

IAG133-06-2013
MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS MODIFICADAS CON AZUFRE
MISTURAS DE ASFALTO MODIFICADAS COM ENXOFRE

Mario Roberto Jair
Shell CAPSA
CABA, Argentina
mario.jair@shell.com

Gary L. Fitts, P.E.
Shell Oil ProductsUS
gary.fitts@shell.com

Resumen

Desde hace muchos años ha existido particular interés en el uso de ligantes alternativos para reemplazar parte del ligante bituminoso en las mezclas asfálticas. Con el embargo de petróleo en los años 70, se investigó el uso de azufre como producto sustituto en Norteamérica con diferentes proyectos construidos en los EEUU y Canadá. A pesar del éxito demostrado, no existió mayor interés en usar mezclas asfálticas extendidas con azufre después de los 80's porque los factores económicos cambiaron a favor del uso de las mezclas asfálticas tradicionales. Ahora existe un renovado interés en ligantes alternativos por razones económicas, medioambientales y para mejorar el desempeño de mezclas asfálticas.

El desarrollo de la tecnología de Shell Thiopave, utiliza un producto sólido que al ser introducido a la mezcla asfáltica a una temperatura similar a una "tibia" ("warm mix") permite la utilización de azufre para reemplazar entre 20 y 25% el volumen de betún en el concreto asfáltico minimizando el riesgo de problemas potenciales en el medioambiente y la salud de los trabajadores. El azufre, además, modifica las características mecánicas de las mezclas asfálticas, disminuyendo su sensibilidad a cambios de temperaturas, mejorando su resistencia a las deformaciones permanentes, aumentando su rigidez a temperaturas altas bajo cargas pesadas/lentas y aumentando su resistencia al derrame de combustible.

El objeto del presente trabajo es mostrar la evolución de las mezclas asfálticas modificadas con azufre desde los 70 hasta hoy como así también la actualidad en cuanto a su diseño, producción y construcción, incluyendo algunos recientes proyectos como ejemplo.

Resumo

Por muitos anos, tem havido um interesse particular no uso de aglomerantes alternativos para substituir parte do fichário betuminosos em misturas asfálticas. Com o embargo do petróleo da década de 1970, investigou o uso de enxofre como um produto de substituição na América do Norte com vários projetos construídos nos Estados Unidos e no Canadá para apesar do sucesso demonstrado, houve maior interesse na utilização de misturas asfálticas estendidas com enxofre

depois da década de 80, porque mudaram de factores económicos a favor de misturas de asfalto tradicional. Há agora um interesse renovado em aglomerantes alternativos por razões econômicas, ambientais e para melhorar o desempenho de misturas asfálticas.

O desenvolvimento da tecnologia da Shell Thiopave, usa um produto sólido que é introduzido para a mistura de asfalto a uma temperatura semelhante a um "warm" (quente mistura) permite o uso de enxofre para substituir entre 20% e 25% do volume de betume no asfalto concreto, minimizando o risco de potenciais problemas ambientais e a saúde dos trabalhadores. Enxofre, além disso, modifica as características mecânicas de misturas asfálticas, diminuindo a sua sensibilidade às mudanças de temperatura, melhorando sua resistência à deformação permanente, aumentando sua rigidez em altas temperaturas sob cargas elevadas / lento e aumentando sua resistência ao derramamento de combustível.

O objeto deste trabalho é mostrar a evolução das misturas asfalto modificado com enxofre dos anos 70 até hoje assim como o presente em termos de design, produção e construção, incluindo alguns projetos recentes como exemplo.

ANTECEDENTES

En los años 70 y a principios de los 80, hubo un marcado interés en la utilización de asfaltos extendidos con azufre (en adelante AEA) debido a la preocupación sobre la disponibilidad y el costo de los ligantes bituminosos. El azufre elemental se encuentra en un estado fundido a las temperaturas de operación de las plantas de mezcla asfáltica, solidificándose para formar una red cristalina a temperaturas de servicio (Figura 1) y siendo, por lo tanto, una práctica alternativa a considerar.



Figura 1: Vista ampliada de cristales de azufre en una mezcla asfáltica

Beatty (Field Evaluation of Sulphur-Extended Asphalt Pavements, Beatty y otros, 1987), revisó el comportamiento de tramos de prueba utilizando AEA y comparándolos con secciones de control utilizando mezclas densas “convencionales” en 26 proyectos diseminados en Estados Unidos. Este estudio concluyó que no existieron significativas diferencias de performance (caracterizada por la observación de ahuellamiento y fisuración) entre las secciones con AEA y las de control. La cantidad de ligante asfáltico reemplazado por azufre elemental fue variable, pero generalmente encontrándose entre 15 y 33%. Como la densidad del azufre es alrededor del doble que la del asfalto, la relación de masa entre ambos varió entre 20/80 y 50/50. Los contenidos volumétricos de asfalto fueron similares o menores que en las mezclas de las secciones de control. En algunos proyectos el azufre fue sustituido en peso, resultando una reducción del total de ligante debido a la diferencia citada de densidades (Performance Evaluation of Sulfur-Extended Asphalt Pavements, Laboratory Evaluation, K.Stuart, 1990)

Otras aplicaciones de los AEA documentadas en esa etapa incluyeron mezclas para bacheo (Thermopatch[®] Guidelines) y arenas asfalto para bases, las cuales presentaron un muy buen comportamiento, comparadas con las de control (Final Evaluation of a Sand-Asphalt-Sulphur Test Section on US 77, 1992)

Ha existido un renovado interés en ligantes alternativos, incluyendo azufre. El Departamento de Transporte de la FWA, publicó un resumen técnico en 2012 (An Alternative Asphalt Binder, Sulfur-Extended Asphalt, Federal Highway Administration, Mayo, 2012.) que proveyó una oportuna actualización de las mezclas con AEA, incluyendo discusiones sobre investigaciones recientes.

En estos proyectos el azufre (fundido) fue combinado con el ligante asfáltico antes del mezclado con los agregados. Esta forma de trabajo podría crear riesgos por la exposición al sulfuro de hidrógeno (H₂S) dado que los niveles del mismo se incrementan exponencialmente cuando los hidrocarburos se exponen a temperaturas mayores a 150°C, como se muestra en la Figura 2.

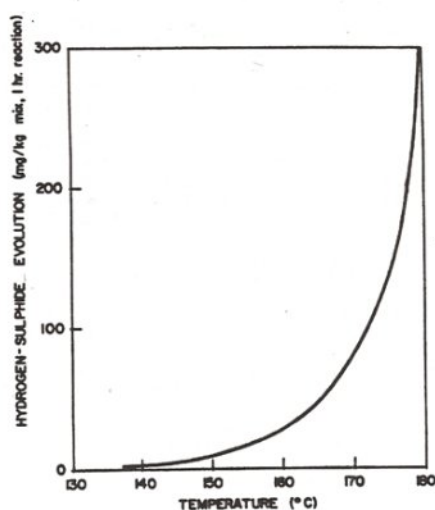


Figura 2: Efecto de la temperatura de la mezcla en la evolución del H₂S

Las tecnologías de mezclas asfálticas “tibias” (Warm Mix Asphalt, en adelante WMA) se han desarrollado rápidamente en la década pasada. Las WMA pueden describirse como aquellas que, por el uso de procesos ó materiales, permiten ser fabricadas a temperaturas significativamente menores y pudiendo además, mejorar su trabajabilidad a temperaturas de compactación más bajas. Algunos han definido a las WMA como mezclas asfálticas producidos por debajo de una cierta temperatura (por ejemplo, 135°C) y/ó usando procesos ó materiales definidos en una calificada lista de proveedores referenciada por el Grupo Técnico de Trabajo de Mezclas Asfálticas Tibias en los Estados Unidos, la cual incluye expertos de agencias y la industria del asfalto de Norteamérica (<http://www.warmmixasphalt.com/>).

Shell Thiopave es una aproximación a la tecnología de los AEA en el cual azufre sólido en forma de pellets se agrega a la mezcla durante la producción para que se funda y disperse en la misma antes de ser descargada desde el mezclador. Esta tecnología permite la utilización de aditivos químicos para generar WMA y mejorar, tal lo dicho, las condiciones de compactación a menores temperaturas que las utilizadas en las mezclas convencionales.

COMPORTAMIENTO CARACTERÍSTICO DE LAS MEZCLAS CON AEA

Históricamente, el objetivo de utilizar los AEA fue simplemente el reemplazar parte del asfalto en la mezcla. Como se mencionó, no existen diferencias significativas en el comportamiento de los pavimentos construídos con AEA en comparación con las secciones de control construídas en los años 70 y 80.

Algunos de los trabajos recientemente realizados han investigado el efecto de utilizar azufre en los parámetros de calidad relacionados con la performance de las mezclas asfálticas en ensayos de laboratorio y tramos de prueba. Cuando se revisan dichos trabajos publicados sobre la utilización de Shell Thiopave (Review of Shell Thiopave Sulphur Extended Asphalt Modifier, Nicholls, Julio 2009; Evaluation of Mixture Performance and Structural Capacity of Pavements Using Shell Thiopave, Timm y otros, 2009; Laboratory Evaluation of Sulfur-Modified Warm Mix, Taylor y otros, 2010; Evaluation of Mixture Performance and Structural Capacity of Pavements Using Shell Thiopave – Comprehensive Laboratory Performance Evaluation; Tran y otros, 2010; Performance and Structural Capacity of Pavements Using Shell Thiopave, Timm y otros, 2012) aparecen las siguientes diferencias de comportamiento entre mezclas utilizando AEA y mezclas convencionales:

- Aumento del módulo a las altas temperaturas de servicio.
- Similar resistencia a la fisuración por bajas temperaturas.
- Mayor resistencia a la fatiga a bajas tensiones de flexión ($<600\mu\epsilon$)
- Menor resistencia a la fatiga a altas tensiones de flexión.

Debido a que un material visco elástico como el asfalto está siendo parcialmente reemplazado por un ligante cristalino, es lógico pensar que la mezcla sería más sensible a niveles de alta tensión, que una mezcla convencional. Sin embargo, la carpeta de rodamiento de una sección evaluada en la pista de la NCAT, con mezcla realizada con Shell Thiopave como parte de un programa de

certificación nacional de WMA, no se fisuró después de 5 millones cargas por eje simple equivalente (ESAL), mientras que la mezcla de control que se comportó mejor en el laboratorio, presentó fisuración después de aproximadamente 2,9 millones ESAL (Design, Construction, and Performance of Sulfur-Modified Mix in the WMA Certification Program at the NCAT Pavement Test Track, Powell y otros, 2012).

Con la aceptación del modelo de diseño estructural mecanicista-empírico que permite la consideración de las propiedades ingenieriles de los materiales de las capas de pavimento, es posible desarrollar un diseño de mezcla asfáltica que, teniendo en cuenta las propiedades del AEA, permita optimizar el diseño.

DISEÑO Y TESTEO DE MEZCLAS CON AEA

Las mezclas con AEA pueden ser diseñadas utilizando los mismos métodos que las mezclas convencionales con leves modificaciones que tengan en cuenta el efecto de usar azufre elemental. La temperatura de mezclado en laboratorio debería ser de alrededor de 140°C y la de compactación de 125°C, independientemente del método de seguido para el moldeo y compactación de las probetas.

Las probetas de mezclas con AEA, deben ser acondicionadas antes de ensayar sus propiedades mecánicas para permitir la cristalización del azufre y su efecto sobre aquéllas. Muchas de las investigaciones de laboratorio que se han hecho sobre mezclas con AEA fueron realizadas sobre probetas acondicionadas durante 14 días a temperatura ambiente, antes de evaluar su rigidez, resistencia al ahuellamiento y sensibilidad al agua. Mahoney (Sulfur Extended Asphalt Mixture Laboratory Investigation, Mahoney y otros, 1982) encontró que acondicionando las probetas a 60°C durante 24hs se obtenían mejoras de rigidez de la mezcla en el corto plazo. Este método ha sido utilizado en los proyectos de Shell Thiopave en USA y Canadá en 2011.

El contenido de asfalto total (combinado) de una muestra de mezcla con AEA, puede ser fácilmente obtenido utilizando el horno de ignición (ASTM D6307 ó equivalente). Dos métodos que permiten determinar convenientemente los componentes de ligante incluyen:

- a) Determinar el contenido de ligante asfáltico de una forma separada mediante el método nuclear (ASTM D4125 o equivalente), ó
- b) Utilizando el horno de ignición en dos etapas, primero calentar la muestra a 300° C por 45 minutos o hasta que se estabilice el peso medido y luego calentar la muestra a 540° C como el estándar que se requiere para el resto de la prueba.

El primer método determina el contenido de ligante total y el de ligante asfáltico por lo cual se puede obtener el de azufre por diferencia, mientras que el segundo método, hace lo contrario. El segundo método utiliza el mismo concepto que el DOT de Texas aplica en el ensayo Tex-217-F, parte III, cuando se requiere estimar la cantidad de madera ó papel residual contenido en tejas de asfalto reclamado.

TECNOLOGÍA SHELL THIOPAVE

A principios de los 2000 se desarrolló una aproximación para el uso de AEA utilizando azufre sólido (pellets) en lugar de azufre fundido, conociéndose como “SEAM”. Shell Canada adquirió dicha tecnología en el año 2002, que fue rebautizada como "Shell Thiopave" en 2008. El Laboratorio de Investigación de Transporte en el Reino Unido completó una revisión del producto que incluía proyectos en los cuales se había utilizado SEAM/Shell Thiopave alrededor del mundo. El mismo concluye en que las principales ventajas de Shell Thiopave incluyeron una mayor "resistencia, durabilidad y posiblemente, estabilidad" y que "las demostradas mejoras de propiedades permitirían disminuir espesores de pavimento, particularmente en aquellos de alto tránsito". Esto es debido al aumento de la rigidez de la mezcla a temperaturas de servicio altas, que se traduce en una reducción de deflexiones debido a la carga y por lo tanto menores daños en el pavimento por las aplicaciones de carga pesada por eje durante condiciones de tiempo cálido.

Shell Thiopave actualmente está formado por azufre desgasificado (bajo H_2S ocluído) proveniente de fuentes de azufre elemental y puede incorporar un aditivo para capturar el H_2S dentro del pellet. Un aditivo sólido para mejorar las condiciones de operación para el trabajador se incluye como parte del sistema. Otros aditivos (químicos para mezclas tibias, polímeros, etc.) también pueden proporcionarse según el proyecto o las necesidades regionales.

Los sistemas de granulación Sandvik's Rotoform y Enersul's GX[®] han sido utilizados para producir los pellets de Shell Thiopave. Las mayores ventajas del uso de azufre en pellets en lugar de fundido son que resulta mucho más seguro y conveniente manejar un producto sólido que uno líquido y caliente.

La cantidad de azufre que se utiliza en la mezcla asfáltica se encuentra en el mismo rango descripto antes para las mezclas con AEA y puede ser variada para acentuar las características específicas y deseadas para el uso de la misma. Para mezclas que requieran un aumento de la rigidez a altas temperaturas de servicio, puede incrementarse la proporción del azufre utilizado potenciando dicho efecto. Para mezclas de Shell Thiopave, las proporciones comunes de azufre/asfalto son entre 30/70 y 40/60, resultando un reemplazo volumétrico de entre 18 y 25% del ligante asfáltico.

Cuando se utilizan aditivos químicos para mezclas tibias, el propósito principal es mejorar la capacidad del ligante para cubrir los agregados cuando se producen mezclas a temperaturas más bajas. Varios tipos de estos aditivos se han utilizado con éxito. Algunos de ellos pueden proporcionar una mejora en la adherencia árido-ligante de manera similar a los aditivos líquidos del tipo “antistripping”. Estos aditivos se manejan e incorporan de la misma forma que en las mezclas sin azufre. En la actualidad, Shell no recomienda el uso de sistemas mecánicos ni aditivos que induzcan a la formación de espuma en el ligante asfáltico como tecnología de mezcla tibia para ser utilizada con Shell Thiopave.

Para que el azufre elemental sirva a su propósito dentro de la mezcla, es necesario que los pellets sólidos se fundan y se dispersen completamente durante el proceso de mezclado en la planta. Al mismo tiempo, el azufre debe ser manipulado para evitar una generación de polvo excesivo y la exposición directa a la llama o a la de un hidrocarburo (por ejemplo, un ligante asfáltico) a

temperaturas superiores a los 150 ° C. Exponer el azufre elemental a la llama directa genera dióxido de azufre (SO₂), que es una sustancia peligrosa que plantea riesgos para la salud y puede evolucionar hacia ácidos sulfurosos que ocasionan corrosión acelerada de los metales. La exposición a un ligante asfáltico a temperaturas excesivas, puede resultar en la liberación de sulfuro de hidrógeno (H₂S), para lo cual existen restricciones y preocupaciones similares. Para mezclas de Shell Thiopave el objetivo para la temperatura de descarga de la mezcla a la salida del mezclador debe ser de alrededor de 130°. Esta temperatura es lo suficientemente alta para derretir y dispersar consistentemente el azufre, reduciendo la probabilidad de formación de H₂S.

PRODUCCIÓN DE MEZCLAS CON SHELL THIOPAVE

Las plantas de fabricación de mezclas asfálticas que están diseñadas para incorporar relativamente altas tasas de pavimento reciclado (RAP) ofrecen similares disposiciones y pueden ser fácilmente adaptadas para trabajar con Shell Thiopave. Se prefieren los tipos de planta en los cuales los procesos de secado y calentamiento de los agregados se realizan separadamente del de mezclado. La mayoría de las plantas requieren cambios menores para almacenar y manipular los pellets de Shell Thiopave y otros aditivos, pero es usualmente recomendado instalar un mezclador continuo secundario cuando se utilizan plantas de tambor-secador-mezclador.

Como con cualquier otro componente de la mezcla se deberán instalar sistemas para la medición precisa del azufre y otros aditivos, los cuales se deben calibrar correctamente. Como el azufre de Shell Thiopave forma parte del asfalto de la mezcla, estos sistemas deben ser capaces de entregar el material con una tolerancia adecuada que permita asegurar el contenido total del ligante según las especificaciones de la mezcla.

Las operaciones y los equipos de colocación y compactación son esencialmente los mismos que los utilizados con las mezclas convencionales. Las diferencias más notables de las mezclas con AEA son su mayor trabajabilidad y que se producen a temperaturas más bajas que las mezclas asfálticas convencionales. Esta mayor trabajabilidad es, en parte, por los aditivos químicos de mezcla tibia, pero fundamentalmente debida al azufre, el cual resulta considerablemente menos viscoso que el ligante asfáltico a las temperaturas típicas de pavimentación y compactación (Figura 3).

Las operaciones de compactación de las mezclas con Shell Thiopave, destinadas a reorientar las partículas de los agregados, deben completarse antes de que el azufre se solidifique en la mezcla, lo cual comenzará a temperaturas inferiores a 115°. Esto es importante cuando se trabaja con mezclas con altas proporciones de azufre/asfalto (40/60 o mayor) y especialmente cuando se realizan retoques manuales. Si el azufre se solidifica completamente antes que se termine la compactación, las partículas de agregado pueden no ligarse completamente, resultando entonces una mezcla propensa a los desprendimientos.

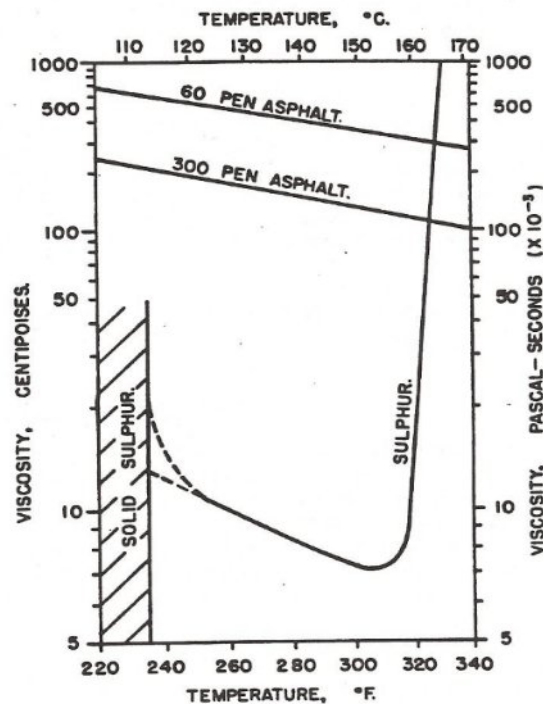


Figura 3: Relación viscosidad-temperatura para azufre y ligantes asfálticos puros

TEMAS DE SALUD, SEGURIDAD Y MEDIOAMBIENTE

Numerosas mediciones han sido recogidas durante la producción y colocación de mezclas con Shell Thiopave para determinar las concentraciones de SO_2 y H_2S , puesto que ambas sustancias se consideran peligrosas y han definido los límites de exposición personal en varias agencias reguladoras del gobierno. Cuando las plantas y equipos funcionan dentro del rango de temperaturas recomendadas y se evita la exposición de azufre elemental a llama directa, los límites de exposición a estas sustancias, tal como se define por el US National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), no han sido excedidos. Como Nicholls concluye (Review of Shell Thiopave Sulphur Extended Asphalt Modifier, 2009) "siempre y cuando la temperatura no supere los 140°C , no existen riesgos de salud o seguridad con la inclusión de pellets de Shell Thiopave en las mezclas asfálticas".

Una pregunta que se hace a menudo es si las mezclas con Shell Thiopave pueden ser recicladas de manera segura. Proyectos pilotos con ésta tecnología han sido ejecutados en Estados Unidos, el Reino Unido y los países bajos donde el pavimento asfáltico recuperado contenía Shell Thiopave y éste RAP fue utilizado para la fabricación de nuevas mezclas asfálticas. Los porcentajes de utilización de ese RAP han sido de hasta de un 50% y utilizando diferentes configuraciones de planta, no existiendo evidencia de liberación excesiva de SO_2 o H_2S . El tema está en manejar una mezcla que contiene azufre elemental y un hidrocarburo (ligante asfáltico) a

temperaturas elevadas y siendo capaces de evitar que se queme el azufre elemental (creación de SO₂) o lo sobrecaliente produciendo H₂S.

En consecuencia, una forma de reciclado no recomendada de éste tipo de mezclas es el del tipo en caliente in situ, donde la superficie del pavimento es calentada con llama ó calor intenso y directo. Claramente, los reciclados en frío o a temperatura ambiente (en planta, in situ ó full depth) no se diferenciarían del de las mezclas convencionales. Se han realizado mediciones de H₂S y SO₂ durante procesos de fresado, los cuales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Mediciones de SO₂ y H₂S durante operaciones de fresado en un proyecto en Longview, Texas, USA.

Actividad	SO ₂ (ppm) 10 Mín. prom.	SO ₂ (ppm) Máx.	H ₂ S (ppm) 10 Mín. prom.	H ₂ S (ppm) Máx.	Total pm Máx.)
Fresado de mezcla en caliente convencional con 100% agregado virgen					
Operador fresadora	0,0	0,5	0,0	0,0	1,4
Fresadora lado derecho	0,1	0,7	0,0	0,0	4,9
Fresadora lado izquierdo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7
Area de fresado	1,3	1,9	0,4	8,0	No medido
Fresado de mezcla tibia con Shell Thiopave					
Operador fresadora	0,0	0,0	0,0	5,0	1,6
Fresadora lado derecho	0,0	0,0	1,4	13,0	1,7
Fresadora lado izquierdo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Area de fresado	0,2	1,8	1,5	12	No medido

Una metodología para obtener créditos de carbono utilizando Shell Thiopave ha sido desarrollada para su uso en la provincia de Alberta, Canadá (Quantification Protocol for the Substitution of Bitumen Binder in Hot Mix Asphalt Production and Usage, 2009) siendo aplicado por primera vez en un proyecto construido cerca de Bonnyville, Alberta, en 2011.

CONCLUSIÓN

La posibilidad de utilizar azufre pre elaborado y producir mezclas asfálticas a temperaturas reducidas con hacen que este material sea una opción real a los ligantes convencionales.

Las mejoras que su uso le confiere a las mezclas asfálticas en términos de performance, sugiere que debería considerarse como una práctica alternativa, particularmente en aquellas regiones donde la provisión de ligantes asfálticos, es limitada.

REFERENCIAS

T.L. Beatty, K. Dunn, E.T. Harrigan, K. Stuart and H. Weber, "Field Evaluation of Sulphur-Extended Asphalt Pavements," Transportation Research Record 1115, 1987.

K.Stuart, "Performance Evaluation of Sulfur-Extended Asphalt Pavements – Laboratory Evaluation", FHWA-RD-90-110, November 1990.

"Thermopatch[®] Guidelines," Shell Canada Limited.

Dale A. Rand, "Final Evaluation of a Sand-Asphalt-Sulphur Test Section on US 77, Kenedy County, Texas." Report No.187-19, Texas Department of Transportation, Division of Materials and Tests, Bituminous Section. March 1992.

"An Alternative Asphalt Binder, Sulfur-Extended Asphalt (SEA)." FHWA-HIF-12-037. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. May, 2012.

J.C. Nicholls, "Review of Shell Thiopave™ Sulphur Extended Asphalt Modifier," Transport Research Laboratory, July 2009.

David Timm, N. Tran, A. Taylor, M. Robbins, B. Powell,: "Evaluation of Mixture Performance and Structural Capacity of Pavements Using Shell Thiopave®, Phase I: Mix Design, Laboratory Performance Evaluation and Structural Pavement Analysis and Design." Report No. 09-05, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, 2009.

Adam Taylor, N. Tran, R. May, R.; Timm, D.; Robbins, M.; Powell, B: "Laboratory Evaluation of Sulfur-Modified Warm Mix." *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. Vol. 79, 2010. pp. 403-441.

Nam Tran, A. Taylor, D. Timm, M. Robbins, B. Powell, and R. Dongre, "Evaluation of Mixture Performance and Structural Capacity of Pavements Using Shell Thiopave – Comprehensive Laboratory Performance Evaluation", National Center for Asphalt Technology, Report No.10-05, September 2010.

David Timm, M. Robbins, N. Tran, J.R. Willis, and A. Taylor, "Evaluation of Mixture Performance and Structural Capacity of Pavements Using Shell Thiopave®, Phase II: Construction, Laboratory Evaluation and Full-Scale Testing of Thiopave® Test Sections – Final Report Report No. 12-07, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, August 2012.

R.B. Powell and A.J. Taylor, "Design, Construction, and Performance of Sulfur-Modified Mix in the WMA Certification Program at the NCAT Pavement Test Track;" Report No. 12-01, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, February, 2012.

Joe P Mahoney, J.A. Lary, F. Balgunaim and T.C. Lee, Sulfur Extended Asphalt Mixture Laboratory Investigation – Mixture Characterization. University of Washington, 1982.

Alberta Environment, "Quantification Protocol for the Substitution of Bitumen Binder in Hot Mix Asphalt Production and Usage, Version 1.0," October 2009.
<http://environment.gov.ab.ca/info/library/8204.pdf>