

Aplicación del concepto de diseño balanceado a mezclas templadas con emulsión asfáltica. Una apuesta a la sostenibilidad de pavimentos

Fernando Martínez

fermar@fceia.unr.edu.ar

Luis Zorzutti

zorzutti@fceia.unr.edu.ar

Sebastián Andreoni

andreo26@fceia.unr.edu.ar

Marina Cauhape Casaux

mccasaux@fceia.unr.edu.ar

Silvia Angelone

isangelon@fceia.unr.edu.ar

Las Mezclas Templadas son mezclas asfálticas elaboradas por debajo de la temperatura de evaporación del agua donde el ligante empleado es una emulsión asfáltica. Al trabajar a temperaturas más bajas, los agregados pétreos no son secados por completo y se produce entonces un importante ahorro de energía. Son mezclas sostenibles que presentan notables ventajas medioambientales y energéticas con propiedades mecánicas que pueden asimilarse a las mezclas en caliente. Por otra parte, recientemente se ha propuesto un enfoque conceptual denominado Diseño Balanceado de Mezclas Asfálticas que incluye ensayos de desempeño a probetas debidamente acondicionadas y que simulen múltiples deterioros, el envejecimiento de la mezcla, el tráfico, el clima y demás condiciones de servicio del pavimento. La meta es obtener la combinación y proporciones adecuadas del ligante asfáltico, agregados pétreos y demás componentes de manera de obtener resultados favorables en los ensayos de desempeño relacionados con al agrietamiento y la deformación permanente. Este trabajo presenta la aplicación de este marco conceptual adaptado a las Mezclas Templadas con Emulsión mediante el empleo de técnicas de preparación de especímenes y un conjunto de ensayos de laboratorio que posibiliten valorar su desempeño frente a las acciones del tránsito y el clima.

Palabras Clave: Mezclas templadas - Diseño Balanceado de mezclas – Emulsión bituminosa – Desempeño mecánico.

Half Warm Mixtures are asphalt mixtures prepared at a temperature below the evaporation temperature of water where the binder is an asphalt emulsion. Working at lower temperatures, the aggregates are not completely dried and significant energy savings are produced. They are sustainable mixtures that present notable environmental and energy advantages with mechanical properties that can be assimilated to hot mixes. On the other hand, a conceptual approach called Balanced Mix Design has recently been proposed. It includes performance tests carried on properly conditioned specimens that simulate multiple deteriorations, the aging of the mixture, traffic, climate and other service conditions of the pavement. The goal is to obtain the appropriate combination and proportions of asphalt binder, stone aggregates and other components in order to obtain favorable results in performance tests related to cracking and permanent deformation. This work presents the application of this conceptual framework adapted to Half Warm Mixtures with Emulsion through the use of specimen preparation techniques and a set of laboratory tests that make it possible to assess their performance against the actions of traffic and climate.

Keywords: Half Warm Mixtures - Balanced Mix Design - Asphalt Emulsion - Mechanical Performance.

Aplicación del concepto de diseño balanceado a mezclas templadas con emulsión asfáltica. Una apuesta a la sostenibilidad de pavimentos

1. INTRODUCCIÓN

Los requerimientos de sustentabilidad en la construcción, mantenimiento y rehabilitación de caminos se vinculan a reutilizar materiales, reducir la generación de residuos, minimizar el empleo de materiales vírgenes, reducir las demandas energéticas, moderar las emisiones de gases de efecto invernadero y extender la vida útil de las carreteras con un objetivo de mayor durabilidad de las mismas.

De una manera general, las mezclas asfálticas pueden ser clasificadas según su fabricación y colocación en dos grandes tipos: las mezclas asfálticas en caliente (MAC) y las mezclas asfálticas en frío (MAF).

En las primeras (MAC) se emplean cementos asfálticos que se calientan a elevadas temperaturas, superiores a los 150 °C de manera de reducir su consistencia y ser mezclados con los agregados pétreos para ser luego colocados en la carretera. Es el tipo de material empleado mayoritariamente en la construcción y mantenimiento de las carreteras en todo el mundo dado su excelente desempeño estructural. Sin embargo su producción demanda elevados consumos energéticos para alcanzar las altas temperaturas requeridas para su fabricación lo que conlleva además, emisiones de componentes volátiles de los ligantes asfálticos que son perjudiciales para la salud y el medio ambiente.

Las segundas (MAF) se fabrican y aplican a temperatura ambiente por lo que no requieren ni calentamiento de los agregados pétreos ni del ligante asfáltico. Con el empleo de ligantes asfálticos con viscosidad reducida tales como las emulsiones asfálticas, estas mezclas demandan bajos consumos de energía y muy limitadas emisiones de sustancias perjudiciales con una óptima huella ambiental. Sin embargo su desempeño estructural es menos eficiente cuando se las compara con las mezclas en caliente, especialmente a corto y medio plazo.

Una alternativa más reciente corresponde a la generación de mezclas asfálticas elaboradas por debajo de la temperatura de evaporación del agua denominadas "Mezclas Templadas con Emulsión (MTE)" (Half-warm asphalt mixtures en inglés o Enrobes semi-tiedes en francés) en donde el ligante es una emulsión asfáltica. En las MTE la mezcla de áridos con la emulsión bituminosa se

produce a una temperatura de fabricación por debajo de los 100 °C de manera de obtener condiciones de puesta en obra y prestaciones adecuadas para el uso previsto en función del tipo de tránsito y el clima. Las mismas han tenido un desarrollo significativo en España y Portugal, donde se utilizaron para capas de base y rodamiento. Si bien no existen normas de diseño de estas mezclas a nivel internacional, tres referencias importantes son las recomendaciones de la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía [1], la monografía de la Asociación Técnica de la Emulsión Bituminosa [2] y las normas para el dimensionamiento de firmes de carreteras del País Vasco [3].

En trabajos anteriores se han analizado las propiedades viscoelásticas de estas Mezclas Templadas con Emulsión [4] así como las propiedades mecánicas de MTE con la incorporación de RAP. [5]. Autelitano et al. [6] han llevado a cabo un estudio experimental para determinar la trabajabilidad y las propiedades mecánicas de diferentes MTE respecto a la influencia de tres variables de diseño de la mezcla tales como la temperatura de compactación, el contenido de ligante y la granulometría de los agregados.

En lo que respecta a las mezclas asfálticas en caliente se ha propuesto más recientemente un enfoque metodológico de análisis de su desempeño mecánico y estructural denominado de una manera genérica como Diseño Balanceado de Mezclas (DBM).

El mismo es definido por la Administración Federal de Carreteras de los EE.UU (FHWA por su designación en inglés) como el "diseño de mezclas asfálticas utilizando ensayos de desempeño con probetas debidamente acondicionadas que consideren distintos modos de deterioro teniendo en cuenta el envejecimiento de la mezcla, el tránsito, el clima y la posición dentro de la estructura del pavimento".

Básicamente, consiste en diseñar una mezcla asfáltica para una aplicación prevista y un requisito de servicio. Más allá del procedimiento Marshall de diseño de mezclas asfálticas mundialmente utilizado con la prueba de Estabilidad-Fluencia, este enfoque metodológico pretende la valoración mecanicista del desempeño de la mezcla mediante ensayos que determinen la respuesta real de tensiones y deformaciones para dadas condicio-

nes de tiempo de carga y temperatura de manera que sus resultados se puedan vincular con un modelo de respuesta estructural para predecir el desempeño real de la capa asfáltica.

El mayor desarrollo de este enfoque metodológico ocurre en los Estados Unidos de Norteamérica aunque similares aproximaciones al diseño de mezclas con un rasgo mecanicista también se encuentran en otros países tales como Francia [7], México [8] o Australia [9].

El nombre de balanceado responde a que el proceso de diseño pretende ajustar los distintos parámetros de formulación de manera que satisfagan simultáneamente adecuados desempeños frente a los dos modos más frecuentes de deterioro de los pavimentos asfálticos: el agrietamiento por fatiga y la acumulación de deformaciones permanentes (ahuellamiento).

Por ejemplo, si se considera el contenido de ligante asfáltico como un parámetro de diseño de la mezcla asfáltica, en lo que respecta al desempeño por fatiga es posible establecer un límite aceptable para este deterioro y en consecuencia un contenido mínimo de ligante que satisfaga este criterio como se muestra en el diagrama conceptual del Diseño Balanceado de Mezclas de la Figura 1. Mayores contenidos de ligante que ese mínimo suponen mejores desempeños a fatiga de la mezcla asfáltica. De igual manera es posible establecer un límite aceptable para el deterioro debido al ahuellamiento asumiendo que mezclas más ricas de ligante son más propensas a acumular deformaciones permanentes y en consecuencia, establecer un contenido máximo de ligante que satisfaga este criterio.

Resulta entonces un rango del contenido de ligante en el que se satisfacen de manera "balanceada" ambos deterioros y que puede ajustarse con otro criterio complementario como la verificación de la durabilidad de la mezcla debida a la acción deteriorante del agua.

Son numerosas las referencias a la aplicación de este enfoque metodológico a mezclas en caliente [10, 11, 12, 13, 14] pero son escasas las referencias al caso de mezclas elaboradas a bajas temperaturas.

Saidi et al. [15] presentan un procedimiento para diseñar mezclas recicladas en frío in-situ con asfalto espumado o emulsión asfáltica según el criterio del diseño balanceado equilibrando el deterioro por agrietamiento y

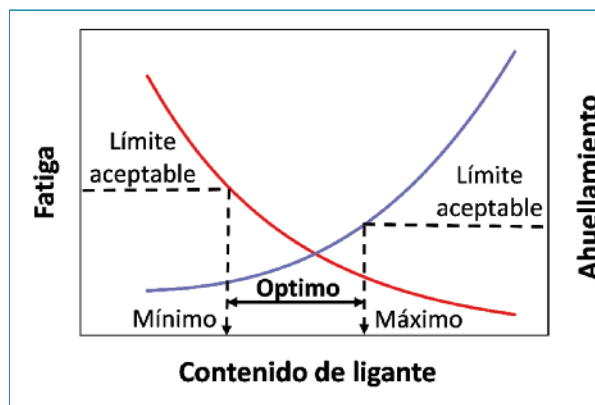


Figura 1. Esquema conceptual Diseño Balanceado de Mezclas (DBM)

acumulación de deformaciones permanentes. Yousefi et al. [16] han aplicado un enfoque de diseño balanceado de mezclas para investigar el efecto de agentes de reciclaje sobre las propiedades de una mezcla tibia con diferentes porcentajes de RAP. En otro trabajo, Saidi et al. [17] han analizado el impacto por el uso de un agente de reciclado, el nivel de compactación y la temperatura de curado en el desempeño de ahuellamiento y agrietamiento de mezclas recicladas en frío con emulsión desarrolladas utilizando el enfoque del diseño balanceado de mezclas. Dong y Charmot [18] han llevado a cabo un estudio para establecer y evaluar ensayos de resistencia al agrietamiento y ahuellamiento que puedan incluirse en el diseño balanceado de mezclas recicladas en frío con emulsión.

Este trabajo presenta la aplicación del marco conceptual del Diseño Balanceado de Mezclas (DBM) adaptado a las Mezclas Templadas con Emulsión mediante el empleo de técnicas de preparación de especímenes y un conjunto de ensayos de laboratorio que posibiliten valorar su desempeño y compararlo con el de una mezcla asfáltica en caliente de características convencionales.

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS

2.1 Mezclas asfálticas consideradas

Este estudio comprende la evaluación de una mezcla templada con emulsión (MTE) elaborada sobre la base de una mezcla asfáltica en caliente (MAC) del tipo concreto asfáltico que fuera diseñado de acuerdo al pro-

Aplicación del concepto de diseño balanceado a mezclas templadas con emulsión asfáltica. Una apuesta a la sostenibilidad de pavimentos

cedimiento Marshall y las especificaciones del Pliego de Especificaciones Técnicas Generales para Concretos Asfálticos en Caliente y Semicaliente del Tipo Densos de la Dirección de Vialidad de Argentina [19]. Se trata de una mezcla densa del tipo CAC-D-12 que satisface también los límites granulométricos de una mezcla AC16D para capa de rodadura elaborada con agregados graníticos y cuya composición granulométrica se muestra en la Figura 2.

La Mezcla Templada con Emulsión (MTE) fue concebida a partir de un simple reemplazo del porcentaje del ligante asfáltico CA30 de la MAC por su equivalente en porcentaje del ligante asfáltico residual de la emulsión sin ninguna otra alteración de la fórmula. La emulsión utilizada es una emulsión catiónica convencional de curado rápido del tipo CRR-1 de la Norma IRAM 6691 de Argentina cuyas principales características se muestran en la Tabla 1.

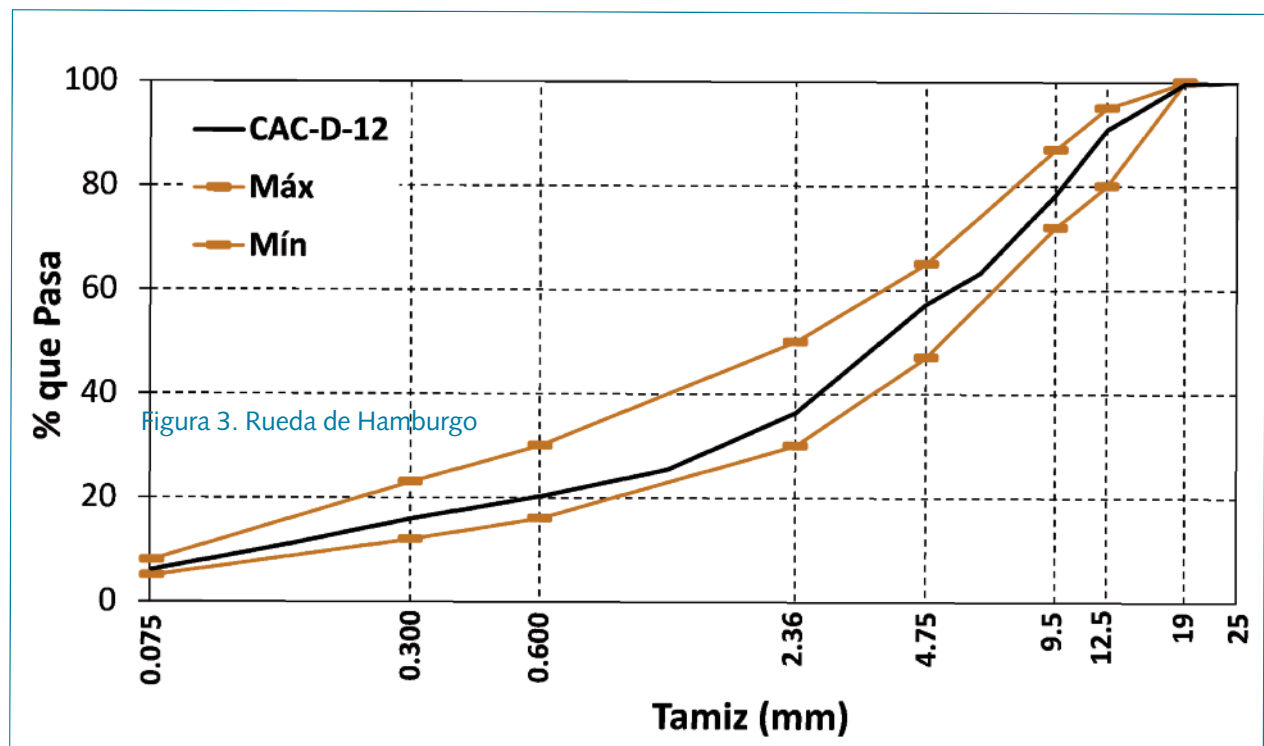


Figura 2. Granulometría de las mezclas

El ligante asfáltico empleado para esta mezcla es del tipo convencional de designación CA30 según la Norma IRAM-IAPG A 6835:2002 de Argentina. Se ha adicionado un 1% de cal hidratada como filler activo reconociendo las ventajas de su incorporación al mejorar las propiedades mecánicas, viscoelásticas y de durabilidad de las mezclas asfálticas [20].

Para la MAC, el mezclado de agregados y ligante se realizó con un mezclador mecánico; luego la mezcla suelta fue distribuida en una bandeja plana y colocada en un horno a la temperatura de compactación durante 30 minutos.

En el caso de la MTE los agregados fueron calentados a una temperatura entre los 95 y 100°C y la emul-

Tabla 1. Características de la emulsión utilizada

Ensayo	Resultado
Sobre la emulsión	
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C	33 SSF
Residuo asfáltico por destilación	64.8%
Residuo sobre tamiz IRAM 850 μm	0.01%
Sobre el residuo asfáltico	
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s)	98 1/10 mm

sión a 60°C para producir el mezclado de estos materiales. Concluido el mismo, la mezcla suelta se colocó en un horno a la temperatura entre 80 y 90°C durante 30 minutos de manera de simular la temperatura y el tiempo en que la mezcla preparada es transportada y colocada en condiciones reales.

En ambos casos, la compactación se realizó mediante un compactador giratorio ajustado para obtener probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 150 mm de altura. Posteriormente cada cilindro fue cortado con un disco diamantado a la mitad de manera de obtener probetas del mismo diámetro pero con espesores comprendidos entre los 60 y 63 mm como se muestra en la Figura 3. Las propiedades volumétricas promedio de estas mezclas se presentan en la Tabla 2.

Previamente a otros ensayos se verificó la durabilidad de ambas mezclas respecto a la acción del agua mediante el ensayo de Resistencia Conservada a la tracción indirecta a 25 °C (Rc25). En este ensayo se compara la resistencia a la tracción indirecta remanente de un par de probetas inmersas en agua durante 24 horas a la temperatura de 60°C respecto a otro par sin inmersión. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3. Ambas mezclas satisfacen el criterio especificado en Argentina con un valor Rc25 superior al 80%.



Figura 3. Probetas elaboradas de ambas mezclas asfálticas



Tabla 2. Propiedades volumétricas promedio de las mezclas

Mezcla	Da (g/cm ³)	Dtm (g/cm ³)	Va (%)	Vb (%)	VAM (%)	RBV (%)
MAC	2.505	2.631	4.8	12.0	16.8	71.5
MTE	2.487	2.618	5.0	11.9	17.0	70.5

Da: Densidad aparente; Dtm: Densidad teórica máxima; Va: Contenido de vacíos; Vb: Contenido volumétrico de ligante; VAM: Vacíos del agregado mineral; RBV: Relación betún-vacíos

Tabla 3. Resistencia Conservada a 25°C

Mezcla	Rt _{seco} (kPa)	Rt _{húmedo} (kPa)	Rc ₂₅
MAC	661.5	671.2	101%
MTE	404.0	387.1	96%

2.2 Procedimientos de evaluación del desempeño

A los efectos de evaluar comparativamente el desempeño estructural de estas mezclas se han seleccionado ensayos para los que se ha postulado su capacidad para discriminar el comportamiento respecto a la resistencia al agrietamiento a temperaturas intermedias y a la acumulación de deformaciones permanentes a alta temperatura. Los mismos son los ensayos IDEAL-CT, IDEAL-RT y RTI-HT, cuyas principales características se describen a continuación.

2.3 Ensayo IDEAL-CT para el desempeño frente al agrietamiento

El ensayo IDEAL-CT [21] es similar al ensayo de resistencia a la tracción indirecta tradicional y se realiza a la temperatura ambiente (25°C) con muestras cilíndricas a una velocidad de carga de 50 mm/min. La mayor ventaja de esta configuración es que el ensayo no requiere ninguna instrumentación, corte, pegado, perforación o entalladura de la probeta. Es un ensayo expeditivo que se completa en menos de 1 minuto y requiere una capacitación mínima del personal que lo realiza.

La Figura 4 muestra una curva típica de evolución de la carga aplicada (P) y el desplazamiento vertical (I). A

Aplicación del concepto de diseño balanceado a mezclas templadas con emulsión asfáltica. Una apuesta a la sostenibilidad de pavimentos

partir de la misma es posible definir un parámetro de desempeño relacionado al agrietamiento (CT_{index}) inspirado en la conocida ley de Paris de la mecánica de fracturas como:

$$CT_{index} = \frac{t}{62} \cdot \frac{G_f}{|m_{75}|} \cdot \left(\frac{l_{75}}{D} \right)$$

donde t : espesor de la probeta (mm); D : diámetro de la probeta (mm); G_f : Energía de fractura (J/m²); m_{75} : valor absoluto de la pendiente de la curva alrededor del 75% de la carga máxima en el tramo posterior a la carga máxima; l_{75} : desplazamiento al 75% de la carga máxima después del pico.

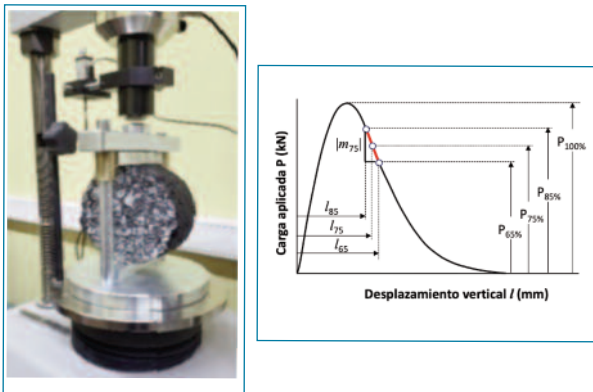


Figura 4: (a) Dispositivo de ensayo; (b) Curva típica P-l del ensayo IDEAL-CT

La energía de fractura G_f se calcula como:

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

con W_f : trabajo de fractura calculado como el área bajo la curva P-l (J). La pendiente de la curva alrededor del 75% de la carga máxima en el tramo post-pico se calcula como:

$$|m_{75}| = \left| \frac{(P_{85} - P_{65})}{(l_{85} - l_{65})} \right|$$

con P_{85} , P_{65} , l_{85} y l_{65} como se indican en la Figura 4.

Generalmente, cuanto mayor sea G_f , mejor será la resistencia al agrietamiento. Cuanto más rígida sea la mezcla, más rápido crecerá el agrietamiento y más rápida será la reducción de la carga con un mayor valor de $|m_{75}|$ y, en consecuencia, peor será la resistencia al agrie-

tamiento.

Además cuanto mayor sea l_{75} , más dúctil será la mezcla con mayor tolerancia a la deformación y resistencia al agrietamiento. Entonces cuanto mayor sea el CT_{index} , mejor será la resistencia al agrietamiento de la mezcla tal como ha sido validado con varias experiencias de laboratorio y de campo [22]. El procedimiento ha sido normalizado como ASTM 8225-19, "Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature". Zhou et al. [23] sugieren un valor CT_{index} mayor a 90 para una buena resistencia al agrietamiento de la mezcla asfáltica en tanto que otras referencias indican valores mínimos entre 80 y 110 [24, 25].

2.4 Ensayo IDEAL-RT para el desempeño frente al ahuellamiento

El IDEAL-RT es un ensayo de carga monótona que ha sido desarrollado recientemente para valorar la resistencia al corte de mezclas asfálticas que utiliza un dispositivo de carga similar al del ensayo de tracción indirecta por compresión diametral salvo que el cabezal inferior es reemplazado por un apoyo en forma de U como se muestra en la Figura 5. El ensayo se realiza a la temperatura de 50°C y la carga se aplica a una velocidad constante de desplazamiento axial de 50 mm/min en el plano diametral de manera de obtener una curva típica carga-desplazamiento.

La configuración de los cabezales de carga induce en la probeta un estado de tensiones de corte que difiere del estado de tensiones que se desarrolla en el ensayo de tracción indirecta convencional (RTI) como se muestra en la Figura 6(a) para una simulación mediante un modelo de Elementos Finitos.

La Figura 6(b) muestra la notable diferencia del patrón de fisuración al final del ensayo para el IDEAL-RT comparado con el RTI.

Se calcula el parámetro RT_{index} para evaluar el desempeño de la mezcla frente a la falla por ahuellamiento como:

$$RT_{index} = 0.0665 \cdot \tau$$

con τ : tensión de corte (KPa).

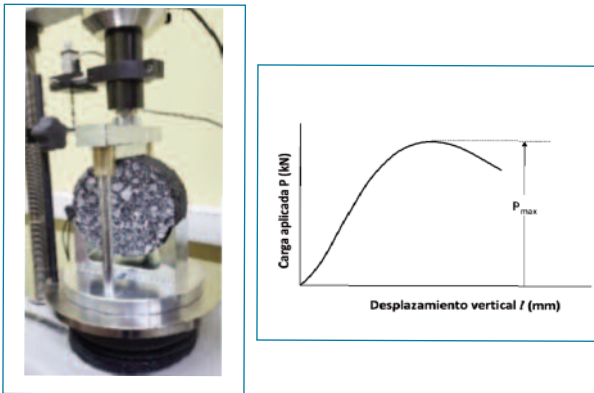


Figura 5. (a) Dispositivo de ensayo; (b) Curva típica P-I del ensayo IDEAL-RT

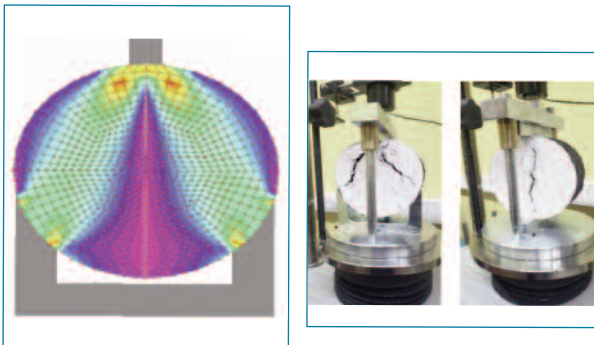


Figura 6. (a) Simulación tensiones de corte; (b) Patrones de agrietamiento comparados

La tensión de corte τ se calcula como:

$$\tau = 0.356 \cdot \frac{P_{max}}{t \cdot w}$$

donde P_{max} : carga máxima (kN); t: espesor de la probeta (m); w: ancho del cabezal superior de carga (0.0191 m).

Un RT_{index} más alto representa una mayor tensión de corte y consecuentemente, una mejor resistencia al ahuellamiento. El ensayo se encuentra normalizado por ASTM como D8360-22 - Standard Test Method for Determination of Rutting Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Ideal Rutting Test.

Vamsikrishna y Singh [26] correlacionando resultados del ensayo de Hamburgo e IDEAL-RT proponen una resistencia al corte τ mayor a 1000 kPa ($RT_{index} \geq 66$) pa-

ra una buena resistencia al ahuellamiento de la mezcla asfáltica. En igual sentido, Zhou et al. [23] proponen un valor mínimo de la resistencia al corte τ igual a 980 kPa ($RT_{index} \geq 65$) en tanto que Boz et al. [27] proponen un valor de τ mayor a 850 kPa ($RT_{index} \geq 55$).

2.5 Ensayo RTI-HT para el desempeño frente al ahuellamiento

El ensayo RTI-HT es un ensayo convencional de tracción indirecta por compresión diametral realizado a la temperatura de 50°C mientras la carga se aplica a una velocidad constante de desplazamiento axial de 50 mm/min en el plano diametral de manera de obtener una curva típica carga-desplazamiento como se muestra en la Figura 7.

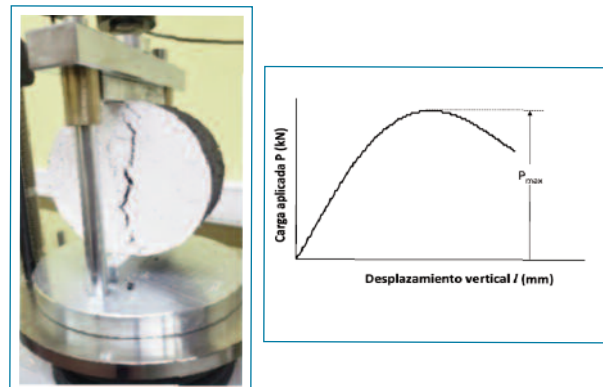


Figura 7. (a) Dispositivo de ensayo; (b) Curva típica P-I del ensayo RTI-HT

Christensen y Bonaquist [28] han mostrado que existe una muy buena correlación entre la tensión máxima del ensayo y la velocidad de crecimiento del ahuellamiento medido en distintos tramos de prueba. Otras referencias han corroborado esta correlación entre resultados de laboratorio y el desempeño de mezclas respecto al ahuellamiento [26, 29, 30].

La Resistencia a la Tracción Indirecta a alta temperatura (RTI-HT) se calcula como:

$$RTI-HT = \frac{2 \cdot P_{max}}{\pi \cdot D \cdot t}$$

Aplicación del concepto de diseño balanceado a mezclas templadas con emulsión asfáltica. Una apuesta a la sostenibilidad de pavimentos

con P_{max} : carga máxima (kN); t: espesor de la probeta (m); D: diámetro de la probeta (m).

El Departamento de Transporte de Alabama (ADOT) considera un valor mínimo de RTI-HT igual a 137 kPa para mezclas con un satisfactorio desempeño frente al ahuellamiento [25]. Vamsikrishna y Singh [26] comparando resultados del ensayo de Hamburgo y la Resistencia a la Tracción Indirecta a alta temperatura han propuesto un valor umbral crítico de RTI-HT de 135 kPa para la aprobación/rechazo de las mezclas asfálticas.

3. DIAGRAMAS ESPACIALES DE DESEMPEÑO

Los Diagramas Espaciales de Desempeño (DED) son un método simple para evaluar simultáneamente el desempeño de mezclas asfálticas frente al agrietamiento y el ahuellamiento. Los mismos son construidos a partir de los resultados de ensayos de desempeño y con adecuados límites propuestos, permiten discernir en áreas diferenciadas sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas respecto a esos modos de deterioro [31, 32].

La Figura 8(a) muestra un ejemplo de DED donde en el eje vertical se ha representado el desempeño respecto al agrietamiento mediante el CT_{index} y en el eje horizontal el desempeño respecto al ahuellamiento con el RT_{index} ; la Figura 8(b) muestra una representación similar pero el desempeño al ahuellamiento se ha valorado mediante el parámetro RTI-HT.

En ellos quedan definidos cuatro cuadrantes donde el de arriba a la derecha corresponde a un satisfactorio desempeño tanto al agrietamiento como al ahuellamiento. El de abajo a la izquierda por el contrario, corresponde a un desempeño al agrietamiento y al ahuellamiento no satisfactorio. Los restantes cuadrantes definen desempeños aceptables para un modo de deterioro pero no satisfactorio para el restante. Para el caso particular de una mezcla asfáltica, los resultados obtenidos en los ensayos de desempeño pueden ser ubicados en los DED y tener una valoración expeditiva de su comportamiento para ser aplicado al diseño de mezclas, el control de calidad o el estudio de la influencia de distintos parámetros de formulación (uso de asfaltos modificados, agregados no convencionales, RAP o aditivos).

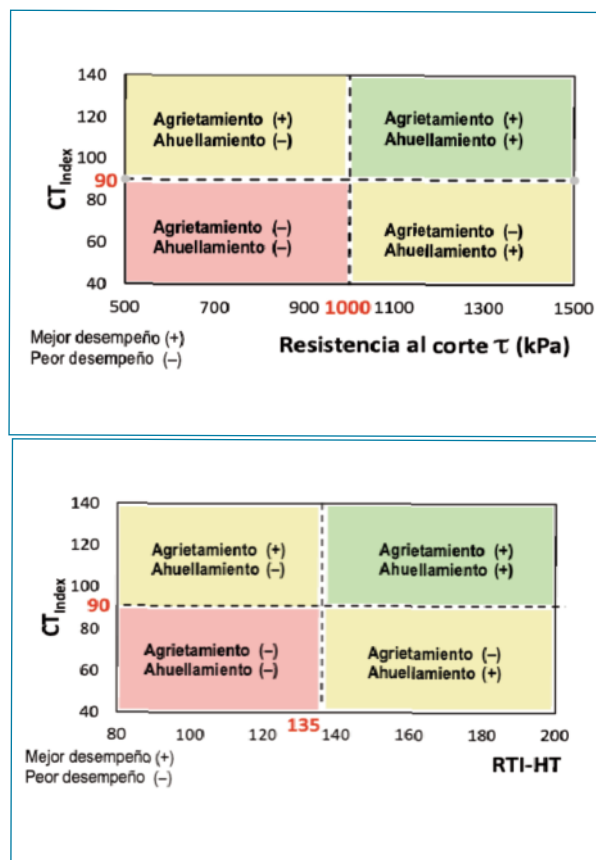


Figura 8. Diagramas Espaciales de Desempeño

4. RESULTADOS OBTENIDOS

4.1 Resultados de desempeño respecto al agrietamiento (CT_{index})

Los resultados obtenidos mediante el ensayo IDEAL-CT para valorar el desempeño respecto al agrietamiento de la mezcla templada con emulsión (MTE) y la mezcla en caliente (MAC) se presentan en la Figura 9.

4.2 Resultados de desempeño respecto al ahuellamiento (RT_{index} y RTI-HT)

Los resultados obtenidos mediante el ensayo IDEAL-RT para valorar el desempeño respecto al ahuellamiento de ambas mezclas asfálticas se presenta en la Figura 10(a) en tanto que los resultados del ensayo RTI-HT se muestran en la Figura 10(b).

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La mezcla MTE presenta un mejor desempeño respecto al agrietamiento que la MAC ya que si bien tiene una menor carga máxima P_{max} y menor Energía de Fractura G_f , es una mezcla más dúctil con una menor pendiente de la curva alrededor del 75% de la carga máxima l_{m75} y un mayor desplazamiento al 75% de la carga máxima después del pico l_{75} .

Considerando el parámetro referido al agrietamiento CT_{Index} de ambas mezclas, la MAC presenta un desempeño de aproximadamente el 37% respecto al mismo índice de la MTE. Para el desempeño comparado respecto al ahuellamiento, la situación es inversa por cuanto la MAC posee mayores valores de la tensión de corte τ y del parámetro RT_{Index} que la MTE.

La situación es similar si se considera el criterio de la Resistencia a la Tracción Indirecta a alta temperatura RTI_{HT} ; simplificada, el desempeño de la MTE está entre el 62 al 67% del desempeño de la MAC. Esta diferencia puede justificarse parcialmente en la diferencia de viscosidad del ligante usado para la MAC respecto al ligante residual de la MTE.

De manera conjunta, estos resultados se han representado en los Diagramas Espaciales de Desempeño que se muestran en la Figura 11 en donde se han conservado los valores críticos aceptables, propuestos en apartados previos. Se observa que ninguna de las dos mezclas se sitúa en el cuadrante superior derecho que correspondería a un desempeño óptimo respecto tanto al agrietamiento como al ahuellamiento. De acuerdo con la propuesta metodológica del Diseño Balanceado de Mezclas en una etapa de diseño de las mismas, correspondería evaluar modificaciones en su formulación cambiando alguno de los materiales componentes, la composición granulométrica o el tipo de ligante con el objeto de optimizar el desempeño de estas mezclas respecto a su respuesta al agrietamiento y el ahuellamiento.

6. CONCLUSIONES

Este trabajo ha analizado la aplicación del marco conceptual del Diseño Balanceado de Mezclas (DBM) adaptado a las Mezclas Templadas con Emulsión (MTE) para valorar su desempeño frente al agrietamiento y la acumulación de deformaciones permanentes de manera

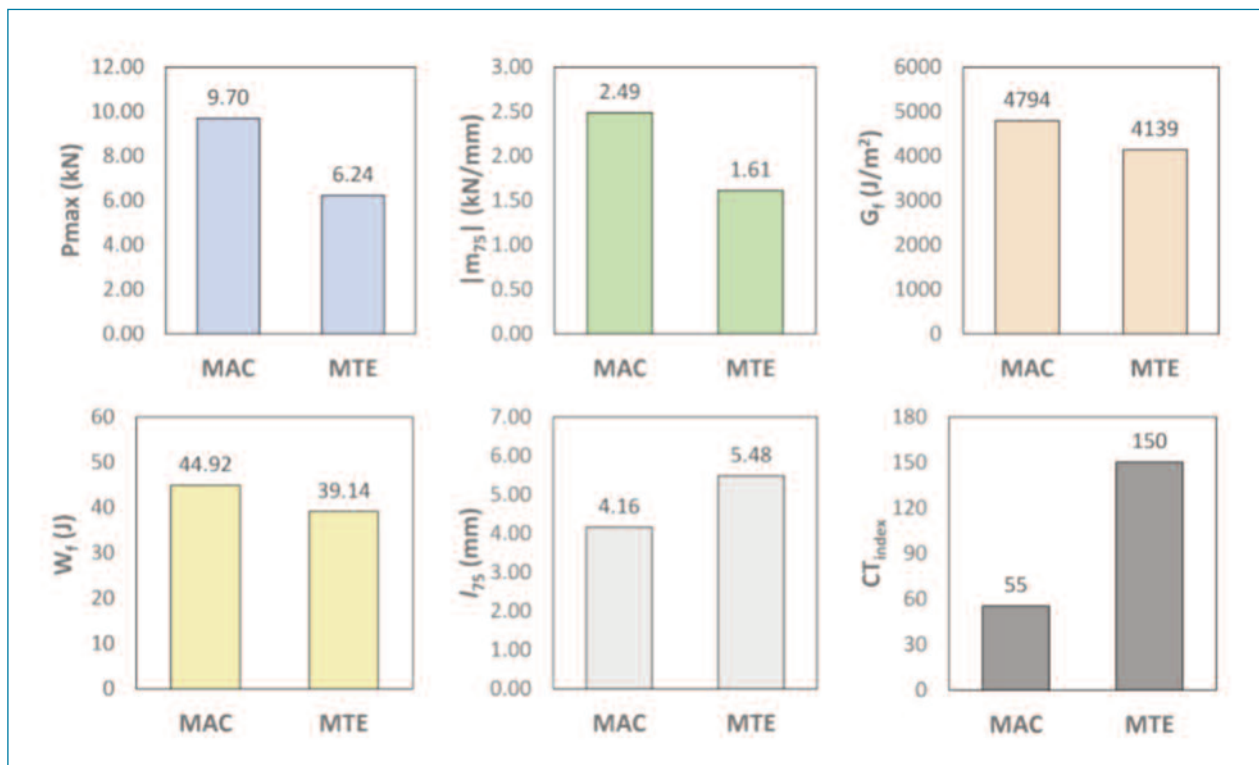


Figura 9. Resultados del ensayo IDEAL-CT

Aplicación del concepto de diseño balanceado a mezclas templadas con emulsión asfáltica. Una apuesta a la sostenibilidad de pavimentos

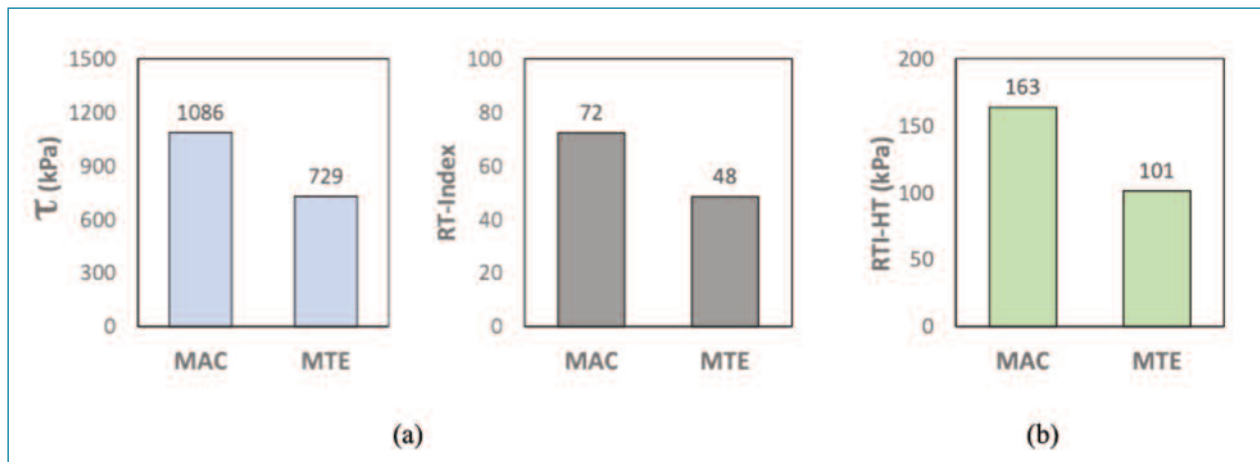


Figura 10. Resultados de los ensayos IDEAL-RT y RTI-HT

comparativa con una mezcla asfáltica en caliente (MAC) de características convencionales.

La MAC es una mezcla densa del tipo CAC-D-12 que satisface las especificaciones argentinas para Concretos Asfálticos en Caliente y Semicaliente. La MTE ha sido producida a partir de un simple reemplazo del ligante asfáltico de la MAC por su equivalente en ligante asfáltico residual de la emulsión sin ninguna otra alteración de la fórmula pero adaptando los procesos de mezclado y compactación al uso de la emulsión sin que se superen los 100°C de temperatura en ninguna etapa.

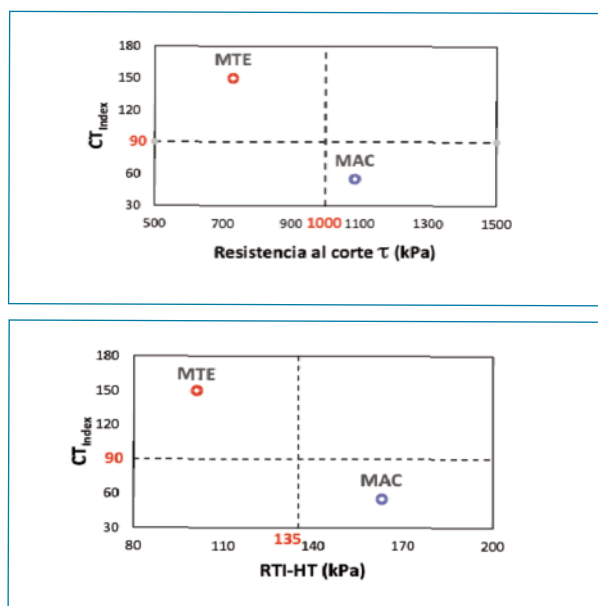


Figura 11. Diagramas Espaciales de Desempeño de ambas mezclas

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía. (2012). Recomendaciones para la redacción de pliegos de especificaciones técnicas para el uso de mezclas bituminosas a bajas temperaturas.
- [2] Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas (ATEB). (2014). Mezclas templadas con emulsión bituminosa. Monografía.
- [3] Administración de la Comunidad Autónoma del País Vasco. (2022). Norma para el dimensionamiento de firmes de la red de carreteras del País Vasco
- [4] Martínez, F., C. Casaux, M., Zorzutti, L. y Angelone, S. (2019). Determinación de las propiedades visco-elásticas de una mezcla templada con emulsión asfáltica. XX Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Guadalajara (México).
- [5] Martínez, F., Cauhapé Casaux, M., Andreoni, S., Zorzutti, L. y Angelone, S. (2022). Caracterización del comportamiento de mezclas templadas con emulsión y RAP. XXI Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Punta del Este (Uruguay).
- [6] Autelitano, F. Garilli, E. and Giuliani, F. (2021). Half-warm mix asphalt with emulsion. An experimental study on workability and mechanical performances. 14th International scientific conference on sustainable, modern and safe transport. Transportation Research Procedia 55, 1081–1089.
- [7] Brosseaud, Y. (2012). La formulación francesa de misturas asfálticas y con las otras metódicas en Eu-

- ropa. Seminario Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente en los Inicios del Siglo XXI, La Visión Europea. XVI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito.
- [8] Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. (AMAAC). (2013). Protocolo AMAAC PA-MA-01/2013: Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño, Ciudad de México.
- [9] Austroads (2018). National performance-based asphalt specification framework. ISBN 978-1-925671-26-1, Austroads Project No. APT1953.
- [10] Zhou, F., Hu, S. and Newcomb, D. (2020). Development of a performance-related framework for production quality control with ideal cracking and rutting tests. *Construction and Building Materials* 261, 120549.
- [11] Yin, F., Taylor, A. J. and Tran, N. (2020). Performance testing for quality control and acceptance of balanced mix design. NCAT Report 20-02. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, Alabama.
- [12] Zhou, F., Steger, R. and Mogawer, W. (2021). Development of a coherent framework for balanced mix design and production quality control and quality acceptance. *Construction and Building Materials* 287, 123020.
- [13] Li, N., Hao, P., Yao, Y. and Zhang, C. (2023). The implementation of balanced mix design in asphalt materials: A review. *Construction and Building Materials* 402, 132919.
- [14] Nsengiyumva, G., Kim, Y. and Hu, J. (2020). Feasibility and implementation of Balanced Mix Design in Nebraska. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Nebraska-Lincoln.
- [15] Saidi, A., Ali, A., Lein, W. and Mehta, Y. (2029). A balanced mix design method for selecting the optimum binder content of cold in-place recycling asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, Volume 2673, Issue 3.
- [16] Yousefi, A. A., Haghshenas, H. F., Underwood, B. S., Harvey, J. and Blankenship, P. (2023). Performance of warm asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement, an anti-stripping agent, and recycling agents: A study using a balanced mix design approach. *Construction and Building Materials*, volume 363, 129633.
- [17] Saidi, A., Ali, A., Mehta, Y., Cox, B. C., Lein, W. and Xie, Z. (2019). Performance evaluation for cold in-place recycling with different binders, curing processes and compaction levels. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*, Volume 88.
- [18] Dong, W. and Charmot, S. (2018). Proposed tests for cold recycling balanced mixture design with measured impact of varying emulsion and cement contents. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2): 04018387.
- [19] Dirección Nacional de Vialidad de Argentina. Pliego de especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos en caliente y semicaliente del tipo densos. Edición 2017. (https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/petg_1.pdf)
- [20] Angelone, S., Cauhapé Casaux, M., Zorzutti, L. M. y Martínez, F. (2022). La influencia de las adiciones activas en las propiedades reológicas de las mezclas asfálticas templadas con emulsión bituminosa. *Revista Carreteras*. Año LXVI - Número 247. Ed. Asociación Argentina de Carreteras.
- [21] Zhou, F., Ima, S., Sunb, L. and Scullion, T. (2017). Development of an IDEAL cracking test for asphalt mix design and QC/QA. *Road Materials and Pavement Design*. DOI: 10.1080/14680629.2017.1389082.
- [22] Zhou, F., Im, S., Sun, L. and Scullion, T. (2017). Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mixture Design, Quality Control and Quality Assurance. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, Newport Beach, California.
- [23] Zhou, F., Hu, S. and Newcomb, D. (2020). Development of a performance-related framework for production quality control with ideal cracking and rutting tests. *Construction and Building Materials* 261, 120549.
- [24] Cross, S. A., and Li, J. (2019). Implement balanced asphalt mix design in Oklahoma. (No. FHWA-OK-19-01). Oklahoma. Department of Transportation.
- [25] Yin, F. and West, R. (2021). Balanced mix de-

Aplicación del concepto de diseño balanceado a mezclas templadas con emulsión asfáltica. Una apuesta a la sostenibilidad de pavimentos

sign resource guide. National Center for Asphalt Technology, IS-143.

- [26] Vamsikrishna, G. and Singh, D. (2023) Comparison of Rutting Resistance of Plant Produced Asphalt Mixes Using Hamburg Wheel Tracker and Surrogate Simple Performance Tests: IDEAL-RT and HT-IDT. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Volume 35, Issue 12.
- [27] Boz, I., Coffey, G. P., Habbouche, J., Diefenderfer, S. D. and Ozbulut, O. E. (2022). A critical review of monotonic loading tests to evaluate rutting potential of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials* 335, 127484.
- [28] Christensen, D., and Bonaquist, R. (2007). Using the Indirect Tensile Test to Evaluate Rut Resistance in Developing Hot-Mix Asphalt Designs. *Transportation Research Circular Number E-C124*, Transportation Research Board, National Academies, Washington, D.C., p. 62 – 77.
- [29] Zieliński, P, 2022. Indirect tensile test as a simple method for rut resistance evaluation of asphalt mixtures–Polish experience. *Road Materials and Pavement Design*, 23 (1), 112–128.
- [30] Wen, H. and Bhusal, S. (2013). A laboratory study to predict the rutting and fatigue behavior of asphalt concrete using the indirect tensile test. *Journal of Testing and Evaluation*, 41 (2), 299–304.
- [31] Buttlar, W. G., Hill, B. C., Wang, H. and Mogawer, W. (2017). Performance space diagram for the evaluation of high- and low-temperature asphalt mixture performance. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 18, N. S1, 336–358.
- [32] Jahangiri, B., Majidifard, H., Meister, J. and Buttlar, W. (2019). Performance Evaluation of Asphalt Mixtures with Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Asphalt Shingles in Missouri. *Transportation Research Record*. Volume 2673, Issue 2.