

**EVALUACION DE ENSAYOS ADICIONALES DE LABORATORIO PARA EL
DISEÑO DE MEZCLAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES RECICLADOS CON
ASFALTO ESPUMADO**

Álvaro González

Universidad del Desarrollo, Escuela de Ingeniería,
Santiago, Chile. Email: aagonzalez@ingenieros.udd.cl

Fernando Paniagua (*)

Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones,
Asunción, Paraguay. Email: rfpaniagua@uc.cl
Telefono: +595981550398

Guillermo Thenoux

Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería,
Santiago, Chile. Email: gthenoux@ing.puc.cl

(*) Autor – Día de entrega: 18-Jul-2016

Dirección Postal: 1920 – Guarayos 818_ Asunción

Resumen

La metodología utilizada en el diseño de mezclas en materiales reciclados de pavimentos flexibles usando asfalto espumado (AE) normalmente fija un contenido constante de filler activo, y utiliza el ensayo de tracción indirecta (ITS) para la determinación del contenido óptimo de asfalto. Contrariamente, reportes de literatura que estudian estos materiales mencionan que las pruebas ITS no son suficientemente sensibles a los contenidos de asfalto. Esto puede ser un problema para el diseñador al momento de determinar el contenido óptimo de asfalto.

El objetivo principal de este trabajo es examinar la sensibilidad del contenido de asfalto mediante ensayos adicionales de laboratorio que complementen el método basado en el ensayo tradicional ITS.

Las mezclas preparadas en este estudio utilizan tres combinaciones de RAP reciclado y Áridos que se mezclaron con tres contenidos de AE: 1,25%, 2,50% y 3,75%. Los resultados confirmaron la baja sensibilidad del ensayo ITS, obteniéndose que la prueba de fatiga por tracción indirecta (ITF) fue el más sensible entre todas las pruebas. Para demostrar la mejor sensibilidad del ensayo ITF comparado con el ITS, se desarrolló un diagrama tensión-deformación y un modelo mecánico unidireccional simple. Adicionalmente, se utilizó un diagrama de fatiga S-N para ilustrar que, ante un mayor número de ciclos de carga, el efecto del contenido AE mejora según lo demuestra el trabajo experimental.

En general, el análisis mediante estos ensayos mecánicos, en estos materiales, indican que los ensayos ITS no proporcionan resultados concluyentes y que estos deben ser complementados con las pruebas ITF para determinar el contenido óptimo de FB con mayor confiabilidad.

Palabras Claves: Asfalto Espumado, Diseño de Mezclas, Ensayos de Laboratorio, Pavimentos

INTRODUCCION

En la actualidad el reciclado profundo (en inglés FDR: Full depth reclamation) de pavimentos flexibles es una técnica ampliamente utilizada. El FDR presenta varias ventajas en comparación a la rehabilitación tradicional en varios aspectos como el ambiental, económico y social. Por ejemplo, se ha demostrado que el consumo de energía en el FDR es menor que en los proyectos que utilizan técnicas tradicionales (reconstrucción del pavimento y recapado de asfalto) (1). El FDR usando asfalto espumado (AE) comúnmente utiliza una recicladora móvil de pavimento que produce y aplica el AE.

Durante la construcción, se tritura la capa de concreto asfáltico superior y una porción de la base granular agregando simultáneamente asfalto espumado, filler activo y agua en su contenido óptimo buscando máxima densidad de compactación.

Normalmente, la trituración resulta de la mezcla con una composición de un tercio (1/3) del concreto asfáltico reciclado (RAP) y dos tercios (2/3) material de la base granular (BG) removido y reciclado. El contenido de AE adicionado a las mezclas del FDR varía entre 2% y 3% en peso de la mezcla RAP/BG. El Cemento Portland es utilizado comúnmente como filler activo en las mezclas con AE, con el objetivo de mejorar el aporte de finos, aumentar la resistencia a temprana edad y reducir la sensibilidad a la humedad.

Problema asociado al Diseño de Mezclas con AE.

El objetivo principal del diseño de mezclas es determinar el contenido óptimo de asfalto espumado que debe agregarse al material reciclado (RAP/BG) y que garantice una mínima resistencia en condición seca y/o saturada. Normalmente se considera un contenido de filler activo de tasa fija del 1% y mientras que tasa óptima de asfalto virgen es determinada con varios contenidos de asfalto midiendo la resistencia en cada mezcla (2, 3, 4). La prueba mecánica corriente en laboratorio para el diseño de mezclas es el ensayo de Tracción Indirecta (ITS: Indirect Tensile Strength, en inglés) en condición seca y saturada (Figura 1a).

En la prueba ITS, se utilizan probetas cilíndricas (diámetro: 100 mm o 150 mm) con aplicación de carga diametralmente hasta obtener el máximo valor de rotura/fractura. De esta prueba se obtienen los valores ITS versus contenidos de AE, se grafican y definen curvas de tendencias que permiten obtener datos (Figura 1b).

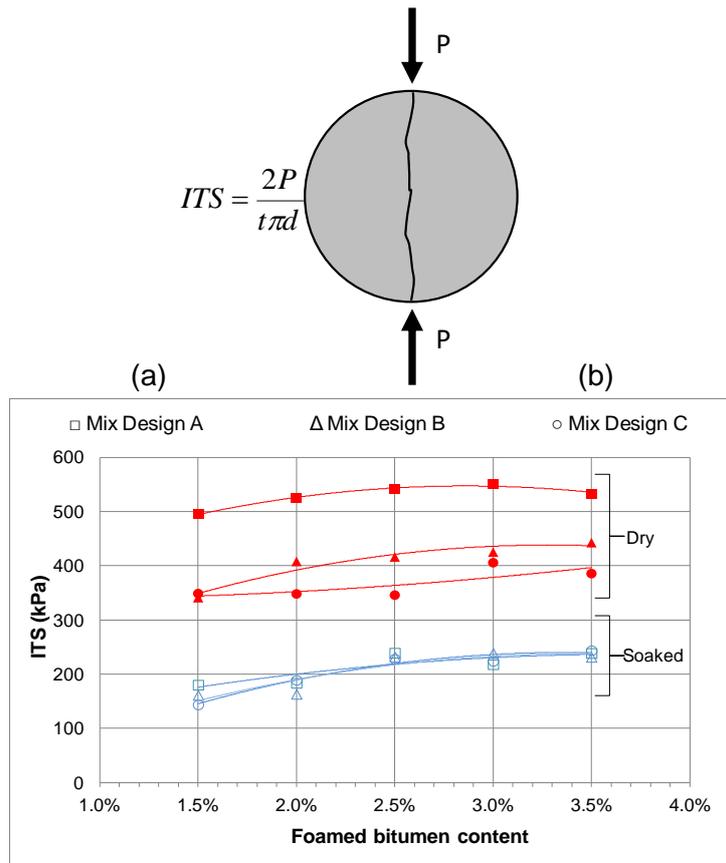


Figura 1: (a) Probeta Cilíndrica con carga diametral y (b) Típicas curvas obtenidas en el diseño de mezcla de proyectos locales con AE (P=carga; t=espesor de probeta; d=diámetro de probeta)

Se considera analizar dos resultados, el contenido de asfalto que muestra la mayor resistencia ITS en condición seca o saturada y/o contenido que resulta de la mayor razón entre el ITS seco y saturado. De estos se obtiene el contenido óptimo de asfalto a considerar. Sin embargo, se ha visto en repetidas observaciones y reportes de literatura internacional que estos valores ITS no muestran cambios significativos para los diferentes contenidos de asfalto (5,6,7,8,9,10,11). Además, muchas veces los valores ITS son mucho menos sensibles a los contenidos de AE que a los contenidos del filler activo, haciendo aún más difícil la justificación de posibles beneficios de usar asfalto espumado para los responsables viales encargados del diseño de mezclas.

Una tendencia típica en los ensayos ITS obtenido en el diseño de mezclas reportado por los autores de esta investigación se grafican en las curvas de la Figura 1b, cada valor ITS resulta del promedio de tres ensayos. Estos resultados muestran valores ITS_secos similares entre 2% y 3.5% con una variación de solo 25 kPa, y en los ITS_saturados con diferencias de solo 50 kPa.

Por el contrario, la relación entre el ITS seco y saturado, o Relación de Tracción Indirecta (TSR tensiles strength ratio) muestra una variación de menos del 5% entre los contenidos de asfalto. En otras palabras, esto puede ser un problema para el ingeniero sin experiencia que busque validar su diseño de mezclas con AE, dado que el ensayo ITS muestra poca sensibilidad ante los contenidos de asfalto.

Objetivos y Alcance del Estudio

Los objetivos del trabajo son: 1) examinar la sensibilidad de los contenidos de asfalto con otros ensayos de laboratorio que complementen el método de diseño tradicional de mezclas con AE y determine con mayor confiabilidad el óptimo contenido de AE, y 2) entender mejor el comportamiento del material ante diferentes regímenes de carga y los efectos resultantes en laboratorio. Complementar los ensayos de laboratorio que puedan ayudar al ingeniero inexperto en asfalto espumado a definir el contenido óptimo de AE en proyectos de carreteras, y mejorar la confiabilidad en el diseño y ejecución de este tipo de material para pavimentos.

El estudio se limitó a las condiciones de caminos que se encuentran en Chile, donde la mayoría de los proyectos FDR que utilizan AE se ejecutan en pavimentos con carpeta de concreto asfáltico relativamente delgada (50-80 mm) y buena calidad de las capas de base y la subbase. Estas condiciones son similares en muchos otros países (por ejemplo, Australia, Nueva Zelanda, Sudáfrica y carreteras con tráfico moderado a bajo en los Estados Unidos) y cuyo rendimiento de mezclas RAP-BG se genera con aproximadamente un tercio de RAP y dos tercios de BG.

Metodología del Estudio

La metodología consistió inicialmente en una revisión de la literatura para ver el efecto que estos mencionan respecto al contenido de asfalto en resultados de diferentes pruebas de laboratorio. Se dio una atención particular a las mezclas con menos del 50% de RAP buscando mantener la coherencia con las condiciones locales. Posteriormente, se diseñó y ejecuto un trabajo experimental en laboratorio, estudiando la sensibilidad del contenido de asfalto para diferentes ensayos de laboratorio. Por último, se utilizó un modelo mecánico conceptual para la interpretación del comportamiento de mezcla, detallado más adelante en este documento.

PROGRAMA EXPERIMENTAL DE LABORATORIO

El programa de laboratorio consistió en el estudio y comparación de la sensibilidad en las pruebas mecánicas de laboratorio para cuatro contenidos de asfalto ensayos.

Los ensayos utilizados en el programa de investigación fueron: Tracción Indirecta (ITS) y Compresión Simple No Confinada (UCS), y otros ensayos no comunes, Módulo Resiliente Triaxial (TxMr) y Fatiga por Tracción Indirecta (ITF).

La mayoría de las mezclas se prepararon con contenido de asfalto de 1,25%, 2,5% y 3,75%, y 1% de cemento Portland del peso seco de los agregados (RAP/BG). Algunas probetas ensayadas se prepararon sin cemento Portland y contenidos de asfalto de 1,83% y 3,13%. Los detalles de las mezclas preparadas para cada una de las pruebas de laboratorio y condiciones de ensayo se muestran en la Tabla 1.

Tabla1: Detalles de las mezclas y condiciones de ensayos adoptados en el programa de laboratorio

Ensayo	Cemento (%)		Asfalto (%)						Condición	
	0	1	0.00	1.25	1.83	2.75	3.13	3.75	Seca	Saturada
ITS	●	-	●	●	●	●	●	●	●	●
	-	●	-	-	-	●	-	●	●	●
UCS	-	●	-	●	-	●	-	●	●	●
TxMr	-	●	-	●	-	●	-	●	●	●
ITF	-	●	-	●	-	●	-	●	●	-

Materiales

El RAP fue obtenido del fresado de una carpeta envejecida de un proyecto de rehabilitación cercano a Santiago, mientras que los materiales de BG (Base Granular) fueron proveídos por una compañía local de áridos y asfalto. El RAP y la BG fueron separados en 11 diferentes tamaños y luego combinados en peso de manera a generar tres mezclas diferentes en su granulometría. Esta intensiva campaña de mano de obra en laboratorio se considera importante dada la disminución de variabilidad que pudiese darse por la generación de granulometría distintas.

La combinación de RAP y BG fue preparada con el objetivo de simular tres escenarios comunes de proyectos del tipo FDR. La diferencia principal entre las tres granulometrías se da en el contenido de finos (% de finos) de las mezclas: 5%, 10% y 15%. Las tres granulometrías (Figura 2) fueron denominadas según los contenidos de finos: A5 (5% finos), B10 (10% finos) y C15 (15% finos). Las mezclas A5, B10 y C15 se adoptaron según la propuesta desarrollada por la Guía Sudafricana TG2 (2). La humedad óptima para las tres mezclas A5, B10 y C15 fue de 6.2%, 6.6% y 6.4% respectivamente, obtenidas mediante la prueba de Proctor Modificado. Las máximas densidades secas obtenidas en este ensayo fueron de 2.220 Tn/m³, 2.245 Tn/m³ y 2.225 Tn/m³. La proporción RAP/BG fue de similar a 1/3.

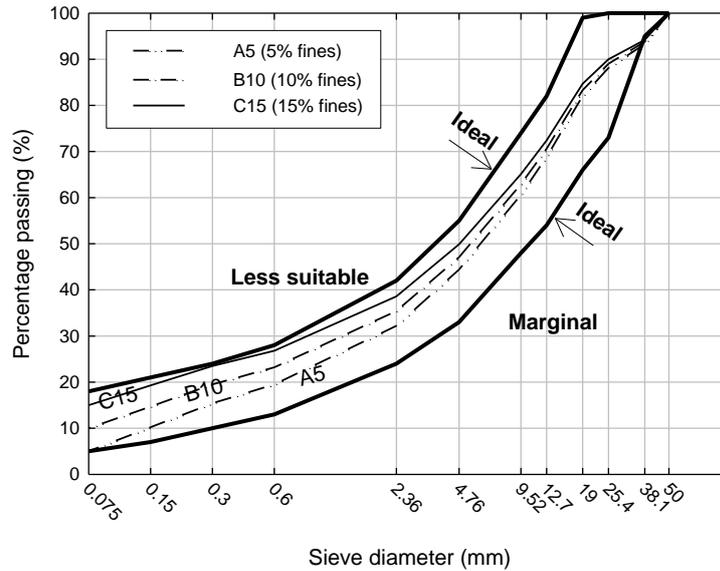


Figura 2: Distribución granulométrica de las tres combinaciones de RAP/BG

Caracterización del asfalto espumado

El cemento asfáltico utilizado en esta investigación fue el CA_24 (equivalente a un PG 64-16) comúnmente utilizado en proyectos locales de FDR. Las propiedades del asfalto espumado son: razón de expansión (ER) de 23, vida media ($\tau_{1/2}$) de 8 segundos, índice de espumado (12) de 286, agua de espumación del 3.5% y temperatura de 160°C. El Cemento Portland fue utilizado como filler activo. La tasa de filler activo fue del 1%, tradicionalmente utilizado en proyectos locales y recomendaciones de guías técnicas (2).

Mezcla

El equipo para generación del asfalto espumado fue el Wirtgen WLB 10, en tanto que, para el proceso de mezcla se utilizó el WLM 30. El agregado se mantuvo entre 20°C -25°C antes de la mezcla por al menos 12 horas, y luego se colocó el agua de compactación mediante la mezcladora WLM 30. En cada mezcla se añadió un contenido de agua en un porcentaje aproximado entre el 70%-80% del contenido de humedad óptima. El asfalto se calentó en horno hasta una temperatura de 120°C el día antes al mezclado. Los envases de asfalto se colocaron en el WLB 10 que añade agua y la temperatura se elevó a 160°C. agua La formación de espuma se estableció en un equivalente de flujo de 3,5% del peso del betún. Una vez que se añadieron agua compactación y filler activo, el mezclador se enciende durante al menos dos minutos antes de inyectar AE. El tiempo de mezcla fue próximo a los 60 segundos para todas las mezclas AE.

Compactación, curado y condiciones de ensayos

Los diferentes métodos de compactación se muestran en la Tabla 2, para cada uno de los tipos de ensayos realizados. Todas las muestras se curaron durante 72 horas en un horno de aire y temperatura controlada a 25°C, mientras que las muestras saturadas fueron

sumergidas en agua temperada a 40°C durante 24 horas. Las muestras se acondicionaron a 20°C durante al menos 6-12 horas antes del ensayo. Los ensayos se realizaron a una temperatura ambiente controlada de 20 a 25°C.

Tabla 2: Dimensiones de especímenes, tipo de compactación, método y cantidad de golpes aplicados

Ensayo	Dimensiones	Compactacion
ITS, ITF	Cilíndrico ($\varnothing = 101.6$ mm; h = 63.5 mm)	Marshall 75 golpes por cara
UCS	Cilíndrico ($\varnothing = 100$ mm; h = 115 mm)	Proctor Modificado 25 golpes, 5 capas
TxMr	Cilíndrico ($\varnothing = 100$ mm; h = 200 mm)	Proctor Modificado 56 golpes, 5 capas

Procedimiento de Ensayos

Los ensayos ITS y UCS son pruebas conocidas y estandarizadas por lo que no es necesaria una descripción detallada en este artículo. Sin embargo, la prueba TxMr aplicada corresponde a la norma AASHTO T-307 99, consistente en la combinación de 15 estados de carga con presiones de confinamiento lateral y repeticiones de 200 ciclos de carga vertical controlada en cada confinamiento lateral con aire comprimido. El pre-acondicionamiento se da con 500 ciclos con baja carga vertical. En el ensayo ITF se aplicó la norma EN 12697-24 (13). Este prueba dispone una probeta similar a la prueba ITS (Figura 1a), de 100 mm de diámetro y cuya aplicación de carga es diametral con ciclos de esfuerzos horizontales controlados usando el Equipo de Prueba Universal (Universal Testing Machine). Para la obtención de resistencia a la fatiga, se configuro tensiones horizontales equivalentes a 240 kPa, en este caso, induciendo fallas por fatiga a determinada configuración de deformación. En este ensayo, se registra la deformación vertical dinámica inicial y el número de ciclos. Los resultados se presentan como el porcentaje del incremento de la deformación dinámica vertical inicial. Las pruebas ITF han sido adoptadas por otros investigadores (14,15).

ANALISIS DE RESULTADOS EN ENSAYOS

Tracción Indirecta y Compresión Simple No Confinada

Mezclas con 1% de cemento

La Figura 3a muestra los resultados de las probetas preparadas con las tres mezclas de agregados y contenidos de asfalto del 1,25%, 2,5% o 3,75% y cemento con el 1%. El promedio general de los resultados está representado por la línea gruesa en la figura, y confirma el efecto mínimo de contenido de asfalto en el ensayo ITS cuando se prueban mezclas con filler activo. Similarmente los máximos ITS_secos se observan para las mezclas con contenidos de 1,25% y 3,75% de asfalto, mientras que en los ITS_saturados las mezclas con contenidos de 3,75% de asfalto, fueron los de máxima resistencia.

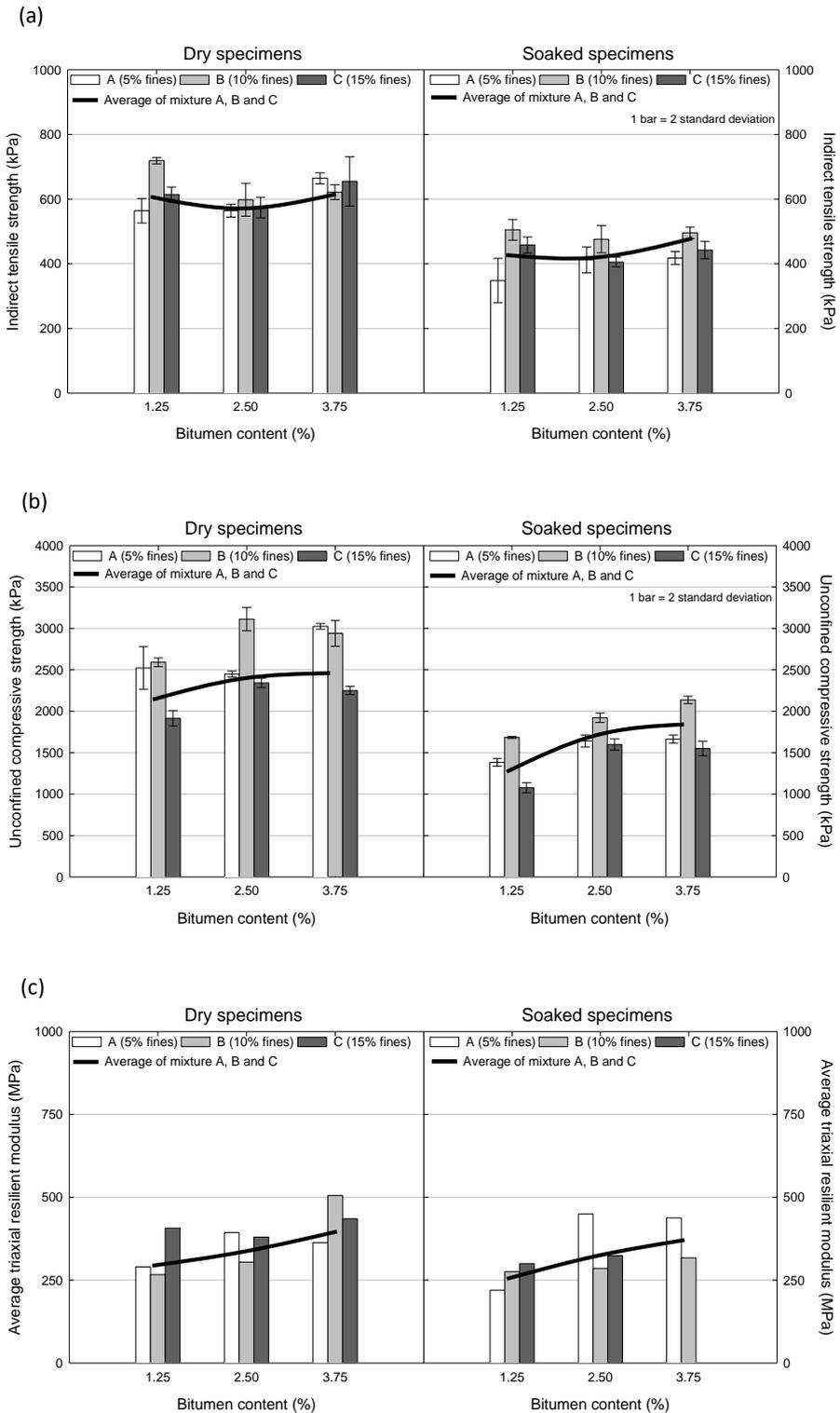


Figura 3: Resultados de ensayos en probetas secas (derecha) y saturadas (izquierda) (a) ITS, (b) UCS y (c) MrTx

La Figura 3b muestra resultados de las pruebas UCS ejecutadas en tres mezclas de agregados con contenidos de asfalto de 1,25%, 2,5% y 3,75%, y 1% de cemento. Los

resultados mostraron un máximo valor UCS_seco para un contenido de asfalto del 2,5%, mientras que en la condición saturada se observó un valor máximo UCS_saturado para el contenido de 3,75% de asfalto. Sin embargo, los resultados ITS y UCS, en general, definen tendencias diferentes. Por ejemplo, las mezclas B10 resulta con un máximo ITS para un contenido de 1,25% de asfalto, mientras que el máximo UCS en la misma mezcla resulta para un contenido de 2,5% de asfalto.

Mezclas con 0% de Cemento

Además de las mezclas preparadas con 1% de cemento, una cierta cantidad de probetas ITS fueron mezcladas y compactadas sin filler activo. Estas mezclas se prepararon en base a la recomendación de la investigación desarrollada por Fu et al. (16) y Caltrans en California (17). Los investigadores afirman que, en las mezclas con AE, el filler activo esconde los efectos del asfalto y por lo tanto mezclas deberían de probarse solo con asfalto para observar más claramente los efectos del AE.

Igualmente, con las mezclas de agregados, A5, B10 y C15 se prepararon y ensayaron probetas ITS sin filler activo en las mismas condiciones de laboratorio aplicadas a las probetas con cemento. Los resultados ITS (Figura 4) en condiciones secas están en el orden de 320 kPa a 450 kPa, mientras que su condición saturada se da con valores muy bajos en el orden de 20 kPa a 80kPa, lo que confirma que este tipo de mezclas con AE son muy sensibles a la humedad y la adición de filler activo es muy importante para los esfuerzos en las mezclas con AE. Las mezclas C15 con contenidos bajos de asfalto (1,25% y 1,83%) no sobrevivieron a las 24 horas de saturación. Estos resultados indican que no siempre es posible la saturación en probetas sin filler activo que buscan ser evaluadas ante contenidos de AE.

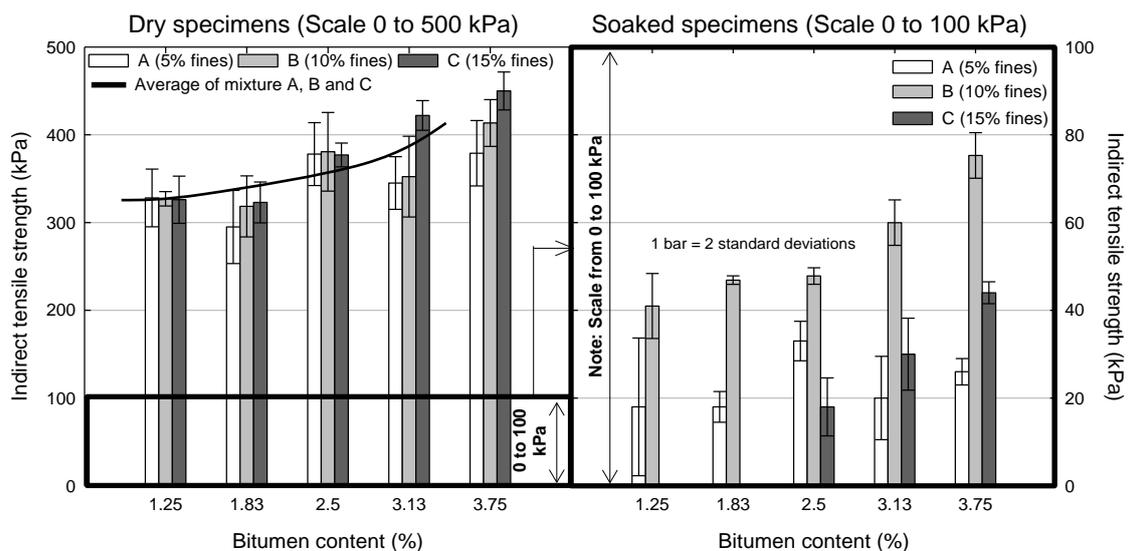


Figura 4: Resultados en ensayos ITS con 0% cemento para probetas (a) secas (b) saturadas

Ensayo de Modulo Resiliente Triaxial

El ensayo del módulo resiliente triaxial consiste en aplicar diferentes presiones de confinamiento y esfuerzos verticales repetidamente, midiendo a la vez la deformación vertical elástica. En general, la condición de esfuerzo aplicado en esta prueba es muy inferior a la resistencia máxima al cizallamiento del material ensayado. El módulo elástico se calcula como la relación entre el esfuerzo desviador y la deformación resiliente vertical. Para una mejor interpretación de los resultados, los 15 módulos medidos se promedian y presentan en la Figura 3c. Los resultados generales se muestran como el promedio del módulo para cada aumento del contenido de AE. Los módulos más bajos se obtuvieron para la condición saturada, como se esperaba. Las muestras preparadas con la mezcla de C15 fueron afectadas durante la saturación y no pudieron ser ensayadas.

Fatiga por Tracción Indirecta

Los resultados de la prueba de ITF se presentan en la Figura 5a (promedio de tres muestras). Este ensayo se realizó únicamente en mezclas B10 bajo condiciones secas, de manera idéntica a la prueba ITS_secas. La Figura 5b muestra la evolución de curvas de la relación dada entre la deformación real y la deformación inicial con el número de ciclos de carga aplicada. La figura indica que los especímenes que sustentan el mayor número de ciclos antes de la falla son 2,5% de asfalto. Las tendencias obtenidas fueron puestas en ecuaciones según con tres muestras ensayadas y sus parámetros, cuyo ajuste de datos obtenidos se incluyen en la Figura 5b.

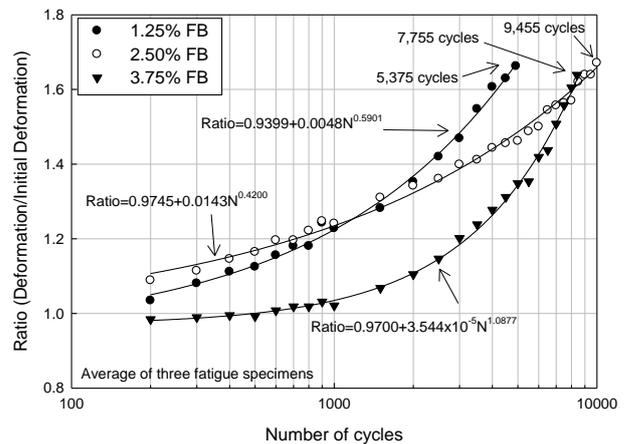
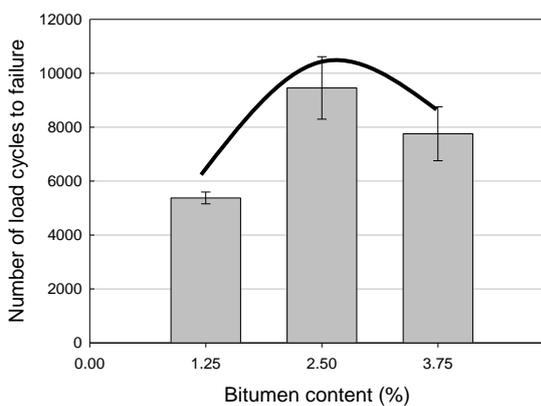


Figura 5: (a) Promedio de vida a la fatiga para cada mezcla (b) Resultados de la evolución de la fatiga en un conjunto de pruebas preparadas con una mezcla de agregados B10 y 1% cemento.

Respecto al número ciclos de falla, es interesante observar los últimos 1.000-2.000 ciclos (Figura 5b). Las pendientes de las curvas en este rango estuvieron en el orden de 8 a 10% para las muestras con 1,25% y 3,75% de asfalto, mientras que para las muestras con 2,5%

de asfalto, el valor fue de aproximadamente 2 a 3%. La razón de deformación indica un comportamiento más dúctil para la mezcla con contenido de 2,5% de asfalto en su tramo final de resistencia a la fatiga. En la prueba ITF se observa mayor sensibilidad ante el contenido de asfalto, mostrando un aumento de aproximadamente 40% en el número de ciclos de carga de 1,25% a 2,5%, lo que induce a que esta prueba podría complementar la prueba ITS cuando se observa una baja sensibilidad ante el contenido de FB.

COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL ANTE ESFUERZOS A TRACCIÓN INDIRECTA:

MONOTONICA VS CARGA CÍCLICA

Modelo Conceptual del Material Compuesto

Uno de los hallazgos observados en los resultados experimentales, es la diferencia obtenida entre las pruebas ITS tradicionales y ampliamente utilizados y los ensayos ITF, donde ambos ensayos utilizan la misma configuración carga en las mismas muestras. Se propone explicar esta diferencia mediante un modelo conceptual basado en el comportamiento del material compuesto. Primeramente, es importante identificar las tres fases sólidas que componen la mezcla con AE (Figura 6) utilizando la propuesta originalmente graficada por Fu et al. (18):

- esqueleto de agregado, formado por grandes partículas de piedras.
- masillas de asfalto, consiste en la mezcla de partículas de agregado fino unidas mediante de gotitas de asfalto durante el proceso de mezcla con el asfalto espumado.
- relleno de mineral, consiste en partículas de agregado fino, no unidos por el asfalto durante la mezcla.

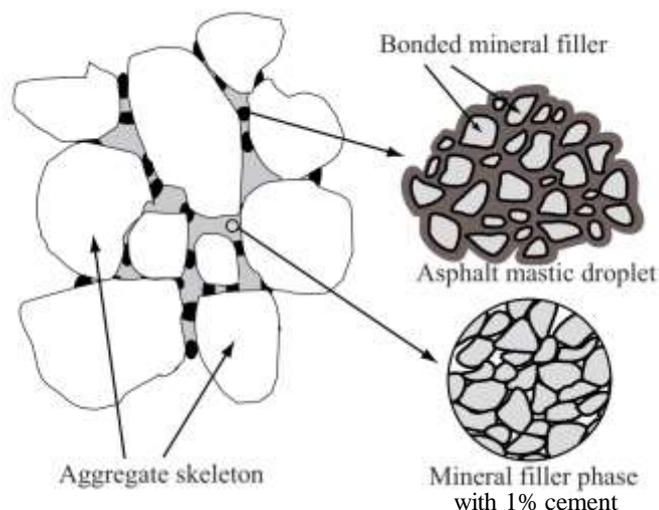


Figura 6: Ilustración conceptual de la microestructura de la mezcla de agregados, cemento y asfalto espumado (AE). Adaptación (18)

Dado que el contenido de filler activo es bajo (sólo 1%) no se forma una fase independiente (17). Sin embargo, el relleno activo se dispersa en la fase del relleno mineral y aumenta

considerablemente su resistencia y rigidez en la mezcla, como se pudo observar en el trabajo experimental.

Cuando una grieta se propaga a través de una mezcla de AE con filler activo en el ensayo de tracción indirecta, se debe a: la rotura a través del relleno mineral con la fase del filler activo, rotura a través de la fase de la masilla de asfalto, o rotura en la interface entre la masilla de asfalto y los áridos (19). Por lo tanto, cuando se aplican esfuerzos de tracción, la mezcla podría ser idealizada como un material compuesto: agregado mineral con fase Filler Activo (FA) y la fase de la masilla de asfalto. El comportamiento de estas dos fases es muy diferente, la fase con FA es rígido y frágil, y la fase de la masilla de asfalto es dúctil. En la Figura 7a se grafican aproximadamente las curvas tensión versus la deformación, para la fase de Filler Activo, para la fase del mastic del Asfalto y para la mezcla de como material compuesto.

La curva de FA es empinada y el inicio de la fractura se produce la tensión σ_{cu} y la deformación ε_{cu} (la letra c se utiliza asumiendo el uso de cemento como filler activo). Si se supone un comportamiento elástico, la masilla de asfalto se puede caracterizar por curvas con una pendiente mucho menor, pero con una mayor deformabilidad. Estas curvas varían para diferentes contenidos de asfalto. Si una fracción importante de las partículas finas no están recubiertas por asfalto espumado, el módulo elástico y la fuerza de la masilla será menor en comparación con una masilla donde las partículas finas que estén recubiertas con un contenido de asfalto 'óptimo'. Se observó también un módulo más bajo si el contenido de asfalto supera el óptimo, ya que algunas partes del asfalto no se mezclan con las partículas finas del agregado y se comportarán como lubricante, reduciendo la rigidez y la resistencia de la masilla. La resistencia a la fractura y la tensión de la masilla de asfalto con el contenido óptimo de asfalto es σ_{bu} y ε_{bu} , respectivamente. En la Figura 7a se observa unas curvas compuestas por una combinación de la masilla filler activo y la del asfalto, con sus esfuerzos de rotura (σ_{pu}) que se expresan usando como ley de mezclas (20):

$$\sigma_{pu} = \sigma_{cu} V_c + \sigma_{bu}(1-V_c) \quad (1)$$

donde V_c es el volumen de cemento en el material compuesto. El diagrama y la ecuación (1) explican el efecto mínimo del contenido AE en comparación a los esfuerzos del filler activo de la mezcla. Considerar que la fuerza o tensión máxima de la fase de filler activo es mucho mayor que la del mastic de asfalto, donde un contenido de asfalto por encima o por debajo del óptimo tendrá un pequeño efecto comparativo en la curva tensión-deformación del material compuesto, así como también en la tensión máxima, apoyados en los resultados observados en el trabajo experimental y revisión de literatura.

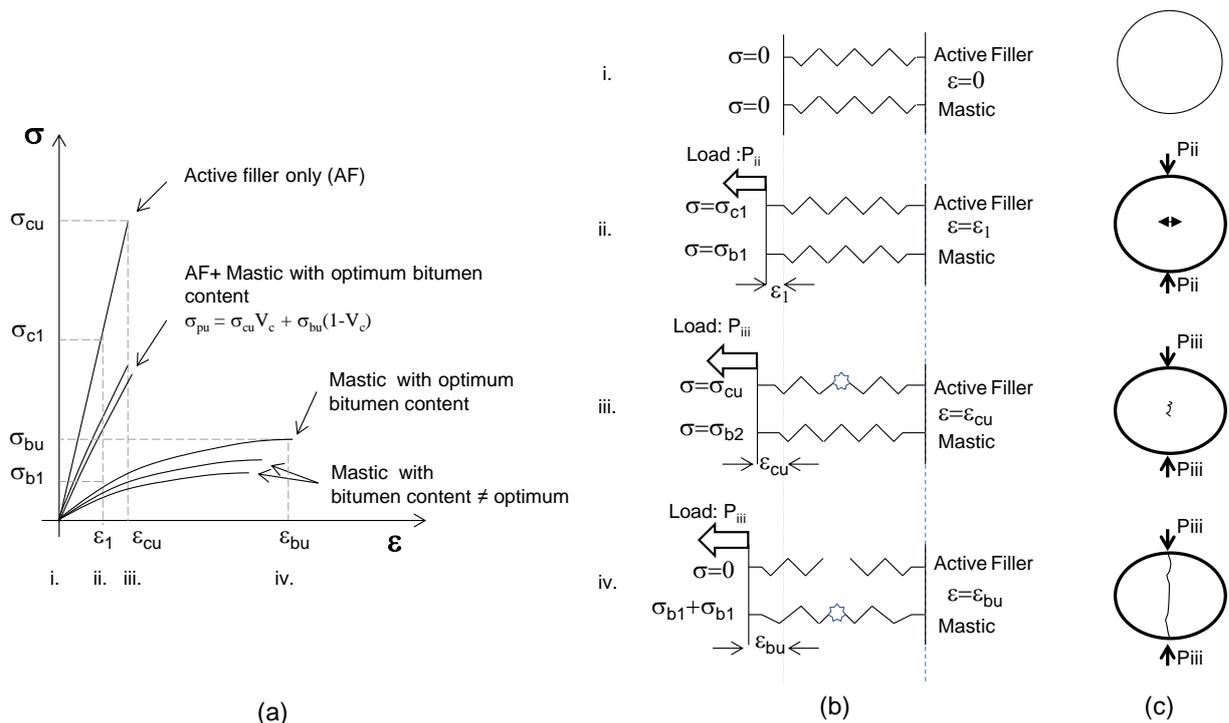


Figura 7: (a) Relación Tensión-Deformación de la mezcla y su composición (b) Esquema Conceptual de la Propiedades Mecánicas de las fases con filler activo y asfalto (c) Ensayos de Tracción Indirecta con representación de Esfuerzos

Interpretación de las Pruebas de Resistencia a la Tracción Indirecta

Las pruebas ITS se describen conceptualmente usando un sistema mecánico con vínculos (resortes) unidireccionales (Figura 7b) que representan comportamiento del FA (cemento) y la masilla de asfalto (mastic) en cuatro etapas:

- Estado i, con tensión cero, antes de aplicar cualquier tipo de carga.
- Estado ii, cuando se aplica la carga monotónica (P) y los resortes toman una tensión de σ_{c1} y σ_{b1} . La deformación ϵ_1 es menor que la deformación ϵ_{cu} de fractura.
- Estado iii, P se incrementa hasta la fractura en la fase de FA (cemento), y deformación ϵ_{cu} .
- Estado iv, Dado que P se mantiene constante o mayor que en la etapa iii, la tensión de la fase de FA fracturado pasa al mastic de asfalto. Desde σ_{cu} es mucho mayor que la de asfalto σ_b , el mastic de asfalto se deforma rápidamente hasta la máxima deformación (ϵ_{bu}) y alcanza la máxima tensión (σ_{cu}).

Interpretación de Resistencia a la Fatiga por Tracción Indirecta

En las pruebas ITF las cargas aplicadas son cíclicas y las tensiones de sometimiento en ambas fases, la del FA y la del mastic de asfalto están muy por debajo de la tensión de rotura. Para la interpretación de los resultados de ensayos a fatiga, se utiliza el diagrama de S-N o Wholer (Figura 8), y donde el eje horizontal es el logaritmo del número de ciclos aplicados (N_f) y el eje vertical es la lectura de deformación unitaria del material compuesto

(probeta). En el diagrama de S-N, se observa el comportamiento del material diferenciadas en tres regiones (21). La Región I, donde la deformación de rotura del material compuesto se extiende horizontalmente con una dispersión de curvas según el contenido de asfalto. En esta región el mecanismo predominante de falla es no-progresiva y representa la carga monotónica descrito anteriormente donde se aplica un sólo ciclo de carga. La Región II define el ciclo de vida a la fatiga, que se rige por el mecanismo progresivo de fractura. En este caso la fractura se da primeramente en la fase del filler activo (FA) que luego continua con la fractura del mastic de asfalto. La falla en esta región es mucho más inestable que la primera (Región I), considerando la fractura. La Región III es la faja donde ya no se dispone de límite a la fatiga o resistencia, ya las grietas por fatiga en la matriz son propensas a desarrollarse, pero la tensión aplicada ya es insuficiente para empeorar la deformación.

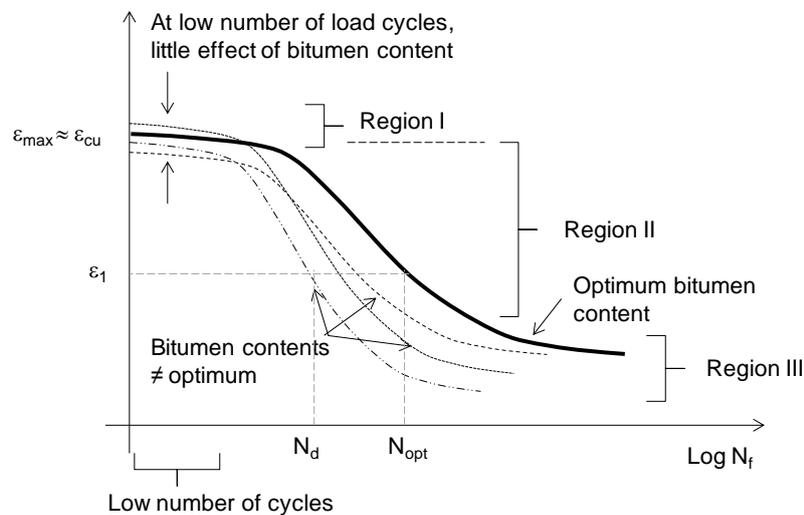


Figura 8: Diagrama de Fatiga S-N de la interpretación de resultados de laboratorio

El efecto de los diferentes contenidos de asfalto también se ilustra en la Figura 8. Para un bajo número de ciclos de carga con grandes deformaciones (por ejemplo, una carga monótonica), la masilla de FA (cemento) y asfalto se fracturan con un comportamiento similar a la Figura 7, y el efecto del contenido de asfalto no necesariamente es claro. Si la amplitud de la deformación o tensión aplicada es baja (por ejemplo ϵ_1), el material compuesto sostiene un mayor número de ciclos de carga y se desarrolla un daño acumulativo. Dado que el FA es frágil, las micro-grietas por fatiga comienzan a crecer en esta fase. El mastic de asfalto comenzará a absorber gradualmente la tensión adicional y la deformación será mayor sin fractura, que a su vez significa que el compuesto resistirá un mayor número de ciclos de carga. Si el contenido de asfalto está cercano a la óptima, las partículas finas se pueden recubrir mediante asfalto espumado, aumentando el módulo, la tensión y el número de ciclos de carga que la mezcla puede soportar.

Mejora de la Resistencia a la Fatiga según la Literatura

Dado el comportamiento con un efecto de mayor número de ciclos y una falla con mayor ductilidad en las mezclas con AE con contenidos 'óptimos' de asfalto observados en el

trabajo experimental, y estas fueron comparadas con otros reportes de investigaciones. Por ejemplo, en Nueva Zelanda un experimento a escala real (22), evaluó el desempeño de pavimentos con secciones estabilizadas con un contenido de cemento del 1% y diferentes contenidos de AE. En la sección con cemento y sin asfalto (0% AE) se produjo una rotura frágil y la superficie del pavimento a escala real en la parte superior mostro una deformación permanente al final del experimento (después de 106 ciclos de carga), mientras que las secciones con AE mostraron indicadores de deterioro inferior y un comportamiento más dúctil, siendo consistente con los resultados de pruebas de laboratorio ITF que se presentan en esta investigación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha observado en la literatura internacional y en el diseño de mezclas FDR con asfalto espumado (AE) que los valores ITS no cambian significativamente para diferentes contenidos AE con presencia de filler activo (cemento) en las mezclas, lo que dificulta justificar los beneficios del uso de AE a las autoridades de transporte e ingenieros. En esta investigación, las pruebas ITS, UCS, TrMx y las ITF se llevaron a cabo en tres mezclas representativas. En base a los resultados de obtenidos en estas pruebas, se extraen las siguientes conclusiones:

- Los resultados en las pruebas ITS en mezclas con 1% de cemento y diferentes contenidos de asfalto no fueron sensibles en la entrega de contenidos 'óptimos' de asfalto, confirmando los resultados encontrados en la literatura de diseños de mezclas locales.
- Las pruebas ITS_secos en mezclas sin filler activo osciló entre 320 kPa y 440 kPa, mientras que los ITS_saturados varió entre 20 kPa a 80 kPa, mostrando la importancia de la adición de filler activo a este tipo de mezclas FDR. Algunas mezclas sin filler activo no sobreviven a la saturación en agua, mostrando la importancia de la adición de filler activo en este tipo de mezclas.
- Se encontraron diferentes curvas de diseño ITS en mezclas con filler activo y sin filler activo. Basados en estos resultados, no se recomienda para definir el 'óptimo' de asfalto utilizando la curva de diseño sin filler activo.
- Los valores en las pruebas UCS en mezclas con 1% de cemento y diferentes contenidos de asfalto aumentan al aumentar el contenido de asfalto. Se observó una tendencia similar en las pruebas MrTx.
- La mezcla preparada con un contenido de 2,5% de asfalto contuvo un mayor número de ciclos de carga en las pruebas ITF, duplicando a la mezcla con 1,25% de asfalto. Además, las mezclas con 2,5% de asfalto mostraron una falla más dúctil en comparación con mezclas preparadas con 1,25% y 3,75% de asfalto. La prueba ITF fue más sensible al contenido de AE en las mezclas, entre todas las pruebas. Además, se observó una tendencia claramente diferente entre los resultados de la prueba ITS y la prueba ITF, aunque ambos utilizan el mismo tipo de muestras y aplicación de carga.

- Para explicar la diferencia entre las pruebas ITS y los resultados de pruebas ITF, se utilizó un modelo mecánico unidireccional simple mediante un diagrama tensión-deformación. El modelo conceptual ilustra por qué se observa poca diferencia en las resistencias en mezclas AE con filler activo. Además, se utilizó un diagrama de S-N para explicar el mejor desempeño de las mezclas AE cuando se aplican tensiones de baja magnitud (mucho menor a la de rotura).

- En general, el programa de laboratorio e interpretación del comportamiento en el material indican que la prueba ITS no proporciona resultados concluyentes, el programa de laboratorio se debe complementar con pruebas ITF para determinar el contenido el óptimo de AE con mayor confiabilidad. El número de ciclos de carga hasta la falla con respecto al contenido de asfalto se debe utilizar para construir curvas de diseño con más sensibilidad ante los contenidos de asfalto.

Agradecimientos

Los autores reconocen: A la Comisión Nacional en su programa de iniciación a la investigación de Ciencia y Tecnología (CONICYT) por la financiación proporcionada_11110139, a Geoff Jameson de la ARRB para la predisposición a aportes técnicos, a Asfaltos Chilenos y Quilín por proporcionar los materiales, a Javier Castro por la revisión final del manuscrito y a las Escuelas de Ingeniería Civil de la Universidad del Desarrollo y la Pontificia Universidad Católica de Chile.

REFERENCES

1. Thenoux, G., Gonzalez, A. and R. Dowling (2006). *Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in Chile*. In Resources, Conservation & Recycling, Vol. 49, Issue 4, Netherlands, pp. 325-339.
2. Asphalt Academy (2009), "*Technical guideline: bitumen stabilised materials: A guide for the design and construction of bitumen emulsion and foamed bitumen stabilised materials*", CSIR, Pretoria, South Africa.
3. Kim, Y. and Lee, D.(2006) "Development of Mix Design Procedure for Cold In-Place Recycling with Foamed Asphalt", Journal of Materials in CE, Vol. 18, No. 1, pp. 116-124.
4. Kim, Y. and Lee, D., Heitzman, M. (2007) "Validation of a new mix design procedure for cold-in-place recycling with foamed asphalt", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 19, No. 11, pp. 1000-1010.
5. Long, F. &Theyse, H. (2002b), "Laboratory Testing for the HVS Sections on Road P243/1", Contract Report CR-2001/69. CSIR, Pretoria, South Africa.
6. Long, F. & Ventura, D. (2004), "Laboratory Testing for the HVS Test Sections on the N7 (TR11/1)", Contract Report CR-2003/56, CSIR, Pretoria, South Africa.
7. Frobel, T. &Hallet, J. (2008). "Laboratory Foamed bitumen stabilisation in New Zealand - Projects do's and don'ts, performance", Proc. Recycling and Stabilisation Conference, New Zealand Institute of Highway Technology, New Plymouth, New Zealand.

8. Gonzalez, A., Cubrinovski, M., Pidwerbesky, B. and Alabaster, D. (2011). "Strength and deformational characteristics of foamed bitumen mixes under suboptimal conditions", *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 137, Issue 1, pp. 1-10, USA.
9. Long, F. & Theyse, H. (2002). "Second Level Analysis of HVS Data from Road P243/1", Contract Report CR-2002/23, CSIR, Pretoria, South Africa.
10. Long, F. & Ventura, D. (2004), "Laboratory Testing for the HVS Test Sections on the N7 (TR11/1)", Contract Report CR-2003/56, CSIR, Pretoria, South Africa.
11. Frobel, T. & Hallet, J. (2008). "Laboratory Foamed bitumen stabilisation in New Zealand - Projects do's and don'ts, performance", *Proc. Recycling and Stabilisation Conference*, New Zealand Institute of Highway Technology, New Plymouth, New Zealand.
12. Jenkins, K. (1999). "Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen", PhD dissertation, Department of Civil Engineering, University of Stellenbosch, South Africa.
13. CSN (2012b) European Standard EN 12697-24, "Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to Fatigue".
14. Halles, F., Thenoux, G., Gonzalez, A. (2013), "Stiffness evolution of granular materials stabilized with foamed bitumen and cement" *Transportation Research Record 2363*, Transportation Research Board, Washington, D.C., 105-112
15. Twagira, M., Jenkins, K. and Ebels, L. (2006). "Characterisation of fatigue performance of selected cold bituminous mixes", *Proceedings 10th International Conference on Asphalt pavements*, 12-17 August, Quebec, Canada.
16. Fu, P., Steven, B., Jones D., Harvey, J., and Bukhari, S., (2009). "Laboratory Test Methods for Foamed Asphalt Mix Resilient Modulus", *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 10, No. 1, pp. 187-212.
17. Jones, D., Fu, P., Harvey, J. & Halles, F. (2008). "Full-depth reclamation with foamed asphalt: final report", *Caltrans Report UCPRC-RR-2008-07*, CPRC, California, United States.
18. Fu, P., Jones, D., Harvey, J. and Halles, F. (2010). "Investigation of the Curing Mechanism of Foamed Asphalt Mixes Based on Micromechanics Principles", *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE*, Vol. 22, No. 1, pp. 29-38.
19. Fu, P., Harvey, J., Jones, D., Chao, Y (2008), "Understanding internal structure characteristics of foamed asphalt mixes with fracture face image analysis" *Transportation Research Record 2057*, Transportation Research Board, Washington, D.C., 20-27.
20. Tarleja, R., *Fatigue of composite materials: damage mechanisms and fatigue-life diagrams*, *Proc R Soc London A*, 378(1981), 461-75.
21. Tarleja, R. & Singh, C.V. (2012), "Damage and failure of composite materials", Cambridge University Press, UK.
22. Gonzalez, A., Cubrinovski, M., Pidwerbesky, B., and Alabaster, D. (2009). "Full scale experiment on foam bitumen pavements in CAPTIF accelerated testing facility", *Transportation Research Record 2094*, TRResearch B, Washington, D.C., 21-29.