

**Universidad de Costa Rica**

**Facultad de Ingeniería**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Correlación de los resultados de ensayo de flexión en 4 puntos con distintos  
parámetros del ensayo de flexión semicircular**

**Trabajo de Graduación**

Para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

**Gianluca Corazzari Herrera**

Director de Proyecto de Graduación:

**Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio



## Hoja de aprobación

---

Ing. José Pablo Aguiar Moya, PhD.

Director

---

Ing. Fabián Elizondo Arrieta, MBA

Asesor

---

Ing. Mónica Jiménez Acuña

Asesora

---

Gianluca Corazzari Herrera

Autor

## **Derechos de autor**

**El suscrito, Gianluca Corazzari Herrera**, cédula 1-1695-0915, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **B52132**, manifiesta que es autor del **Proyecto Final de Graduación Correlación de los resultados de ensayo de flexión en 4 puntos con distintos parámetros del ensayo de flexión semicircular**, bajo la Dirección del **Ph.D José Pablo Aguiar Moya**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

**Nota:** De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mi familia, especialmente a mis padres, hermano y a mi abuela Leida. Su apoyo incondicional a lo largo de este camino ha sido fundamental para culminar esta etapa. Gracias por su paciencia y por su infinito cariño.

## **Agradecimiento**

A mi familia: Eric, Evelyn, Stefano, Leida, Hazel, Marionne y Giovanni. Este logro también es de ustedes.

A mi director, José Pablo Aguiar Moya, por su guía y el tiempo dedicado a apoyarme durante esta investigación. Además, quiero agradecerle el tiempo que fue mi profesor y jefe en el LanammeUCR, en el que siempre destacó su amabilidad y respeto.

A mis asesores, Mónica Jiménez Acuña y Fabián Elizondo Arrieta, por su apoyo y comentarios que me guiaron durante este proceso.

A mis compañeros y amigos, que fui conociendo a lo largo de los últimos años. A Marín, Priscilla, María José, Leonardo, Dianlly, Santiago, María Paula, Aura, Eric, Padilla, Diego, Adrián y Roberto; así como a todos los compañeros con los que tuve el gusto de trabajar y conocer durante la carrera y universidad. Definitivamente, hicieron que mi paso por la Universidad de Costa Rica fuera mucho más alegre.

## Tabla de contenidos

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Justificación .....	1
1.1.1 Problema específico .....	1
1.1.2 Importancia.....	2
1.2 Antecedentes teóricos y prácticos del problema.....	3
1.3 Objetivos .....	5
1.3.1 Objetivo general .....	5
1.3.2 Objetivos específicos .....	5
1.4 Delimitación del problema .....	6
1.4.1 Alcance .....	6
1.4.2 Limitaciones .....	6
1.5 Metodología .....	7
1.5.1 Etapa 1: Revisión bibliográfica.....	7
1.5.2 Etapa 2: Resultados de ensayos previos.....	7
1.5.3 Etapa 3: Correlación de datos .....	8
1.5.4 Etapa 4: Elaboración del informe de resultados.....	8
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	9
2.1 Pavimento flexible .....	9
2.2 Mezcla asfáltica en caliente (MAC).....	10
2.3 Principales deterioros en los pavimentos flexibles .....	11
2.3.1 Deformación permanente .....	11
2.3.2 Agrietamiento térmico .....	12
2.3.3 Daño por humedad .....	13
2.3.4 Fatiga .....	13
2.4 Rigidez a flexión .....	16
2.5 Mecánica de fractura.....	17
2.5.1 Intensidad de esfuerzo (K).....	17
2.5.2 Tasa de liberación de energía (G).....	18
2.5.3 J-integral.....	19
2.6 Ensayos de fatiga y fractura para MAC .....	19
2.6.1 Ensayo de viga a flexión en 4 puntos.....	19
2.6.2 Ensayo de flexión semi-circular (SCB) .....	23

2.6.3	Overlay Test (Tex-248-F).....	24
2.7	Índices de fractura para flexión semicircular (SCB) .....	25
2.7.1	Energía de fractura ( $Gf$ ).....	25
2.7.2	Energía de deformación (U) .....	27
2.7.3	Tasa crítica de liberación de energía de deformación ( $J_c$ ).....	28
2.7.4	Índice de Flexibilidad de Illinois (FI) .....	29
2.7.5	Índice de resistencia a la fractura (CRI) .....	30
2.7.6	Índice de dureza (TI) .....	31
	CAPÍTULO III: DATOS EXISTENTES.....	32
3.1	Datos LanammeUCR .....	32
3.2	Tipos de mezcla asfáltica.....	32
3.3	Granulometría del agregado extraído de la mezcla asfáltica (AASHTO T30 / ASTM D5444) 33	
3.4	Contenido de asfalto en mezcla asfáltica por ignición (INTE C9 / AASHTO T308 / ASTM D6307).....	34
3.5	Porcentaje de vacíos de aire en mezcla asfáltica de los especímenes compactados.....	35
3.6	Clasificación de la granulometría de los agregados según el Diseño de mezcla volumétrico Superpave (AASHTO M 323) .....	36
3.7	Parámetros volumétricos de la mezcla .....	38
3.8	Resultados del ensayo de flexión en 4 puntos .....	38
3.9	Resultados del ensayo de flexión semicircular .....	41
	CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	42
4.1	Relación de los parámetros volumétricos con los parámetros de susceptibilidad a la fatiga y agrietamiento.....	42
4.1.1	Parámetros volumétricos analizados .....	42
4.1.2	Relación de los parámetros volumétricos con los resultados del ensayo de flexión en 4 puntos43	
4.1.3	Relación de los parámetros volumétricos con los resultados de flexión semicircular	52
4.1.4	Análisis de correlación entre los parámetros volumétricos de la mezcla y los resultados de los ensayos de susceptibilidad a la fatiga y agrietamiento .....	56
4.2	Variabilidad de los resultados de ensayo.....	61
4.3	Susceptibilidad al agrietamiento por fatiga de las mezclas convencionales y modificadas 63	
4.4	Correlación de los resultados de Flexión en 4 puntos con los de Flexión semicircular ....	64
	CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	71
5.1	Conclusiones .....	71

5.2 Recomendaciones.....	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
APÉNDICES .....	78
Apéndice A. Caracterización de los materiales.....	78
Apéndice B. Índices del ensayo SCB.....	79



## Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología del proyecto .....	7
Figura 2. Composición de la mezcla asfáltica .....	10
Figura 3. Esquema de la deformación permanente: sección transversal (sup.) y vista en planta (inf.) .....	12
Figura 4. Esquema del agrietamiento térmico .....	13
Figura 5. Mecanismo de funcionamiento de agrietamiento por fatiga .....	14
Figura 6. Esquema de la evolución de la fatiga de arriba hacia abajo .....	15
Figura 7. Mecanismo de fractura por fatiga de arriba hacia abajo en MAC de poco espesor .	16
Figura 8. Modos de carga que generan fractura .....	17
Figura 9. Esquema del ensayo de flexión en 4 puntos (AASHTO T321) .....	20
Figura 10. Tipos de carga para el ensayo de viga a flexión en 4 puntos .....	21
Figura 11. Curvas de fatiga obtenidas utilizando esfuerzo constante y deformación constante para una misma mezcla .....	22
Figura 12. Gráfica típica de rigidez en función del número de ciclo de carga.....	22
Figura 13. Esquema del ensayo de flexión semicircular (ASTM D8044).....	24
Figura 14. Esquema del ensayo Overlay .....	24
Figura 15. Energía de fractura .....	25
Figura 16. Curvas de carga deformación de un material frágil y dúctil.....	26
Figura 17. Energía de deformación .....	27
Figura 18. Gráfica de profundidad de ranura vs. energía de deformación (M01).....	28
Figura 19. Resultados que limitan la aplicación del Índice de Flexibilidad.....	30
Figura 20. Representación gráfica del Índice de dureza .....	31
Figura 21. Tipos de MAC incluidos en los resultados del LanammeUCR .....	33
Figura 22. Tamaño máximo nominal del agregado en las muestras del LanammeUCR.....	33
Figura 23. Curvas granulométricas del agregado extraído de las mezclas asfálticas .....	34
Figura 24. Contenido de asfalto en las muestras del LanammeUCR.....	35
Figura 25. Distribución de los vacíos de aire en los resultados del LanammeUCR .....	35
Figura 26. Puntos de control Superpave y tamiz primario de control para las mezclas con TMN de 19 mm.....	36
Figura 27. Puntos de control Superpave y tamiz primario de control para las mezclas con TMN de 12.5 mm.....	37

Figura 28. Número de ciclos 400 $\mu$ s (AASHTO T 321) vs. parámetros volumétricos .....	44
Figura 29. Número de ciclos 600 $\mu$ s (AASHTO T 321) vs. parámetros volumétricos .....	45
Figura 30. Rigidez normalizada 400 $\mu$ s (AASHTO T 321) vs. parámetros volumétricos .....	46
Figura 31. Rigidez normalizada 600 $\mu$ s (AASHTO T 321) vs. parámetros volumétricos .....	47
Figura 32. Energía disipada 400 ms (AASHTO T 321) vs. parámetros volumétricos .....	48
Figura 33. Energía disipada 600 ms (AASHTO T 321) vs. parámetros volumétricos .....	49
Figura 34. Pendiente de la fase II 400 ms (AASHTO T 321) vs. parámetros volumétricos ....	50
Figura 35. Pendiente de la fase II 600 ms (AASHTO T 321) vs. parámetros volumétricos ....	51
Figura 36. Energía de fractura (SCB) vs. parámetros volumétricos.....	52
Figura 37. Tasa crítica de liberación de energía (SCB) vs. parámetros volumétricos.....	53
Figura 38. Índice de dureza (SCB) vs. parámetros volumétricos .....	54
Figura 39. Índice de flexibilidad (SCB) vs. parámetros volumétricos.....	55
Figura 40. Índice de resistencia a la fractura (SCB) vs. parámetros volumétricos .....	56
Figura 41. Diagramas de cajas y bigotes para los coeficientes de variación .....	61
Figura 42. Resultados de flexión en 4 puntos (No. ciclos) vs. resultados de flexión semicircular .....	65
Figura 43. Resultados de flexión en 4 puntos (Rigidez normalizada) vs. resultados de flexión semicircular .....	66
Figura 44. Resultados de flexión en 4 puntos (Energía disipada) vs. resultados de flexión semicircular .....	67
Figura 45. Resultados de flexión en 4 puntos (Pendiente fase II) vs. resultados de flexión semicircular .....	68

## Índice de cuadros

Cuadro 1. Detalle de los resultados LanammeUCR .....	32
Cuadro 2. Parámetros volumétricos de las mezclas asfálticas analizadas .....	38
Cuadro 3. Resultados del ensayo de flexión en 4 puntos.....	40
Cuadro 4. Resultados del ensayo de flexión semicircular .....	41
Cuadro 5. Comportamiento esperado de la resistencia a la fatiga en función de los parámetros volumétricos.....	43
Cuadro 6. Coeficientes de correlación de Pearson para los resultados de flexión en 4 puntos (400 $\mu$ s) en función de los parámetros volumétricos de la MAC .....	58
Cuadro 7. Coeficientes de correlación de Pearson para los resultados de flexión en 4 puntos (600 $\mu$ s) en función de los parámetros volumétricos de la MAC .....	58
Cuadro 8. Coeficientes de correlación de Pearson para los resultados de flexión semicircular en función de los parámetros volumétricos de la MAC.....	59
Cuadro 9. Valores P de la prueba t para la regresión entre los resultados de flexión en 4 puntos y los parámetros volumétricos de la MAC .....	60
Cuadro 10. Valores P de la prueba t para la regresión entre los resultados de flexión semicircular y los parámetros volumétricos de la MAC .....	60
Cuadro 11. Coeficientes de variación para los resultados de los ensayos de fatiga .....	61
Cuadro 12. Coeficientes de variación por muestra, para ambos ensayos .....	62
Cuadro 13. Resultados de la prueba de diferencia de medias .....	63
Cuadro 14. Valores p para la correlación entre los resultados de flexión en 4 puntos y los de flexión semicircular.....	69
Cuadro 15. Coeficientes de determinación ( $R^2$ ) para la regresión lineal entre los resultados de flexión en 4 puntos y los de flexión semicircular.....	70

## RESUMEN

Corazzari Herrera, Gianluca

Correlación de los resultados de ensayo de flexión en 4 puntos con distintos parámetros del ensayo de flexión semicircular

Proyecto de graduación – Ingeniería Civil – San José, C.R.:

G. Corazzari H., 2021

xi, 77, 8, ils. col. – 39

Este proyecto se enfocó en analizar la correlación entre los resultados del ensayo de flexión en 4 puntos y el ensayo de flexión semicircular (SCB), así como la relación de estos resultados de ensayo con los parámetros volumétricos de la mezcla y un análisis de la variabilidad de estos procedimientos. La finalidad de este trabajo era generar límites de fatiga de mezcla asfáltica, congruentes con los establecidos en el CR-2010 para el ensayo de flexión en 4 puntos, pero, en términos del ensayo SCB.

Para esto, se realizó una revisión del estado de la cuestión en materia de fatiga de mezcla asfáltica y de la relación de estos resultados de ensayo. Seguidamente se recolectaron resultados de ensayo disponibles en el LanammeUCR para aquellas muestras a las que se les haya realizado tanto el ensayo de flexión en 4 puntos como el ensayo de flexión semicircular. Una vez se obtuvieron los datos, se procedió a analizar la variabilidad de los resultados de ensayo, así como sus correlaciones entre sí y con los parámetros volumétricos.

Se encontró que los resultados de flexión semicircular tienen menor variabilidad que los resultados de flexión en 4 puntos, siendo los menos variables la energía de deformación y el índice de resistencia al agrietamiento. Los resultados de flexión semicircular también mostraron tendencias esperadas respecto a los parámetros volumétricos de la mezcla, mientras que los de flexión en 4 puntos mostraron una débil correlación. También se determinó que los resultados de flexión semicircular y los de flexión en 4 puntos siguen una correlación esperada. Sin embargo, debido a la gran dispersión de estas correlaciones, se decidió que no era adecuado utilizar los modelos encontrados para predecir los resultados del ensayo SCB en función del ensayo de flexión en 4 puntos y, por consiguiente, generar los límites del CR-2010 en términos de los indicadores del ensayo SCB. G.C.H.

FATIGA EN PAVIMENTOS FLEXIBLES, ENSAYO DE VIGA A FLEXIÓN EN 4 PUNTOS, ENSAYO DE FLEXIÓN SEMICIRCULAR, PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS, VARIABILIDAD, CORRELACIÓN.

Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D

Escuela de Ingeniería Civil

# **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Justificación**

### ***1.1.1 Problema específico***

En Costa Rica para el año 2019, cerca de un 39 % de la Red Vial Nacional (aproximadamente 2042 km) se encontraba en condiciones de deterioro que afectaban tanto su funcionalidad como su capacidad estructural. En estas secciones las condiciones funcionales de la superficie de rodamiento tenían deterioros que afectan la velocidad de tránsito y presentan una condición estructural menor o igual al 60 % de vida estructural remanente (Sanabria, Barrantes, & Elizondo, 2019).

Entre enero del 2016 y diciembre del 2017, el gobierno invirtió cerca de 177 mil millones de colones en el mantenimiento de la Red Vial Nacional (Sanabria, Barrantes, & Elizondo, 2019). Ante las condiciones actuales de la Red Vial Nacional y las elevadas inversiones en mantenimiento hechas por el gobierno, surge la necesidad de encontrar no solo mejores formas de diseñar y construir infraestructura vial, sino también de mejorar los procesos de control de calidad de los materiales utilizados.

En los pavimentos flexibles, el agrietamiento por fatiga de la mezcla asfáltica en caliente (MAC) es uno de los principales mecanismos de deterioro. Por esta razón, la resistencia a la fatiga de las MAC es un parámetro de suma importancia para el diseño de este tipo de estructuras. Este tipo de deterioro es de carácter estructural y, una vez que el agrietamiento se muestra en la superficie, puede dar pie a otro tipo de deterioros como el desprendimiento de agregado, disminución de la capacidad mecánica en los materiales granulares de base y subbase por condiciones de alta humedad, y el bombeo de finos en estas capas.

Lo anterior hace que la adecuada determinación de la vida a fatiga de las mezclas asfálticas sea muy importante. Por lo anterior, es de suma importancia mejorar la capacidad de valorar y discriminar la susceptibilidad al fisuramiento por fatiga de las MAC, especialmente en aquellas mezclas que son modificadas para mejorar su desempeño y aumentar su vida útil en condiciones de alta demanda de tránsito. Para esto, en Costa Rica y en el mundo se ha empleado mayoritariamente el método de ensayo de vigas de mezcla asfáltica compactada

sometidas a flexión en 4 puntos. Este procedimiento se detalla en estándares como AASHTO T321 o ASTM D7640.

Sin embargo, este procedimiento de ensayo tiene condiciones que limitan su uso para el control de calidad de las mezclas asfálticas. Entre estas condiciones están la elevada cantidad de material y tiempo necesarios para elaborar los especímenes, la necesidad de contar con equipo dinámico específico para realizar este ensayo y el tiempo que toma llevar a cabo el ensayo en mezclas muy resistentes a la fatiga o que se realizan a niveles de esfuerzo o deformación bajos.

Ante esta problemática, el ensayo de flexión semicircular (SCB) surge como una alternativa que permitiría evaluar el agrietamiento de las mezclas asfálticas de manera más expedita, utilizando equipo disponible en la mayoría de laboratorios de materiales y control de calidad. Debido al auge de este método de ensayo, ya se han generado procedimientos estándar para su aplicación utilizando especímenes semicirculares de 150 mm de diámetro (como las normas AASHTO TP105, AASHTO TP124 o ASTM D8044).

Adicionalmente, la normativa costarricense establece requerimientos de resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas utilizando el ensayo de flexión en 4 puntos en el Manual de especificaciones Generales para la Construcción de Caminos Carreteras y Puentes (CR-2010) Sección 401.03 *Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall* y 402.03 *Diseño de mezcla Superpave®*. Por lo tanto, para poder utilizar el ensayo de flexión semicircular (SCB) en el proceso de control de calidad es necesario establecer relaciones entre los resultados de este ensayo y el ensayo clásico de flexión en 4 puntos.

### **1.1.2 Importancia**

Debido a los altos costos que tiene la construcción y el mantenimiento de la infraestructura vial en Costa Rica, es sumamente importante asegurar que los materiales utilizados puedan resistir adecuadamente las cargas de tránsito durante toda la vida útil de la estructura de pavimento.

Consecuentemente, debido a la severidad de las consecuencias del daño por fatiga en la mezcla asfáltica, se vuelve muy relevante una adecuada y oportuna determinación de la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga de la mezcla asfáltica no sólo durante el diseño de mezcla, sino durante el control de calidad en obra.

Para satisfacer esta necesidad, en Costa Rica la sección 401.03 y 402.03 del Manual de especificaciones Generales para la Construcción de Caminos Carreteras y Puentes (CR-2010)

establece los límites para fatiga utilizando el procedimiento estándar AASHTO T321-07 de flexión repetida en vigas apoyadas en 4 puntos, que implementa el criterio de falla del 50 % de la rigidez.

La normativa costarricense exige completar desde 300000 repeticiones o 450000 repeticiones (a 400  $\mu$ s) en el ensayo de fisuramiento por fatiga en viga a flexión en 4 puntos (como requisito para las MAC tipo D y C, respectivamente), que, de acuerdo con las características dinámicas del ensayo, tomaría aproximadamente 14 horas en completarse para las mezclas tipo C, y 9.5 horas para las mezclas tipo D (sin incluir el tiempo necesario para el muestreo, elaboración y envejecimiento de los especímenes).

Estas duraciones de ensayo multiplicadas por la cantidad de réplicas (mínimo 4, de acuerdo con el CR-2010) y sumadas a los largos periodos de tiempo que se requieren para el muestreo, preparación de especímenes y condicionamiento de los mismos, hacen que el ensayo de flexión en 4 puntos tenga limitaciones a la hora de aplicarlo en el proceso de control de calidad.

Por esta razón, desarrollar límites para fatiga a partir de un ensayo estático, de menor duración y que se pueda elaborar con equipo común en laboratorios de materiales debería ser una prioridad para mejorar las especificaciones actuales y, por consiguiente, mejorar también el proceso de control de calidad en obra. Si la duración del proceso de muestreo y condicionamiento es igual para ambos ensayos, el ensayo SCB posee ventajas prácticas a la hora de moldear los especímenes con el compactador giratorio Superpave y en los tiempos de falla mucho más rápidos. El ensayo de flexión semicircular (SCB, ASTM D8044) se ha utilizado de manera satisfactoria para evaluar el desempeño ante la fractura de las mezclas asfálticas y se presenta como una alternativa para enriquecer la normativa nacional existente en materia de fatiga de mezclas asfálticas.

## **1.2 Antecedentes teóricos y prácticos del problema**

Tang (2014) estudió la idoneidad del ensayo de flexión semicircular (SCB) para evaluar la resistencia a la fractura de las mezclas asfálticas y mezclas con adición de pavimento asfáltico reciclado (RAP). Además, se llevaron a cabo ensayos clásicos de fatiga de mezclas asfálticas (flexión en 4 puntos) y del ligante. Tang encontró que para ensayos a temperaturas mayores a -20 °C, el ensayo SCB debería llevarse a cabo utilizando especímenes con una ranura pequeña.

Nsengiyumva (2015) investigó la sensibilidad del ensayo de flexión semicircular (SCB) a cambios en variables de ensayo como el espesor de los especímenes, longitud de ranura, tasa de carga, cantidad de repeticiones de ensayo y temperatura de ensayo. En sus resultados encontró que los ensayos cuyos especímenes tienen espesores de 40 mm a 60 mm, 5 a 6 repeticiones, corte de 5 mm y una tasa de deformación entre 1 mm/min y 5 mm/min son los que tienen una menor variabilidad en sus resultados.

Arrieta (2016) realizó una comparación de procedimientos de ensayo para evaluar la vida a fatiga de las mezclas asfálticas. Utilizó 4 tipos de mezcla (control, modificada con polímero SBS, modificada con polímero SBS y antidesnudante, y modificada con polímero SBS y cal) para realizar los ensayos de flexión en 4 puntos, ensayo *Overlay* y el ensayo dinámico de flexión semicircular (RSCB). A partir de estos ensayos, concluyó que los resultados del ensayo *Overlay* y los del ensayo RSCB arrojaban resultados similares de comportamiento a la fatiga; mientras que los ensayos de flexión en 4 puntos arrojaban resultados inadecuados para algunos tipos de mezcla.

Cao, Mohammad, Elseifi, Cooper y Saadeh (2018) correlacionaron la resistencia a la fractura de una mezcla asfáltica con su desempeño *in situ*. Para esto, se predijo el desempeño ante el agrietamiento por fatiga de pavimentos asfálticos basándose en resultados del ensayo de flexión semicircular (SCB) a temperaturas intermedias. Esta predicción se llevó a cabo desde el enfoque de la tasa crítica de liberación de energía de deformación ( $J_c$ ) que se puede obtener con los resultados del ensayo SCB. Con este parámetro se calibró el modelo genérico de fatiga propuesto por AASHTO, modificado para considerar la tasa crítica de liberación de energía de deformación.

Kim, Mohammad y Elseifi (2012) investigaron la resistencia a la fractura a temperaturas intermedias mediante el ensayo de flexión semicircular y tensión indirecta. También se evaluaros los efectos de factores del proceso de diseño, como tecnología de producción, grados del ligante, envejecimiento de los especímenes y contenido de RAP. Se encontró una buena correlación entre el parámetro  $J_c$  con los datos de agrietamiento en campo.

Lu, Saleh y Nguyen (2020) reconocen la utilidad del ensayo de flexión semicircular y las versiones estandarizadas de este, utilizando especímenes de 150 mm de diámetro, para estudiar la resistencia a la fractura a bajas temperaturas y la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga. En esta investigación se pretende evaluar el potencial que tiene el ensayo de flexión



semicircular utilizando especímenes de 100 mm de diámetro, y los resultados del ensayo SCB se correlacionan moderadamente con los de flexión en 4 puntos, obteniendo valores del coeficiente de determinación de entre 0.62 y 0.78. Los resultados del ensayo SCB se analizan desde el enfoque del Índice de Flexibilidad (FI), propuesto por Ozer et. al. (2018).

Mora (2020) analizó la variabilidad asociada a procedimientos de ensayo de la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga. Para esto llevó a cabo ensayos *Overlay*, de flexión semicircular (SCB) y de viga sometida a flexión en 4 puntos en tres tipos de mezcla asfáltica producidas en planta en Costa Rica. Con este trabajo concluyó que el ensayo con mayor variabilidad en sus resultados fue el de flexión en 4 puntos. También concluyó que el ensayo SCB es el más práctico desde un punto de vista de facilidad de elaboración del espécimen y tiempo de ensayo. Finalmente, destacó que la variabilidad de los resultados de ensayo depende en gran manera de las propiedades de la mezcla asfáltica ensayada, como el contenido de asfalto y el porcentaje de vacíos. Se debe considerar que los ensayos de *Overlay* y de flexión semicircular no evalúan directamente el comportamiento a fatiga del material, pero son ensayos de agrietamiento que se pueden utilizar para evaluar indirectamente la susceptibilidad a agrietamiento por fatiga.

Algunos autores, como Huang, Shu y Vukosavljevic (2011), Eljairi y Saadeh (2011), Adhikari y You (2010), Chaiwat (2010) y Pramesti, et. al. (2013), han reportado que el ensayo de viga a flexión en 4 puntos permite simular de manera adecuada las condiciones de carga cíclica que experimentan los pavimentos y que es una opción viable para la evaluación de la vida a fatiga de la mezcla asfáltica.

### **1.3 Objetivos**

#### ***1.3.1 Objetivo general***

Definir límites para fatiga, congruentes con los previamente establecidos en la normativa costarricense, mediante la correlación de los resultados del ensayo de flexión en 4 puntos (AASHTO T321) con los del ensayo de flexión semicircular (ASTM D8044).

#### ***1.3.2 Objetivos específicos***

- Estudiar, mediante una revisión bibliográfica, las investigaciones previas que analizan las alternativas al ensayo de flexión en 4 puntos (AASHTO T321) y la aplicación del ensayo de flexión semicircular (ASTM D8044).

- Recolectar resultados de ensayos de flexión en 4 puntos (AASHTO T321) y flexión semicircular (ASTM D8044) realizados a una misma mezcla asfáltica en caliente.
- Evaluar los indicadores de agrietamiento que se obtienen mediante el ensayo de flexión semicircular (ASTM D8044) y flexión en 4 puntos (AASHTO T321) en función de su correlación con los parámetros volumétricos de la mezcla.
- Evaluar los indicadores de agrietamiento que se obtienen mediante el ensayo de flexión semicircular (ASTM D8044) en función de su correlación con los resultados obtenidos con la aplicación del ensayo de flexión en 4 puntos (AASHTO T321).

## **1.4 Delimitación del problema**

### ***1.4.1 Alcance***

Este proyecto analizó la correlación entre los resultados del ensayo de flexión semicircular y los del ensayo de flexión en 4 puntos. No se encontró una correlación suficiente para definir, con la precisión necesaria, los límites preliminares para la fatiga de mezclas asfálticas utilizando el ensayo de flexión semicircular (SCB). Esta tarea implicó una revisión de los resultados de ensayos previamente realizados en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR).

Se analizó la relación entre los resultados de los ensayos de flexión semicircular y flexión en 4 puntos con los parámetros volumétricos de las mezclas. También se estudió la variabilidad de los distintos indicadores de los ensayos de flexión semicircular y flexión en 4 puntos.

### ***1.4.2 Limitaciones***

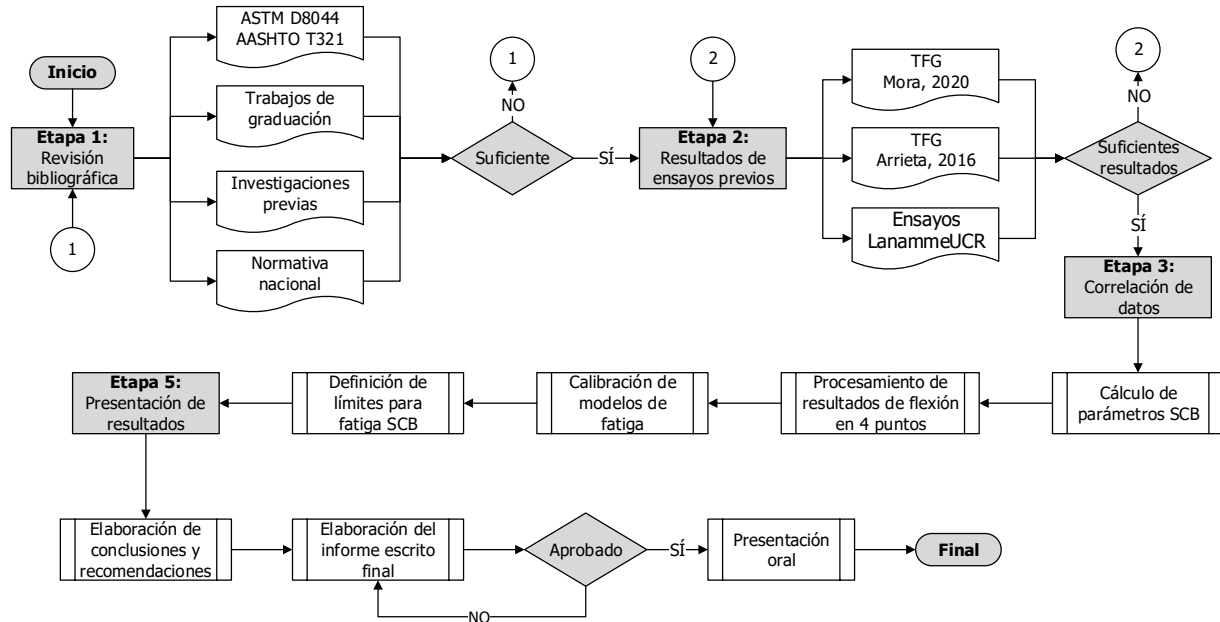
La obtención de los resultados de ensayo existentes en las bases de datos del LanammeUCR está condicionada a la colaboración del laboratorio y sus distintas unidades. Estos resultados son de vital importancia para el desarrollo de la investigación ya que, debido a la crisis sanitaria y a las limitaciones de uso de las instalaciones de la universidad a raíz de la pandemia Covid-19, no se llevará a cabo ningún componente experimental que permitiera obtener resultados de ensayo propios.

Todas las mezclas utilizadas para este proyecto fueron producidas en planta, lo que implicó que algunas de las características de la mezcla se basaron en información proveniente de los informes de diseño de mezcla proporcionados por el fabricante. Por ejemplo, no se contó con

información verificada por el laboratorio sobre el proceso de modificación, dosificaciones y modificante utilizado. También se utilizaron características de los agregados que fueron proporcionadas por el fabricante.

## 1.5 Metodología

La metodología utilizada en esta investigación se muestra en la Figura 1.



**Figura 1.** Diagrama de flujo de la metodología del proyecto

### 1.5.1 Etapa 1: Revisión bibliográfica

En esta etapa se realizó una revisión bibliográfica que permitió comprender a profundidad el fenómeno de la fatiga en mezclas asfálticas y los ensayos de laboratorio que permiten evaluar la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga de estas. También se revisaron trabajos de graduación e investigaciones previas que estudian los resultados de ambos procedimientos de ensayo relacionados con la evaluación de la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga de las mezclas asfálticas. De manera similar, se estudió la normativa costarricense en materia de fatiga de mezclas asfálticas.

### 1.5.2 Etapa 2: Resultados de ensayos previos

Como parte de los insumos para la etapa 3 de este trabajo, se recopilaron los resultados de ensayos de flexión en 4 puntos y flexión semicircular (SCB) que se hayan realizado a una misma mezcla asfáltica. Estos resultados se obtuvieron de los resultados de ensayos que el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR).

### ***1.5.3 Etapa 3: Correlación de datos***

En esta etapa se utilizaron los insumos aportados por la etapa 2 para estudiar la correlación entre los resultados del ensayo de flexión en 4 puntos con los del ensayo de flexión semicircular. No se encontraron correlaciones satisfactorias que permitieran redefinir los límites de fatiga establecidos en la normativa costarricense en términos de los resultados del ensayo de flexión semicircular.

### ***1.5.4 Etapa 4: Elaboración del informe de resultados***

En la última etapa se reportaron, en el informe escrito final, los resultados de la investigación, conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Pavimento flexible**

Un pavimento flexible es un sistema complejo conformado por capas de distintos materiales, incluyendo materiales granulares y bituminosos, que permiten distribuir las cargas de tránsito sobre la subrasante. Una estructura de pavimento suele estar sujeta a condiciones variables de tránsito, carga y ambiente (Kim R. Y., 2009).

En un pavimento flexible convencional, se colocan los mejores materiales en las capas superiores donde la intensidad de los esfuerzos de tránsito es mayor, y los materiales de menor calidad se colocan en la parte inferior donde los esfuerzos de tránsito ya han sido disipados. La utilización de materiales de mayor y menor calidad en una misma estructura de pavimentos busca optimizar económicamente el diseño, bajo la premisa de que los materiales de menor calidad son más abundantes y accesibles, mientras que aquellos de mayor calidad también tendrán mayor precio (Huang Y. H., 2004).

Una estructura de pavimento flexible tradicionalmente está compuesta por las capas que se detallan a continuación, sin embargo, una o más de estas capas podrían omitirse si los requerimientos de tránsito o razones económicas lo justifican (Huang Y. H., 2004).

Sello: tratamiento asfáltico superficial de poco espesor que contribuye a la impermeabilización de la estructura y provee protección ante el desgaste a los agregados de la capa de rodamiento de manera que se mejora la resistencia al deslizamiento de los vehículos. El sello asfáltico puede estar cubierto de agregados.

Capa de rodamiento: una capa con mezcla asfáltica en caliente densa, de manera que sea resistente al ahuellamiento. Debe proveer buena resistencia al deslizamiento e impermeabilizar la estructura de pavimento.

Riego de liga: aplicación de asfalto o emulsión asfáltica cuya finalidad es asegurar la adecuada adherencia entre capas de MAC, o una capa de MAC y una superficie de concreto hidráulico.

Carpeta asfáltica: la carpeta asfáltica es una capa de mezcla asfáltica en caliente adicional a la capa de rodamiento. Usualmente se incluye otra capa de MAC cuando la capa diseñada tiene gran espesor y requiere ser dividida para su compactación; o cuando se busca mejorar

económicamente el diseño, pues en esta capa se pueden utilizar mezclas menos densas y con agregado de mayor tamaño que en la capa de rodamiento.

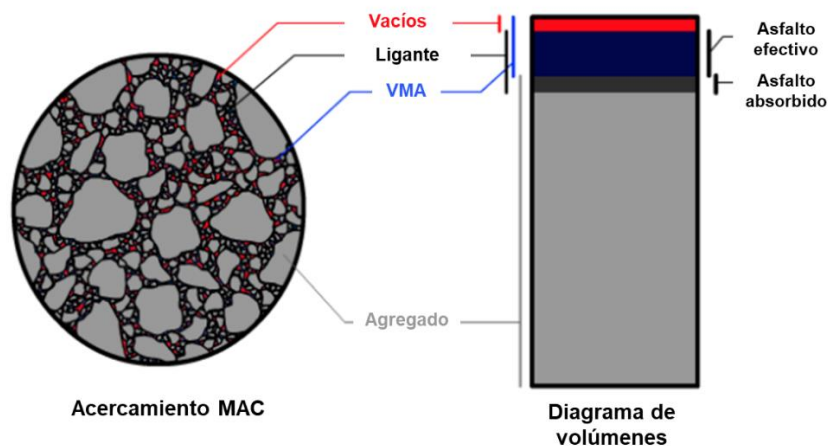
Riego de Imprimación: similar al riego de liga, es una aplicación de emulsión asfáltica de bajo espesor. Sin embargo, esta se coloca entre una capa granular y una capa de MAC. Adicionalmente se requiere que la emulsión utilizada sea de baja viscosidad para facilitar la penetración de esta en la capa granular.

Base y subbase: son capas de material granular que soportan la carpeta asfáltica. La base puede o no estar estabilizada y, por motivos económicos, generalmente utiliza materiales de mejor calidad que los de la subbase.

Subrasante: es el suelo sobre el que se apoya toda la estructura de pavimento. Usualmente se escarifica su superficie y se compacta hasta alcanzar una densidad aceptable.

## 2.2 Mezcla asfáltica en caliente (MAC)

La mezcla asfáltica en caliente (MAC) es un material heterogéneo, compuesto, en su forma más simple, por agregado, ligante asfáltico y vacíos de aire. Por volumen, el agregado grueso y fino ocupan la mayor parte del volumen de la mezcla asfáltica, mientras que el ligante asfáltico y los vacíos de aire ocupan el espacio entre las partículas de agregado. En la Figura 2 se observa gráficamente la composición y distribución de los materiales en la mezcla asfáltica, así como un diagrama de volúmenes que permite visualizar las proporciones en las que cada componente está presente en la MAC.



**Figura 2.** Composición de la mezcla asfáltica

**Fuente:** Cornelison, 2003

**Modificado por:** Corazzari, 2021

El ligante asfáltico es un material negro y viscoso, que puede ser encontrado naturalmente u obtenido como un subproducto de la refinación de petróleo. Su función en la mezcla asfáltica es servir como un aglutinante de las partículas de agregado mineral (cemento asfáltico). Por las características viscoelásticas del ligante asfáltico, este debe calentarse para poder ser mezclado con el agregado y para poder ser colocado y compactado en sitio. El ligante asfáltico puede modificarse para mejorar las características del material, con la finalidad de mejorar el desempeño de la MAC ante la fatiga o el ahuellamiento.

## **2.3 Principales deterioros en los pavimentos flexibles**

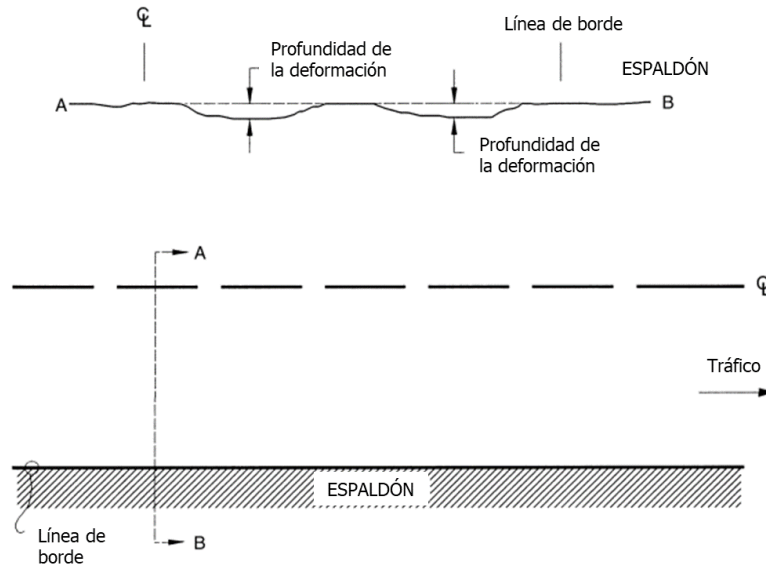
Una estructura de pavimento adecuadamente diseñada puede brindar un servicio adecuado durante un periodo extenso de tiempo. Sin embargo, los pavimentos se deterioran de manera progresiva por varios motivos. Las causas del deterioro de una estructura son muy variadas y, generalmente, el deterioro de los pavimentos responde a una combinación de causas. Entre estas causas se encuentran las cargas de tránsito, efectos medioambientales, calidad constructiva, propiedades de los materiales y el mantenimiento de la estructura.

Aunque para esta investigación es de especial importancia el fenómeno de fatiga y el deterioro asociado a este (se detalla en la sección 2.3.4), también se presenta una pequeña introducción para otros tipos de deterioro.

### ***2.3.1 Deformación permanente***

La deformación permanente, también conocida como ahuellamiento, es un tipo de deterioro que pueden exhibir los pavimentos flexibles. Debido al comportamiento viscoelástico de la mezcla asfáltica en caliente (disminución del módulo del material con el aumento de la temperatura o el aumento del tiempo de carga) este tipo de deterioro es más frecuente en aquellos pavimentos que están expuestos a altas temperaturas o a bajas velocidades de operación de los vehículos.

Sin embargo, la deformación permanente no solo está asociada a la capa de mezcla asfáltica, y podría también deberse a la deformación de las capas inferiores de la estructura, como la base, subbase o subrasante. El ahuellamiento se muestra como una depresión longitudinal en la huella de los vehículos (Miller & Bellinger, 2014), como se observa en la Figura 3 .



**Figura 3.** Esquema de la deformación permanente: sección transversal (sup.) y vista en planta (inf.)  
**Fuente:** FHWA, 2014  
**Modificado por:** Corazzari, 2021

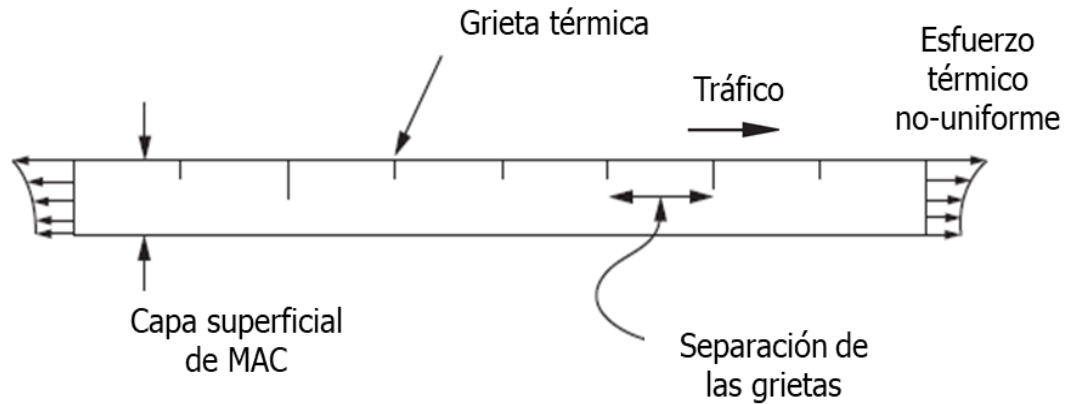
### 2.3.2 Agrietamiento térmico

El agrietamiento térmico es un tipo de deterioro que se da cuando el pavimento se expone a bajas temperaturas. Usualmente el deterioro por agrietamiento térmico es irreversible y costoso de reparar. El agrietamiento térmico se da cuando las bajas temperaturas (menores a 0 °C) inducen cambios volumétricos en la mezcla asfáltica que generan esfuerzos localizados que superan la resistencia del material (Kim R. Y., 2009).

Las grietas generadas por el agrietamiento térmico inician en la superficie y se extienden hacia el inferior de la capa de mezcla asfáltica. Esto se debe a que la superficie de la mezcla asfáltica está a mayor temperatura que el inferior de la capa. Este gradiente de temperatura genera que la contracción térmica sea mayor en las fibras inferiores y que se generen esfuerzos de tensión de gran magnitud en la superficie de la capa.

Los esfuerzos de tensión en la superficie son de mayor magnitud en la dirección longitudinal del pavimento, lo que hace que las grietas por agrietamiento térmico se generen en dirección transversal (perpendiculares a la dirección del tráfico) (Kim R. Y., 2009). En la Figura 4 se observa un esquema del agrietamiento térmico, en donde se destaca la magnitud de los esfuerzos térmicos en la superficie del pavimento y en el inferior de la mezcla asfáltica.





**Figura 4.** Esquema del agrietamiento térmico

**Fuente:** Kim, 2009

**Modificado por:** Corazzari, 2021

### ***2.3.3 Daño por humedad***

El daño por humedad en los pavimentos flexibles genera huecos, desprendimientos y propicia otros deterioros como la fatiga o el ahuellamiento. A diferencia de otros deterioros que se asocian a las cargas que experimentan los pavimentos, el daño por humedad impacta directamente la durabilidad e integridad de los materiales (Dong-Woo & Kyoungchul, 2009).

La humedad en la mezcla asfáltica genera la pérdida de la cohesión entre el mastic asfáltico y la superficie de los agregados, y la pérdida la resistencia cohesiva del cemento asfáltico mismo (Kiggundu & Roberts, 1988). Al igual que los otros deterioros en pavimentos, el daño por humedad se suele dar en combinación con otros deterioros, por lo que las consecuencias de estos se combinan y afectan en mayor manera la condición estructural y funcional del pavimento.

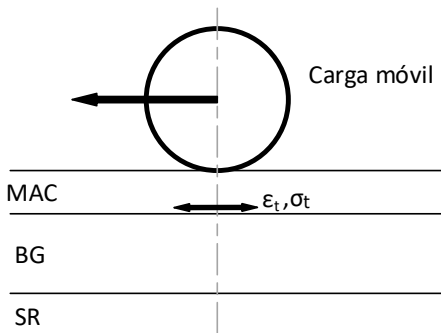
### ***2.3.4 Fatiga***

La fatiga se refiere al daño progresivo que experimentan los materiales que están expuestos a cargas cíclicas. La aplicación de cargas dinámicas repetidamente genera la formación de microfisuras que se agrandan e interconectan conforme continúa la aplicación de cargas.

Los pavimentos, por la naturaleza de su uso, están sujetos a cargas cíclicas. Debido a esto, el daño por fatiga es considerado uno de los principales deterioros en los pavimentos, y se manifiesta mediante la formación de grietas interconectadas que aparecen en la superficie de la capa de rodamiento.

### Fatiga de abajo hacia arriba

El agrietamiento por fatiga clásico en pavimentos flexibles inicia en las fibras inferiores (abajo hacia arriba) de la carpeta asfáltica debido a los esfuerzos de tensión que se generan en esta región cuando los vehículos transitan por el pavimento. Estas grietas comienzan en forma de micro-fisuras que finalmente se convierten en macro-fisuras que se interconectan y llegan a la superficie debido a los esfuerzos de tracción y cortante que se generan por la continua aplicación de cargas cíclicas (Baghaee, Rehan, & Mahrez, 2011).



**Figura 5.** Mecanismo de funcionamiento de agrietamiento por fatiga

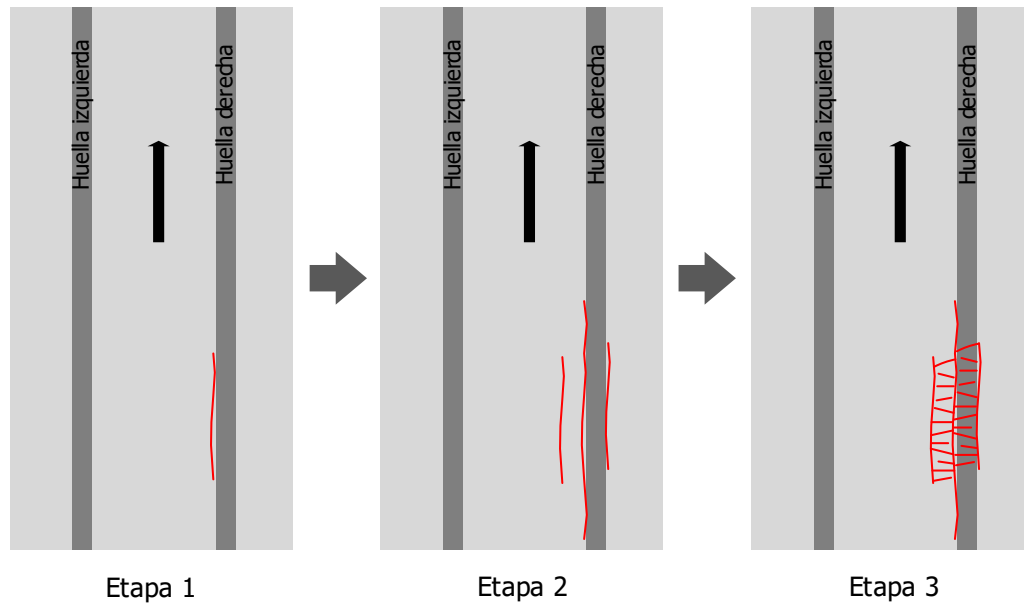
**Fuente:** Brown, 1996

**Modificado por:** Corazzari, 2020

### Fatiga de arriba hacia abajo

La fatiga de arriba hacia abajo también contribuye al deterioro de los pavimentos flexibles y, tal y como se ha observado, cada vez es más frecuente encontrar este tipo de deterioro en estructuras de pavimento alrededor del mundo. Este modo de falla se asocia a la fatiga debido a que se presenta ante cargas repetidas y a niveles de esfuerzo mucho más bajos que el límite del material. Se diferencia del modo de fatiga clásico debido a que las grietas en el pavimento se originan de forma longitudinal en la superficie del pavimento, y avanzan hasta alcanzar las fibras inferiores de la capa de mezcla asfáltica (Canestrari & Ingrassia, 2020).

En la mayoría de los casos, al igual que con la fatiga de abajo hacia arriba, la fatiga de arriba hacia abajo inicia con la formación de una grieta longitudinal paralela y cercana a la huella de las ruedas de los vehículos. Conforme continúa el paso de los vehículos se forman más grietas paralelas a la grieta inicial y, finalmente, se forman pequeñas grietas transversales que unen las grietas longitudinales formando el patrón conocido como piel de cocodrilo. Esta evolución se observa gráficamente en el esquema de la Figura 6.



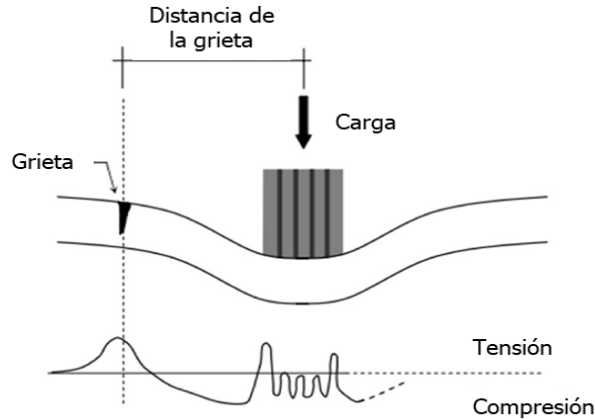
**Figura 6.** Esquema de la evolución de la fatiga de arriba hacia abajo

**Fuente:** Canestrari, 2020

**Modificado por:** Corazzari, 2021

Algunas observaciones de campo indican que el agrietamiento por fatiga de arriba hacia abajo en capas asfálticas en capas asfálticas gruesas o muy rígidas se debe a los esfuerzos cortantes que generan las llantas de los vehículos cerca de la superficie del pavimento. Conforme estos esfuerzos cortantes generan daño bajo la superficie de la mezcla asfáltica, se incrementan los esfuerzos de flexión en la superficie que propician la aparición de grietas en la superficie. La continuación de aplicación de cargas de tránsito junto con la redistribución de esfuerzos hace que el deterioro por cortante avance en profundidad y, por consiguiente, que la grieta longitudinal avance hasta el final de la capa de mezcla asfáltica (Canestrari & Ingrassia, 2020).

Por otra parte, para las capas asfálticas de menor espesor se ha observado que las cargas de tránsito generan esfuerzos de flexión en la superficie, más separados de la huella de los vehículos. Este mecanismo de falla se muestra en la Figura 7.



**Figura 7.** Mecanismo de fractura por fatiga de arriba hacia abajo en MAC de poco espesor

**Fuente:** Canestrari, 2020

**Modificado por:** Corazzari, 2021

## 2.4 Rigidez a flexión

La rigidez a flexión es un concepto utilizado en el criterio de falla de ensayo de viga a flexión en 4 puntos (AASHTO T 321). La rigidez se define como la capacidad de un material de soportar cargas externas sin experimentar cambios extremos en su geometría (deformaciones) (Rivin, 2010). En términos estructurales la rigidez representa la deflexión que experimenta un elemento o estructura ante la aplicación de una carga externa unitaria.

La rigidez a flexión de un elemento depende de las siguientes características:

- Longitud entre apoyos ( $L$ ): entre mayor sea la longitud libre del elemento. La longitud entre apoyos tiene una relación directa con la deflexión de un elemento, y una relación indirecta con la rigidez a flexión.
- Momento de inercia ( $I$ ): también conocido como segundo momento de área, es una propiedad geométrica de la sección transversal de un cuerpo. Indica la distribución del área de la sección respecto a un eje dado. La rigidez a flexión (en el eje de interés) de un elemento tiene una relación directa con su momento de inercia.
- Módulo de elasticidad ( $E$ ): es una constante propia de cada material, que representa la pendiente de una gráfica esfuerzo-deformación de un material elástico. La rigidez a flexión de un elemento tiene una relación directa con el módulo de elasticidad del material. Debido a las características viscoelásticas de la mezcla asfáltica, su módulo de elasticidad (módulo dinámico) varía dependiendo de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga.

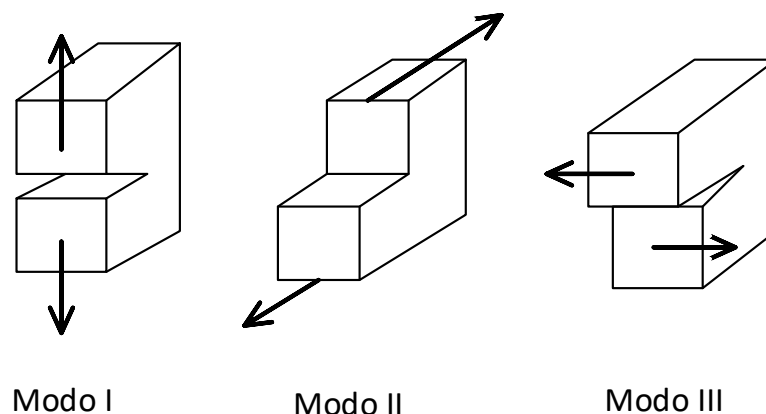
## 2.5 Mecánica de fractura

La mecánica de fractura es un conjunto de teorías que buscan explicar el comportamiento de cuerpos agrietados, estudiando el fenómeno de la fractura y los eventos que llevan este. La mecánica de fractura se puede dividir en dos ramas: la mecánica de fractura lineal elástica y la mecánica de fractura elastoplástica (LEFM y EPFM, correspondientes a sus siglas en inglés). La LEFM ha probado ser adecuada para materiales frágiles, mientras que la EPFM se ajusta mejor a los materiales más dúctiles. Sin embargo, cuando los niveles de esfuerzo son bajos, la LEFM se ajusta adecuadamente al comportamiento real de las mezclas asfálticas (Wang, 1996).

Los ensayos de fatiga en pavimentos permiten determinar experimentalmente algunos parámetros relacionados con la fatiga, como el factor de intensidad de esfuerzo ( $K$ ), tasa de liberación de energía ( $G_c$ ) y la J-integral ( $J_c$ ). Según Tang (2014), es importante seleccionar adecuadamente los parámetros de resistencia a la fractura debido a las características reológicas y viscoelásticas de la mezcla asfáltica, así como la naturaleza no homogénea de esta.

### 2.5.1 Intensidad de esfuerzo ( $K$ )

La intensidad de esfuerzo es un parámetro de carga que permite calcular el esfuerzo local y describe el campo de esfuerzos alrededor del inicio de la grieta. El valor máximo del factor de intensidad de esfuerzo ( $K$ ) se conoce como la resistencia a la fractura ( $K_c$ ). La relación entre el factor de intensidad de esfuerzo ( $K$ ) y la resistencia a la fractura ( $K_c$ ) es, en términos de fractura, similar a la relación entre esfuerzo y resistencia de un material (Tang, 2014).



**Figura 8.** Modos de carga que generan fractura

**Fuente:** Anderson, 1991

**Modificado por:** Corazzari, 2020

Aunque existen tres modos de carga que generan fracturas (Figura 8), el modo I es el que se genera cuando el plano de la grieta es normal a los esfuerzos de tensión que la generan, y en el caso de fatiga de pavimentos flexibles, este es el modo que mejor describe el agrietamiento por fatiga clásico (de abajo hacia arriba).

El factor de intensidad de esfuerzo para el modo I ( $K_I$ ) está dado por:

$$K_I = \sigma\beta\sqrt{\pi a} \quad \text{[Ecu. 1]}$$

Donde:

$\sigma$ : Esfuerzo axial en la fibra más extrema del elemento  
 $\beta$ : Factor de geometría del espécimen  
 $a$ : Longitud de grieta

En el caso del agrietamiento por fatiga de abajo hacia arriba en capas de mezcla asfáltica de gran espesor o de gran rigidez, la fractura se rige primeramente por el modo II y posteriormente por el modo I. Por otra parte, en las capas de mezcla asfáltica de bajo espesor rige el modo I, donde suele regir la fatiga de arriba hacia abajo.

### **2.5.2 Tasa de liberación de energía (G)**

La tasa de liberación de energía se refiere a la reducción de energía elástica por unidad de área (Tang, 2014). El momento en que el material es incapaz de contener la propagación rápida de la grieta coincide con el momento en que la tasa de liberación de energía alcanza su valor crítico ( $G_c$ ).

La tasa de liberación de energía está dada por:

$$G = \frac{\partial U}{\partial A} \quad \text{[Ecu. 2]}$$

Donde:

$\partial U$ : cambio en energía elástica  
 $\partial A$ : cambio en el área de la cara de la grieta

### **2.5.3 J-integral**

Según Tang (2014), la J-integral representa una tasa de liberación de energía elastoplástica. Esta tasa se relaciona con el área bajo la curva carga-deformación, dividida entre el área de la cara de la grieta. La tasa de cambio de energía J-integral se calcula como:

$$J = -\frac{1}{B} \left( \frac{\partial U}{\partial a} \right)_{\Delta} \quad \text{[Ecu. 3]}$$

Donde:

$B$ : Espesor del espécimen

$a$ : Longitud de grieta

$U$ : Energía de deformación

$\Delta$ : Subíndice que denota que la derivada se realiza en un punto específico de carga-deformación.

## **2.6 Ensayos de fatiga y fractura para MAC**

Se han desarrollado varios ensayos que permiten evaluar el desempeño ante el fisuramiento por fatiga de las mezclas asfálticas, utilizando especímenes con distintos factores de forma y basándose en diferentes principios mecánicos (flexión, tensión directa e indirecta, compresión-tensión, torsión, etc.) (Arrieta, 2016). El presente trabajo se enfocará en los dos ensayos que se detallan a continuación.

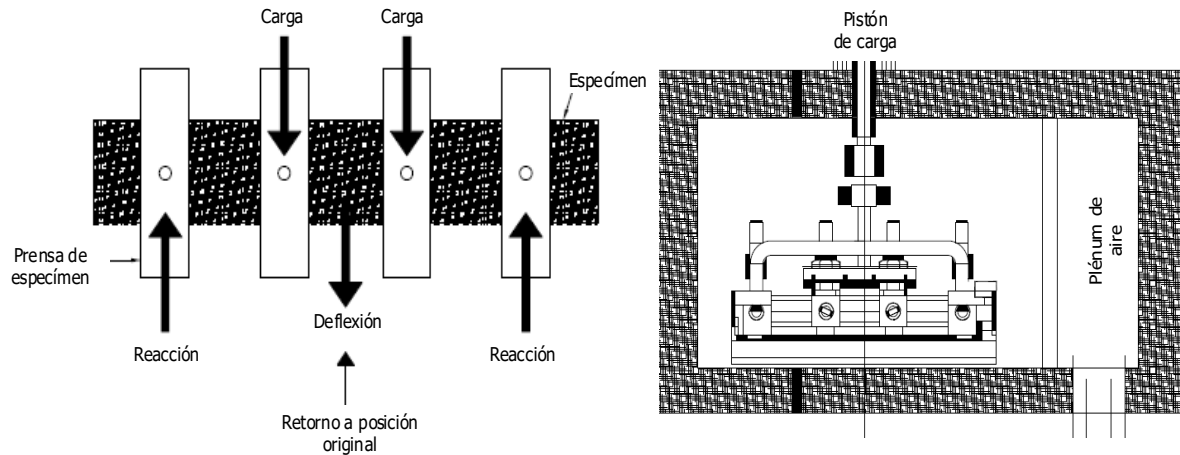
### **2.6.1 Ensayo de viga a flexión en 4 puntos**

Según Arrieta (2016), este es uno de los ensayos más populares para evaluar la resistencia a fatiga de las mezclas asfálticas. El montaje del ensayo busca simular la flexión que experimenta la mezcla asfáltica cuando los vehículos transitan sobre ella.

El CR2010 en la sección 401.03 *Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall* y 402.03 *Diseño de mezcla asfáltica Superpave®* especifica la aplicación de la norma AASHTO T 321 para determinar la cantidad de repeticiones que debe soportar un espécimen para valorar su desempeño ante el fisuramiento por fatiga, como parte de los requisitos de desempeño y aceptación del diseño.

La norma AASHTO T 321 establece el procedimiento estándar para valorar el desempeño ante la fatiga de mezclas asfálticas compactadas sujetas a flexión cíclica. Este procedimiento de ensayo permite obtener el número de ciclos y la energía de fatiga.

En este ensayo dinámico se aplican cargas sinusoidales en el tercio medio de un espécimen rectangular prismático, generando así momentos positivos en el tercio medio que a su vez generan esfuerzos de tracción similares a los experimentados por la mezcla asfáltica en un pavimento. El esquema de ensayo se muestra en la Figura 9.



**Figura 9.** Esquema del ensayo de flexión en 4 puntos (AASHTO T321)

**Fuente:** AASHTO, 2017

**Modificado por:** Corazzari, 2020

La norma establece la falla del espécimen a fatiga cuando el producto de la rigidez del mismo con el número de ciclos ha alcanzado un máximo, y el ensayo se puede detener una vez que este producto muestre una disminución del 15 % respecto su máximo valor. Anteriormente, en la versión de la norma AASHTO T321-07, se definía la falla del espécimen cuando este alcanzaba una rigidez equivalente al 50 % de su rigidez inicial. Este último criterio de falla es el que utiliza la normativa costarricense (CR-2010).

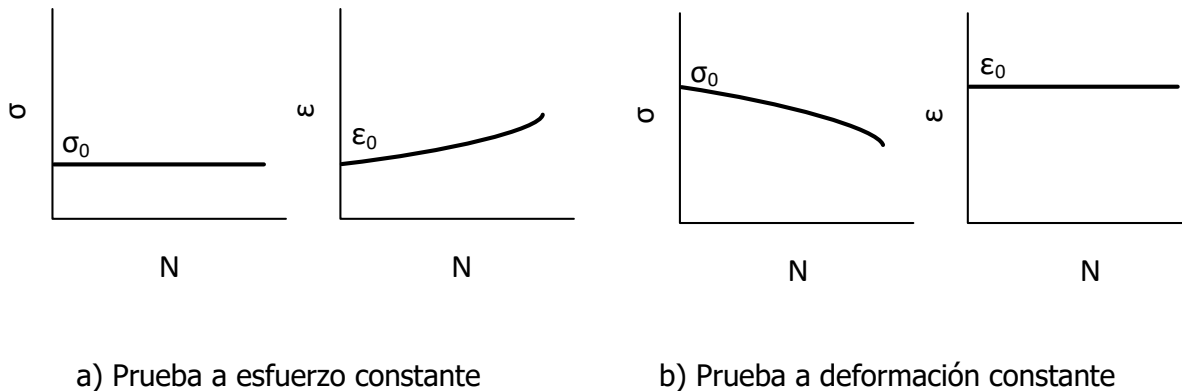
Arrieta (2016) explica que este ensayo tiene desventajas prácticas, como las elevadas duraciones de ensayo para mezclas muy resistentes a la fatiga o para aquellas realizadas a un bajo nivel de esfuerzos o deformaciones, la dificultad y cantidad de material necesario para elaborar los especímenes y la necesidad de contar con un aparato de ensayo específico para esta prueba que debe ser capaz de realizar el ensayo en un ambiente controlado.

Además de las dificultades prácticas, los ensayos dinámicos para determinar la vida a fatiga de mezclas asfálticas presentan una alta variabilidad en sus resultados, que depende de aspectos como las propiedades de la mezcla y la elaboración de los especímenes (Mora, 2020).

En la Figura 10 se muestran los dos tipos de carga controlada que se establecen en la norma AASHTO T321 para el ensayo de viga a flexión en 4 puntos. A la izquierda se muestra el modo



en que se mantiene un esfuerzo constante con una deformación unitaria del espécimen que crece debido al daño que causa el esfuerzo constante en el material. Por otra parte, en la derecha se muestra el escenario en que el espécimen es sometido a una deformación constante (400 y 600 microstrains de acuerdo con el CR-2010), y para mantener esta deformación constante se debe reducir el esfuerzo conforme avanza la prueba.



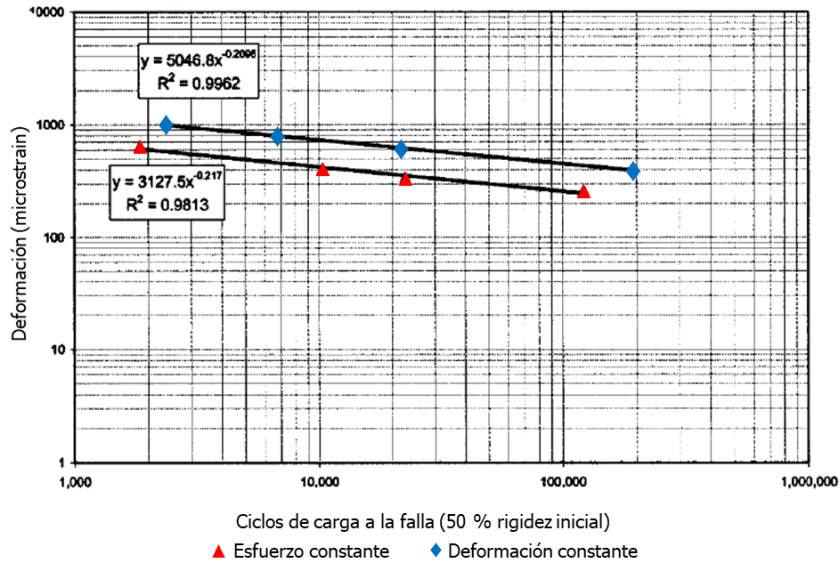
**Figura 10.** Tipos de carga para el ensayo de viga a flexión en 4 puntos

**Fuente:** Huang, 2004

**Modificado por:** Corazzari, 2021

Generalmente, el ensayo a esfuerzo a constante se utiliza para estructuras de pavimentos de gran espesor (por ejemplo, pavimentos de espesor pleno), mientras que el ensayo a deformación constante se recomienda para el resto de estructuras de pavimento flexible (Ghuzlan & Carpenter, 2000).

El criterio de falla más ampliamente utilizado, el cual dicta que el espécimen ha fallado cuando ha perdido el 50 % de su rigidez a flexión inicial, constituye una de las principales limitaciones de este procedimiento de ensayo. El criterio del 50 % asegura un cambio consistente del espécimen a partir de las condiciones iniciales, sin embargo, no asegura que la vida a fatiga remanente del espécimen también sea consistente (Ghuzlan & Carpenter, 2000). Más aún, este criterio de falla resulta en números de ciclo distintos para un mismo material que es ensayado tanto a deformación constante como a esfuerzo constante, como se muestra en la Figura 11.

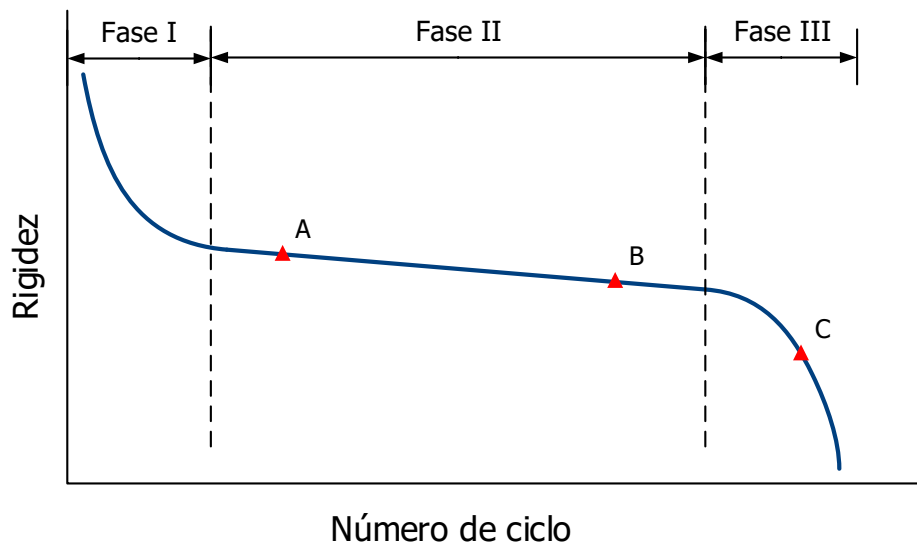


**Figura 11.** Curvas de fatiga obtenidas utilizando esfuerzo constante y deformación constante para una misma mezcla

**Fuente:** Ghuzlan, 2000

**Modificado por:** Corazzari, 2021

Otra limitación asociada al criterio de falla del 50 % de la rigidez inicial está relacionada con la forma en la que los especímenes pierden rigidez durante la prueba de viga a flexión en 4 puntos y el momento en que se alcanza la falla. En la Figura 12 se muestra la forma típica de una gráfica de rigidez del espécimen en función del ciclo de carga, así como las 3 fases que se pueden distinguir claramente en la gráfica.



**Figura 12.** Gráfica típica de rigidez en función del número de ciclo de carga

De acuerdo con Di Benedetto (2004), las 3 fases se pueden describir como:

- Fase I o fase de adaptación: en esta fase inicial se exhibe una pérdida rápida de rigidez a flexión que no se explica únicamente por el fenómeno de fatiga, sino que también es causada por el calentamiento del material y fenómenos locales en el espécimen. La pérdida de rigidez de esta fase no es completamente permanente y se recupera, en su mayoría, tan pronto como se detiene el ensayo. En esta fase se inicia la formación de microgrietas.
- Fase II o fase quasi-estacionaria: en esta fase se presenta una pérdida gradual de la rigidez y se considera esta pérdida es causada principalmente por el fenómeno de fatiga. En esta fase se continúa la formación de microgrietas.
- Fase III o fase de falla: en esta fase se exhibe una pérdida de rigidez acelerada debido al fenómeno de propagación y conexión de grietas. Este proceso culmina en la formación de macro-grietas y con la falla del espécimen.

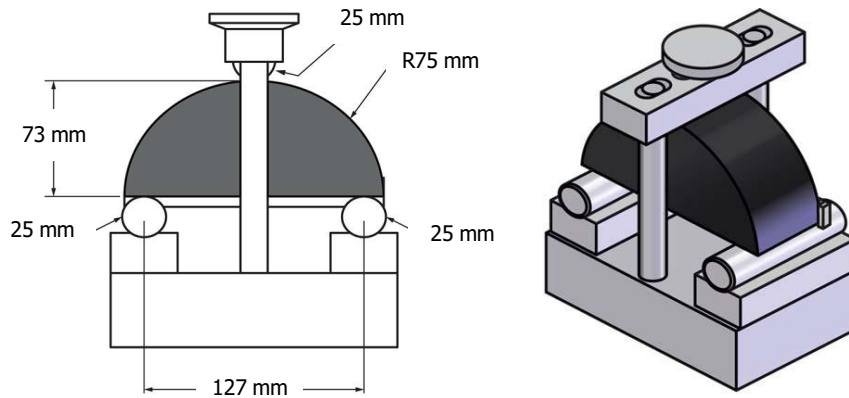
En la Figura 12 también se observa que el criterio de pérdida del 50 % de la rigidez inicial no toma en cuenta en que fase sucede la falla. Por ejemplo, un espécimen que falla en el punto A presenta un número de ciclos mucho menor al que presenta un espécimen en el punto B, a pesar de que el punto A está lejos de alcanzar la fase de deterioro acelerado (fase III). También se puede observar que si un espécimen alcanza el 50 % de su rigidez inicial en el punto C, este posteriormente tendrá un deterioro mucho más acelerado que el expuesto por uno que falle en el punto A o B.

### ***2.6.2 Ensayo de flexión semi-circular (SCB)***

Este ensayo posee una configuración simple de flexión en 3 puntos en un espécimen prismático semicircular, con un corte en la base para fomentar la falla a tensión en radio que coincide con el punto central de aplicación de carga.

Este ensayo está descrito en la norma ASTM D8044: Evaluación de la resistencia a la fractura de la mezcla asfáltica en caliente utilizando un espécimen semi-circular (SCB) a temperaturas intermedias. Este procedimiento permite determinar la tasa crítica de liberación de energía de deformación ( $J_c$ ) y la energía de deformación (U).

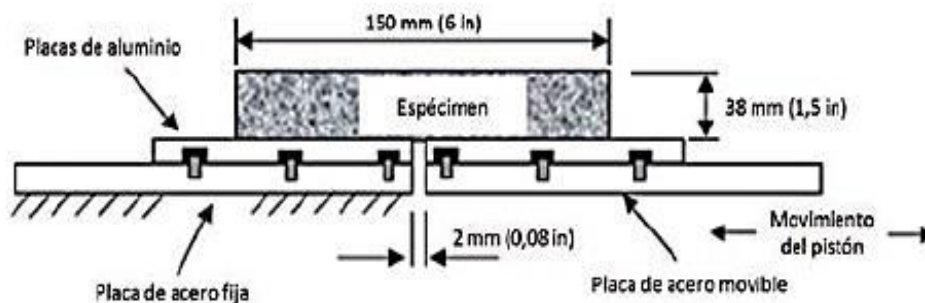
Este ensayo posee ventajas respecto a la prueba de viga a flexión en 4 puntos, como un menor tiempo de ensayo, menor cantidad de material requerido para los especímenes y también que, por la naturaleza estática del ensayo, se puede llevar a cabo con una prensa convencional.



**Figura 13.** Esquema del ensayo de flexión semicircular (ASTM D8044)  
**Fuente:** ASTM, 2016  
**Modificado por:** Corazzari, 2020

### 2.6.3 Overlay Test (Tex-248-F)

El ensayo Overlay es un procedimiento que permite estudiar las características de agrietamiento de las mezclas asfálticas, comprendiendo el proceso de formación y de reflejo de las grietas. El equipo para el ensayo permite aplicar cargas repetidas de tensión directa, utilizando unas placas fijas y otras placas móviles que permiten simular el movimiento de la grieta. El espécimen de mezcla asfáltica se adhiere a las placas utilizando un pegamento epóxico. Adicionalmente, el equipo cuenta con un deformímetro y una celda de carga para recopilar los datos del ensayo (Jiménez, 2013). El esquema del equipo se muestra en la Figura 14.



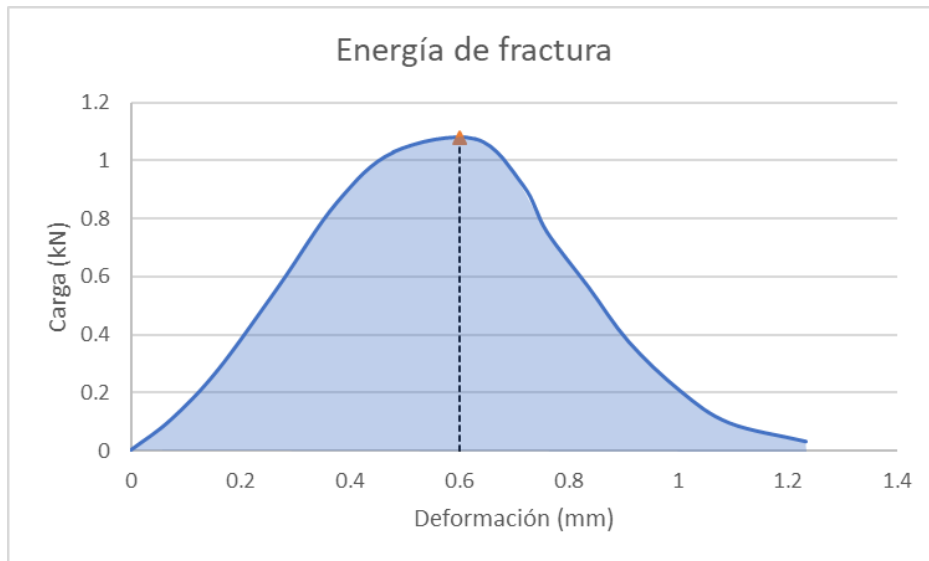
**Figura 14.** Esquema del ensayo Overlay  
**Fuente:** Jiménez, 2013

## 2.7 Índices de fractura para flexión semicircular (SCB)

A continuación, se describen los índices de fractura utilizados en esta investigación para cuantificar los resultados provenientes del ensayo de flexión semicircular.

### 2.7.1 Energía de fractura ( $G_f$ )

La energía de fractura es uno de los principales resultados que se obtienen a partir del ensayo SCB, y representa el trabajo necesario para iniciar y propagar una grieta en un espécimen de ensayo. Este parámetro es función de la resistencia y la ductilidad de la mezcla asfáltica, que dependen de la carga máxima y la deformación del espécimen. La energía de fractura se puede visualizar como el área debajo de la curva de carga (trabajo de fractura) contra desplazamiento, dividida entre el área de ligamento.



**Figura 15.** Energía de fractura

Las ecuaciones que permiten calcular la energía de fractura (Ecu. 4, 5, 6) se muestran a continuación:

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad \text{[Ecu. 4]}$$

Donde:

$G_f$ : Energía de fractura ( $J/m^2$ )

$W_f$ : trabajo de fractura (J)

$A_{lig}$ : área de ligamento ( $m^2$ )

$$W_f = \int P(u)du \quad \text{[Ecu. 5]}$$

Donde:

$W_f$ : trabajo de fractura (kN mm)

$P(u)$  : función de la curva de carga (kN) – deformación del espécimen (mm)

$$A_{lig} = t(r - a) \quad \text{[Ecu. 6]}$$

Donde:

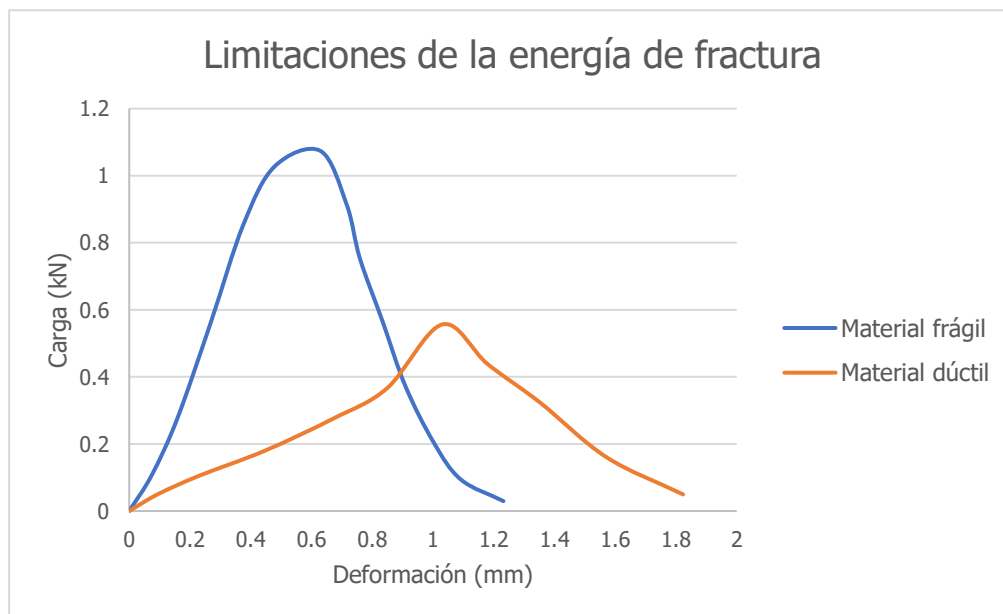
$A_{lig}$  : área de ligamento (m<sup>2</sup>)

$t$  : espesor promedio de los especímenes semicirculares (m)

$r$  : radio promedio de los especímenes semicirculares (m)

$a$  : longitud promedio de la ranura de los especímenes semicirculares (m)

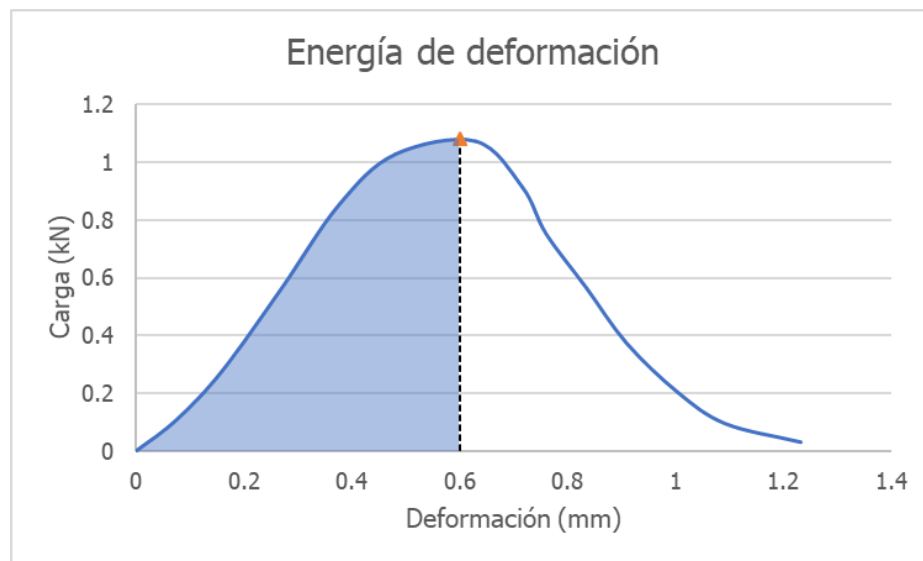
Una de las mayores limitaciones de la energía de fractura es que no es efectiva para discriminar mezclas que presentan un comportamiento frágil de mezclas con comportamiento dúctil. Una muestra que resiste cargas elevadas, pero falla abruptamente (curva  $P(u)$  esbelta) puede tener un mismo valor de energía de fractura que una mezcla que resiste cargas bajas, pero acepta altas deformaciones (curva  $P(u)$  chata). Esta limitación se puede observar de manera gráfica en la Figura 16.



**Figura 16.** Curvas de carga deformación de un material frágil y dúctil

### 2.7.2 Energía de deformación (U)

Al igual que la energía de fractura, la energía de deformación es otro de los principales resultados que se obtienen del ensayo de flexión semicircular. La energía de deformación se obtiene calculando el área bajo la curva carga-deformación, desde la deformación cero hasta la deformación asociada a la carga máxima (Figura 17). A diferencia de la energía de fractura, en la norma ASTM D8044, la energía de deformación no se presenta por unidad de área, por lo que podría compararse con el trabajo de fractura de la ecuación 4. El procedimiento de ensayo especifica que se debe calcular la energía de deformación para cada longitud de ranura en el espécimen.



**Figura 17.** Energía de deformación

La energía de deformación se puede calcular utilizando datos discretos utilizando la ecuación 7, o bien ajustando los datos con una ecuación polinómica de grado 6 y calculando el área mediante la ecuación 8.

$$U = \sum_{i=1}^n (u_{i+1} - u_i) \cdot P_i + \frac{1}{2} (u_{i+1} - u_i) \cdot (P_{i+1} - P_i) \quad \text{[Ecu. 7]}$$

Donde:

$U$ : energía de deformación (kJ)

$P_i$ : carga aplicada en el ciclo de carga  $i$  (kN)

$P_{i+1}$ : carga aplicada en el ciclo de carga  $i + 1$  (kN)

$u_i$ : deformación del espécimen en el ciclo de carga  $i$  (m)

$u_{i+1}$ : deformación del espécimen en el ciclo de carga  $i + 1$  (m)

$$U = \int_0^{u_{max}} P(u) du$$

[Ecu. 8]

Donde:

$W_f$ : trabajo de fractura (kN mm)

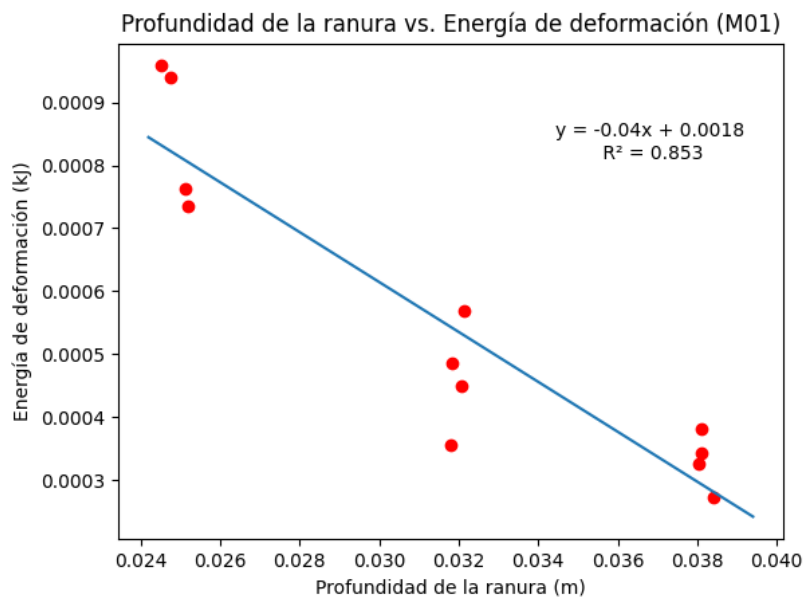
$P(u)$ : función de la curva de carga (kN) – deformación (mm)

$u_{max}$ : deformación del espécimen asociada a la carga máxima (mm)

### 2.7.3 Tasa crítica de liberación de energía de deformación ( $J_c$ )

En esta sección se presenta el cálculo de la tasa crítica de energía de deformación a partir de los datos obtenidos mediante el ensayo de flexión semicircular. La tasa crítica de liberación de energía se detalló desde el enfoque de la mecánica de fractura en la sección 2.5.2.

De acuerdo con el procedimiento de ensayo de flexión semicircular (ASTM D8044), una vez que se ha calculado la energía de deformación ( $U$ ) para cada espécimen y para cada profundidad de ranura, se procede a elaborar una gráfica de energía de deformación en función de la profundidad de la ranura. En la Figura 18 se observa, a manera de ejemplo, la gráfica en cuestión para la muestra de mezcla asfáltica modificada 01 (M01). Se distinguen claramente tres grupos de datos, correspondientes a las tres profundidades de ranura ensayadas (25 mm, 32 mm y 38 mm).



**Figura 18.** Gráfica de profundidad de ranura vs. energía de deformación (M01)



Una vez que se grafican los datos, se calculan los parámetros de la recta de mejor ajuste. La tasa crítica de liberación de energía ( $J_c$ ) se calcula como sigue:

$$J_c = \frac{|m|}{t} \quad \text{[Ecu. 9]}$$

Donde:

$J_c$ : Tasa crítica de liberación de energía ( $\text{kJ/m}^2$ )

$|m|$ : valor absoluto de la pendiente de la recta de mejor ajuste ( $\text{kJ/m}$ )

$t$ : espesor promedio de los especímenes (m)

#### **2.7.4 Índice de Flexibilidad de Illinois (FI)**

El índice de flexibilidad de Illinois fue introducido en el 2015, como una alternativa que permitiera diferenciar de mejor manera a las muestras frágiles de las dúctiles. Al igual que la energía de fractura, el índice de flexibilidad se basa en el principio de trabajo de fractura ( $W_f$ ) (Batioja-Álvarez, Lee, & Haddock, 2019). Para lograr el objetivo de diferenciar mezclas, el cálculo del índice de flexibilidad incorpora la pendiente post-pico, de esta manera tomando en cuenta no sólo la carga máxima que resiste un espécimen, sino que también la rapidez con la que este pierde capacidad luego de alcanzar la carga máxima. El índice de flexibilidad se calcula mediante la ecuación 10.

$$FI = \frac{G_f}{|m|} \cdot A \quad \text{[Ecu. 10]}$$

Donde:

$FI$  : índice de flexibilidad

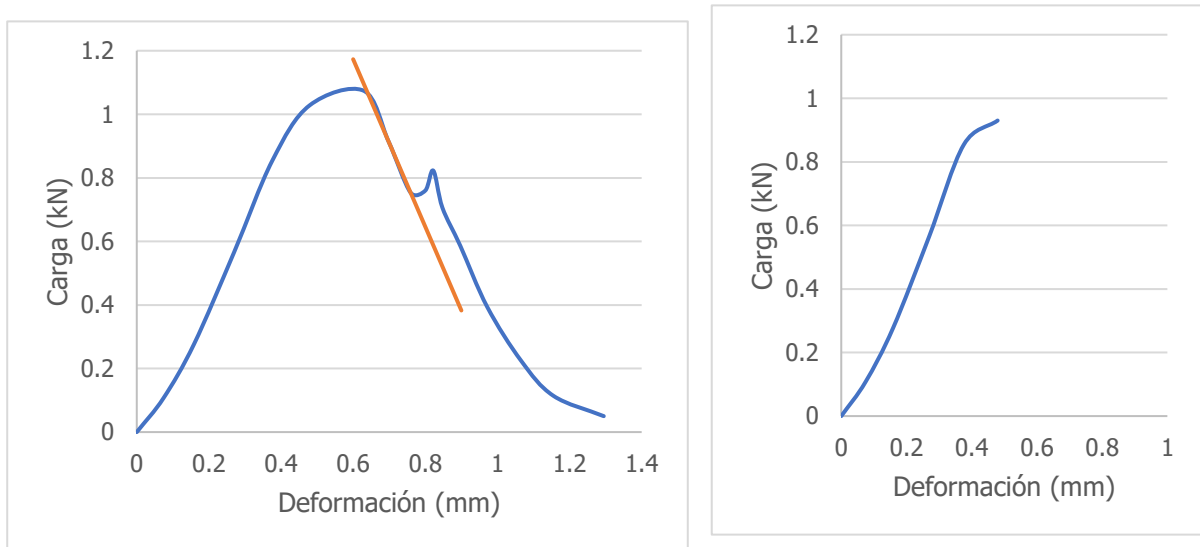
$G_f$ : energía de fractura ( $\text{J/m}^2$ )

$|m|$ : valor absoluto de la pendiente post-pico calculada en el punto de inflexión ( $\text{kN/mm}$ )

$A$ : factor de conversión de unidades considerado como 0.01

Aunque el índice de flexibilidad presenta ventajas sobre la energía de fractura para diferenciar entre distintas mezclas asfálticas, también presenta limitaciones. La determinación de los puntos de inflexión de la curva de carga-deformación puede presentar dificultades (Kaseer, y otros, 2018). Incluso el software oficial desarrollado por el Centro para el transporte de Illinois (ICT, por sus siglas en inglés), la Herramienta de Análisis I-FIT, en ocasiones no logra encontrar una curva de ajuste para los datos y por lo tanto falla también al encontrar puntos de inflexión y, por consiguiente, la pendiente post-pico. Adicionalmente, es imposible obtener la pendiente

post-pico cuando el espécimen falla de manera frágil. Algunas de estas limitaciones se pueden observar de manera gráfica en la Figura 19.



**Figura 19.** Resultados que limitan la aplicación del Índice de Flexibilidad

### 2.7.5 Índice de resistencia a la fractura (CRI)

El índice de resistencia a la fractura (CRI) fue propuesto en el 2018, con el objetivo de encontrar un índice que permitiera diferenciar las mezclas frágiles de las dúctiles. Además, se buscaba eliminar el uso de la pendiente post-pico en el cálculo del índice, evitando así las limitaciones que presenta el índice de flexibilidad.

Para normalizar la energía de deformación ( $G_f$ ), Kaseer et. Al. (2018) proponen el uso de la carga máxima. Este parámetro se obtiene de manera sencilla al obtener los datos, y para encontrarlo no se requiere que la curva carga-deformación tenga la forma típica. El índice de resistencia a la fractura se obtiene como se muestra en la ecuación 11.

$$CRI = \frac{G_f}{P_{m\acute{a}x}} \quad \text{[Ecu. 11]}$$

Donde:

**CRI** : índice de resistencia a la fractura

**$G_f$** : energía de fractura ( $J/m^2$ )

**$P_{m\acute{a}x}$** : carga pico (kN)

### 2.7.6 Índice de dureza (TI)

El índice de dureza también busca resolver las limitaciones de la energía de fractura, empleando la diferencia entre la deformación post-pico a la mitad de la carga máxima y la deformación en la carga máxima como un factor que multiplica a la energía de fractura post-pico. Este factor permite que el índice de dureza penalice a aquellos materiales que sufren una disminución acelerada de resistencia después de alcanzar la carga pico. El índice de flexibilidad se calcula mediante la ecuación 12, y sus componentes se muestran gráficamente en la Figura 20.

$$TI = G_{f, \text{ post pico}} \cdot (\Delta_{mdp} - \Delta_{p \text{ máx}}) \cdot 10^{-3} \quad \text{[Ecu. 12]}$$

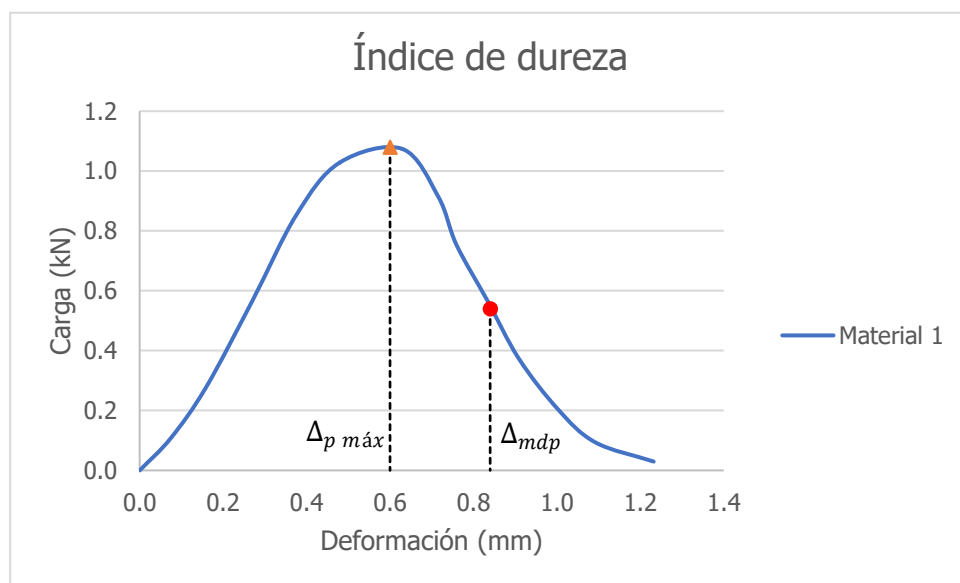
Donde:

**TI:** índice de dureza

$G_{f, \text{ post pico}}$ : Energía de fractura post-pico (J/m<sup>2</sup>)

$\Delta_{mdp}$ : Deformación post-pico a la mitad de la carga máxima (mm)

$\Delta_{p \text{ máx}}$ : Deformación en la carga máxima (mm)



**Figura 20.** Representación gráfica del Índice de dureza

## CAPÍTULO III: DATOS EXISTENTES

### 3.1 Datos LanammeUCR

La Unidad de Auditoría Técnica y el Laboratorio de Mezclas Asfálticas del LanammeUCR facilitaron una serie de resultados de ensayos realizados a mezclas asfálticas utilizadas en varios proyectos viales desarrollados en Costa Rica. Como parte del acuerdo con el LanammeUCR, estos datos serán despojados de cualquier elemento identificativo antes de ser presentados en esta investigación.

Los resultados entregados por el laboratorio corresponden a ensayos realizados a 13 muestras de MAC, e incluyen información de contenido de asfalto, granulometría, parámetros Marshall y desempeño, dentro de los cuales destacan los resultados de la aplicación de los ensayos de flexión en 4 puntos (AASHTO T321) y de flexión semicircular (ASTM D8044). En la Figura 21 se muestra la proporción de mezclas asfálticas modificadas y convencionales incluidas en los resultados facilitados por el LanammeUCR. Adicionalmente, en el Cuadro 1 se listan detalladamente los resultados facilitados.

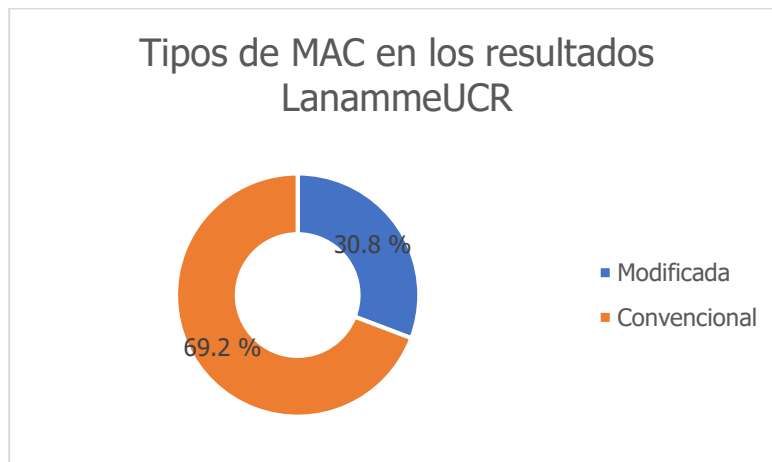
**Cuadro 1.** Detalle de los resultados LanammeUCR

<b>Categoría</b>	<b>Resultados</b>
Composición	Contenido de asfalto
Granulometría	Tamaño máximo nominal y porcentajes pasando distintos tamices
Parámetros volumétricos de diseño	$G_{BS\ MAC}$ , $G_{BS\ Agregado}$ , $G_{Máx}$ , % Vacíos, Estabilidad, Flujo, VMA, VFA, Relación polvo/asfalto, Asfalto efectivo, Asfalto absorbido, contenido de agua y factor de corrección del agregado.
Desempeño	Módulo dinámico, APA, Rueda de Hamburgo, Flexión en 4 puntos (400 y 600 $\mu$ -strain), Flow number, Deformación permanente, tasa de alivio de la energía de deformación crítica (Jc).

### 3.2 Tipos de mezcla asfáltica

En los resultados facilitados por el LanammeUCR se pueden encontrar mezclas asfálticas modificadas o convencionales. Las mezclas asfálticas pueden modificarse utilizando diversas técnicas y materiales modificantes, sin embargo, la información facilitada por el laboratorio solo distingue las mezclas convencionales de las modificadas. Esto se debe a que las mezclas

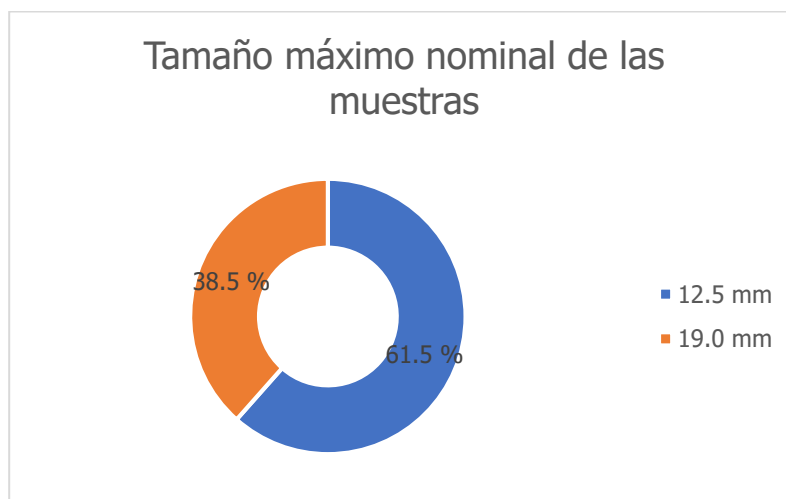
analizadas corresponden a mezclas producidas en planta, y esta información sobre el proceso de modificación se encuentra en los diseños de mezcla del fabricante.



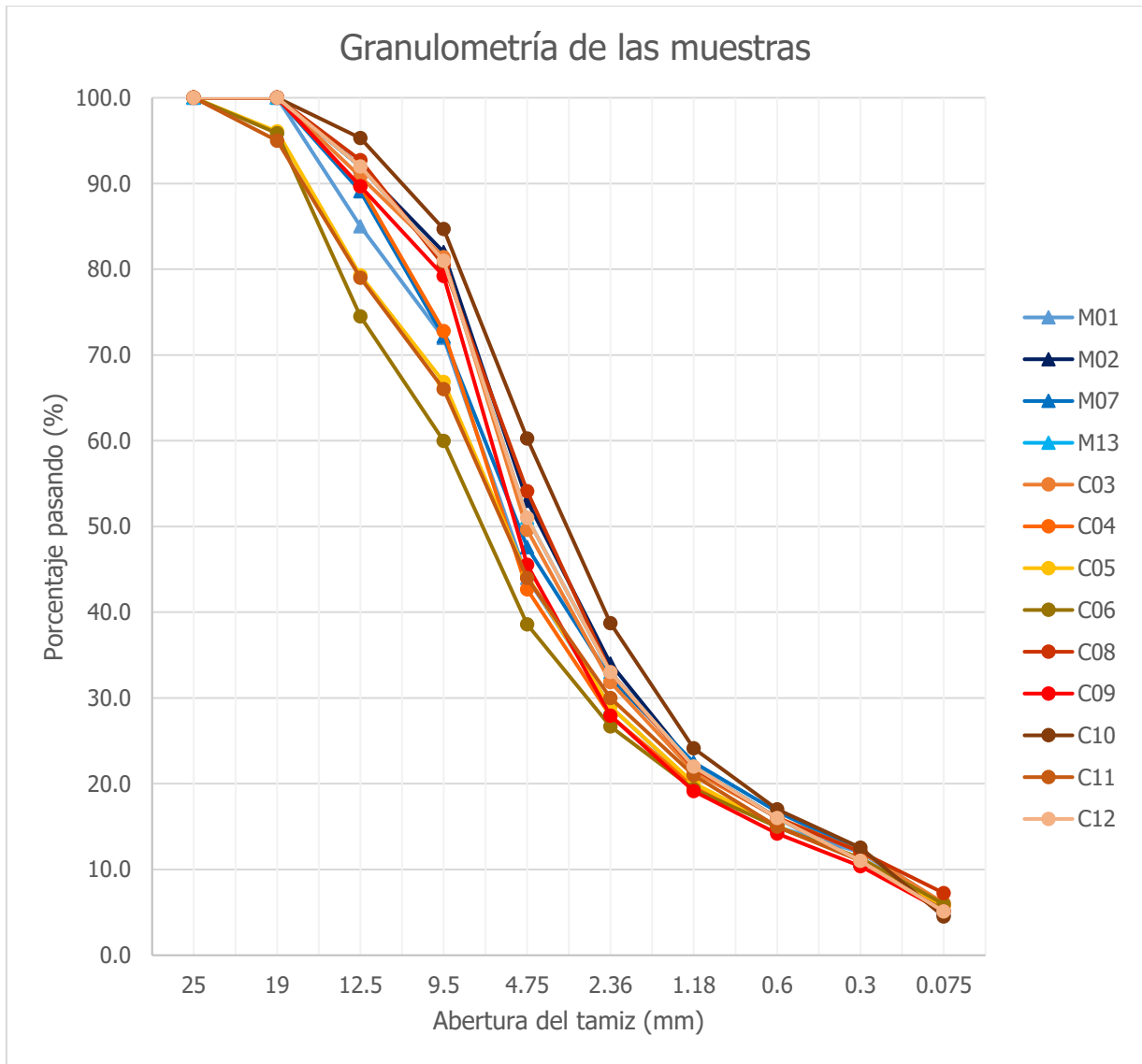
**Figura 21.** Tipos de MAC incluidos en los resultados del LanammeUCR

### 3.3 Granulometría del agregado extraído de la mezcla asfáltica (AASHTO T30 / ASTM D5444)

Este método permite determinar la distribución de los tamaños de partícula del agregado fino y grueso extraído de mezclas asfálticas, utilizando una serie de tamices con aberturas cuadradas. A partir de los resultados de este ensayo se determina el tamaño máximo nominal, en la Figura 22 se observa que la mayoría de las mezclas asfálticas tienen un tamaño máximo nominal de 12.5 mm. Adicionalmente, en la Figura 23 se muestra la distribución del tamaño de partículas de agregado de las muestras aportadas por el LanammeUCR.



**Figura 22.** Tamaño máximo nominal del agregado en las muestras del LanammeUCR

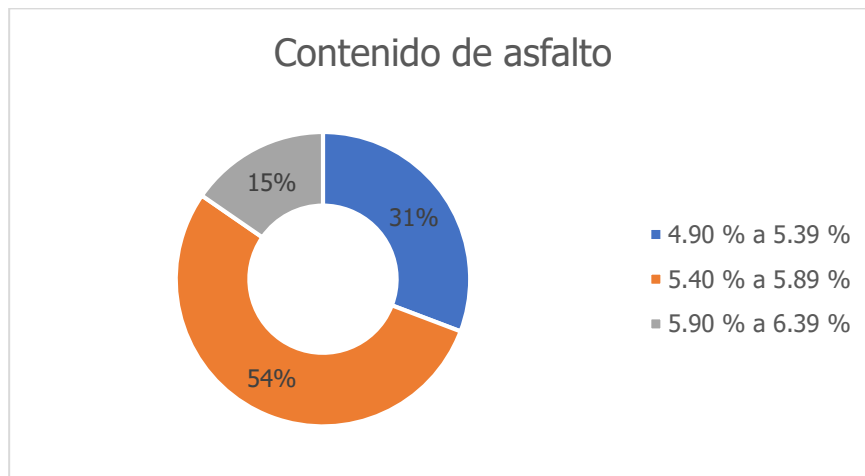


**Figura 23.** Curvas granulométricas del agregado extraído de las mezclas asfálticas (M: mezcla asfáltica modificada, C: mezcla asfáltica convencional)

### 3.4 Contenido de asfalto en mezcla asfáltica por ignición (INTE C9 / AASHTO T308 / ASTM D6307)

Este método de ensayo permite la determinación cuantitativa del contenido de asfalto en una mezcla asfáltica, mediante la remoción del ligante asfáltico de la mezcla. Este método de ensayo no utiliza solventes para remover el ligante, sino que utiliza el método de ignición en un horno para eliminarlo. El contenido de asfalto se calcula mediante la diferencia de masa de la muestra antes y después de la prueba, tomando en cuenta el factor de corrección por cenizas. Después de la prueba, el material puede utilizarse para estudiar su granulometría de

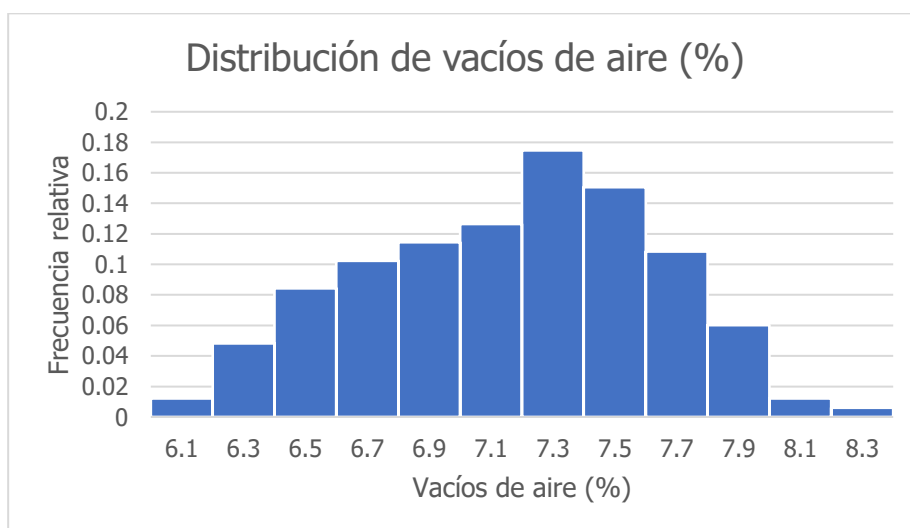
acuerdo con los estándares AASHTO T30 / AASHTO D5444). En la Figura 24 se observa la distribución de los contenidos de asfalto en las muestras analizadas por el LanammeUCR.



**Figura 24.** Contenido de asfalto en las muestras del LanammeUCR

### 3.5 Porcentaje de vacíos de aire en mezcla asfáltica de los especímenes compactados

El porcentaje de vacíos de aire es una característica importante para el diseño de pavimentos y para la evaluación en campo de la compactación de la carpeta asfáltica. En la Figura 25 se observa el histograma de frecuencia relativa de los vacíos de aire de los 166 especímenes utilizados en los ensayos de flexión semicircular realizados por el LanammeUCR. Para ambos ensayos, el porcentaje de vacíos objetivo es del 7 %.



**Figura 25.** Distribución de los vacíos de aire en los resultados del LanammeUCR

### 3.6 Clasificación de la granulometría de los agregados según el Diseño de mezcla volumétrico Superpave (AASHTO M 323)

La metodología de diseño Superpave permite clasificar las mezclas de acuerdo con la granulometría de sus agregados, en mezclas con granulometría gruesa o fina. En las figuras 26 y 27, se muestran respectivamente las gráficas con los puntos de control y el tamiz primario de control para las muestras de 19 y 12.5 mm. Se concluye que todas las mezclas, para ambos tamaños máximos nominales, son de gradación gruesa debido a que sus curvas granulométricas pasan por debajo de los puntos de los tamices primarios de control.

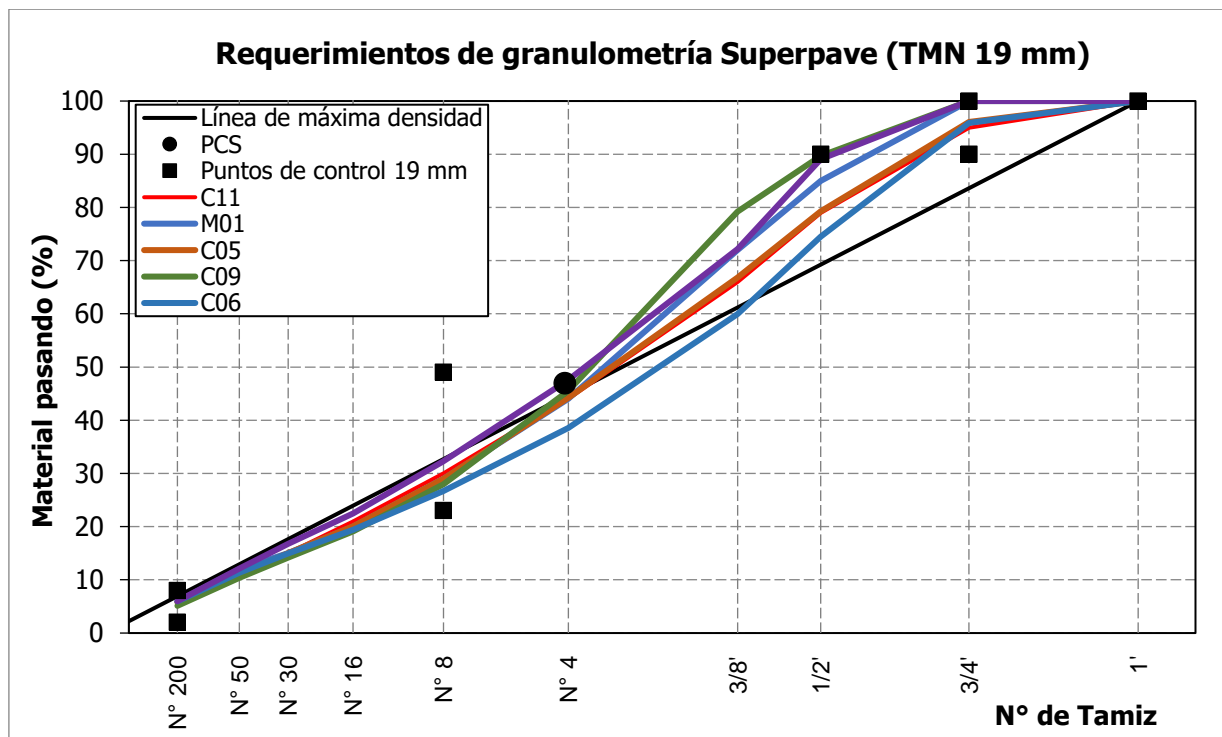
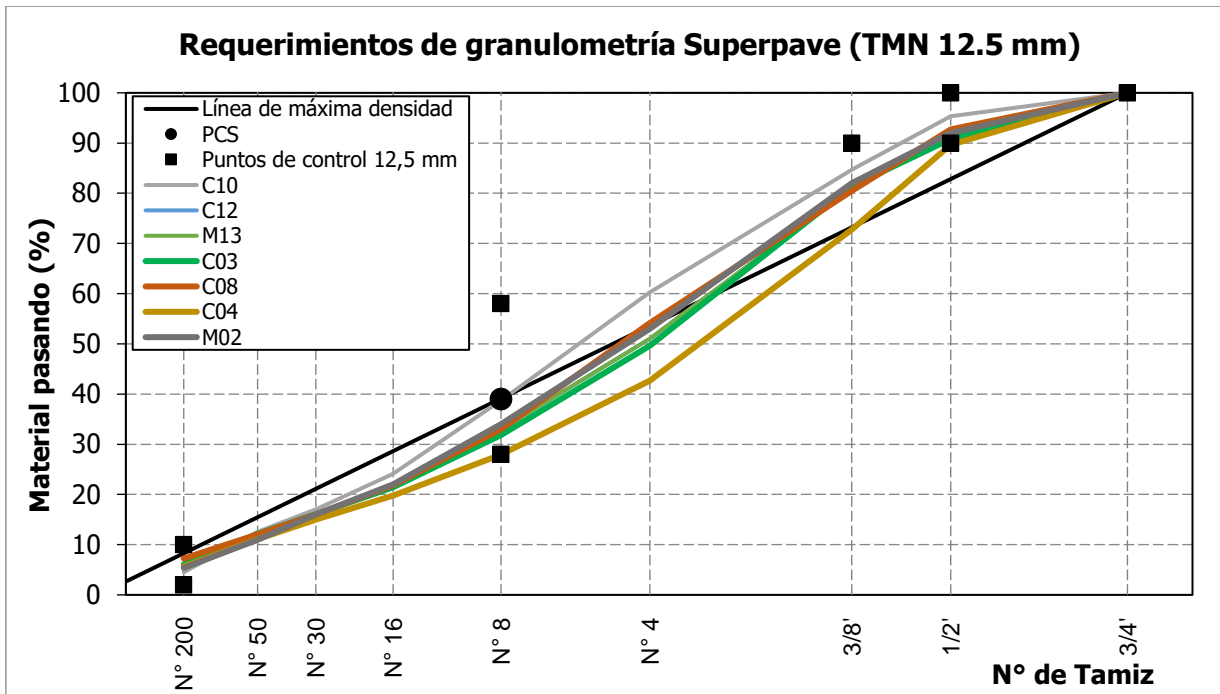


Figura 26. Puntos de control Superpave y tamiz primario de control para las mezclas con TMN de 19 mm





**Figura 27.** Puntos de control Superpave y tamiz primario de control para las mezclas con TMN de 12.5 mm

### 3.7 Parámetros volumétricos de la mezcla

A partir de informes del LanammeUCR e informes elaborados por los diseñadores de las mezclas asfálticas se calcularon algunos parámetros volumétricos de interés para evaluar su correlación con los resultados de flexión en 4 puntos y de flexión semicircular.

**Cuadro 2.** Parámetros volumétricos de las mezclas asfálticas analizadas

Código	M01	M02	M07	M13	C03	C04	C05	C06	C08	C09	C10	C11	C12
<b>P<sub>b</sub> (%)</b>	5.50	5.86	5.35	5.60	5.56	5.31	4.94	5.60	5.57	5.39	6.40	4.90	5.5
<b>P<sub>be</sub> (%)</b>	4.42	4.91	4.18	4.81	3.46	4.31	3.59	4.69	4.71	4.31	5.52	4.16	4.44
<b>VMA (%)</b>	14.00	15.00	14.80	15.00	12.40	14.10	12.40	14.40	15.00	14.80	15.70	14.00	14.00
<b>VFA (%)</b>	75.00	73.00	65.90	72.00	65.00	68.70	66.30	79.40	67.80	67.10	83.00	65.00	84.00
<b>P/A</b>	1.40	1.20	1.41	1.10	1.76	1.34	1.61	1.21	1.63	1.21	1.25	1.30	1.00
<b>Vacíos de aire (%)</b>	3.30	3.90	5.03	4.20	4.35	4.42	4.19	2.96	4.84	4.87	2.67	4.90	2.30
<b>G<sub>bs</sub> agregados combinados</b>	2.644	2.625	2.618	2.625	2.587	2.600	2.565	2.648	2.617	2.666	2.642	2.618	2.615
<b>% Pasando malla # 200</b>	5.9	5.4	6.0	5.2	6.1	5.7	5.8	6.0	7.2	5.1	4.5	5.1	5.1

### 3.8 Resultados del ensayo de flexión en 4 puntos

A partir de los resultados brindados por el LanammeUCR, se calcularon los parámetros de fatiga del ensayo de flexión en 4 puntos (AASHTO T321) mostrados en el Cuadro 3. Para este ensayo, además del número de ciclos en el que el espécimen alcanza el 50 % de su rigidez inicial (el criterio de falla que especifica el manual CR-2010), también se calculó la rigidez normalizada ( $S_{norm}$ ) y la pendiente de la fase II de la curva de fatiga (ver Figura 12).

La rigidez normalizada ( $S_{norm}$ ) es el término que se utilizará en esta investigación para referirse al producto de la rigidez y el número de ciclo al momento en que el espécimen ha alcanzado un 50 % de su rigidez inicial. Este parámetro no debe confundirse con el

parámetro que especifica la norma AASHTO T321,  $S x n$  . Este parámetro se refiere al valor máximo del producto entre la rigidez a flexión del espécimen y el número de ciclo.

Para esta investigación se utilizó la rigidez normalizada como parámetro debido a que los ensayos realizados por el LanammeUCR se realizaron de acuerdo a lo que especifica el manual CR-2010, por lo que el ensayo se detiene una vez que el espécimen alcanza el 50 % de su rigidez a flexión inicial. Para este momento del ensayo, el producto de rigidez con el número de ciclo ( $S x n$ ) no ha alcanzado su valor máximo.

La energía disipada se calcula especialmente para compararla con la energía de deformación de los especímenes semicirculares. Al igual que en los índices utilizados para el ensayo de flexión semicircular, la energía disipada se refiere al área bajo la curva de esfuerzo-deformación. La mezcla asfáltica disipa la energía aplicada mediante deformación, agrietamiento o calentamiento del material.

La pendiente de la fase II de la curva de fatiga permite considerar la rapidez con que se deteriora el espécimen durante la fase más estable del ensayo. Todas las mezclas analizadas llegaron a la falla (50 % de la rigidez) en esta fase de la curva. Sin embargo, esta la mayor limitación de este indicador es que no considera la magnitud de la rigidez y permite analizar solo su tasa de cambio respecto al avance del ensayo. Los valores esperados para este indicador son negativos y, entre menor sea su magnitud menor será la rapidez del deterioro del espécimen durante la segunda fase.

**Cuadro 3.** Resultados del ensayo de flexión en 4 puntos

<b>Código</b>	<b>M01</b>	<b>M02</b>	<b>M07</b>	<b>M13</b>	<b>C03</b>	<b>C04</b>	<b>C05</b>	<b>C06</b>	<b>C08</b>	<b>C09</b>	<b>C10</b>	<b>C11</b>	<b>C12</b>
<b>Rigidez inicial (400 <math>\mu s</math>)</b>	3025	7921	7182	8052	6474	7213	7215	5801	6799	5747	6324	8163	8035
<b>Ciclos de carga (400 <math>\mu s</math>)</b>	240333	145780	40503	70145	147203	176123	111078	62753	92953	133888	154428	76478	57908
<b>S<sub>norm</sub> (400 <math>\mu s</math>)</b>	924.1	557.2	145.3	279.8	332.9	630.5	386.9	181.9	337.2	257.8	485.6	305.3	228.8
<b>U disipada (400 <math>\mu s</math>)</b>	71.1	250.8	64.2	123.5	137.2	264.8	158.4	76.7	139.4	110.0	213.5	131.6	104.2
<b>m<sub>fase II</sub> (400 <math>\mu s</math>)</b>	-0.006	-0.010	-0.069	-0.039	-0.020	-0.012	-0.011	-0.072	-0.032	-0.056	-0.053	-0.023	-0.034
<b>Rigidez inicial (600 <math>\mu s</math>)</b>	4081	7755	7446	7215	6220	6079	7178	5407	6414	5017	6498	7644	7478
<b>Ciclos de carga (600 <math>\mu s</math>)</b>	30667	10743	6463	7348	18980	14573	7770	6838	18223	15660	17240	9018	9195
<b>S<sub>norm</sub> (600 <math>\mu s</math>)</b>	248.0	41.1	23.2	26.0	28.1	43.4	24.9	18.5	58.2	43.1	55.8	34.1	34.2
<b>U disipada (600 <math>\mu s</math>)</b>	92.4	43.9	23.4	28.2	28.5	43.8	25.4	18.8	57.7	40.6	55.6	35.0	36.1
<b>m<sub>fase II</sub> (600 <math>\mu s</math>)</b>	-0.095	-0.314	-0.999	-0.371	-0.244	-0.227	-0.278	-0.264	-0.107	-0.065	-0.086	-0.234	-0.301

### 3.9 Resultados del ensayo de flexión semicircular

Se utilizaron las salidas del ensayo de flexión semicircular (ASTM D8044) para calcular diversos parámetros de fatiga. Los resultados se muestran en el Cuadro 4.

**Cuadro 4.** Resultados del ensayo de flexión semicircular

<b>Código</b>	<b>M01</b>	<b>M02</b>	<b>M07</b>	<b>M13</b>	<b>C03</b>	<b>C04</b>	<b>C05</b>	<b>C06</b>	<b>C08</b>	<b>C09</b>	<b>C10</b>	<b>C11</b>	<b>C12</b>
<b>Energía de fractura (J/m<sup>2</sup>)</b>	555.350	550.686	344.427	452.847	384.537	346.457	301.997	342.806	427.516	387.920	552.250	390.407	443.797
<b>Jc (kJ/m<sup>2</sup>)</b>	0.694	0.696	0.444	0.370	0.385	0.481	0.338	0.451	0.486	0.320	0.708	0.513	0.419
<b>FI</b>	6.500	5.545	2.396	2.767	4.669	3.264	2.163	4.390	4.057	6.675	23.492	4.793	0.419
<b>CRI</b>	528.2	502.4	346.7	365.8	461.7	385.8	311.6	444.2	428.3	539.9	1044.6	472.5	575.4
<b>TI</b>	0.278	0.246	0.096	0.144	0.156	0.120	0.082	0.143	0.168	0.210	0.523	0.162	0.243

## **CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **4.1 Relación de los parámetros volumétricos con los parámetros de susceptibilidad a la fatiga y agrietamiento**

Algunas características volumétricas de la mezcla asfáltica en caliente influyen de manera directa o indirecta al comportamiento del material ante la fatiga. A continuación, se describe los parámetros volumétricos de la mezcla incluidos en el análisis, así como su relación con la resistencia a fatiga.

#### **4.1.1 Parámetros volumétricos analizados**

Las propiedades volumétricas se refieren a las propiedades de un material contenido en un volumen conocido. Los parámetros volumétricos de la mezcla pueden ser medidos (por ejemplo, la masa de agregado) o pueden ser calculados (por ejemplo, los vacíos en el agregado mineral). Para esta investigación se consideraron 6 parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica que tienen efectos importantes en el desempeño a fatiga del material. Los parámetros volumétricos de interés se describen a continuación.

- Vacíos de aire ( $V_a$ ): se refiere al volumen de los espacios que contienen aire entre el agregado recubierto por asfalto en una mezcla compactada. Los vacíos de aire contribuyen a la estabilidad de la MAC, brindan espacio para la expansión térmica del ligante asfáltico y dejan espacio para el reacomodo del ligante debido a las cargas de tránsito, previniendo la exudación. Los vacíos de aire se expresan como la relación entre la densidad compactada de la MAC y la densidad máxima teórica de la mezcla. Los vacíos de aire se reducen con la compactación, y estudios anteriores indican que la resistencia a la fatiga aumenta conforme se reducen los vacíos de aire.
- Porcentaje de asfalto ( $P_b$ ): describe la porción de masa de la MAC que está constituida por ligante asfáltico. Para un mismo agregado, mayores contenidos de asfalto son favorables para la resistencia a la fatiga, pues mejoran la capacidad de la MAC de deformarse sin fracturarse. Es importante considerar las características de absorción del agregado, pues cualquier porción del asfalto que sea absorbida por el agregado mineral no contribuirá a la resistencia al agrietamiento de la MAC.
- Porcentaje de asfalto efectivo ( $P_{be}$ ): es el contenido de asfalto ( $P_b$ ) sin considerar la cantidad de asfalto que es absorbido por el agregado mineral ( $P_{ba}$ ). Este parámetro es

importante ya que es el contenido de asfalto efectivo, o el asfalto que se encuentra libre entre las partículas, el que le brinda a la MAC sus características viscoelásticas. Si gran parte del asfalto es absorbido por el agregado, la resistencia a la fatiga de la MAC podría afectarse negativamente.

- Relación polvo-asfalto (P/A): se define como a relación entre el porcentaje pasando el tamiz No. 200 y el porcentaje de asfalto efectivo ( $P_{be}$ ). El agregado fino que se mezcla con el ligante asfáltico lo rigidiza, por lo que relaciones polvo-asfalto altas afectan negativamente la resistencia a la fatiga de la MAC.
- Vacíos en el agregado mineral (VMA): se refiere al volumen interparticular en el agregado mineral, que es ocupado por el asfalto efectivo y los vacíos de aire.
- Vacíos llenos con asfalto (VFA): define el volumen interparticular (VMA) que se encuentra ocupado por ligante asfáltico. Al igual que el porcentaje de asfalto efectivo, un aumento en el VFA tendrá un impacto positivo en la resistencia a fatiga de la MAC.

En el Cuadro 5 se resume el comportamiento esperado de los parámetros volumétricos en relación con el aumento de la resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica.

**Cuadro 5.** Comportamiento esperado de la resistencia a la fatiga en función de los parámetros volumétricos

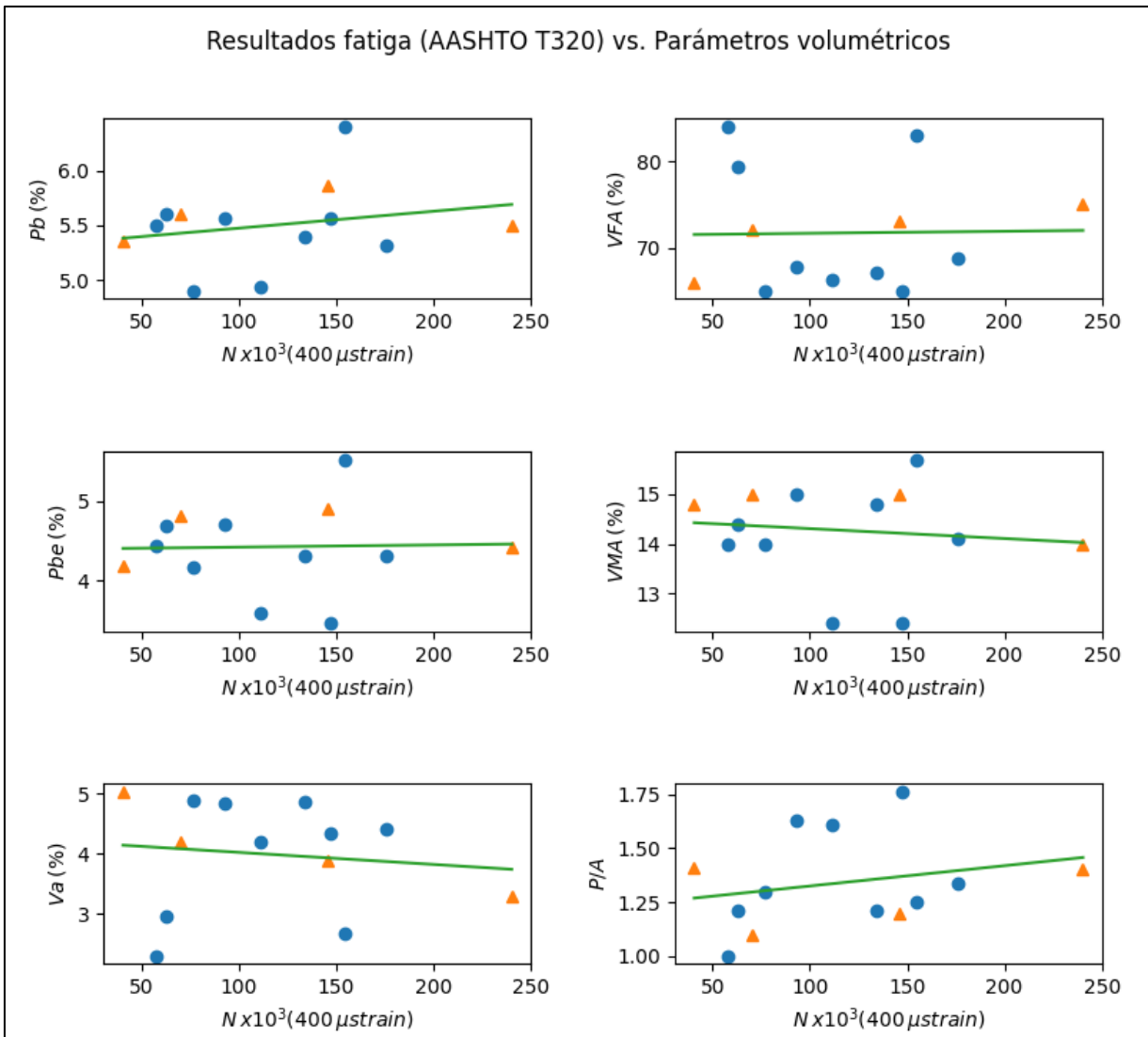
Parámetro A	Comportamiento	Parámetro B	Comportamiento
Resistencia al fisuramiento por fatiga	Aumenta ↑	Porcentaje de asfalto ( $P_b$ )	Aumenta ↑
		Porcentaje de asfalto efectivo ( $P_{be}$ )	Aumenta ↑
		Vacíos de aire de diseño ( $V_a$ )	Disminuye ↓
		Vacíos en el agregado mineral (VMA)	Aumenta ↑
		Vacíos llenos con asfalto (VFA)	Aumenta ↑
		Relación polvo-asfalto (P/A)	Disminuye ↓

#### **4.1.2 Relación de los parámetros volumétricos con los resultados del ensayo de flexión en 4 puntos**

Se graficaron los 6 parámetros volumétricos de la MAC descritos anteriormente en función de los números de ciclo y la rigidez normalizada. De esta manera se pueden identificar y cotejar

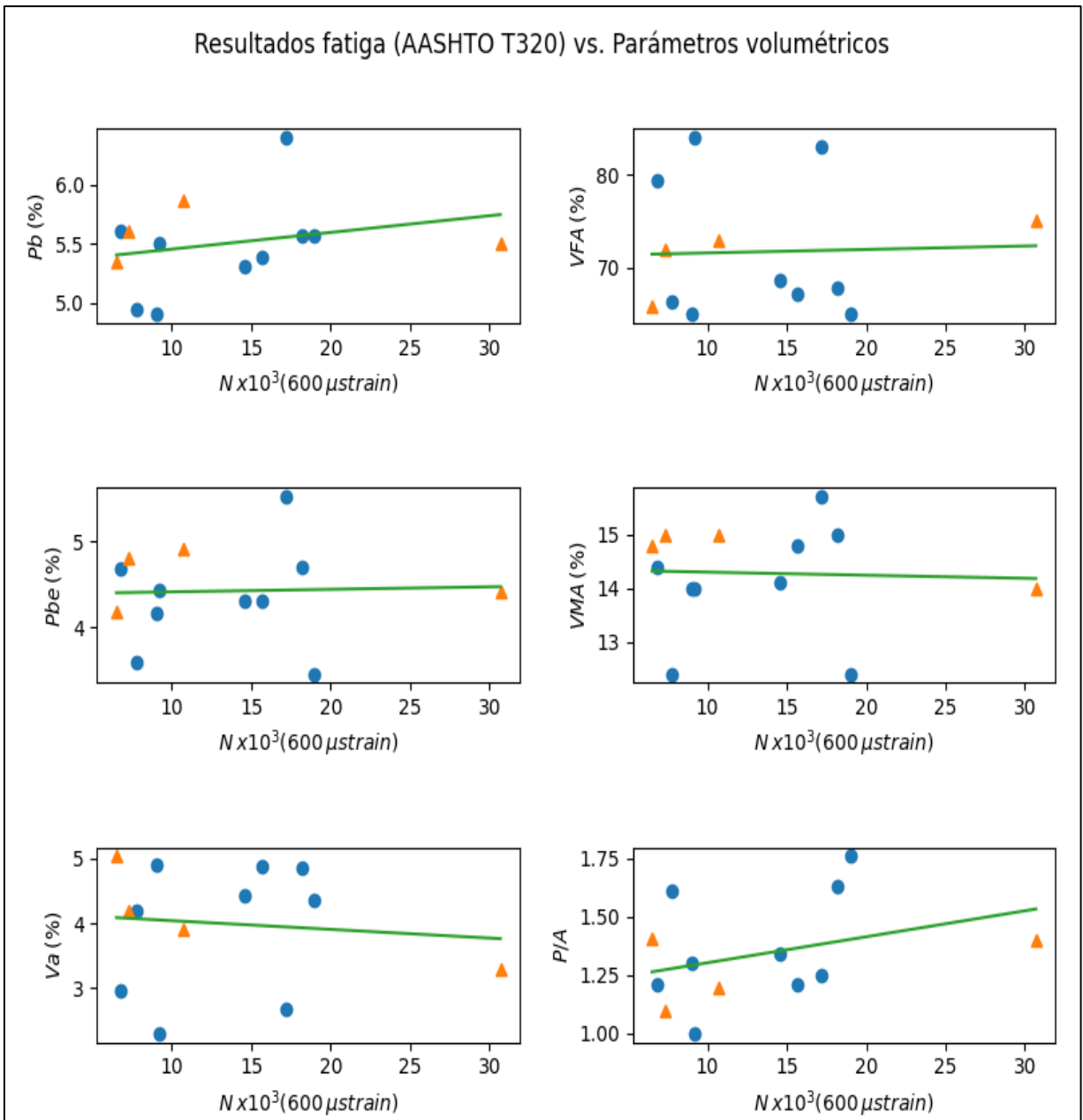
las tendencias de los datos respecto al comportamiento esperado. Las figuras 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34 y 35 presentan las gráficas de interés.

En general, se observan tendencias muy débiles entre los parámetros volumétricos y los resultados del ensayo de flexión en 4 puntos, tanto para el número de ciclos como para la rigidez normalizada. En la sección 4.1.4 se analiza la correlación entre los parámetros volumétricos y de fatiga utilizando el coeficiente de correlación de Pearson.

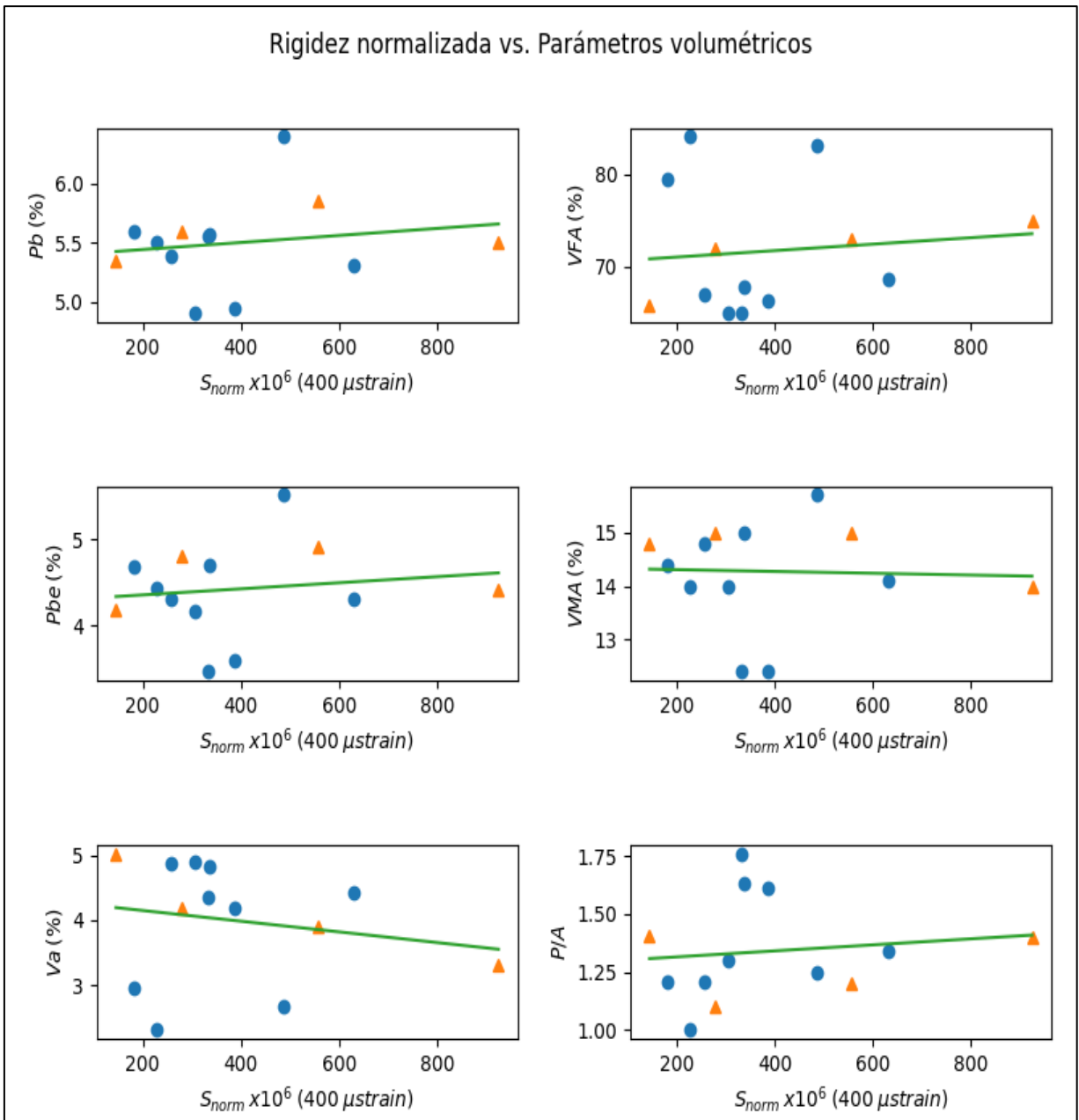


**Figura 28.** Número de ciclos  $400 \mu s$  (AASHTO T 321) vs. parámetros volumétricos

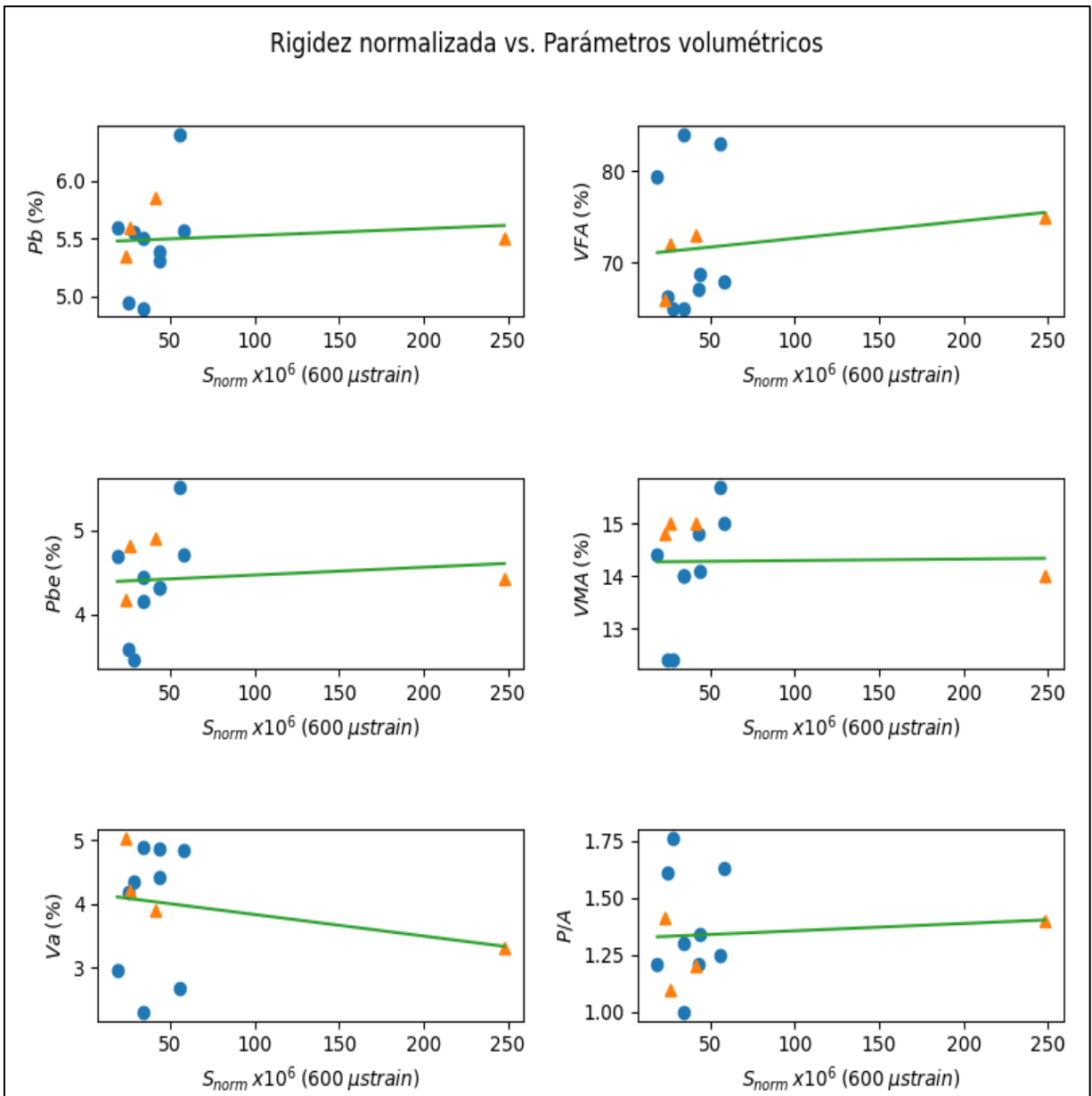




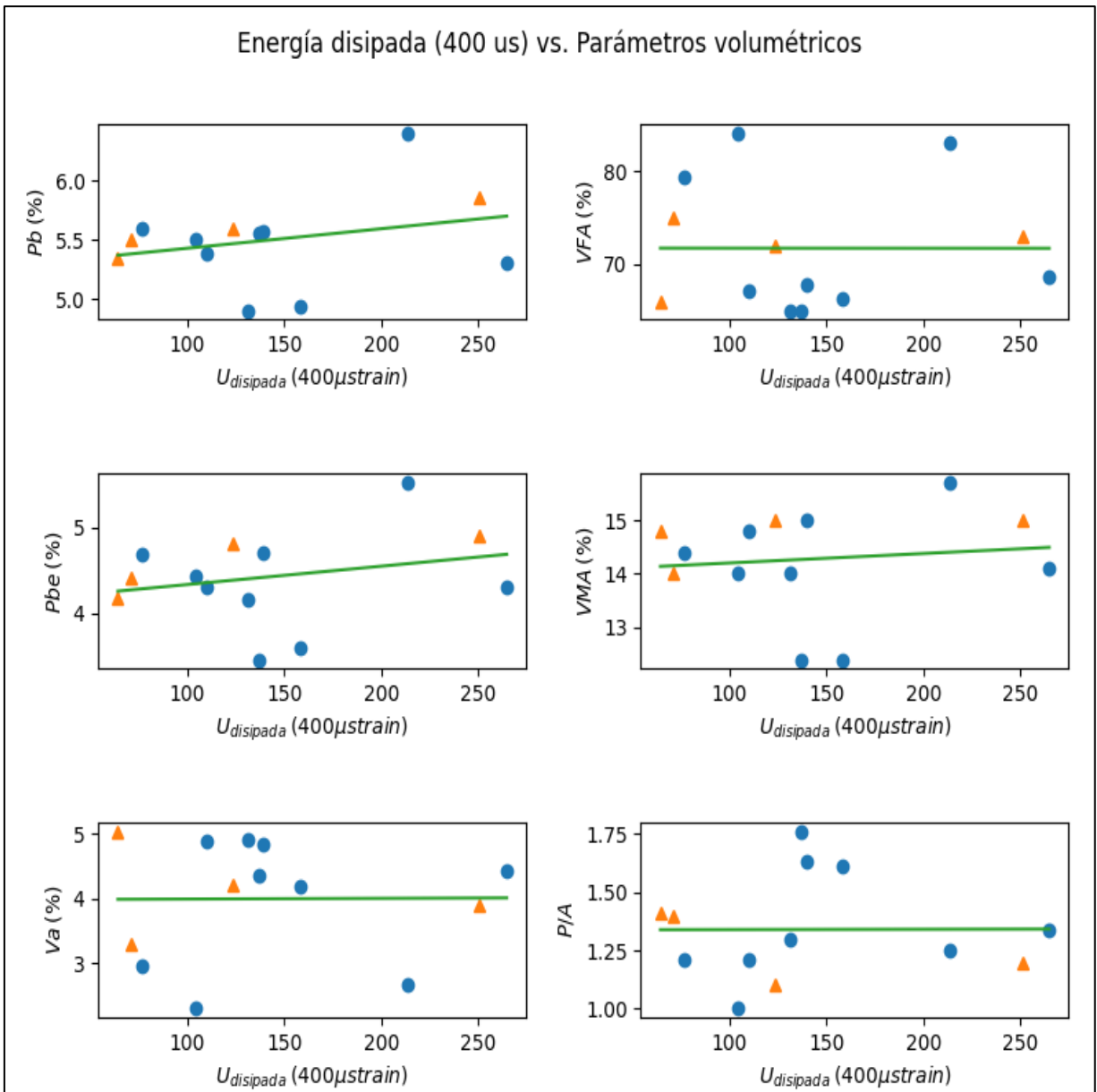
**Figura 29.** Número de ciclos  $600 \mu s$  (AASHTO T 321) vs. parámetros volumétricos



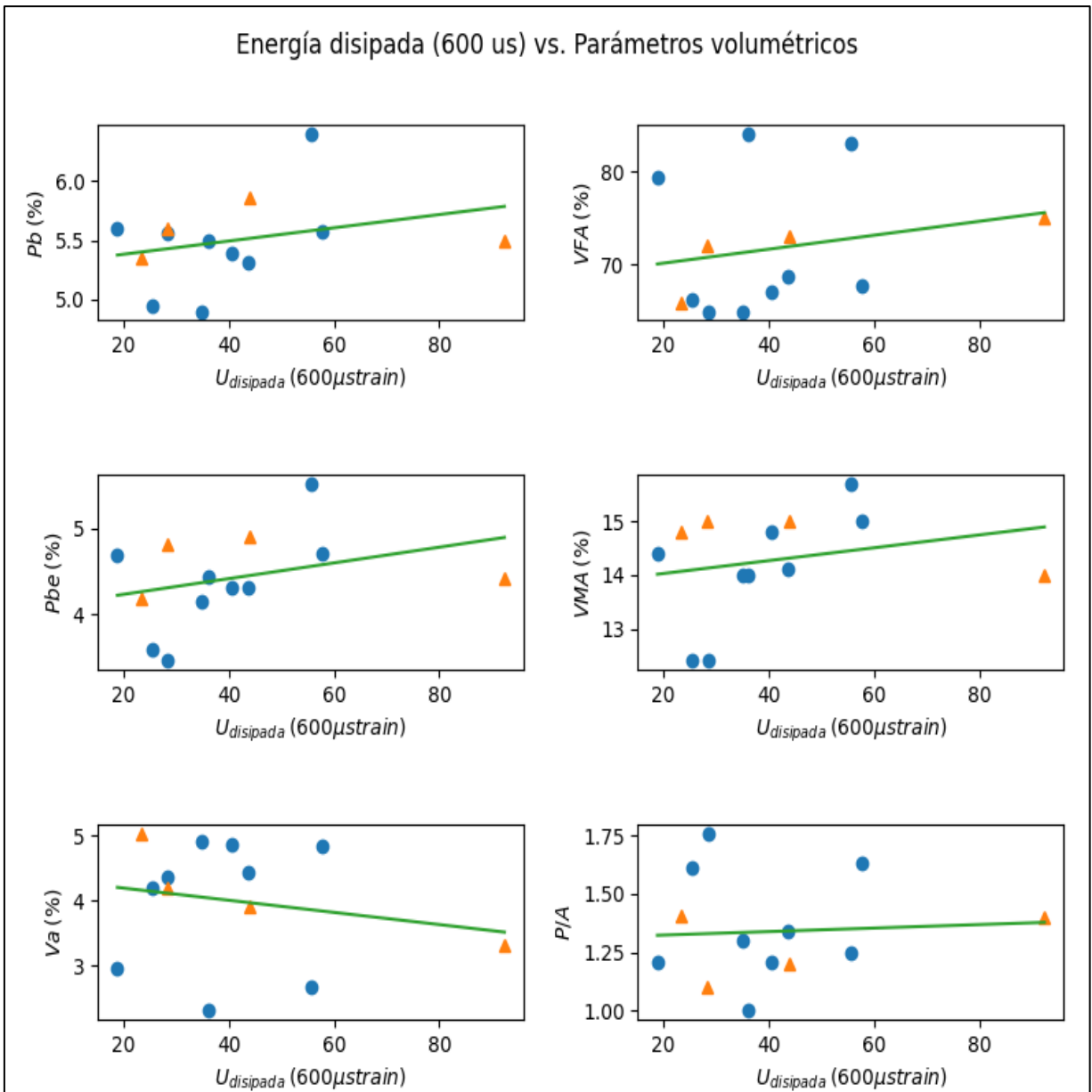
**Figura 30.** Rigidez normalizada  $400 \mu\text{s}$  (AASHTO T 321) vs. parámetros volumétricos



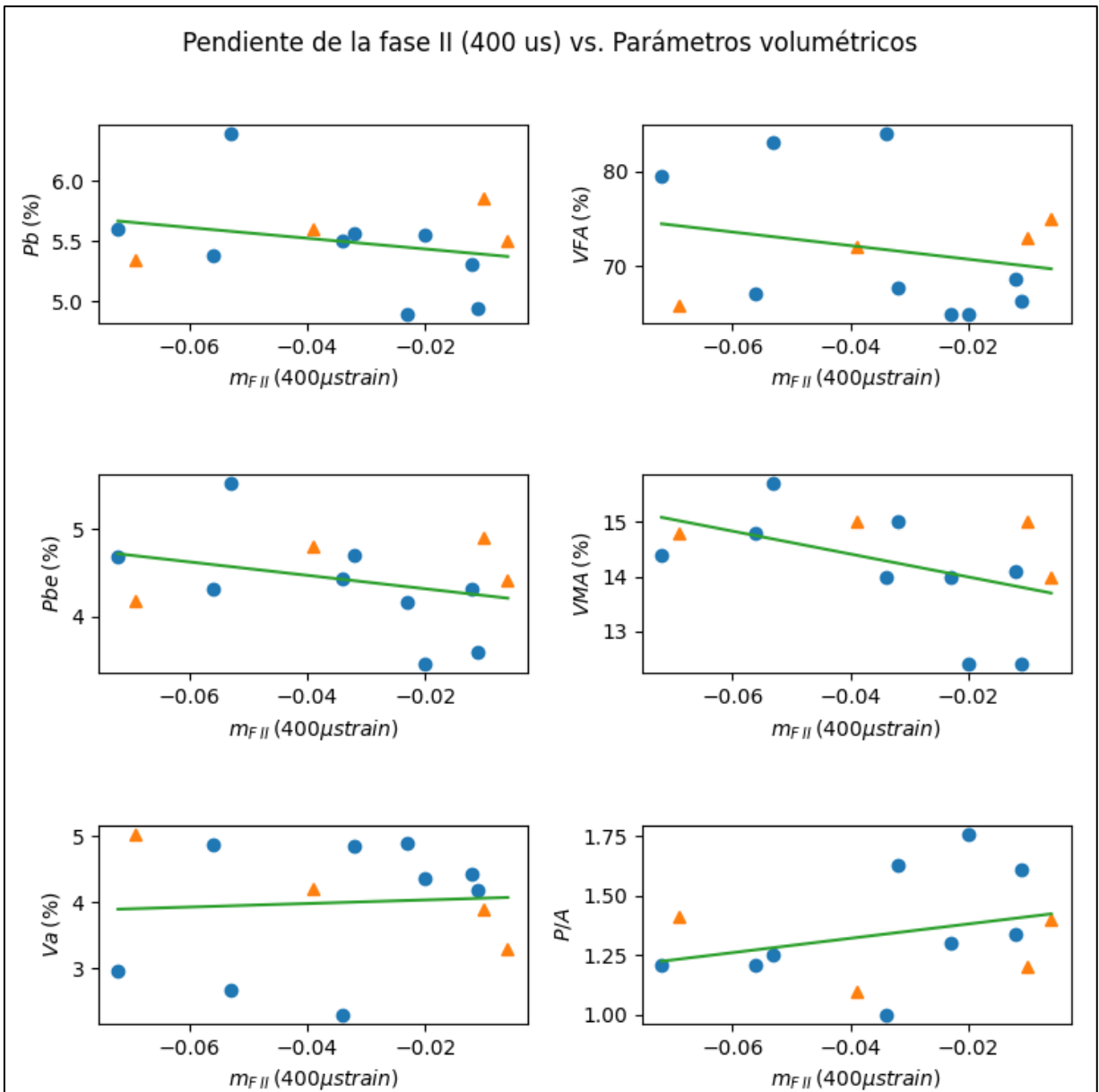
**Figura 31.** Rigidez normalizada  $600 \mu\text{s}$  (AASHTO T 321) vs. parámetros volumétricos



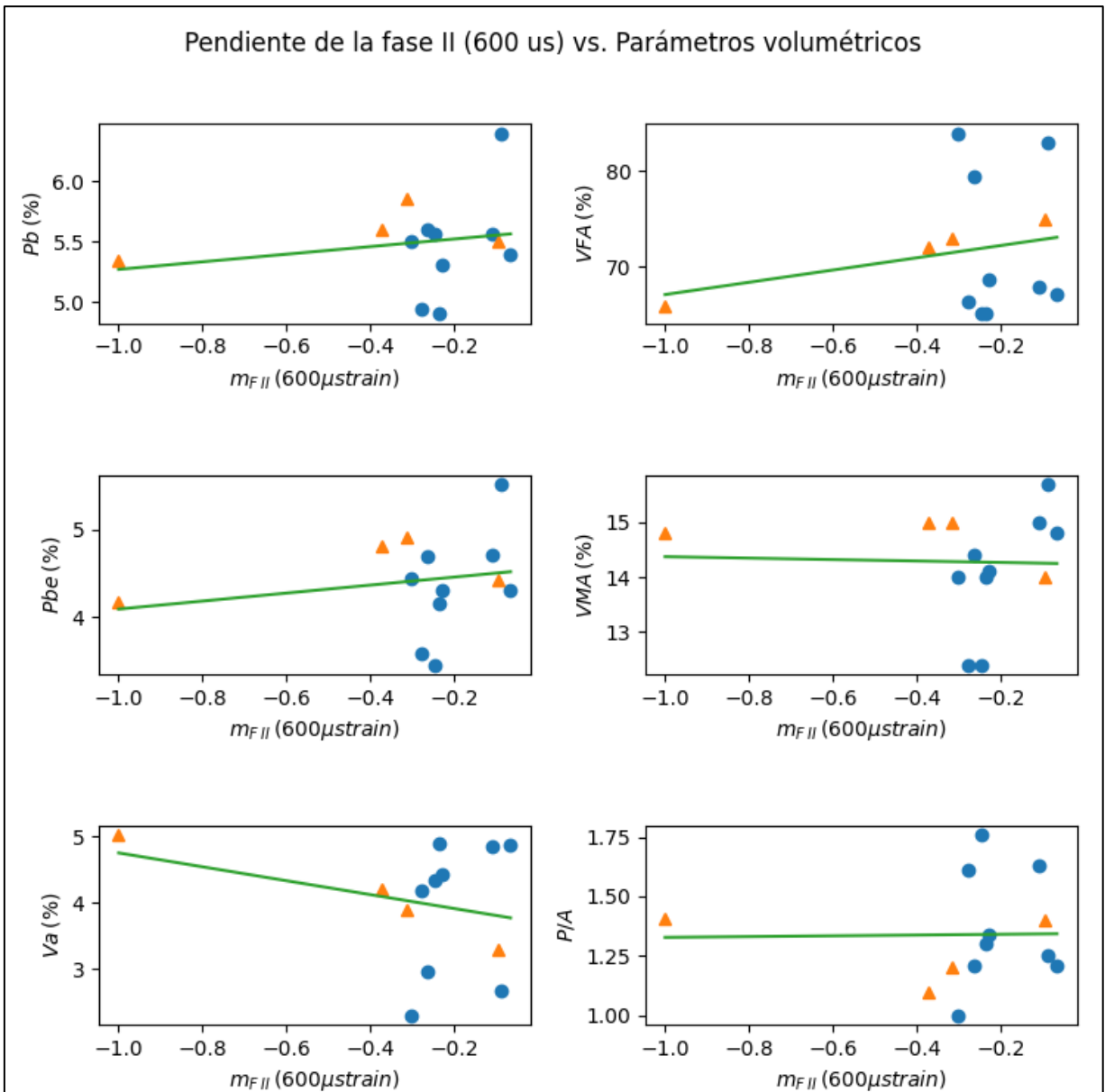
**Figura 32.** Energía disipada 400 ms (AASHTO T 321) vs. parámetros volumétricos



**Figura 33.** Energía disipada 600 ms (AASHTO T 321) vs. parámetros volumétricos



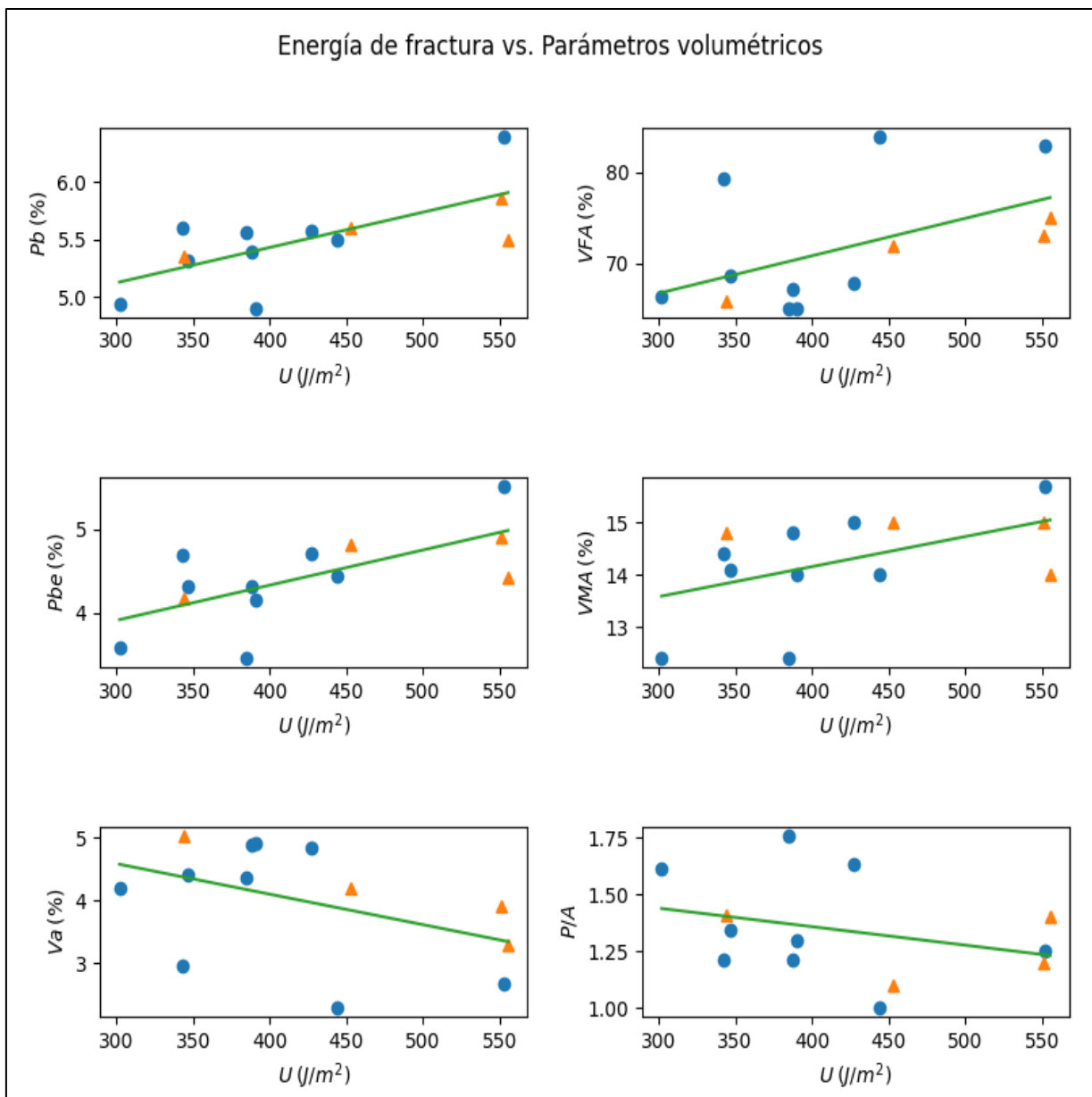
**Figura 34.** Pendiente de la fase II 400 ms (AASHTO T 321) vs. parámetros volumétricos



**Figura 35.** Pendiente de la fase II 600 ms (AASHTO T 321) vs. parámetros volumétricos

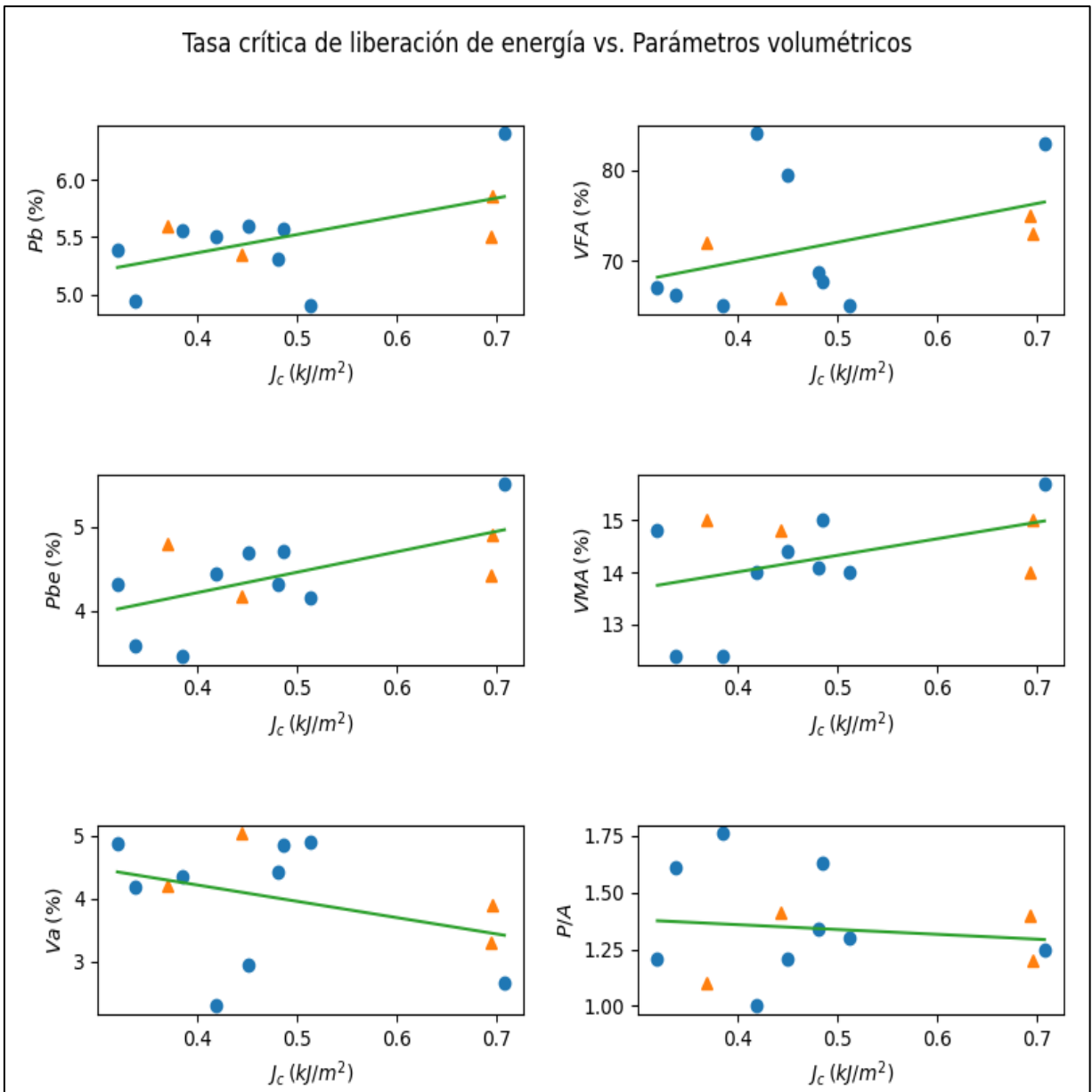
### 4.1.3 Relación de los parámetros volumétricos con los resultados de flexión semicircular

De manera similar a los resultados de flexión en 4 puntos, también se graficaron los parámetros volumétricos en función de los resultados del ensayo de flexión semicircular (SCB). En este caso, se logra observar una mejor correlación entre los parámetros y, se observan más claramente las relaciones que van de la mano con el comportamiento esperado. Las gráficas de los parámetros de flexión semicircular se muestran en las figuras 36, 37, 38, 39 y 40.

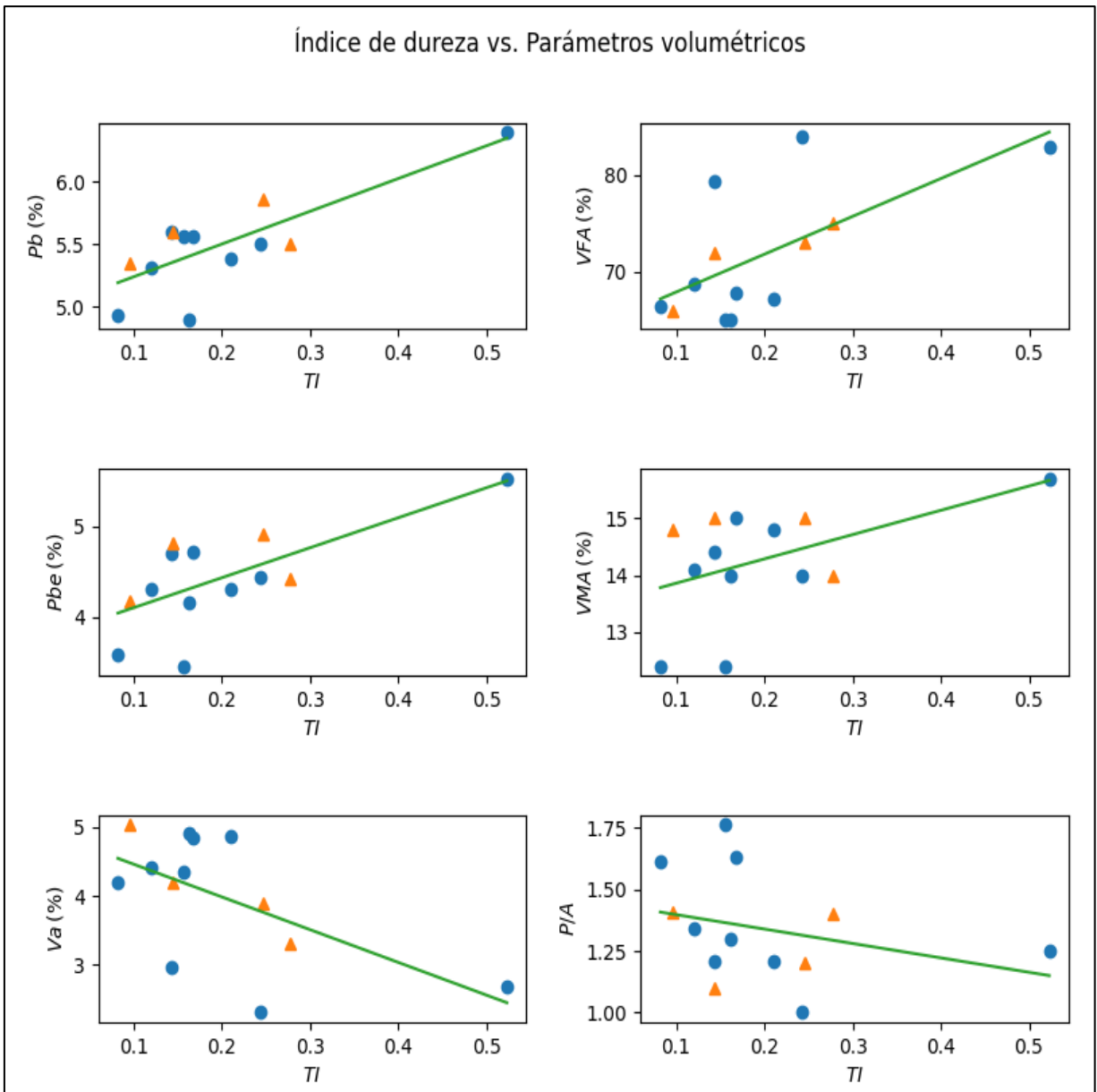


**Figura 36.** Energía de fractura (SCB) vs. parámetros volumétricos

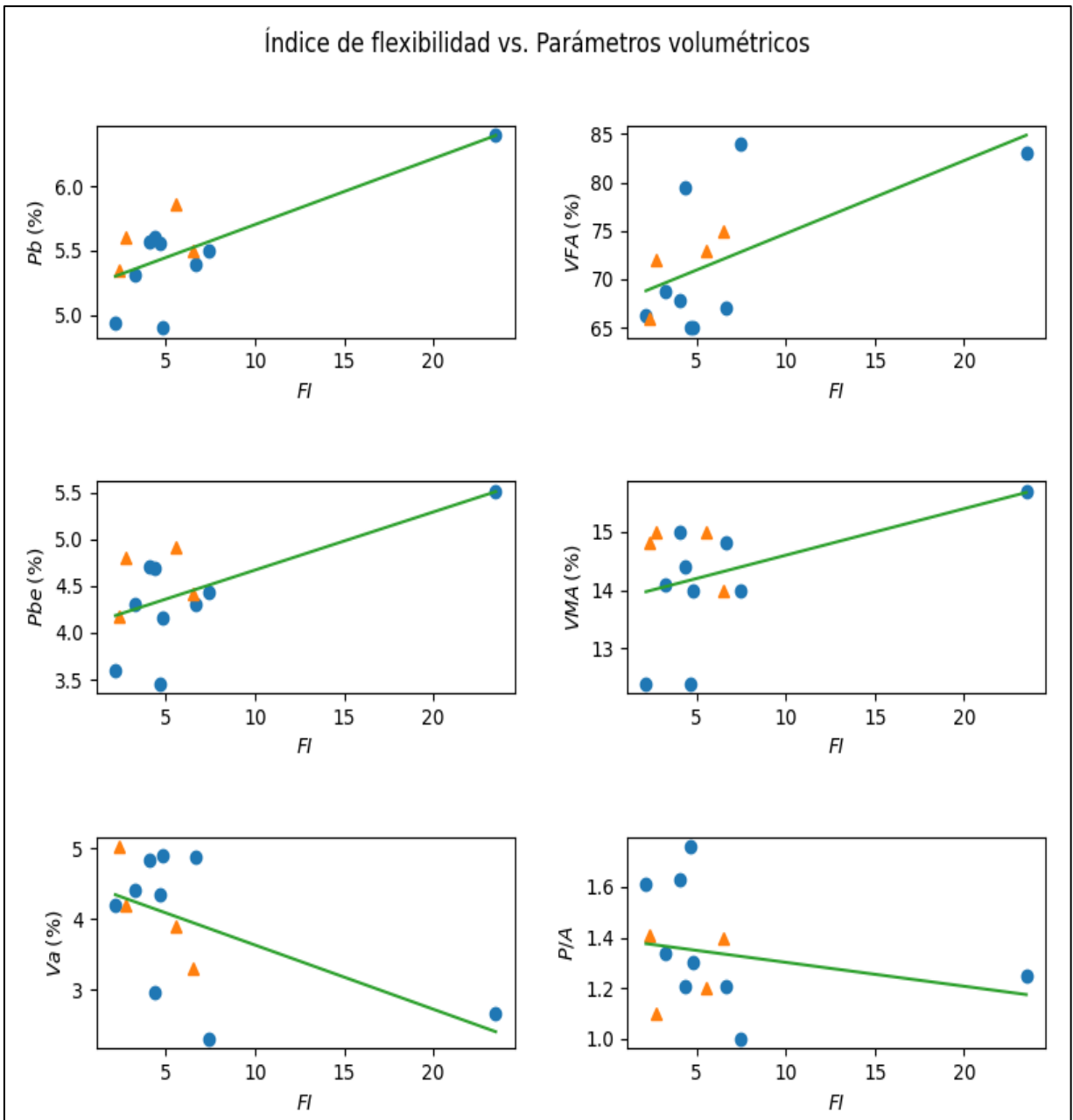




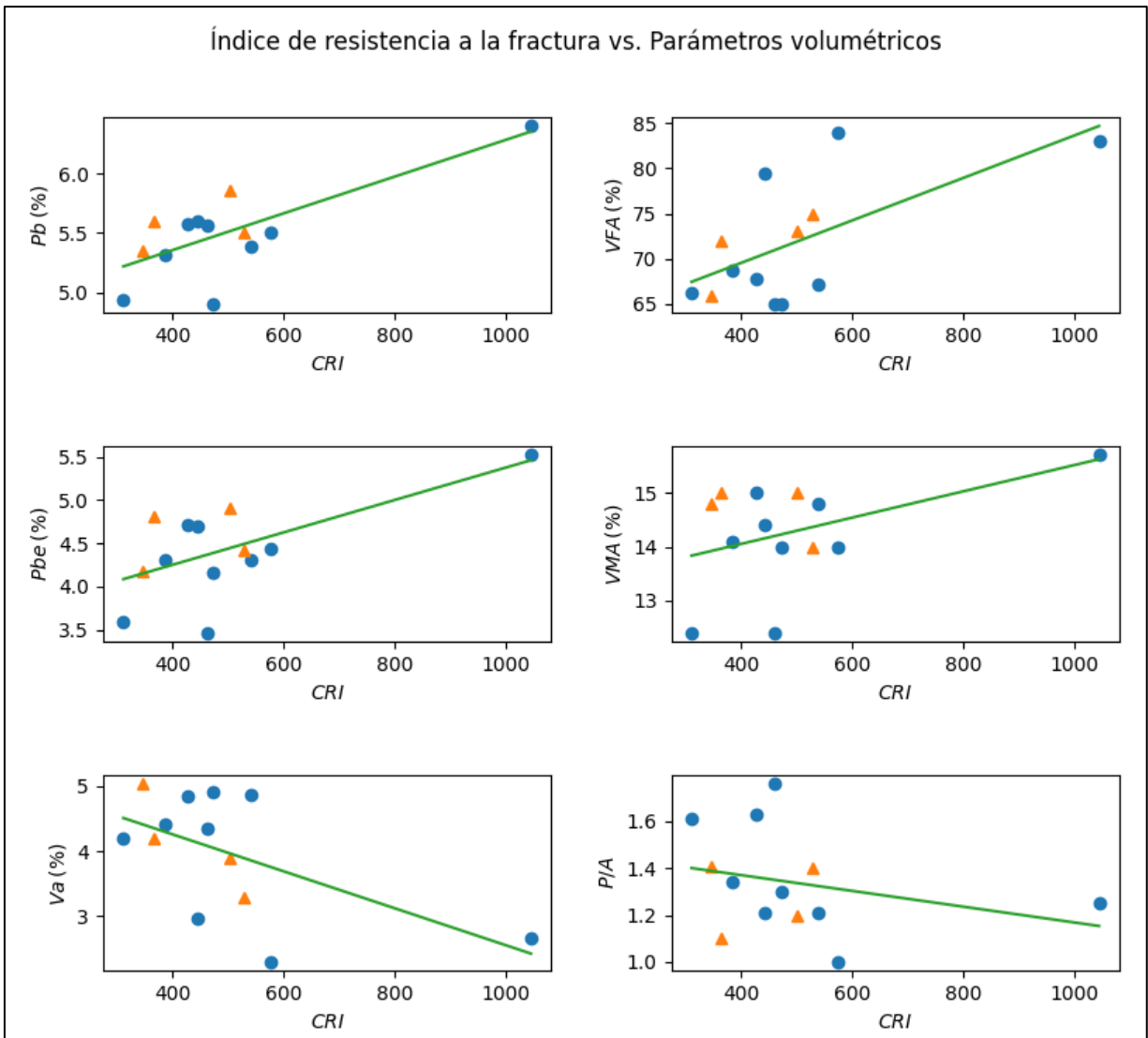
**Figura 37.** Tasa crítica de liberación de energía (SCB) vs. parámetros volumétricos



**Figura 38.** Índice de dureza (SCB) vs. parámetros volumétricos



**Figura 39.** Índice de flexibilidad (SCB) vs. parámetros volumétricos



**Figura 40.** Índice de resistencia a la fractura (SCB) vs. parámetros volumétricos

**4.1.4 Análisis de correlación entre los parámetros volumétricos de la mezcla y los resultados de los ensayos de susceptibilidad a la fatiga y agrietamiento**

Para verificar la correlación se decidió utilizar la prueba de correlación de Pearson. La prueba de correlación de Pearson permite determinar si dos variables están relacionadas linealmente. El valor del coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) varía entre 1 y -1, cuanto más cercano sea a 0 menor es la fuerza de la relación lineal entre las variables. El signo positivo o negativo del coeficiente indica si la relación lineal entre las variables es directa (signo positivo) o indirecta (signo negativo).

La hipótesis nula y alternativa de esta prueba se muestran a continuación:

$$H_0: r_{x,y} = 0$$
$$H_1: r_{x,y} \neq 0$$

La hipótesis nula indica que el coeficiente de correlación es igual a cero, de tal manera que no habría correlación lineal entre las variables. Por otra parte, la hipótesis alternativa indica que el coeficiente será diferente de cero, indicando que existe correlación lineal entre las variables.

En los cuadros 6 y 7 se muestran los coeficientes de correlación de Pearson correspondientes a la relación lineal entre los parámetros volumétricos de la MAC y los resultados del ensayo de flexión en 4 puntos. De manera similar a lo observado visualmente en las gráficas de dispersión mostradas en la sección 4.1.2, los coeficientes de correlación de Pearson demuestran una correlación pobre entre las variables de interés.

Los ciclos de carga, la rigidez normalizada y la energía disipada se relacionan directamente con la resistencia a la fatiga. Por esta razón, de acuerdo con los comportamientos esperados presentados en el Cuadro 5, los coeficientes de Pearson para estos indicadores y su relación con el contenido de asfalto, asfalto efectivo, VFA y VMA deberían ser positivos. Por el contrario, los coeficientes de Pearson para estos indicadores y la correlación con los vacíos de aire y la relación polvo asfalto deberían ser negativos.

Los coeficientes de Pearson para el indicador de pendiente de la fase II ( $m_{\text{fase II}}$ ) deberían el comportamiento opuesto a lo expuesto anteriormente. Esto debido a que la relación indirecta entre la pendiente de la fase II y la resistencia a la fatiga (entre más negativa sea la pendiente, más rápido se deteriora el espécimen).

La escala de colores de los cuadros 6 y 7 permite analizar de manera visual los valores del coeficiente de Pearson de acuerdo a los valores esperados que se explicaron anteriormente. Se observa que para los indicadores del ensayo de flexión a 4 puntos realizado a una deformación controlada de  $400 \mu s$  la mayoría de las correlaciones siguió el comportamiento esperado, pero, los coeficientes de Pearson con valores cercanos a cero indican que la correlación es débil.

En el caso de la relación entre el VMA con los ciclos de carga y la rigidez normalizada, el color anaranjado indica que se esperaba obtener coeficientes de Pearson positivos. De manera similar, la relación P/A también presenta coeficientes de Pearson con el signo contrario al esperado. Sin embargo, aunque estos coeficientes de Pearson indiquen correlaciones en

direcciones opuestas a lo esperado, sus magnitudes bajas nuevamente indican correlaciones bastante débiles.

**Cuadro 6.** Coeficientes de correlación de Pearson para los resultados de flexión en 4 puntos (400  $\mu s$ ) en función de los parámetros volumétricos de la MAC

Variables	Coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ )			
	Ciclos de carga (400 $\mu s$ )	$S_{norm}$ (400 $\mu s$ )	Energía disipada (400 $\mu s$ )	$m_{fase II}$ (400 $\mu s$ )
<b>P<sub>b</sub></b>	0.23	0.17	0.28	-0.27
<b>P<sub>be</sub></b>	0.03	0.14	0.26	-0.32
<b>V<sub>a</sub></b>	-0.13	-0.19	0.01	0.07
<b>VFA</b>	0.02	0.11	0.00	-0.24
<b>VMA</b>	-0.12	-0.04	0.12	-0.49
<b>P/A</b>	0.24	0.13	0.00	0.31

El Cuadro 7 presenta un comportamiento similar al expuesto anteriormente, aunque destaca que el indicador de a pendiente de la fase II presenta un comportamiento completamente opuesto al esperado. Este hecho, en conjunto con la magnitud baja de los coeficientes se pueden asociar a la alta variabilidad que presenta este indicador (se detalla en la sección 4.2).

**Cuadro 7.** Coeficientes de correlación de Pearson para los resultados de flexión en 4 puntos (600  $\mu s$ ) en función de los parámetros volumétricos de la MAC

Variables	Coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ )			
	Ciclos de carga (600 $\mu s$ )	$S_{norm}$ (600 $\mu s$ )	Energía disipada (600 $\mu s$ )	$m_{fase II}$ (600 $\mu s$ )
<b>P<sub>b</sub></b>	0.26	0.09	0.29	0.20
<b>P<sub>be</sub></b>	0.04	0.10	0.33	0.20
<b>V<sub>a</sub></b>	-0.10	-0.22	-0.20	-0.27
<b>VFA</b>	0.04	0.17	0.22	0.23
<b>VMA</b>	-0.04	0.02	0.24	-0.03
<b>P/A</b>	0.35	0.09	0.07	0.02

Los coeficientes de correlación de Pearson mostraron valores más satisfactorios para los resultados del ensayo de flexión semicircular (Cuadro 8). En este caso los coeficientes de correlación de Pearson reflejaron de manera correcta el comportamiento esperado de los resultados de flexión semicircular ante los parámetros volumétricos. Adicionalmente, en general las magnitudes de los coeficientes de Pearson aumentaron, indicando una mayor fuerza

de la correlación entre los indicadores del ensayo de flexión semicircular y los parámetros volumétricos.

**Cuadro 8.** Coeficientes de correlación de Pearson para los resultados de flexión semicircular en función de los parámetros volumétricos de la MAC

Variables	Coeficiente de correlación de Pearson ( <i>r</i> )				
	U	Jc	FI	CRI	TI
<b>P<sub>b</sub></b>	0.70	0.57	0.75	0.75	0.79
<b>P<sub>be</sub></b>	0.67	0.61	0.63	0.64	0.69
<b>V<sub>a</sub></b>	-0.46	-0.38	-0.55	-0.57	-0.60
<b>VFA</b>	0.53	0.43	0.61	0.64	0.66
<b>VMA</b>	0.51	0.44	0.45	0.46	0.50
<b>P/A</b>	-0.32	-0.13	-0.24	-0.28	-0.30

Para verificar la significancia de la correlación, se llevó a cabo una prueba estadística para la regresión que se muestra en la ecuación 13.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X \quad \text{[Ecu. 13]}$$

Donde:

*Y*: variable dependiente

*X*: variable independiente

$\beta_0$ : constante (intercepto)

$\beta_1$ : pendiente de la regresión

Adicionalmente, se definen la hipótesis nula y alternativa para la prueba:

$$H_0: \beta_1 = 0$$

$$H_1: \beta_1 \neq 0$$

En donde la hipótesis nula establece que la pendiente de la regresión es igual a cero, indicando que la variable dependiente no es sensible a los cambios en la variable independiente. De manera contraria, la hipótesis nula establece que la pendiente de la regresión es diferente de cero, indicando que los cambios en la variable independiente influyen a la variable dependiente.

Los resultados de la prueba estadística se muestran en los cuadros 9 y 10, para los indicadores de flexión en 4 puntos y flexión semicircular respectivamente. Si se parte de un nivel de significancia típico del 95 %, ninguna de las relaciones establecidas entre los resultados de flexión en 4 puntos y los parámetros volumétricos es significativa.

**Cuadro 9.** Valores P de la prueba t para la regresión entre los resultados de flexión en 4 puntos y los parámetros volumétricos de la MAC

Variables	P-valor							
	Ciclos de carga (400 $\mu$ s)	Ciclos de carga (600 $\mu$ s)	S <sub>norm</sub> (400 $\mu$ s)	S <sub>norm</sub> (600 $\mu$ s)	U disipada (400 $\mu$ s)	U disipada (600 $\mu$ s)	m <sub>fase II</sub> (400 $\mu$ s)	m <sub>fase II</sub> (600 $\mu$ s)
<b>P<sub>b</sub></b>	0.44	0.39	0.58	0.76	0.35	0.34	0.37	0.52
<b>P<sub>be</sub></b>	0.93	0.90	0.65	0.74	0.40	0.27	0.28	0.51
<b>V<sub>a</sub></b>	0.68	0.74	0.52	0.46	0.98	0.51	0.83	0.36
<b>VFA</b>	0.95	0.90	0.72	0.58	1.00	0.48	0.43	0.46
<b>VMA</b>	0.70	0.89	0.90	0.96	0.70	0.43	0.09	0.92
<b>P/A</b>	0.42	0.24	0.68	0.78	0.99	0.83	0.30	0.95

Por otra parte, los resultados de la prueba estadística son más satisfactorios para la relación entre los resultados de flexión semicircular y los parámetros volumétricos de la MAC. Los valores P para todos los resultados del ensayo de flexión semicircular y el porcentaje de asfalto y asfalto efectivo permiten rechazar la hipótesis nula con un 95 % de confianza, indicando que los resultados de flexión semicircular sí son sensibles ante cambios en el contenido de asfalto.

De manera similar, los parámetros de flexión semicircular que toman en cuenta las características de forma de la curva de carga-deformación también presentan valores P que indican la significancia de la correlación con los vacíos de aire y el VFA. Se encuentran resultados negativos en la relación de los resultados de flexión semicircular y el parámetro de polvo-asfalto, en el que para rechazar la hipótesis nula se requeriría reducir el nivel de significancia a valores entre 70 % y 30 % de confianza.

**Cuadro 10.** Valores P de la prueba t para la regresión entre los resultados de flexión semicircular y los parámetros volumétricos de la MAC

Variables	P-valor				
	U	Jc	FI	CRI	TI
<b>P<sub>b</sub></b>	<b>0.008</b>	<b>0.043</b>	<b>0.003</b>	<b>0.003</b>	<b>0.001</b>
<b>P<sub>be</sub></b>	<b>0.013</b>	<b>0.027</b>	<b>0.020</b>	<b>0.019</b>	<b>0.008</b>
<b>V<sub>a</sub></b>	0.117	0.197	<b>0.051</b>	<b>0.041</b>	<b>0.031</b>
<b>VFA</b>	0.065	0.147	<b>0.026</b>	<b>0.019</b>	<b>0.013</b>
<b>VMA</b>	0.077	0.134	0.123	0.115	0.082
<b>P/A</b>	<b>0.286</b>	<b>0.669</b>	<b>0.436</b>	<b>0.351</b>	<b>0.313</b>



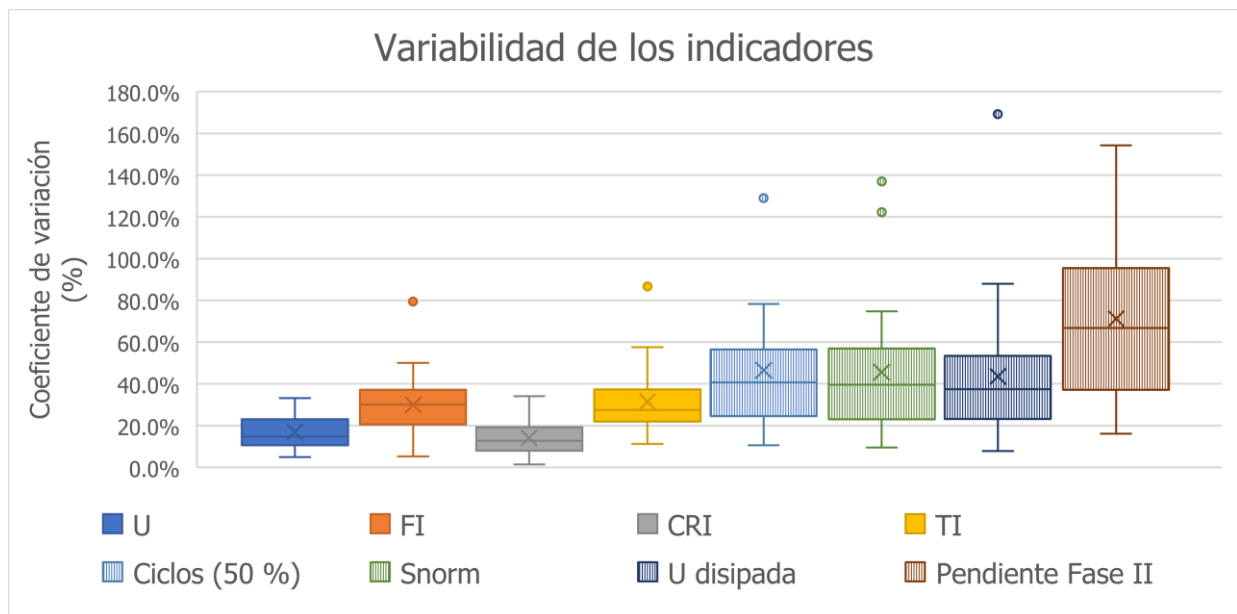
## 4.2 Variabilidad de los resultados de ensayo

Para analizar la variabilidad de los resultados de ensayo se utilizaron los coeficientes de variación. En el Cuadro 11 se muestran algunos estadísticos descriptivos de los coeficientes de variación para los distintos parámetros analizados en cada ensayo.

**Cuadro 11.** Coeficientes de variación para los resultados de los ensayos de fatiga

	Coeficiente de variación							
	Resultados de flexión semicircular				Resultados fatiga en 4 puntos			
	U	FI	CRI	TI	Ciclos de carga	S <sub>norm</sub>	U disipada	m <sub>fase II</sub>
<b>Mínimo</b>	5%	5%	1%	11%	11%	10%	8%	16%
<b>Q1</b>	11%	21%	8%	22%	26%	25%	25%	38%
<b>Mediana</b>	15%	30%	13%	27%	41%	40%	37%	67%
<b>Q3</b>	23%	36%	19%	37%	56%	56%	53%	85%
<b>Máximo</b>	33%	50%	34%	58%	78%	122%	88%	154%
<b>Promedio</b>	17%	30%	14%	32%	47%	46%	44%	71%

Los resultados presentados en el cuadro anterior se visualizan de manera más sencilla en la Figura 41, en donde se observa que, para los resultados de flexión semicircular, la energía de fractura y el índice de resistencia a la fractura son los que presentan una menor variabilidad. Sin embargo, a pesar de que el FI y TI tienen una variabilidad mayor, estos también toman en cuenta el comportamiento post-pico del material, lo que puede permitir una mejor discriminación de las mezclas frágiles y dúctiles.



**Figura 41.** Diagramas de cajas y bigotes para los coeficientes de variación

Por otra parte, se nota que los resultados de flexión en 4 puntos presentan una mayor variabilidad, destacando la altísima variabilidad de parámetro de pendiente de la fase II, que lo hace poco apropiado para ser utilizado en la caracterización de la vida a fatiga de la MAC.

Con la finalidad de verificar si existe una diferencia estadísticamente significativa entre la variabilidad de los resultados de flexión en 4 puntos y la de los resultados de flexión semicircular se realiza una prueba t para muestras emparejadas para la diferencia de medias. Como se muestra en el Cuadro 12, en este análisis no se incluyeron los coeficientes de variación para el indicador de pendiente de la fase II, debido a que su variabilidad es mucho mayor a la de los otros indicadores calculados y esto alteraría los resultados a favor del ensayo de flexión semicircular. Como se indicó anteriormente, no se recomienda la utilización del indicador de pendiente de la fase II.

**Cuadro 12.** Coeficientes de variación por muestra, para ambos ensayos

Muestra	Coeficientes de variación								
	Flexión semicircular					Flexión en 4 puntos			
	U	FI	CRI	TI	CV promedio	No. Ciclos	S <sub>norm</sub>	U disipada	CV promedio
<b>M01</b>	16.7%	37.8%	17.0%	37.7%	27.3%	76.9%	80.1%	85.8%	81.0%
<b>M02</b>	11.7%	28.8%	13.7%	26.7%	20.2%	50.6%	49.4%	54.4%	51.5%
<b>C03</b>	13.5%	26.3%	11.2%	27.6%	19.6%	37.1%	37.4%	76.2%	50.3%
<b>C04</b>	20.8%	20.9%	10.8%	28.4%	20.2%	58.8%	58.9%	99.8%	72.5%
<b>C05</b>	16.8%	41.7%	15.8%	49.7%	31.0%	54.2%	52.9%	70.0%	59.0%
<b>C06</b>	24.9%	32.4%	16.2%	41.1%	28.6%	37.4%	37.6%	100.6%	58.5%
<b>M07</b>	14.6%	21.9%	11.8%	25.9%	18.6%	55.9%	56.1%	112.8%	74.9%
<b>C08</b>	13.0%	30.1%	13.8%	28.7%	21.4%	33.6%	35.1%	85.7%	51.5%
<b>C09</b>	12.8%	20.3%	12.5%	15.3%	15.2%	75.7%	66.0%	92.5%	78.1%
<b>C10</b>	12.7%	30.7%	14.7%	27.0%	21.3%	11.3%	13.3%	16.2%	13.6%
<b>C11</b>	21.0%	38.9%	19.9%	39.2%	29.8%	32.0%	27.6%	36.1%	31.9%
<b>C12</b>	18.9%	28.1%	10.5%	28.9%	21.6%	35.9%	34.5%	36.8%	35.7%
<b>M13</b>	21.4%	32.5%	16.7%	34.1%	26.2%	45.4%	44.6%	59.7%	49.9%

A partir de estos resultados de variabilidad, se procede a establecer las hipótesis de la prueba:

$$H_0: \mu_{CV\ viga} - \mu_{CV\ SCB} = 0$$

$$H_1: \mu_{CV\ viga} - \mu_{CV\ SCB} \neq 0$$

La hipótesis nula establece que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de los coeficientes de variación para el ensayo de flexión en 4 puntos y la media de los

coeficientes de variación para el ensayo de flexión semicircular. La hipótesis alternativa, por el contrario, afirma que sí existe tal diferencia. Los resultados de la prueba se muestran en el Cuadro 13, e indican que con un nivel de confianza superior al 99% se puede afirmar que la variabilidad de los resultados de flexión semicircular es menor a la variabilidad de los resultados de flexión en 4 puntos.

**Cuadro 13.** Resultados de la prueba de diferencia de medias

<b>Estadístico t</b>	5.37
<b>Valor crítico de t</b>	2.19
<b>P-valor</b>	0.0002

Es importante destacar que ambos métodos de ensayo presentan niveles de variabilidad importantes. Esto, según Walubita (2012), puede deberse a que en los especímenes de flexión semicircular la zona de falla está predeterminada y altamente localizada. De manera similar, en el ensayo de flexión semicircular, la ranura que se corta en el espécimen concentra los esfuerzos de tensión la parte más profunda del corte, forzando que la grieta se forme en esa posición.

Al combinar esta localización forzada de la zona de falla con las variaciones presentes en un material heterogéneo como la mezcla asfáltica en caliente, es completamente esperable obtener variabilidad entre las repeticiones del ensayo. La heterogeneidad del material sí afecta la variabilidad de ambos ensayos.

### **4.3 Susceptibilidad al agrietamiento por fatiga de las mezclas convencionales y modificadas**

Las mezclas asfálticas en Costa Rica son utilizadas en proyectos viales importantes, en los que la estructura de pavimentos deberá soportar altas demandas, y en las que un deterioro acelerado tendría consecuencias económicas significativas. Por esta razón, se analiza si los resultados de los ensayos de flexión semicircular y flexión en 4 puntos permiten identificar la el desempeño superior que deberían tener las mezclas modificadas sobre las convencionales.

Para esto, se procede a realizar una prueba estadística para la diferencia de medias en dos pruebas independientes, asumiendo varianzas desiguales. Las hipótesis de la prueba son las siguientes:

$$H_0: \mu_{modificadas} - \mu_{convencionales} = 0$$

$$H_1: \mu_{modificadas} - \mu_{convencionales} \neq 0$$

La hipótesis nula establece que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de los resultados de ensayo para las mezclas modificadas y convencionales. La hipótesis alternativa, por el contrario, afirma que sí existe tal diferencia. Los resultados de la prueba se muestran en el Cuadro 14.

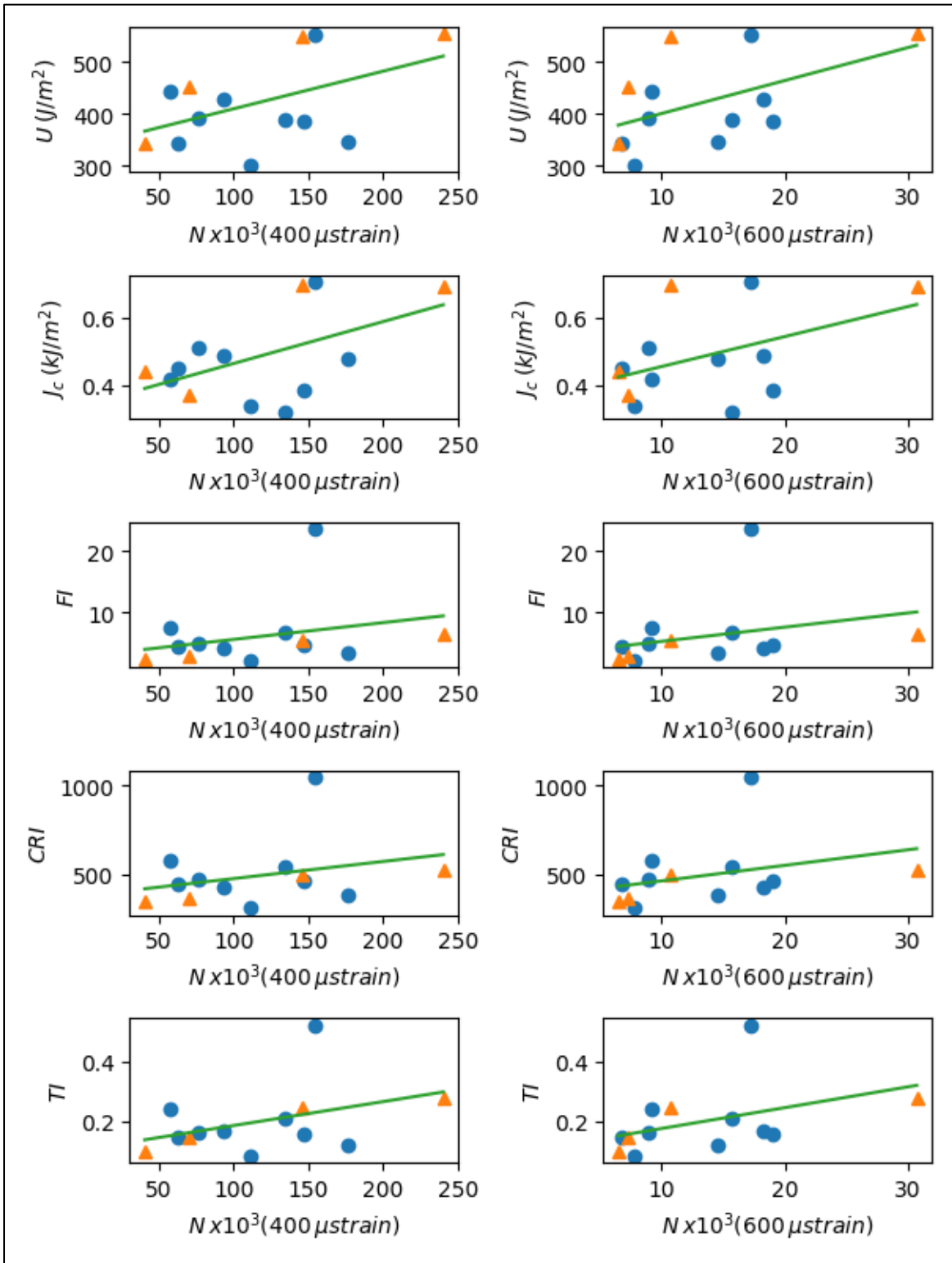
**Cuadro 14.** Resultados de la prueba de hipótesis para la diferencia de medias entre mezclas modificadas y convencionales

	Indicador	Valor promedio del indicador		P-valor
		Modificadas	Convencionales	
Flexión en 4 puntos	Ciclos de carga (400 $\mu$ s)	124190	112535	0.82
	S <sub>norm</sub> (400 $\mu$ s)	476594904	349642567	0.53
	U disipada (400 $\mu$ s)	127.42	148.44	0.68
	m <sub>fase II</sub> (400 $\mu$ s)	-0.03	-0.03	0.84
	Ciclos de carga (600 $\mu$ s)	13805	13055	0.91
	S <sub>norm</sub> (600 $\mu$ s)	84562253	37822336	0.46
	U disipada (600 $\mu$ s)	46.99	37.93	0.62
	m <sub>fase II</sub> (600 $\mu$ s)	-0.44	-0.20	0.30
Flexión semicircular	Energía de fractura (J/m <sup>2</sup> )	475.83	397.52	0.23
	J <sub>c</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	0.55	0.46	0.36
	FI	4.30	6.77	0.32
	CRI	435.78	518.23	0.35
	TI	0.19	0.20	0.88

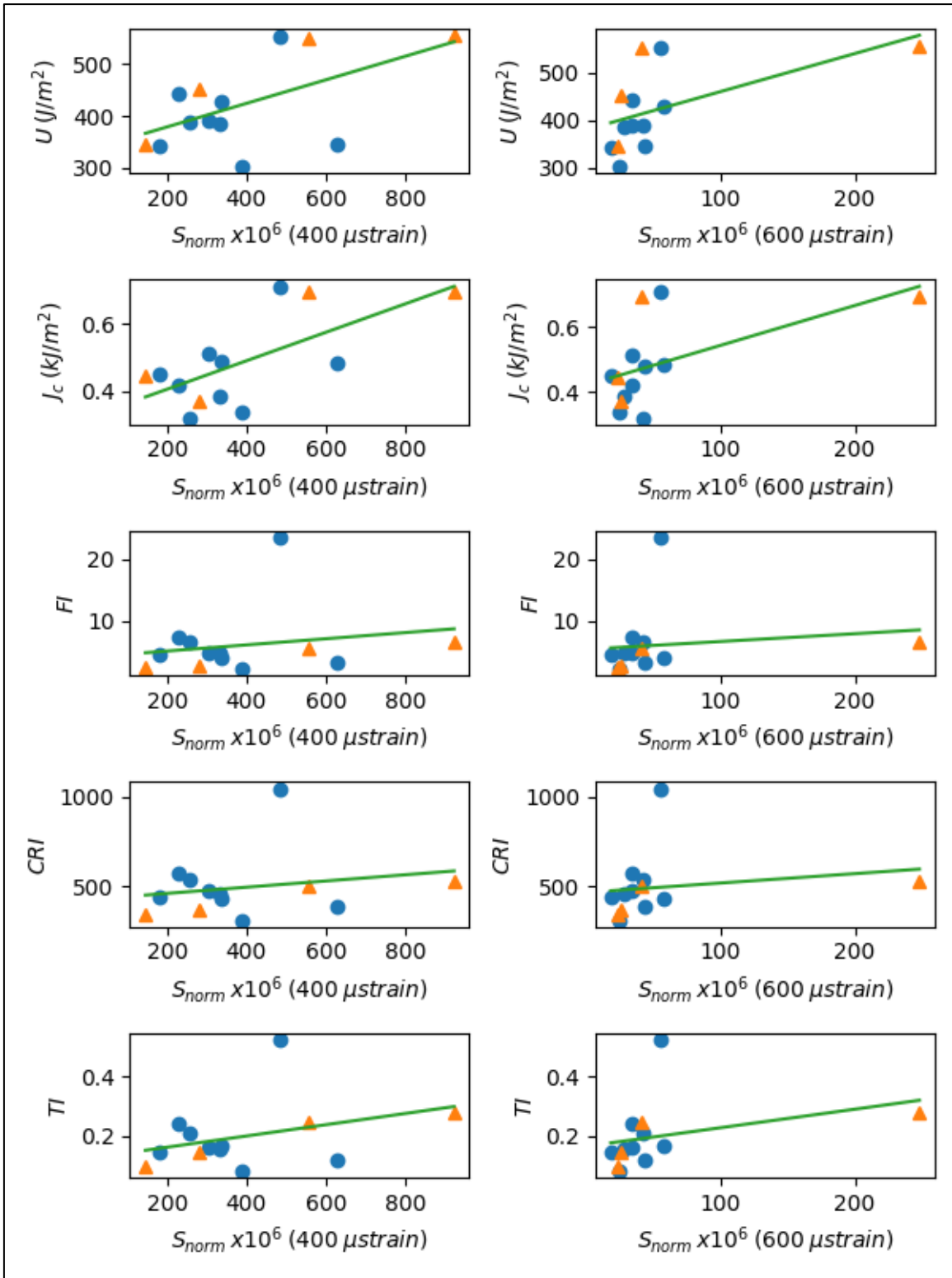
Como se observa en el cuadro anterior, los p-valores de la prueba de hipótesis son bastante altos, indicando que, para una confianza superior al 75 %, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados obtenidos a partir de las mezclas modificadas y convencionales.

#### 4.4 Correlación de los resultados de Flexión en 4 puntos con los de Flexión semicircular

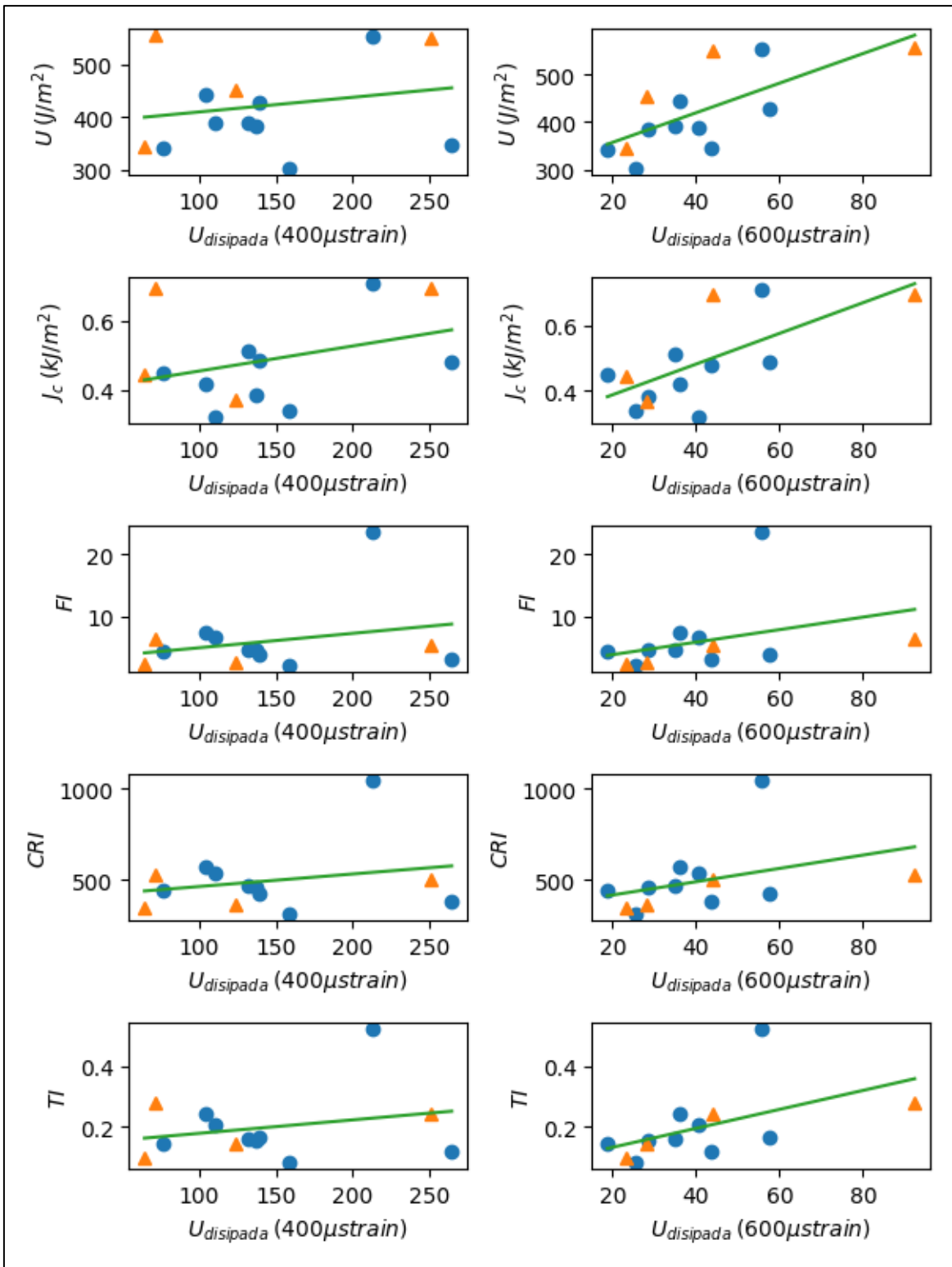
De manera similar al procedimiento seguido para evaluar la correlación de los resultados de los ensayos con los parámetros volumétricos de las mezclas, para la correlación entre los resultados de flexión semicircular y flexión en 4 puntos se inició organizando los datos en gráficas de dispersión. Las gráficas de dispersión se muestran en las figuras 42, 43, 44 y 45.



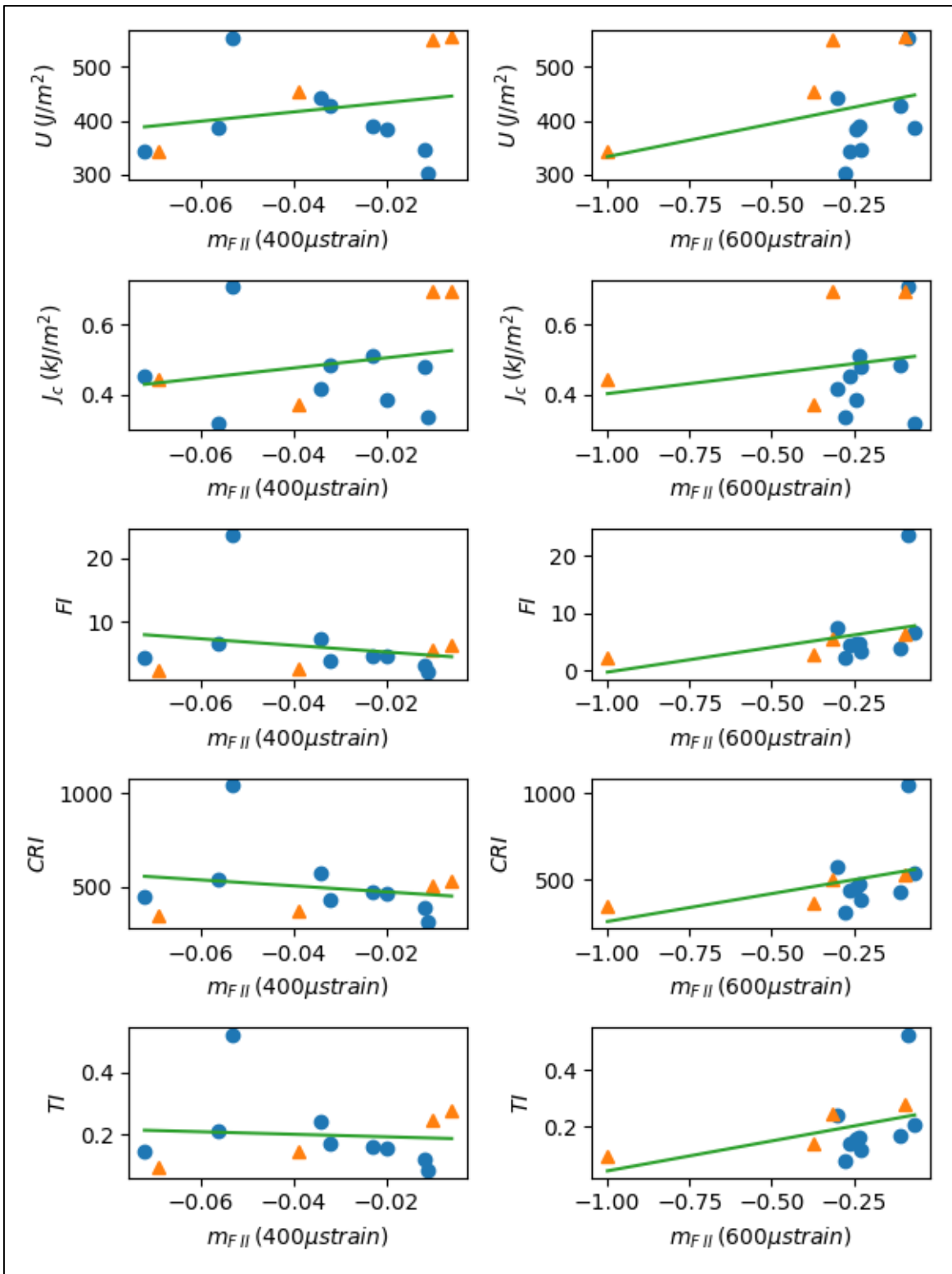
**Figura 42.** Resultados de flexión en 4 puntos (No. ciclos) vs. resultados de flexión semicircular



**Figura 43.** Resultados de flexión en 4 puntos (Rigidez normalizada) vs. resultados de flexión semicircular



**Figura 44.** Resultados de flexión en 4 puntos (Energía disipada) vs. resultados de flexión semicircular



**Figura 45.** Resultados de flexión en 4 puntos (Pendiente fase II) vs. resultados de flexión semicircular



De manera similar al procedimiento utilizado para las relaciones entre los resultados de los ensayos y los parámetros volumétricos de las mezclas, se realizó una prueba t de dos colas. Las hipótesis nula y alternativa de la prueba son las mismas a las presentadas en la sección 4.1.4 y, los resultados se presentan en el Cuadro 15.

**Cuadro 15.** Valores p para la correlación entre los resultados de flexión en 4 puntos y los de flexión semicircular

		Fatiga en 4 puntos							
Variable		Ciclos de carga (400 ms)	Ciclos de carga (600 ms)	S <sub>norm</sub> (400 ms)	S <sub>norm</sub> (600 ms)	U disipada (400 ms)	U disipada (600 ms)	m <sub>fase II</sub> (400 ms)	m <sub>fase II</sub> (600 ms)
Flexión Semicircular	U	0.10	0.07	0.04	0.05	0.49	0.01	0.45	0.26
	Jc	0.07	0.12	0.01	0.05	0.24	0.01	0.42	0.51
	FI	0.35	0.33	0.53	0.65	0.37	0.24	0.48	0.21
	CRI	0.33	0.27	0.51	0.58	0.43	0.19	0.51	0.16
	TI	0.17	0.16	0.24	0.27	0.41	0.06	0.79	0.14

A pesar de que en las gráficas de dispersión es difícil observar alguna tendencia en los datos, el análisis estadístico arroja que existe una buena correlación entre la energía de fractura (U) y la tasa crítica de liberación de energía (Jc) con los ciclos de carga y la rigidez normalizada.

De acuerdo a los valores p, con una confianza del 95 % podemos rechazar la hipótesis de que no existe una correlación entre los valores de rigidez normalizada y los parámetros U y Jc del ensayo de flexión semicircular. Más aún, si se reduce el nivel de confianza a un 85 % se podrían incluir también las correlaciones entre los ciclos de carga y los parámetros U y Jc.

Caso contrario se observa para el resto de parámetros de flexión semicircular, en los que se obtienen valores p mucho más elevados, pese a que presentan algunas ventajas a la hora de caracterizar mejor el comportamiento de carga-deformación de los especímenes de ensayo. También se obtienen resultados negativos para el parámetro de pendiente de la fase II (m<sub>fase II</sub>) que, como se expuso anteriormente, tiene limitaciones asociadas a su variabilidad y al hecho de solo poder cuantificar la rapidez del deterioro en la etapa II de la curva de fatiga.

Sin embargo, a pesar de que los valores p indicaron que existe una tendencia estadísticamente significativa entre los resultados del ensayo de flexión en 4 puntos (ciclos de carga y rigidez normalizada) y flexión semicircular (energía de fractura y tasa crítica de liberación de energía),

se observa una gran dispersión en los datos. Para cuantificar esta dispersión, en el Cuadro 16 se presentan los coeficientes de determinación de las regresiones lineales.

**Cuadro 16.** Coeficientes de determinación ( $R^2$ ) para la regresión lineal entre los resultados de flexión en 4 puntos y los de flexión semicircular

		Fatiga en 4 puntos							
Variable		Ciclos de carga (400 ms)	Ciclos de carga (600 ms)	$S_{norm}$ (400 ms)	$S_{norm}$ (600 ms)	U disipada (400 ms)	U disipada (600 ms)	$m_{fase II}$ (400 ms)	$m_{fase II}$ (600 ms)
Flexión Semicircular	U	0.23	0.27	0.32	0.31	0.31	0.12	0.04	0.50
	Jc	0.27	0.21	0.45	0.30	0.30	0.04	0.12	0.46
	FI	0.08	0.08	0.04	0.02	0.02	0.14	0.07	0.13
	CRI	0.09	0.11	0.04	0.03	0.03	0.17	0.06	0.15
	TI	0.16	0.18	0.13	0.11	0.11	0.19	0.06	0.29

En general, las 40 regresiones realizadas presentan valores de coeficiente de determinación sumamente bajos. Específicamente, se observan valores de entre 0.45 y 0.21 en los coeficientes de determinación de los parámetros que se mencionaron anteriormente.

A partir de esto se concluye que, aunque se puede inferir que existe una tendencia entre los resultados del ensayo de flexión en 4 puntos (ciclos de carga y rigidez normalizada) y flexión semicircular (energía de fractura y tasa crítica de liberación de energía) y que esta tendencia es congruente con lo esperado, dada la gran dispersión de los datos no sería adecuada utilizar la regresión lineal para predecir los resultados de flexión semicircular a partir de los de flexión en 4 puntos.

## **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 Conclusiones**

El ensayo de flexión en 4 puntos es de gran utilidad para el proceso de diseño de mezcla asfáltica y para la elaboración de modelos de desempeño ante fatiga. Sin embargo, su aplicación como ensayo de control de calidad se ve limitada por la complejidad para elaborar los especímenes, la duración del ensayo y el equipo necesario para su aplicación.

El ensayo de flexión semicircular no evalúa directamente la vida a fatiga de la MAC, sino que permite estudiar el agrietamiento del material. El ensayo SCB ha surgido como una alternativa al ensayo de flexión en 4 puntos, permitiendo estudiar las características de agrietamiento de la MAC en un menor tiempo.

Tanto el ensayo de flexión semicircular como el ensayo de flexión en 4 puntos ven limitada su aplicación en los procesos de control de calidad debido a la duración la preparación de los especímenes de ensayo para el acondicionamiento de la MAC, cuya duración es de 5 días.

Se estudiaron 13 mezclas asfálticas, modificadas y convencionales, producidas en distintas plantas de Costa Rica. Las mezclas utilizadas tienen tamaños máximos nominales de 19 mm y 2.5 mm, caracterizadas como de granulometría gruesa de acuerdo al punto de control primario de la metodología Superpave.

El parámetro de energía de agrietamiento que se obtiene típicamente del ensayo de flexión semicircular no discrimina adecuadamente mezclas que resisten cargas altas y deformaciones bajas (frágiles) de aquellas mezclas que resisten cargas bajas pero admiten mayores deformaciones (dúctiles).

Para el ensayo de flexión semicircular se calcularon los indicadores de Índice de flexibilidad, Índice de dureza y el Índice de resistencia al agrietamiento. Estos índices fueron desarrollados para superar las limitaciones de la energía de agrietamiento, tomando en cuenta la forma de la curva de carga-deformación.

Los indicadores del ensayo de flexión en 4 puntos y de flexión semicircular no permitieron evidenciar diferencias en la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga de las mezclas convencionales respecto a las modificadas.

diferenciaron adecuadamente las mezclas modificadas y convencionales. Esto puede deberse, entre otras razones, a fallos en el proceso de modificación. Sin embargo, esto no puede afirmarse o negarse con la información disponible.

Los resultados de flexión en 4 puntos y los parámetros volumétricos de la MAC exhibieron correlaciones muy débiles. Si bien la mayoría de las correlaciones siguió el comportamiento esperado, se encontraron algunas inconsistencias entre el comportamiento esperado y el observado en la relación polvo-asfalto y en la pendiente de la fase II. Las correlaciones entre los indicadores de flexión en 4 puntos y los parámetros volumétricos resultaron en niveles de confianza de entre el 75 % y 5 %.

La relación entre los resultados de flexión semicircular y los parámetros volumétricos de la mezcla resultó en resultados más satisfactorios, con relaciones más fuertes y mayores significancias estadísticas. El porcentaje de asfalto y el porcentaje de asfalto efectivo presentaron los mejores resultados, con correlaciones con niveles de confianza superiores al 95 %. Por otra parte, los indicadores de flexión semicircular presentaron una baja sensibilidad a la relación polvo-asfalto.

El indicador de pendiente de la fase II presentó la variabilidad más alta de todos los indicadores, con un coeficiente de variación promedio del 71 %. Esta variabilidad puede deberse a que la fase II se identificó visualmente en las gráficas, por lo que es sumamente dependiente del criterio del observador. Otra limitación de este indicador es que, si bien permite analizar la rapidez con que se deteriora el espécimen durante la fase II, no toma en consideración la magnitud de la rigidez. Por estas razones, basándose en el alcance de este trabajo, no se recomienda utilizar este indicador.

Se concluye con un nivel de confianza mayor al 99 % que los indicadores de flexión semicircular presentan una menor variabilidad que los indicadores de flexión en 4 puntos. Para este análisis no se tomó en cuenta la variabilidad del parámetro de pendiente de la fase II debido a que su alta variabilidad alteraría los resultados a favor del ensayo de flexión semicircular.

No se observaron correlaciones claras al analizar de manera visual la correlación entre los indicadores de flexión semicircular y los de flexión en 4 puntos. Sin embargo, a través del análisis estadístico, se encontraron tendencias significativas entre la rigidez normalizada y ciclos de carga con los indicadores de energía de fractura y la tasa crítica de liberación de energía.

Se concluye que los indicadores de número de ciclos y rigidez normalizada siguen una tendencia esperada respecto a la energía de deformación y tasa crítica de liberación de energía; sin embargo, debido a la alta dispersión de los datos, no se recomienda utilizar los modelos para predicción.

## **5.2 Recomendaciones**

Es recomendable contrastar los resultados de esta investigación con unos obtenidos utilizando muestras elaboradas en laboratorio. Esto permitiría tener más control sobre el proceso de modificación, materiales, entre otros. También se podrían evaluar mezclas con características distintas a las usuales en las mezclas de planta.

Evaluar procedimientos de envejecimiento de menor duración, de manera que se siga simulando el cambio en las características de la MAC pero también se pueda realizar un control de calidad más oportuno en los proyectos viales.

Se debe estudiar a mayor profundidad la capacidad del ensayo de flexión semicircular para predecir el comportamiento ante la fatiga de las MAC de manera separada al ensayo de flexión en 4 puntos. Esto se puede lograr complementando los indicadores de flexión semicircular con ensayos acelerados a escala real como, por ejemplo, el Simulador de Vehículos Pesados (HVS).

Establecer mejores mecanismos para la certificación de la calidad de los asfaltos modificados y estudiar detalladamente las prácticas utilizadas en la industria costarricense para la modificación de los asfaltos. Esto permitiría identificar y corregir deficiencias en los asfaltos modificados, que pueden explicar porque las mezclas modificadas elaboradas en nuestro país no satisfacen los requerimientos de susceptibilidad a la fatiga y no se diferencian de las mezclas no modificadas.

Implementar, en Costa Rica, especificaciones y procedimientos de ensayo que permitan un oportuno control de calidad de la mezcla asfáltica y de su susceptibilidad al agrietamiento por fatiga.

Debido a que las mezclas asfálticas modificadas se conciben como mezclas de mayor desempeño que las mezclas convencionales y que precisamente la modificación del asfalto debería mejorar las características de agrietamiento del material, se debe indagar las razones por las que mediante los ensayos de flexión semicircular y de flexión en 4 puntos no se logran identificar mejorías en la susceptibilidad a fatiga de estas mezclas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adhikari, S., & You, Z. (2010). *Fatigue Evaluation of Asphalt Pavement using Beam Fatigue Apparatus*. Morehead. Obtenido de [https://scholarworks.moreheadstate.edu/msu\\_faculty\\_research/399/](https://scholarworks.moreheadstate.edu/msu_faculty_research/399/)
- Arrieta, G. (2016). *Comparación de procedimientos de ensayo para determinar la resistencia al agrietamiento por fatiga en mezclas asfálticas en caliente*. (Trabajo final de graduación para optar por el grado de licenciatura, Universidad de Costa Rica). Universidad de Costa Rica.
- ASTM International. (2016). *D8044-16 Standard Test Method for Evaluation of Asphalt Mixture Cracking Resistance using the Semi-Circular Bend Test (SCB) at Intermediate Temperatures*. doi:<https://doi-org.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/10.1520/D8044-16>
- Baghaee, T., Rehan, M., & Mahrez, A. (2011). A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes. *SCIENTIFIC RESEARCH AND ESSAYS*, 6(4), 670-682. doi:<https://doi.org/10.5897/SRE10.946>
- Batioja-Álvarez, D., Lee, J., & Haddock, J. E. (2019). Understanding the Illinois Flexibility Index Test (I-FIT) using Indiana Asphalt Mixtures. *Transportation Research Record*, 337-346. doi:<https://doi.org/10.1177%2F0361198119841282>
- Boriack, P. (2015). *A Laboratory Study on the Effect of High RAP and High Asphalt Binder Content on the Stiffness, Fatigue Resistance and Rutting Resistance of Asphalt Concrete*.
- Canestrari, F., & Ingrassia, L. (2020). A review of top-down cracking in asphalt pavements: Causes, models, experimental tools and future challenges. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(5), 541-572. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.08.002>
- Cao, W., Mohammad, L. N., Elseifi, M., Cooper, S. B., & Saadeh, S. (2018). Fatigue Performance Prediction of Asphalt Pavement Based on Semicircular Bending Test at Intermediate Temperature. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(9). doi:[doi:10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002448](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002448)
- Chaiwat, N. (2010). *Fatigue-fracture relation on asphalt concrete mixtures*. Illinois. Obtenido de <https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/16917>

- Di Benedetto, H., de la Roche, C., Baaj, H., Pronk, A., & Ludström, R. (2004). Fatigue of bituminous mixtures. *Matériaux et Constructions*, 37, 202-216.
- Dong-Woo, C., & Kyoungchul, K. (2009). *The Mechanisms of Moisture Damage in Asphalt Pavement*. doi:DOI 10.1007/s12205-010-0333-z
- Eljairi, O., & Saadeh, S. (2011). *Development of a Quality Control Test Procedure for Characterizing Fracture Properties of Asphalt Mixtures*. California: METTRANS. Obtenido de <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/23262>
- Ghuzlan, K. A., & Carpenter, S. H. (2000). Energy-Derived, Damage-Based Failure Criterion for Fatigue Testing. *Transportation Research Record*, 1723(1), 141-149. doi:<https://doi.org/10.3141%2F1723-18>
- Huang, B., Shu, X., & Vukosavljevic, D. (2011). Huang, B., Shu, X., & Vukosavljevic, D. (2011). Laboratory Investigation of Cracking Resistance of Hot-Mix Asphalt Field Mixtures Containing Screened Reclaimed Asphalt Pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(11), 1535–1543. doi:10.1061/(as. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1535-1543. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000223
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. Upper Saddle River: Pearson.
- Jiménez, M. (2013). Overlay Tester: equipo de laboratorio para evaluar la resistencia al agrietamiento en mezclas asfálticas. *Métodos y materiales*, 3(1), 29-43.
- Kaseer, F., Yin, F., Arámbula-Mercado, E., Epps-Martin, A., Sias, J., & Salari, S. (2018). Development of an index to evaluate the cracking potential of asphalt mixtures using the semi-circular bending test. *Construction and Building Materials*, 167, 286-298. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.014>
- Kiggundu, B., & Roberts, F. (1988). *Stripping in HMA mixtures: state-of-the-art and critical review of test methods*.
- Kim, M., Mohammad, L., & Elseifi, M. (2012). Characterization of Fracture Properties of Asphalt Mixtures as Measured by Semicircular Bend Test and Indirect Tension Test. *Journal of the Transportation Research Board*, 115-124. doi:10.3141/2296-12
- Kim, R. Y. (2009). *Modeling of Asphalt Concrete*. Carolina del Norte: McGraw-Hill.

- Liang, R., & Zhou, J. (1997). Prediction of fatigue life of asphalt concrete beams. *International Journal of Fatigue*, 19(2), 117-124. doi:doi:10.1016/s0142-1123(96)00066-7
- Lu, D. X., Saleh, M., & Nguyen, N. H. (2020). Evaluation of Fracture and Fatigue Cracking Characterization Ability of Nonstandardized Semicircular-Bending Test for Asphalt Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(8). doi:doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003292
- Miller, J., & Bellinger, W. (2014). *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program*. Georgetown Pike: FHWA. Obtenido de <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/13092/13092.pdf>
- Moghaddam,, B. (2011). A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes. *Scientific Research and Essays*, 670-682. doi:doi:https://doi.org/10.5897/SRE10.946
- Moghaddam,, B., Karim, M. R., & Abdelaziz, M. (2011). A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes. *Scientific Research and Essays*, 6(4), 670-682.
- Montazeri, S. (2009). *Assessing repeatability of four-point bending method for estimating fatigue cracking of hot mix asphalt*. (Trabajo Final de Graduación, University of Texas at El Paso). University of Texas at El Paso. Recuperado el 10 de Setiembre de 2020, de [https://scholarworks.utep.edu/open\\_etd/2734/](https://scholarworks.utep.edu/open_etd/2734/)
- MOPT. (2010). Sección 402.) DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO SUPERPAVE®. En *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010)*. San José: MOPT.
- Mora, M. (2020). *Análisis de la variabilidad asociada a ensayos de fatiga en mezclas asfálticas*. (Trabajo final de graduación para optar por el grado de licenciatura, Universidad de Costa Rica). Universidad de Costa Rica.
- Nsengiyumva, G. (2015). *Development of semi-circular bending (SCB) fracture test for bituminous mixtures*. (Trabajo final de graduación, University of Nebraska - Lincoln, 2015). University of Nebraska - Lincoln.
- Ozer, H., Al-Qadi, I. L., Singhvi, P., Bausano, J., Carvalho, R., Li, X., & Gibson, N. (2018). Prediction of pavement fatigue cracking at an accelerated testing section using asphalt



- mixture performance tests. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(3), 264-278. doi:doi:10.1080/10298436.2017.1347435
- Pramesti, F., Molenaar, A., & van de Ven, M. (2013). The Prediction of Fatigue Life Based on Four Point Bending Test. *Procedia Engineering*(54), 851-862.
- Rivin, E. I. (2010). Introduction and Definitions. En *Handbook on Stiffness & Damping in Mechanical Design*. ASME Press. doi:https://doi.org/10.1115/1.802939
- Roylance, D. (2001). *Introduction to Fracture Mechanics [Introduction]*. MIT. Recuperado el 10 de Setiembre de 2020, de <https://web.mit.edu/course/3/3.11/www/modules/frac.pdf>
- Sanabria, J., Barrantes, R., & Elizondo, A. L. (2019). *Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica años 2018-2019*. LanammeUCR. San José: Universidad de Costa Rica. Recuperado el 10 de setiembre de 2020, de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1750>
- Tang, S. (2014). *Evaluate the fracture and fatigue resistances of hot mix asphalt containing high percentage reclaimed asphalt pavement (RAP) materials at low and intermediate temperatures*. (Trabajo final de graduación). Recuperado el 10 de Setiembre de 2020, de <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4789&context=etd>
- The American Association of State Highway and Transportation Officials. (2019). *AASHTO R30-02(2019) Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA)*. Obtenido de [https://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?3PC+AASHTO+AASHTO R30-02\(2019\)+en-US](https://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?3PC+AASHTO+AASHTO R30-02(2019)+en-US)
- Thomas, B. (2019). *EVALUATION OF SEMI-CIRCULAR BEND TEST FOR HMA SPECIALTY MIXES (Rep. No. FHWA NJ-2019-008)*. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.13039/100006285>
- Walubita, L., Faruk, A. N., Das, G., Tanvir, H., Zhang, J., & Scullion, T. (2012). *The Overlay Tester: A Sensitivity Study to Improve Repeatability and Minimize Variability in the Test Results*. Texas.
- Wang, C. (1996). *Introduction to Fracture Mechanics (Rep. No. DSTO-GD-0103)*. Melbourne: Defense Science and Technology Organization.

## APÉNDICES

### Apéndice A. Caracterización de los materiales

**Cuadro A - 1.** Granulometría de las mezclas asfálticas estudiadas

Muestra	Porcentaje pasando (%)									
	25 mm (1")	19 mm (3/4")	12,5 mm (1/2")	9,5 mm (3/8")	4,75 mm (N°4)	2,36 mm (N°8)	1,18 mm (N°16)	600 µm (N°30)	300 µm (N°50)	75 µm (N°200)
<b>C10</b>	100.0	100.0	95.3	84.7	60.3	38.7	24.1	17.0	12.5	4.5
<b>C11</b>	100.0	95.0	79.0	66.0	44.0	30.0	21.0	15.0	11.0	5.1
<b>C12</b>	100.0	100.0	92.0	81.0	51.0	33.0	22.0	16.0	11.0	5.1
<b>M13</b>	100.0	100.0	92.0	81.0	51.0	33.0	22.0	16.0	11.0	5.2
<b>M01</b>	100.0	100.0	85.0	72.0	44.0	29.0	20.0	15.0	12.0	5.9
<b>C05</b>	100.0	96.1	79.3	66.9	44.2	29.0	20.1	15.0	11.1	5.8
<b>C03</b>	100.0	100.0	90.8	81.4	49.6	31.8	21.4	16.1	12.1	6.1
<b>C08</b>	100.0	100.0	92.7	80.5	54.1	33.0	21.8	16.0	12.1	7.2
<b>C09</b>	100.0	100.0	89.7	79.2	45.5	27.9	19.1	14.2	10.4	5.1
<b>C06</b>	100.0	95.9	74.5	60.0	38.6	26.7	19.4	15.0	11.3	6.0
<b>M07</b>	100.0	100.0	89.1	72.2	47.6	32.3	22.5	16.8	12.2	6.0
<b>C04</b>	100.0	100.0	89.7	72.8	42.7	27.9	19.8	15.0	11.1	5.7
<b>M02</b>	100.0	100.0	92.0	82.0	53.0	34.0	22.0	16.0	11.0	5.4

## Apéndice B. Índices del ensayo SCB

**Cuadro B - 1.** Información utilizada en el cálculo de los índices del ensayo SCB

Código	Vacios (%)	Temp (°C)	Radio (mm)	Espesor (mm)	Ranura (mm)	U deform (kN.mm)	Pendiente postpico (kN/mm)	Energía de fractura (Joules/m <sup>2</sup> )	FI	Carga pico (kN)	CRI	U postpico (J/m <sup>2</sup> )	$\Delta P_{max}$ (mm)	$\Delta P_{mdp}$ (mm)	TI
<b>M01-01</b>	6.54	25.10	74.83	57.35	25.20	0.74	-2.18	513.46	2.35	1.53	336.36	267.53	0.78	1.27	0.13
<b>M01-02</b>	6.81	24.80	75.21	56.35	24.53	0.96	-1.37	814.85	5.93	1.57	518.03	466.29	1.08	1.86	0.36
<b>M01-03</b>	7.36	24.80	74.70	57.36	24.77	0.94	-1.11	733.89	6.59	1.39	528.10	436.31	0.96	1.82	0.37
<b>M01-04</b>	7.30	24.80	74.95	57.39	25.14	0.76	-0.97	771.03	7.96	1.38	558.87	475.90	0.93	1.98	0.50
<b>M01-05</b>	7.54	24.90	74.93	56.96	31.80	0.36	-0.70	435.07	6.18	0.91	480.52	285.35	0.64	1.44	0.23
<b>M01-06</b>	7.53	24.90	74.98	56.86	31.82	0.49	-1.12	535.68	4.78	1.14	468.15	342.39	0.69	1.36	0.23
<b>M01-07</b>	7.59	24.90	74.96	57.49	32.07	0.45	-0.62	541.78	8.77	0.90	598.92	356.43	0.75	1.71	0.34
<b>M01-08</b>	7.39	24.90	75.01	57.06	32.14	0.57	-1.00	539.97	5.39	1.08	502.11	319.37	0.79	1.51	0.23
<b>M01-09</b>	7.74	25.00	74.88	57.36	38.09	0.34	-0.57	517.73	9.15	0.77	668.60	328.45	0.79	1.67	0.29
<b>M01-10</b>	7.43	24.90	74.97	57.10	38.03	0.33	-0.86	350.59	4.06	0.73	478.54	223.17	0.58	1.15	0.13
<b>M01-11</b>	7.52	24.90	74.91	57.03	38.10	0.38	-0.47	532.94	11.23	0.77	692.26	358.77	0.69	1.68	0.36
<b>M01-12</b>	7.14	24.90	74.80	57.07	38.40	0.27	-0.67	377.21	5.60	0.74	507.95	239.42	0.61	1.29	0.16
<b>M02-01</b>	6.57	24.90	74.92	56.52	24.58	0.96	-1.24	793.89	6.42	1.51	525.78	444.27	1.08	1.91	0.37
<b>M02-02</b>	6.09	24.90	74.90	57.07	24.44	0.89	-1.82	697.51	3.84	1.73	402.45	402.59	0.81	1.46	0.26
<b>M02-03</b>	6.63	25.00	74.93	57.14	25.34	0.78	-1.80	683.02	3.79	1.68	405.59	397.71	0.87	1.50	0.25
<b>M02-04</b>	6.10	24.90	74.92	57.16	31.30	0.60	-0.84	617.51	7.38	1.05	589.70	382.04	0.87	1.71	0.32
<b>M02-05</b>	7.18	24.90	74.97	57.12	31.62	0.53	-0.72	603.68	8.38	1.01	597.61	388.28	0.86	1.78	0.35
<b>M02-06</b>	6.47	24.90	74.93	57.12	31.89	0.46	-0.83	506.69	6.13	0.96	529.32	319.76	0.73	1.49	0.24
<b>M02-07</b>	6.66	24.90	74.95	57.09	31.75	0.44	-0.94	439.40	4.70	0.98	447.94	273.00	0.65	1.34	0.19
<b>M02-08</b>	6.76	24.80	75.01	57.26	38.42	0.40	-0.70	473.77	6.76	0.82	581.24	307.58	0.66	1.42	0.23
<b>M02-09</b>	6.50	24.80	74.93	57.23	37.48	0.34	-0.78	465.92	6.00	0.87	536.88	298.30	0.62	1.34	0.22
<b>M02-10</b>	6.44	24.80	74.96	57.20	37.54	0.34	-0.99	399.35	4.03	0.85	468.67	240.87	0.62	1.20	0.14
<b>M02-11</b>	6.39	24.80	74.95	57.16	37.78	0.34	-1.05	376.82	3.58	0.85	441.29	229.08	0.58	1.12	0.12
<b>C03-01</b>	7.52	25.20	74.76	57.13	24.82	0.38	-0.77	368.90	4.77	0.83	446.10	223.78	0.78	1.49	0.16

Código	Vacíos (%)	Temp (°C)	Radio (mm)	Espesor (mm)	Ranura (mm)	U deform (kN.mm)	Pendiente postpico (kN/mm)	Energía de fractura (Joules/m2)	FI	Carga pico (kN)	CRI	U postpico (J/m2)	$\Delta P_{max}$ (mm)	$\Delta P_{mdp}$ (mm)	TI
C03-02	7.79	25.30	74.91	57.66	24.51	0.72	-1.24	521.36	4.19	1.23	422.60	301.30	0.79	1.48	0.21
C03-03	7.26	25.20	74.72	57.10	25.94	0.36	-0.92	325.06	3.54	0.82	396.48	189.73	0.75	1.36	0.11
C03-04	7.70	25.20	74.92	57.33	25.80	0.63	-1.08	510.04	4.71	1.10	462.78	278.71	0.93	1.63	0.20
C03-05	7.12	25.10	74.81	56.31	31.62	0.48	-1.10	395.78	3.60	0.86	459.95	203.81	0.88	1.42	0.11
C03-06	7.68	25.10	74.84	56.95	31.63	0.32	-0.81	388.98	4.78	0.83	467.52	244.64	0.68	1.35	0.16
C03-07	7.59	25.10	74.96	57.35	31.53	0.36	-0.99	359.40	3.64	0.85	424.82	212.97	0.68	1.26	0.12
C03-08	7.23	25.10	74.85	57.37	31.26	0.36	-0.60	401.76	6.67	0.84	479.32	259.38	0.65	1.48	0.21
C03-09	7.68	25.10	74.85	57.38	37.97	0.33	-0.57	384.05	6.80	0.64	600.77	236.07	0.75	1.50	0.18
C03-10	6.96	24.90	74.68	57.73	36.39	0.24	-0.65	344.89	5.34	0.68	504.72	231.33	0.59	1.30	0.16
C03-11	7.50	24.90	74.78	57.10	36.48	0.26	-0.62	332.94	5.38	0.63	529.70	225.48	0.59	1.26	0.15
C03-12	7.39	24.90	74.87	57.22	36.30	0.25	-1.07	281.29	2.62	0.82	345.07	179.61	0.45	0.93	0.09
C04-01	6.38	25.00	74.66	57.70	24.31	0.35	-1.61	327.55	2.03	1.16	282.61	196.37	0.54	1.02	0.09
C04-02	6.62	24.80	74.78	57.78	24.48	0.57	-2.05	428.16	2.09	1.41	302.69	243.84	0.61	1.08	0.12
C04-03	6.44	24.80	74.60	57.68	24.95	0.86	-1.59	541.64	3.41	1.36	397.48	295.22	0.88	1.49	0.18
C04-04	6.63	24.80	74.77	57.54	24.90	0.51	-2.00	375.12	1.87	1.28	293.77	200.18	0.65	1.09	0.09
C04-05	6.36	24.90	74.76	57.68	32.29	0.25	-1.04	293.17	2.81	0.84	350.68	191.83	0.48	1.00	0.10
C04-06	6.40	24.90	74.77	57.00	32.39	0.27	-0.93	359.94	3.87	0.88	409.95	241.38	0.53	1.16	0.15
C04-07	6.35	24.90	74.67	57.50	32.47	0.25	-1.05	287.96	2.75	0.82	351.84	185.14	0.52	1.03	0.09
C04-08	6.57	24.90	74.99	57.64	31.85	0.32	-0.89	361.47	4.06	0.92	393.32	232.78	0.57	1.22	0.15
C04-09	6.36	24.90	74.89	56.49	37.55	0.10	-0.52	185.60	3.59	0.44	421.98	134.11	0.38	0.98	0.08
C04-10	6.47	24.90	74.87	57.63	37.75	0.30	-0.91	385.59	4.22	0.84	460.50	243.15	0.59	1.19	0.15
C04-11	6.39	24.80	74.90	57.37	37.39	0.20	-0.64	300.85	4.68	0.59	509.95	212.17	0.51	1.15	0.13
C04-12	6.37	24.90	74.83	57.00	38.73	0.24	-0.82	310.42	3.78	0.68	455.31	192.84	0.56	1.11	0.11
C05-01	6.73	24.80	74.90	57.46	24.61	0.50	-2.65	391.09	1.47	1.48	264.96	220.97	0.58	0.97	0.09
C05-02	7.75	24.80	74.77	56.47	24.06	0.36	-2.42	348.25	1.44	1.39	250.97	216.70	0.48	0.87	0.08
C05-03	7.14	24.80	74.63	57.59	24.57	0.44	-1.99	418.30	2.10	1.44	289.91	276.72	0.49	0.97	0.13
C05-04	7.12	24.80	74.66	57.66	25.05	0.49	-2.57	363.64	1.41	1.43	254.19	196.95	0.77	1.15	0.07

Código	Vacíos (%)	Temp (°C)	Radio (mm)	Espesor (mm)	Ranura (mm)	U deform (kN.mm)	Pendiente postpico (kN/mm)	Energía de fractura (Joules/m2)	FI	Carga pico (kN)	CRI	U postpico (J/m2)	$\Delta P_{max}$ (mm)	$\Delta P_{mdp}$ (mm)	TI
<b>C05-05</b>	6.86	24.80	74.79	57.52	32.60	0.19	-1.67	269.62	1.62	0.97	277.81	188.32	0.35	0.75	0.08
<b>C05-06</b>	6.68	24.80	74.84	57.45	32.94	0.27	-2.00	286.15	1.43	1.07	266.85	181.31	0.43	0.78	0.06
<b>C05-07</b>	7.30	24.80	74.80	57.11	32.82	0.33	-2.83	281.98	0.99	1.16	243.06	155.62	0.47	0.76	0.04
<b>C05-08</b>	6.82	24.80	74.77	57.05	32.90	0.29	-2.26	224.76	0.99	0.92	244.46	117.37	0.50	0.79	0.03
<b>C05-09</b>	6.58	25.10	74.84	56.67	37.61	0.22	-1.70	221.34	1.31	0.75	295.71	124.49	0.52	0.82	0.04
<b>C05-10</b>	6.95	25.10	74.82	57.41	37.52	0.18	-1.25	220.67	1.76	0.71	312.15	143.60	0.40	0.77	0.05
<b>C05-11</b>	7.53	25.10	75.04	57.54	37.12	0.16	-0.57	214.73	3.80	0.49	440.74	135.36	0.55	1.13	0.08
<b>C05-12</b>	7.05	25.10	75.17	57.15	37.85	0.23	-0.50	383.44	7.62	0.64	598.07	261.33	0.63	1.48	0.22
<b>C06-01</b>	7.31	25.10	74.85	57.23	24.64	0.49	-1.60	372.43	2.33	1.12	332.84	217.38	0.66	1.14	0.10
<b>C06-02</b>	6.64	25.10	74.72	57.35	24.67	0.48	-0.91	459.63	5.03	1.05	438.82	285.29	0.73	1.49	0.22
<b>C06-03</b>	7.35	25.00	74.87	57.78	24.49	0.54	-0.91	481.09	5.31	1.11	431.49	296.19	0.74	1.54	0.24
<b>C06-04</b>	7.00	25.00	74.92	57.45	25.27	0.52	-1.31	401.64	3.07	1.06	378.27	234.91	0.73	1.29	0.13
<b>C06-05</b>	6.55	24.90	74.77	57.10	31.87	0.56	-0.85	509.01	6.01	0.94	539.40	311.89	0.81	1.56	0.23
<b>C06-06</b>	7.12	24.90	74.85	56.68	32.04	0.26	-0.65	331.01	5.11	0.66	499.53	203.69	0.68	1.37	0.14
<b>C06-07</b>	7.17	24.90	74.97	57.55	32.06	0.37	-0.98	399.96	4.09	0.92	434.65	255.25	0.63	1.25	0.16
<b>C06-08</b>	7.16	24.90	74.89	57.37	32.70	0.16	-0.65	220.05	3.37	0.58	380.49	149.79	0.48	1.10	0.09
<b>C06-09</b>	7.32	24.90	74.79	57.63	37.40	0.16	-0.45	189.62	4.24	0.40	475.12	115.79	0.61	1.21	0.07
<b>C06-10</b>	6.57	25.00	74.88	56.90	37.38	0.24	-0.51	332.89	6.51	0.57	582.31	210.42	0.67	1.46	0.16
<b>C06-11</b>	6.79	25.00	74.75	57.75	37.60	0.13	-0.68	180.34	2.64	0.53	342.21	118.91	0.40	0.89	0.06
<b>C06-12</b>	7.08	25.00	74.76	57.45	37.72	0.18	-0.48	236.01	4.97	0.48	495.52	156.66	0.53	1.18	0.10
<b>M07-01</b>	7.61	24.90	74.95	57.41	24.43	0.65	-2.45	423.96	1.73	1.42	297.57	217.73	0.74	1.15	0.09
<b>M07-02</b>	7.36	24.90	75.02	57.79	24.55	0.53	-1.78	428.46	2.41	1.31	327.27	247.33	0.70	1.20	0.12
<b>M07-03</b>	7.46	25.00	74.98	58.34	24.30	0.47	-2.16	358.15	1.66	1.36	264.18	210.21	0.58	1.00	0.09
<b>M07-04</b>	7.30	24.90	75.06	57.67	31.45	0.30	-1.37	405.25	2.97	1.06	384.09	278.77	0.50	1.01	0.14
<b>M07-05</b>	7.36	25.00	75.06	57.59	31.45	0.51	-1.45	415.10	2.86	1.02	407.81	207.02	0.82	1.33	0.11
<b>M07-06</b>	7.20	25.10	75.03	57.52	32.01	0.28	-2.27	224.98	0.99	0.93	242.37	119.61	0.51	0.80	0.03
<b>M07-07</b>	6.94	24.90	74.97	58.30	31.87	0.31	-1.30	345.16	2.66	1.01	341.63	213.68	0.55	1.06	0.11

Código	Vacíos (%)	Temp (°C)	Radio (mm)	Espesor (mm)	Ranura (mm)	U deform (kN.mm)	Pendiente postpico (kN/mm)	Energía de fractura (Joules/m2)	FI	Carga pico (kN)	CRI	U postpico (J/m2)	$\Delta P_{max}$ (mm)	$\Delta P_{mdp}$ (mm)	TI
<b>M07-08</b>	7.22	25.00	75.05	57.59	37.34	0.26	-1.02	285.61	2.79	0.72	394.91	170.63	0.56	1.03	0.08
<b>M07-09</b>	7.28	25.00	74.96	57.64	37.38	0.16	-1.04	265.84	2.56	0.72	366.92	182.10	0.42	0.89	0.09
<b>M07-10</b>	7.22	25.00	75.03	57.68	37.41	0.24	-1.10	308.82	2.82	0.78	397.14	196.85	0.51	0.98	0.09
<b>M07-11</b>	7.19	25.00	75.05	57.38	37.63	0.22	-1.13	327.37	2.90	0.84	389.72	215.41	0.49	0.98	0.10
<b>C08-01</b>	7.83	25.00	74.97	57.82	24.47	0.68	-1.13	570.43	5.05	1.28	444.35	349.38	0.80	1.56	0.27
<b>C08-02</b>	6.87	24.90	74.96	57.77	24.42	0.64	-1.80	471.18	2.61	1.34	350.56	262.93	0.73	1.31	0.15
<b>C08-03</b>	7.47	25.00	74.97	57.90	24.43	0.66	-1.02	586.12	5.73	1.28	457.63	359.50	0.83	1.64	0.29
<b>C08-04</b>	7.86	24.90	75.05	58.23	24.69	0.70	-1.31	548.45	4.19	1.34	410.45	331.11	0.77	1.45	0.23
<b>C08-05</b>	7.79	24.90	75.04	58.04	31.46	0.47	-0.99	433.93	4.39	0.93	466.14	257.01	0.78	1.42	0.16
<b>C08-06</b>	7.10	25.00	74.98	58.19	31.89	0.29	-1.33	303.15	2.28	0.94	323.70	187.61	0.52	0.99	0.09
<b>C08-07</b>	7.89	25.00	74.97	58.31	31.92	0.45	-1.08	408.00	3.78	0.99	411.36	254.01	0.65	1.25	0.15
<b>C08-08</b>	7.27	24.90	74.97	58.31	31.92	0.45	-1.08	408.00	3.78	0.99	411.36	254.01	0.65	1.25	0.15
<b>C08-09</b>	7.44	24.90	75.05	58.43	37.98	0.35	-0.71	427.35	6.02	0.76	558.71	266.00	0.74	1.45	0.19
<b>C08-10</b>	7.05	25.00	74.98	58.12	37.78	0.26	-0.81	327.28	4.03	0.74	443.11	210.78	0.55	1.14	0.12
<b>C08-11</b>	7.61	25.00	74.97	57.75	37.53	0.29	-0.76	327.24	4.32	0.69	473.76	209.64	0.59	1.19	0.13
<b>C08-12</b>	7.64	24.90	75.02	57.53	37.57	0.31	-1.28	319.04	2.49	0.82	388.80	177.50	0.61	1.06	0.08
<b>C09-01</b>	7.51	25.10	75.04	58.49	24.89	0.47	-0.65	465.79	7.16	0.90	519.88	312.34	0.81	1.72	0.28
<b>C09-02</b>	7.30	24.90	75.06	58.26	24.28	0.39	-0.82	428.60	5.26	1.00	430.53	280.97	0.65	1.44	0.22
<b>C09-03</b>	7.90	25.00	75.05	57.84	21.80	0.55	-0.58	472.24	8.16	0.92	513.56	295.58	0.90	1.92	0.30
<b>C09-04</b>	8.00	25.00	74.98	58.36	24.20	0.45	-0.66	411.99	6.24	0.89	463.67	276.17	0.69	1.56	0.24
<b>C09-05</b>	7.69	25.00	63.81	57.65	31.99	0.38	-0.48	503.37	10.50	0.64	788.03	320.75	0.81	1.68	0.28
<b>C09-06</b>	8.08	24.90	75.07	57.61	31.36	0.39	-0.76	437.09	5.76	0.83	526.61	267.45	0.78	1.52	0.20
<b>C09-07</b>	8.36	25.00	75.05	58.36	31.57	0.34	-0.45	431.12	9.48	0.67	642.29	296.38	0.80	1.81	0.30
<b>C09-08</b>	8.00	25.00	75.07	58.38	32.71	0.26	-0.44	369.87	8.33	0.66	561.36	258.97	0.62	1.55	0.24
<b>C09-09</b>	7.21	25.00	74.97	58.37	37.88	0.13	-0.58	214.49	3.72	0.50	430.80	153.65	0.41	1.01	0.09
<b>C09-10</b>	7.14	25.00	74.97	58.36	37.91	0.18	-0.48	274.51	5.74	0.51	540.72	172.46	0.64	1.34	0.12
<b>C09-11</b>	6.82	25.00	75.01	58.09	37.96	0.20	-0.57	300.81	5.25	0.57	523.69	199.66	0.59	1.25	0.13

Código	Vacíos (%)	Temp (°C)	Radio (mm)	Espesor (mm)	Ranura (mm)	U deform (kN.mm)	Pendiente postpico (kN/mm)	Energía de fractura (Joules/m2)	FI	Carga pico (kN)	CRI	U postpico (J/m2)	$\Delta P_{max}$ (mm)	$\Delta P_{mdp}$ (mm)	TI
C09-12	6.66	24.90	75.04	58.30	37.91	0.32	-0.77	345.17	4.50	0.64	537.88	185.04	0.87	1.45	0.11
C10-01	6.96	25.20	74.98	56.34	25.50	0.77	-0.37	712.66	19.34	0.77	919.70	415.20	1.50	2.96	0.61
C10-02	6.99	25.10	74.82	57.63	25.36	0.85	-0.36	690.37	19.16	0.78	889.67	399.84	1.64	3.10	0.58
C10-03	6.28	25.10	74.86	57.68	25.95	0.65	-0.38	590.71	15.37	0.73	807.64	340.77	1.38	2.69	0.45
C10-04	6.44	25.10	74.87	56.07	25.29	0.71	-0.49	553.16	11.36	0.74	743.42	309.10	1.25	2.33	0.34
C10-05	7.92	25.10	75.09	56.47	24.54	0.99	-0.26	743.27	28.46	0.67	1104.37	419.42	1.94	3.77	0.77
C10-06	7.81	25.00	75.03	56.41	25.74	0.90	-0.17	712.80	41.07	0.54	1316.16	419.19	2.02	4.29	0.95
C10-07	7.63	25.00	74.99	57.69	32.66	0.39	-0.20	525.92	26.06	0.49	1081.80	334.85	1.29	3.01	0.57
C10-08	7.49	25.00	74.94	57.64	32.07	0.71	-0.27	673.27	24.77	0.58	1163.29	373.54	1.75	3.35	0.60
C10-09	7.84	25.00	74.84	57.58	32.17	0.55	-0.22	521.10	24.15	0.49	1074.07	307.33	1.50	3.06	0.48
C10-10	7.91	25.00	75.15	56.40	31.19	0.47	-0.31	453.00	14.84	0.54	838.96	264.81	1.25	2.48	0.32
C10-11	7.50	25.00	74.70	56.78	31.56	0.48	-0.19	593.88	30.83	0.52	1144.37	374.47	1.45	3.24	0.67
C10-12	7.57	25.00	75.01	57.45	32.16	0.47	-0.32	551.27	17.06	0.59	941.69	318.97	1.31	2.65	0.43
C10-13	7.72	25.00	74.95	57.70	38.89	0.31	-0.17	414.18	24.26	0.36	1156.90	263.96	1.16	2.67	0.40
C10-14	7.66	25.00	75.21	56.19	37.99	0.30	-0.16	455.01	27.60	0.39	1166.67	300.04	1.14	2.73	0.48
C10-15	7.53	24.90	74.86	56.23	37.53	0.37	-0.15	501.67	32.75	0.38	1324.27	320.04	1.36	3.10	0.56
C10-16	7.54	24.90	75.12	57.74	37.61	0.33	-0.19	464.23	24.17	0.44	1058.91	310.50	1.05	2.59	0.48
C10-17	7.36	24.90	74.99	56.81	37.80	0.26	-0.17	335.07	19.37	0.33	1026.41	214.81	1.03	2.40	0.29
C10-18	7.46	24.90	74.90	56.91	37.14	0.30	-0.20	448.93	22.22	0.43	1044.80	303.67	1.01	2.44	0.44
C11-01	7.56	24.90	75.02	56.76	25.93	0.28	-0.85	332.78	3.92	0.89	373.06	220.10	0.58	1.26	0.15
C11-02	7.67	24.90	74.64	56.45	25.92	1.00	-1.36	601.75	4.42	0.92	655.07	205.66	1.49	2.08	0.12
C11-03	7.43	24.90	74.96	57.21	24.48	0.73	-1.23	544.03	4.43	1.22	446.62	299.67	0.92	1.60	0.20
C11-04	7.00	24.90	74.87	57.44	25.85	0.54	-1.30	441.24	3.38	1.15	383.58	266.93	0.71	1.31	0.16
C11-05	7.77	24.90	74.87	56.78	24.37	0.38	-1.66	329.36	1.98	1.09	302.50	190.00	0.65	1.09	0.08

<b>Código</b>	<b>Vacíos (%)</b>	<b>Temp (°C)</b>	<b>Radio (mm)</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Ranura (mm)</b>	<b>U deform (kN.mm)</b>	<b>Pendiente postpico (kN/mm)</b>	<b>Energía de fractura (Joules/m2)</b>	<b>FI</b>	<b>Carga pico (kN)</b>	<b>CRI</b>	<b>U postpico (J/m2)</b>	<b>ΔP<sub>max</sub> (mm)</b>	<b>ΔP<sub>mdp</sub> (mm)</b>	<b>TI</b>
<b>C11-06</b>	7.46	24.90	74.70	56.84	24.57	0.50	-0.80	501.40	6.25	1.06	474.85	323.75	0.72	1.63	0.29
<b>C11-07</b>	7.20	24.90	74.89	57.22	31.82	0.44	-0.98	490.93	5.00	1.06	463.31	312.57	0.64	1.34	0.22
<b>C11-08</b>	7.20	24.90	74.67	57.33	32.29	0.43	-0.61	498.71	8.18	0.85	585.39	326.40	0.77	1.66	0.29
<b>C11-09</b>	7.06	24.90	74.87	57.01	31.43	0.36	-1.03	311.57	3.03	0.71	436.14	159.23	0.87	1.35	0.08
<b>C11-10</b>	7.13	25.00	75.01	56.88	31.65	0.46	-1.12	395.31	3.52	0.91	434.25	220.63	0.76	1.32	0.12
<b>C11-11</b>	6.86	25.00	74.63	56.85	32.17	0.36	-0.51	429.38	8.49	0.70	613.80	278.29	0.78	1.69	0.25
<b>C11-12</b>	7.26	25.10	75.04	57.17	31.33	0.39	-0.87	435.44	5.01	0.93	468.70	267.58	0.67	1.41	0.20
<b>C11-13</b>	7.55	25.10	74.52	56.52	37.58	0.14	-0.65	202.19	3.13	0.50	404.09	137.16	0.43	0.94	0.07
<b>C11-14</b>	7.86	25.20	74.90	56.45	37.42	0.23	-0.69	331.42	4.81	0.68	485.99	213.38	0.56	1.20	0.14
<b>C11-15</b>	7.30	25.10	74.75	57.48	37.90	0.21	-0.36	302.67	8.47	0.48	628.11	209.69	0.60	1.47	0.18
<b>C11-16</b>	7.68	25.10	74.95	57.27	36.83	0.28	-0.76	363.51	4.76	0.80	452.41	233.53	0.57	1.22	0.15
<b>C11-17</b>	7.05	25.10	74.78	56.35	37.89	0.21	-0.85	301.78	3.53	0.68	442.03	203.56	0.49	1.02	0.11
<b>C11-18</b>	7.79	25.10	74.91	56.60	38.59	0.12	-0.54	213.84	3.95	0.47	454.60	154.18	0.41	1.03	0.09
<b>C12-01</b>	7.25	25.10	75.00	57.43	24.47	0.53	-0.71	504.16	7.06	1.05	478.23	331.36	0.71	1.64	0.31
<b>C12-02</b>	6.58	25.00	74.97	57.52	25.30	0.76	-1.02	549.47	5.36	1.09	504.84	305.34	0.97	1.71	0.23
<b>C12-03</b>	7.23	25.00	74.92	57.37	24.43	0.53	-0.74	490.04	6.61	1.03	477.67	316.53	0.75	1.63	0.28
<b>C12-04</b>	6.91	25.00	74.67	57.30	24.76	0.57	-0.74	583.02	7.87	1.04	559.85	372.30	0.92	1.84	0.34
<b>C12-05</b>	7.13	25.20	74.53	57.12	31.84	0.25	-0.50	303.61	6.11	0.57	537.23	201.69	0.62	1.40	0.16
<b>C12-06</b>	6.66	25.00	74.74	57.09	32.85	0.32	-0.68	375.43	5.56	0.72	521.28	225.69	0.73	1.48	0.17
<b>C12-07</b>	6.77	25.00	74.63	57.26	31.99	0.46	-1.00	490.42	4.92	0.91	536.15	272.94	0.90	1.55	0.18
<b>C12-08</b>	7.33	25.10	74.57	57.07	31.68	0.33	-0.47	379.17	8.09	0.72	529.88	254.92	0.64	1.54	0.23
<b>C12-09</b>	6.95	24.90	74.61	56.29	37.68	0.28	-0.32	449.92	14.24	0.53	856.98	287.81	0.92	2.03	0.32
<b>C12-10</b>	7.19	25.00	74.80	57.67	37.75	0.33	-0.45	524.31	11.58	0.68	770.67	369.54	0.74	1.80	0.39
<b>C12-11</b>	7.25	25.00	74.79	57.04	37.74	0.30	-0.56	432.05	7.68	0.69	622.27	289.92	0.65	1.45	0.23
<b>C12-12</b>	7.26	24.90	74.63	57.18	38.18	0.23	-0.57	243.95	4.26	0.48	510.17	139.87	0.68	1.26	0.08
<b>M13-01</b>	6.94	24.90	74.87	57.36	25.06	0.49	-3.18	441.52	1.39	1.88	235.35	273.81	0.46	0.85	0.11
<b>M13-02</b>	6.83	24.80	74.67	57.39	25.09	0.37	-2.80	314.22	1.12	1.43	219.18	199.65	0.42	0.76	0.07



<b>Código</b>	<b>Vacíos (%)</b>	<b>Temp (°C)</b>	<b>Radio (mm)</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Ranura (mm)</b>	<b>U deform (kN.mm)</b>	<b>Pendiente postpico (kN/mm)</b>	<b>Energía de fractura (Joules/m2)</b>	<b>FI</b>	<b>Carga pico (kN)</b>	<b>CRI</b>	<b>U postpico (J/m2)</b>	<b><math>\Delta P_{max}</math> (mm)</b>	<b><math>\Delta P_{mdp}</math> (mm)</b>	<b>TI</b>
<b>M13-03</b>	7.54	24.90	75.01	56.96	25.54	0.77	-3.03	573.70	1.89	1.88	304.62	299.59	0.74	1.18	0.13
<b>M13-04</b>	7.52	24.90	74.76	57.23	24.94	0.58	-1.94	446.66	2.31	1.37	325.78	247.75	0.67	1.16	0.12
<b>M13-05</b>	7.13	24.90	74.89	57.52	32.04	0.51	-1.96	491.35	2.50	1.39	353.40	290.14	0.62	1.10	0.14
<b>M13-06</b>	6.73	24.90	74.81	56.78	32.23	0.41	-2.26	425.60	1.88	1.39	306.40	275.73	0.47	0.88	0.11
<b>M13-07</b>	6.73	24.90	74.62	57.65	31.60	0.46	-1.84	512.81	2.79	1.41	363.86	339.98	0.53	1.04	0.17
<b>M13-08</b>	6.81	24.90	74.88	57.18	31.88	0.35	-1.49	391.40	2.63	1.16	337.96	244.43	0.50	1.00	0.12
<b>M13-09</b>	6.95	24.90	74.60	57.05	37.84	0.24	-1.26	278.93	2.22	0.76	366.38	165.62	0.52	0.93	0.07
<b>M13-10</b>	6.68	24.90	74.72	57.42	38.04	0.23	-0.81	579.98	7.12	0.91	639.27	457.71	0.44	1.17	0.33
<b>M13-11</b>	6.73	24.90	74.77	57.13	37.61	0.33	-1.43	494.69	3.45	1.10	450.53	340.84	0.50	1.01	0.17
<b>M13-12</b>	6.68	24.90	74.60	57.13	38.65	0.29	-1.24	483.32	3.89	0.99	487.18	341.77	0.48	1.02	0.18