



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

TEMA:

**Valoración experimental de soluciones para mejorar el índice de
tolerancia al agrietamiento en mezclas asfálticas.**

AUTORA:

Romero Loayza, Emili Alejandra

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

TUTOR:

Ing. Vila Romaní, Rolando. PhD

Guayaquil, Ecuador

21 de septiembre 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 **Romero Loayza, Emili Alejandra**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniera Civil**.

TUTOR

f. _____
Ing. Vila Romaní, Rolando. PhD

DIRECTORA DE LA CARRERA

f. _____
Ing. Stefany Alcívar Bastidas, MSc.

Guayaquil, a los 21 días del mes de septiembre del año 2022



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

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Romero Loayza, Emili Alejandra**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Valoración experimental de soluciones para mejorar el índice de tolerancia al agrietamiento en mezclas asfálticas**, previo a la obtención del título de **Ingeniera 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 21 días del mes de septiembre del año 2022

LA AUTORA:

f. _____
Romero Loayza, Emili Alejandra



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

AUTORIZACIÓN

Yo, **Romero Loayza, Emili Alejandra**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Valoración experimental de soluciones para mejorar el índice de tolerancia al agrietamiento en mezclas asfálticas**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 21 días del mes de septiembre del año 2022

LA AUTORA:

f. _____
Romero Loayza, Emili Alejandra

REPORTE URKUND



Document Information

Analyzed document	TRABAJO FINAL EMILY urkund.docx (D143547420)
Submitted	2022-09-03 01:31:00
Submitted by	Clara Glas
Submitter email	claglas@hotmail.com
Similarity	8%
Analysis address	clara.glas.ucsg@analysis.orkund.com

AGRADECIMIENTOS

Uno de los valores más sublimes que posee el ser humano es la gratitud, por eso en estas breves líneas agradezco en primer lugar a Dios por bendecirme con toda la salud, fuerza y sabiduría necesaria durante todo mi proceso académico y llegar a la culminación de esta nueva etapa. A mis padres, Geovanny Romero Sánchez e Irlanda Loayza Aguilar, sin ellos nada de esto sería posible, gracias por estar para mí, siempre apoyándome en todo momento y ser el ser motor que me impulsa cada día a mejorar como persona. A mis hermanas, Camila y Ariana, gracias por alegrar mis días, definitivamente mi vida no hubiera sido la misma sin ustedes. A mi prima Cristina Noles Loayza, por todo su cariño y ante todo ser un apoyo incondicional en mi vida. A mis abuelos paternos, maternos y en general a toda mi familia, gracias por sus consejos llenos de amor e inspiración.

A todos los docentes de la facultad por transmitir sus conocimientos, en especial al Ing. Rolando Vila, PhD. Por la oportunidad y confianza depositada en mí, y por ser un tutor excelente e incondicional guiándome en cada detalle del proceso de mi trabajo de titulación. Al Ing. Walter Mera y la Ing. Ariana Villao por brindarme su apoyo en el laboratorio de carreteras de la UCSG.

A Luis Cevallos, gracias por ser no solo mi novio, sino también mi mejor amigo, por confiar en mí, estar presente a lo largo de la carrera, brindarme tu amor y cariño y sobre todo escucharme y apoyarme cuando más te he necesitado.

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación está dedicado a Dios, por guiarme y mantenerme firme en todo el proceso de mi carrera Universitaria. A mis padres, por confiar en mí en todo momento, por cuidarme y estar siempre pendientes de mi bienestar, y sobre todo por convertirse en mis motivadores constantes en esta etapa y finalmente a mis hermanas, por todo su amor brindado.



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

f. _____

Ing. Rolando Vila Romaní, PhD.

TUTOR

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

Ing. Stefany Alcívar Bastidas, MSc.

DIRECTORA DE LA CARRERA

f. _____

Ing. Nancy Varela Terreros, MSc.

DOCENTE

f. _____

Ing. Federico Von Buchwald, PhD.

OPONENTE

ÍNDICE:

Capítulo I	2
1. Introducción:	2
1.1 Antecedentes	2
1.2 Justificación e importancia del tema	4
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo General	5
1.3.2 Objetivos Específicos	5
1.4 Alcance	6
1.5 Metodología.....	6
Capítulo II	8
2. Marco teórico	8
2.1 Mezclas asfálticas	8
2.1.1 Generalidades	8
2.1.2 Propiedades consideradas en su diseño y control de calidad	11
2.1.3 Pruebas para el control de estas propiedades	17
2.1.4 Control de calidad rutinario en las mezclas asfálticas	18
2.2 El fenómeno del agrietamiento en capas asfálticas de carreteras.....	23
2.2.1 Descripción	23
2.2.2 Factores que inciden en el agrietamiento.	24
2.2.3 Envejecimiento de las mezclas asfálticas.....	26
2.2.4 Prueba IDEAL para evaluar el índice de tolerancia al agrietamiento..	28

2.3	Posibles soluciones para mejorar el comportamiento al agrietamiento.	32
2.4	Precisiones sobre las soluciones escogidas	36
Capítulo III		40
3.	Trabajo experimental	40
3.1	Características de la mezcla patrón a emplear.....	40
3.1.1	Generalidades	40
3.1.2	Diseño de la mezcla	41
3.2	Proceso de envejecimiento aplicado.....	46
3.2.1	Acondicionamiento de mezclas para el envejecimiento a corto plazo. 46	
3.2.2	Acondicionamiento de mezclas para el envejecimiento a largo plazo. 46	
3.3	Proceso de confección de especímenes en el compactador giratorio Superpave.....	47
3.4	Precisiones sobre el desarrollo en particular de la prueba IDEAL.....	54
3.5	Análisis de resultados.....	58
4.	Conclusiones y Recomendaciones	62
4.1	Conclusiones	62
4.2	Recomendaciones	63
Referencias Bibliográficas		64
Anexos:		69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metodología del trabajo experimental.....	7
Figura 2. Esquema del proceso de fraccionamiento SARA.....	10
Figura 3. Carril con ahuellamiento.	12
Figura 4. Agrietamiento por fatiga tipo piel de cocodrilo.....	14
Figura 5. Pavimento asfáltico con peladuras.	15
Figura 6. Representación de las diferentes texturas.....	17
Figura 7. Equipos para prueba RICE.	19
Figura 8. Ensayo estabilidad Marshall.....	23
Figura 9. Agrietamiento descendente por fatiga.	25
Figura 10. Pruebas para evaluar el agrietamiento en mezclas asfálticas	28
Figura 11. Prueba IDEAL.	30
Figura 12. Parámetros de interés para el cálculo del CTindex.....	32
Figura 13. Kraton Sylvaroad RP1000 empleado.	36
Figura 14. Recipiente con asfalto modificado por EMULDEC.....	38
Figura 15. Fibras FORTA.....	39
Figura 16. Materiales para el diseño de la mezcla asfáltica.....	40
Figura 17. Pruebas de granulometría a los agregados.....	41
Figura 18. Granulometría seleccionada.	43
Figura 19. Muestras de la mezcla patrón para envejecimiento a corto plazo.	46
Figura 20. Horno de convección empleado para envejecimiento a largo plazo.	47
Figura 21. Juego de probetas - Mezcla Patrón.....	47

Figura 22. Juego de probetas - Rejuvenecedores.....	48
Figura 23. Juego de Probetas - Polímeros.....	48
Figura 24. Juego de Probetas - Fibras.....	48
Figura 25. Pesaje de los distintos agregados minerales.	49
Figura 26. Colocación de los agregados en el horno de convección.	49
Figura 27. Calentando el cemento asfáltico.....	50
Figura 28. Proceso de mezcla de los agregados minerales y el asfalto.....	50
Figura 29. Colocación de la mezcla en horno para envejecimiento a corto plazo...	51
Figura 30. Colocación de la mezcla en el molde.	51
Figura 31. Colocación del molde en el compactador giratorio.....	51
Figura 32. Programación del compactador giratorio.	52
Figura 33. Extracción de la probeta cilíndrica.	52
Figura 34. Probetas envejecidas a largo plazo.	53
Figura 35. Fibra FORTA FI y su adición a los agregados.....	54
Figura 36. Dispositivos para prueba IDEAL.	55
Figura 37. Cámara empleada para filmar el ensayo.....	55
Figura 38. Curva carga vs desplazamiento.	57
Figura 39. Gráfico de barras con los resultados promedios.....	58
Figura 40. Gráfico de barras para la mezcla patrón.....	59
Figura 41. Gráfico de barras para la mezcla con rejuvenecedor.....	60
Figura 42. Gráfico de barras para la mezcla con polímero.	60
Figura 43. Gráfico de barras para la mezcla con fibras.	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de granulometrías para mezclas calientes en Ecuador.	8
Tabla 2. Pruebas y exigencias a los agregados minerales.	9
Tabla 3. Clasificación por viscosidad.	11
Tabla 4. Granulometría combinada para la mezcla.	42
Tabla 5. Dosificación de agregados minerales.	42
Tabla 6. Resultados de la prueba RICE.	43
Tabla 7. Obtención de los pesos a emplear para cada probeta compactada.	44
Tabla 8. Resultados de las pruebas al asfalto sin modificar y con rejuvenecedor. ...	44
Tabla 9. Resultados de las pruebas al asfalto mejorado con polímeros.	45
Tabla 10. Detalle de hoja EXCEL para el procesamiento de la información.	56
Tabla 11. Determinación del CT index.	58
Tabla 12. Resumen de resultados del CT index.	58

Resumen

Uno de los problemas que más impactan en el deterioro de nuestros pavimentos son sin duda los agrietamientos en las capas asfálticas, asociados a las cargas aplicadas y al impacto de los factores climáticos. Sin embargo, el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) en sus especificaciones técnicas vigentes no recomienda o exige el empleo de alguna prueba básica para el control rutinario del agrietamiento. Es conocido que, en años recientes, investigaciones en EE.UU. han propuesto el empleo de la Prueba IDEAL que permite determinar el índice de tolerancia al agrietamiento (CT index), ya bajo norma ASTM. Basado en lo anterior el objetivo de este trabajo es valorar la resistencia al agrietamiento utilizando la prueba IDEAL sobre probetas envejecidas a corto y a largo plazo, en una mezcla asfáltica patrón a la que se le aplicarán tres soluciones para mejorar esa resistencia: asfaltos con polímeros, asfaltos con rejuvenecedores y fibras a la mezcla, lo que permitirá establecer comparaciones y valorar sus posibles comportamientos. Como resultado se comprueba que, si bien la mezcla patrón cumple de manera muy ajustada la exigencia de CT index mayor a 65, el cual es válido para mezclas densas envejecidas a corto plazo y a 25°C, el empleo del rejuvenecedor muestra grandes potencialidades, alcanzando valores promedios muy elevados de CT index tanto a corto como a largo plazo, 80,9 y 68,0 respectivamente. El empleo de fibras no tuvo mayor afectación y la utilización de polímeros resultó negativa, tal vez por los procedimientos de mezclado.

***Palabras Claves:* Prueba IDEAL, CT index, Polímeros, Rejuvenecedores, Fibras.**

Abstract

One of the main problems that causes the deterioration of Ecuadorian flexible pavements are undoubtedly cracking of the asphalt layers, associated with the applied loads and the impact of climatic factors. However, the “Ministerio de Transporte y Obras Públicas” (MTO) in its current technical specifications does not recommend or require the use of any basic test for routine cracking control. It is known that, in recent years, research in the US has proposed the use of the IDEAL Test that allows determining the crack tolerance index (CT index), already under the ASTM standard. Based on the above, the objective of this work is to assess the resistance to cracking using the IDEAL test on specimens aged in the short and long term, in a standard asphalt mixture to which three solutions will be used to improve that resistance: asphalts with polymers, asphalts with rejuvenators and fibers to the mixture, which will allow comparisons to be made and their possible behaviors to be evaluated. As a result, it is verified that, although the standard mixture meets very closely the requirement of CT index greater than 65, which is valid for dense mixtures aged in the short term and at 25°C, the use of the rejuvenator shows great potential, reaching high average CT index values both in the short and long term, 80.9 and 68.0 respectively. The use of fibers didn't have any effect and the use of polymers was negative, perhaps due to the mixing procedures.

Keywords: Ideal Test, CT index, Polymers, Rejuvenators, Fibers.

Capítulo I

1. Introducción:

1.1 Antecedentes

Las obras viales son fundamentales para el crecimiento de un país, ya que fortalecen e impulsan el desarrollo económico y social del mismo. De manera general, las carreteras son un medio de transporte que se deben construir para soportar y permitir de forma adecuada el paso de vehículos tanto livianos como pesados. Para lograr este objetivo, el diseño debe adoptar ciertos criterios enfocados a alcanzar vías seguras y con el confort adecuado para los usuarios.

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el período para el cual fue diseñada la estructura del pavimento (Montejo, 2002). Uno de los componentes más importantes del pavimento flexible son las mezclas asfálticas, que sirven para transmitir las cargas a las capas inferiores, pero teniendo la mayor interacción con los neumáticos de los vehículos que son los que transfieren las cargas.

Esta interacción en el tiempo puede generar en las capas asfálticas dos problemas fundamentales: agrietamientos o deformaciones. En este trabajo nos enfocaremos exclusivamente al agrietamiento, que es el mayor problema existente en los pavimentos flexibles del Ecuador, y culpable de la poca durabilidad de estos. En general, las grietas asociadas a los tipos de deterioros se clasifican como grietas por fatiga y grietas de bloque. Las grietas por fatiga tipo piel de cocodrilo se producen por las flexiones continuas de la capa asfáltica bajo las cargas actuantes de los vehículos, mientras que las grietas de bloque no dependen de las cargas, sino de los gradientes diarios grandes de temperatura que provocan contracciones y dilataciones continuas

en la mezcla. El envejecimiento de la mezcla con el tiempo impactará ambos tipos de grietas.

Ya que las carreteras ecuatorianas padecen estos dos tipos de fallas, se considera oportuno hacer un estudio usando la metodología de la prueba de agrietamiento IDEAL, con el fin de buscar soluciones para mejorar el índice de agrietamiento en mezclas asfálticas. Esta prueba surgió del proyecto IDEA (acrónimo en inglés de: “Innovations Deserving Exploratory Analysis Program”) financiado por el Programa NCHRP de los EE.UU (Zhou, 2019). El objetivo de este programa, para el caso específico de la prueba de agrietamiento IDEAL fue buscar una prueba simple, confiable y de bajo costo para garantizar controles de calidad y aseguramiento de la calidad aceptables ante los problemas de agrietamiento en las mezclas. Estos problemas se encuentran en alza en EE.UU. por el uso cada vez más grande de mezclas recicladas, donde se emplean porcentajes elevados de pavimentos asfálticos recuperados (RAP) o de tejas asfálticas recuperadas (RAS).

En trabajos anteriores realizados en el Laboratorio de Carreteras de la UCSG, se ha demostrado que el empleo de la prueba de agrietamiento IDEAL es factible de emplear en Ecuador para mezclas con envejecimiento a corto y largo plazo. Es conocido que una probeta envejecida a largo plazo tendrá una menor resistencia al agrietamiento que una envejecida a mediano y corto plazo, ya que a medida aumentan los días de envejecimiento la resistencia al agrietamiento va a ser menor (Navarrete, 2021). Por otra parte, en otro estudio realizado con la prueba IDEAL CT empleando mezclas fabricadas en diferentes plantas de Guayaquil, se obtuvieron en general índices de agrietamientos bajos. Además, que las mezclas asfálticas con agregados provenientes de rocas calizas o basaltos presentaron una mejor resistencia al agrietamiento, luego del envejecimiento, que la mezcla con agregados provenientes de pizarras (Rodríguez, 2022).

Existen algunas soluciones para mejorar el comportamiento al agrietamiento, este trabajo de titulación hará énfasis en tres posibles alternativas: asfaltos con rejuvenecedores, asfaltos con polímeros y el empleo de fibras en la mezcla. Estas posibles soluciones serán chequeadas precisamente mediante la prueba IDEAL.

1.2 Justificación e importancia del tema

Los agrietamientos que se originan en las capas asfálticas de las carreteras son originados generalmente por las cargas aplicadas y el impacto de los factores climáticos. De manera global, estas fallas se generan normalmente en puntos frágiles de la estructura, como consecuencia de mala calidad de los materiales, diseños inadecuados o procedimientos constructivos incorrectos.

Una de las razones principales para llevar a cabo esta investigación es continuar indagando sobre las posibles soluciones para contrarrestar los agrietamientos, a partir del empleo de la novedosa prueba IDEAL. Para ello se confeccionarán en el laboratorio probetas cilíndricas con distintos aditivos, a las cuales se les aplicará previamente un envejecimiento a corto y largo plazo. Posterior a esto, se realizarán las pruebas IDEAL y se compararán los resultados con el fin de valorar posibles soluciones al frecuente agrietamiento de las mezclas en nuestros pavimentos flexibles, principal causante de su poca durabilidad.

El tema tratado es de gran importancia ya que en realidad el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) en sus especificaciones técnicas vigentes (MOP, 2002), no recomienda o exige el empleo de alguna prueba básica para el control del agrietamiento. Si bien para el diseño de mezclas asfálticas se considera la determinación de ciertos parámetros volumétricos y resistentes, dentro de estos últimos solo se encuentran la estabilidad Marshall y el flujo, ambos asociados a las deformaciones plásticas. Esos mismos parámetros son los que después se consideran en el control rutinario de las mezclas producidas en planta.

A pesar de que en las mencionadas especificaciones del MTO también se recomienda, en el numeral de ensayos y tolerancias, el posible empleo de la prueba de tracción indirecta, esta se enfoca en chequear la resistencia retenida ante el daño originado por el agua. Es de destacar que la prueba IDEAL, aunque se basa en dicho ensayo de tracción indirecta, va mucho más allá en la interpretación de los aspectos técnicos relacionados con el agrietamiento.

Este trabajo de titulación ayudará a toda la comunidad ingenieril dedicada al tema de construcción de vías, ya que:

1.- Compartirá conocimientos sobre el empleo de la novedosa prueba IDEAL y la determinación de su índice de tolerancia al agrietamiento (CTindex).

2.- Hará comparaciones entre las tres soluciones propuestas para mejorar el comportamiento ante el agrietamiento, mediante el empleo de rejuvenecedores, polímeros y fibras, para valorar la mejor opción a nuestro alcance para contrarrestar este problema.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Valorar la resistencia al agrietamiento utilizando la prueba IDEAL sobre probetas envejecidas a corto y a largo plazo, en una mezcla asfáltica patrón a la que se le aplicarán tres soluciones para mejorar esa resistencia: asfaltos con polímeros, asfaltos con rejuvenecedores y fibras a la mezcla, lo que permitirá establecer comparaciones y valorar sus posibles comportamientos.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Estudiar el procedimiento de la prueba de agrietamiento IDEAL.
2. Estudiar las particularidades de las soluciones a emplear: asfaltos con rejuvenecedores, asfaltos con polímeros elastoméricos y mezclas con fibras.
3. Seleccionar una mezcla asfáltica patrón o de referencia.
4. Confeccionar los especímenes de 150 mm de diámetro con $7 \pm 0.5\%$ de vacíos, empleando mezclas envejecidas a corto y largo plazo, tanto para la mezcla patrón como para las mezclas confeccionadas con las diferentes soluciones.
5. Realizar las pruebas de agrietamiento IDEAL y procesar la información adquirida.
6. Analizar y comparar los resultados obtenidos.
7. Realizar recomendaciones.

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 serán de interés y posible aplicación por el M.I. Municipio de Guayaquil, el MTOP (Ministerio de Transporte y Obras Públicas), consultores y técnicos en general vinculados a la temática.

El resultado que se obtendrá a partir de la investigación es dar a conocer las tres soluciones para mejorar el índice de agrietamiento en mezclas asfálticas, con ayuda de estudios bibliográficos, obtención de datos experimentales y la utilización de métodos estadísticos. El procedimiento que se seguirá para evaluar la menor o mayor tendencia al agrietamiento es la prueba IDEAL, donde se tiene que medir y procesar la relación carga vs desplazamiento mediante los criterios de la mecánica de fractura, determinando finalmente el CTIndex (Índice de tolerancia al agrietamiento).

El uso de la información recolectada permitirá actualizar los conocimientos a los ingenieros relacionados con la construcción vial, respecto a tres opciones técnicas para solucionar el problema de los agrietamientos generados en el pavimento flexible. A futuro, y con la acumulación de experiencias, alguna de estas soluciones pudiera convertirse en una nueva recomendación o requerimiento en nuestra norma.

1.5 Metodología

Se realizará con la aplicación del método general de análisis y síntesis. Se hará un estudio bibliográfico, el procesamiento de datos experimentales y la aplicación de modelos estadísticos. El desarrollo experimental se lo va a ejecutar en el Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

Lo primero a realizar en la práctica es la selección del tipo de mezcla a emplear, que incluye tipos de agregados y asfalto, así como sus dosificaciones. Luego se trabajará con especímenes patrones, para poder contrastar el efecto de las posibles soluciones. Una vez preparadas las mezclas se realizará el envejecimiento a corto plazo, el cual consiste en llevar las mezclas sueltas al horno por 4 horas a 135°C. Posterior a esto, se compactarán empleando el compactador giratorio Superpave para conseguir un 7% de vacíos de aire. Cabe recalcar que todas las muestras, tendrán un diámetro de 150 mm y un espesor aproximado de 62 mm. Para el envejecimiento a largo plazo los especímenes compactados se colocarán en un horno durante 5 días a 85°C y finalmente

se realizarán las pruebas IDEAL. En total se van a ensayar 24 muestras cilíndricas, se compararán los resultados y se evaluarán los valores del CTindex, para determinar la solución óptima.

A continuación, se muestra en la Figura 1 la metodología de trabajo.

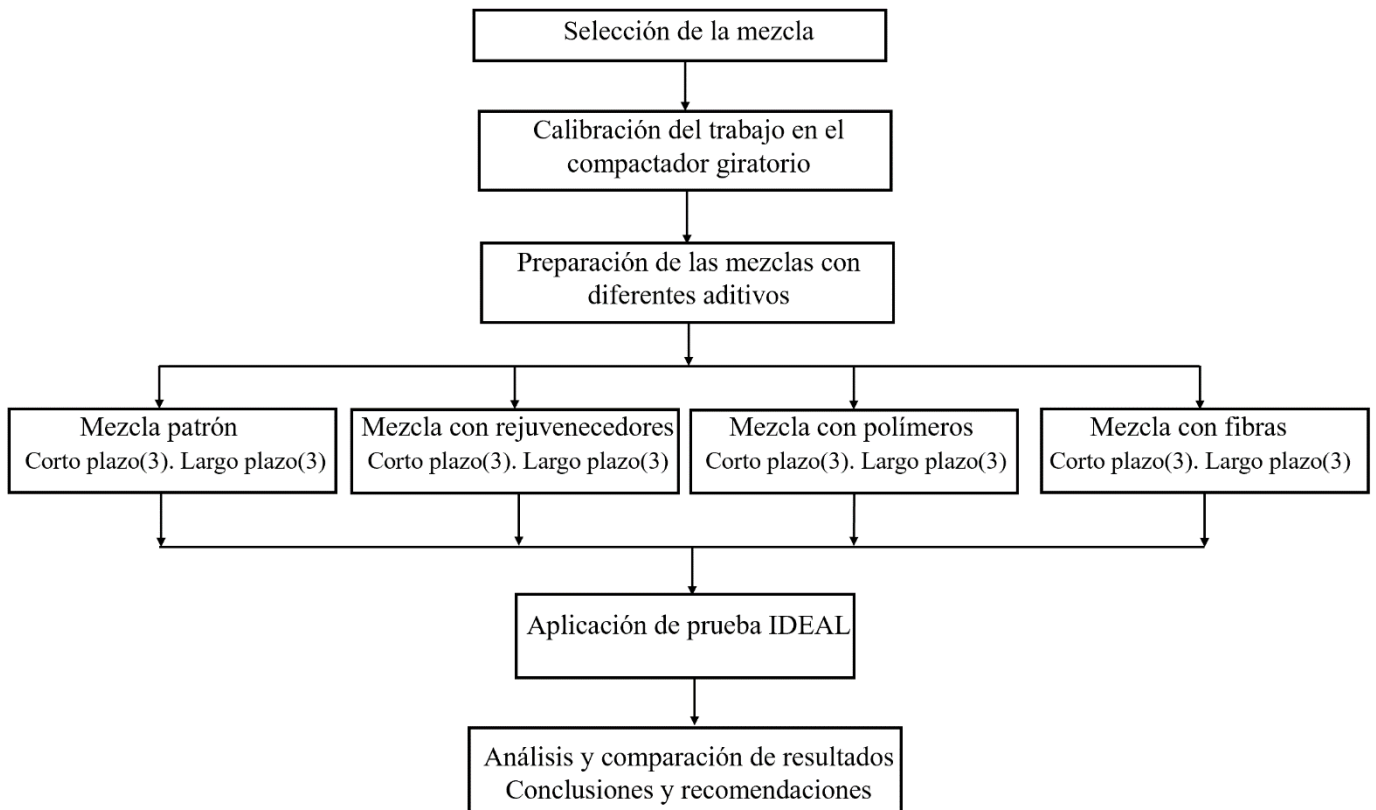


Figura 1. Metodología del trabajo experimental

Capítulo II

2. Marco teórico

2.1 Mezclas asfálticas

2.1.1 Generalidades

Las mezclas asfálticas son una combinación de agregados gruesos, agregados finos y relleno mineral o filler (de ser necesario) con cemento asfáltico, para cumplir con ciertos criterios de composición y otras características o propiedades. Las proporciones de estos componentes dictan su desempeño como pavimento flexible (Cepeda, 2002).

2.1.1.1 Agregados minerales

Estos representan el mayor componente en peso de la mezcla asfáltica, variando aproximadamente entre el 93 y el 95%, por lo que la incidencia de su calidad será muy importante en la mezcla. Los agregados minerales están constituidos de fragmentos de rocas o materiales aluviales triturados en ciertos tamaños, que permitan al dosificarse cumplir alguna de las exigencias granulométricas previstas. Ver en la Tabla 1 la clasificación de acuerdo a sus tamaños máximos nominales (MOP, 2002).

Tabla 1. Tipos de granulometrías para mezclas calientes en Ecuador.

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	¾"	½"	3/8"	Nº4
1" (25.4 mm.)	100	--	--	--
¾" (19.0 mm.)	90 - 100	100	--	--
½" (12.7 mm.)	--	90 - 100	100	--
3/8" (9.50 mm.)	56 - 80	--	90 - 100	100
Nº 4 (4.75 mm.)	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100
Nº 8 (2.36 mm.)	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100
Nº 16 (1.18 mm.)	--	--	--	40 - 80
Nº 30 (0.60 mm.)	--	--	--	25 - 65
Nº 50 (0.30 mm.)	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40
Nº 100 (0.15 mm.)	--	--	--	3 - 20
Nº 200 (0.075 mm.)	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10

Las características generales que deben cumplir los agregados minerales pueden agruparse en: forma, dureza, limpieza y capacidad de adherencia con el betún. Las pruebas asociadas a estas características y sus exigencias (MOP, 2002) se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Pruebas y exigencias a los agregados minerales.

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

Tomado de: Clases de la asignatura de Pavimentos. UCSG. Ing. Rolando Vila, 2020.

2.1.1.2 *Cemento asfáltico*

Es un material bituminoso de color negro, con composición muy compleja y naturaleza hidrocarbonada, que posee propiedades adhesivas y aglomerantes, manifestando, además, un comportamiento reológico en el que están basadas sus aplicaciones tecnológicas, principalmente las mezclas asfálticas.

El cemento asfáltico es producto del residuo de la destilación del petróleo, con una composición química conformada básicamente por:

- 82 a 88% de carbono
- 8 a 11% de hidrógeno
- 0 a 1,5% de oxígeno
- 0 a 6% de azufre
- 0 a 1% de nitrógeno
- pequeñas cantidades de metales.

Sin embargo, para su estudio suelen emplearse las llamadas técnicas de fraccionamiento con solventes, que permiten seccionar su estructura química. La técnica más usual se recoge en la normativa ASTM D4124, denominada composición SARA (Saturados-Aromáticos-Resinas-Asfaltenos). Ver Figura 2. La composición SARA de un asfalto incidirá en sus propiedades físicas y por ende en el comportamiento de la mezcla. Los asfáltenos son partículas coloidales recubiertas por resinas que impiden su floculación y mantienen su dispersión en aceites máltenos. (Alencar, A.E., Bringel, R.M., Soares, J.B. & Soares, S.A., 2006; Bernucci, 2008).

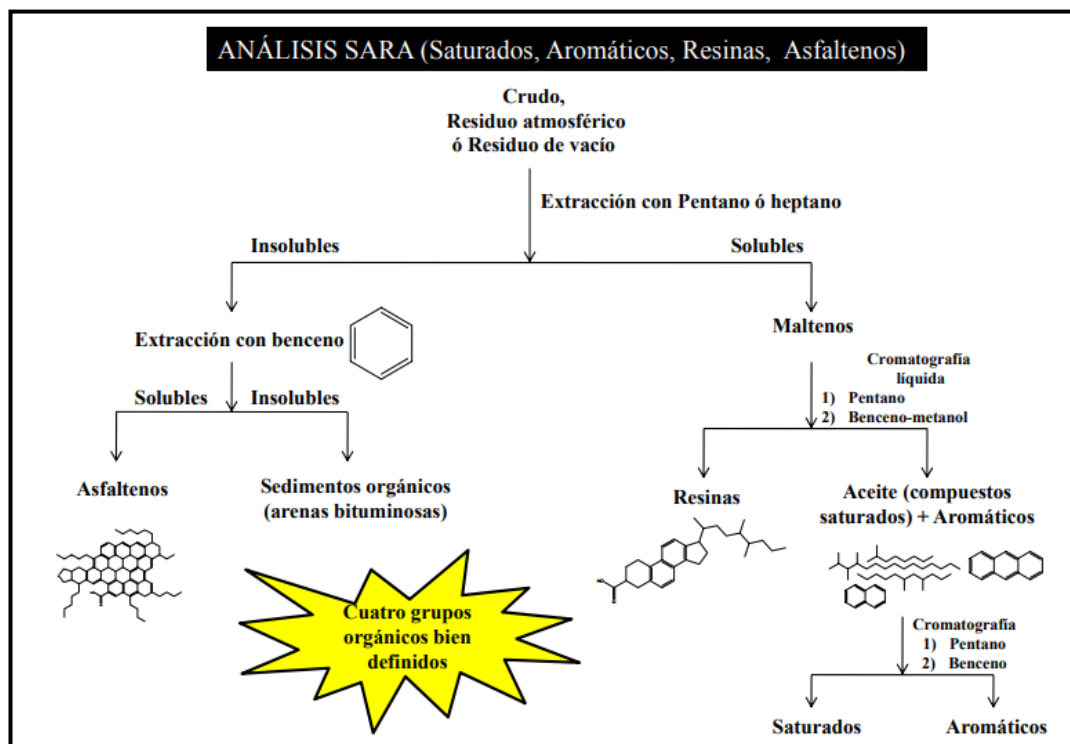


Figura 2. Esquema del proceso de fraccionamiento SARA.

Tomado de: Curso “Asfaltos y mezclas asfálticas para obras viales”. Rolando Vila. UCSG. 2017.

El asfalto es un material de especial interés para los ingenieros por ser un adhesivo fuerte, con buena resistencia al agua y alta duración. Es un plastificante que otorga flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que normalmente se combina. Además, es resistente a la mayoría de los ácidos, álcalis y sales. Aunque es un sólido o semisólido a temperaturas atmosféricas ordinarias, puede licuarse fácilmente mediante la aplicación de calor, la acción de solventes de volatilidad variable o por emulsificación.

En el Ecuador, la clasificación del asfalto procedente de la Refinería de Esmeraldas se realiza según los criterios de viscosidad, considerando la NTE INEN 2515, Enmienda 1 (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010). Ver Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación por viscosidad.

Ensayo	Unidad	Grado de Viscosidad										Norma de ensayo
		AC-6		AC-10		AC-20		AC-30		AC-42		
		Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa s	60 ± 20		100 ± 20		200 ± 40		300 ± 60		420 ± 60		ASTMD 2171
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm ² s ⁻¹	175	--	250	--	300	--	350	--	400	--	ASTMD 2170
Punto de Inflamación	°C	177	--	219	--	232	--	232	--	232	--	NTE INEN 808
w. Solubilidad en tricloroetileno, ^C	%	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	NTE INEN 915
Gravedad específica 25 °C/25 °C		Informe		Informe		Informe		Informe		Informe		ASTMD70
Índice de Penetración ^B		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		ASTM D5/D5M
Residuo de ensayos de película fina en horno rotatorio:												
Viscosidad, 60 °C	Pa s	--	300	--	500	--	800	--	1 200	--	2 000	ASTMD 2171
Cambio de masa,	% w/w	--	1,5	--	1,0	--	1,0	--	1,0	--	1,0	ASTMD 2872
Ductilidad ^A , 25 °C [77 °F], 5 cm/min	cm	100	--	75	--	50	--	40	--	25	--	NTE INEN 916
^A Si la ductilidad es menor a 100, el material debe ser aceptado, solo si la ductilidad a 15,5 °C es mínimo 100 a una velocidad de tiro de 5 cm/min.												
^B Índice de penetración = $\frac{1952-500 \log pen-20 SP}{50 \log pen-SP-120}$												
donde:												
pen = penetración a 25 °C, 100 g, 5 s												
SP = punto de ablandamiento (°C) ASTM D36												
^C Solubilidad en bromuro de propilo N puede ser un método alternativo a la solubilidad en TCE.												

2.1.2 Propiedades consideradas en su diseño y control de calidad

El diseño de una mezcla asfáltica se basa en la dosificación adecuada de agregados minerales para cumplir con una granulometría en particular, así como la determinación del contenido óptimo de asfalto a emplear, para cumplir teóricamente con una serie de propiedades que satisfagan los requisitos específicos del proyecto. La selección apropiada de los materiales (con la calidad suficiente) que constituirán la mezcla y de sus proporciones correctas, requiere el conocimiento de las propiedades más importantes de las mezclas, y de su influencia en el comportamiento del pavimento. (Cepeda, 2002).

Las propiedades principales de las mezclas asfálticas son:

- 1) Estabilidad.
- 2) Resistencia a la fatiga.
- 3) Resistencia a agentes externos o durabilidad.
- 4) Resistencia al deslizamiento.

1) Estabilidad

La estabilidad de una capa asfáltica es su capacidad para resistir el empuje y la formación de surcos bajo cargas (tráfico). Una mezcla estable mantiene su forma y suavidad bajo cargas repetidas; una inestable desarrolla surcos o ahuellamientos (canales), ondulaciones (tipo tablas de lavar) y otros signos de desplazamiento de la mezcla. Ver Figura 3.



Figura 3. Carril con ahuellamiento.

Tomado de: Clases de la asignatura de Pavimentos. UCSG. Ing. Rolando Vila, 2020.

Debido a que las especificaciones de estabilidad dependen del tráfico que se espera circule en el pavimento, los requisitos se pueden establecer sólo después de un análisis de tráfico completo. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficientemente altas para manejar el tráfico adecuadamente, pero no más altas de lo que requieren las condiciones del tráfico. Un valor de estabilidad demasiado alto produce una mezcla

demasiado rígida, susceptible a las fracturas y por lo tanto menos duradera de lo deseado.

La estabilidad de una mezcla depende de la fricción interna y la cohesión. La fricción interna del agregado (fricción entre partículas y su trabazón) está relacionada con las características del agregado tales como forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad de unión del aglutinante.

Un grado adecuado tanto de fricción interna como de cohesión en una mezcla evita que las partículas de agregados se muevan entre sí por las fuerzas ejercidas por el tráfico. En general, cuanto más angular es la forma de las partículas de agregado y más rugosa su textura superficial, mayor será la estabilidad de la mezcla. Donde los agregados con buenas características de fricción no estén disponibles, mezclas más económicas usando agregados con baja fricción se pueden usar cuando el tráfico esperado sea ligero.

La fuerza de unión de la cohesión aumenta a medida que se incrementa la viscosidad del aglutinante asfáltico, y mientras mayor sea la temperatura del pavimento la cohesión disminuye. Además, la cohesión aumentará con el aumento del contenido de asfalto hasta un cierto punto. Más allá de ese punto, dicho aumento crea una película demasiado gruesa recubriendo las partículas de agregados, lo que resulta en una pérdida de fricción entre partículas.

2) Resistencia a la fatiga

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para soportar flexiones repetidas causadas por el movimiento vehicular sin fisurarse. El paso de las cargas genera deformaciones por tracción en la capa asfáltica que van deteriorando la mezcla, formando fisuras inicialmente pequeñas. Este proceso va produciendo un agotamiento progresivo por fatiga del material y cuando se llega a un avanzado estado se transforma en agrietamientos generalizados. Ver Figura 4.



Figura 4. Agrietamiento por fatiga tipo piel de cocodrilo.

Tomado de: Clases de la asignatura de Pavimentos. UCSG. Ing. Rolando Vila, 2020.

Las investigaciones muestran que los vacíos de aire (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del aglutinante tienen un efecto significativo en la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la vida de fatiga del pavimento (el período de tiempo durante el cual un pavimento en servicio es adecuadamente resistente a la fatiga) es acortado drásticamente. Asimismo, una mezcla que contenga un asfalto que se haya envejecido y endurecido excesivamente habrá reducido significativamente la resistencia a la fatiga.

En general, los contenidos de asfalto muy altos harán que la mezcla tienda más a deformarse elásticamente que a fracturarse bajo carga repetida. También debe señalarse que la resistencia a la fatiga depende en gran medida de la relación entre el espesor estructural de la capa y las cargas esperadas (Garnica, Flores, Gómez, & Delgado, 2005). Si para cargas elevadas y con alto número de repeticiones esperadas el espesor de la capa asfáltica es insuficiente, la fatiga de esta se producirá en poco tiempo. Peor aún si las capas inferiores donde se apoya la capa asfáltica son débiles o presentan problemas de humedad.

3) Durabilidad

La durabilidad de una capa asfáltica es su capacidad para resistir factores tales como cambios debido al envejecimiento del asfalto (oxidación, polimerización, etc), a la desintegración del agregado y al desnudamiento o "stripping". Este último es un mecanismo de destrucción que produce la separación física del agregado y el asfalto por la pérdida de adhesión debido al efecto del agua o del vapor de agua de las películas de ligante del agregado. Estos factores pueden ser el resultado del clima (lluvias, temperaturas, radiaciones UV), del tráfico o una combinación de los dos. Ver Figura 5. Una consecuencia frecuente de la falta de durabilidad son los desmoronamientos o desprendimientos en la superficie de la capa asfáltica, que en Ecuador suelen denominarse “peladuras”.



Figura 5. Pavimento asfáltico con peladuras.

Tomado de: Clases de la asignatura de Pavimentos. UCSG. Ing. Rolando Vila, 2020.

En general, la durabilidad de una mezcla se puede mejorar por tres métodos. Ellos son: usar el máximo contenido de ligante, usar una gradación densa de agregado resistente al desprendimiento, así como diseñar y compactar la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.

El contenido máximo de aglutinante aumenta la durabilidad porque las películas gruesas de aglutinante no envejecen y se endurecen tan rápido como las delgadas. En consecuencia, el ligante conserva sus características originales por más tiempo. Además, el contenido máximo de aglomerante sella eficazmente un mayor porcentaje

de vacíos de aire interconectados en la mezcla, lo que dificulta la penetración del aire y del agua. Por supuesto, un cierto porcentaje de vacíos de aire deben dejarse abiertos en la mezcla para permitir la expansión del asfalto en climas cálidos.

Una gradación densa de agregados sólidos, duros y resistentes al desprendimiento contribuye a la durabilidad de la capa asfáltica de tres maneras. Una gradación densa proporciona un contacto más estrecho entre las partículas de los agregados, lo que mejora la impermeabilidad de la mezcla. Un agregado sólido y resistente resiste la desintegración bajo carga de tráfico; y el agregado resistente al desprendimiento resiste la acción del agua y del tráfico, que tienden a arrancar la película de ligante de las partículas de agregado y provocar el desmoronamiento del pavimento. Bajo ciertas condiciones, la resistencia de una mezcla al stripping se puede aumentar mediante el uso de aditivos adherencia o un relleno mineral (filler) como como cal hidratada.

4) Resistencia al deslizamiento

La resistencia al deslizamiento es la capacidad de una superficie asfáltica para minimizar el deslizamiento o deslizamiento de los neumáticos de vehículos, especialmente cuando están mojados. Para una buena resistencia al deslizamiento, la banda de rodadura del neumático debe poder mantener el contacto con las partículas de agregado en lugar de viajar sobre una película de agua en la superficie del pavimento (hidroplaneo).

Los factores que afectan el coeficiente de fricción influyen la macrotextura, la microtextura, la presencia de agua en la superficie, el tipo de agregado y aglutinante, estacionalidad, la presión de inflado del neumático y la velocidad del vehículo (Leiva, 2005). Ver Figura 6. Una superficie del pavimento áspera con muchos pequeños picos y valles tendrá una mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con agregados de textura rugosa en una mezcla de grado relativamente abierto con un agregado de tamaño máximo igual o mayor a 12,5 mm (1/2 pulgada).

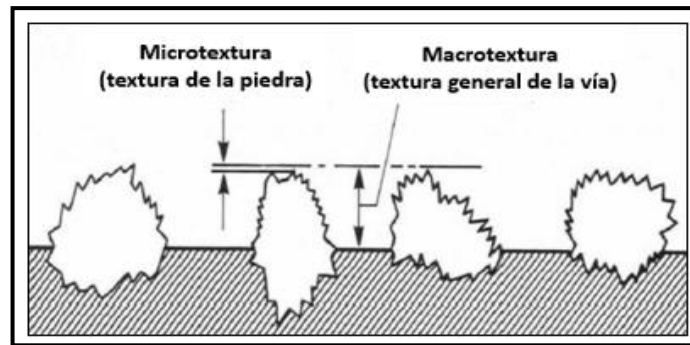


Figura 6. Representación de las diferentes texturas.

Además de tener una superficie rugosa, los agregados deben resistir el pulido bajo el tráfico. Los agregados calcáreos se pulen más fácilmente que los silíceos. Mezclas inestables que tienden a deformarse o que pueden tener problemas de exudación de asfalto presentarán serios problemas de resistencia al deslizamiento.

2.1.3 Pruebas para el control de estas propiedades

En general existen varias posibilidades para la evaluación de estas propiedades a nivel de laboratorio, que van desde pruebas simples (como el empleo de cargas monotónicas) a pruebas dinámicas o mediciones con equipos de alto rendimiento.

Estabilidad.

Puede valorarse a través de pruebas simples como: Marshall, Hveem, Duriez o de compresión simple. También con pruebas dinámicas como compresión uniaxial repetida, triaxial dinámico, rueda de Hamburgo u otras pruebas tipo Wheel Tracking.

Fatiga.

La fatiga es una propiedad conceptualmente dinámica y de hecho las pruebas tienen que seguir esa dirección. Su evaluación puede realizarse a través de pruebas donde las cargas se aplican con cierta forma, frecuencia y a cierta temperatura, bajo carga o deformación controlada. La aplicación de carga suele realizarse con dispositivos de tracción indirecta o en vigas de 3 ò 4 puntos.

No obstante, existen varias pruebas simples de fractura que permiten valorar la resistencia de la mezcla al agrietamiento. Tal es el caso de la tracción indirecta, la flexión semicircular entre otras, que serán mostradas más adelante en el numeral 1.2.4.

Durabilidad.

Comprenden disímiles pruebas como daño en agua y comportamientos ante las deformaciones o fatiga en mezclas sometidas a envejecimiento.

Resistencia al deslizamiento.

Incluyen pruebas para determinar el coeficiente de rozamiento empleando varios tipos de equipos, desde el péndulo TRL hasta el SCRIM, así como pruebas para determinar la textura, por ejemplo, la mancha de arena.

2.1.4 Control de calidad rutinario en las mezclas asfálticas

A continuación, se detallan las pruebas básicas y simples que se realizan para el control rutinario de las mezclas en el Ecuador. Estas son las mismas pruebas que previamente se emplean para el diseño de nuestras mezclas por el método Marshall.

2.1.4.1 Parámetros volumétricos

Para obtener una mezcla asfáltica apropiada debe considerarse la relación entre el contenido de betún y los componentes del agregado mineral o sencillamente, parámetros volumétricos. A continuación, se mencionan los parámetros más utilizados:

- a) Gravedad específica bulk de la mezcla (Gmb)
- b) Gravedad específica máxima (Gmm)
- c) Vacíos de aire en mezcla asfáltica (Va)
- d) Gravedad específica bulk de los agregados (Gsb)
- e) Vacíos en el agregado mineral (VAM)
- f) Vacíos rellenos de asfalto (VFA)
- g) Gravedad específica efectiva de los agregados (Gse)
- h) Porcentaje de asfalto absorbido (Pba)

a) Gravedad específica bulk de la mezcla (Gmb). - Es la relación entre la masa de un volumen en una mezcla asfáltica compactada teniendo en cuenta los vacíos de aire que quedan entre las partículas recubiertas con el betún, y la masa de un volumen igual de agua a una determinada temperatura, dando como resultado un

valor adimensional. Los procedimientos para esta prueba se proporcionan en varios estándares (AASHTO T 166, 2016; ASTM D2726, 2019).

Para determinar la gravedad específica bulk de la mezcla se debe usar la siguiente fórmula:

$$Gmb = \frac{P. Aire}{P. SSS - P. Agua}$$

Donde:

- P. Aire: Peso de la probeta en aire.
- P. SSS: Peso de la probeta saturado superficialmente seco en el aire.
- P. Agua: Peso de la probeta en agua.

- b) Gravedad específica máxima (Gmm).** – Es la relación entre la masa de un volumen en una mezcla asfáltica sin compactar, excluyendo los vacíos que quedan entre las partículas recubiertas con betún ($V_a = 0$), y la masa de un volumen igual de agua a una determinada temperatura. Este valor suele calcularse mediante la denominada prueba “RICE”, utilizando normas como la (ASTM D2041, 2019; AASHTO T 209, 2020). Ver Figura 7.



Figura 7. Equipos para prueba RICE.

Para determinar la gravedad específica máxima teórica se debe utilizar la siguiente expresión:

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

Donde:

- A: Peso del picnómetro + agua.
- B: Peso del picnómetro + agua + material.
- C: Peso del material suelto.

c) **Vacíos de aire en mezcla asfáltica (Va).** – Representan los espacios de aire entre las partículas del agregado mineral recubierto por el betún, en una mezcla compactada. Se expresa como un porcentaje del volumen total de la muestra. Para el diseño de la mezcla bituminosa por el método Marshall, se permite una relación de vacíos entre 3 % a 5% en el laboratorio, mientras que los requisitos para la compactación in situ permiten una densidad del 97 % respecto al laboratorio. Para obtener los vacíos de aire en la mezcla, se toma en consideración la siguiente fórmula:

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

Donde:

- Gmm: Gravedad específica máxima.
- Gmb: Gravedad específica bulk de la mezcla.

d) **Gravedad específica bulk de los agregados (Gsb).** – Es la relación entre la masa en el aire de un volumen dado de agregado permeable. Se debe tomar en cuenta que el agregado total consiste en proporciones de agregado grueso y agregado fino. Después de obtener la gravedad específica de cada agregado, la gravedad específica neta total de los agregados se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

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

e) **Vacíos en el agregado mineral (VAM).** – Es el espacio de aire entre las partículas de agregado mineral en la mezcla compactada, incluidos los vacíos de aire y el volumen asfáltico efectivo, expresado como porcentaje del volumen total. (Asphalt

Institute, 1997). Si el VMA es mayor, significa que el espacio libre entre las partículas para la capa de asfalto va a ser mayor. No obstante, si los valores de VAM son pequeños y más gruesa la capa de asfalto, más duradero será la mezcla asfáltica.

Para calcular el VAM se lo realiza mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

- Gmb: Gravedad específica bulk de la mezcla.
- Ps: Porcentaje o contenido total de agregados.
- Gsb: Gravedad específica neta total de los agregados.

f) **Vacíos rellenos de asfalto (VFA).** – Se determina como el porcentaje de vacíos en los agregados minerales (VAM) que efectivamente derrama el betún y, a su vez, representa la masa efectiva de asfalto que contiene la mezcla asfáltica (Icaza & Mera, 2018). Se lo calcula por medio la siguiente fórmula:

$$VFA = \frac{100 * (VAM - Va)}{VAM}$$

Donde:

- VAM: Vacíos en el agregado mineral.
- Va: Porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

g) **Gravedad específica efectiva de los agregados (Gse).** – Se representa por todos aquellos espacios vacíos del agregado mineral y la masa de un volumen igual de agua, ambos componentes con temperaturas iguales. Este parámetro se puede obtener mediante la siguiente ecuación cuando se conoce la densidad máxima (Gmm) obtenida en el ensayo de “RICE”, así como el porcentaje y gravedad específica del betún:

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

Donde:

- Gmm: Gravedad específica máxima teórica.
- Pb: Porcentaje de asfalto o betún.
- Gb: Gravedad específica de betún o asfalto.

h) **Porcentaje de asfalto absorbido (Pba).** – Se define como el porcentaje de betún absorbido, en peso del agregado mineral. El Pba se calcula con la siguiente fórmula:

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

Donde:

- Gse: Gravedad específica efectiva de los agregados.
- Gsb: Gravedad específica neta total de los agregados.
- Gb: Gravedad específica de betún o asfalto.

1.1.4.2 Parámetros resistentes

Los parámetros resistentes se los puede obtener mediante el ensayo de estabilidad Marshall y flujo.

Una vez determinada la gravedad específica bulk de la mezcla (Gmb), se realizan pruebas de estabilidad y flujo. Se basa en sumergir la muestra en un baño María a 60°C por 30 a 40 minutos. Con el aparato de prueba listo (prensa), la muestra se retira del baño María y se seca la superficie cuidadosamente.

Luego la muestra se posiciona en las mordazas y se aplica la carga mediante una velocidad de desplazamiento constante de 50mm/min en la prensa Marshall, hasta que se produce la falla. La estabilidad Marshall (EM) se corresponde con la carga máxima para la rotura obtenida y se representa usualmente en libras o kilo Newtons, aunque dicha carga debe tener correcciones en función de las variaciones de altura en las probetas. Ver Figura 8.

En esta prueba se mide colateralmente el flujo o fluencia con un medidor o dial especial. El flujo es la medida de la variación del diámetro de la probeta ensayada entre la carga igual a cero y la carga máxima de rotura. Su unidad de medida usualmente es la centésima de pulgadas (1" / 100).

La ecuación de estabilidad Marshall se muestra a continuación:

$$EM = \text{lectura del anillo} * \text{factor de calibración del anillo} \\ * \text{factor de corrección por altura o volumen}$$



Figura 8. Ensayo estabilidad Marshall

2.2 El fenómeno del agrietamiento en capas asfálticas de carreteras

2.2.1 Descripción

El fenómeno de fisuración o agrietamiento, objeto de este trabajo, debe ser tomado en consideración puesto que es una patología común en estos aglomerados y puede afectar tanto la estructura del pavimento como su funcionalidad en el servicio. Este fenómeno provoca la pérdida de la integridad estructural de la mezcla en sí, distorsionando su comportamiento como capa en el pavimento, disminuyendo su resistencia mecánica y tenacidad, así como su módulo elástico. El agrietamiento de hecho potencia la entrada

y el impacto del agua en el pavimento, más sus efectos asociados. Elevados porcentajes de grietas generan baches y hundimientos, entre otros daños, independientemente de las causas en particular que las provocan. (Valdés, Pérez, & Calabi, 2012).

La propagación de grietas consta de tres etapas principales, la primera etapa, conocida como iniciación de grietas, es donde aparecen las primeras micro fisuras debido al estrés generado por las cargas de tráfico y la variación térmica provocando discontinuidades. La segunda etapa, ocurre debido a la repetición continua de los factores que causan las micro fisuras en la primera etapa, solo que en esta fase dichas micro fisuras encajan para formar macro fisuras. La tercera y última etapa es conocida como falla de capa, se da cuando la propagación termina y las grietas en la superficie de la capa de asfalto se pueden ver claramente.

2.2.2 Factores que inciden en el agrietamiento.

El entendimiento común del fenómeno de agrietamiento por fatiga sugiere que las repeticiones de las cargas aplicadas crean áreas de deformación por tracción en la parte inferior de la capa asfáltica que a su vez conducen a la iniciación de microfisuras. Bajo las cargas repetidas estas microfisuras pueden densificarse, fusionarse, propagarse y eventualmente convertirse en macrofisuras visibles en la superficie del pavimento. El nuevo método de diseño mecanicista (NCHRP , 2004) proporciona un medio mecánico para explorar este proceso tradicional de daño por fatiga. El método calcula los niveles de tensión y deformación en los puntos críticos dentro de la estructura del pavimento para predecir el desempeño de este. La deformación crítica es la deformación por tracción, y su ubicación para la fatiga clásica de ascendente (bottom-up cracking: BUC) o piel de cocodrilo, está en la parte inferior de la capa de asfalto El método de diseño mecanicista adopta la siguiente relación fenomenológica entre la vida de fatiga y la deformación por tracción en la parte inferior de la capa de asfalto:

$$N_f = K_1 \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^{K_2} |E^*|^{K_3}$$

Donde:

N_f : Número de ciclos para el fallo,

ϵ_t : Deformación por tracción en la parte inferior de la capa asfáltica,

$|E^*|$: Módulo dinámico de la mezcla asfáltica y

K_1 , K_2 y K_3 : Constantes del material.

La ecuación indica que la fatiga ascendente depende tanto del material (expresado a través de los coeficientes K_1 , K_2 , K_3 y también de $|E^*|$) como de la estructura (\mathcal{E}_t).

La comprensión común antes mencionada de la falla por fatiga ha sido cuestionada en los últimos años a medida que muchos investigadores comenzaron a informar sobre otra forma de falla por fatiga descendente o de arriba hacia abajo (top-down cracking: TDC) (Myers & Roque, 2001; Pellinen, 2002; Al-Qadi & Yoo, 2007), cuyas causas pueden diferir de la fatiga ascendente o BUC. Ver Figura 9. En la fatiga con TDC incidirá con más fuerza el efecto del envejecimiento, que es mayor en la parte más superficial de la capa asfáltica, y los esfuerzos cortantes de los neumáticos sobre la superficie.



Figura 9. Agrietamiento descendente por fatiga.

Tomado de: Clases de la asignatura de Pavimentos. UCSG. Ing. Rolando Vila, 2020.

Las investigaciones han demostrado que numerosos factores afectan la respuesta a la fatiga de la mezcla asfáltica. Los factores más importantes incluyen el tipo de asfalto, el contenido de filler, el porcentaje de vacíos de aire y el contenido de asfalto. Factores secundarios que también se ha demostrado que contribuyen al comportamiento a la fatiga de ciertas mezclas incluyen la gradación de los agregados, la angularidad, la fuente y la temperatura de construcción (Epps & Monismith, 1972; Malan, Straus, &

Hugo, 1989; Tayebali & Huang, 2004). También se ha encontrado que ciertos materiales y ciertas combinaciones de materiales promueven el envejecimiento, lo que en última instancia hacen que estos materiales sean más propensos al agrietamiento por fatiga (Glover, y otros, 2009).

Un fenómeno similar existe con respecto a la resistencia al daño por humedad. Se ha encontrado que la resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica disminuye cuando el daño por humedad está presente en el sistema (Sebaaly, E., Eid, & Epps, 2001). Estudios del comportamiento físico - químico de las superficies de agregados minerales y asfaltos han demostrado que ciertos materiales pueden promover o mitigar estos comportamientos (Hefer, W., Little, & Lytton, 2005). Muchos de estos mismos factores también pueden tener un efecto significativo en el comportamiento ante el ahuellamiento de mezclas de hormigón asfáltico.

Cambios adicionales provocados por la metodología Superpave, como el mayor uso de mezclas de gradación gruesa y una supuesta reducción sistemática en el contenido de asfalto, han complicado este problema de agrietamiento por fatiga (Christensen, W., & Bonaquist, 2006).

2.2.3 Envejecimiento de las mezclas asfálticas.

Uno de los principales fenómenos que más contribuye al deterioro de las mezclas asfálticas a lo largo del tiempo es el envejecimiento, que se caracteriza fundamentalmente por el endurecimiento del betún. Conociendo su influencia, así como los diversos factores que la afectan, es muy importante para evaluar el comportamiento de las mezclas bituminosas. Por esta razón, la mezcla asfáltica debe diseñarse y construirse no solo para resistir las cargas causadas por el tráfico si no también los efectos del envejecimiento.

El desarrollo natural de envejecimiento de un ligante asfáltico se debe mayormente a la pérdida de compuestos livianos de la estructura del asfalto y por otro a la oxidación producto de la reacción con el oxígeno del aire. En el proceso de elaboración y colocación de una mezcla asfáltica en caliente se somete al ligante a las altas temperaturas y aire lo que produce un envejecimiento acelerado debido a los dos mecanismos mencionados. Una vez colocado en el camino la mezcla asfáltica se ve sometida a un envejecimiento leve pero continuo por oxidación producto del aire y la radiación solar (Morea, 2011).

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

En definitiva, el envejecimiento de las mezclas bituminosas se da por el endurecimiento de los ligantes bituminosos, de esta forma las mezclas reducen su capacidad de deformación y pierden su elasticidad, comportamiento muy relacionado con la vida útil del pavimento flexible. Por lo tanto, es importante al estudiar el comportamiento de la mezcla, iniciar con el comportamiento del ligante asfáltico bajo los efectos del envejecimiento.

Causas:

Es fundamental tener en cuenta que estas causas pueden actuar en mayor o menor medida juntas, provocando efectos negativos en la mezcla. No obstante, se analizarán individualmente.

- a) **Oxidación.** - Es el proceso en el que las moléculas del asfalto se oxigenan, produciendo una serie de reacciones químicas que termina alterando su respuesta reológica y mecánica. Se ha identificado a este fenómeno como contribuyente principal de fragilidad y pérdida de la resistencia a la fractura de los pavimentos flexibles. Además, es una de las causas de envejecimiento del asfalto que nunca deja de alterar al ligante desde el momento de su obtención.
- b) **Volatilización.** - El incremento de la temperatura que se aplica al asfalto para su mezclado con los agregados y el posterior almacenamiento en caliente de la mezcla, su transporte y colocación en obra, conlleva que los constituyentes volátiles del ligante se puedan evaporar. Este mecanismo de envejecimiento se lo denomina como de corto plazo ya que ocurre principalmente en la mezcla de los agregados y el asfalto, cuando las temperaturas superan los 150°C. Un aumento de temperatura en 10 a 12°C por encima de los 150°C podría duplicar la emisión de volátiles. Por esto la viscosidad puede aumentar de 150 a 400%, lo cual afecta a las propiedades de flujo (Fernandez, Rondon, & Reyes, 2013).

c) **Radiación Solar.** - El sol emite energía mediante radiación electromagnética con longitudes de onda entre 200 y 3000 nanómetros. Se estima que el 7% de esta radiación que alcanza nuestro planeta es radiación ultravioleta, 42% está dentro del campo visible y 51% es radiación infrarroja. Además, se ha determinado que la exposición a la radiación ultravioleta es la que más pudiera generar alteraciones en las propiedades de los asfaltos analizados (Fernandez, Rondon, & Reyes, 2013). La radiación ultravioleta suele representarse con el Índice UV, el cual se asocia con la intensidad de dicha radiación en un lugar en específico (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2003).

2.2.4 Prueba IDEAL para evaluar el índice de tolerancia al agrietamiento.

Introducción

A lo largo del tiempo se han desarrollado varias pruebas con el objetivo de un realizar un control primario o simple de la tendencia al agrietamiento de las mezclas asfálticas, principalmente basadas en el análisis de una carga o esfuerzo de rotura a la tracción. Ver Figura 10. Entre estas se encuentran: la prueba de tracción indirecta (a), la viga con muesca en un borde o viga entallada (b), la prueba de tracción en disco barrenado (c), la prueba de flexión semicircular (d) y la prueba Fénix (e). Sin embargo, recientemente ha aparecido una nueva prueba denominada "prueba IDEAL", la cual se explica a continuación.

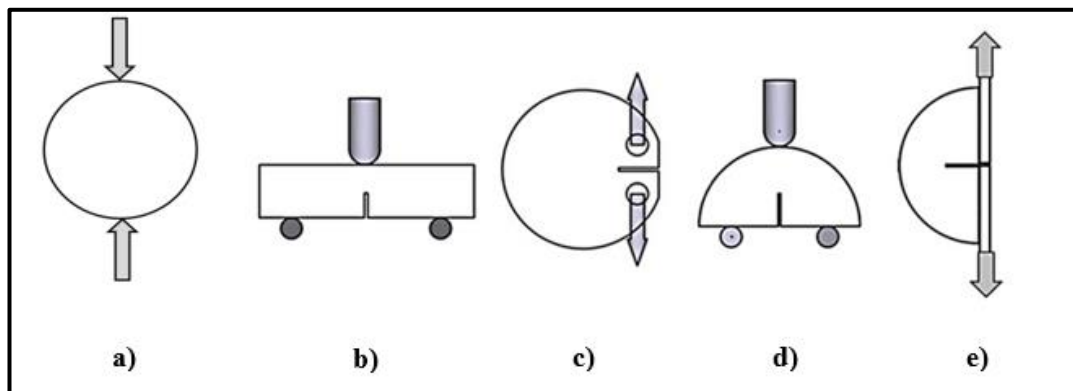


Figura 10. Pruebas para evaluar el agrietamiento en mezclas asfálticas

En la década de 1990 en los Estados Unidos, la industria del asfalto utilizó una serie de medidas para contrarrestar los ahuellamientos en los pavimentos, entre ellas el uso de asfaltos mejorados con polímeros, granulometrías más gruesas y porcentajes de asfaltos más bajos en la mezcla. Junto a esto ganó terreno el empleo de los materiales

fresados, trayendo como consecuencia problemas de agrietamientos en muchos pavimentos. Esta situación fue el detonante para desarrollar el NCHRP IDEA Project 195 “Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design, Quality Control and Quality”, que finalizó con el desarrollo de la prueba IDEAL de agrietamiento.

La prueba IDEAL es similar a la prueba tradicional de resistencia a la tracción indirecta, variando sustancialmente el tratamiento de la información obtenida, que debe comprender la relación carga versus desplazamiento en el proceso de ensayo. Se aconseja utilizar de 3 a 5 muestras de diámetro 150 mm, altura 62 mm y confeccionadas con 7% de vacíos, a las que se les debe aplicar un envejecimiento a corto plazo.

Este ensayo puede determinar la resistencia al agrietamiento de las mezclas asfálticas por medio de su índice de tolerancia al agrietamiento (CT index), un parámetro basado en la mecánica de fractura. Las pruebas han demostrado que cuanto mayor sea el índice de tolerancia, mejor será la resistencia al agrietamiento. A su vez, se sabe que la prueba IDEAL es sensible al empleo de mezclas procedentes de pavimentos asfálticos recuperados (RAP) y de tejas de asfalto recuperados (RAS). Este innovador ensayo permite tratar la resistencia al agrietamiento de mezclas asfálticas como un proceso rutinario, mejorando en gran medida los ensayos de control de agrietamiento que se utilizan actualmente en la industria del asfalto (Zhou, 2019).

La prueba de agrietamiento IDEAL se realiza cumpliendo las exigencias que se muestran a continuación:

- una velocidad de desplazamiento de 50 mm/min, similar a prueba Marshall,
- temperatura ambiente (25 °C),
- dimensiones similares a las probetas empleadas en la rueda de Hamburgo (150 mm de diámetro y 62 mm de altura con un $7\pm 0,5$ % de vacíos de aire), ya que muchas instituciones de carreteras y la industria del asfalto están familiarizadas con el moldeo de tales muestras,
- Sistema de adquisición de datos que permita obtener la curva carga vs desplazamiento.

Ver en la Figura 11 una imagen de la ejecución de una prueba IDEAL sin el sistema de adquisición de datos.

En general el ensayo cuenta con una serie de características que lo hacen de mucho interés, como son: cabezal de prueba barato, buena sensibilidad para evaluar la fractura en las distintas mezclas, su simplicidad y una buena correlación con los agrietamientos en las vías.



Figura 11. Prueba IDEAL.

Procedimiento para realizar el ensayo

Lo que primero se debe tener en cuenta es que las mezclas deben ser sometidas previamente a un proceso de envejecimiento a corto plazo, siguiendo la normativa AASHTO R30. Es decir, las mezclas fabricadas y compactadas en laboratorio, deben ser envejecidas a 135°C por 4 horas en horno de convección antes de compactarse.

De acuerdo con (Zhou, 2019), para llevar a cabo correctamente la prueba IDEAL se tiene que seguir los siguientes pasos:

1. Moldear de tres a cinco probetas cilíndricas compactados por compactador giratorio, los cuales tengan un porcentaje aproximado de vacíos de aire de un $7\pm 0.5\%$. Y también adicionalmente agregar un envejecimiento a corto antes de compactar la mezcla suelta y finalmente un envejecimiento a largo plazo de ser necesario.
2. Aclimatar en una cámara ambiental las muestra a 25°C, durante un período de tiempo de 2 a 3 horas.

3. Revisar los accesorios, comprobando la limpieza de estos. Para ejecutar el ensayo se coloca y alinea la muestra en el marco de carga, luego se procede a cargar la muestra a una velocidad constante 50 mm/min hasta producir la falla.
4. Registrar los datos y graficar la curva carga (kN) vs desplazamiento (mm) mediante algún procedimiento, durante el desarrollo del ensayo.
5. Obtener el trabajo de fractura (W_f) en Joules ($1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$), calculando el área bajo la curva determinada en el paso anterior.
6. Determinar la energía de fractura mediante la siguiente fórmula:

$$G_f = \frac{W_f}{D \times t} \times 10^6$$

Donde:

- G_f = Energía de fractura (Joules/m²)
- W_f = Trabajo de fractura (Joules)
- D = Diámetro de la muestra o espécimen (mm)
- t = Espesor de la muestra o espécimen (mm)

7. Calcular la pendiente absoluta de la zona tangencial al 75% de la carga máxima posterior al pico (PPP_{75}), o sea, $|m_{75}|$ en N/m. Para ello se determinan en la curva de carga-deformación las cargas post-pico (máxima) y los desplazamientos post-pico al 65, 75 y 85% de la carga máxima (P_{max}), que se expresan de esta forma: cargas (PPP_{65} , PPP_{75} y PPP_{85}), desplazamientos (I_{65} , I_{75} y I_{85}), respectivamente. Ver Figura 11. Se calcula $|m_{75}|$ mediante la siguiente ecuación:

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

8. Determinar finalmente el índice de resistencia al agrietamiento (CTindex) mediante la siguiente fórmula:

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

En la misma 10^6 es un factor de escala.

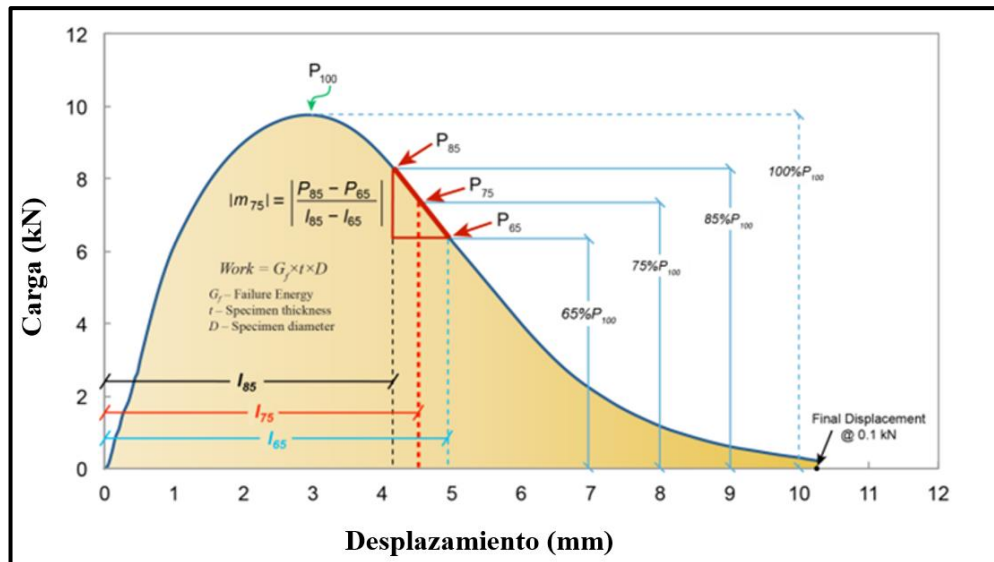


Figura 12. Parámetros de interés para el cálculo del CTindex.

Tomado de “Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design, Quality Control and Quality Assurance” (Zhou, 2019)

2.3 Posibles soluciones para mejorar el comportamiento al agrietamiento.

En las últimas dos décadas, la industria del asfalto y los ingenieros de pavimentos han estado abordando el problema del agrietamiento con vista a mejorar la durabilidad de los pavimentos. Se han manejado diferentes enfoques tanto en el laboratorio como en el campo (Zhou, 2019).

Para mejorar el comportamiento o resistencia ante el agrietamiento del pavimento asfáltico aumentando el CT index, se pueden emplear las siguientes soluciones:

- a) Aumentar el contenido de asfalto.
- b) Emplear rejuvenecedores.
- c) Utilizar asfaltos modificados con polímeros.
- d) Reducir el monto de RAP (pavimento asfáltico recuperado) en la mezcla
- e) Utilizar WMA (mezclas asfálticas tibias).
- f) Añadir fibras.
- g) Utilizar áridos poco absorbentes.
- h) Cambiar la fuente de procedencia del asfalto.

Más elementos al respecto se dan a continuación:

a) Aumentar el contenido de asfalto

Evidentemente trabajar con mezclas donde el contenido de asfalto sea alto, podrá traer una mejoría en su respuesta a la fractura. Este sería el caso de mezcla de gradación más fina o mezclas que requieran menos energía de compactación debido a que el tráfico esperado no sea pesado. En Ecuador, en especial en las regiones costera y amazónica, este tipo de solución no es recomendable, ya que las altas temperaturas prevalentes crearían potenciales problemas de deformaciones plásticas en la superficie de los pavimentos.

b) Emplear rejuvenecedores

Los rejuvenecedores son tipos de aceites que actúan con las fracciones de resinas y aromáticos de asfalto envejecido, aumentando su contenido para buscar el equilibrio inicial de los componentes del asfalto. De esta manera se recupera la flexibilidad del asfalto envejecido.

El rejuvenecedor como modificador en mezclas asfálticas es un aditivo que se encarga de aportar al asfalto viejo los componentes perdidos para que recupere sus propiedades originales, además de crear un reordenamiento en el asfalto, reduciendo la permeabilidad al agua y al aire (Sanabria, 2000).

Dado los problemas de envejecimiento prematuro que presentan los asfaltos producidos en la Refinería de Esmeraldas (Vila, 2005; Mera, Jaramillo, Icaza, García, & Vila, 2019; Vila, García, Jaramillo, Pinargote, & Ramos, 2019), ampliamente utilizados en Ecuador, el empleo de rejuvenecedores sería una alternativa posible a estudiar.

c) Utilizar asfaltos modificados con polímeros

Este método puede mejorar significativamente la calidad del asfalto para mejorar ciertos comportamientos, donde puede estar el agrietamiento. El término "polímero" simplemente se refiere a moléculas muy grandes constituidas al hacer reaccionar químicamente muchas moléculas pequeñas (monómeros) para producir cadenas largas. Cuando se agregan polímeros al asfalto, las propiedades del cemento asfáltico modificado dependen de varias cosas: las características particulares del polímero y

del asfalto, las condiciones del mezclado y la compatibilidad del polímero con el asfalto.

Como modificadores de asfaltos los polímeros tienden a agruparse como: elastómeros y plastómeros. Los elastómeros se pueden alargar y por su elasticidad recobran su forma (Ejemplo: SBS). Los plastómeros forman una red rígida tridimensional que aportan resistencia para resistir cargas pesadas, pero se fracturan con facilidad cuando son deformados (Ejemplo: EVA). Sin dudas, el empleo de polímeros es una alternativa interesante a estudiar.

d) Reducir el monto de RAP en las mezclas

Los denominados RAP (pavimentos asfálticos recuperados) son obtenidos mediante el empleo de fresadoras en ciertas obras de rehabilitación de pavimentos flexibles. En la actualidad, estos materiales se emplean en porcentajes variables, como parte de las mezclas calientes en muchos países. Ya que el RAP debe estar constituido por agregados de buena calidad más un asfalto envejecido, la reutilización de este recurso puede ser muy valiosa desde el punto de vista económico y ambiental. Notar que el asfalto envejecido puede corregirse.

En general en nuestro país no se ha aprovechado este recurso. El RAP se ha utilizado puntualmente tan solo como base de agregados y en pocas obras para mezcla reciclada en frío. Todo su potencial de empleo en mezclas calientes queda pendiente.

e) Utilizar WMA (mezclas tibias)

Warm Mix Asphalt (WMA) es el término genérico para una variedad de tecnologías que permiten la producción de mezclas asfálticas con temperaturas más bajas para su mezclado y colocación en la carretera. Es una tecnología probada que puede: reducir los costos de pavimentación, mejorar la compactación de la mezcla, permitir que la mezcla sea transportada a distancias más largas y mejorar las condiciones de trabajo al reducir la exposición a las emisiones de combustible, humos y olores.

Los métodos de producción de WMA usan temperaturas hasta 50°C más bajas que la mezcla caliente tradicional. Debido a que se consume menos energía para producir la mezcla asfáltica, se necesitará menos combustible. Estas tecnologías se basan en

reducir la viscosidad del aglomerante asfáltico para que los agregados puedan recubrirse a temperaturas más bajas. La clave es la adición de aditivos (a base de agua, orgánicos, químicos o híbridos) a la mezcla asfáltica.

f) Añadir fibras

En general es aceptado que las mezclas asfálticas son fuertes bajo compresión y débiles bajo tracción. La adición de fibras con alta resistencia a la tracción puede ayudar a incrementar dicha resistencia en la mezcla. Para transferir los esfuerzos a la fibra deberá existir una muy buena adhesión entre la fibra y el ligante asfáltico, además de una dispersión uniforme de la fibra en la mezcla.

Muchos tipos y formas de fibras han sido utilizadas, tanto experimentalmente como en la práctica. Fibras de celulosas, minerales y polímeros han sido las más frecuentes. Si bien las fibras de celulosa tienden a ser ramificadas y con bastante absorción de asfalto, lo que la hace adecuada para mezclas SMA (Stone Mastic Asphalt), las de polímeros presentan una gran variedad de tipos: poliéster, polipropileno, aramida y aramida-polioléfina (polipropileno), entre otras. Las fibras de polímeros en general presentan buena resistencia tanto al agrietamiento como a las deformaciones o ahuellamientos. Por esta razón, estudiar su posible uso en nuestras mezclas es conveniente.

g) Utilizar áridos menos absorbentes

En la provincia Guayas la mayor parte de los áridos son poco absorbentes en general, salvo los agregados procedentes de la cantera de Durán, con valores que pueden estar alrededor del 5% de absorción en agua. Además, en el país es bastante común el empleo de materiales aluviales (cantos rodados) triturados de baja absorción. Por estas razones, no se analizará esta solución en nuestro trabajo.

h) Cambiar la fuente de ligante

En Ecuador todo el asfalto empleado en obras de vialidad procede de la Refinería de Esmeraldas, clasificado como AC 20. Por tal motivo, en la práctica es improcedente analizar esta posible solución.

2.4 Precisiones sobre las soluciones escogidas

Emplear rejuvenecedores

Se empleará el aditivo rejuvenecedor SYLVAROAD RP1000 producido por KRATON, que es un aditivo líquido que moviliza el aglutinante envejecido del pavimento asfáltico recuperado (RAP) utilizado en mezclas asfálticas para pavimentación. Esto mejora la flexibilidad, lo que mejora la resistencia al agrietamiento, permitiendo el empleo de mayores cantidades de RAP en una mezcla asfáltica. Debe notarse que el aumento del contenido de RAP reduce el consumo de material virgen y de asfalto en la fabricación de mezclas, decreciendo la “huella de carbono”. Este aditivo es derivado del Crude Tall Oil (CTO), una materia prima renovable que es un subproducto de la industria del papel. Así, este aditivo de base biológica hace un uso eficaz de los recursos existentes para garantizar que la construcción de carreteras sea más segura y sostenible. Ver Figura 13.



Figura 13. Kraton Sylvaroad RP1000 empleado.

Menos de un kilogramo de SYLVAROAD™ RP1000 se necesita por tonelada de asfalto para restaurar las propiedades originales y satisfacer las necesidades más exigentes requeridas en el pavimento para evitar la formación de surcos y agrietamiento. La sensibilidad al agua se restaura también al nivel de una nueva

mezcla, lo que es particularmente relevante para capas de rodadura. El aditivo mejora el comportamiento a las bajas temperaturas en capas superficiales sin comprometer el comportamiento a altas temperaturas. El producto también recupera la resistencia a la fatiga para capas base mientras mantiene un adecuado módulo. Algunas investigaciones muestran este adecuado comportamiento (Lu & Saleh, 2017).

No obstante, es importante señalar que el gran objetivo de nuestra investigación no se dirige al empleo de RAP como parte componente de las mezclas calientes, sino a contrarrestar el envejecimiento prematuro que se presenta en nuestros asfaltos. Por esta razón, en el proceso de mezclado el rejuvenecedor, dosificado con un porcentaje en peso de 2,5% (valor obtenido en investigaciones precedentes), se añade directamente y se mezcla con el asfalto calentado a 150°C. De esta forma se alcanzan valores reducidos de viscosidad y ductilidad en el residuo de la prueba de película delgada, que permiten el adecuado desempeño de la mezcla (Vila, Mera, & Jaramillo, 2021).

Utilizar asfaltos modificados con polímeros

Fue seleccionado el polímero denominado Elvaloy 4170, que es un terpolímero elastomérico reactivo (RET) que se puede utilizar para modificar las propiedades del ligante asfáltico utilizado en pavimentación. Su composición química es glicidil metacrilato de etileno. Es efectivo cuando se usa con una amplia gama de asfaltos en dosificaciones tan bajas como 0,5 % y rara vez por encima del 2,5 %. El asfalto modificado con polímeros resultante es muy estable y se puede almacenar durante periodos de tiempo prolongados.

El asfalto modificado con polímeros nos fue suministrado por la empresa EMULDEC, siendo este un AC 20 de la Refinería de Esmeraldas mezclado con 1.3% en peso de Elvaloy 4170. Ver Figura 14.



Figura 14. Recipiente con asfalto modificado por EMULDEC.

Existen algunas experiencias internacionales que muestran las bondades del Elvaloy 4170 para mejorar tanto la resistencia al agrietamiento como a las deformaciones en las capas asfálticas, lo que permite prolongar la vida útil del pavimento (Keyf, Ismail, & Çorbacioğlu, 2007; Vachhani & Mishra, 2014).

Adición de fibras

Como aditivo a la mezcla se agregó una fibra sintética denominada FORTA-FI que se compone principalmente por aramida y poliolefina. Esta se muestra en la Figura 15. Son fibras químicamente inertes, que se mezclan de forma rápida y se distribuyen uniformemente en las mezclas asfálticas.

Estas fibras presentan una alta resistencia a la tracción y han sido formuladas para reforzar la mezcla asfáltica, ayudando a controlar y reducir su agrietamiento, como han demostrado algunos investigadores (Villa, S., & Martínez, 2019). También se ha comprobado que mejora el comportamiento ante las deformaciones plásticas. Es decir, que este producto permite mejorar la durabilidad del pavimento, disminuyendo las labores de mantenimiento y las inversiones en las obras viales.



Figura 15. Fibras FORTA.

Capítulo III

3. Trabajo experimental

3.1 Características de la mezcla patrón a emplear.

3.1.1 Generalidades

En el presente trabajo se evaluará la incidencia en el comportamiento de una mezcla asfáltica, de las diferentes soluciones propuestas, es decir, empleando rejuvenecedores, polímeros y fibras, con la finalidad de encontrar una óptima solución para mejorar el índice de tolerancia al agrietamiento, utilizando la prueba IDEAL. Para una buena comprensión de los resultados que se vayan a obtener se debe partir de una mezcla patrón o de referencia, es decir, una mezcla conocida a la cual no se le añade ningún tipo de modificador. El diseño de la mezcla patrón se lo realiza por la metodología Marshall, tomando en cuenta parámetros volumétricos y resistentes. La mezcla de referencia está constituida por agregados minerales basálticos, adquiridos de la planta de asfalto de la empresa Hidalgo e Hidalgo S.A., como se exhibe en la Figura 16. El tipo de asfalto utilizado es un AC-20 producido por la Refinería de Esmeraldas, asfalto utilizado generalmente en Ecuador.



Figura 16. Materiales para el diseño de la mezcla asfáltica

3.1.2 Diseño de la mezcla

Para este estudio se empleó el diseño de mezcla asfáltica utilizado por la empresa Hidalgo e Hidalgo S.A. en su planta Chivería. Las mezclas asfálticas se confeccionaron en el Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil y están conformadas por tres agregados diferentes, que son: piedra de 19mm (Agregado 1), piedra de 9,5 mm más cisco o fracción 10-0 mm (Agregado 2) y arena de río (Agregado 3).

Para cumplir con las especificaciones granulométricas establecidas por el (MOP, 2002) para mezclas asfálticas, se tomó en cuenta la mezcla de tamaño máximo nominal, TM, de 12,5 mm (1/2 pulgada) y se corroboró la granulometría de agregados como se observa en la Figura 17. Con dichas granulometrías se ajustó una dosificación para cumplir la exigencia para el TM seleccionado. Ver Tabla 4.



Figura 17. Pruebas de granulometría a los agregados.

Tabla 4. Granulometría combinada para la mezcla.

ABERTURA DE TAMIQUES		AG 1	AG 2	AG 3	AG 1	AG 2	AG 3	GRANUL. COMBINADA	ESPE C. 1/2" MOP 2002	
No.	mm	100	100	100	20,0	75,0	5,0		Mínimo	Máximo
3/4"	19,00	100,0	100,0	100,0	20,0	75,0	5,0	100,0	100	100
1/2"	12,70	72,5	100,0	100,0	14,5	75,0	5,0	94,5	90	100
3/8"	9,50	32,1	100,0	100,0	6,4	75,0	5,0	86,4		
# 4	4,75	0,2	83,5	99,2	0,0	62,6	5,0	67,6	44	74
# 8	2,36	0,2	58,3	97,9	0,0	43,7	4,9	48,7	28	58
# 16	1,19	0,2	42,0	95,4	0,0	31,5	4,8	36,4		
# 30	0,59	0,2	29,0	83,6	0,0	21,7	4,2	26,0		
# 50	0,30	0,2	17,6	32,0	0,0	13,2	1,6	14,8	5	21
# 100	0,15	0,2	9,1	3,5	0,0	6,9	0,2	7,1		
# 200	0,10	0,1	4,9	0,7	0,0	3,7	0,0	3,7	2	10

La dosificación de agregados a emplear se muestra a continuación en la Tabla 5 y es coincidente con el diseño original.

Tabla 5. Dosificación de agregados minerales.

# AGREGADO	TIPO :	CANTERA:	DOSIF:
AGREGADO 1 :	PIEDRA 3/4"	CHIVERÍA	20
AGREGADO 2 :	CISCO (3/8")	CHIVERÍA	75
AGREGADO 3 :	ARENA	LAUREL	5
TOTAL DE AGREGADOS:			100

En la Figura 18 se grafica la curva de abertura del tamiz vs porcentaje del material pasado donde las líneas de color rojo representan los valores mínimos y máximos establecidos por la MOP 2002 para el TM de 12,5 mm, mientras que la línea azul representa los valores de la granulometría combinada, considerando la dosificación de: 20% de piedra 19 mm, 75% de cisco y 5% de arena. Se pueden observar que los valores alcanzados se mantienen dentro de las exigencias, por tanto, se cuenta con una granulometría combinada adecuada.

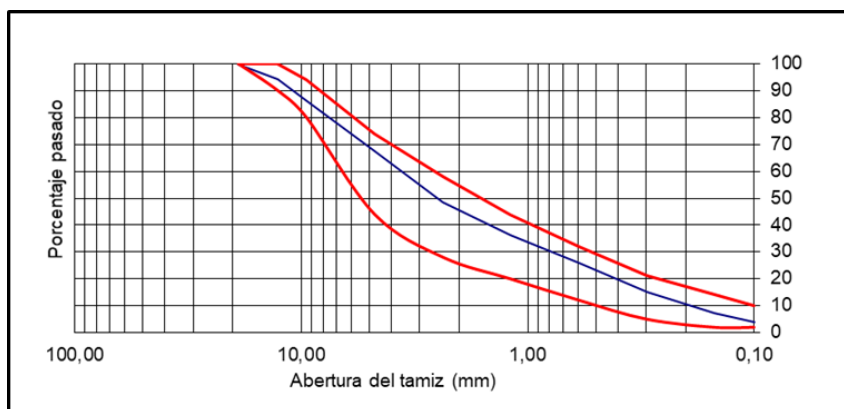


Figura 18. Granulometría seleccionada.

Luego de ser comprobada la granulometría, se preparó una cierta cantidad de mezcla con la dosificación de agregados ya mostrada y con 5.9% en peso de cemento asfáltico. Con ella se procedió a realizar la prueba RICE para determinar la gravedad específica máxima (Gmm). Ver Tabla 6.

Tabla 6. Resultados de la prueba RICE.

A: PESO DEL FRASCO + AGUA	6620,5 gr
B: PESO DEL FRASCO + AGUA + MATERIAL	7335,7 gr
C: PESO DE LA MEZCLA SUELTA	1168,3 gr
Gmm = C / [A - (B - C)]	
Gmm	2,578

Con el Gmm obtenido y mediante relaciones peso-volumen, se puede calcular con exactitud el peso total necesario de mezcla para que una probeta cilíndrica obtenida en el compactador giratorio, con diámetro de 150 mm y altura de 62 mm, alcance un porcentaje de vacíos de 7%, tal como lo exige la prueba IDEAL. Con dicho peso se pueden calcular entonces los pesos correspondientes a cada material constitutivo de la mezcla. Esta información se muestra resumida en la Tabla 7.

Tabla 7. Obtención de los pesos a emplear para cada probeta compactada.

NO.	PROPIEDAD	VALOR	CÁLCULO
1	Gmm:	2,578	
2	Gmb (93% Gmm):	2,398	(2)=(1) x 0,93
3	Volumen probeta (cm ³):	1095,6	(3)=(3,1416 x (15 ²)/4) x 6,2
4	Peso probeta (g):	2627,3	(4)=(3) x (2)
5	Peso de asfalto/probeta	155,0	(5)=(4) x 0,059
6	Peso total de agregados/probeta	2472,3	(6)=(4) - (5)
7	Peso de agregado 19 mm/probeta	494,5	(7)=(6) * 0,20
8	Peso de agregado 9,5 mm/probeta	1854,2	(8)=(6) * 0,75
9	Peso de arena/probeta	123,6	(9)=(6) * 0,05

1.1.3. Observaciones sobre los asfaltos empleados.

Como ya se ha expresado, en el trabajo se utilizarán asfaltos con ciertas modificaciones como parte de las soluciones previstas. Para la mezcla patrón o de referencia y la mezcla con fibras se empleará el AC 20 de Esmeraldas sin modificar, pero también se confeccionarán mezclas con este asfalto mejorado con rejuvenecedores y también modificado con polímeros. Los resultados de las diferentes pruebas realizadas a los mismos se muestran en las tablas 8 y 9. Para la Tabla 8 se consideraron los criterios de la normativa INEN 2515, Enmienda 1, de clasificación de asfaltos por viscosidad, vigente en el Ecuador.

Tabla 8. Resultados de las pruebas al asfalto sin modificar y con rejuvenecedor.

PROPIEDAD	UNIDAD	MÉTODO	EXIGENCIAS INEN		CEMENTO ASFÁLTICO	CA + REJUVENECEDOR
			AC-20	AC-30		
LIGANTE ORIGINAL						
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa.s	ASTM D 2171	200 ± 40	300 ± 60	255	100
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm ² /s	ASTM D 2170	300 mín	350 mín	367,5	277
Punto de inflamación Cleveland	°C	NTE INEN 808	232 mín	232 mín	290	305
Solubilidad en tricloroetileno	%	NTE INEN 915	99,0 mín	99,0 mín	NO	NO
Gravedad específica 25°C/25°C		ASTM D 70	Informar	Informar	1,013	1,011
Penetración, 25 °C, 100 g, 5 s	0,1 mm	ASTM D-5			64	100
Punto de ablandamiento	°C	ASTM D-36			49,5	47,0
Índice de penetración		ASTM D 5/D5M	-1.5 a +1.0	-1.5 a +1.0	-0,7	-0,2
RESIDUO RTFOT (163°C, 85 min)						
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa.s	ASTM D 2171	800 máx	1200 máx	1350	716
Cambio de masa	% w/w	ASTM D 2872	1.0 máx	1.0 máx	0,049	0,063
Ductilidad 25°C, 5 cm/min	cm	NTE INEN 916	50 mín	40 mín	30	55,5

Puede apreciarse en la Tabla 8 que el cemento asfáltico procedente de Esmeraldas presenta algunas insuficiencias, en especial en el residuo RTFOT, que simula el cambio debido al proceso de mezclado en planta del asfalto con los agregados y la transportación y puesta en obra de la mezcla. Notar que la condición del residuo es la real con la cual la mezcla en obra comienza su vida útil. A nivel de laboratorio esto se logra con el envejecimiento a corto plazo en el horno. Por esta razón se decidió emplear como posible solución el asfalto con rejuvenecedor. Puede verse en dicha Tabla 8 la gran mejoría del asfalto con el rejuvenecedor.

Tabla 9. Resultados de las pruebas al asfalto mejorado con polímeros.

PROPIEDAD	UNIDAD	MÉTODO	EXIGENCIAS ASTM D5976		CA + POLÍMERO
			MÍN	MÁX	
Penetración, 25 °C, 100 g, 5 s	0,1 mm	ASTM D-5	40	75	51
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa.s	ASTM D 2171	500		12130
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm ² /s	ASTM D 2170		5000	2426
Punto de inflamación Cleveland	°C	NTE INEN 808	232		282
Gravedad específica 25°C/25°C		ASTM D 70	Informar	Informar	1,010
RESIDUO RTFOT (163°C, 85 min)					
Recuperación elástica, 25 °C, 10 cm elongación	%	ASTM D 6084	60 mín		75
Penetración, 4 °C, 200 g, 60 s	0,1 mm	ASTM D-5	10 mín		26

La exigencia empleada en la Tabla 9, recogida en la norma ASTM D5976 para asfaltos modificados Tipo 1 Designación I-D, corresponde a varios tipos de elastómeros en especial de la familia de estirenos-butadienos. Ya que el producto Elvaloy 4170 se ha comparado por su efectividad con el SBS empleando menores dosificaciones, se decidió emplear esa exigencia.

3.2 Proceso de envejecimiento aplicado.

3.2.1 Acondicionamiento de mezclas para el envejecimiento a corto plazo.

El acondicionamiento a corto plazo para la mezcla asfáltica se aplica a la mezcla suelta preparada en laboratorio. La mezcla suelta se coloca en una bandeja, formando una capa de pequeño espesor, y luego a un horno de convección durante 4 horas \pm 5 minutos a una temperatura de $135 \pm 3^{\circ}\text{C}$. Las 24 probetas preparadas pasaron por este envejecimiento a corto plazo. Ver Figura 19.



Figura 19. Muestras de la mezcla patrón para envejecimiento a corto plazo.

3.2.2 Acondicionamiento de mezclas para el envejecimiento a largo plazo.

Una vez realizado el envejecimiento a corto plazo se procede a la confección de las probetas en el compactador giratorio. Luego se realiza el envejecimiento a largo plazo en 3 probetas de las 6 previstas para cada variante de análisis, o sea, 12 muestras en total. Se ingresan los especímenes cilíndricos en el horno de convección durante 5 días a una temperatura de $85 \pm 3^{\circ}\text{C}$. Ver Figura 20.



Figura 20. Horno de convección empleado para envejecimiento a largo plazo.

3.3 Proceso de confección de especímenes en el compactador giratorio Superpave.

1.3.1. Generalidades.

Los especímenes cilíndricos que se van a confeccionar para este trabajo de titulación son en total 28, ya que, se dividen en 4 juegos de 6 probetas más 1 probeta adicional por si ocurre algún problema o imprevisto durante los ensayos. El primer juego corresponde a la mezcla patrón, como se muestra en la Figura 21; el segundo juego corresponde a la mezcla con rejuvenecedores, en la Figura 22; el tercer juego corresponde a la mezcla con polímeros, en Figura 23; por último, el cuarto juego, que corresponde a la mezcla con fibras, en la Figura 24.



Figura 21. Juego de probetas - Mezcla Patrón.



Figura 22. Juego de probetas - Rejuvenecedores.

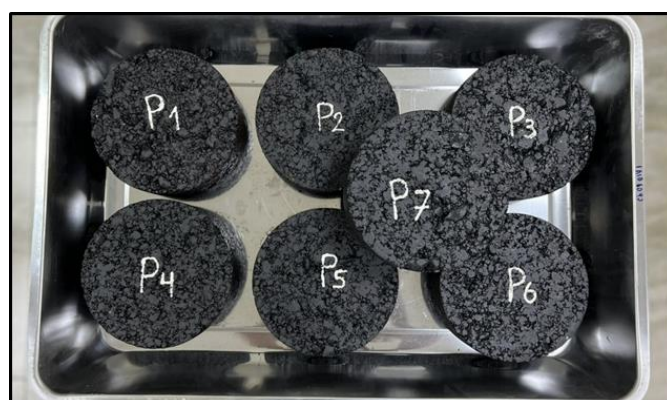


Figura 23. Juego de Probetas - Polímeros.

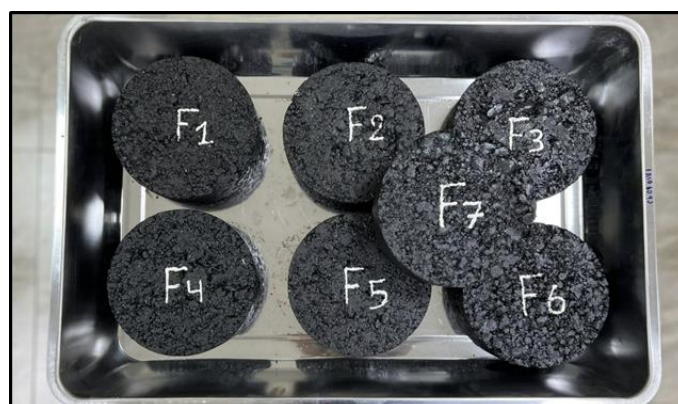


Figura 24. Juego de Probetas - Fibras.

A continuación, se detalla el proceso de confección para cada juego de probetas cilíndricas.

1.3.2. Mezcla Patrón.

1. Se pesan las distintas fracciones de los agregados para alcanzar la granulometría deseada, como se muestra en la Figura 25.



Figura 25. Pesaje de los distintos agregados minerales.

2. Posteriormente, se coloca la bandeja con los agregados combinados pesados en un horno, por un tiempo de 24 horas a 110 °C y luego se incrementa la temperatura a 150 °C durante 4 horas. Ver Figura 26.



Figura 26. Colocación de los agregados en el horno de convección.

3. Se calienta el cemento asfáltico a una temperatura de 150 °C. Ver Figura 27.



Figura 27. Calentando el cemento asfáltico.

4. Se mezclan manualmente los agregados minerales y la cantidad de asfalto determinada de acuerdo con la dosificación correspondiente, para cada probeta por separado, procurando que la mezcla sea lo más homogénea posible. Ver Figura 28.



Figura 28. Proceso de mezcla de los agregados minerales y el asfalto.

5. Una vez realizada la mezcla se coloca en el horno de convección durante 4 horas a 135 °C para cumplir con el envejecimiento a corto plazo. Ver Figura 29.



Figura 29. Colocación de la mezcla en horno para envejecimiento a corto plazo.

6. Se procede a colocar la mezcla suelta a 135 °C en el molde del compactador giratorio, también calentado a dicha temperatura, después de engrasar el equipo. Ver Figura 30.



Figura 30. Colocación de la mezcla en el molde.

7. Luego, se coloca el molde en el compactador giratorio y seguidamente se lo asegura. Ver Figura 31.



Figura 31. Colocación del molde en el compactador giratorio.

- Se programa el equipo para que las probetas obtengan una altura de 62 mm como especifica la Prueba IDEAL. Ver Figura 32.



Figura 32. Programación del compactador giratorio.

- Se extrae la probeta compactada con envejecimiento a corto plazo. Ver Figura 33.



Figura 33. Extracción de la probeta cilíndrica.

- Finalmente, para realizar el envejecimiento a largo plazo se dejan las probetas seleccionadas durante 5 días a 85°C. Ver Figura 34.



Figura 34. Probetas envejecidas a largo plazo.

1.3.3. Rejuvenecedores.

Para la preparación de los especímenes cilíndricos con asfaltos mejorados con 2,5% en peso de rejuvenecedores, se siguen los mismos pasos mencionados anteriormente, con la diferencia que en el Paso 4 el cemento asfáltico se mezcla previamente con el rejuvenecedor. Para confeccionar 7 probetas se necesitan un total de 1085 g, por lo que se decidió preparar 1200 g por las pérdidas en su manejo. Para ello se mezclaron 1170 g del cemento asfáltico muestreado para este estudio, con 30 g del rejuvenecedor.

Se calentó tanto el asfalto como el rejuvenecedor a una temperatura entre 145°C-150°C, añadiéndose luego al asfalto la cantidad respectiva de rejuvenecedor, mezclándose durante 15 minutos ambos, manteniendo una temperatura constante de 150°C.

1.3.4. Polímeros.

Para la confección de las probetas utilizando asfalto con polímeros, se mantienen los mismos pasos que en la mezcla patrón, ya que la empresa EMULDEC CIA. LTDA nos facilitó 1 galón de su asfalto modificado con polímeros, así como las características de este. Por esa razón, en el Paso 4 se calentó todo el envase suministrado por esa empresa y se colocó la cantidad de asfalto según la dosificación única empleada para la mezcla.

Es importante destacar que para las mezclas con polímeros la temperatura de mezclado con los agregados, Paso 5, y de compactación, Paso 7, fueron 10°C por encima de las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla patrón.

1.3.5. Fibras.

Para la preparación de las mezclas con adición de fibras, si bien en general se sigue el mismo procedimiento que en la mezcla patrón, debe considerarse que en el Paso 5 se deben agregar las fibras de acuerdo con la dosificación establecida por el suministrador del producto. La misma que corresponde a 0,5 kg de fibra por 1000 kg de mezcla a producir. Ya que el peso de cada probeta es de 2,627 kg, esto implica que se deben agregar tan solo 1,3 g para cada una. La adición de fibra se realiza cuidadosamente sobre los agregados calientes y luego de un mezclado inicial se añade el asfalto y se continúa el proceso. Ver Figura 35.



Figura 35. Fibra FORTA FI y su adición a los agregados.

3.4 Precisiones sobre el desarrollo en particular de la prueba IDEAL.

Después del envejecimiento realizado a cada probeta, ya sea a corto o largo plazo, se procede a ejecutar la prueba IDEAL. Para ello se sitúan las muestras en la cámara térmica del equipo NAT a la temperatura de 25 °C por unas 3 horas. Una vez climatizadas las probetas se procede a realizar las pruebas en la prensa con velocidad de desplazamiento de 50 mm/minuto, empleando el cabezal de tracción indirecta para diámetro de 150 mm. A continuación, se muestra el ensayo en la Figura 36.



Figura 36. Dispositivos para prueba IDEAL.

Como ya se ha dicho, el principio de la prueba IDEAL se basa en la curva carga vs deformación, por lo que para obtener esa curva existen diversos sistemas de adquisición directa de esos datos. Sin embargo, al no contar con alguno de esos sistemas, se procede a filmar el ensayo con una cámara de video, como se observa en la Figura 37.



Figura 37. Cámara empleada para filmar el ensayo.

Con las imágenes captadas se obtienen los tiempos de aplicación de la carga, lo que está vinculado a la velocidad de desplazamiento de 50 mm/min, mientras que el dial del anillo dinamométrico permite calcular los valores de la carga. A partir de la

obtención de esos valores y utilizando una hoja de EXCEL, se procesan los datos de tiempo (cada 0,25 segundo aproximadamente) y las lecturas del dial correspondientes, para determinar la curva de carga versus desplazamiento, así como facilitar el cálculo del CT index. Ver en la Tabla 10 el procesamiento correspondiente a la Probeta 3 utilizando asfalto con rejuvenecedor, luego del envejecimiento a largo plazo, que ese tomará como ejemplo.

Tabla 10. Detalle de hoja EXCEL para el procesamiento de la información.

Tiempo (s)	Desp. vertical (mm)	Desp. correg. (mm)	Lect. Anillo (mm)	Lect. Correg. (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)
16,00	13,33	0,0	0	0	0	0,0
16,25	13,5	0,2	0,006	4,7	52	0,2
16,50	13,7	0,4	0,026	20,5	204	0,9
16,75	14,0	0,6	0,055	43,3	424	1,9
17,00	14,2	0,8	0,083	65,4	636	2,8
17,25	14,4	1,0	0,113	89,0	864	3,8
17,50	14,6	1,2	0,134	105,5	1023	4,6
17,75	14,8	1,5	0,153	120,5	1167	5,2
18,00	15,0	1,7	0,173	136,2	1319	5,9
18,25	15,2	1,9	0,191	150,4	1456	6,5
18,50	15,4	2,1	0,205	161,4	1562	6,9
18,75	15,6	2,3	0,215	169,3	1638	7,3
19,00	15,8	2,5	0,226	178,0	1721	7,7
19,25	16,0	2,7	0,234	184,3	1782	7,9
19,50	16,2	2,9	0,24	189,0	1827	8,1
19,75	16,5	3,1	0,245	192,9	1865	8,3
20,00	16,7	3,3	0,246	193,7	1873	8,3
20,25	16,9	3,5	0,245	192,9	1865	8,3
20,50	17,1	3,7	0,242	190,6	1842	8,2
20,75	17,3	4,0	0,232	182,7	1766	7,9
21,00	17,5	4,2	0,218	171,7	1660	7,4
21,25	17,7	4,4	0,201	158,3	1531	6,8
21,50	17,9	4,6	0,186	146,5	1418	6,3
21,75	18,1	4,8	0,175	137,8	1334	5,9
22,00	18,3	5,0	0,163	128,3	1243,2	5,5
22,25	18,5	5,2	0,151	118,9	1152,2	5,1
22,50	18,7	5,4	0,139	109,4	1061,1	4,7
22,75	19,0	5,6	0,128	100,8	977,7	4,3
23,00	19,2	5,8	0,115	90,6	879,1	3,9
23,25	19,4	6,0	0,106	83,5	810,9	3,6
23,50	19,6	6,2	0,096	75,6	735,0	3,3
23,75	19,8	6,5	0,086	67,7	659,2	2,9
24,00	20,0	6,7	0,076	59,8	583,4	2,6
24,25	20,2	6,9	0,068	53,5	522,7	2,3
24,50	20,4	7,1	0,06	47,2	462,0	2,1
24,75	20,6	7,3	0,05	39,4	386,2	1,7
25,00	20,8	7,5	0,043	33,9	333,1	1,5
25,25	21,0	7,7	0,035	27,6	272,4	1,2
25,50	21,2	7,9	0,027	21,3	211,7	0,9
25,75	21,4	8,1	0,022	17,3	173,8	0,8
26,00	21,7	8,3	0,02	15,7	158,7	0,7
26,25	21,9	8,5	0,017	13,4	135,9	0,6
26,50	22,1	8,7	0,016	12,6	128,3	0,6
26,75	22,3	9,0	0,012	9,4	98,0	0,4
27,00	22,5	9,2	0,011	8,7	90,4	0,4
27,25	22,7	9,4	0,007	5,5	60,1	0,3
27,50	22,9	9,6	0,006	4,7	52,5	0,2
27,75	23,1	9,8	0,005	3,9	44,9	0,2
28,00	23,3	10,0	0,002	1,6	22,1	0,1
28,25	23,5	10,2	0,002	1,6	22,1	0,1
28,50	23,7	10,4	0,001	0,8	14,6	0,1
28,75	23,9	10,6	0,001	0,8	14,6	0,1

Las columnas 1 y 4 corresponden a los datos obtenidos a partir del video. El primer valor de la Columna 1 corresponde al tiempo en que comienza a generarse la carga

con lectura del anillo dinamométrico cero. Después se procesan los valores a partir de cada 0,25 segundo con su respectiva lectura de dial. La Columna 2 muestra el desplazamiento vertical en milímetros registrados a partir de la velocidad de la prensa, que es de 0,833 mm por cada segundo. En la Columna 3 se ajusta la información de la Columna 2 para considerar que el desplazamiento comienza en cero.

Los datos de la Columna 4 corresponden a la lectura del anillo dinamométrico en milímetros y en la Columna 5 su conversión a pulgadas, ya que el sistema inglés es el empleado en la ecuación de calibración del anillo. En la Columna 6 se presentan los resultados de la carga en libras, procesados de la ecuación de calibración, y en la Columna 7 dichos valores convertidos a kilo Newtons. La información de las columnas 3 y 7 permiten graficar la curva carga versus desplazamiento. Ver Figura 38.

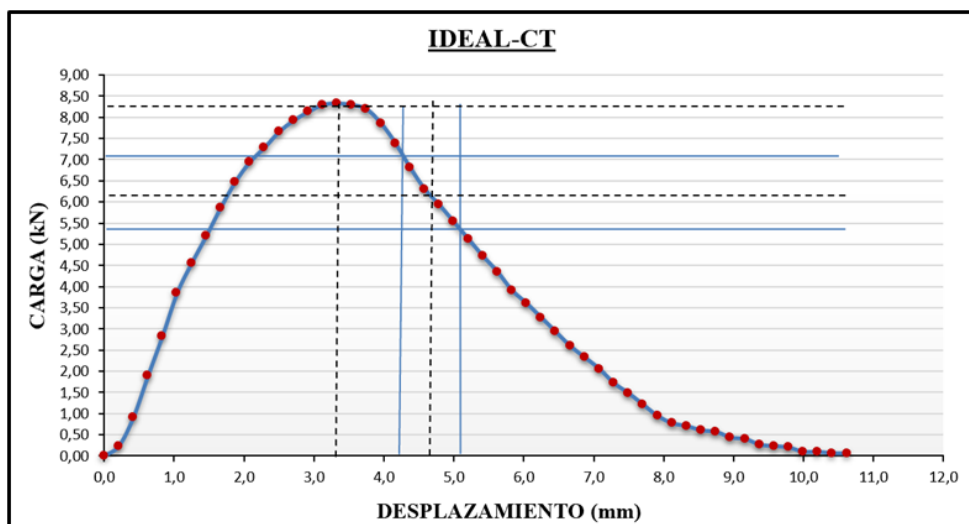


Figura 38. Curva carga vs desplazamiento.

Una vez obtenida la gráfica de carga vs desplazamiento para cada espécimen cilíndrico con su respectivo envejecimiento, se calculan los parámetros para encontrar el CT-Index (índice de tolerancia al agrietamiento). Ver Tabla 11.

Tabla 11. Determinación del CT index.

Wf (Joules)	39,0	
D (mm)	150	
t (mm)	62	
Gf (Joules/m²)	4196	
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,3	8,3
P85	4,2	7,1
P65	5,1	5,4
P75	4,7	6,2
l75/D	0,031	
m75 (kN/mm)	1,85	
CT index	71,0	

3.5 Análisis de resultados.

En la Tabla 12 aparece un resumen de los resultados de CT index obtenidos para las diferentes alternativas estudiadas. Los resultados promedios también aparecen graficados en la Figura 39.

Tabla 12. Resumen de resultados del CT index.

SOLUCIÓN	MEZCLA PATRÓN		REJUVENECEDOR		POLÍMERO		FIBRAS	
ENVEJEC.	Corto Plazo	Largo plazo	Corto Plazo	Largo plazo	Corto Plazo	Largo plazo	Corto Plazo	Largo plazo
Probeta 1	67,8	47,0	68,8	60,9	38,4	17,3	63,8	50,0
Probeta 2	68,5	65,3	77,1	72,1	26,4	23,9	56,2	56,8
Probeta 3	62,1	57,2	96,7	71,0	29,8	24,7	65,1	53,2
PROMEDIO	66,1	56,5	80,9	68,0	31,5	22,0	61,7	53,3
DES. EST.	3,5	9,2	14,3	6,2	6,2	4,1	4,8	3,4
COEF. VAR.	5,3	16,2	17,7	9,1	19,6	18,5	7,8	6,4

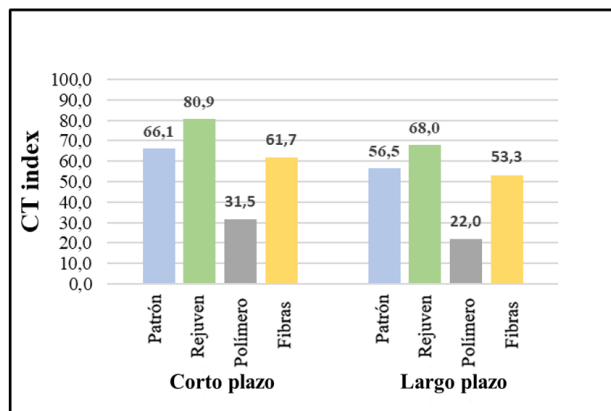


Figura 39. Gráfico de barras con los resultados promedios.

Los resultados muestran que al aumentar el nivel del envejecimiento en todos los casos disminuye el CT index, por lo que la resistencia al agrietamiento de la mezcla disminuye. Esto implicará mayor cantidad de áreas fisuradas en las obras.

De acuerdo a investigaciones norteamericanas sobre la prueba IDEAL (Zhou F. , 2021) son recomendables valores de CT index mayores a 65 en mezclas densas con envejecimiento a corto plazo y a una temperatura de 25°C, como las estudiadas. Partiendo de este criterio puede observarse que la mezcla patrón, que en realidad se produce en planta de manera cotidiana, cumple de manera muy ajustada ese valor, con un promedio de 66,1. Incluso el resultado de la Probeta 3 (62,1) se encuentra por debajo de lo recomendado. La caída en el CT index por el incremento del envejecimiento fue de 9,6. Ver Figura 40.

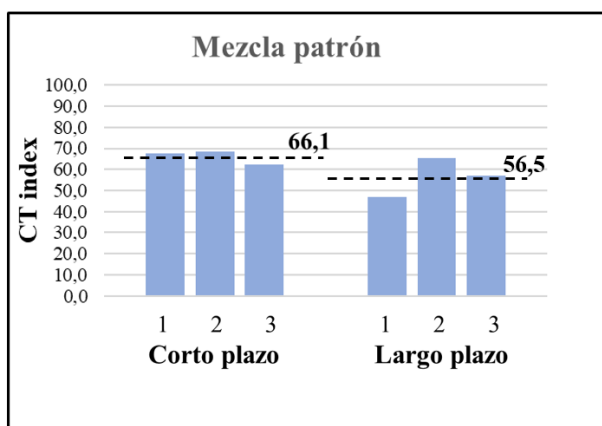


Figura 40. Gráfico de barras para la mezcla patrón.

De las soluciones estudiadas la mayor mejora la produjo el asfalto con rejuvenecedor, con CT index promedio de 80,9 a corto plazo. Notar que incluso con envejecimiento a largo plazo el promedio obtenido cumple la exigencia de valores mayores a 65. Este resultado resalta las potencialidades de emplear esta solución. La caída en el CT index por el incremento del envejecimiento fue de 12,9. Ver Figura 41.

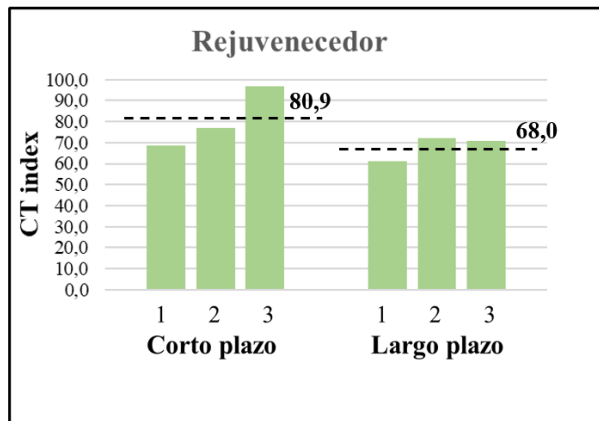


Figura 41. Gráfico de barras para la mezcla con rejuvenecedor.

El empleo del asfalto modificado con polímeros no mostró una mejora ante el agrietamiento, obteniéndose tan solo un CT index de 31,5 a corto plazo y 22,0 a largo plazo. Este mal desempeño a nuestro juicio lo pueden generar las altas temperaturas de calentamiento del asfalto (alrededor de 180°C), usuales para la mezcla con polímeros, más el tiempo de mezclado asociado, vinculado a las insuficiencias de calidad del asfalto procedente de Esmeraldas. La caída en el CT index por el incremento del envejecimiento fue de 9,5. Ver Figura 42.

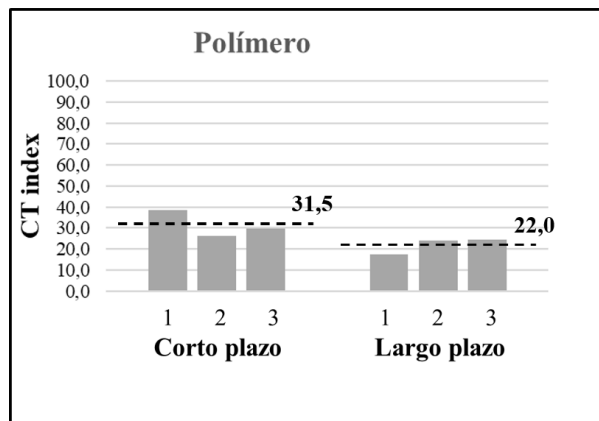


Figura 42. Gráfico de barras para la mezcla con polímero.

Respecto a la utilización de mezclas con adición de fibras su impacto en el CT index no fue significativo, obteniéndose resultados muy cercanos a la mezcla patrón. Esta situación pudo ser generada por el contenido tan bajo de fibras en la dosificación. El

CT index promedio pasó de 61,7 a 53,3 por el incremento del envejecimiento. Una caída de 8,4, la menor variación obtenida en todas las soluciones. Ver Figura 43.

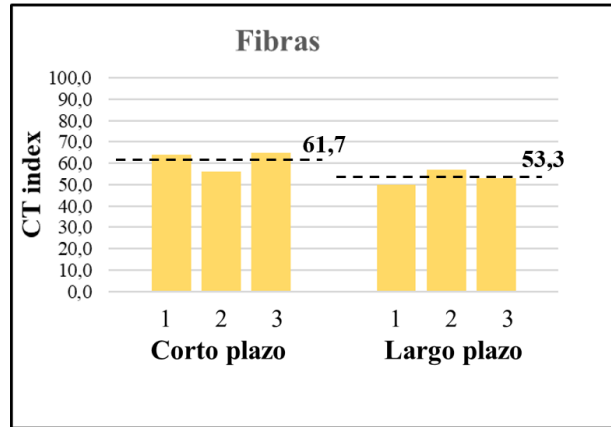


Figura 43. Gráfico de barras para la mezcla con fibras.

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

1. En la medida que aumenta el tiempo de envejecimiento en las mezclas asfálticas los valores de CT index disminuyen, lo que indica una menor resistencia al agrietamiento, aumentando la probabilidad de ocurrencia de fallos asociados a agrietamientos en los pavimentos. Es decir, que el envejecimiento es un fenómeno que impacta con mucha fuerza al agrietamiento.
2. El compactador giratorio Superpave demostró ser una opción muy cómoda y rápida para confeccionar probetas de mezclas asfálticas para la prueba IDEAL. En especial por la posibilidad de manejar relaciones peso-volumen que permiten alcanzar probetas de altura 62 mm con un porcentaje de huecos próximo al 7%.
3. Si bien la mezcla patrón cumple, pero de manera muy ajustada, la exigencia de CT index mayor a 65, el cual es válido para mezclas densas envejecidas a corto plazo y a 25°C, el empleo del rejuvenecedor muestra grandes potencialidades por la mejora que ofrece en el comportamiento ante agrietamiento. La mezcla con asfalto más rejuvenecedor presentó los valores promedios de CT index más elevados tanto a corto como a largo plazo, 80,9 y 68,0 respectivamente.
4. El empleo del asfalto modificado con polímeros no mostró una mejora ante el agrietamiento, con CT index de 31,5 a corto plazo y 22,0 a largo plazo. El mal desempeño se considera puede estar asociado a las altas temperaturas de calentamiento del asfalto (alrededor de 180°C), usuales para la mezcla con polímeros, más el tiempo de mezclado, vinculado a las insuficiencias de calidad del asfalto procedente de Esmeraldas. Como se muestra en el trabajo, el asfalto empleado no cumple los requisitos de calidad para el residuo de la prueba RTFO.
5. La posible solución de adicionar fibras a la mezcla generó resultados en el CT index muy parecidos a la mezcla patrón, es decir, que su impacto no fue

significativo en la dirección de mejorar el agrietamiento de las mezclas. Esta situación pudo ser generada por el contenido de fibras tan bajo empleado en la mezcla.

6. Se considera que la prueba IDEAL es una valiosa herramienta para el análisis del agrietamiento, permitiendo el CT index relacionar los factores más importantes involucrados en el mismo. De acuerdo a la experiencia obtenida en este trabajo, la incidencia de la pendiente $|m_{75}|$ es muy grande.

4.2 Recomendaciones

1. Promocionar el uso de la prueba de agrietamiento IDEAL en el municipio de Guayaquil y ante el MTOP, para que la misma puede suplir la falta de una prueba simple para este control tan necesario tanto en el diseño balanceado de mezcla (deformaciones-agrietamientos), como para los controles de calidad futuros en planta y en obra.

Bibliografías

- AASHTO T 166. (2016). *Standad Metohd of Test for Bulk Specific Gravity of Compacted Asphalt Mixtures Using Saturated- Dry Specimens*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.
- AASHTO T 209. (2020). *Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.
- Alencar, A.E., Bringel, R.M., Soares, J.B. & Soares, S.A. (2006). *Efeito da presença de aditivos nas propriedades reológicas do ligante asfáltico modificado por EVA*. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás IBP 18 Encontro do Asfalto. Brazil.
- Al-Qadi, I., & Yoo, P. J. (2007). *Surface Tangential Contact Stresses Effect on Flexible Pavement Response*. Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 76, pp. 663-692.
- Asphalt Institute. (1997). *Mix Design Methods for Asphalt Concrete*. Lexington, Kentucky, Estados Unidos. Manual Series No. 2.
- ASTM D2041. (2019). *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures*. ASTM International, West Conshohocken, PA. Retrieved from www.astm.org.
- ASTM D2726. (2019). *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures*. ASTM International, West Conshohocken, PA. Retrieved from www.astm.org.
- Bernucci, L. A. (2008). *Pavimentação asfáltica - Formação básica para engenheiros*. ABEDA (Vol. 3). Rio de Janerio.
- Cepeda, J. (2002). Análisis del comportamiento de mezclas asfálticas a fisuración por fatiga mediante la aplicación de un nuevo ensayo dinámico a tracción directa. *Análisis del comportamiento de mezclas asfálticas a fisuración por fatiga*

mediante la aplicación de un nuevo ensayo dinámico a tracción directa.
Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España .

- Christensen, W., D., & Bonaquist, R. F. (2006). *Volumetric Requirements for Superpave Mix Design*. NCHRP Report 567. National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board. National Research Council, Washington, D.C.
- Epps, J. A., & Monismith, C. L. (1972). *Fatigue of Asphalt Concrete Mixtures Summary of Existing Information*. In *Fatigue of Compacted Bituminous Aggregate Mixtures*, ASTM STP 508, ASTM, pp. 45-59.
- Fernandez, G., Rondon, Q., & Reyes, L. (2013). *El fenómeno de envejecimiento en asfalto y mezclas asfálticas*.
- Garnica, P., Flores, M., Gómez, J., & Delgado, H. (2005). *CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS*. México.
- Glover, J., C., Martin, A., Chowdhury, A., Han, R., Paraitrakul, N., . . . Lawrence, J. (2009). *“Evaluation of Binder Aging and Its Influence on Hot Mix Asphalt Concrete: Literature Review and Experimental Design,”*. Texas Transportation Institute, Texas Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Hefer, W., A., Little, D. N., & Lytton, R. L. (2005). *A Synthesis of Theories and Mechanisms of Bitumen-Aggregate Adhesion Including Recent Advances in Quantifying the Effects of Water*. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 74: pp. 139-196.
- Icaza, K., & Mera, W. (2018). *Influencia de los asfaltos mejorados con rejuvenecedores en el comportamiento de las mezclas asfálticas*. Guayaquil.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). *Productos derivados del petróleo. Cemento asfáltico (Clasificación por viscosidad). Requisitos*. . Quito.
- Keyf, S., Ismail, O., & Çorbacioğlu, B. D. (2007). *Polymer Modified Bitumen Using Ethylene Terpolymers*. *European Polymer Journal, Petroleum Science and Technology* Volume 25, Issue 7.

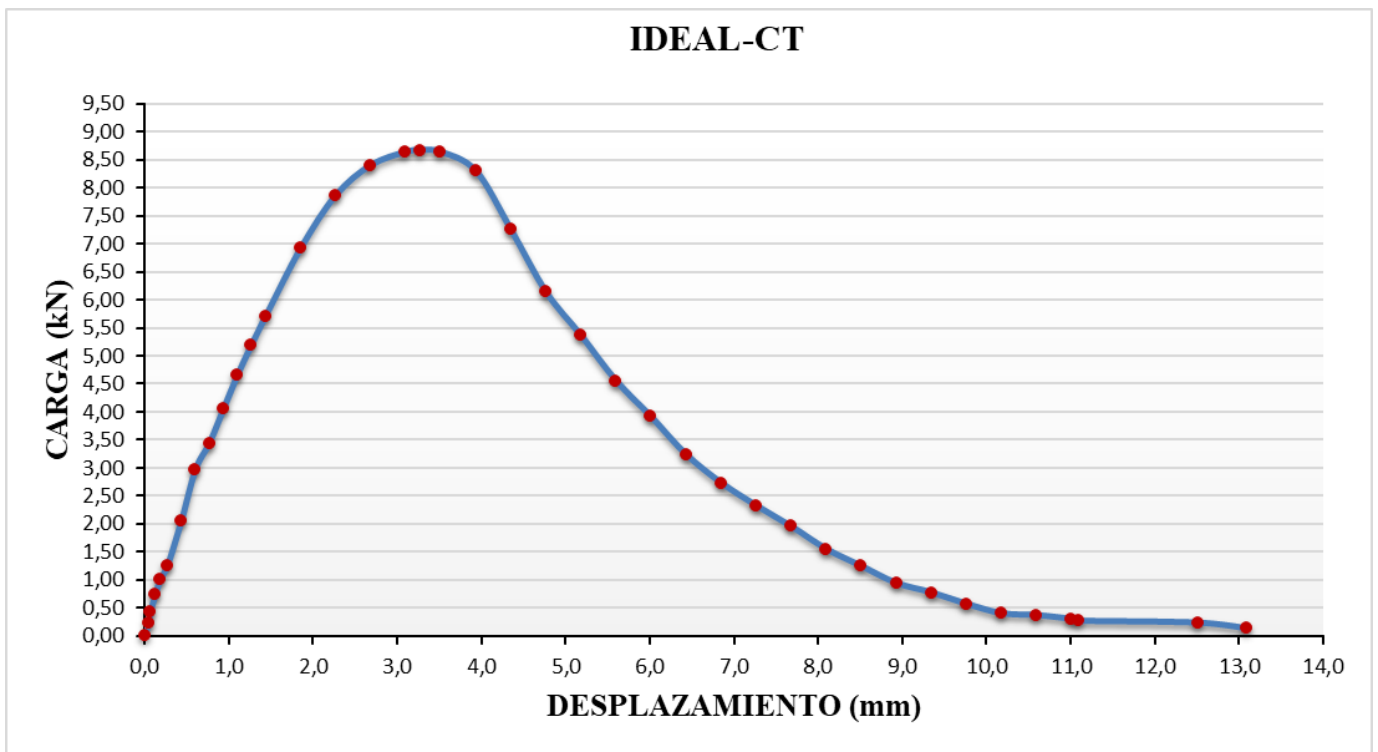
- Leiva, F. (2005). *Normativa para evaluar la resistencia al deslizamientos superficial de los pavimentos*.
- López, T., & Miró, J. (2015). El envejecimiento en mezclas asfálticas. *El envejecimiento en mezclas asfálticas*. Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Lu, D., & Saleh, M. (2017). *Evaluation of Mechanical Properties of a New Warm-Mix Asphalt using Sylvaroad Additive*. Athens Journal of Technology & Engineering. Vol. 4, No. 2.
- Malan, G. W., Straus, P. J., & Hugo, F. (1989). *A Field Study of Premature Surface Cracking in Asphalt*. Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 58, pp. 142-162.
- Mera, W., Jaramillo, J., Icaza, K., García, G., & Vila, R. (2019). Estudio del empleo de rejuvenecedores como aditivos en el asfalto ecuatoriano. In *Memorias XX CILA. México*.
- Montejo. (2002). *Ingeniería de Pavimentos*. Bogotá, D.C., Colombia: Stella Valbuena de Fierro.
- MOP. (2002). *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes*. Ecuador.
- Morea, F. (2011). *Deformaciones permanentes en mezclas asfálticas. Efecto de la reología de los asfaltos, la temperatura y las condiciones de carga*. Universidad de la plata, Argentina .
- Myers, L. A., & Roque, R. (2001). *Evaluation of Top-Down Cracking in Thick Asphalt Pavements and the Implications for Pavement Design*. Transportation Research Circular: Perpetual Bituminous Materials. Washington, D.C.
- Navarrete, E. F. (2021). Empleo de la prueba “ideal” para el control del agrietamiento. *Empleo de la prueba “ideal” para el control del agrietamiento*. Universidad Católica Santiago de Guaquil, Guayaquil, Guayas, Ecuador.

- NCHRP . (2004). “*2002 Design Guide: Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*” . NCHRP 1-37A Project, National Cooperative Highway Research Program.
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2003). *Índice UV solar mundial* .
- Pellinen, T. (2002). *Evaluation of Surface (top-down) Longitudinal Wheel Path Cracking in Indiana*. Joint Transportation Research Program. Purdue University, West Lafayette, IN.
- Rodríguez, C. A. (2022). Comparación del índice de agrietamiento en. *Comparación del índice de agrietamiento en*. Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Guayas, Ecuador.
- Sanabria, L. C. (2000). *Evaluacion del aditivo rejuvenecedor de asfaltos y pavimentos*. Retrieved from file:///C:/Users/jorge/Downloads/Evaluacion_Aditivo_Rejuvenecedor%
- Sebaaly, E., P., Eid, Z., & Epps, J. A. (2001). “*Evaluation of Moisture Sensitivity Properties of ADOT Mixtures on US93*”. Volume I: Final Report. Report No. FHWA AZ98-402-01. Arizona Department of Transportation.
- Tayebali, A. A., & Huang, Y. (2004). *Material Characterization and Performance Properties of Superpave Mixtures*. Final Report. Report No. FHWA/NC/2004-011.
- Vachhani, K., & Mishra, C. (2014). *Influence of VG30 Grade Bitumen with and without reactive Ethylene Terpolymer (Elvaloy® 4170) in short term aging*. International Journal of Current Engineering and Technology. Vol.4, No.6.
- Valdés, V., Pérez, J., & Calabi, F. (2012). La fisuración en pavimentos asfálticos y sus mecanismos de deterioro. *La fisuración en pavimentos asfálticos y sus mecanismos de deterioro*. Universidad de la Frontera, Temuco, Chile.
- Vila, R. (2005). Apuntes sobre la calidad del asfalto AP-3 de Esmeraldas. . *Revista “Construcción y Desarrollo. Cámara de la Construcción de Guayaquil. Mes Diciembre*.

- Vila, R., García, G., Jaramillo, J., Pinargote, K., & Ramos, K. (2019). Análisis de la calidad del cemento asfáltico ecuatoriano durante el 2018. In *Memorias XX CILA. México*.
- Vila, R., Mera, W., & Jaramillo, J. (2021). *Valoración de un rejuvenecedor como aditivo en el asfalto. Revista Ingeniería de Construcción RIC. Vol 36 N°2. www.ricuc.cl.*
- Villa, L., S., C., & Martínez, A. (2019). *Sensibilidad del ensayo Fénix sobre mezclas discontinuas. . Efecto de la adición de fibra sintética con variación en el contenido de asfalto. Memorias XX CILA, México.*
- Zhou, F. (2019). Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design, Quality Control and Quality. *Innovations Deserving Exploratory Analysis Programs* , 40.
- Zhou, F. (2021). NCHRP Project 20-44(16). Implementation of the IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design and QC/QA. Final Report. Texas A&M Transportation Institute.

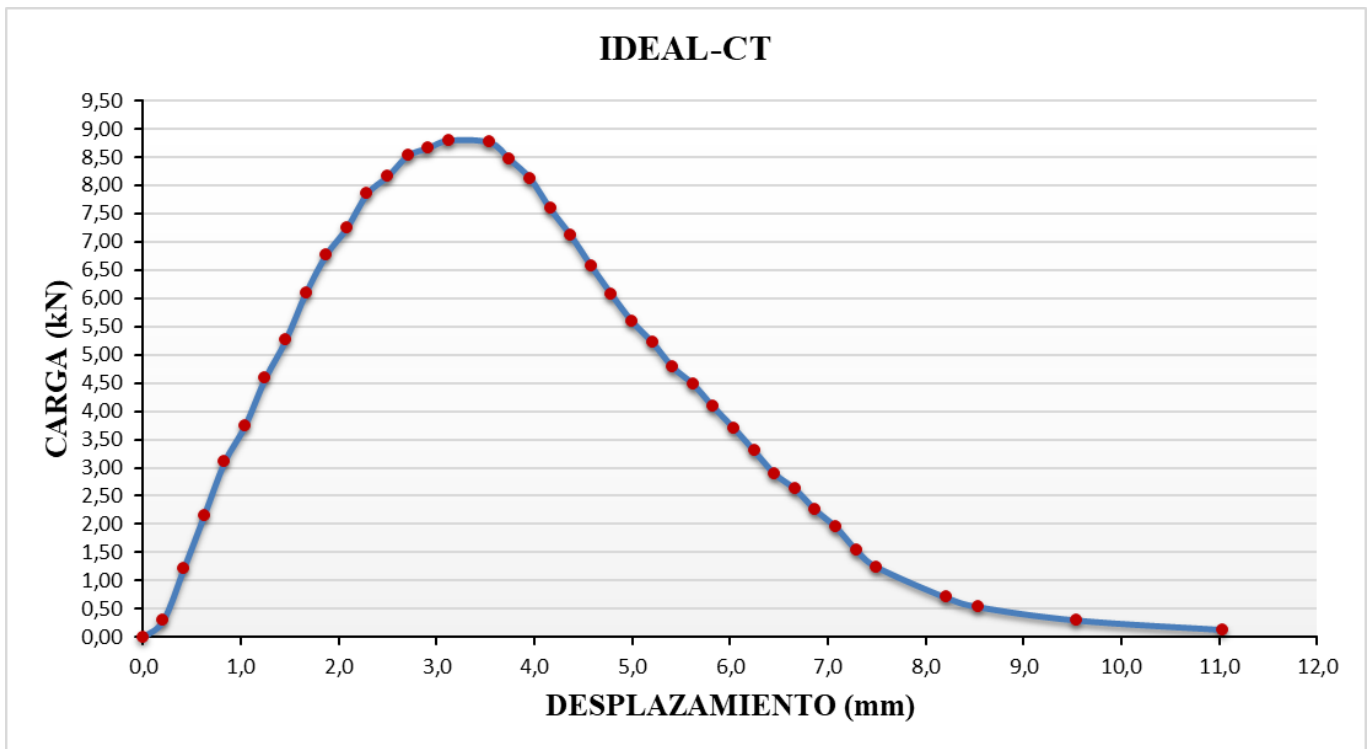
Anexos:

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA PATRÓN. MUESTRA 1. CORTO PLAZO.



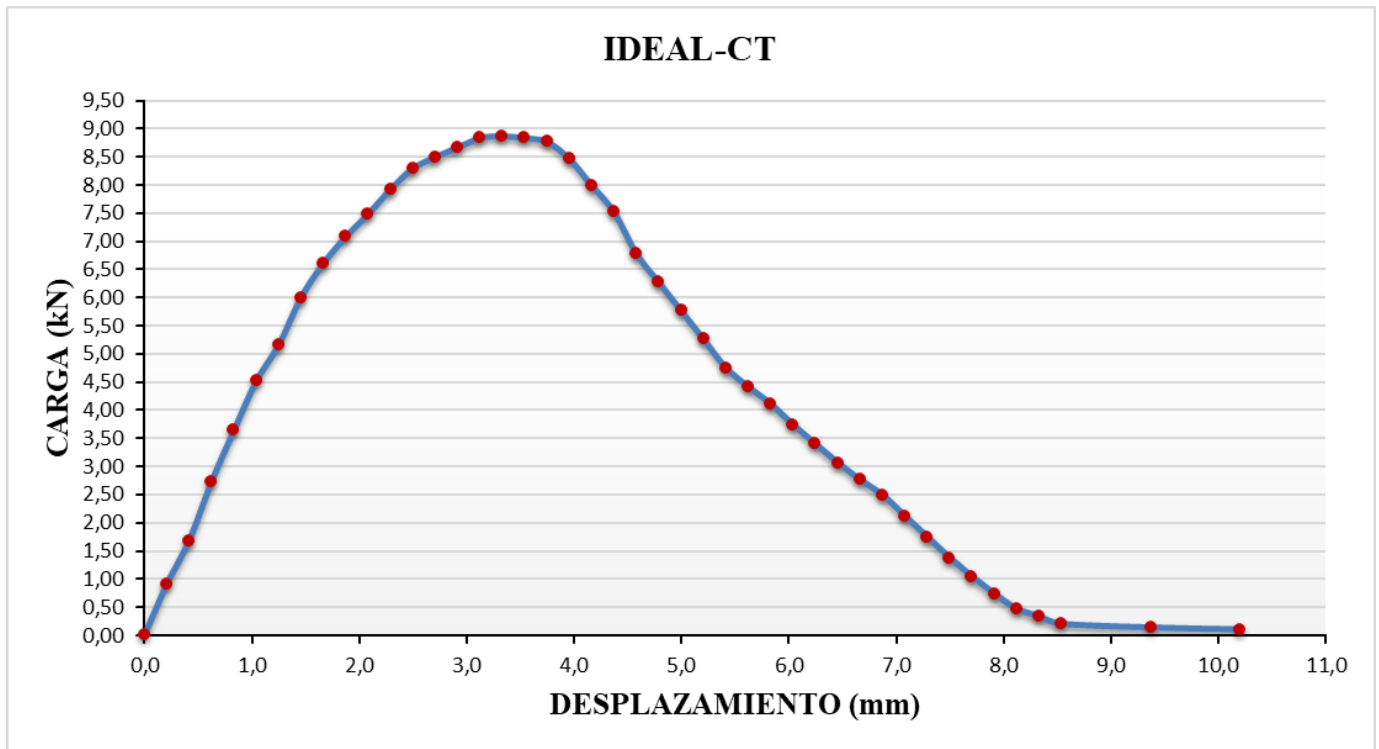
Wf (Joules)		44,6
D (mm)		150
t (mm)		62
Gf (Joules/m²)		4792
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,3	8,7
P85	4,2	7,4
P65	5,0	5,6
P75	4,6	6,5
I75/D		0,031
m75 (kN/mm)		2,17
CT index		67,8

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA PATRÓN. MUESTRA 2. CORTO PLAZO.



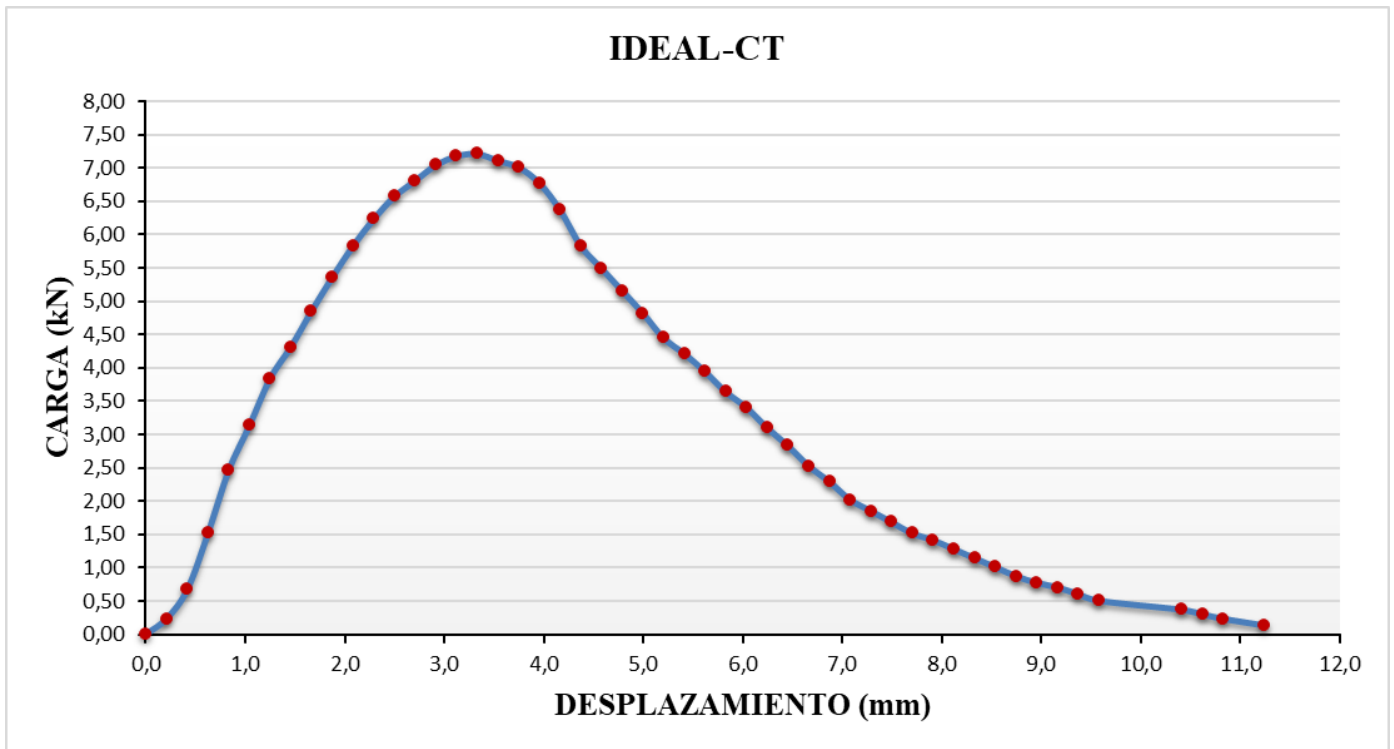
Wf (Joules)		40,6
D (mm)		150
t (mm)		62
Gf (Joules/m²)		4366
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,2	8,8
P85	4,1	7,5
P65	5,0	5,7
P75	4,6	6,6
I75/D		0,031
m75 (kN/mm)		1,96
CT index		68,5

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA PATRÓN. MUESTRA 3. CORTO PLAZO.



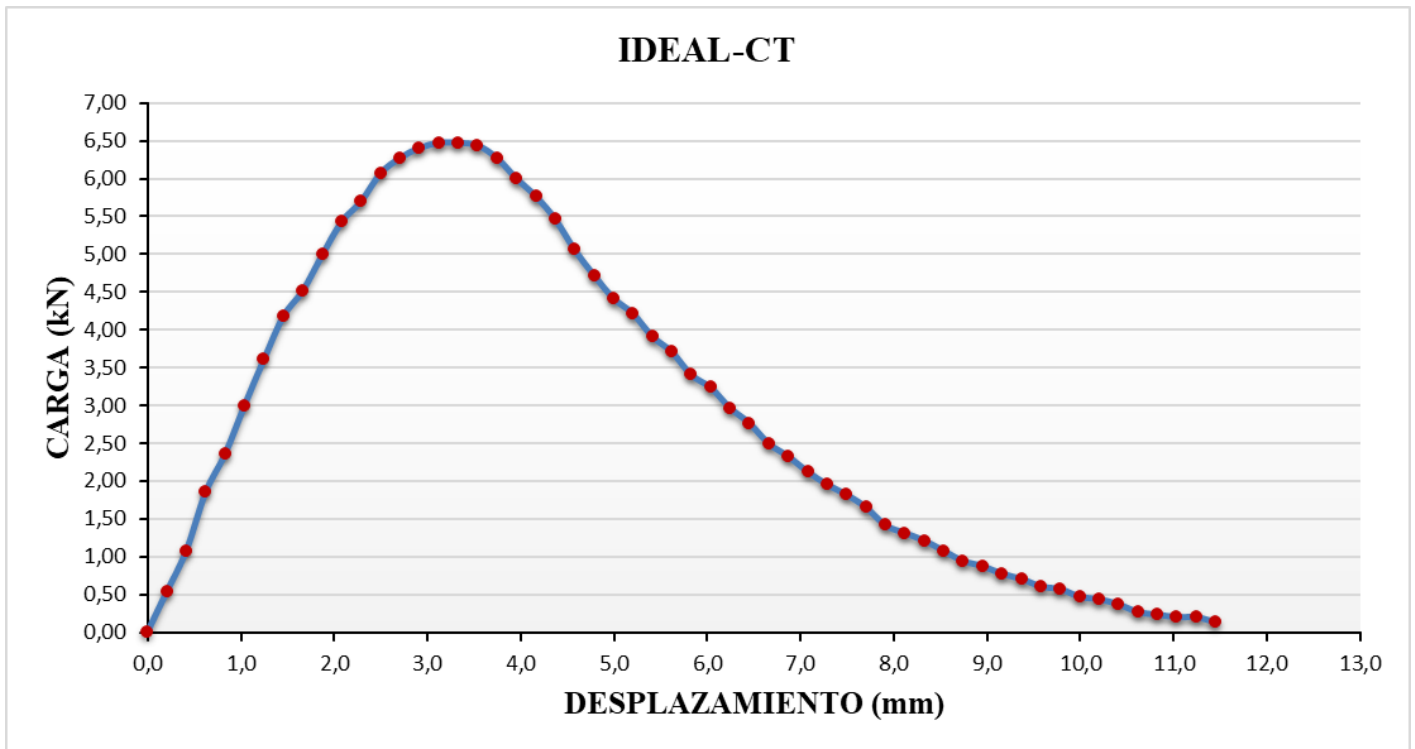
Wf (Joules)		41,7
D (mm)		150
t (mm)		62
Gf (Joules/m²)		4487
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,3	8,9
P85	4,2	7,5
P65	5,0	5,8
P75	4,6	6,7
l75/D		0,031
m75 (kN/mm)		2,22
CT index		62,1

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA CON REJUVENECEDOR. MUESTRA 1.
CORTO PLAZO.



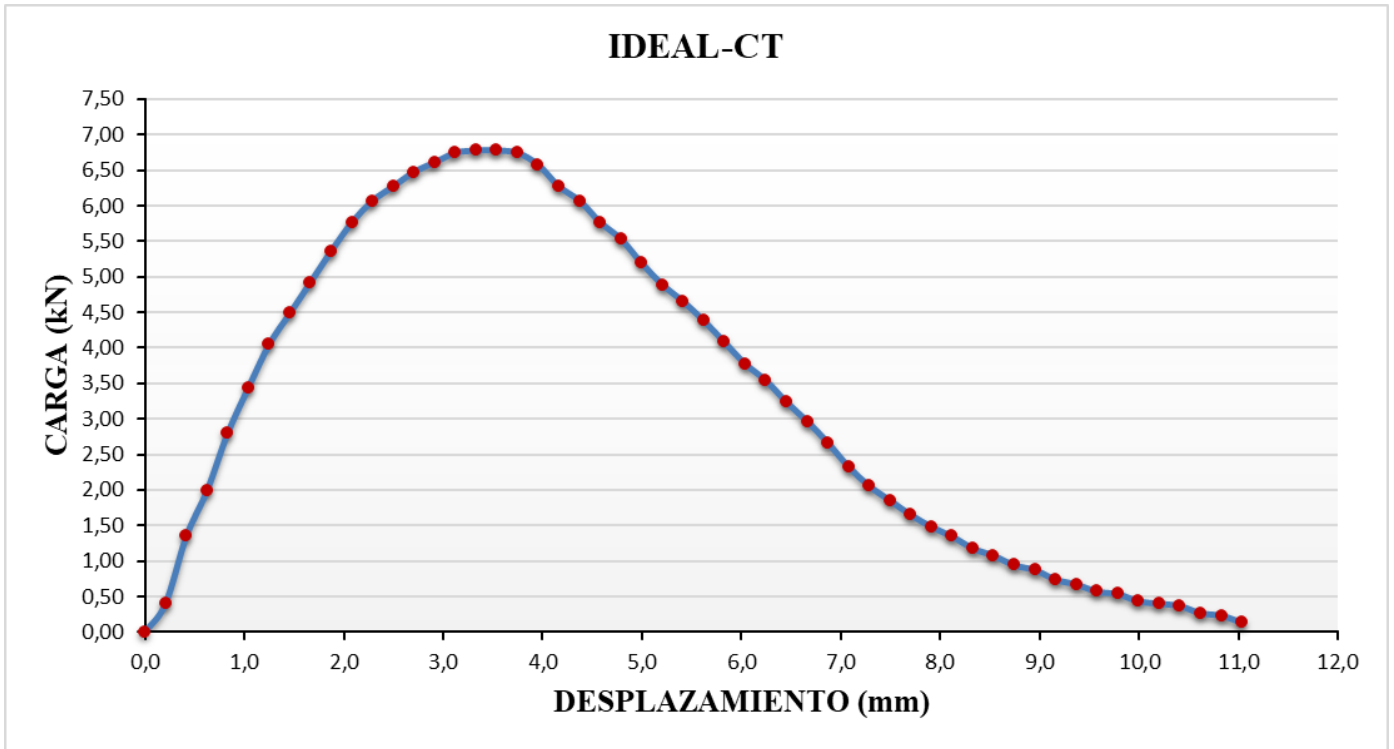
Wf (Joules)		35,4
D (mm)		150
t (mm)		62
Gf (Joules/m²)		3810
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,3	7,2
P85	4,2	6,1
P65	5,1	4,7
P75	4,6	5,4
l75/D		0,031
m75 (kN/mm)		1,70
CT index		68,8

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA CON REJUVENECEDOR. MUESTRA 2.
CORTO PLAZO.



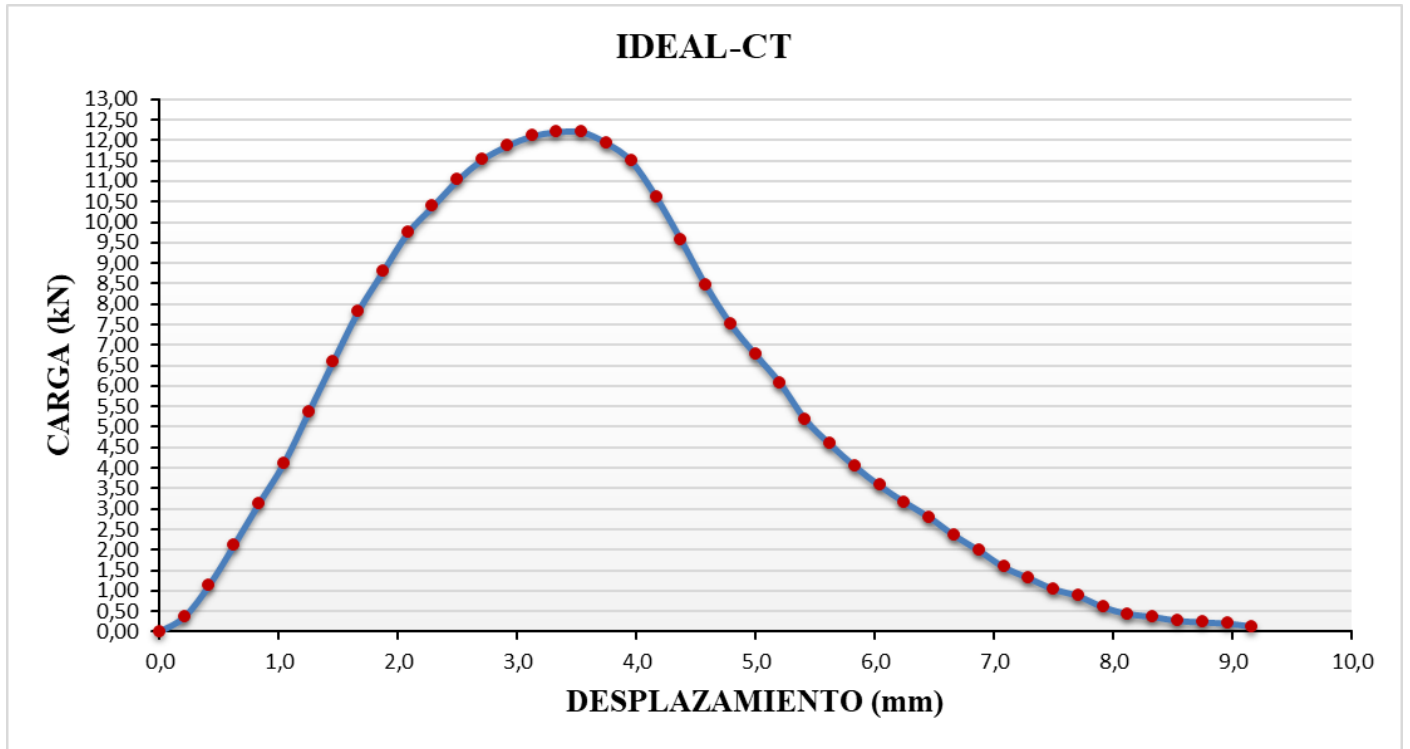
Wf (Joules)		33,6
D (mm)		150
t (mm)		62
Gf (Joules/m²)		3614
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,2	6,5
P85	4,3	5,5
P65	5,2	4,2
P75	4,6	4,9
l75/D		0,031
m75 (kN/mm)		1,44
CT index		77,1

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA CON REJUVENECEDOR. MUESTRA 3.
CORTO PLAZO.



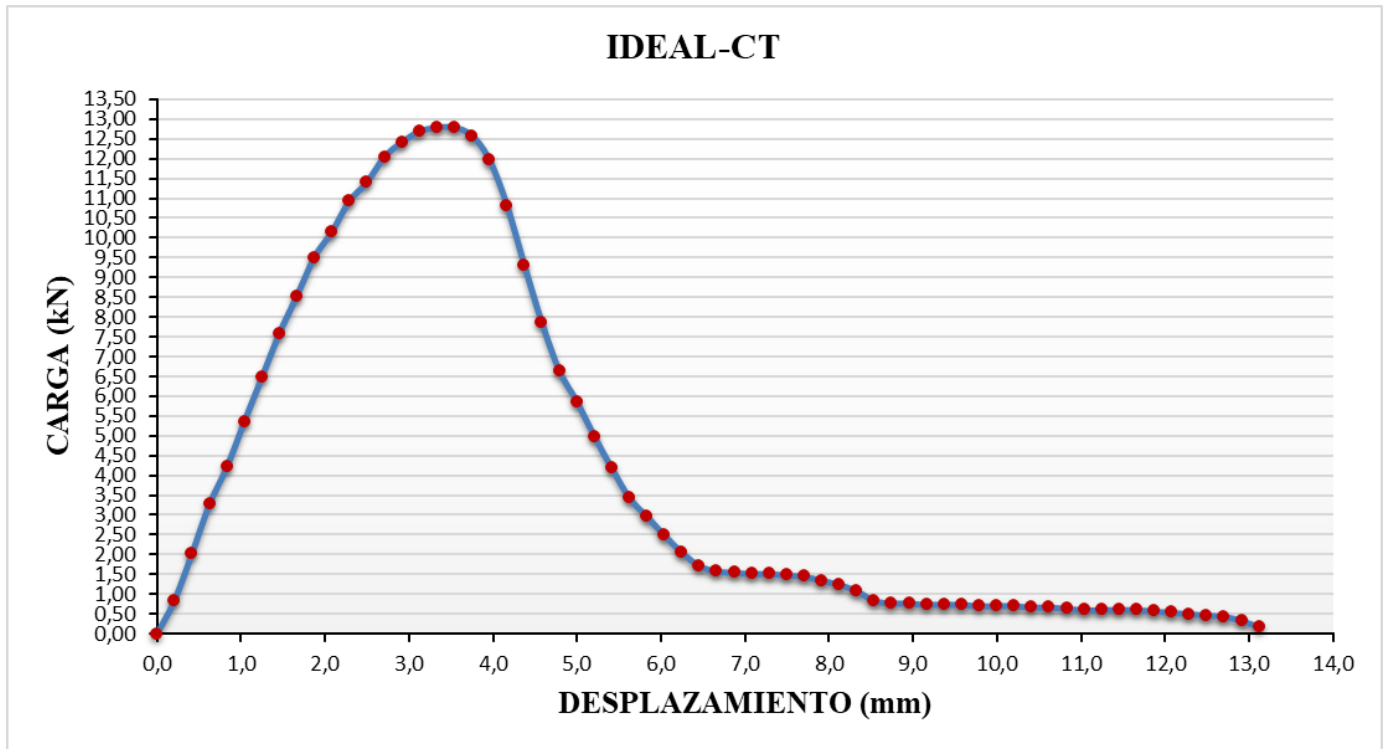
Wf (Joules)		36,6
D (mm)		150
t (mm)		62
Gf (Joules/m²)		3934
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,3	6,8
P85	4,5	5,8
P65	5,5	4,4
P75	5	5,1
I75/D		0,033
m75 (kN/mm)		1,36
CT index		96,7

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA CON POLÍMEROS. MUESTRA 1. CORTO PLAZO.



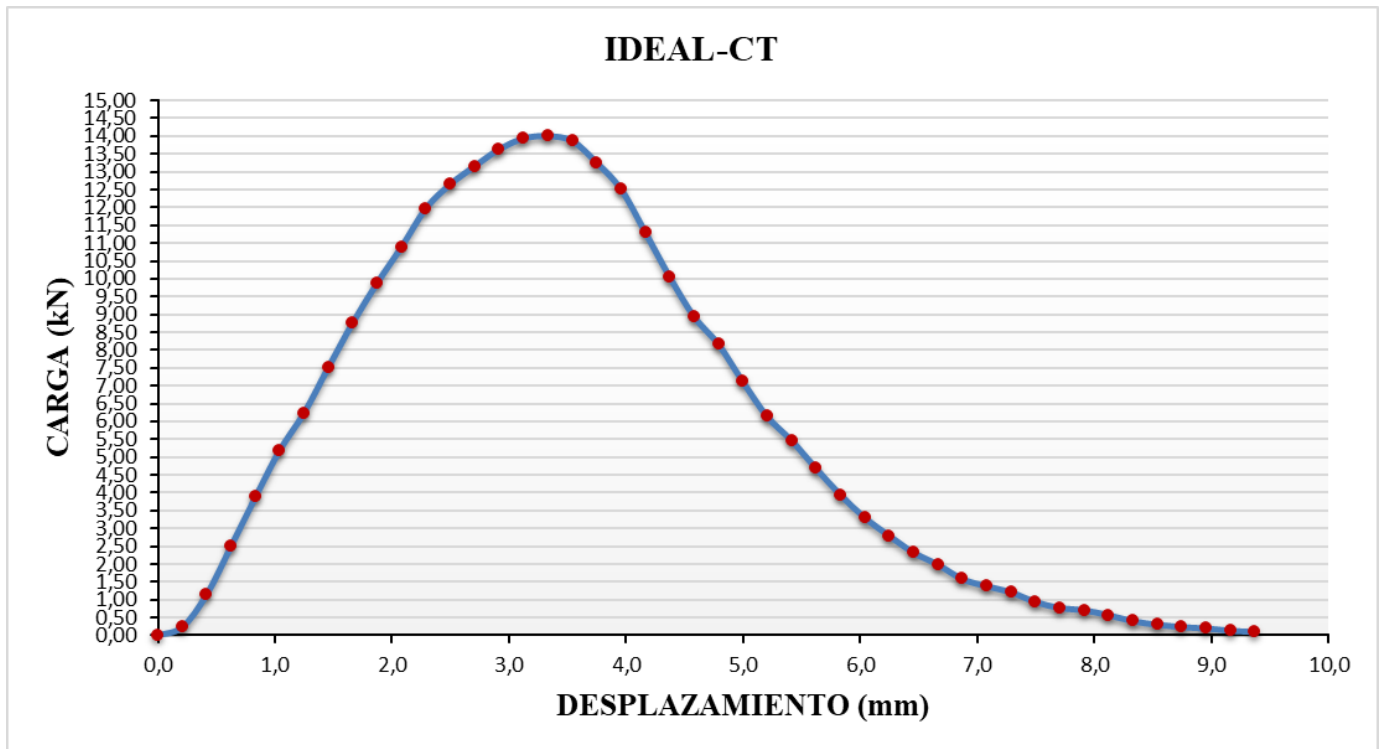
Wf (Joules)		49,5
D (mm)		150
t (mm)		65
Gf (Joules/m²)		5078
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,3	12,2
P85	4,2	10,4
P65	4,8	7,9
P75	4,4	9,2
I75/D		0,029
m75 (kN/mm)		4,07
CT index		38,4

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA CON POLÍMEROS. MUESTRA 2. CORTO PLAZO.



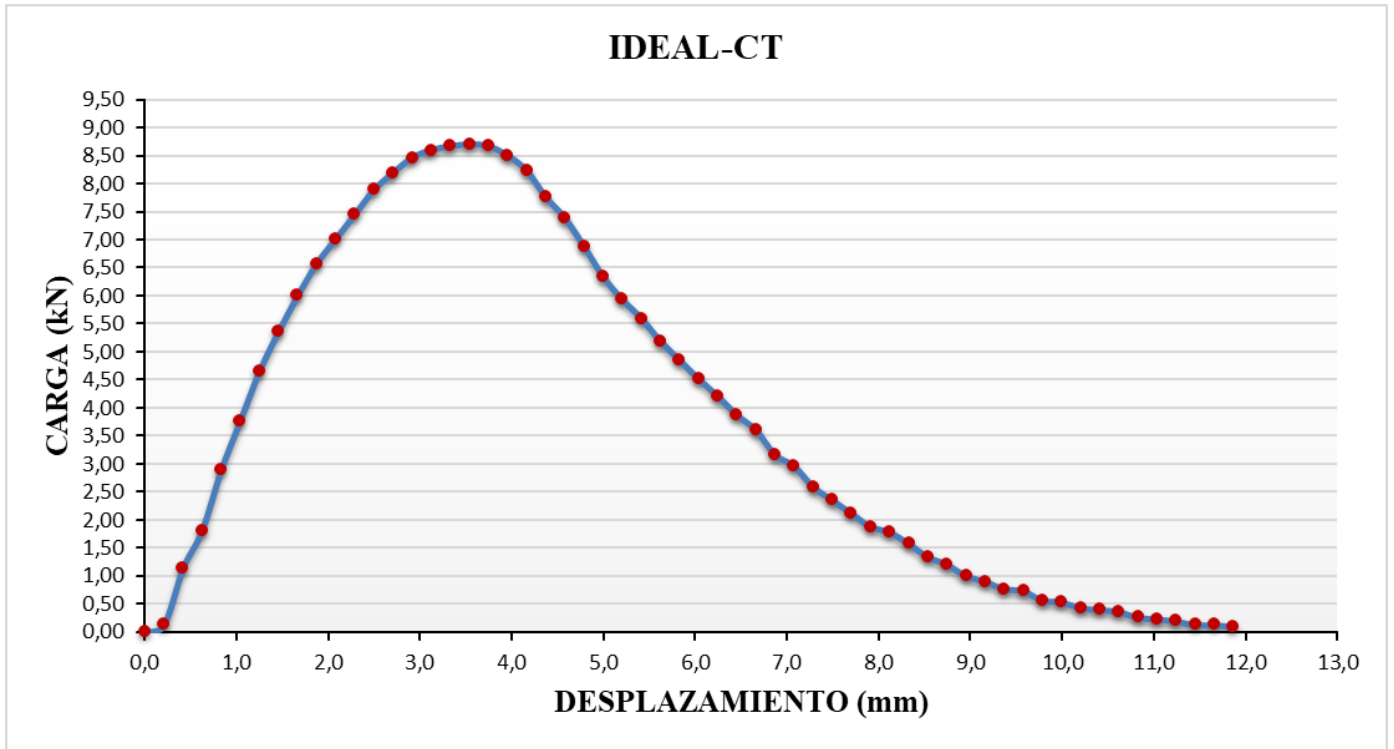
Wf (Joules)		53,5
D (mm)		150
t (mm)		65
Gf (Joules/m²)		5483
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,3	12,8
P85	4,1	10,9
P65	4,5	8,3
P75	4,3	9,6
l75/D		0,029
m75 (kN/mm)		6,23
CT index		26,4

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA CON POLÍMEROS. MUESTRA 3. CORTO PLAZO.



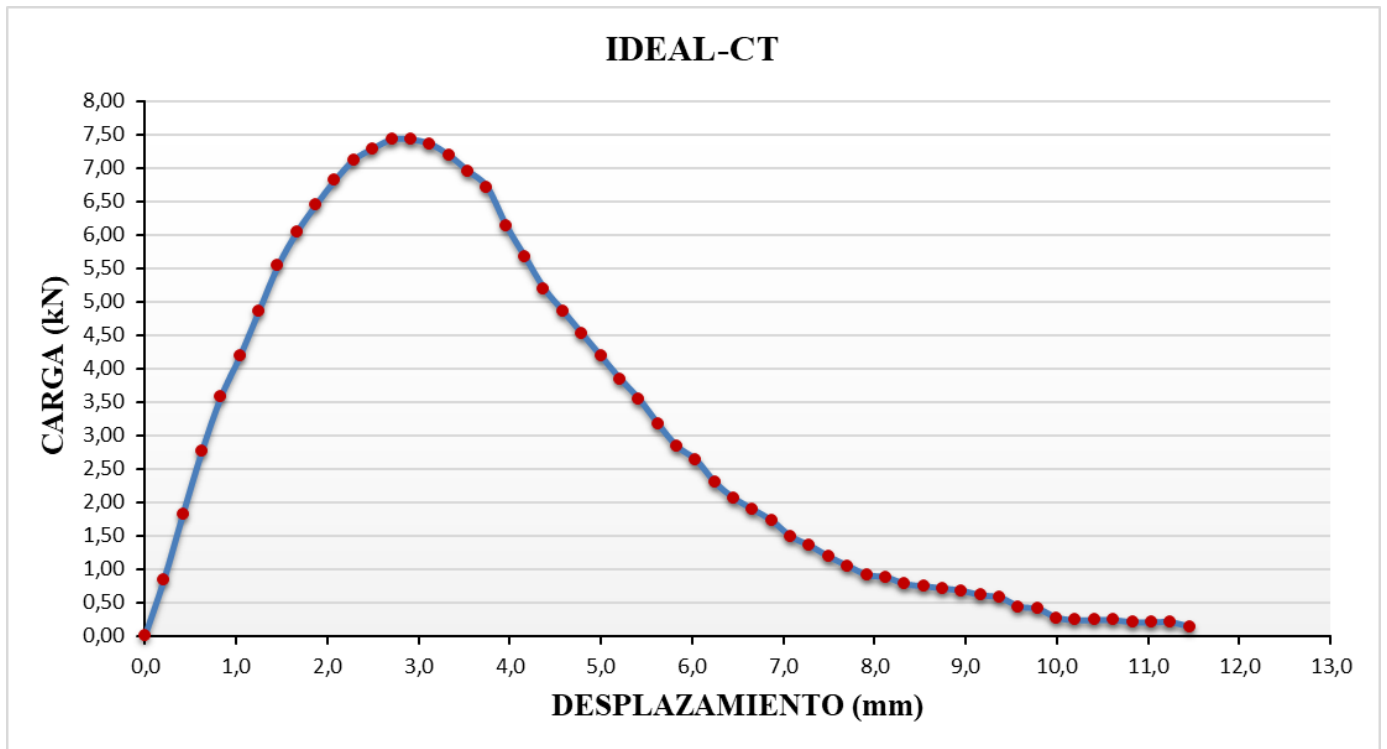
Wf (Joules)		54,1
D (mm)		150
t (mm)		63
Gf (Joules/m²)		5727
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,3	14,0
P85	4,1	11,9
P65	4,6	9,1
P75	4,3	10,5
l75/D		0,029
m75 (kN/mm)		5,60
CT index		29,8

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA CON FIBRAS. MUESTRA 1. CORTO PLAZO.



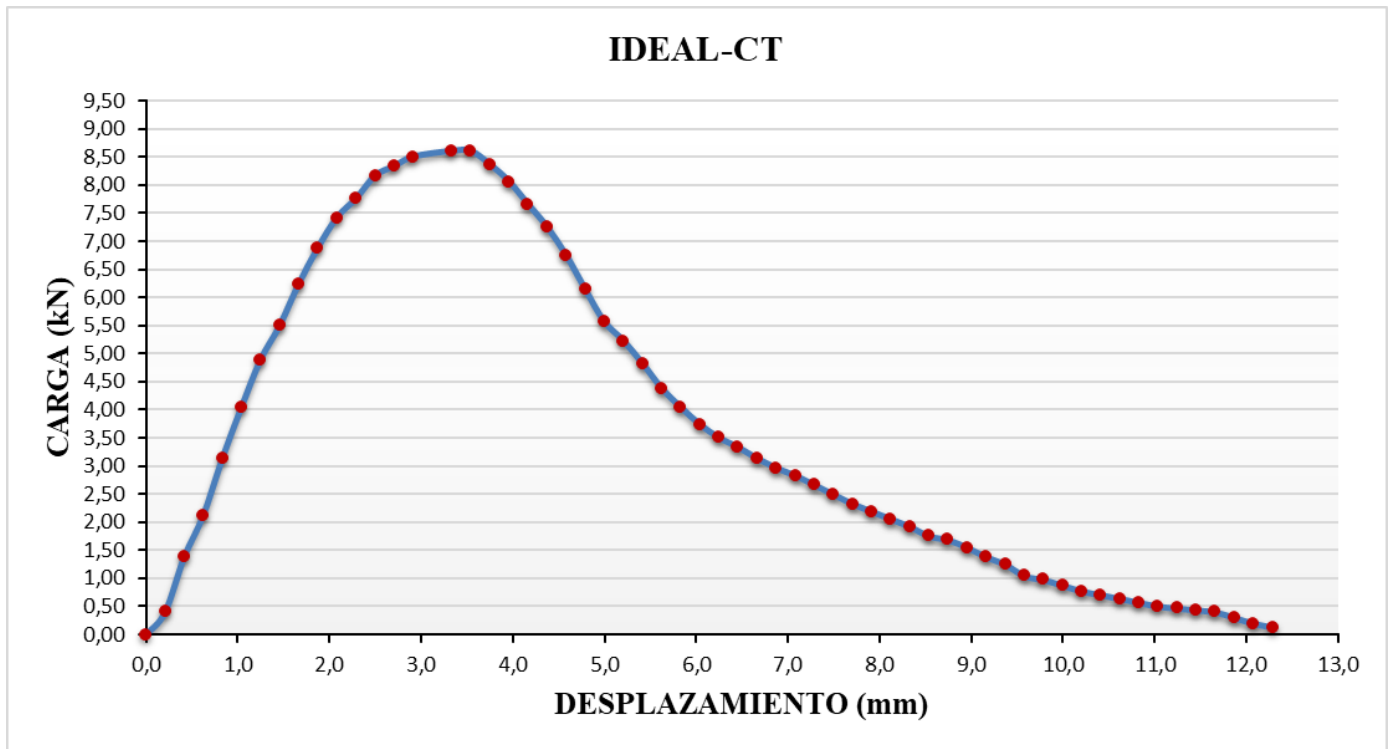
Wf (Joules)		45,1
D (mm)		150
t (mm)		62
Gf (Joules/m²)		4852
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,5	8,7
P85	4,5	7,4
P65	5,2	5,7
P75	4,9	6,5
l75/D		0,033
m75 (kN/mm)		2,49
CT index		63,8

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA CON FIBRAS. MUESTRA 2. CORTO PLAZO.



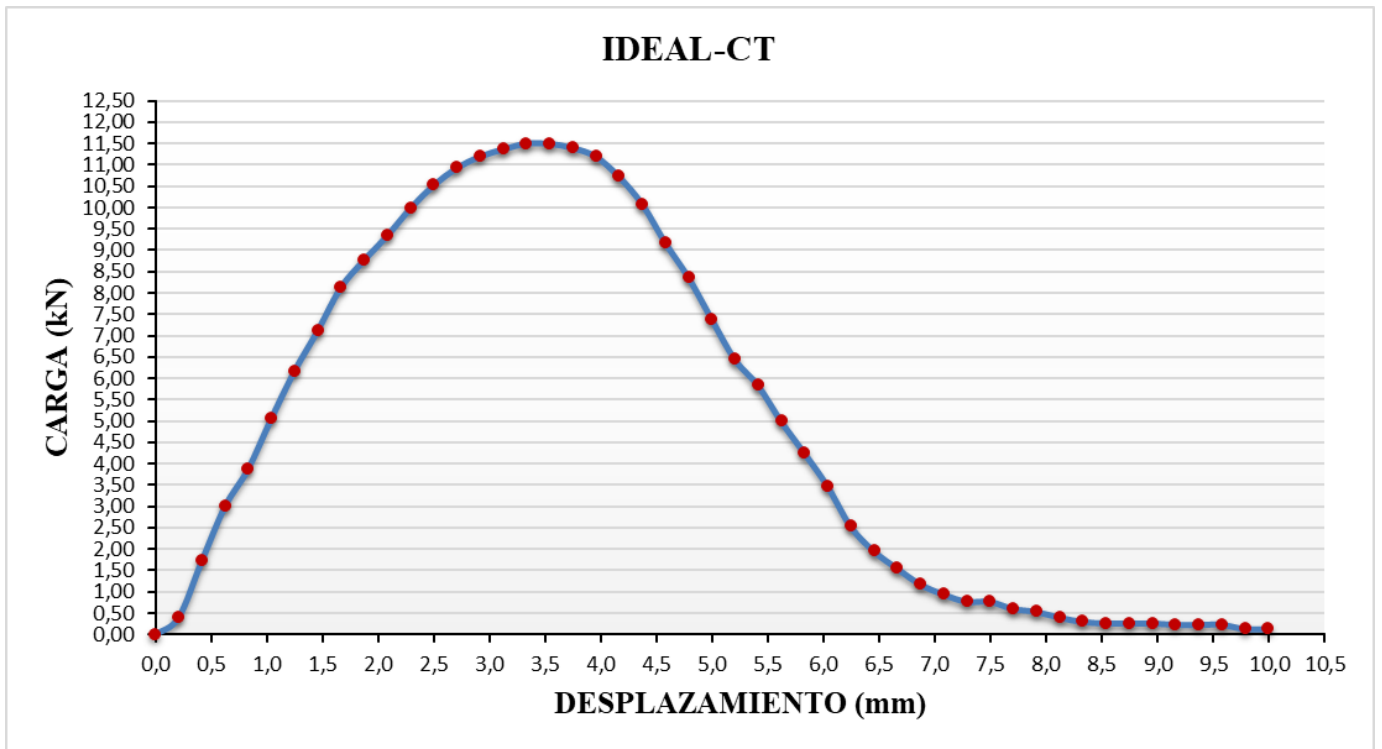
Wf (Joules)		35,0
D (mm)		150
t (mm)		64
Gf (Joules/m²)		3648
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	2,8	7,4
P85	3,8	6,3
P65	4,6	4,8
P75	4,2	5,6
l75/D		0,028
m75 (kN/mm)		1,86
CT index		56,2

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA CON FIBRAS. MUESTRA 3. CORTO PLAZO.



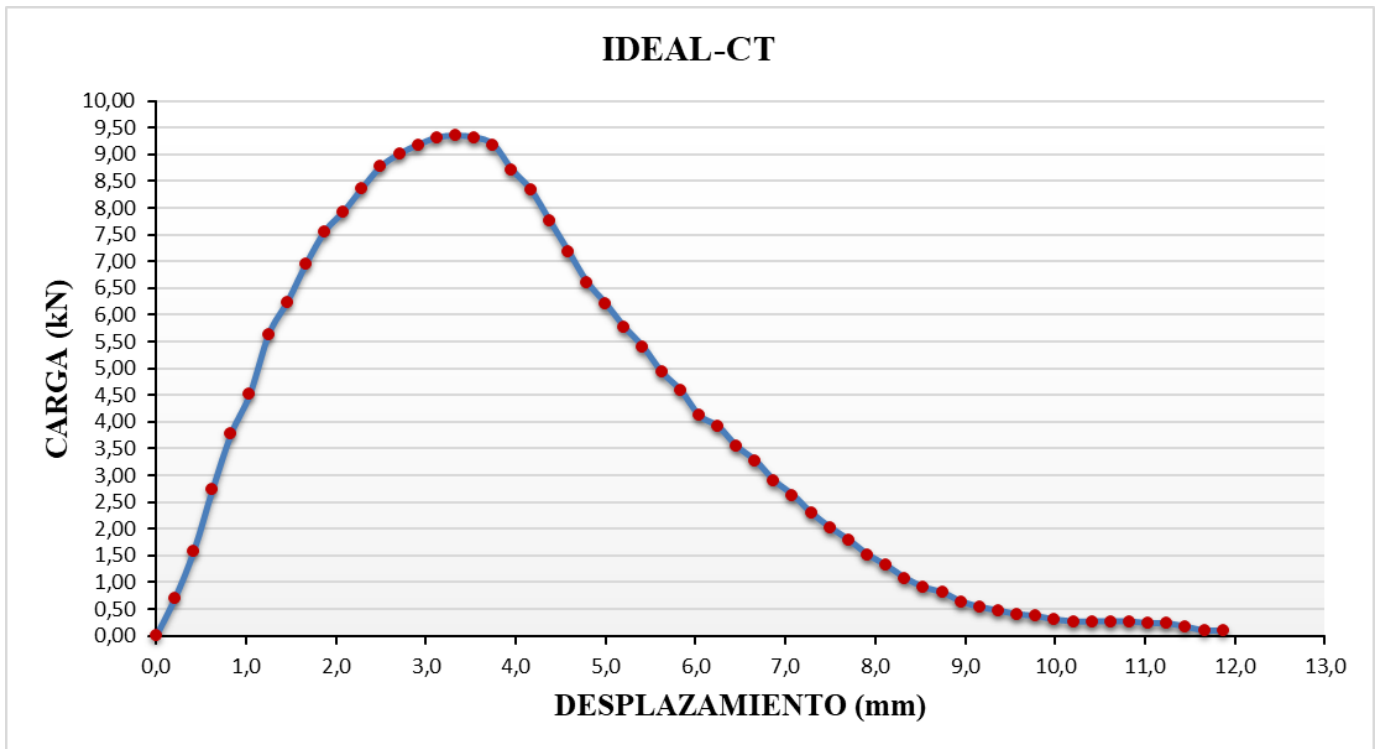
Wf (Joules)		45,3
D (mm)		150
t (mm)		62
Gf (Joules/m²)		4870
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,4	8,6
P85	4,3	7,3
P65	5,0	5,6
P75	4,6	6,5
l75/D		0,031
m75 (kN/mm)		2,29
CT index		65,1

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA PATRÓN. MUESTRA 1. LARGO PLAZO.



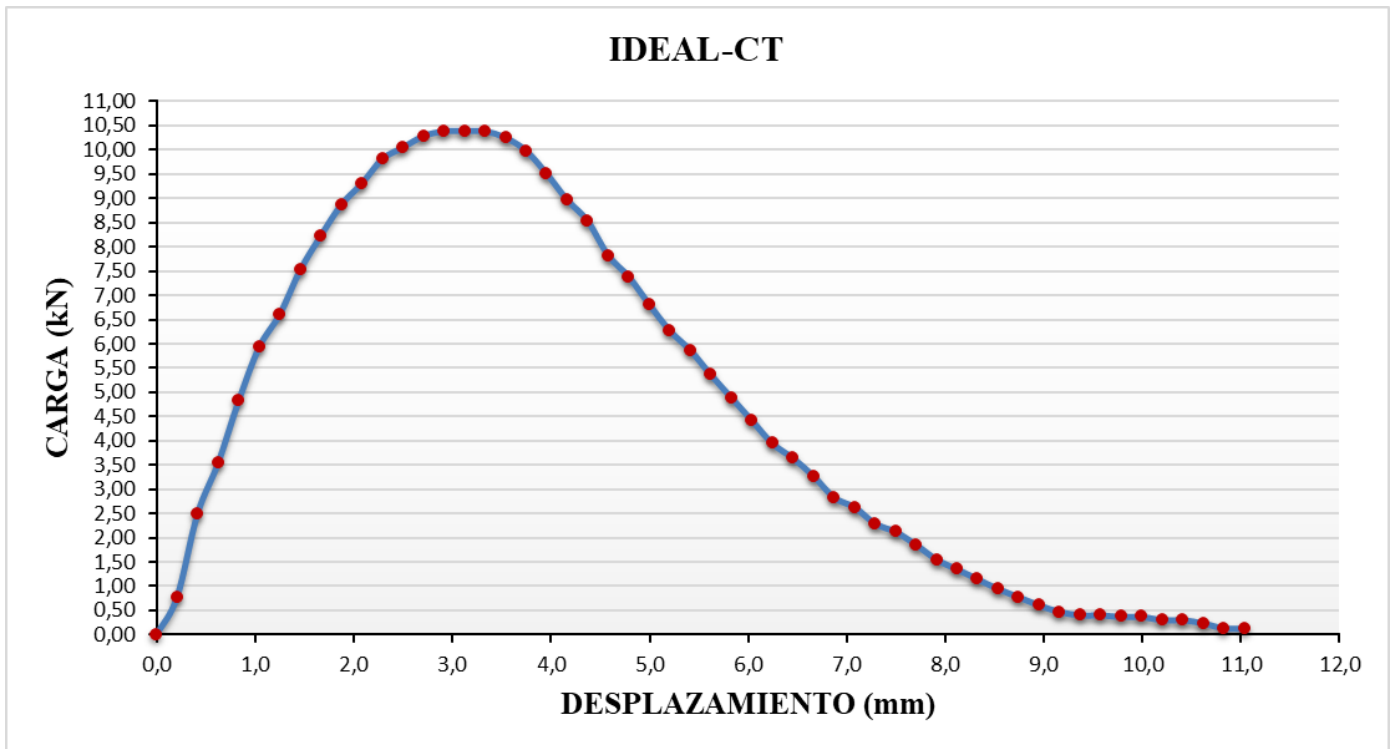
Wf (Joules)		49,4
D (mm)		150
t (mm)		62
Gf (Joules/m²)		5310
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,4	11,5
P85	4,4	9,8
P65	5,0	7,5
P75	4,7	8,6
l75/D		0,031
m75 (kN/mm)		3,54
CT index		47,0

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA PATRÓN. MUESTRA 2. LARGO PLAZO.



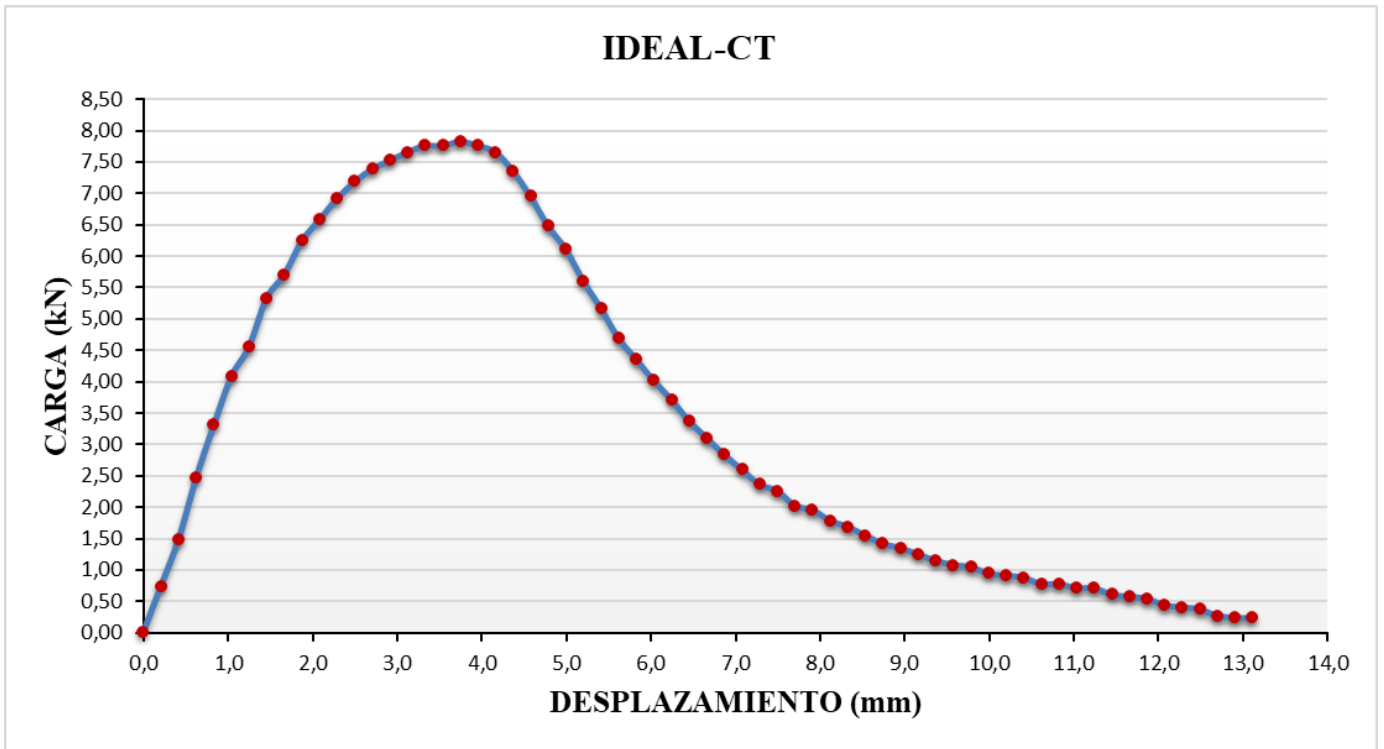
Wf (Joules)		46,3
D (mm)		150
t (mm)		62
Gf (Joules/m²)		4974
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,3	9,3
P85	4,2	7,9
P65	5,0	6,1
P75	4,6	7,0
l75/D		0,031
m75 (kN/mm)		2,34
CT index		65,3

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA PATRÓN. MUESTRA 3. LARGO PLAZO.



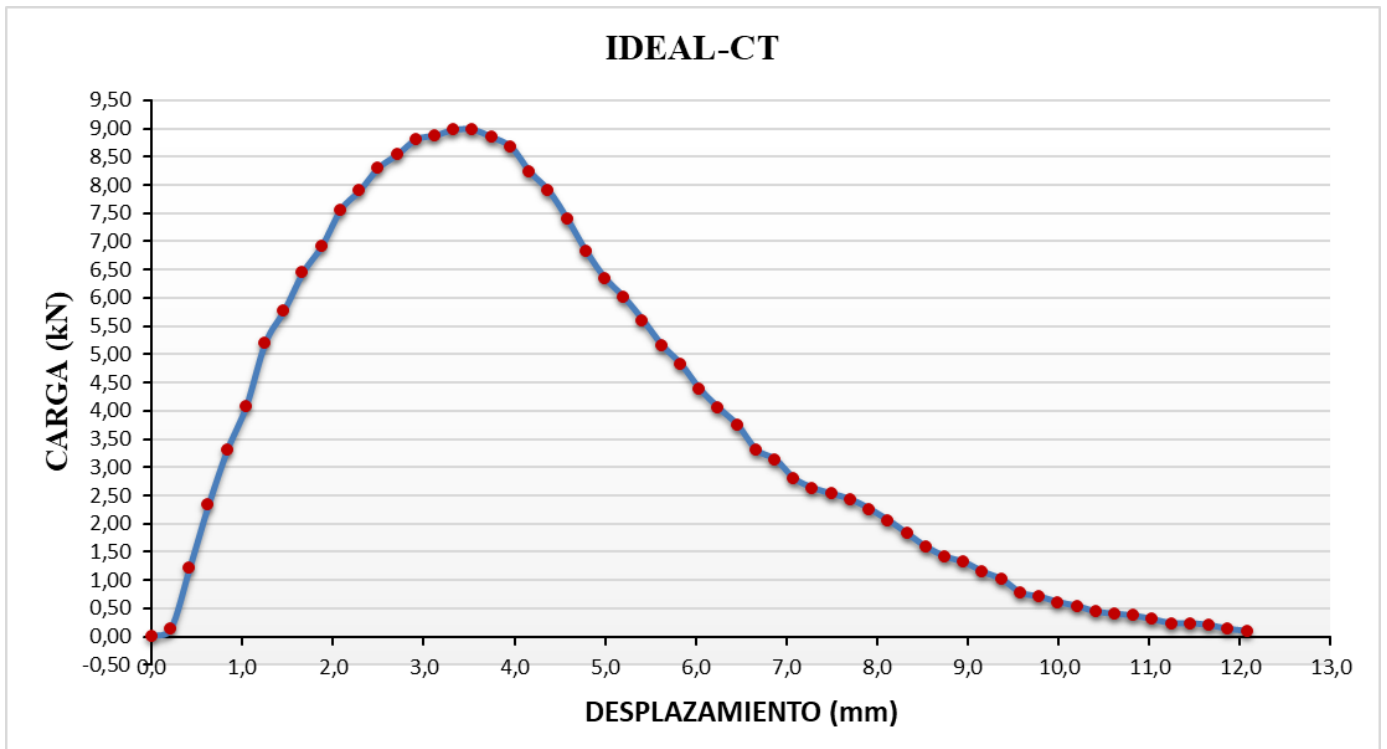
Wf (Joules)		51,5
D (mm)		150
t (mm)		62
Gf (Joules/m²)		5542
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,1	10,4
P85	4,2	8,8
P65	4,9	6,8
P75	4,6	7,8
l75/D		0,031
m75 (kN/mm)		2,97
CT index		57,2

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA CON REJUVENECEDOR. MUESTRA 1.
LARGO PLAZO.



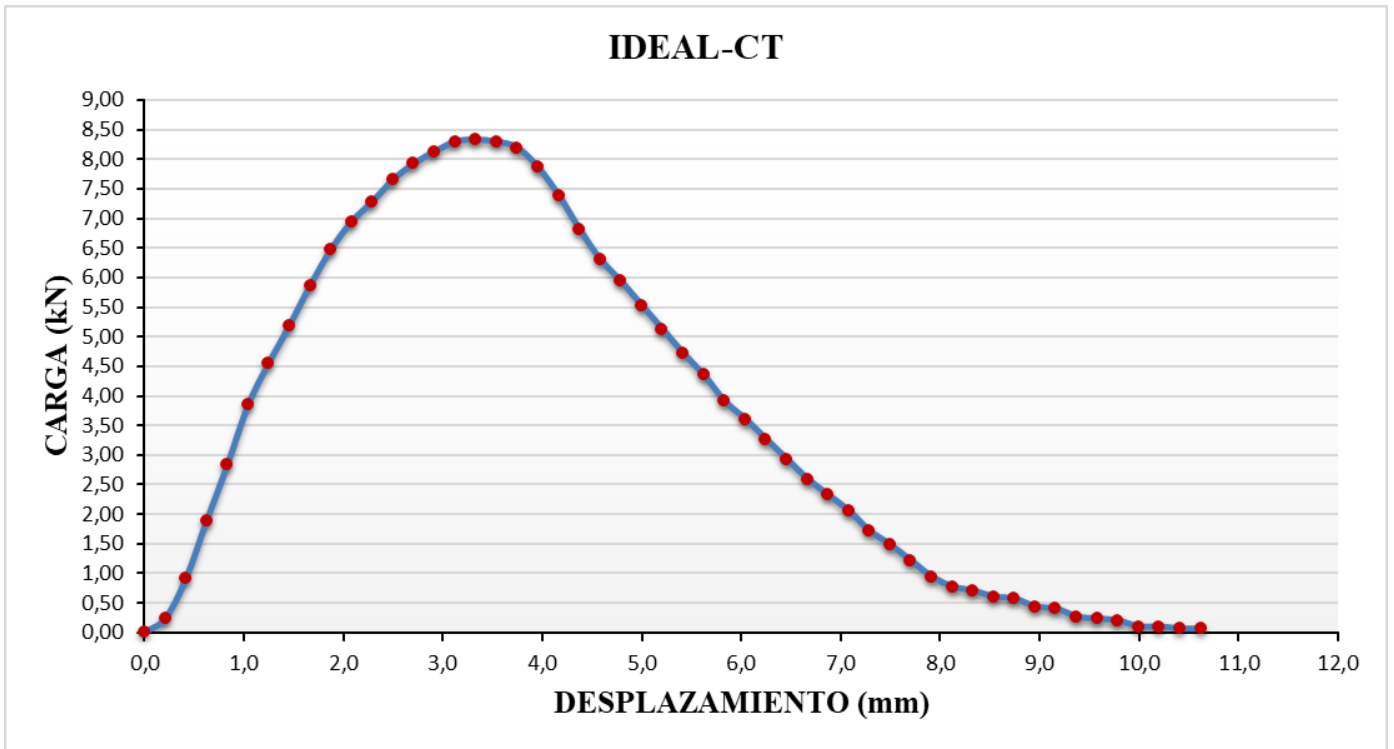
Wf (Joules)		44,3
D (mm)		150
t (mm)		62
Gf (Joules/m²)		4761
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,7	7,8
P85	4,7	6,6
P65	5,3	5,1
P75	5	5,9
l75/D		0,033
m75 (kN/mm)		2,61
CT index		60,9

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA CON REJUVENECEDOR. MUESTRA 2.
LARGO PLAZO.



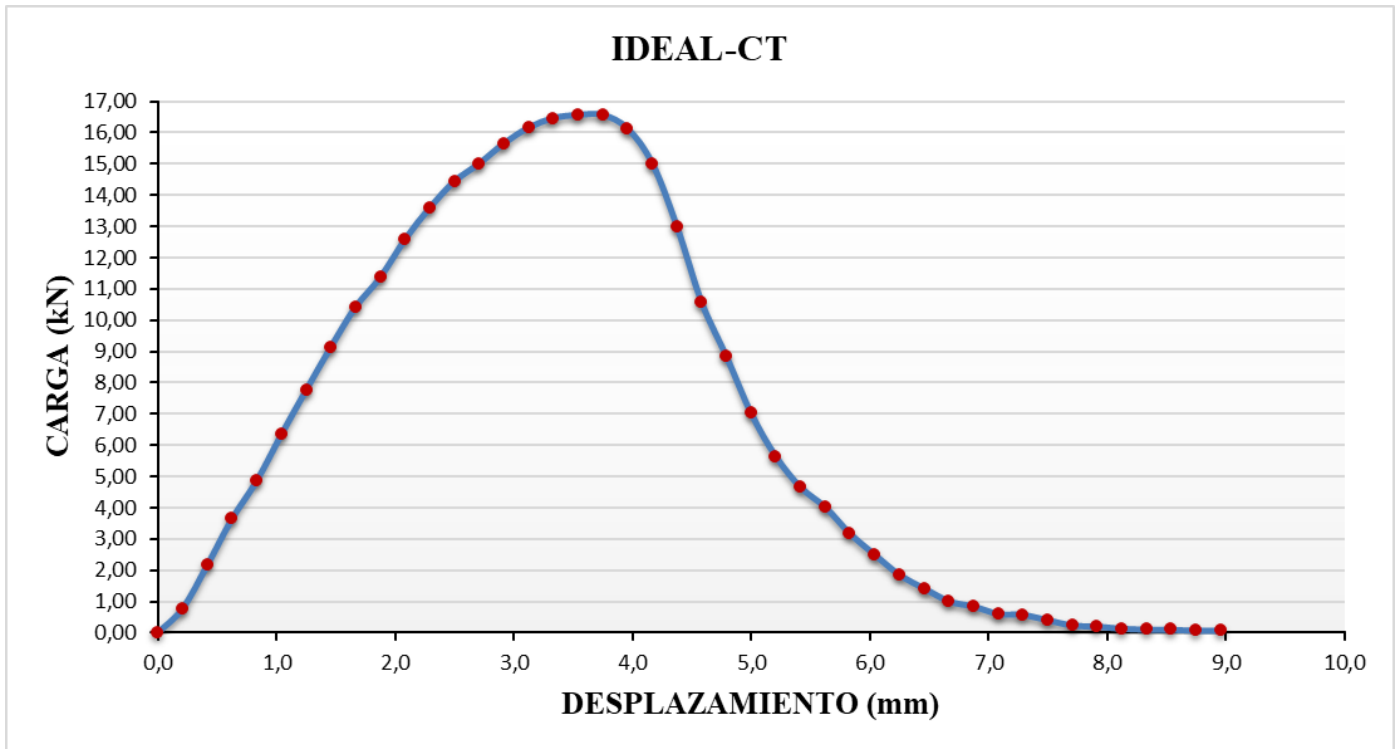
Wf (Joules)		47,0
D (mm)		150
t (mm)		62
Gf (Joules/m²)		5051
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,3	9,0
P85	4,4	7,6
P65	5,2	5,8
P75	4,8	6,7
l75/D		0,032
m75 (kN/mm)		2,24
CT index		72,1

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA CON REJUVENECEDOR. MUESTRA 3.
LARGO PLAZO.



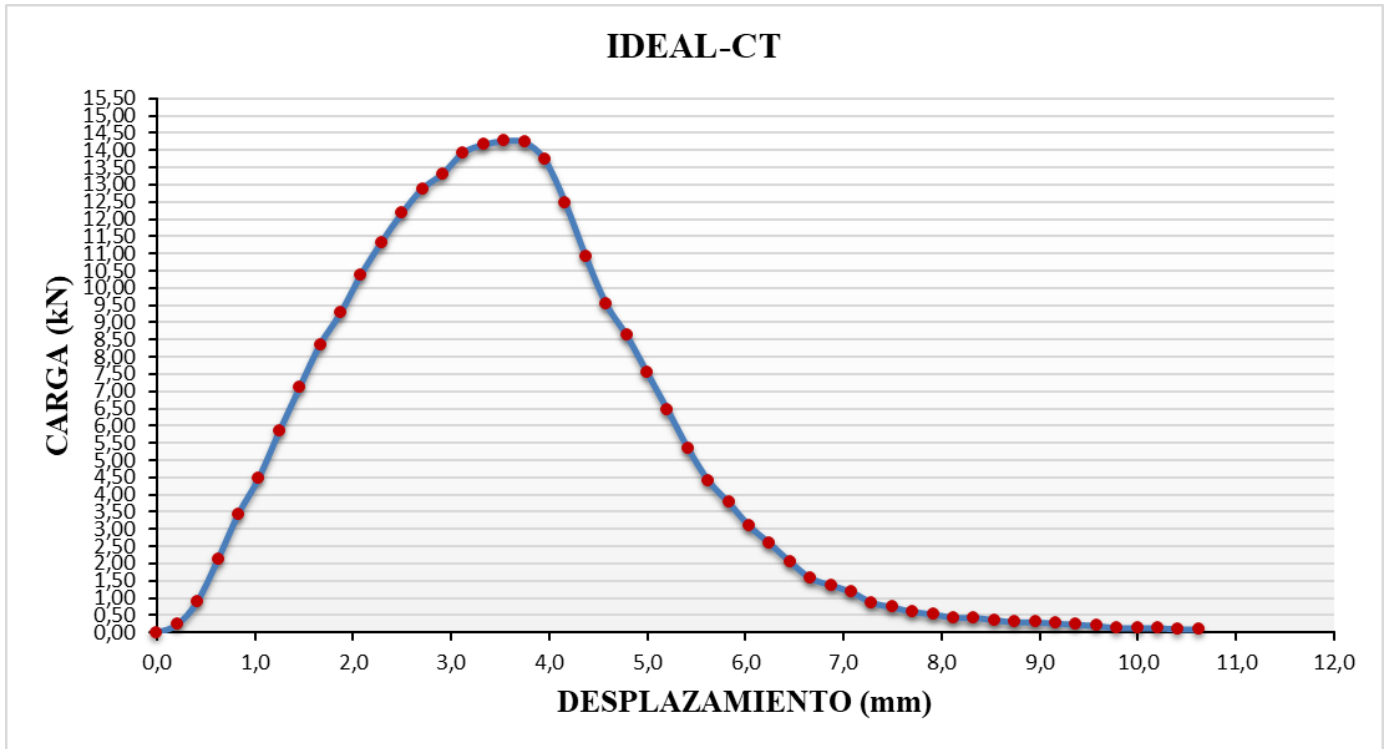
Wf (Joules)		39,0
D (mm)		150
t (mm)		62
Gf (Joules/m²)		4196
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,3	8,3
P85	4,2	7,1
P65	5,1	5,4
P75	4,7	6,2
l75/D		0,031
m75 (kN/mm)		1,85
CT index		71,0

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA CON POLÍMEROS. MUESTRA 1. LARGO PLAZO.



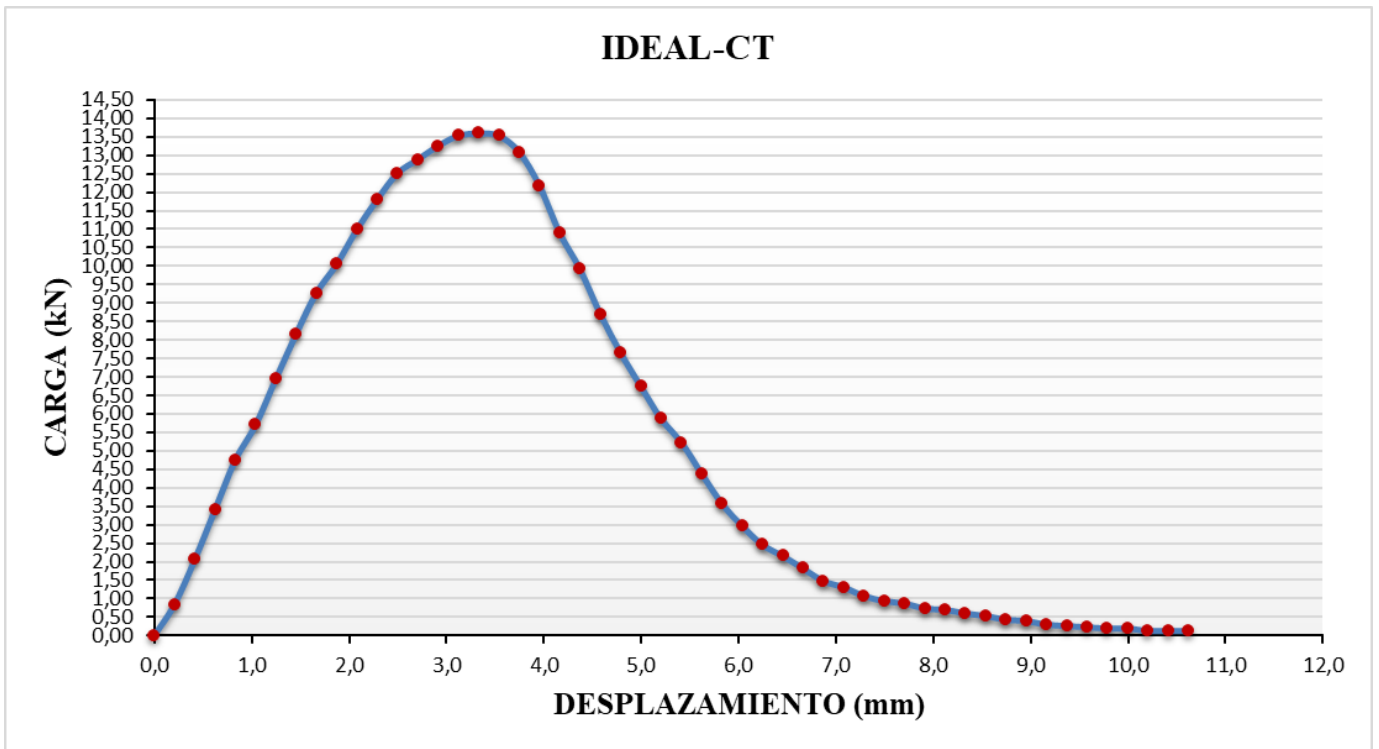
Wf (Joules)		60,7
D (mm)		150
t (mm)		63
Gf (Joules/m²)		6424
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,5	16,6
P85	4,3	14,1
P65	4,6	10,8
P75	4,4	12,4
l75/D		0,029
m75 (kN/mm)		11,04
CT index		17,3

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA CON POLÍMEROS. MUESTRA 2. LARGO PLAZO.



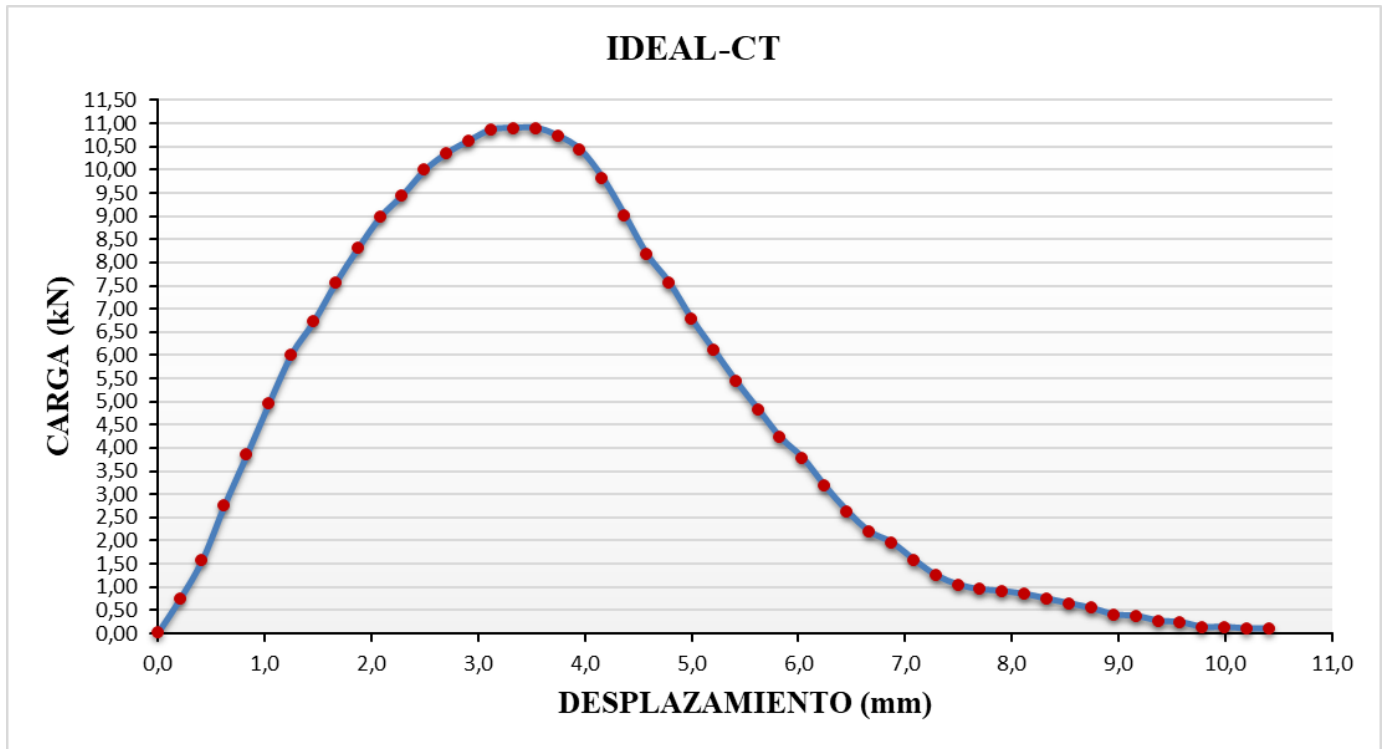
Wf (Joules)		54,0
D (mm)		150
t (mm)		65
Gf (Joules/m²)		5534
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,5	14,3
P85	4,2	12,1
P65	4,6	9,3
P75	4,4	10,7
l75/D		0,029
m75 (kN/mm)		7,14
CT index		23,9

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA CON POLÍMEROS. MUESTRA 3. LARGO PLAZO.



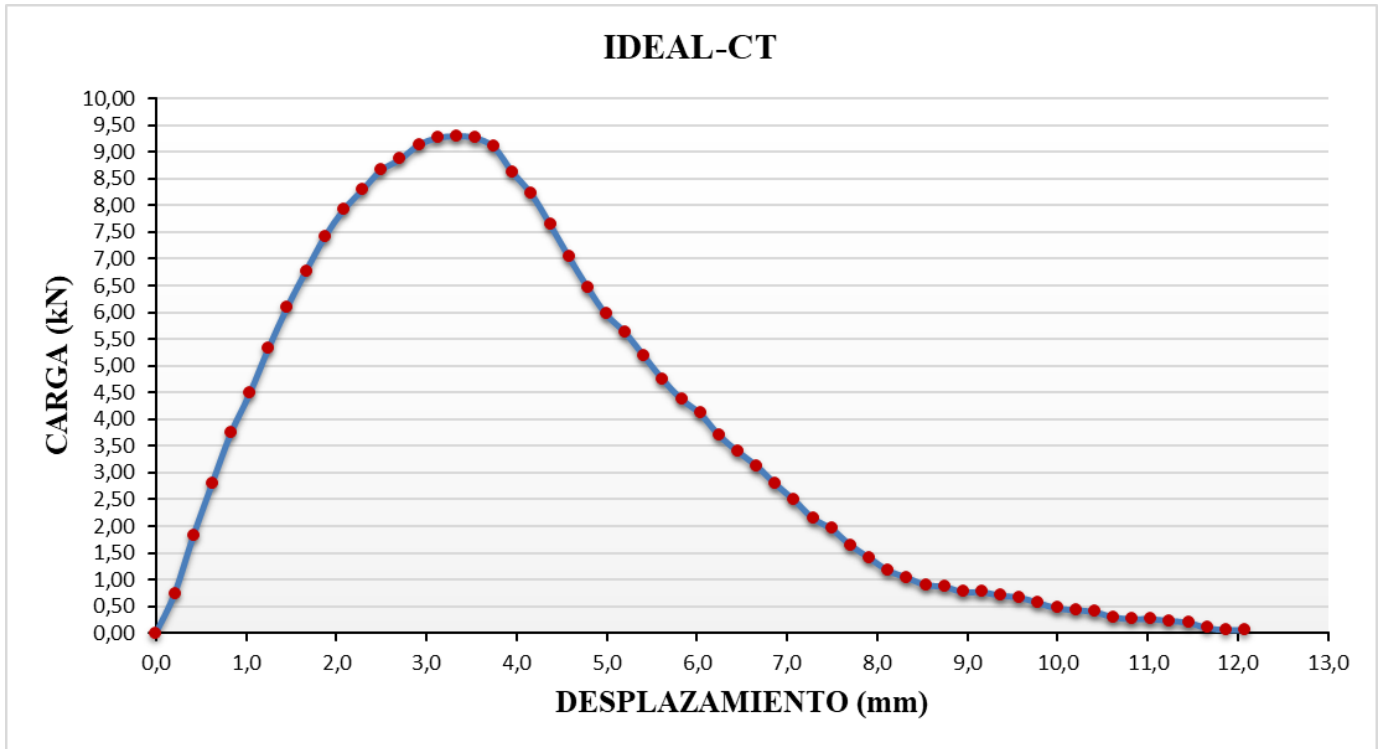
Wf (Joules)		54,5
D (mm)		150
t (mm)		64
Gf (Joules/m²)		5674
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,3	13,6
P85	4,1	11,6
P65	4,5	8,8
P75	4,3	10,2
l75/D		0,029
m75 (kN/mm)		6,79
CT index		24,7

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA CON FIBRAS. MUESTRA 1. LARGO PLAZO.



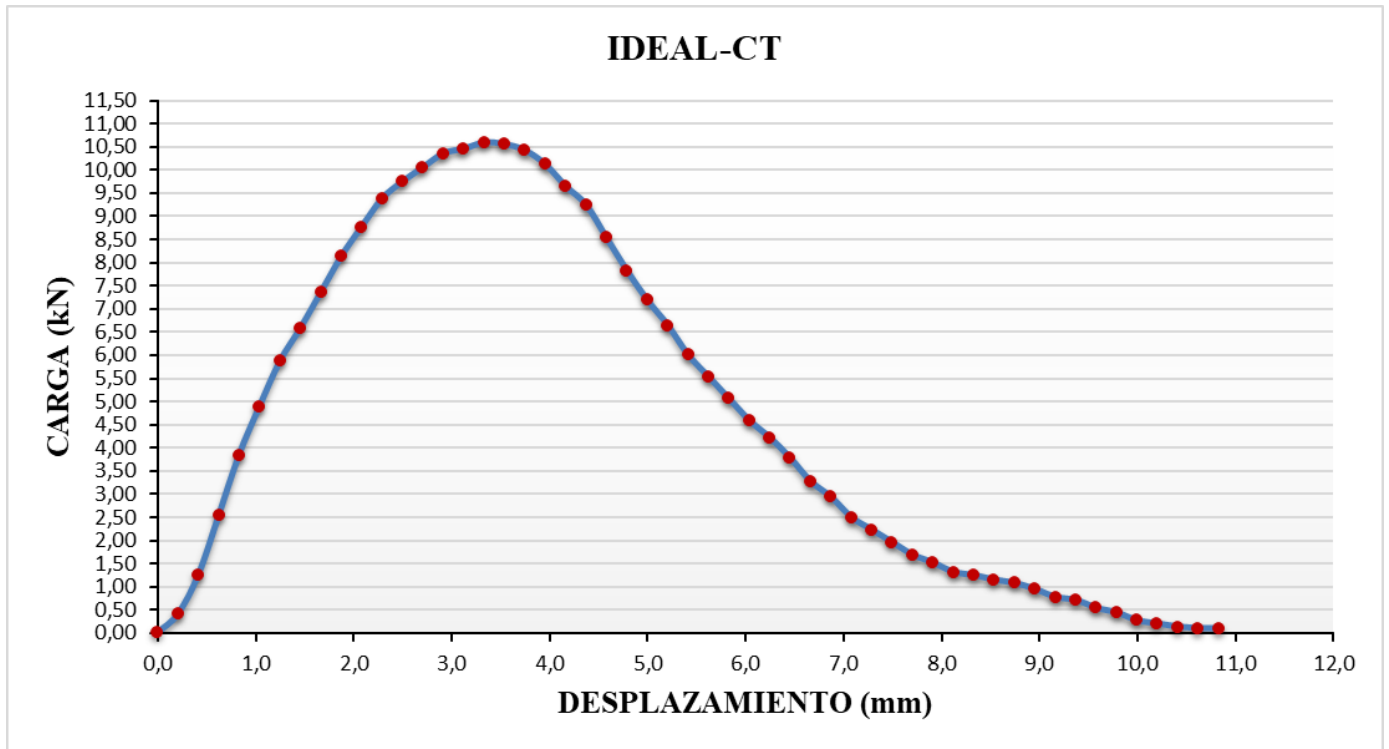
Wf (Joules)		48,2
D (mm)		150
t (mm)		63
Gf (Joules/m²)		5099
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,3	10,9
P85	4,2	9,3
P65	4,9	7,1
P75	4,5	8,2
I75/D		0,030
m75 (kN/mm)		3,11
CT index		50,0

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA CON FIBRAS. MUESTRA 2. LARGO PLAZO.



Wf (Joules)		45,8
D (mm)		150
t (mm)		62
Gf (Joules/m²)		4929
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,3	9,3
P85	4,2	7,9
P65	4,9	6,1
P75	4,6	7,0
l75/D		0,031
m75(kN/mm)		2,66
CT index		56,8

IDENTIFICACIÓN: MUESTRA CON FIBRAS. MUESTRA 3. LARGO PLAZO.



Wf (Joules)		50,9
D (mm)		150
t (mm)		62
Gf (Joules/m²)		5475
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,3	10,6
P85	4,4	9,0
P65	5,1	6,9
P75	4,8	7,9
l75/D		0,032
m75 (kN/mm)		3,26
CT index		53,2



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



**Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes**



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Romero Loayza, Emili Alejandra**, con **C.C: # 075067011-9** autora del trabajo de titulación: **Valoración experimental de soluciones para mejorar el índice de tolerancia al agrietamiento en mezclas asfálticas**, previo a la obtención del título de **Ingeniera 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, a los 21 días del mes de septiembre del año 2022

f. _____

Nombre: **Romero Loayza, Emili Alejandra**

C.C: **0750670119**



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Valoración experimental de soluciones para mejorar el índice de tolerancia al agrietamiento en mezclas asfálticas.		
AUTOR(ES)	Romero Loayza, Emili Alejandra		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Ing. Vila Romani, Rolando. PhD		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería Civil		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniera Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	21 de septiembre del 2022	No. DE PÁGINAS:	91
ÁREAS TEMÁTICAS:	Mezclas Asfálticas, Rejuvenecedores, Fibras, Polímeros, Asfalto, Pavimentos.		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Prueba IDEAL, CTIndex, Polímeros, Rejuvenecedores, Fibras.		

RESUMEN/ABSTRACT: Uno de los problemas que más impactan en el deterioro de nuestros pavimentos son sin dudas los agrietamientos en las capas asfálticas, asociados a las cargas aplicadas y al impacto de los factores climáticos. Sin embargo, el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) en sus especificaciones técnicas vigentes no recomienda o exige el empleo de alguna prueba básica para el control rutinario del agrietamiento. Es conocido que, en años recientes, investigaciones en EE.UU. han propuesto el empleo de la Prueba IDEAL que permite determinar el índice de tolerancia al agrietamiento (CT index), ya bajo norma ASTM. Basado en lo anterior el objetivo de este trabajo es valorar la resistencia al agrietamiento utilizando la prueba IDEAL sobre probetas envejecidas a corto y a largo plazo, en una mezcla asfáltica patrón a la que se le aplicarán tres soluciones para mejorar esa resistencia: asfaltos con polímeros, asfaltos con rejuvenecedores y fibras a la mezcla, lo que permitirá establecer comparaciones y valorar sus posibles comportamientos. Como resultado se comprueba que, si bien la mezcla patrón cumple de manera muy ajustada la exigencia de CT index mayor a 65, el cual es válido para mezclas densas envejecidas a corto plazo y a 25°C, el empleo del rejuvenecedor muestra grandes potencialidades, alcanzando valores promedios muy elevados de CT index tanto a corto como a largo plazo, 80,9 y 68,0 respectivamente. El empleo de fibras no tuvo mayor afectación y la utilización de polímeros resultó negativa, tal vez por los procedimientos de mezclado.

ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
CONTACTO CON AUTORES:	Teléfono: +593-86397041	E-mail: emilyr12@hotmail.com
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Clara Glas Cevallos	
	Teléfono: +593-4 -2206956	
	E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec	

SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA

Nº. DE REGISTRO (en base a datos):	
Nº. DE CLASIFICACIÓN:	
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):	