días

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
AGREGADO: CALIZA	8	0,0	0	0	0	0,0
	9	0,8	0,06	47,2	462	2,1
	10	1,7	0,162	127,6	1236	5,5
TIEMPO ENVEJ: 3 días	11	2,5	0,225	177,2	1713	7,6
	12	3,3	0,252	198,4	1918	8,5
	13	4,2	0,260	204,7	1979	8,8
MUESTRA: 1	14	5,0	0,198	155,9	1509	6,7
	15	5,8	0,125	98,4	955	4,2
	16	6,7	0,091	71,7	697	3,1
	17	7,5	0,057	44,9	439	2,0
	18	8,3	0,035	27,6	272	1,2
	19	9,2	0,024	18,9	189	0,8
	20	10,0	0,013	10,2	106	0,5
	21	10,8	0,005	3,9	45	0,2

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
AGREGADO: CALIZA	6	0,0	0	0	0	0,0
	7	0,8	0,102	80,3	779	3,5
	8	1,7	0,173	136,2	1315	5,8
TIEMPO ENVEJ: 3 días	9	2,5	0,224	176,4	1700	7,6
	10	3,3	0,245	192,9	1858	8,3
	11	4,2	0,233	183,5	1768	7,9
MUESTRA: 2	12	5,0	0,163	128,3	1240	5,5
	13	5,8	0,110	86,6	840	3,7
	14	6,7	0,073	57,5	560	2,5
	15	7,5	0,046	36,2	355	1,6
	16	8,3	0,031	24,4	242	1,1
	17	9,2	0,017	13,4	136	0,6
	18	10,0	0,008	6,3	68	0,3
	19	10,8	0,002	1,6	22	0,1

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
	6	0,0	0	0	0	0
AGREGADO:	7	0,8	0,026	20,5	204	0,9
CALIZA	8	1,7	0,143	112,6	1091	4,9
	9	2,5	0,214	168,5	1630	7,3
TIEMPO ENVEJ:	10	3,3	0,248	195,3	1888	8,4
3 días	11	4,2	0,256	201,6	1948	8,7
	12	5,0	0,223	175,6	1698	7,6
MUESTRA:	13	5,8	0,147	115,7	1122	5,0
3	14	6,7	0,109	85,8	834	3,7
	15	7,5	0,068	53,5	523	2,3
	16	8,3	0,044	34,6	341	1,5
	17	9,2	0,021	16,5	166	0,7
	18	10,0	0,007	5,5	60	0,3
	19	10,8	0,003	2,4	30	0,1

5 días

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
	6	0,0	0	0	0	0,0
AGREGADO:	7	0,8	0,063	49,6	484	2,2
CALIZA	8	1,7	0,148	116,5	1127	5,0
	9	2,5	0,196	154,3	1489	6,6
TIEMPO ENVEJ:	10	3,3	0,217	170,9	1648	7,3
5 días	11	4,2	0,213	167,7	1617	7,2
	12	5,0	0,174	137,0	1323	5,9
MUESTRA:	13	5,8	0,125	98,4	953	4,2
1	14	6,7	0,071	55,9	545	2,4
	15	7,5	0,055	43,3	424	1,9
	16	8,3	0,036	28,3	279	1,2
	17	9,2	0,025	19,7	197	0,9
	18	10,0	0,011	8,7	91	0,4
	19	10,8	0,003	2,4	30	0,1

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
AGREGADO: CALIZA	7	0,0	0	0	0	0,0
	8	0,8	0,081	63,8	621	2,8
	9	1,7	0,190	149,6	1448	6,4
	10	2,5	0,245	192,9	1865	8,3
TIEMPO ENVEJ: 5 días	11	3,3	0,265	208,7	2017	9,0
	12	4,2	0,237	186,6	1804	8,0
	13	5,0	0,152	119,7	1160	5,2
MUESTRA: 2	14	5,8	0,102	80,3	781	3,5
	15	6,7	0,066	52,0	508	2,3
	16	7,5	0,040	31,5	310	1,4
	17	8,3	0,019	15,0	151	0,7
	18	9,2	0,007	5,5	60	0,3
	19	10,0	0,002	1,6	22	0,1

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
AGREGADO: CALIZA	6	0,0	0	0	0	0,0
	7	0,8	0,053	41,7	409	1,8
	8	1,7	0,166	130,7	1266	5,6
	9	2,5	0,240	189,0	1827	8,1
TIEMPO ENVEJ: 5 días	10	3,3	0,265	208,7	2017	9,0
	10,5	3,7	0,271	213,4	2062	9,2
	11	4,2	0,264	207,9	2009	8,9
MUESTRA: 3	12	5,0	0,176	138,6	1342	6,0
	13	5,8	0,114	89,8	872	3,9
	14	6,7	0,074	58,3	568	2,5
	15	7,5	0,044	34,6	341	1,5
	16	8,3	0,022	17,3	174	0,8
	17	9,2	0,010	7,9	83	0,4
	18	10,0	0,002	1,6	22	0,1

Planta 3: Pizarra

0 días

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
AGREGADO: PIZARRA	9	0,0	0	0	0	0,0
	10	0,8	0,041	32,3	318	1,4
	11	1,7	0,149	117,3	1137	5,1
	12	2,5	0,226	178,0	1721	7,7
TIEMPO ENVEJ: 0 días	13	3,3	0,280	220,5	2130	9,5
	14	4,2	0,303	238,6	2305	10,3
	15	5,0	0,297	233,9	2259	10,1
MUESTRA: 1	16	5,8	0,196	154,3	1493	6,6
	17	6,7	0,092	72,4	705	3,1
	18	7,5	0,036	28,3	280	1,2
	19	8,3	0,007	5,5	60	0,3

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
	8	0,0	0	0	0	0,0
AGREGADO:	9	0,8	0,054	42,5	417	1,9
PIZARRA	10	1,7	0,147	115,7	1122	5,0
	11	2,5	0,214	168,5	1630	7,3
TIEMPO ENVEJ:	12	3,3	0,251	197,6	1911	8,5
0 días	13	4,2	0,265	208,7	2017	9,0
	14	5,0	0,250	196,9	1903	8,5
MUESTRA:	15	5,8	0,183	144,1	1395	6,2
2	16	6,7	0,119	93,7	909	4,0
	17	7,5	0,071	55,9	545	2,4
	18	8,3	0,031	24,4	242	1,1
	19	9,2	0,010	7,9	83	0,4
	20	10,0	0,006	4,7	52	0,2

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
	7	0,0	0	0	0	0,0
AGREGADO:	8	0,8	0,053	41,7	409	1,8
PIZARRA	9	1,7	0,171	134,6	1304	5,8
	10	2,5	0,247	194,5	1880	8,4
TIEMPO ENVEJ:	11	3,3	0,296	233,1	2252	10,0
0 días	12	4,2	0,311	244,9	2366	10,5
	13	5,0	0,292	229,9	2221	9,9
MUESTRA:	14	5,8	0,203	159,8	1547	6,9
3	15	6,7	0,133	104,7	1016	4,5
	16	7,5	0,080	63,0	614	2,7
	17	8,3	0,034	26,8	265	1,2
	18	9,2	0,008	6,3	68	0,3
	19	10,0	0,002	1,6	22	0,1

3 días

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
	8	0,0	0	0	0	0,0
AGREGADO:	9	0,8	0,031	24,4	242	1,1
PIZARRA	10	1,7	0,190	149,6	1448	6,4
	11	2,5	0,351	276,4	2669	11,9
TIEMPO ENVEJ:	12	3,3	0,430	338,6	3268	14,5
3 días	13	4,2	0,323	254,3	2457	10,9
	14	5,0	0,210	165,4	1600	7,1
MUESTRA:	15	5,8	0,131	103,1	1000	4,5
1	16	6,7	0,079	62,2	606	2,7
	17	7,5	0,037	29,1	288	1,3
	18	8,3	0,015	11,8	121	0,5
	19	9,2	0,003	2,4	30	0,1

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
	8	0,0	0	0	0	0,0
AGREGADO:	9	0,8	0,144	113,4	1099	4,9
PIZARRA	10	1,7	0,313	246,5	2381	10,6
	11	2,5	0,403	317,3	3063	13,6
TIEMPO ENVEJ:	12	3,3	0,424	333,9	3223	14,3
3 días	13	4,2	0,292	229,9	2221	9,9
	14	5,0	0,150	118,1	1145	5,1
MUESTRA:	15	5,8	0,083	65,4	636	2,8
2	16	6,7	0,041	32,3	318	1,4
	17	7,5	0,021	16,5	166	0,7
	18	8,3	0,005	3,9	45	0,2

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
	8	0,0	0	0	0	0,0
AGREGADO:	9	0,8	0,041	32,3	318	1,4
PIZARRA	10	1,7	0,180	141,7	1372	6,1
	11	2,5	0,328	258,3	2495	11,1
TIEMPO ENVEJ:	12	3,3	0,408	321,3	3101	13,8
3 días	13	4,2	0,379	298,4	2881	12,8
	14	5,0	0,215	169,3	1638	7,3
MUESTRA:	15	5,8	0,106	83,5	811	3,6
3	16	6,7	0,041	32,3	318	1,4
	17	7,5	0,010	7,9	83	0,4
	18	8,3	0,005	3,9	45	0,2

5 días

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
	10	0,0	0	0	0	0,0
AGREGADO:	11	0,8	0,074	58,3	568	2,5
PIZARRA	12	1,7	0,250	196,9	1903	8,5
	13	2,5	0,382	300,8	2904	12,9
TIEMPO ENVEJ:	14	3,3	0,431	339,4	3276	14,6
5 días	15	4,2	0,308	242,5	2343	10,4
	16	5,0	0,115	90,6	879	3,9
MUESTRA:	17	5,8	0,035	27,6	272	1,2
1	18	6,7	0,002	1,6	22	0,1

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
	8	0,0	0	0	0	0,0
AGREGADO:	9	0,8	0,116	91,3	887	3,9
PIZARRA	10	1,7	0,275	216,5	2093	9,3
	11	2,5	0,405	318,9	3078	13,7
TIEMPO ENVEJ:	12	3,3	0,447	352,0	3397	15,1
5 días	13	4,2	0,260	204,7	1979	8,8
	14	5,0	0,073	57,5	561	2,5
MUESTRA:	15	5,8	0,022	17,3	174	0,8
2	16	6,7	0,003	2,4	30	0,1

1	2	3	4	5	6	7
Identificación	Tiempo (s)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
	8	0,0	0	0	0	0,0
AGREGADO:	9	0,8	0,021	16,5	166	0,7
PIZARRA	10	1,7	0,191	150,4	1456	6,5
	11	2,5	0,400	315,0	3041	13,5
TIEMPO ENVEJ:	12	3,3	0,499	392,9	3791	16,9
5 días	12,5	3,7	0,520	409,4	3951	17,6
	13	4,2	0,476	374,8	3617	16,1
MUESTRA:	14	5,0	0,134	105,5	1023	4,6
3	15	5,8	0,021	16,5	166	0,7
	16	6,7	0,002	1,6	22	0,1

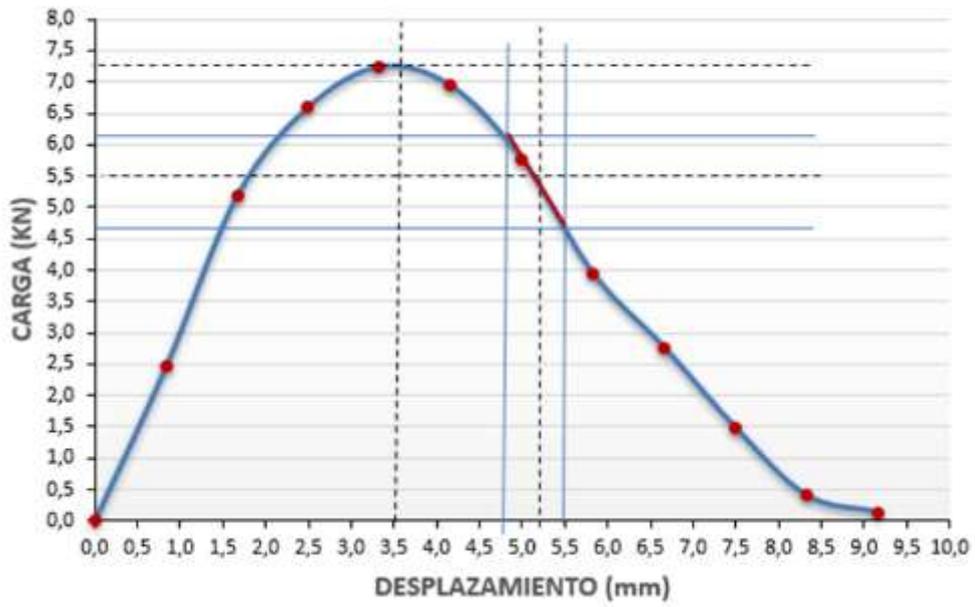
Anexo 2. Curvas carga vs desplazamiento de muestras de las 3 plantas asfálticas.

Planta 1: Basaltos

0 días

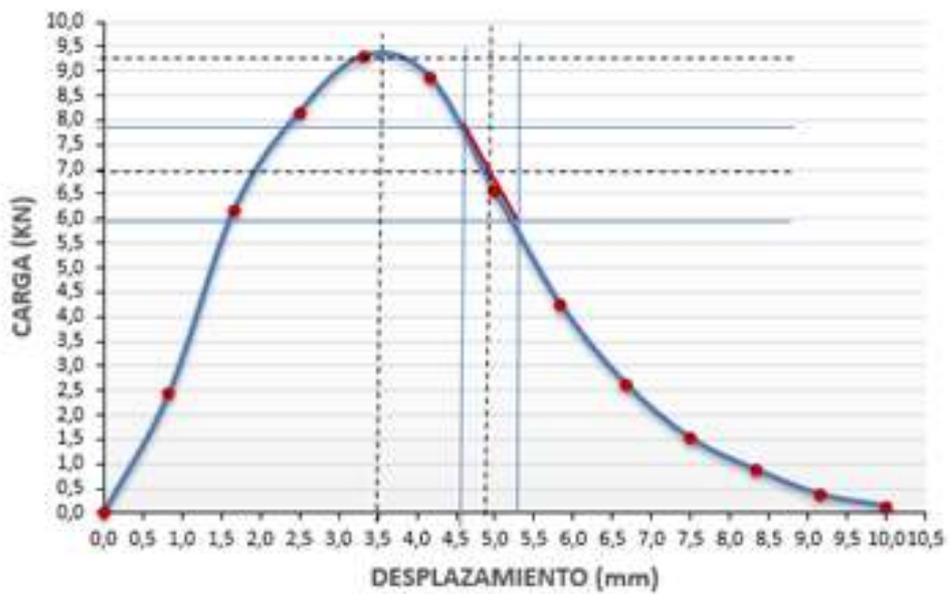


IDEAL-CT Basalto 0 días muestra 3



3 días

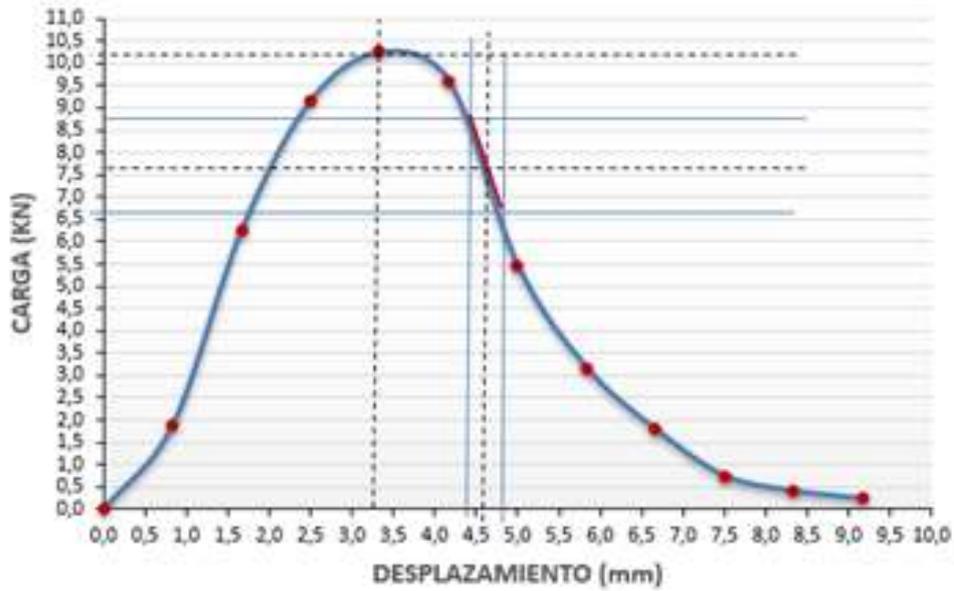
IDEAL-CT Basalto 3 días Muestra 1



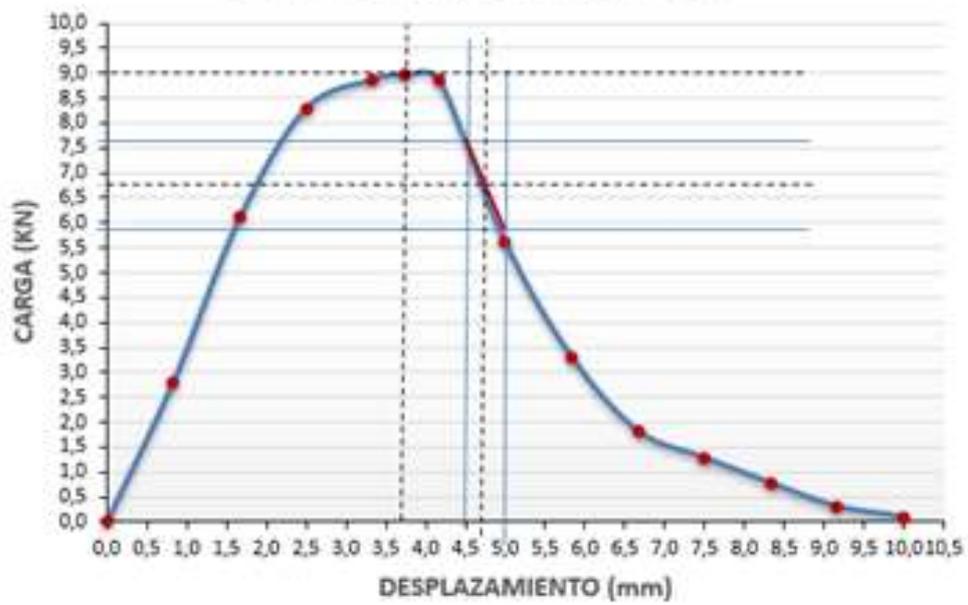


5 días

IDEAL-CT Basalto 5 días Muestra 1



IDEAL-CT Basalto 5 días Muestra 2



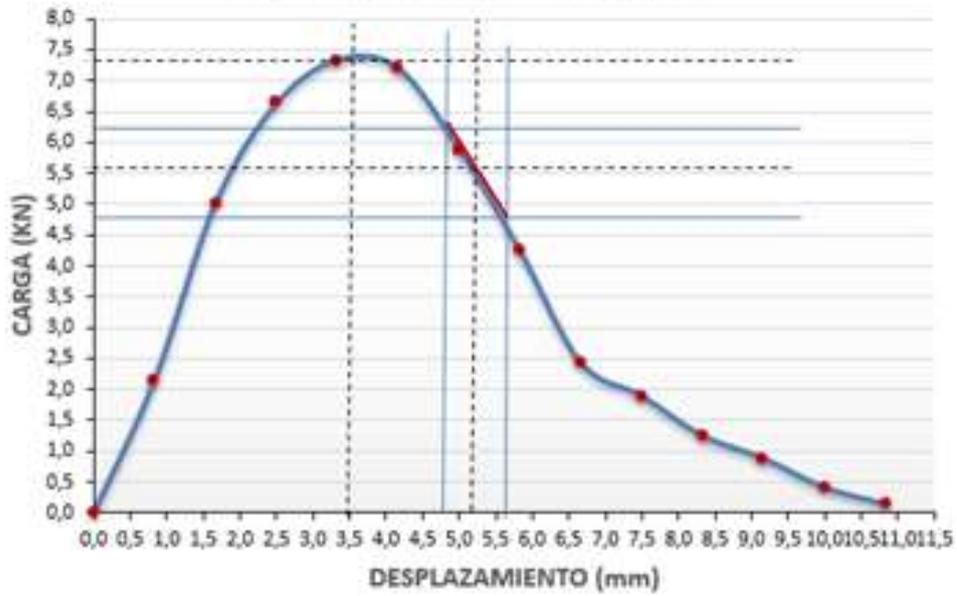


Planta 2: Caliza

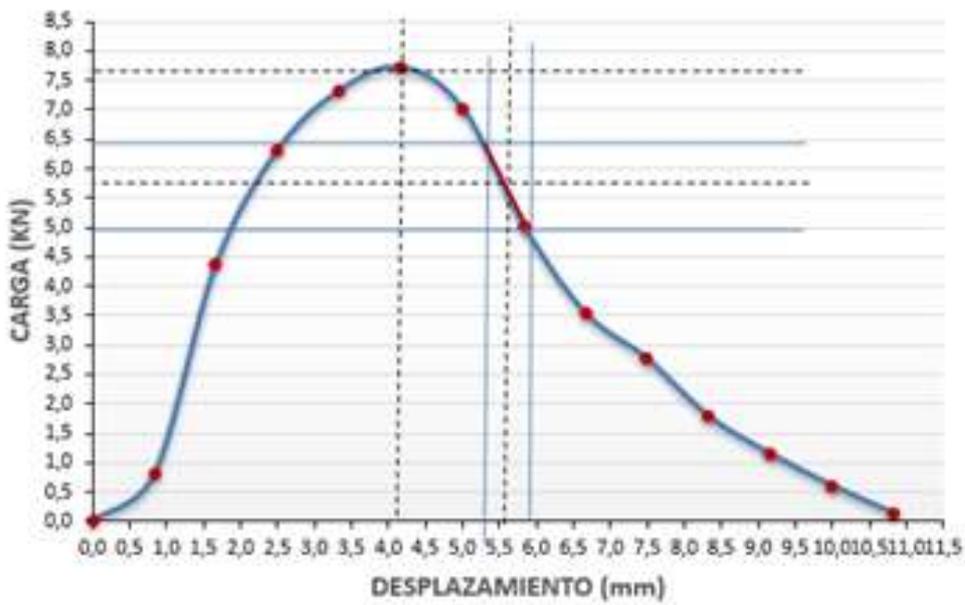
0 días



IDEAL-CT Caliza 0 días Muestra 2



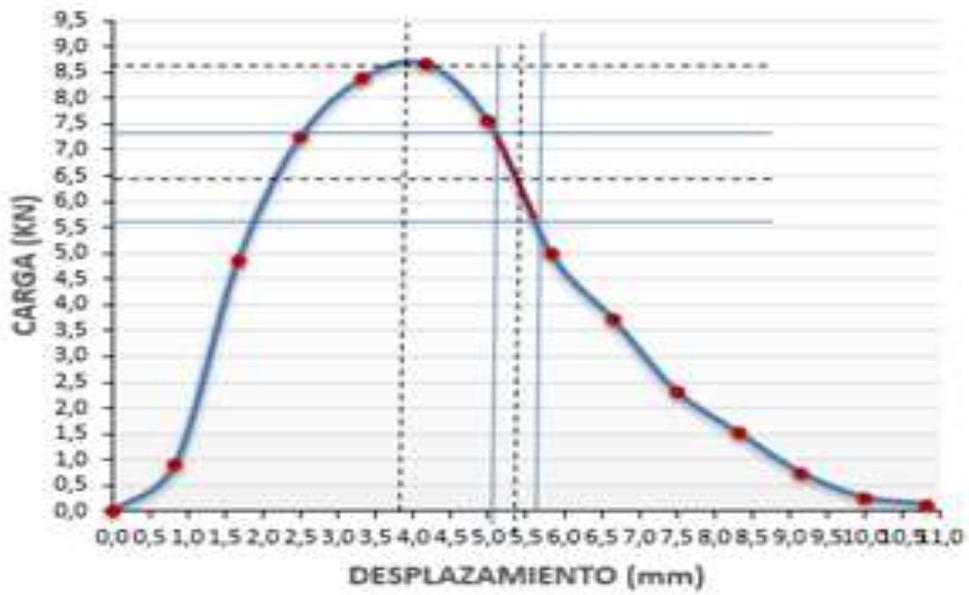
IDEAL-CT Caliza 0 días Muestra 3



3 días

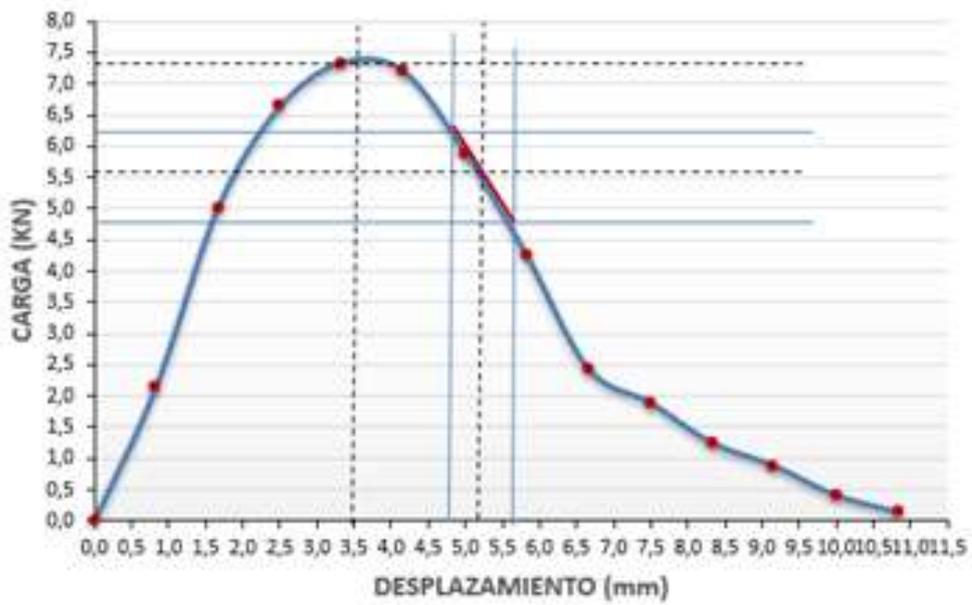


IDEAL-CT Caliza 3 días Muestra 3

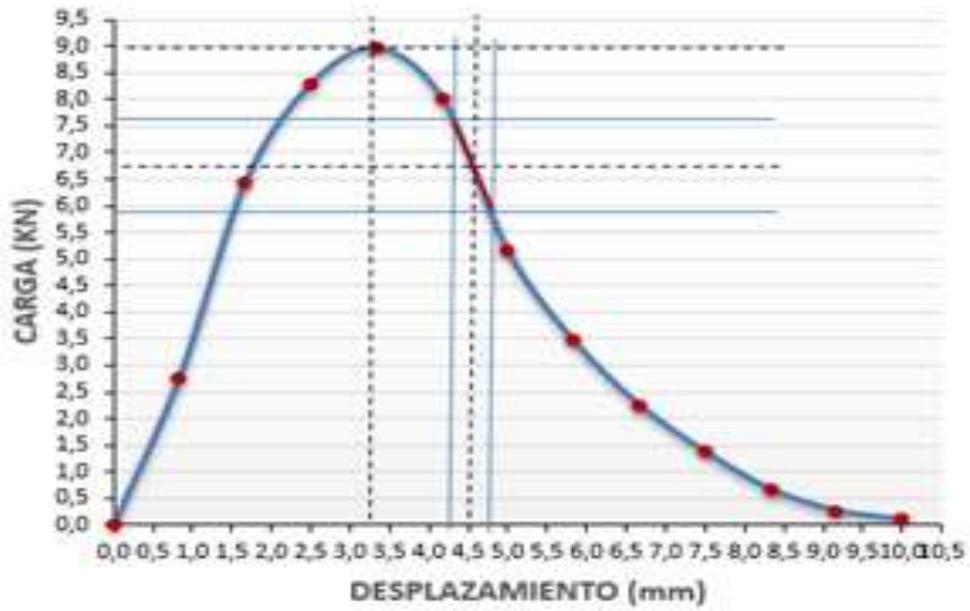


5 días

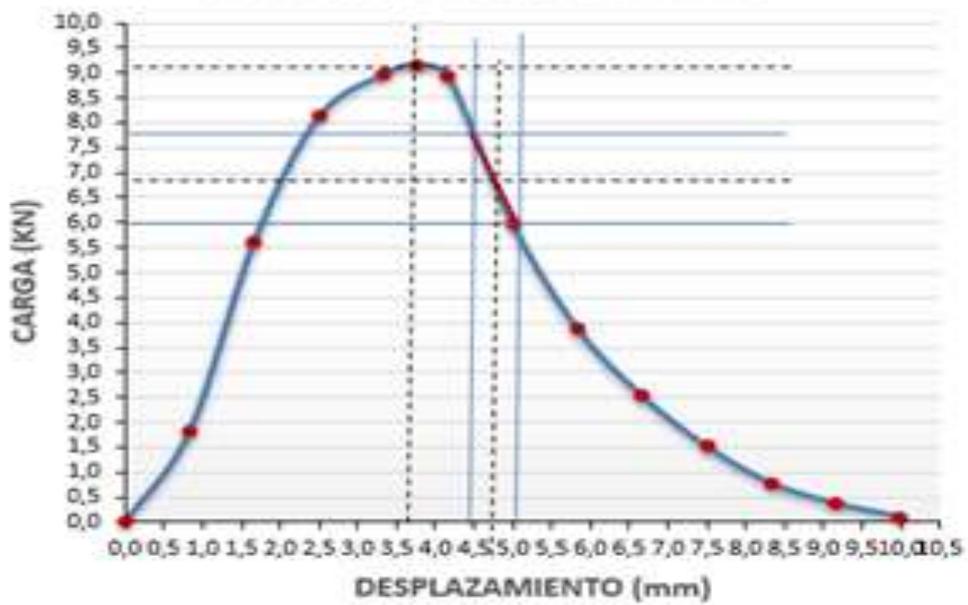
IDEAL-CT Caliza 5 días Muestra 1



IDEAL-CT Caliza 5 días Muestra 2



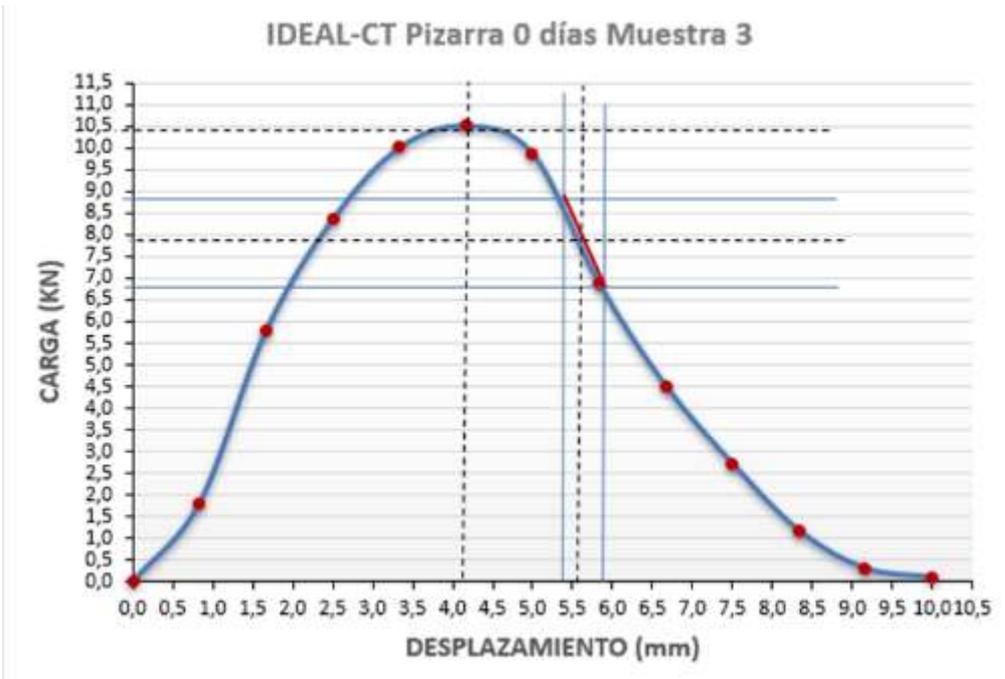
IDEAL-CT Caliza 5 días Muestra 3



Planta 3: Pizarra

0 días

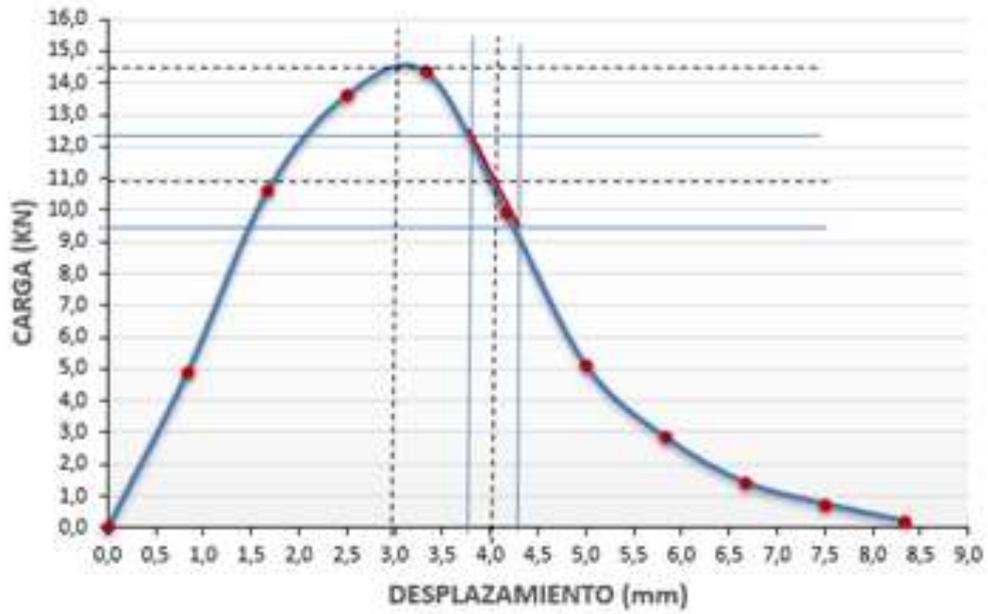




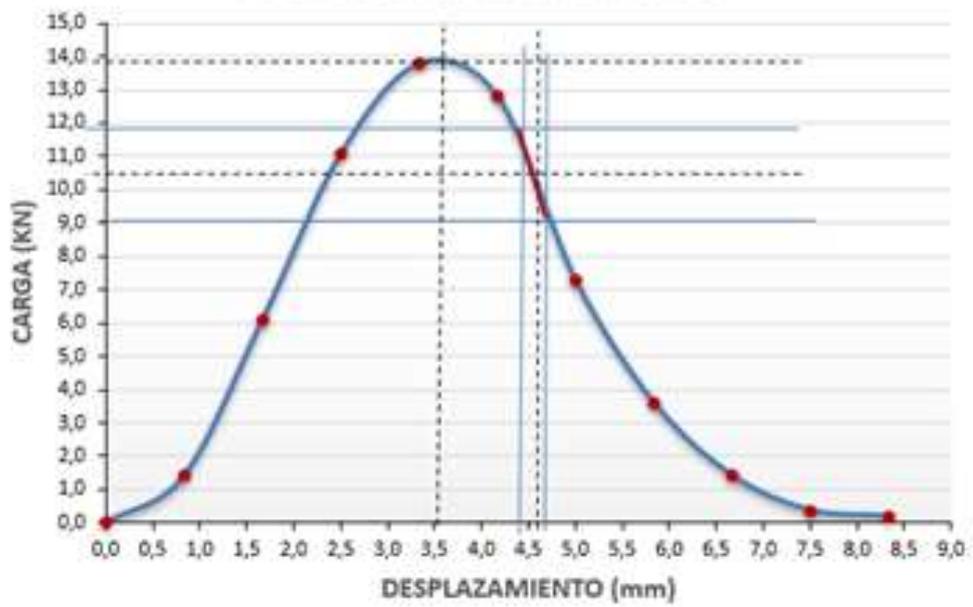
3 días



IDEAL-CT Pizarra 3 días Muestra 2

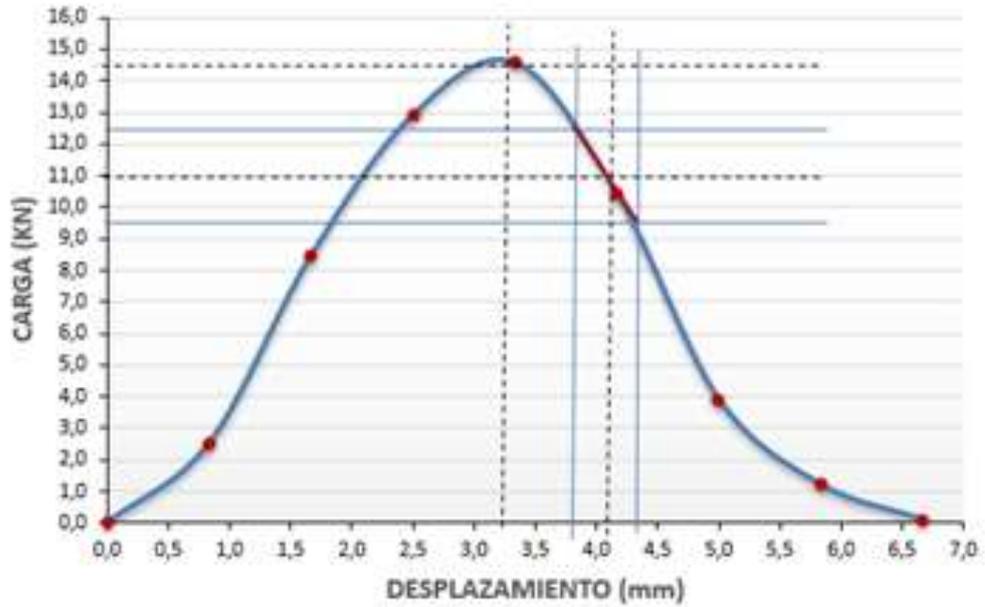


IDEAL-CT Pizarra 3 días Muestra 3

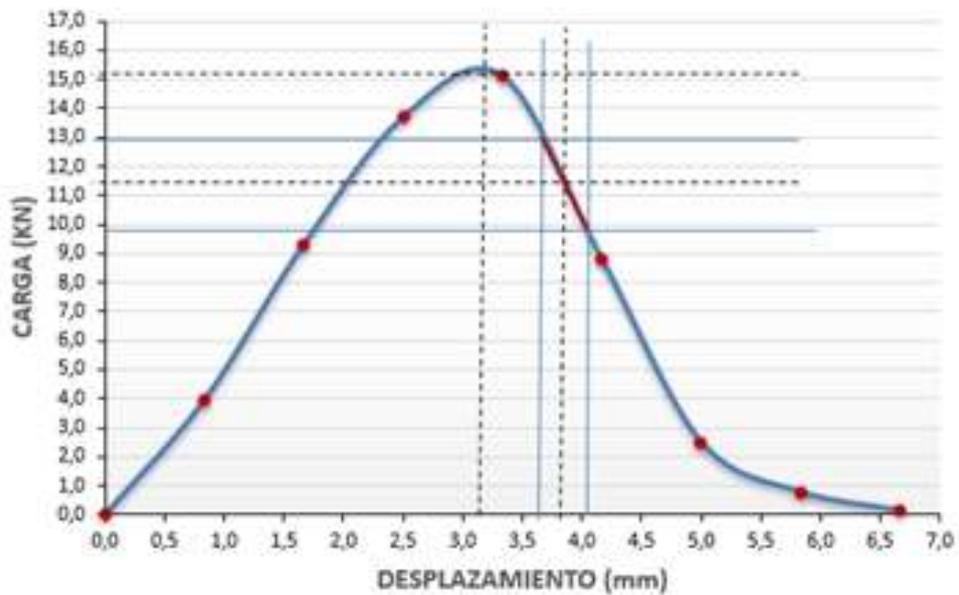


5 días

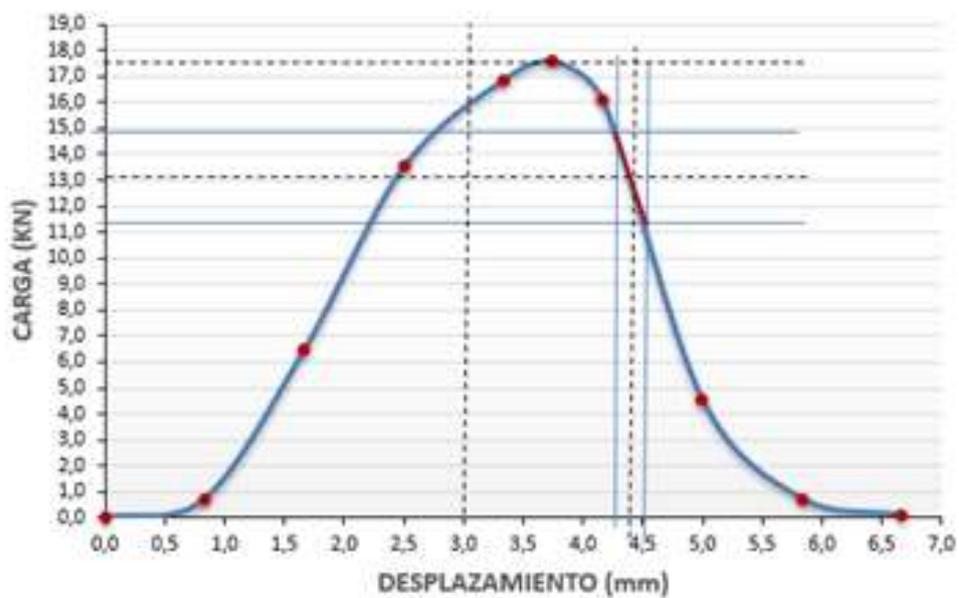
IDEAL-CT Pizarra 5 días Muestra 1



IDEAL-CT Pizarra 5 días Muestra 2



IDEAL-CT Pizarra 5 días Muestra 3





DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Rodríguez De la Cruz, Cristopher Alejandro**, con C.C: # 0953481413 autor del trabajo de titulación: **Comparación del índice de agrietamiento en mezclas de diferentes plantas 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, **9 de marzo de 2022**

f. _____

Nombre: **Rodríguez De la Cruz, Cristopher Alejandro**

C.C: **0953481413**

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Comparación del índice de agrietamiento en mezclas de diferentes plantas asfálticas		
AUTOR(ES)	Rodríguez De la Cruz, Christopher Alejandro		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Ing. Vila Romaní, Rolando PhD.		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería Civil		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniería Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	9 de marzo del 2022	No. DE PÁGINAS:	81
ÁREAS TEMÁTICAS:	Pavimentos, Mezclas Asfálticas		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	mezclas asfálticas, agrietamientos, envejecimiento, prueba IDEAL, AASHTO R30, CT index.		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras): Los agrietamientos son el principal deterioro de las mezclas asfálticas en el Ecuador y deben ser tomados en cuenta en los controles de calidad, ya que actualmente no existen pruebas ni exigencias establecidas al respecto. El objetivo de este trabajo es evaluar la resistencia a la fractura de diferentes mezclas asfálticas procedentes de plantas ubicadas en la ciudad de Guayaquil o sus alrededores, mediante la prueba IDEAL sobre probetas envejecidas a corto, mediano y a largo plazo, para establecer comparaciones y valorar sus posibles comportamientos. Para el proceso de envejecimiento se consideraron en general los criterios de la normativa AASHTO R30. Se seleccionaron en total 3 plantas que emplean distintos agregados, procedentes de rocas basálticas, calizas y pizarras, confeccionándose 9 briquetas de 150 mm de diámetro de las mezclas de cada planta, con 7% de vacíos aproximadamente. Luego se aplica el proceso de envejecimiento en horno, se realiza la prueba IDEAL a 25 °C y la determinación del CT index. En los tres tipos de mezclas al incrementar el tiempo de envejecimiento los valores de CT index disminuyen, por lo que la resistencia al agrietamiento es menor en mezclas más envejecidas. Las mezclas con agregados provenientes de roca caliza y basalto presentaron una mejor resistencia al agrietamiento, luego del envejecimiento, que la mezcla con pizarra. No obstante, al comparar con otros resultados internacionales puede concluirse que todos nuestros valores fueron bajos. Esta situación puede ser consecuencia de la calidad del asfalto producido en Esmeraldas.			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593995307554	E-mail: cristopherodriguez98@gmail.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):	Nombre:		
Nº. DE CLASIFICACIÓN:	Teléfono:		
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):	E-mail:		