



ESTUDIO INTERLABORATORIO DE LA PRUEBA DE AGRIETAMIENTO IDEAL-CT

Alfonso Díaz¹, Rey Omar Adame²,
Horacio Alamilla³, Leonardo Ochoa⁴, Pedro Limón⁵,
Carlos Humberto Fonseca⁶, Alejandro Castellanos⁷, Eymard Ávila⁸, Luis Guillermo Díaz⁹

¹ Ergon Asfaltos México, Puebla, México, Alfonso.diaz@ergon.com

² Red Carretera de Occidente, Guadalajara, México, omar.adame@redoccidente.com

³ Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México, hdelgado@imt.mx

⁴ Quimi-Kao, El Salto, México, lochoa@kao.com

⁵ Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México, pedro.limon@academicos.udg.mx

⁶ Tecnológico de Monterrey, Monterrey, México, Carlos.fonseca@tec.mx

⁷ Ceviter, Querétaro, México, Alejandro.castellanos@ceviter.com.mx

⁸ Ergon Asfaltos México, Puebla, México, Eymard.avila@ergon.com

⁹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Luis.diazfl@uanl.edu.mx

Resumen

Los principales tipos de deterioros en un pavimento flexible son: el agrietamiento, la deformación permanente y el desprendimiento. En la década de los noventa, la industria del asfalto estuvo enfocada en reducir la susceptibilidad a la deformación permanente en las capas asfálticas usando varias medidas como el uso de asfaltos modificados con polímeros entre otras. El problema de deformación se disminuyó considerablemente, sin embargo, estas medidas resultaron en agrietamientos tempranos de las mezclas asfálticas.

Determinar la susceptibilidad al agrietamiento de los pavimentos flexibles es cada vez más complejo, debido a la incorporación de materiales reciclados, rejuvenecedores, entre otros. Existen diversas pruebas para medir el agrietamiento en mezclas asfálticas, y muchas de ellas ya se utilizan en México, sin embargo, existe la necesidad de homologar el uso de una de estas pruebas, que sea simple, repetible, sensible a la composición de la mezcla y práctica para su uso en el diseño balanceado de mezclas asfálticas, control y aseguramiento de calidad.

El objetivo de este trabajo es evaluar la repetibilidad y reproducibilidad de la metodología IDEAL-CT, (por su nombre en inglés, indirect tensile asphalt cracking test), así como la capacidad técnica de los laboratorios participantes para ejecutarla. Participaron siete laboratorios pertenecientes a la Asociación Mexicana del Asfalto (AMAAC), se evaluaron tres diferentes tipos de mezcla asfáltica, una de referencia y dos con incorporación pavimento asfáltico recuperado (RAP). El estudio interlaboratorio incluyó, la organización de los trabajos, el diseño de las mezclas asfálticas evaluadas, la ejecución de los ensayos y el análisis estadístico de los resultados obtenidos por los laboratorios participantes. Los resultados obtenidos en este trabajo ponen las bases para la declaración de precisión del método IDEAL-CT en México.

Palabras Clave: IDEAL-CT, Interlaboratorio, Repetibilidad, Reproducibilidad



1 Introducción

Las causas de agrietamiento en los pavimentos asfálticos son una amplia variedad de posibilidades. De entre ellas incluyen el agrietamiento de abajo hacia arriba la cual se relaciona con la intensidad de tráfico y el agrietamiento de arriba hacia abajo relacionada con el número de repeticiones de carga que el pavimento ha alcanzado, tensiones inducidas térmicamente o agrietamiento térmico (debido a un evento de carga única o cargas repetidas) siendo esta otra causa del agrietamiento de arriba hacia abajo bajo condiciones climáticas frías. Por lo general, el agrietamiento comienza después de un tiempo considerable de acumulación de daños y de puesta en servicio la mezcla asfáltica, además del proceso de envejecimiento del asfalto que también debe ser tomado en cuenta.

La implementación y desarrollo de la metodología SUPERPAVE que se enfoca en un diseño volumétrico, a principios de los años 90 impulsó el uso de asfaltos modificados para minimizar la formación de roderas, pero provocó problemas de agrietamiento en algunos asfaltos.

Para la década de los 2000 el asfalto en el mundo tuvo un incremento en sus costos obligando al uso de mezclas con mayores tasas o porcentajes de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) generando problemas de agrietamiento [1]. En Estados Unidos después de esto algunos proveedores comenzaron a usar cantidades excesivas de residuos reciclados de aceite de motor (REOB, por sus siglas en inglés), para modificar el asfalto y que este a su vez cumpliera con los requisitos de la temperatura baja del grado de desempeño PG. Esta cantidad excesiva de aceites provocaba que el asfalto fuera susceptible al envejecimiento, así después de estos problemas los departamentos de Transporte en USA han estado tratando de abordar esta problemática con pruebas de desempeño para ligantes y mezclas asfálticas.

El agrietamiento generado por reflexión de las capas inferiores, asfalto envejecido y por el número sobrepasado de repeticiones de carga son los problemas principales de agrietamiento en las carreteras de asfalto en México.

El agrietamiento a baja temperatura o térmico tiene dos mecanismos fundamentales: 1) un aumento constante en el tiempo de la fragilización debido al envejecimiento, oxidación y tensiones de tracción en el pavimento creadas por la contracción en condiciones de baja temperatura. Y 2) el endurecimiento físico que se genera en condiciones de bajas temperaturas por tiempos prolongados fragilizando el ligante [2].

En México en las versiones del Protocolo AMAAC “Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño” se incluye un análisis de agrietamiento por fatiga para el Nivel IV y tráfico de más de 30 millones de ejes equivalentes en la que se ejecuta la prueba a fatiga en 4 puntos. Además de la viga de cuatro puntos existen diversas pruebas para medir el agrietamiento en mezclas asfálticas, y muchas de ellas ya se utilizan en México, sin embargo, existe la necesidad de homologar el uso de una de estas pruebas, que sea simple, repetible, sensible a la composición de la mezcla y práctica para su uso en el diseño balanceado de mezclas asfálticas, control y aseguramiento de calidad.

La buena práctica y el conocimiento de la ejecución de ensayos se ha convertido en puntos clave para garantizar la confiabilidad en el desempeño de los materiales de las mezclas asfálticas. En lo que se refiere al ensayo de ensayo de agrietamiento IDEAL-CT que desde su inicio de uso en México (2020), se ha tenido el interés de definir los parámetros de precisión y exactitud en una o varias características de las mezclas asfálticas evaluadas.

Hoy en día en México no se cuenta con parámetros de precisión y sesgo, por lo que, se toman esos parámetros de normas de la ASTM para llevar a cabo los análisis estadísticos, debido a esto, se han recopilado de los datos para llevar a cabo el estudio utilizando el método estadístico de la norma ASTM E691 (2020) [3] con el objetivo de evaluar la variabilidad de los laboratorios de ensayos, este

método específica que debe hacerse un estudio de interlaboratorios (ILS) para analizar la precisión en los resultados entre laboratorios y laboratoristas.

La importancia del proyecto a realizar se ve soportado a través de la aplicación de una herramienta estadística conocida como estudios de r&R (Repetibilidad y Reproducibilidad). El estudio r&R es una de las únicas herramientas que brinda confianza al determinar el grado de criterios validos que un grupo de personas pueda tener para tomar las decisiones anteriores adecuadas y validar los parámetros de desviación estándar de la repetibilidad (Sr) y desviación estándar de la reproducibilidad (SR).

2 Objetivo

El objetivo de este trabajo es evaluar la repetibilidad y reproducibilidad del método de prueba IDEAL-CT. Analizando sus variables principales como carga pico (KN), pendiente post pico (N/mm), energía de fractura (J/m²) y el Índice de agrietamiento o Index-CT. Así como la capacidad técnica de los laboratorios participantes para ejecutarla.

3 Planeación del estudio

3.1 Método de prueba a evaluar.

El IDEAL-CT [4] es una prueba de agrietamiento desarrollada por el Instituto de transporte de Texas. Su objetivo es determinar el índice de agrietamiento de las mezclas asfálticas a temperaturas intermedias (25°C). La prueba se puede ejecutar en especímenes fabricados en laboratorio o núcleos de campo.

Los especímenes se acondicionan dentro de una cámara de temperatura controlada por un tiempo de 2 horas ± 10 minutos a 25°C y se evalúan a tensión indirecta aplicando carga monótonica a una velocidad de 50 mm/min, hasta la falla completa de la muestra.

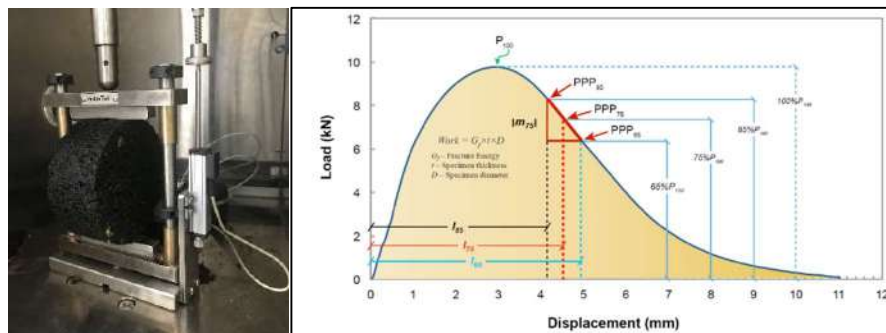


Figura 1. Dispositivo de prueba y curva esfuerzo-deformación de la prueba IDEAL-CT.[1]

El cálculo del valor de CTindex se realiza sobre la gráfica de esfuerzo- deformación obtenida de la prueba, utilizando la Ecuación 1.

$$CT_{index} = \frac{t}{62} * \frac{l_{75}}{D} * \frac{G_f}{|m_{75}|} * 10^6 \quad (1)$$

Donde CTindex es el índice de tolerancia al agrietamiento, $|m_{75}|$ es el valor absoluto de la pendiente post-pico al 75% de reducción de la carga pico en N/m, l_{75} es la deformación del espécimen hasta el punto donde la carga pico se reduce al 75% en mm. (figura), D y t son el diámetro y espesor del espécimen respectivamente, ambos en mm. El valor de Gf se determina mediante la Ecuación 2.



$$G_f = \frac{W_f}{D * t} * 10^6 \quad (2)$$

Donde G_f es la energía de fractura en J/m², W_f es el trabajo a la falla en Joules.

3.2 Laboratorios

De acuerdo con ASTM D691-20 Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method, se recomienda realizar el estudio interlaboratorio de un método de prueba con 30 laboratorios participantes, sin embargo, esto puede no ser práctico. Es importante incluir suficientes laboratorios para que se considere una muestra representativa razonable de la población de laboratorios calificados.

Por laboratorios calificados se entiende que cuentan con las instalaciones y equipos adecuados, operadores competentes, familiaridad con el método de prueba, una reputación de prueba confiable y suficiente tiempo e interés para hacer un buen trabajo ya que de esto depende el éxito del estudio interlaboratorio.

En este estudio participaron siete laboratorios que pertenecen a la Asociación Mexicana del Asfalto (AMAAC) y que cuentan con el personal, equipo e instalaciones para realizar el método de prueba planteado.

Durante el desarrollo de este artículo se hará referencia a los laboratorios participantes solamente con un número de identificación del uno al siete.

3.3 Materiales

Para fines de este estudio se planteó realizar tres diseños de mezcla asfáltica densa bajo las especificaciones del protocolo AMAAC PA-MA 01-2011 “Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño” utilizando una granulometría de tamaño nominal de ¾” como se muestra en la Figura 2.

La mezcla 1 se fabricó con agregados pétreos 100% vírgenes provenientes del banco Thomé ubicado en el estado de Puebla, México y un asfalto modificado con polímero grado de desempeño PG 76-22.

El diseño 2 se fabricó con agregados pétreos del banco Thome y la incorporación de 15% de RAP proveniente del pavimento fresado de algunos tramos del periférico ecológico de Puebla y cemento asfáltico PG 76-22.

El diseño 3 se fabricó con agregados del banco Thome y la incorporación de 30% de RAP del periférico ecológico de Puebla, el asfalto base PG 76-22 utilizado fue aditivado con un agente rejuvenecedor para garantizar la correcta incorporación del asfalto del RAP evitando que se genere una mezcla seca y con alta susceptibilidad al agrietamiento.

Para un adecuado ajuste de la curva de diseño de las mezclas con RAP, este material se cribó en dos fracciones, una fracción gruesa con material pasa la malla ¾” a retenido en la malla #4 y una fracción fina con material pasa la malla #4 a finos. El contenido de asfalto presente en el RAP se obtuvo por el método de ignición ASTM D6307 para cada una de las fracciones y fue de 6.1% para la fracción gruesa y de 8.3% para la fracción fina.

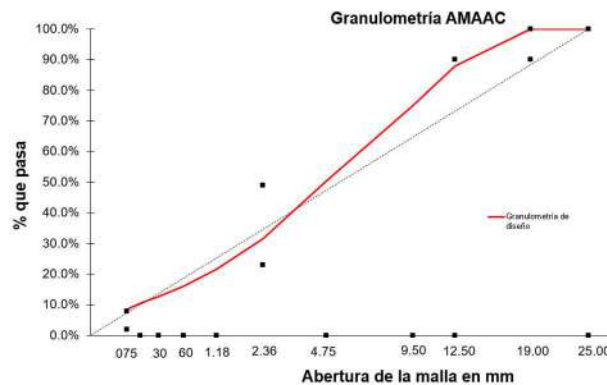


Figura 2. Granulometría de diseño.

3.4 Fabricación de los especímenes de prueba

Para cada tipo de mezcla a evaluar se fabricaron especímenes de prueba cilíndricos de 150 mm de diámetro por 62 mm de altura y un nivel de vacíos de aire de $7 \pm 0.5\%$ mediante el compactador giratorio. El armado, mezclado y compactación de los especímenes se realizó en un solo laboratorio con personal capacitado y acreditado por AMAAC con la finalidad de reducir variables que pudieran afectar a los resultados obtenidos.

Cada uno de los 7 laboratorios participantes fue provisto con 4 especímenes de prueba correspondientes a cada tipo de mezcla, por lo tanto, se enviaron un total de 12 especímenes que cumplieran los requisitos de geometría y vacíos a cada laboratorio. Además, se fabricaron especímenes de prueba adicionales para proporcionarlos a cualquier laboratorio en caso de requerirlos para repetir alguna de las evaluaciones.

La mezcla utilizada para la fabricación de los especímenes de prueba de los tres diseños realizados fue fabricada y compactada en laboratorio, utilizando las temperaturas de mezclado y compactación correspondientes al tipo de asfalto utilizado que en este caso fue de 170°C para el mezclado y de 160°C para la compactación después de un tiempo de 2 horas de curado de la mezcla en horno a esta misma temperatura.

El contenido óptimo de la mezcla con agregados 100% vírgenes fue de 5.6% respecto a la mezcla y el contenido óptimo de las mezclas con 15 y 30% de incorporación de RAP fue de 5.6% con respecto a la mezcla. Para las mezclas con RAP se hizo el ajuste del asfalto tomando en cuenta el porcentaje de asfalto que aporta el RAP. Los datos de las mezclas diseñadas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Características de las mezclas diseñadas

Mezcla	Fuente de material pétreo virgen	Grado de desempeño del asfalto	Aditivo rejuvenecedor	RAP (%)	Asfalto óptimo (%)	Asfalto de aporte nuevo (%)	Asfalto que aporta el RAP (%)
Mezcla 1	Thome	76-22	---	0	5.8	5.8	0
Mezcla 2	Thome	76-22	---	15	5.6	4.57	1.03
Mezcla 3	Thome	76-22	si	30	5.6	3.54	2.06



3.5 Datos a evaluar en el estudio

Como ya se mencionó anteriormente, este estudio se basa en la evaluación del método de prueba de agrietamiento IDEAL-CT ASTM D822. En la evaluación de este método se miden varios parámetros importantes para llegar a calcular el resultado final o Index-CT.

En este trabajo se realizará el análisis estadístico de los parámetros más importantes que conforman la evaluación de la prueba, los cuales son carga pico, pendiente post pico, energía de fractura y el Índice de agrietamiento o Index-CT.

Cada uno de los laboratorios participantes evaluó un mínimo de cuatro especímenes para cada tipo de mezcla, y para cada espécimen evaluado se reportaron los resultados obtenidos correspondientes a cada parámetro de prueba ya mencionado, además los laboratorios entregaron los archivos de datos sin procesar para su revisión en caso de ser necesario.

3.6 Método de análisis estadístico.

El tratamiento y análisis de los resultados se realizó bajo la norma ASTM E691-20 “Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a test Method” [3].

Este método de análisis tiene tres propósitos principales; determinar si los datos recopilados son lo suficientemente consistentes para formar la base de una declaración de precisión del método de prueba, investigar y actuar sobre cualquier dato que se considere inconsistente, y obtener la precisión estadística en las que se puede basar la declaración de precisión.

4 Análisis y discusión de resultados

4.1 Datos filtrados

Una vez que los siete laboratorios participantes en el estudio entregaron sus resultados para cada una de las variables solicitadas y cada una de las mezclas evaluadas, se realizó una depuración de datos con la finalidad de tener una menor desviación, en la cual se eliminó el dato más disperso de la media teniendo así tres datos para cada variable como se muestra en la Tabla 2, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Tabla 3. Resultados de los siete laboratorios para la mezcla 2 con 15% RAP

Laboratorio	% RAP	% V.a	Espesor (mm)	Carga pico (KN)	Pendiente post pico (N/mm)	Gf (J/m ²)	Index CT
1	15	7.2%	62.5	12.53	2380	7090.12	86.18
	15	6.7%	62.5	12.86	2950	7436.27	78.66
	15	7.1%	62.19	13.44	2860	7622.13	74.91
2	15	7.4%	62.58	13.067	2360	8270.62	120.79
	15	7.2%	61.21	13.58	2840	8352.87	93.23
	15	7.1%	62.39	12.81	2320	7878.026	104.43
3	15	7.2%	61.91	12.28	2475	7953	99.57
	15	6.8%	61.86	11.84	2202	7358.9	116.78
	15	7.0%	61.65	13.81	2805	8361.2	85.82
4	15	7.0%	62.26	13.001	2880	7437.9	84.13
	15	6.7%	61.99	12.885	2920	7765.67	89.15
	15	7.4%	62.33	12.096	2470	7436.32	106.9
5	15	7.4%	62.395	12.055	2450	7781.05	116.72
	15	7.1%	62.285	13.713	3490	7953.11	76.99
	15	7.2%	62.335	13.356	3180	8045.56	89.94
6	15	6.6%	62.2	9.208	2170	8271.04	193.6



	15	7.2%	62.05	12.37	2860	6910.31	70.85
	15	7.3%	62.15	12.67	2390	9155.82	154.98
	15	6.9%	61.95	12.53	2280	5371.21	57.91
7	15	7.2%	61.88	12.12	2080	6268.83	92.31
	15	7.5%	61.88	10.7	1620	3711.71	71.4

Tabla 4.

Tabla 2. Resultados de los siete laboratorios para la mezcla 1 con 0% RAP

Laboratorio	% RAP	% V.a	Espesor (mm)	Carga pico (KN)	Pendiente post pico (N/mm)	Gf (J/m ²)	Index CT
1	0	7.0%	62.3	10.15	1300	8089.07	263.83
	0	6.8%	62.3	9.66	1190	7660.75	246.27
	0	7.3%	62.4	10.35	1570	7512.81	178.68
2	0	6.8%	62.3	9.52	1380	7845.17	247.97
	0	7.4%	62.3	10.54	1310	8418.22	251.54
	0	7.2%	62.3	10.22	1310	7982.84	243.51
3	0	7.5%	62.2	10.59	1441	8684	243.93
	0	6.5%	61.9	9.05	1272	7103.1	228.85
	0	6.9%	61.9	10.47	1546	7679.5	193.7
4	0	7.0%	62.5	10.33	1330	8435.57	267.99
	0	6.6%	62.5	11.79	1720	8960.08	216.41
	0	6.9%	62.3	9.58	1380	8643.44	299.13
5	0	6.5%	63.1	10.27	1640	8164.55	214.2
	0	7.3%	62.3	10.80	1860	8400.17	210.21
	0	7.1%	62.2	11.37	2030	8469.3	174.47
6	0	7.1%	62.1	12.48	2080	9486.15	183.62
	0	7.0%	62.2	12.26	1800	9775.79	248.4
	0	7.3%	62.1	11.79	1960	7702.22	138.25
7	0	7.1%	62.0	9.80	1440	7567.87	197.2
	0	7.3%	62.1	7.66	890	4256	184.74
	0	7.4%	61.9	9.01	1200	4248	143.4

Tabla 3. Resultados de los siete laboratorios para la mezcla 2 con 15% RAP

Laboratorio	% RAP	% V.a	Espesor (mm)	Carga pico (KN)	Pendiente post pico (N/mm)	Gf (J/m ²)	Index CT
1	15	7.2%	62.5	12.53	2380	7090.12	86.18
	15	6.7%	62.5	12.86	2950	7436.27	78.66
	15	7.1%	62.19	13.44	2860	7622.13	74.91
2	15	7.4%	62.58	13.067	2360	8270.62	120.79
	15	7.2%	61.21	13.58	2840	8352.87	93.23
	15	7.1%	62.39	12.81	2320	7878.026	104.43
3	15	7.2%	61.91	12.28	2475	7953	99.57
	15	6.8%	61.86	11.84	2202	7358.9	116.78
	15	7.0%	61.65	13.81	2805	8361.2	85.82
4	15	7.0%	62.26	13.001	2880	7437.9	84.13
	15	6.7%	61.99	12.885	2920	7765.67	89.15
	15	7.4%	62.33	12.096	2470	7436.32	106.9
5	15	7.4%	62.395	12.055	2450	7781.05	116.72
	15	7.1%	62.285	13.713	3490	7953.11	76.99
	15	7.2%	62.335	13.356	3180	8045.56	89.94



6	15	6.6%	62.2	9.208	2170	8271.04	193.6
	15	7.2%	62.05	12.37	2860	6910.31	70.85
	15	7.3%	62.15	12.67	2390	9155.82	154.98
7	15	6.9%	61.95	12.53	2280	5371.21	57.91
	15	7.2%	61.88	12.12	2080	6268.83	92.31
	15	7.5%	61.88	10.7	1620	3711.71	71.4

Tabla 4. Resultados de los siete laboratorios para la mezcla 3 con 30% RAP

Laboratorio	% RAP	% V.a	Espesor (mm)	Carga pico (KN)	Pendiente post pico (N/mm)	Gf (J/m ²)	Index CT
1	30	6.6%	62.3	12.61	2390	7834.78	99.95
	30	7.0%	62.31	13.251	2800	8325.19	93.47
	30	6.9%	62.78	14.412	2880	7008.06	58.85
2	30	7.0%	62.23	12.053	2430	7002.95	76.72
	30	6.7%	62.51	10.56	1970	6600.96	101.058
	30	7.0%	62.41	12.18	2130	7017.05	91.13
3	30	6.9%	60	11.59	2305	6854.5	86.14
	30	6.6%	61.92	11.51	2339	7326.7	102.62
	30	7.1%	62.09	11.49	2259	6475.8	80.98
4	30	6.5%	62.08	12.585	3010	7304.82	80.35
	30	6.7%	62.08	11.324	2430	6291.25	81.99
	30	7.2%	62.39	12.365	2720	7061.83	80.37
5	30	7.1%	62.28	11.557	2930	6502.5	77.42
	30	6.8%	62.142	11.382	2810	6913.28	92.29
	30	6.6%	62.07	13.152	3180	8413.02	85.15
6	30	6.8%	62.1	13.58	3060	8088.8	93.82
	30	7.2%	62.1	13.69	3860	7872.39	74.68
	30	6.4%	62.1	12.82	2460	7392.35	96.77
7	30	7.0%	62.05	11.657	3270	4090.94	26.17
	30	7.0%	61.95	12.057	3250	4131.31	25.53
	30	6.7%	62.38	12.82	3530	4573.65	27.5

4.2 Análisis de la consistencia de datos

De acuerdo con los cálculos indicados en la sección 15 de la norma ASTM E691-20, se determinaron las estadísticas correspondientes interlaboratorio y multilaboratorio para cada variable correspondiente a cada mezcla

Un ejemplo de las estadísticas calculadas se muestra en la Tabla 5, la cual corresponde a los resultados de los siete laboratorios para la variable de “carga pico” de la mezcla 1. Donde x son los resultados individuales de la prueba, \bar{x} es el promedio de los resultados, s es la desviación estándar de los tres resultados de cada laboratorio, $\bar{\bar{x}}$ es el promedio de los promedios, d es la diferencia entre el promedio de resultados y el promedio de promedios, S_x es la desviación estándar de las celdas promedio, S_r es la desviación estándar de la repetibilidad, S_L es la desviación estándar entre laboratorios, S_R es la desviación estándar de la reproducibilidad, k es la consistencia estadística interlaboratorio y h es la consistencia estadística multilaboratorio.

Los valores críticos de consistencia estadística h y k se obtuvieron de la tabla 5 que se presenta en la norma ASTM E691-20. Donde h depende del número de laboratorios participantes en el estudio y k depende de las replicas de prueba realizadas por cada laboratorio y del número de laboratorios



participantes. Para este estudio interlaboratorio realizado donde participaron siete laboratorios y cada laboratorio reportó sus resultados por triplicado, h es igual a 2.05 y k es igual a 2.03.

Teniendo el cálculo de estadísticas y los valores críticos de h y k se realizan las gráficas de consistencia estadística interlaboratorio y multilaboratorio. Por motivo de la extensión de este documento solo se muestran los cálculos de estadísticas de la Tabla 5, para el resto de las combinaciones de variables y tipos de mezcla solo se presentan las gráficas de consistencia estadística.

Tabla 5. Cálculo del valor h, k y desviaciones estándar correspondiente la carga pico de la mezcla 1.

Laboratorio	Resultados de prueba, x			\bar{x}	s	d	h	k
	1	2	3					
1	10.15	9.66	10.35	10.052	0.353	-0.314	-0.31	0.47
2	9.52	10.54	10.22	10.093	0.522	-0.272	-0.27	0.69
3	10.59	9.05	10.47	10.037	0.857	-0.329	-0.32	1.13
4	10.33	11.79	9.58	10.566	1.124	0.200	0.20	1.49
5	10.27	10.80	11.37	10.814	0.551	0.449	0.44	0.73
6	12.48	12.26	11.79	12.177	0.352	1.811	1.78	0.47
7	9.80	7.66	9.01	8.822	1.080	-1.544	-1.52	1.43

Promedio de las celdas promedio, $\bar{x} = 10.366$

Desviación estándar de los promedios, $S_x = 1.015$

Desviación estándar de la repetibilidad, $S_r = 0.755$

Desviación estándar entre laboratorio, $S_L = 0.917$

Desviación estándar de la reproducibilidad, $S_R = 1.188$

4.2.1 Consistencia estadística de la variable "Carga pico"

La estadística k obtiene únicamente valores positivos y es una medida de sensibilidad, valores altos de k representa imprecisión entre los resultados obtenidos por un mismo laboratorio. La estadística h puede obtener valores positivos y negativos, de manera general valores altos de h representa valores dispersos entre los laboratorios participantes en el estudio. K tiene mayor influencia en la repetibilidad (r) y h en la reproducibilidad (R).

En la Figura 3 se muestra el gráfico de consistencia estadística interlaboratorio k y multilaboratorio h para la variable de carga pico. En cada uno de los gráficos se muestra el valor para cada una de las tres mezclas evaluadas y para cada uno de los siete laboratorios.

Para el caso de la carga pico se puede observar que tanto interlaboratorio como multilaboratorio no existen datos mayores del valor crítico para ninguna de las tres mezclas evaluadas. Sin embargo, el laboratorio N° 6 obtuvo el valor mayor de la estadística k para la mezcla 2 y fue también el laboratorio con los valores mayores en la estadística h.

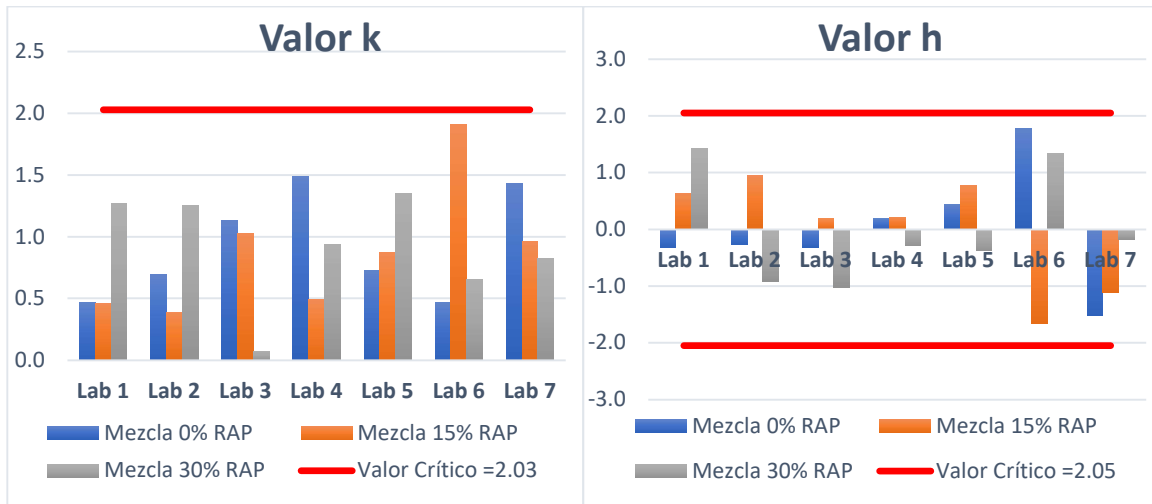


Figura 3. Consistencia estadística de carga pico. Izquierda valor k interlaboratorio. Derecha valor h multilaboratorio

4.2.2 Consistencia estadística de la variable “Pendiente post pico”

Para el análisis de la variable “pendiente post pico” en el gráfico del lado izquierdo de la Figura 4, se puede observar que el laboratorio 6 obtuvo un valor superior al crítico para la mezcla 3, El resto de los laboratorios obtuvieron valores estadísticamente consistentes, k menor a 2.03 para las tres mezclas evaluadas. Para el caso de la estadística h que se muestra en el gráfico de la derecha de la Figura 4, todos los laboratorios están por debajo de los valores críticos de 2.05 por lo que los valores muestran que la consistencia estadística entre laboratorios es aceptable. Los laboratorios con mayor dispersión fueron; el laboratorio 5 en la mezcla 1 y 2, el laboratorio 6 en la mezcla 1 y el laboratorio 7 en la mezcla 1, 2 y 3.

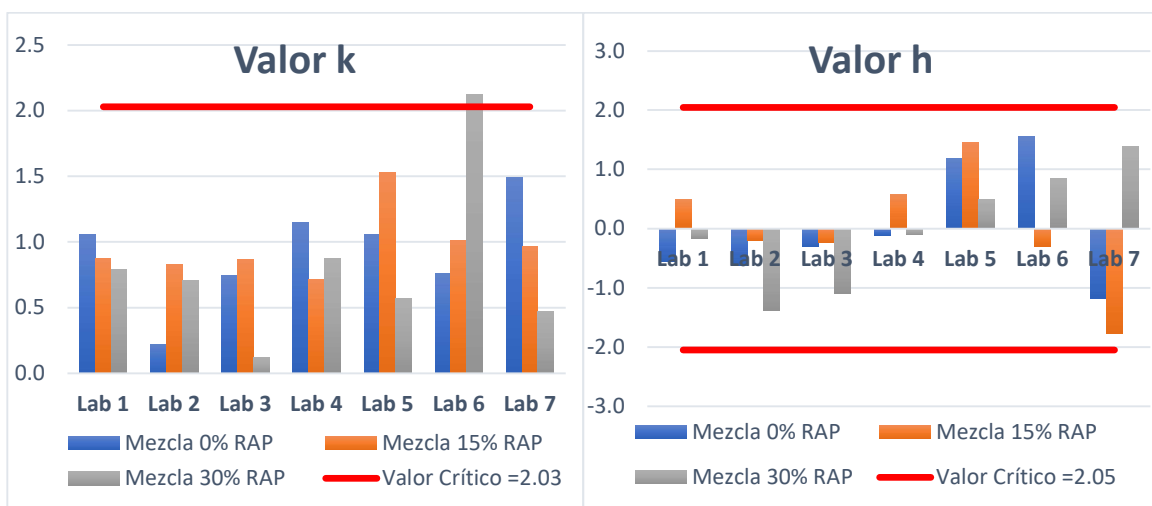


Figura 4. Consistencia estadística de pendiente post pico. Izquierda valor k interlaboratorio. Derecha valor h multilaboratorio

4.2.3 Consistencia estadística de la variable "Energía de fractura"

En la Figura 5 se muestran los gráficos para los valores de consistencia estadística k y h de la variable "energía de fractura" de las tres mezclas evaluadas.

Para el valor k se puede observar que el laboratorio siete obtuvo un valor mayor al valor crítico para la mezcla 1, el resto de los laboratorios mostró resultados menores al valor crítico para las tres mezclas. Para el valor de consistencia h se puede observar que los laboratorios del uno al seis tuvieron valores muy cercanos a cero o con dispersión hacia el lado positivo para las tres mezclas evaluadas, en todos los casos con valores menores al valor crítico y únicamente el laboratorio siete tuvo una dispersión hacia el lado negativo con valores que superan el valor crítico en las tres mezclas. Esto indica que el laboratorio siete midió valores muy inferiores con respecto a la media de todos los laboratorios para la variable de energía de fractura en las tres mezclas evaluadas.

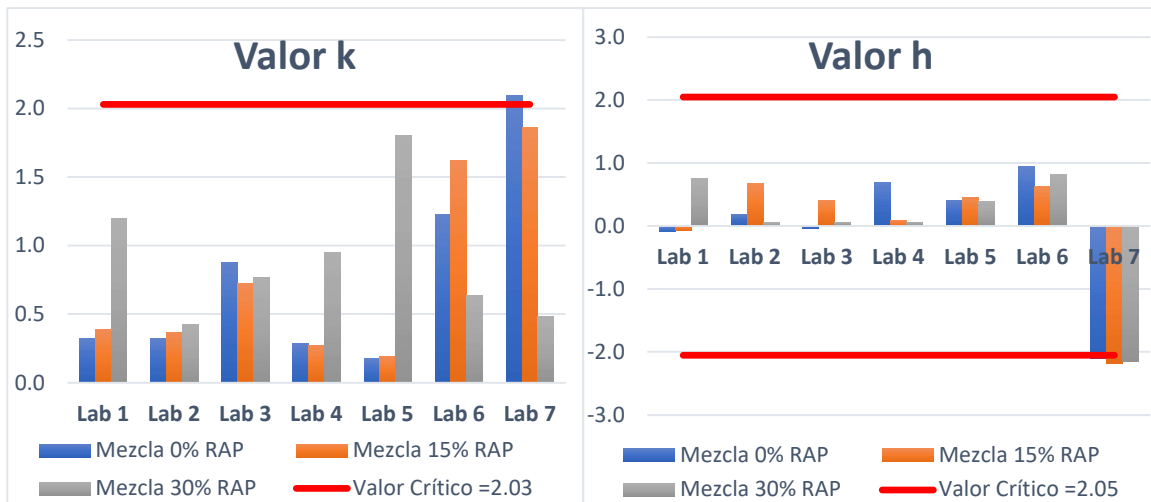


Figura 5. Consistencia estadística de energía de fractura. Izquierda valor k interlaboratorio. Derecha valor h multilaboratorio

4.2.4 Consistencia estadística de la variable "Index-CT"

Para el valor de Index-CT, en la Figura 6 del lado izquierdo se pueden observar los valores de repetibilidad por laboratorio para cada una de las mezclas, donde se observa que el único valor superior al valor crítico fue alcanzado por el laboratorio seis para la evaluación de la mezcla dos con 15% de RAP. El resto de los laboratorios mostraron valores de repetibilidad consistentes para las tres mezclas evaluadas. En la misma imagen del lado derecho se muestra la gráfica de consistencia estadística de reproducibilidad, donde el laboratorio siete mostró valores dispersos mayores al valor crítico para la mezcla 3. Al igual que para el análisis de consistencia h de la energía de fractura, el laboratorio siete mostró valores negativos indicando que sus valores medidos son menores a la media de todos los laboratorios.

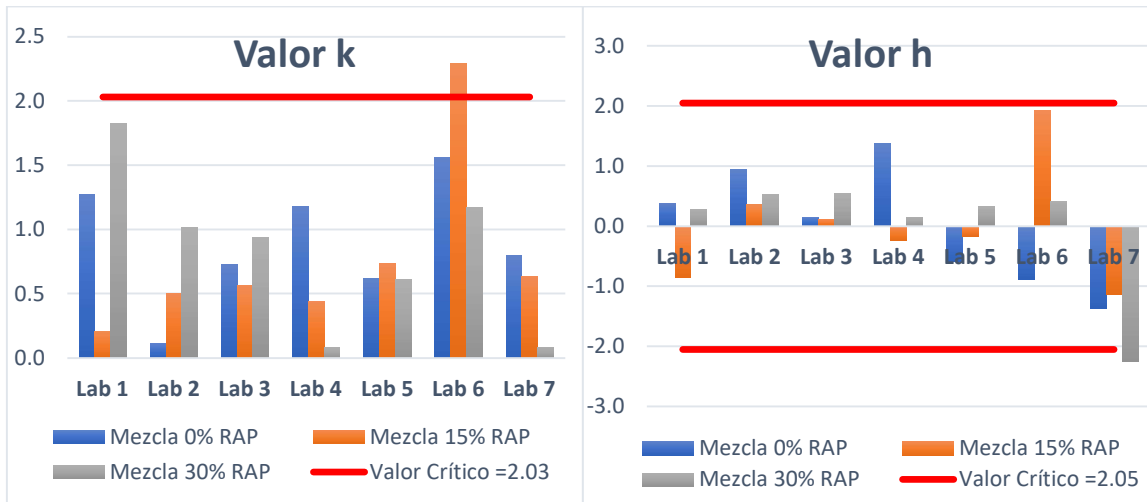


Figura 6. Consistencia estadística de Index-CT. Izquierda valor k interlaboratorio. Derecha valor h multilaboratorio

4.3 Eliminación de datos inconsistentes

De acuerdo con los análisis de inconsistencia de datos realizado en el apartado anterior para cada una de las mezclas y variables analizadas, se determinaron los datos puntuales con baja repetibilidad y los grupos de datos con baja reproducibilidad.

Como se puede observar en la Figura 3, Figura 4, Figura 5 y Figura 6 dos laboratorios mostraron inconsistencia para algunos resultados y estos fueron el laboratorio seis y el laboratorio siete. Siendo para el laboratorio seis únicamente inconsistencia del valor k, es decir baja repetibilidad con un dato puntual para la variable y mezcla en la que se obtuvo un valor mayor al crítico y para el laboratorio siete se obtuvieron mayormente inconsistencias para el valor h para varias de las mezclas y variables analizadas, indicando una diferencia considerable de medición con respecto al promedio del grupo de laboratorios.

Para la eliminación de los datos inconsistentes mencionados, del laboratorio seis se eliminaron los datos puntuales de cada grupo en el que se presentó un valor k mayor al crítico, y para el laboratorio siete se tomó la decisión de eliminarlo del estudio ya que presentó irregularidades en varias de las variables y para las tres mezclas evaluadas.

Una vez eliminados los datos inconsistentes, se recalcularon las estadísticas presentadas en la Tabla 5 para los laboratorios uno al seis, dando como resultado valores de k y h de todos los laboratorios, para todas las variables analizadas y para las tres mezclas evaluadas menores al valor crítico.

4.4 Repetibilidad y Reproducibilidad

Una vez que se ha determinado que el grupo de datos es consistente, se procedió a calcular los límites de repetibilidad y reproducibilidad, usando las estadísticas de S_r y S_R corregidas y de acuerdo con la ecuación 3 y ecuación 4 se calculó la repetibilidad y reproducibilidad respectivamente.

$$r = 2.8(S_r) \quad (3)$$

$$R = 2.8(SR) \quad (4)$$

Donde: r es la repetibilidad obtenida del estudio, Sr es la desviación estándar de la repetibilidad, R es la reproducibilidad obtenida del método y SR es la desviación estándar de la reproducibilidad

4.4.1 Repetibilidad y Reproducibilidad de la carga pico.

En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos para la declaración de precisión para la variable de la carga pico del método de prueba analizado.

En la Figura 7 presentan los valores de repetibilidad y Reproducibilidad con respecto al promedio para cada una de las mezclas evaluadas. Los puntos solidos en color azul representan los valores de r y los cuadros rojos representan los valores de R.

Para la mezcla 1 se obtuvo un valor de r de 1.92 y de R de 2.79 que representa un 18.08% y 26.28% con respecto a la media. Para la mezcla 2 se obtuvieron valores de r de 14.05% y R de 14.05% con respecto a la media y para la mezcla 3 se obtuvieron valores de r de 16.77 y R de 23.60 con respecto a la media. De acuerdo con estos resultados la mezcla 2 fue la que presentó valores de r y R más bajos para la variable de carga pico.

Tabla 6. Estadísticas de precisión para la carga pico.

Mezcla	\bar{x}	Sr	SR	r	R
1	10.623	0.6858	0.9972	1.92	2.79
2	12.827	0.6434	0.6434	1.80	1.80
3	12.340	0.7392	1.0401	2.07	2.91

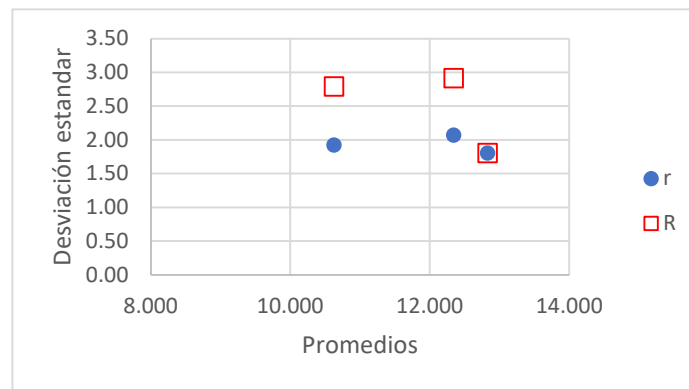


Figura 7. Desviación estándar de repetibilidad y reproducibilidad de carga pico

4.4.2 Repetibilidad y Reproducibilidad de la pendiente post pico

En la Tabla 7 y la Figura 8 se muestran los límites de precisión de repetibilidad y reproducibilidad para la variable de pendiente post-pico de las tres mezclas analizadas en este estudio interlaboratorio.

Para la mezcla 1, se obtuvo una media de 1562.27 N/mm y un valor de r de 459.98 y R de 831.08 N/mm, representando un 29.45% y un 53.20% con respecto a la media. Para la mezcla 2 y mezcla 3 los valores promedio fueron muy similares siendo de 2666.76 y 2664.61 N/mm respectivamente, con valores de r de 983.58 y 982.23 y R de 1013.93 y 1309.14 que en porcentaje respecto a su media son 36.88% y 38.02% para r y 36.86 y 49.13% para R respectivamente.

Tabla 7. Estadísticas de precisión para la pendiente post-pico

Mezcla	\bar{X}	Sr	SR	r	R
1	1562.139	164.2784	296.8141	459.98	831.08
2	2666.761	351.2803	362.1163	983.58	1013.93
3	2664.611	350.7953	467.5492	982.23	1309.14

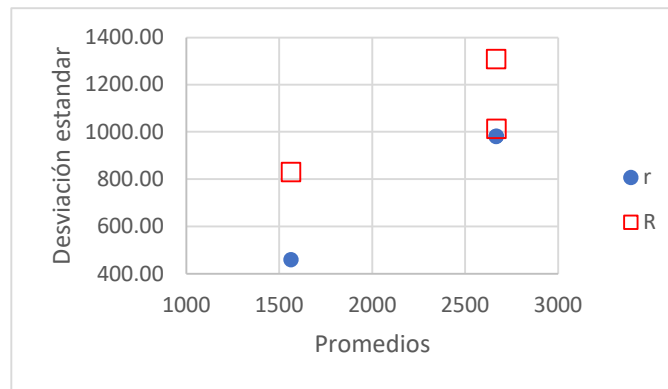


Figura 8. Desviación estándar de repetibilidad y reproducibilidad de pendiente post-pico.

4.4.3 Repetibilidad y Reproducibilidad de la energía de fractura

La energía de fractura promedio más alta fue obtenida por la mezcla 1 con 0% de RAP con un valor de 8278.48 J/m² seguida de la mezcla 2 con 7750.82 J/m² y finalmente de la mezcla 3 con 7238.12 J/m². Tabla 8.

Los valores de r en porcentaje con respecto a la media para cada una de las mezclas evaluadas estuvieron en el rango de 17.27% a 22.88% siendo el valor más bajo el que corresponde a la mezcla 2 y el más alto a la mezcla 3. Y para R estuvieron en el rango de 17.61% a 24.96% siendo de igual manera el más bajo para la mezcla 2 y el más alto para la mezcla 3. Los valores de r y R de la energía de fractura se muestran en la Figura 9.

Tabla 8. Estadísticas de precisión para la energía de fractura.

Mezcla	\bar{X}	Sr	SR	r	R
1	8278.485	602.1387	692.6825	1685.99	1939.51
2	7750.821	478.0382	487.5208	1338.51	1365.06
3	7238.124	591.4827	645.2968	1656.15	1806.83

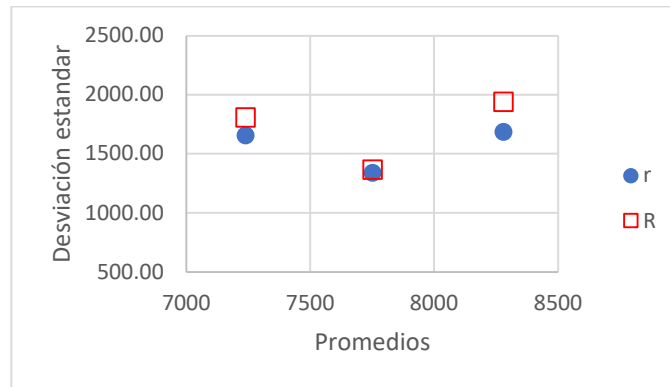


Figura 9. Desviación estándar de repetibilidad y reproducibilidad de energía de fractura.

4.4.4 Repetibilidad y Reproducibilidad del Index-CT.

Finalmente, los resultados para la declaración de precisión del método de IDEAL-CT se presentan en la Tabla 9 y Figura 10, donde se muestran los valores de la media de todos los laboratorios para el valor de Index-CT, así como los valores de las estadísticas Sr y SR calculadas y finalmente los valores de r y R.

Como se observa en la Figura 10, la mezcla que presentó la mayor desviación estándar de r y R fue la mezcla 1 con un valor de r de 102.18 y de R de 113.07. Las mezclas 2 y 3 obtuvieron valores similares de r, igual a 39.98 y 36.57 y R de 42.72 y 36.57 respectivamente. Sin embargo, en porcentaje con respecto al valor de la media los valores de r y R para las tres mezclas fueron similares estando en el rango de 42.11% a 45.4% para r y de 42.47% a 50.24% para R.

Tabla 9. Estadísticas de precisión para el Index-CT

Mezcla	\bar{x}	Sr	SR	r	R
1	225.053	36.4931	40.3823	102.18	113.07
2	94.947	14.2783	15.2562	39.98	42.72
3	86.107	13.0598	13.0598	36.57	36.57

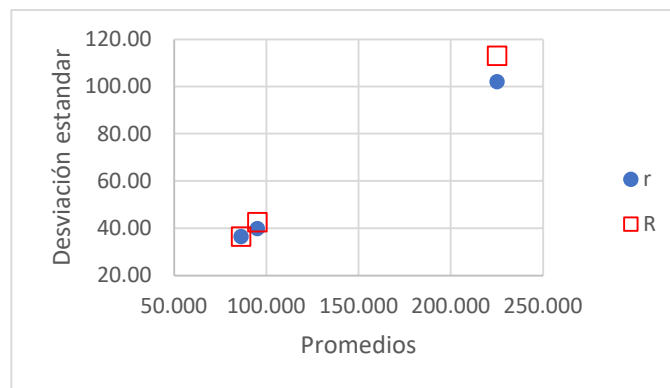


Figura 10. Desviación estándar de repetibilidad y reproducibilidad de Index-CT



5 Conclusiones

- Se logró realizar con éxito el estudio interlaboratorio con la participación de siete laboratorios y la evaluación de tres mezclas asfálticas diferentes.
- El método de prueba IDEAL-CT fue capaz de identificar la mezcla con materiales 100% vírgenes de las mezclas con adición de RAP.
- El método de cálculo de estadísticas h y k descrito en la norma ASTM E691-20 y utilizado en este estudio, resultó efectivo para la determinación de la consistencia de datos, eliminación de datos inconsistentes y determinación de los límites de variación r y R.
- Se determinó que los laboratorios del uno al seis obtuvieron datos consistentes y válidos para el estudio.
- El laboratorio siete obtuvo resultados inconsistentes en varias de las mezclas evaluadas y variables analizadas por lo que sus resultados se eliminaron del estudio para la declaración de precisión.
- Los límites obtenidos r y R varían considerablemente de acuerdo con el orden de magnitud de cada una de las variables analizadas.
- De las variables carga pico, pendiente post-pico y energía de fractura que integran el resultado de Index-CT, La pendiente post-pico fue la que mostró los valores con mayor dispersión con r en el rango de 29.45% a 36.88% con respecto a la media para las tres mezclas evaluadas y R en el rango de 38.02% a 53.20% con respecto a la media.
- En Index-CT la mezcla 1 fue la que presentó la mayor desviación estándar debido al orden de magnitud de los valores de Index-CT, sin embargo en porcentaje con respecto al promedio se obtuvieron valores similares en las tres mezclas evaluadas, en el rango de 42.11% a 45.4% para r y de 42.47% a 50.24% para R
- Los valores de r y R presentados en este estudio aplican únicamente para las condiciones y las mezclas evaluadas en este trabajo y no se pueden tomar como una declaración de precisión definitiva.
- El IDEAL-CT es una prueba que actualmente se propone únicamente para utilizarse como control de calidad y no para el diseño de mezclas balanceadas, ya que falta experiencia de evaluación y comportamiento de mezclas asfálticas con diferentes contenidos y fuentes de RAP, diferentes aditivos, diferentes grados de desempeño del asfalto y otras adiciones a la mezcla.

6 Trabajos futuros

Este trabajo es el inicio para establecer la declaración de precisión del método IDEAL-CT, sin embargo, es necesario la evaluación de más tipos de mezclas asfálticas y la repetición de este estudio interlaboratorio a través de los años para poder establecer un valor de r y R aceptables.

Se planea integrar el método de prueba de IDEAL-CT en el programa de evaluación y acreditación de laboratorios IMT-AMAAC para los laboratorios que estén interesados y así obtener datos anualmente que ayuden a establecer una declaración válida de precisión del método en México.

7 Referencias

- [1] Zhou, F, S. Im, L. Sun, & T. Scullion. (2017). Development of an IDEAL cracking test for asphalt mix design and QC/QA. Road Materials and Pavement Design, 18(Sup 4), 405-427. DOI:10.1080/14680629.2017.1389082
- [2] Newcomb, D. (2021). Test Methods to Quantify Cracking Resistance of Asphalt Binders and Mixtures. Research project final report 2021-02. Texas A & M Transportation Institute.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.



XII CONSEJO DIRECTIVO
AMAAC
LA FUERZA DE LA UNIÓN

[3] ASTM E691(2020). Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method.

[4] ASTM D8225 (2019). Standar Test Mhetod for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature.