

ADITIVO A BASE DE RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS PARA LA CONFORMACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS ALMACENABLES

Emiliano Dottori¹, Leonardo M. Pérez Maturano², Oscar Moreno³,
Oscar Víctor Cordo⁴, Marcelo Gastón Bustos⁵

¹ Dirección Nacional de Vialidad, 13°Distrito Chubut, edottori@vialidad.gob.ar

² Dirección Nacional de Vialidad, 13°Distrito Chubut, lperezmaturano@vialidad.gob.ar

³ LABIEVI, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, morenoxt55@gmail.com

⁴ EICAM, Universidad Nacional de San Juan, oscordo@eicam.unsj.edu.ar

⁵ EICAM, Universidad Nacional de San Juan, mbustos@eicam.unsj.edu.ar

Resumen

Economía, Ingeniería y Medio Ambiente son ámbitos que, afortunadamente, hoy en día avanzan de la mano hacia una sociedad autosostenible. Los proyectos de ingeniería vial no escapan de ello y representan uno de los sectores con mayor impacto. En tal sentido, la industria vial se ve sometida a un constante proceso de innovación en lo que refiere a la incorporación de desechos urbanos e industriales en las mezclas asfálticas. En virtud de ello, se plantea en la presente investigación, una eficaz alternativa para la utilización de polietileno reciclado en mezclas asfálticas acopiadas para su posterior aplicación en frío. Por consiguiente, se fabricaron una serie de Blends a base de residuos poliméricos que, añadidos a una mezcla asfáltica emulsionada, otorgan una excelente trabajabilidad, incluso bajo extensos períodos de almacenamiento a la intemperie. Se analizó el efecto que acusa la incorporación de este material recuperado en las propiedades físico-mecánicas de la composición y el porcentaje óptimo de adición a fin de lograr las mejores prestaciones. Se concluye en un desempeño comparable, e incluso superior en ciertos aspectos, al de mezclas del mismo tipo y destino comercialmente difundidas en el mercado, pero con un beneficio ambiental, social y económico.

Palabras Clave: Mezcla asfáltica, almacenable, asfalto frío, baches, residuos plásticos.

1 Introducción

Atendiendo el desfasaje existente entre la cimentación de nuevas carreteras y la clara necesidad de mejorarlas, las tareas de mantenimiento cobran un rol crucial al requerirse mezclas, de fácil elaboración, eficientes, y de rápida colocación.

Las mezclas almacenables persiguen tal fin, al permitir ser acopiadas por un período de tiempo prolongado y ser utilizadas posteriormente a temperatura ambiente, aumentando sustancialmente los rendimientos del proceso y evitando un impacto negativo en el tránsito de vehículos en una carretera. Estas mezclas se destacan por su sencillo almacenamiento y transporte, si se las compara con las aquellas de aplicación en caliente, donde se deben asegurar constantemente temperaturas mínimas y máximas de trabajo sumado a otros requerimientos de manipulación y compactación con el fin de evitar propiedades indeseadas.

Sin embargo, debido a vulnerabilidad de las emulsiones de proveer suficiente cohesión y adherencia entre los agregados, bajo condiciones climáticas adversas, es común que se produzca el rápido deterioro de las reparaciones ejecutadas con mezclas almacenables. Incentivando el uso desmedido de las mismas por la implementación de productos de mala calidad, dosificaciones erróneas, por desconocimiento del mecanismo de trabajo de las emulsiones o bien por una serie de falencias del proceso constructivo. Ello deja en evidencia la necesidad buscar alternativas que mitiguen estos errores y aumenten el desempeño de las mezclas asfálticas en frío con capacidad de almacenamiento.

La investigación propone mejorar ciertas cualidades de las mezclas asfálticas almacenables a partir de la incorporación de polietileno reciclado y optimizar el desempeño de las mezclas emulsionadas. Con esto se busca mitigar el impacto negativo de los plásticos en el medio ambiente y encontrar un destino final para los mismos, asegurando un buen desempeño dentro de una mezcla asfáltica.

A su vez, se busca reemplazar productos altamente contaminantes como ser los elementos hidrocarbonados o diluyentes, utilizados en las mezclas acopiabiles, con el fin de evitar el corte prematuro de la misma y permitir su almacenabilidad.

2 Diseño de mezclas asfálticas almacenables

No existe un método globalmente difundido para el diseño de mezclas asfálticas almacenables. Por lo que dicha tarea resulta un gran desafío, al requerirse propiedades completamente opuestas durante el almacenamiento y manipuleo de la mezcla en contraste a las propiedades requeridas una vez compactada la misma. Si se busca conseguir una buena trabajabilidad, una mezcla de gradación abierta es deseable para favorecer las condiciones de operación, sin embargo, una gradación densa es sumamente requerida para mejorar la durabilidad de la misma. Paralelamente se recomienda evitar áridos angulosos que dificulten la colocación, pero a su vez esta cualidad es sumamente importante para obtener buenas estabilidades. Por otra parte, es deseable una baja viscosidad de la emulsión para favorecer la acopiabilidad y trabajabilidad de la mezcla, pero al mismo tiempo, altas viscosidades son requeridas para obtener una mejor cohesión de la composición.

3 Elaboración de las mezclas

El proceso de dosificación adoptado para el diseño de las mezclas se llevó a cabo en 4 etapas consecutivas: se inició por la caracterización de los agregados constitutivos, seguido de la selección del tipo y porcentaje óptimo ligante y, por último, la incorporación de aditivos.

A continuación, se desarrollan cada una de dichas instancias:

3.1 Caracterización de los agregados

Se utilizó material 100% triturado, confeccionando una mezcla de áridos en función de los límites granulométricos detallados en la Tabla 1, definidos a partir de las recomendaciones del Departamento de Transporte de Texas y la Administración Federal de Carreteras [1].

Tabla 1. Límites granulométricos de mezclas almacenables para bacheo

Tamiz N°	Pasa (%)
3/8 (9,5 mm)	95-100
# 4 (4,75 mm)	40-85
# 8 (2,38 mm)	15-40
# 16 (1,19 mm)	6-25
# 200 (0,075 mm)	1-6

En la Figura 1 se puede observar la curva granulométrica de la mezcla resultante, la que se encuadra dentro de los límites antes citados.

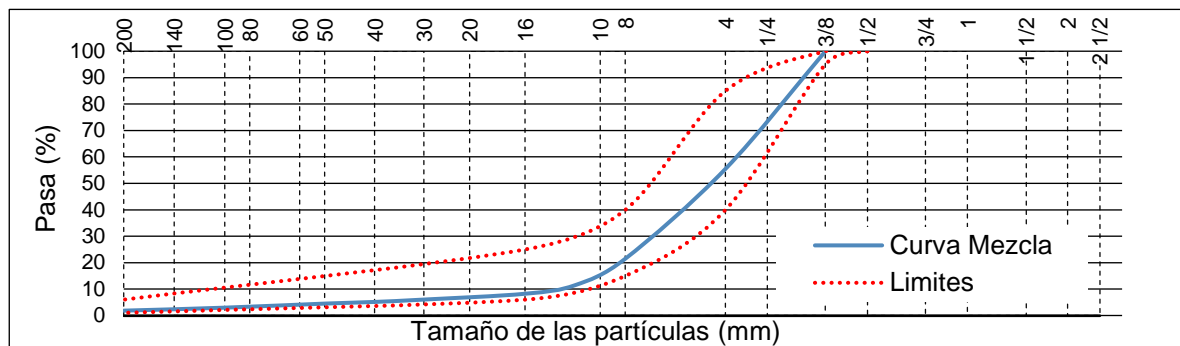


Figura 1. Curva granulométrica de la mezcla de agregados

3.2 Selección y determinación del porcentaje óptimo de ligante

Se optó en este caso, por el uso de una emulsión asfáltica a modo de ligante bituminoso. Las emulsiones asfálticas son amigables con el medio ambiente en comparación a los diluidos, no emanan vapor de solventes, son versátiles en el uso de agregados pétreos, además que se pueden almacenar y aplicar sin mayor costo energético. La emulsión escogida es de tipo Catiónica Superestable, por presentar un mayor tiempo de rotura y permitir mantener buenas condiciones de trabajabilidad. Para la determinación del contenido de emulsión tentativo, y por ende de asfalto residual, se contemplaron dos métodos ampliamente difundidos para mezclas en frío. Uno es el propuesto por el Instituto del Asfalto y otro, el formulado por el Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVIAS).

3.2.1 Método del Instituto del Asfalto

La metodología del Instituto del Asfalto propone la siguiente fórmula para hallar el porcentaje de cemento asfáltico respecto al peso de la mezcla:

$$P = (0,035 * a + 0,045 * b + k * c + K) \quad (1)$$

donde P es el porcentaje de cemento asfáltico respecto al peso de la mezcla, "a" el porcentaje de agregado retenido en el tamiz N.º 10, "b" el porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N.º 10 y se retiene en el tamiz N.º 200, "c" el porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N.º 200, "K" y "k" parámetros que dependen del grado de absorción de los agregados y contenido pasante sobre el tamiz N.º 200.

3.2.2 Método del Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVIAS)

En este caso, se inicia calculando el valor de la superficie específica de los agregados (Σ) como se indica a continuación:

$$\Sigma = \left(\frac{1}{100}\right) * (0,17 * A + 0,33 * B + 2,3 * C + 12 * D + 135 * F) \quad (2)$$

donde Σ es la superficie específica de los materiales en m²/kg, A el porcentaje de agregado que se retiene en el tamiz $\frac{3}{4}$, B el porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz $\frac{3}{4}$ y se retiene en el tamiz N° 4, C el porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N.º 4 y se retiene en el tamiz N° 40, D el porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N.º 40 y se retiene en el tamiz N° 200, F el porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N.º 200. Con dicho valor, se procede al cálculo del contenido de cemento asfáltico:

$$\%L = k\sqrt[5]{\Sigma} \quad (3)$$

donde %L es el porcentaje en peso de cemento asfáltico, “k” el módulo de riqueza y Σ la superficie específica de los materiales definida con anterioridad.

Elaborados los cálculos pertinentes, el método del Instituto del Asfalto arroja un valor de 5,81% de cemento asfáltico, mientras que el de INVIAS un 6,02%. Promediando ambos resultados, se concluye en un contenido óptimo de residuo asfáltico correspondiente a 6%, o el equivalente a 10% de emulsión 60/100.

3.3 Incorporación de aditivos

Siguiendo los lineamientos planteados en esta investigación, se persiguió reemplazar los diluyentes comúnmente utilizados en la fabricación de las mezclas almacenables, por otros de naturaleza menos contaminante. Para ello, en base a la revisión bibliográfica y a partir del estudio de la química de los asfaltos, se propusieron una serie de materiales que fueran capaces de sustituir tales diluyentes, pero con la premisa de que fueran tanto económica como medioambientalmente rentables.

3.3.1 Proceso de elaboración del aditivo

Se realizó una ardua búsqueda de materiales que fueran capaces de dotar a una mezcla de agregados y emulsión asfáltica, de propiedades competentes para ser almacenada a la intemperie durante un tiempo prolongado, pero sin perder la trabajabilidad hasta tanto la misma no sea colocada y compactada.

En este sentido, y a partir de una iniciativa personal, se fabricaron una serie de Blends a base de plástico recuperado y otros componentes, cuya implementación resultó ser de suma eficacia. Obteniendo una buena compatibilidad tanto con los áridos como con la emulsión asfáltica, y dotando a la mezcla de agregados y emulsión de características deseadas para ser almacenada a la intemperie y utilizada posteriormente en tareas de reparación como las labores de bacheos.

En el proceso de fabricación del Blend, se ensayaron tres tipos de plástico:

Escamas de Polietileno de baja densidad.

Escamas de Polietileno de alta densidad.

Pellets de Polietileno de alta densidad.

Tanto las escamas de polietileno de baja densidad como las de alta densidad, fueron descartadas en esta instancia por exhibir rasgos de incompatibilidad, bajo grado de uniformidad y escasa miscibilidad con los demás elementos del Blend.

En cambio, el Blend realizado con Pellets de Polietileno de alta densidad, si presentó uniformidad y aspecto compatible con una mezcla homogénea. Su elaboración requirió menos tiempo de mezclado, en comparación a los otros plásticos, y su granulometría favoreció la total incorporación del material.

Una vez seleccionado el polímero adecuado, se fabricaron 4 variantes de este Blend, con diferentes concentraciones de plástico:

BLEND 00: 0 % Plástico

BLEND 10: 10 % Plástico

BLEND 20: 20 % Plástico

BLEND 50: 50 % Plástico

A medida que se incrementaron las cantidades de plástico, se obtenía un producto final con mayor consistencia. Como puede verse en la Figura 2 (Izquierda), el Blend realizado con 10 % de pellets alcanzó una consistencia final pastosa, mientras que el elaborado con un 50% de plástico (Derecha), acabó con una consistencia mucho mayor. Concentraciones superiores de plástico (mayores al 60%) generaron un producto final muy rígido, y con material polimérico sin disolver. Por lo cual, se limitó el valor de la concentración a 50%.



Figura 2. Consistencia del blend final, izquierda: blend elaborado con 10% plástico, derecha: blend elaborado con 50% plástico

Elaborado el aditivo que dotará a las mezclas de las propiedades esperadas, se definieron sus límites de adición en base a pruebas empíricas de concentración. Para ello, se realizaron numerosos pastones de prueba con la mezcla de áridos y el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica calculado en el apartado anterior. Luego, se les añadió una cierta cantidad de los Blends y se los dejó reposar por 72hs. Transcurrido el tiempo de reposo, se observó en líneas generales, la excelente capacidad del Blend formulado para mantener una destacada trabajabilidad de las mezclas incluso luego de estar expuestas a la intemperie por varios días.

En base a los resultados obtenidos, se opta como parámetro de diseño un contenido máximo de plástico en mezcla de 2% (referido al peso del árido seco). Con dicho valor fue posible la obtención de mezclas con óptima trabajabilidad, aptas para el acopio y de aspecto similar a las mezclas comerciales. Contenidos superiores no mostraron un buen desempeño, al presentarse poco trabajables.

3.4 Mezclas finales

Definida la granulometría de la mezcla, calculado el contenido óptimo de emulsión y determinado el porcentaje máximo de plástico, se procedió a la elaboración de las mezclas finales.

Se ejecutaron en total 100kg de mezcla, particionado en 4 fracciones de 25 kg cada una. El procedimiento de elaboración fue el siguiente:

Primeramente, se realizó la mezcla de áridos en estado seco respetando los límites granulométricos definidos en la sección 3.1.

Luego se le añadió el porcentaje de emulsión calculado en el apartado 3.2 y se lo llevó al mixer durante 5 minutos a velocidad baja.

Posteriormente se incorporó el Blend distribuido en mixer durante 2 minutos más.

Finalmente se dejó reposar las mezclas a la intemperie durante 24hs y luego almacenadas en recipientes herméticos como se indica en la Figura 3.



Figura 3. Mezclas elaboradas y especímenes de prueba una vez compactados

A modo de identificar fácilmente los cuatro tipos mezclas, de aquí en adelante se las denominará con las siguientes siglas: QBxx. Siendo QB el abreviado de “QuicklyBach” y los números que lo acompañan, la concentración de plástico del Blend utilizado. En la Tabla 2 se detalla la composición final de las muestras elaboradas.

Tabla 2. Composición de las mezclas finales

MEZCLA	QB00	QB10	QB20	QB50
Tipo de Blend	Blend 00	Blend 10	Blend 20	Blend 50
Concentración de plástico (%/Blend)	0%	10%	20%	50%
Áridos (kg)	22,1	22,1	22,1	22,1
Emulsión (kg)	2,5	2,5	2,5	2,5
Blend (g)	490,2	543,5	609,8	961,5
Mezcla total (kg)	25,0	25,0	25,0	25,0
Plástico total en mezcla (%/Áridos)	0,0%	0,2%	0,5%	2,0%
Demás componentes del Blend (%/Áridos)	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%

4 Evaluación de propiedades físicas de las mezclas

4.1 Preparación de especímenes y curado

Para la confección de las probetas, se implementó el Compactador Giratorio Superpave®. Cada uno de los especímenes fue elaborado con 1000g de mezcla y compactado a temperatura ambiente controlada (entre 15°C a 20°C) hasta alcanzar el objetivo de 100 giros (Valor equivalente a 75 golpes en el compactador Marshall).

Todas las muestras, una vez retiradas del molde de compactación, permanecieron a temperatura ambiente durante 3 días previo a ser ensayadas. A excepción de las realizadas con la mezcla QB00 (0% de plástico), que permanecieron las 72hs dentro de un molde Marshall a modo de contención lateral, debido a la falta de cohesión en la mezcla.

4.2 Densidad relativa y porcentaje de vacíos

Este procedimiento, se realizó en base a los lineamientos de las normas VN-E27-84 “Determinación del Peso Específico y Absorción de asfalto de agregados pétreos para mezclas asfálticas en caliente” y la AASHTO T312-09 “Método estándar para la preparación y determinación de la densidad en mezclas asfálticas en caliente” En la figura 5, se expresa la variación de los mismos.

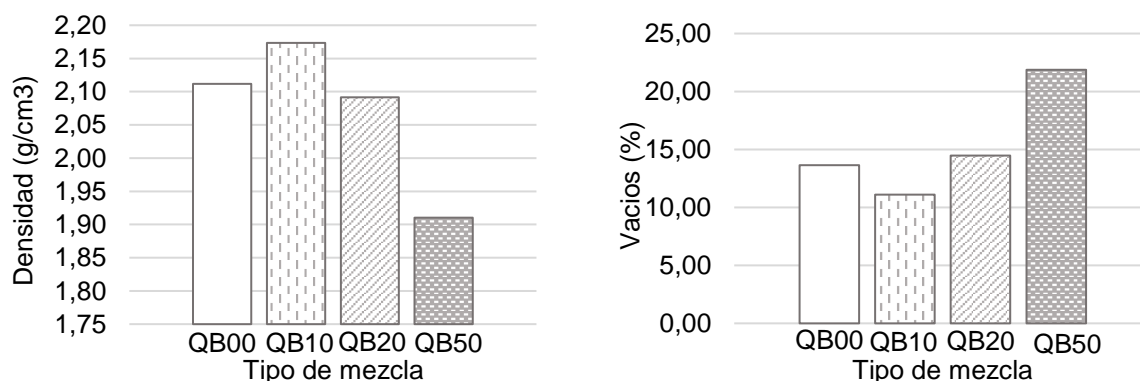


Figura 5. Densidad relativa promedio y porcentaje de vacíos de las mezclas

4.3 Trabajabilidad

Si bien la trabajabilidad de las mezclas asfálticas en frío en escasas ocasiones se exige como criterio de aceptabilidad, existen pruebas que permiten cuantificarla como el Ensayo de Penetración de Cuchilla (Blade Penetrometer). Dicha prueba, consiste en medir la resistencia a la penetración que ejerce una cuchilla de dimensiones normalizadas sobre una mezcla asfáltica en frío. Siendo poco trabajables aquellas que ejercen una mayor resistencia y muy trabajables, las que no oponen resistencia a la penetración de la cuchilla.

A falta del equipamiento necesario para ejecutar dicho ensayo, y a raíz de la necesidad de medir una de las propiedades más importantes de las mezclas almacenables, se desarrolló durante este estudio un sencillo método para la cuantificación de la trabajabilidad de estas composiciones (Figura 6).

La propuesta de determinación de la trabajabilidad, se basa en rellenar un molde troncocónico con mezcla asfáltica almacenable y registrar el tiempo que tarda en quedar estática sobre un plano horizontal una vez retirado el molde que la contiene.

Para ello se confeccionó un cono similar al de Abrams, pero de tamaño reducido, siendo la dimensión de la altura y los diámetros superior e inferior la mitad que el diseño original. Para esta tarea, fue necesario definir un procedimiento de ensayo a modo de permitir su repetitividad. La manera propuesta se explica a continuación:

- 1- Colocar el tronco cono sobre una superficie lisa, plana, horizontal y no absorbente y mantenerlo afirmado a la mesa de trabajo con las manijas laterales.
- 2- Verter la mezcla a controlar (15°C) con una cuchara en tres capas de igual volumen, compactando cada una de ellas con *10 golpes* utilizando una varilla metálica.
- 3- Enrasar la superficie de la capa superior y limpiar el material derramado. Luego levantar verticalmente el molde en un período entre 5 y 10 seg.
- 4- Registrar el tiempo total que tarda la mezcla en quedar estática sobre la superficie horizontal.



Figura 6. izquierda: mezcla evaluada, derecha: elementos del ensayo propuesto para la cuantificación de la trabajabilidad en mezclas almacenables

4.3.1 Análisis de resultados

Bien es sabido, que las mezclas almacenables se mantienen “vivas” antes a ser compactadas, exhibiendo movimientos dinámicos previo a encontrar un estado de equilibrio. Por lo tanto, resulta factible cuantificar esa propiedad de inestabilidad y contrastarla con la trabajabilidad intrínseca de la misma. De tal modo, las mezclas que tarden mucho tiempo en quedar estáticas sobre un plano horizontal, posiblemente se justifique por la fuerte cohesión entre sus partículas. Lo que evidencia una baja trabajabilidad por la elevada fuerza de unión entre los componentes de la mezcla. Por otro lado, si la mezcla tarda muy poco tiempo o bien queda inmediatamente estática luego de retirar el molde, puede concluirse en una mezcla muy fluida o con nula cohesión (muy seca). En tal caso, no podría acopiarse apropiadamente a la intemperie pues se asentaría excesivamente ocupando una gran superficie o, en el caso que esté seco o envejecida, no desarrollaría la fuerza de unión necesaria para su aplicación.

En base lo anterior, se definieron los límites expuesto en la Tabla 3 para cuantificar la trabajabilidad de las mezclas almacenables.

Tabla 3. Parámetros propuestos para la evaluación de la trabajabilidad

Tiempo transcurrido	Comportamiento de la mezcla	Trabajabilidad
$t < 10$ seg	Mezcla excesivamente fluida o muy seca	Nula
$10 \text{ seg} < t < 25 \text{ seg}$	Mezcla fluida o poco cohesiva	Baja
$20 \text{ seg} < t < 1' 50 \text{ seg}$	Mezcla optima	Buena
$t > 1' 50 \text{ seg}$	Mezcla excesivamente cohesiva	Escasa

Por su parte, las mezclas ensayadas arrojaron los valores expuestos en la Tabla 4 a continuación:

Tabla 4. Resultados del ensayo de trabajabilidad

MEZCLA	Plástico en mezcla (%)	Tiempo Registrado (seg)	Trabajabilidad
QB00	0,0%	59	Buena
QB10	0,2	2' 38	Escasa
QB20	0,5	1' 25	Buena
QB50	2,0	21	Baja

4.4 Adhesividad

El ensayo planteado en este apartado persigue estudiar la fuerza de adhesión que existe entre una mezcla asfáltica en frío y la superficie de un pavimento elaborado con mezcla asfáltica en caliente (obviando la aplicación de un material adhesivo). Para ello se implementó el procedimiento del Departamento de Transporte de Virginia, el que relaciona el tiempo que tarda en caer una masa de mezcla almacenable compactada sobre una probeta asfáltica convencional. De este modo, un mayor tiempo de caída conduce a materiales con mayor adhesión.

Ensayadas las 4 mezclas, se obtuvieron resultados expresados en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados del ensayo de adhesividad

MEZCLA	Plástico en mezcla (%)	Tiempo de Adhesión (seg)
QB00	0,0	6,71
QB10	0,2	9,26
QB20	0,5	4,23
QB50	2,0	1,43

Para mezclas asfálticas en frío, el valor óptimo de adhesión recomendado varía entre 5 a 30 seg [2].

4.5 Adherencia agregado-ligante

La adherencia es la capacidad del cemento asfáltico de aglutinarse al agregado. La perfecta colaboración entre el ligante y los agregados evita que el agua ingrese entre los dos materiales, y previene un envejecimiento temprano de la mezcla bituminosa.

Para ello, se recurre al ensayo normado bajo IRAM 6842 "Determinación de la Adherencia entre el Agregado y Ligante" Este es un procedimiento cualitativo que sirve para considerar si es necesario el eventual empleo de un agente mejorador de adherencia. De las 4 muestras, 2 exhibieron más de un 95% de superficie cubierta (QB10 y QB20). Siendo únicamente la QB00 y la QB50 las que presentaron múltiples zonas de desprendimiento de material bituminoso.

4.6 Cohesión

En el ensayo de cohesión se realiza para medir la adhesividad de la mezcla asfáltica en el seno de la misma. La falta de cohesión lleva a mezclas poco estables y con potenciales problemas de desprendimientos de material.

En este caso, se siguieron las pautas establecidas por el Ministerio de Transporte de Ontario: "Determinación de la cohesión de mezclas para bacheo mediante el método del tamiz rodante" Este ensayo, cuantifica la propiedad cohesiva de una mezcla asfáltica fría al someterla a un proceso gradual de fricción. Para ello, se coloca una probeta de mezcla asfáltica sobre un tamiz con aberturas normalizadas, luego se cierra el extremo libre con la tapa del tamiz y se hace rodar el conjunto una cierta cantidad de veces. La abrasión ocasionada entre la probeta y los alambres del tamiz, simula la acción del tránsito. Luego se calcula un índice, en base a la cantidad de material desprendido de la probeta, llamado Índice de cohesión. Mayor es este índice, mejor es la cohesión de la mezcla.

Tabla 6. Resultados del ensayo de cohesión

MEZCLA	Plástico en mezcla (%)	Índice de Cohesión (%)
QB00	0,0	97
QB10	0,2	99
QB20	0,5	99
QB50	2,0	83

Según la Dirección de Vialidad Chilena, este índice debe ser mayor a 90% [3].

5 Evaluación de propiedades mecánicas

Para la determinación del valor de la estabilidad y fluencia de las mezclas formuladas, se empleó el Método propuesto por el PhD. Ing. Augusto Justo B. [4]. Este propone la estimación de una "Estabilidad al aire" (a 25°C en estado seco) y otra "Estabilidad Saturada" (Por inmersión en agua). A este procedimiento se le sumó la determinación del valor de Estabilidad a 5°C, para ampliar el conocimiento del desempeño de las mezclas, y obtener un espectro de comportamiento a diferentes condiciones ambientales.

Por otra parte, se agregó a la evaluación de las propiedades mecánicas, el ensayo de Resistencia al Congelamiento y Deshielo. Considerado por diversos autores, como el principal factor que contribuye a la falla prematura de las mezclas asfálticas en regiones frías. Para ello se siguió el Método Modificado de Lottman AASHTO T-283, en el que se mide la capacidad de una mezcla para resistir el efecto debilitador de la expansión térmica cíclica y de las fuerzas de contracción resultantes del proceso. En este método, se determina el Índice de Tracción Indirecta (ITS) de una mezcla sometida a dos condiciones: en estado seco y en estado saturado luego de un ciclo de congelamiento. Esto permite obtener una relación TSR (Tensile Strength Ratio) que cuantifica la susceptibilidad por daño térmico.

En la Figura 7 se resume el procedimiento llevado a cabo para la evaluación de las propiedades mecánicas de las mezclas QB. Para esta etapa de la investigación, se elaboraron un total de 60 probetas según el procedimiento descrito en el apartado 4.1

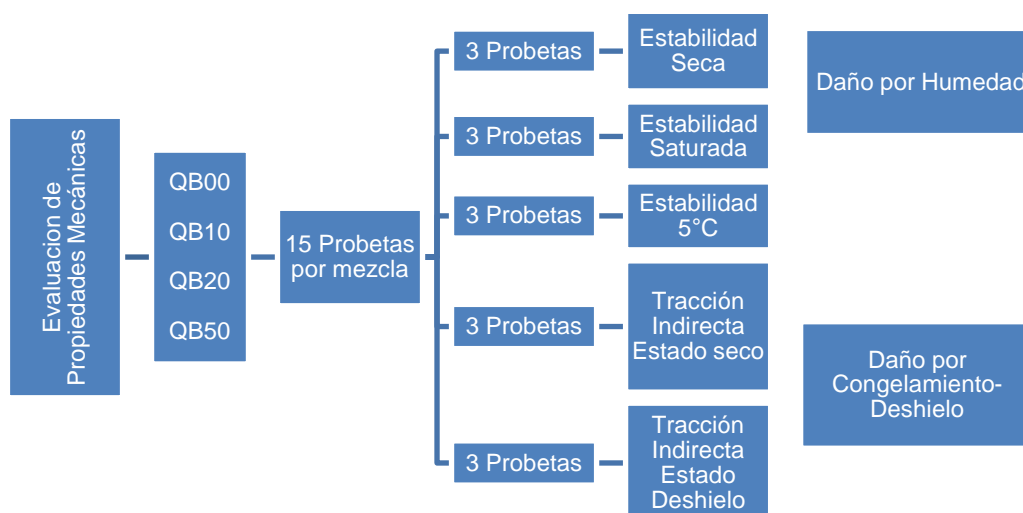


Figura 7. Esquema de procedimiento para la evaluación de las propiedades mecánicas de las mezclas

5.1 Resultados

En la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos planteados anteriormente.

Tabla 7. Resumen de los ensayos de estabilidad ejecutados sobre las mezclas

MEZCLA	Estabilidad en Estado Seco (kg)	Estabilidad en Estado de Saturación (kg)	Estabilidad en Estado de Congelamiento (kg)	ITS seco (kPa)	ITS deshielo (kPa)	TSR (%)	Estabilidad Remanente (%)
QB00	344,5	272,8	724,8	n/a	n/a	n/a	79,2
QB10	563,4	472,3	1137,8	46,38	43,22	93,2	83,8
QB20	632,6	526,4	1272,4	35,10	29,96	85,4	83,2
QB50	432,7	359,1	948,1	9,33	6,22	66,6	83,0

Luego del ciclo de congelamiento y deshielo, únicamente las mezclas modificadas con plástico pudieron superar la prueba. Obteniendo un máximo de TSR para la mezcla QB10, seguida por la QB20 y por último la QB50.

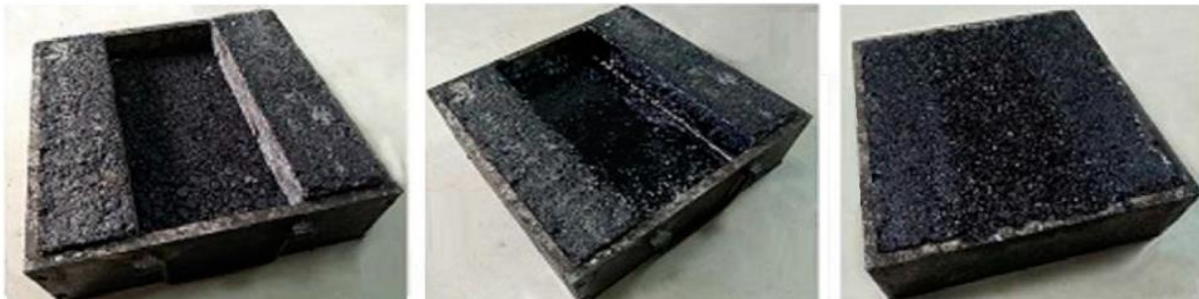
6 Evaluación de desempeño

Para evaluar el desempeño de las mezclas, se decide llevar a cabo el ensayo de Rueda Cargada mayormente conocido como Wheel Tracking Test. Como en este caso se trabaja con mezclas en frío para bacheo, resulta interesante adaptar el Ensayo de Rueda cargada convencional, para predecir y estudiar la respuesta de las mezclas elaboradas bajo los efectos de las deformaciones permanentes. Actualmente no existe un método de ensayo normalizado para la evaluación del ahuellamiento en mezclas asfálticas almacenables por lo que se toma como referencia el procedimiento llevado a cabo por la Escuela de Caminos de la Universidad de Chang'an [5].

Para comenzar, se elaboraron dos probetas de 0,30 x 0,30 x 0,05 m de mezcla asfáltica en caliente CAC-D-19, siguiendo el procedimiento detallado según norma EN 12697-22 para el ensayo de Rueda de Carga.

Seguidamente se realizó un calado en el tercio medio de cada probeta, asegurando un ancho de 13 cm y una profundidad de 30mm. Se utilizó resina epoxi para fijar las secciones caladas y poder materializar la sección hueca que representa un bache dentro de un pavimento asfáltico.

La Figura 8 refleja el proceso de elaboración de la probeta que, en un paso posterior, será rellena y compactada con las mezclas QB, y luego sometida a la acción cíclica de una rueda cargada.



(a) Calado de la probeta (b) Cepillado de las caras expuestas (c) Compactación de la mezcla

Figura 8. Preparación de las probetas caladas para el ensayo de Wheel Tracking

Se confeccionaron en total 2 probetas caladas por cada muestra, con el fin de obtener resultados por duplicado y mejorar la confiabilidad de las mediciones.

En función del volumen geométrico calado en las probetas anteriormente confeccionadas y a partir de evaluación de las propiedades volumétricas de cada mezcla QB (Ver apartado) se calculó la cantidad a añadir de cada material, con el fin de asegurar las mismas condiciones de compactación, densidad y vacíos que las probetas cilíndricas ensayadas en el capítulo anterior.

Definida la cantidad de material a añadir, se la compactó de igual manera que el ensayo de Wheel Tracking convencional, utilizando el compactador de rodillo hasta quedar a nivel con la cara superior de la probeta.

Una vez compactadas las probetas, se colocaron con su molde dentro de la máquina de ensayo, accionando el mecanismo de carga hasta llegar al objetivo final de 5000 ciclos (El método de la Universidad de Chang'an indica 2400 pasadas de rueda, pero se decide duplicar este valor para llevar a las mezclas a una situación crítica de desempeño).

6.1 Resultados

En la Tabla 8 a continuación se exponen los resultados finales obtenidos del ensayo de Wheel Tracking. En la Figura 9, se exhiben dos de las probetas ensayadas una finalizada la prueba.

Tabla 8. Resultados del ensayo de Wheel Tracking

MEZCLA	Plástico en mezcla (%)	Pendiente de ahuellamiento WTS (mm/2,5x10 ³ ciclos)	Porcentaje de ahuellamiento PRD (%)	Profundidad media de ahuellamiento (mm)
QB00	0,0	0,640	13,5	6,76
QB10	0,2	0,350	4,8	2,40
QB20	0,5	0,136	3,0	1,49
QB50	2,0	0,064	1,8	0,89



Figura 9. Probetas ahuelladas luego del ensayo de Wheel Tracking a 5000 ciclos, izquierda: mezcla QB00, derecha: mezcla QB50

7 Análisis e interpretación de resultados

Cabe recordar, que las cuatro mezclas formuladas fueron realizadas idénticamente con la misma granulometría y porcentaje de ligante (emulsión superestable) lo que se varió únicamente fue el contenido de plástico en la composición de los Blends. Por ello, se prestará especial atención en los efectos que acusa la adición de material polimérico en el comportamiento de las cuatro mezclas formuladas, y en base a dichos estudios, como optimizar las composiciones para lograr un mayor rendimiento.

7.1 Influencia del material plástico

Al analizar los resultados obtenidos en las secciones anteriores, se comprueba la sustancial mejora que implica la adición de material polimérico en las mezclas acopiadas. En la Figura 10 se representan los resultados emanados del ensayo de estabilidad a diferentes temperaturas, donde el eje de las abscisas representa el valor de estabilidad en kilogramos para las diferentes condiciones de ensayo y el eje de las ordenadas, el porcentaje de plástico añadido en relación al peso total de la mezcla.

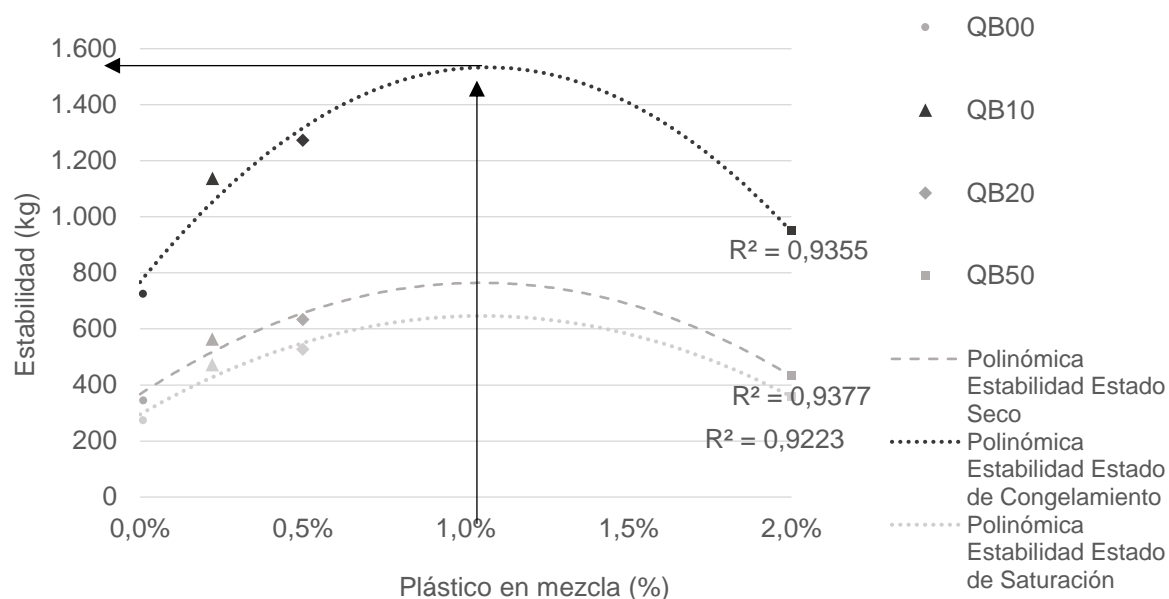


Figura 10. Tendencia en los resultados de estabilidad en función del contenido de plástico en mezcla

El gráfico resultante otorga tres líneas de tendencia, una para cada condición de ensayo (Estabilidad en estado seco, saturado y congelado). El error derivado de ellas es muy pequeño (R^2 entre 0,92 y 0,93) por lo que, puede afirmarse que se ajusta muy bien a los datos de entrada.

De esto se deduce que un contenido de plástico cercano al 1% (referido al peso seco de los áridos) arrojaría los máximos resultados de estabilidad para todas las condiciones. Sin embargo, existe una falta de datos en cuanto a los valores de estabilidad correspondientes a mezclas con contenido de plástico entre 0,5% y 2%. Por ello no resulta completamente válido afirmar que una mezcla con 1% de material polimérico, lograría ubicarse en el pico de la curva de tendencia.

A favor de refutar dicha hipótesis, se confeccionaron 3 probetas con 1% de plástico para verificar si los resultados de su evaluación por Estabilidad, obtienen o no, las máximas resistencias. Se decide ensayar las muestras bajo condición saturada, al ser la situación más desfavorable y con el objeto de ampliar el estudio del comportamiento de la mezcla bajo agua.

Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados de la estabilidad en estado de saturación en función del porcentaje de plástico en mezcla

MEZCLA	Plástico en mezcla (%)	Estabilidad en Estado de Saturación (kg)	Estabilidad Promedio (kg)
QB01	1,0	409,2	388,7
	1,0	388,7	
	1,0	368,1	

Si se agrega a la Figura 10, el resultado de la Estabilidad Promedio para un 1,0% de plástico en mezcla, se comprueba que el comportamiento de la misma no sigue una tendencia Binomial como se supuso anteriormente, es decir, no se adquiere un valor máximo de estabilidad para un 1% de plástico.

El resultado obtenido quedó por debajo de las mezclas con 0,2% y 0,5% de plástico, y por encima de la que contenían 0% y 2% de plástico.

En base a esto, en la Figura 11, se redefine la tendencia en el comportamiento de estabilidad de las mezclas. Así se obtienen 3 curvas polinómicas con su punto máximo para el 0,5% de plástico, para el caso de Estabilidad en Estado Seco y de Congelamiento, y de 0,4% para el caso de Estabilidad en Estado de Saturación.

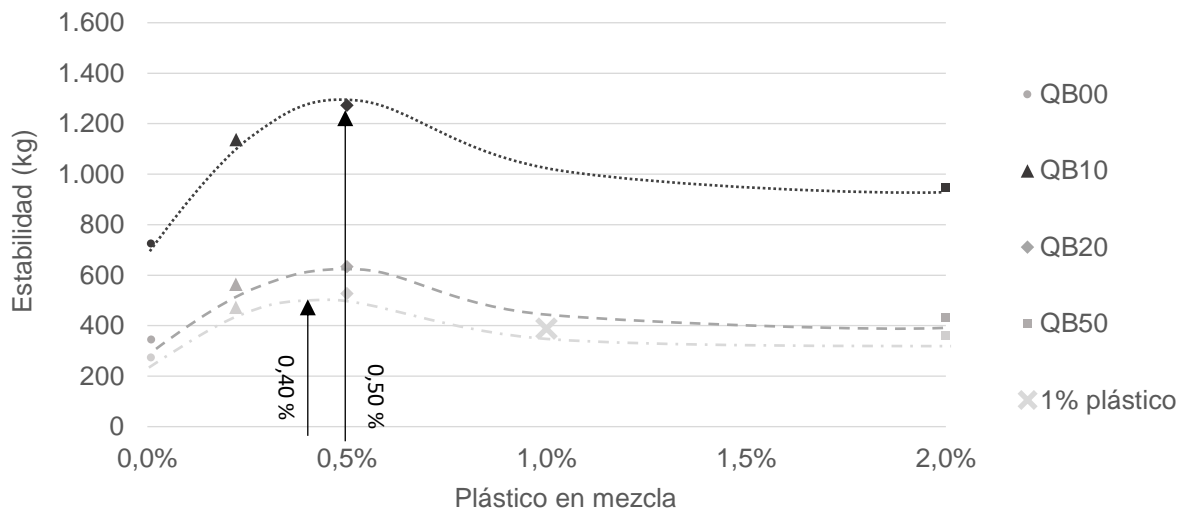


Figura 11. Tendencia redefinida en los resultados de estabilidad

Si se observa el gráfico anterior, se concluye que al adicionar un porcentaje de plástico cercano al 0,5% se consigue mayorar sustancialmente la resistencia de la mezcla para las tres condiciones de ensayo. Logrando estabilidades de casi el doble que las obtenidas con las mezclas con 0% de material polimérico.

Paralelamente, si se grafican los valores de la Estabilidad Remanente (Figura 12) la tendencia indica un pico en el valor de la Estabilidad para mezclas con 0,40% de plástico, valor que, decrece paulatinamente a medida que se aumenta dicho porcentaje.

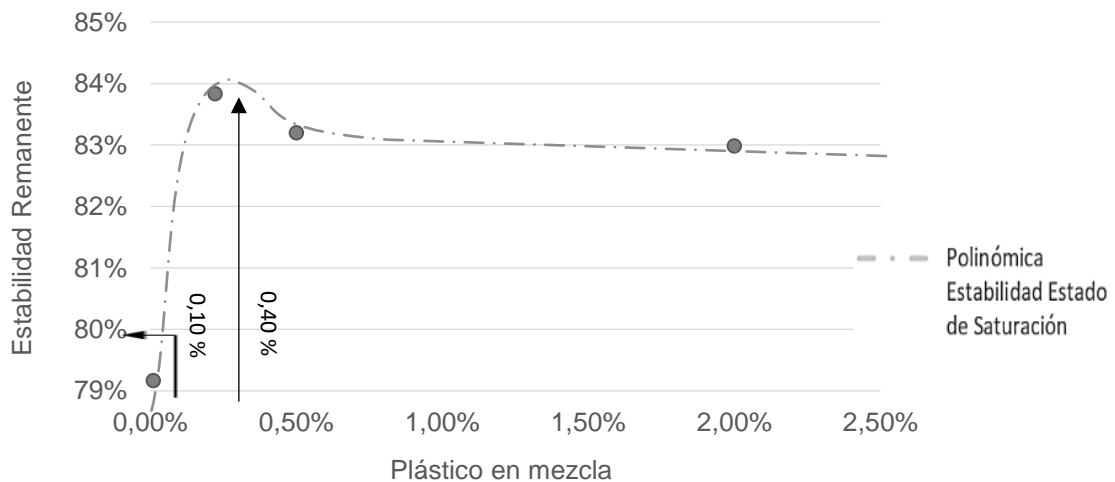


Figura 12. Variación de la estabilidad remanente en función del contenido de plástico en mezcla

Un valor de Estabilidad Remanente superior a 80% denota mezclas con comportamiento óptimo bajo estado de Saturación. En base a dicha premisa, y observando el gráfico anterior, se concluye que la adición de material polimérico mejora el desempeño de las mezclas cuando están expuestas al agua.

Se requiere de al menos un 0,10% de plástico en peso del árido para que el daño por humedad no sea superior al 20% (Lo que es igual a una Estabilidad Remanente de 80%).

Contrariamente a los casos anteriores, al representar los valores de relación de índices de tracción seco a deshielo o TSR (Figura 13), no se visualiza una tendencia de tipo Polinómica (es decir, con un máximo absoluto). En este caso, a medida que se incrementa el contenido de plástico disminuye gradualmente la capacidad de la mezcla de resistir el fenómeno de congelamiento y deshielo. Si se establece que el TSR% sea de al menos un 80%, podría afirmarse en este caso, que las mezclas cumplen con dicha condición siempre y cuando el porcentaje de adición de plástico no supere el 0,75% pero que tampoco sea inferior a 0,2%.

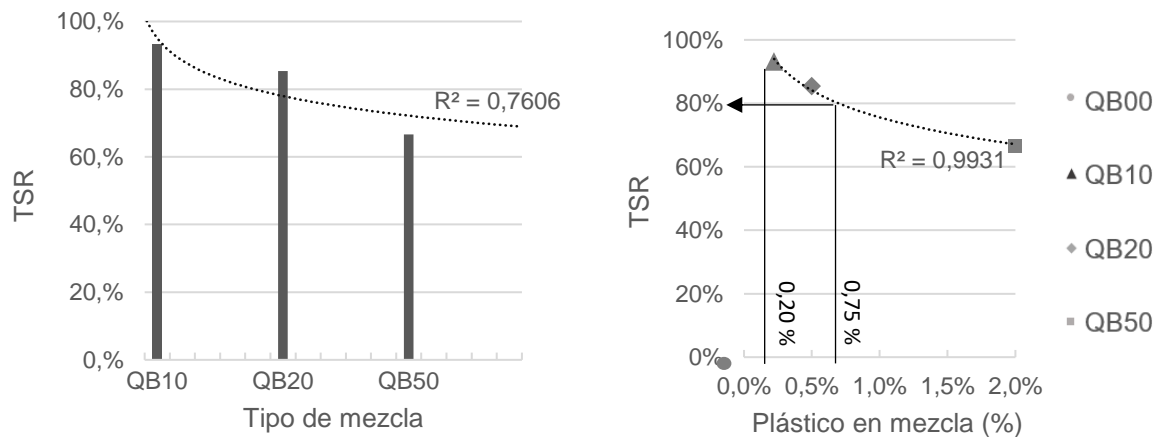


Figura 13. Variación en el ahuellamiento en función del contenido de plástico en mezcla

Independientemente del valor mínimo de TSR % que se establezca, se puede afirmar que el material polimérico colabora, en mayor o menor medida, a soportar las tensiones producidas por la expansión del agua. Esto es simple de determinar, al considerar que la mezcla con 0% de material plástico no superó la prueba de congelamiento y deshielo, pero aquellas composiciones con tan solo un 0,2% de adición, lograron concluir el ensayo con excelentes resultados.

Por último, al analizar los resultados de la evaluación de desempeño de las mezclas obtenidos en la sección 6, se manifiesta una situación inversa a la ocurrida en la determinación del TSR %. A diferencia de este último, las mezclas presentaron un mejor desempeño a medida que se aumentó el porcentaje de plástico en su composición. Concluyendo en una tendencia de tipo potencial negativa tal como se indica en la Figura 14.

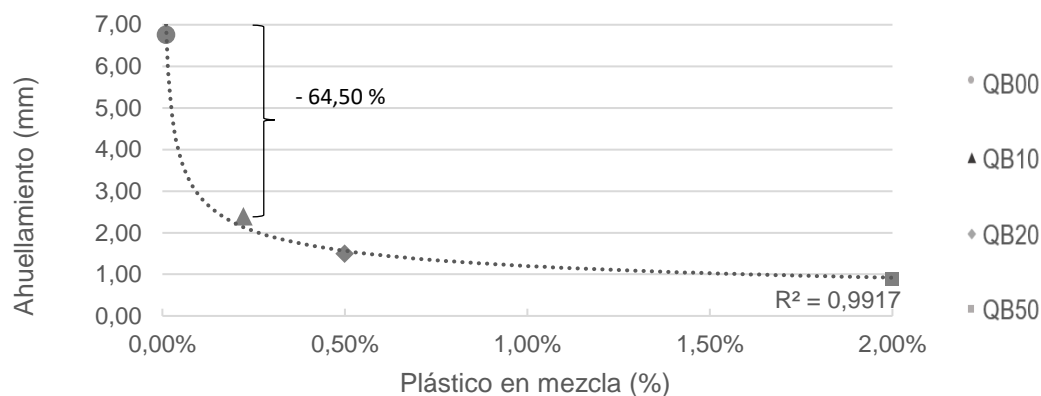


Figura 14 Profundidad media de ahuellamiento en función del contenido de plástico en mezcla

Siguiendo la línea de tendencia resultante del gráfico, se concluye que una pequeña adición de material plástico colabora ampliamente a resistir el desarrollo de deformaciones permanentes. Una vez más, se comprueba la favorable acción del plástico en el desempeño de la mezcla: al adicionar tan solo un 0,2% de material polimérico se redujo el ahuellamiento en un 64,5% valor que continúa decreciendo a medida que se incrementa el porcentaje interviniente de dicho material.

7.2 Porcentaje óptimo de adición

En la Tabla 10 se resumen los criterios de evaluación comentados con anterioridad y el rango de plástico en mezcla para los cuales se obtienen resultados cercanos a los valores de referencia.

Tabla 10. Criterios de evaluación y rangos recomendados de plástico en mezcla

Criterio de evaluación	Valor de Referencia	Mínima cantidad de Plástico en mezcla (%)	Máxima cantidad de Plástico en mezcla (%)
Estabilidad Estado Seco	650 kg	0,40%	0,60%
Estabilidad Estado de Saturación	550 kg	0,30%	0,50%
Estabilidad Estado de Congelamiento	1300 kg	0,40%	0,60%
TSR	Min. 80 %	0,20%	0,75%
Estabilidad Remanente	Min 80 %	0,10%	-
Ahuellamiento	Máx. 3,0 mm	0,10%	-

De esto se deriva, que una mezcla con 0,5% de plástico resultaría ser altamente eficiente, al cumplir con todos los parámetros predefinidos. Coincidentemente en este caso, la QB20 es la que posee dicha proporción de material polimérico y la que mejor desempeño logró de las cuatro mezclas formuladas en la presente investigación.

Si bien un 0,5% de material recuperado no significa de antemano un gran porcentaje interviniente, cabe recordar, que por su bajo peso y elevado volumen constituye un ahorro medioambiental muy notable.

8 Conclusiones finales

Como todas las mezclas en esta investigación fueron elaboradas con los mismos agregados y porcentaje de emulsión asfáltica, resulta fácilmente evidenciable la acción del material polimérico dentro de las mismas, puesto que, fue el único material cuya proporción fue variándose gradualmente. En base a ello, se establecieron las siguientes conclusiones:

En una primera instancia puede expresarse que resultó posible el reemplazo de los diluyentes hidrocarbonados utilizados generalmente en la conformación de mezclas almacenables. Hallando otros materiales capaces de dotar de buenas propiedades de almacenabilidad y trabajabilidad a una mezcla fría de agregados y ligante.

Todas las mezclas elaboradas resultaron en un alto contenido de vacíos luego de ser compactadas, variando su porcentaje entre 11% a 22%. En esta etapa evaluativa se determinó que elevados contenidos de plástico “espuman” la mezcla logrando composiciones altamente permeables y abiertas, en detrimento de la estabilidad.

El plástico colabora con la cohesión entre agregados siempre y cuanto se mantenga bajo su porcentaje de adición (Inferior al 1%), En este sentido, puede afirmarse que las composiciones QB10 y QB20 (las más cohesivas) fueron las que exhibieron propiedades resistentes superiores a las demás. No así la QB00 (con 0% plástico) que si bien presentó un excelente índice de cohesión (superior al 97%), no registró valores de estabilidad destacables.

Los Blends realizados otorgaron en líneas generales una buena trabajabilidad a todas las mezclas, manteniendo “vivas” las composiciones, aún luego de exponerlas a la intemperie por más de 6 meses. La gradación de los agregados también influyó en este aspecto, al perseguirse una estructura abierta a la hora de conformar la curva granulométrica, logrando mezclas de fácil manejo y aplicación. La construcción del cono de Abrams reducido, resultó una herramienta muy útil para la determinación de la trabajabilidad, testeándolo en diferentes mezclas y logrando resultados aceptables y coherentes.

A la hora de evaluar la adherencia del material asfáltico sobre los agregados, se observó que la ausencia de material polimérico, así como también el exceso del mismo, se refleja en una pérdida de la liga existente entre la emulsión y los áridos bajo condiciones de saturación. Este aspecto logró verse tanto en el ensayo de adherencia propiamente dicho como en el de estabilidad saturada. Donde las probetas con nulo aporte de plástico (QB00) y las de mayor contenido (QB50) se lavaron de igual manera luego del ciclo de inmersión. No así las restantes mezclas que no presentaron indicios de pérdida de adherencia.

En cuanto a los valores resistentes de mezclas, puede afirmarse que el plástico influyó de manera decisiva en la determinación de los parámetros de estabilidad y tracción indirecta. Se encontró que al adicionar tan solo un 0,5% de material polimérico se logra duplicar el valor de estabilidad en estado seco en comparación con las mezclas sin aporte de plástico. Caso similar ocurrió al establecer el Índice de

Tracción indirecta, donde no fue posible la determinación de dicho parámetro en las mezclas sin material plástico (por desmoronamiento de los ejemplares). Pero sí fue posible obtener buenos resultados para las composiciones a las que se les añadió polietileno reciclado. Lo cual significa que el plástico colabora en cierta medida a soportar las fallas provocadas por tensiones de tracción.

Se comprueba además que la variación en los valores de estabilidad (en función del porcentaje de plástico en mezcla), no sigue una tendencia binomial para todas las condiciones de ensayo. En efecto, alcanza un punto máximo para porcentajes de adición entre 0,4% y 0,5% y luego decrece paulatinamente hasta hacerse casi asintótica con el eje de las ordenadas. Este comportamiento no se repitió al representar los valores del Índice de Tracción Indirecta donde los resultados obtenidos reflejaron una tendencia decreciente sin posibilidad de fijar un máximo absoluto. En otras palabras, a medida que se incrementó el contenido de plástico disminuyó gradualmente la capacidad de la mezcla de resistir fenómenos de tracción, pero registrando valores nulos de ITS para composiciones con 0% de polietileno. Esto demuestra que existe un mínimo de contenido de plástico para el cual la mezcla comienza a soportar tensiones de tracción. En esta investigación no fue propósito hallar dicho valor, pero se asevera que se encuentra dentro del rango de 0 a 0,2%.

Si se resumen los resultados obtenidos en el estudio del daño por humedad, se concluye fielmente que todas las mezclas modificadas con plástico oponen una buena resistencia a la acción del agua. Al disminuir en promedio un 16,5% el valor de estabilidad luego de ser sometidas 24hs a inmersión. De aquí se infiere que las mezclas podrían ser aplicadas en entornos húmedos sin perder significativamente su estructura resistente. De los gráficos de tendencia elaborados, se determinó que al adicionar tan solo un 0,1% de plástico se asegura una estabilidad remanente superior al 80%. (Es decir, un daño por humedad inferior al 20%). Esto demuestra el gran potencial que reviste el uso de plástico en mezclas almacenables para resistir o repeler la acción destructiva del agua y la humedad.

Al estudiar el daño por congelamiento y deshielo, a través de la determinación del TSR (Tensile Strength Ratio) por el método Lottman AASHTO T-283, se comprobó que el material polimérico favorece a soportar las tensiones producidas por la expansión del agua a bajas temperaturas. Se ha encontrado, que mezclas con contenidos de plástico inferiores a 0,75%, aseguran un TSR % superior al 80% (Daño inferior al 20%). En esta instancia, las probetas realizadas con la mezcla QB00 (Sin adición de plástico) estallaron luego del ciclo de congelamiento y deshielo, no así las restantes composiciones que lograron culminar con el ensayo, evidenciando la clara intervención del material polimérico en las mezclas.

En la evaluación de desempeño de las mezclas por el ensayo de Wheel Tracking, se comprobó la favorable acción del plástico para resistir el desarrollo de deformaciones permanentes. Identificando que las deformaciones acumuladas decrecen potencialmente a medida que se aumenta el contenido de plástico en la mezcla. De este modo, se afirma que es posible disminuir el ahuellamiento de una mezcla almacenable al agregarle material plástico en su composición. Particularmente en este estudio, al adicionar un 0,2% de material polimérico se logró

disminuir el ahuellamiento en un 65% en comparación a una mezcla sin polietileno en su formulación.

En líneas generales, y como conclusión final de esta investigación, se puede revalidar la posibilidad de realizar mezclas asfálticas almacenables con productos alternativos a los convencionales, de naturaleza menos contaminante y sumando el complemento de reutilizar desechos plásticos en su conformación para mejorar su rendimiento. De este estudio, y para las condiciones particulares de fabricación, se desprende que el Blend20 (El utilizado para la realización de la mezcla QB20) es el más efectivo en términos de resistencia mecánica, propiedades físicas y de desempeño. Esto significa que es posible “transformar” una mezcla asfáltica fría de agregados y emulsión en una mezcla asfáltica acopiada mediante la adición de una pequeña cantidad de Blend, lo que viabiliza dotar a dicha composición de propiedades deseables para su utilización en reparaciones de emergencia y bacheo. Dicha mezcla puede ser almacenada a la intemperie por un tiempo prolongado sin que pierda las características antes mencionadas.

La mezcla designada como QB20 logra cumplir todos los requerimientos de mezclas almacenables según recomendaciones internacionales. Si bien a simple vista, puede resultar en un contenido muy bajo de material recuperado (0,5%), y por ende escaso impacto, cabe recordar que por su bajo peso y elevado volumen constituye un ahorro contaminante importante, que refleja una impronta positiva en el medio ambiente.

9 Referencias

- [1] Vanessa I. Rosales-Herrera. “Mixture Design and Performance-Based Specifications for Cold Patching Mixtures”. Report FHWA/TX-08/0-4872-2, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, Austin TX, 2007.
- [2] Brian D. Prowell, Alan G. Franklin, “Evaluation of Cold Mixes for Winter Pothole Repair”. Research Article. Transportation Research Record, Virginia, USA, 1996.
- [3] Manual de carreteras - Dirección de Vialidad de Chile, Departamento de Estudios Viales, Subdirección de Desarrollo de la Dirección de Vialidad, MOP, Chile, 2010.
- [4] Augusto Justo B. “Propuesta de norma para elaboración de mezcla asfáltica Almacenable, para bacheos y reparaciones de emergencia”. Publicación en Revista de Infraestructura Vial del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de Costa Rica, Costa Rica, 2003.
- [5] Sen Han, Mengmei Liu, Weigong Shang, Xiang Qi, Zhuang Zhang & Shihao Dong , “Timely and Durable Polymer Modified Patching Materials for Pothole Repairs in Low Temperature and Wet Conditions”. Article. School of Highway, Chang’an University, China, 2019.