

Caracterización reológica avanzada de betunes tradicionales y modificados utilizados actualmente en Chile

Advanced rheological characterization of traditional and modified bitumens currently employed in Chile

Felipe Araya*, Álvaro González*, Rodrigo Delgadillo*, Carlos Wahr¹*, Gabriel García*, Rogelio Zúñiga**

* Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso. CHILE

** Constructora Asfalcura S.A. CHILE

Fecha de Recepción:06/09/2012

Fecha de Aceptación:11/09/2012

PAG 198 - 210

Resumen

El objetivo de esta investigación fue obtener una caracterización reológica y clasificación avanzada para un grupo de betunes asfálticos modificados y sin modificar utilizados actualmente en Chile. Estudiando seis betunes asfálticos, provenientes de tres empresas asfalteras del medio nacional. Cada empresa aportó con un betún tradicional y un betún modificado. Los tres betunes tradicionales clasificados como CA 24 y los tres modificados clasificados como 60-80 modificados con SBS. Se realizó la caracterización reológica utilizando un reómetro de corte dinámico y un reómetro de viga en flexión, para los betunes en estado original, envejecimiento primario (RTFOT) y envejecimiento secundario (PAV). Determinando para cada uno la clasificación por grado de desempeño, ensayo de fluencia y recuperación (creep and recovery), curvas maestras y diagramas de Black. Se realizó además una completa batería de ensayos tradicionales al total de los betunes asfálticos, para los tres niveles de envejecimiento mencionados. La caracterización reológica permitió determinar las propiedades fundamentales de los betunes a temperaturas altas, temperaturas intermedias y bajas temperaturas. Estas propiedades en conjunto con una adecuada zonificación climatológica de Chile, podrían ser utilizadas para confeccionar una especificación de betunes moderna para nuestro país. También se demostró que para que los ensayos tradicionales tengan alguna utilidad, deben ser realizados para las siguientes condiciones: altas temperaturas, temperaturas intermedias, bajas temperaturas, ligante original, ligante con envejecimiento primario (RTFOT) y ligante con envejecimiento secundario (PAV). Solamente cuando se realizan ensayos para todas las condiciones anteriores, es posible encontrar información y resultados que son comparables a los de Superpave.

Palabras Clave: Reología, betunes asfálticos, reómetro

Abstract

The purpose of this research was to achieve an advanced rheological characterization and classification for a set of modified and non-modified asphaltic bitumens currently employed in Chile. Six asphaltic bitumens were employed, which are locally produced by three asphalt manufacturer companies. Each company provided a traditional bitumen and a modified bitumen. The three traditional bitumens were classified as CA 24 and, SBS-modified bitumens were classified as 60-80. Rheological characterization tests were carried out by employing a dynamic shear rheometer and a bending beam rheometer on bitumens under original condition; primary ageing (RTFOT) and secondary ageing (PAV). Consequently, performance level, creep and recovery tests, master curves and Black's diagrams were determined for each bitumens. Besides, diverse and complete traditional tests were performed to the whole set of bitumens, in accordance to the aforementioned ageing levels. The rheological characterization enabled the determination of bitumen essential properties at high temperatures, intermediate temperatures and low temperatures. These properties together with an adequate climatologically zoning of Chile could be employed to elaborate an updated specification for bitumens in our country. It was also demonstrated that traditional tests are only useful if they are carried out under the following conditions: high temperatures, intermediate temperatures, low temperatures, original binder, primary aged binder (RTFOT) and secondary aged binder (PAV). Only by executing tests under the aforementioned conditions, it is actually possible to achieve information and results comparable to the ones provided by Superpave.

Keywords: Rheology, asphaltic bitumens, rheometer

1. Introducción

Las especificaciones de betunes asfálticos en Chile son de carácter empírico y consideran mediciones de un set incompleto de propiedades del material (Código MINVU 2008, Delgadillo et al. 2009, Manual de Carreteras 2010). Algunas de las propiedades relevantes del material que no son caracterizadas actualmente son el desempeño a bajas temperaturas, envejecimiento secundario del material y las propiedades mecánicas fundamentales como módulo dinámico y ángulo de fase (Delgadillo et al., 2005, Delgadillo et al., 2006).

1. Introduction

Asphaltic bitumen specifications in Chile are of an empirical nature and they consider measurements for an incomplete set of material properties (Code MINVU 2008, Delgadillo et al. 2009; Highways Manual 2010). Some essential material properties - which are not currently characterized - correspond to behavior at low temperatures, material secondary ageing and essential mechanical properties such as dynamic modulus and phase angle (Delgadillo et al., 2005, Delgadillo et al., 2006).

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: carlos.wahr@usm.cl



En el marco del proyecto Fondef D09I1174 “Desarrollo de Materiales para Recapados Asfálticos Utilizados en la Rehabilitación de Pavimentos Deteriorados”, la Universidad Técnica Federico Santa María implementó un avanzado laboratorio de caracterización de betunes y mezclas asfálticas. Dentro de estos equipos se cuenta un Reómetro de Corte Dinámico, el que fue utilizado, junto al reómetro de Viga de Flexión del Laboratorio Nacional de Vialidad, para la caracterización reológica avanzada de los betunes.

La caracterización de los betunes es una de las primeras etapas del proyecto. Los betunes que mostraron mejor desempeño en esta etapa, fueron seleccionados para ser utilizados en la segunda etapa de caracterización de mezclas asfálticas, actualmente en ejecución.

2. Clasificación por grado de desempeño (PG XX-YY) superpave

2.1 Condiciones de Ensayo

Los ensayos para la clasificación de todos los betunes según el grado de desempeño fueron realizados utilizando el Reómetro de Corte Dinámico (DSR), siguiendo el procedimiento descrito en la sección 8.302.22 del Manual de Carreteras junto con la norma ASTM D7175-08. Cada betún asfáltico se ensayo en estado original, envejecimiento primario (RTFOT) y envejecimiento secundario (PAV).

Para betunes en estado original y envejecimiento primario (RTFOT) las temperaturas de ensayo fueron de 46°C hasta 82°C. Para los betunes con envejecimiento secundario (PAV) las temperaturas disminuyen a medida que se desarrolla el ensayo, dicha temperatura va desde los 40°C hasta 4°C. La frecuencia de los ensayos fue de 10[rad/s] como establece la normativa Superpave.

El ensayo se detiene cuando se alcanza un valor mínimo del parámetro $G^*/\sin(\delta)$ y un valor máximo del parámetro $G^*\sin(\delta)$. G^* es el Módulo complejo de corte y δ es el ángulo de fase.

- Betunes en estado original: $G^*/\sin(\delta) \geq 1$ [KPa]
- Betunes envejecidos en RTFOT: $G^*/\sin(\delta) \geq 2,2$ [KPa]
- Betunes envejecidos en PAV: $G^*\sin(\delta) \leq 5000$ [KPa]

La clasificación por grado de desempeño a bajas temperaturas se realizó utilizando los resultados obtenidos del Reómetro de Viga en Flexión (BBR), ensayos realizados en el Laboratorio Nacional de Vialidad.

La clasificación para temperaturas intermedias se obtuvo en base al parámetro de falla $G^*\sin(\delta)$ para betunes con envejecimiento secundario (PAV).

La clasificación a altas temperaturas se obtuvo en base a los criterios de falla del parámetro $G^*/\sin(\delta)$ en betunes en estado original y con envejecimiento primario (RTFOT), considerando el caso más conservador entre ambos.

La Tabla 1 muestra la clasificación por grado de desempeño considerando el valor exacto con el cual se cumplen los criterios de falla y el valor aproximado que se especifica en la sección 8.301.8 del Manual de Carreteras. También muestra las temperaturas intermedias para betunes con envejecimiento secundario (PAV) y la temperatura esperada del pavimento,

Under the Fondef D09I1174 project framework: “Development of Asphaltic Resurfacing Materials Employed for Damaged Pavements Restoration”, The Federico Santa Maria University implemented an advanced laboratory characterization of bitumen and asphaltic mixes. The equipment employed in this work consists of a Dynamic Shear Rheometer, which was used together with the Bending Beam Rheometer for the advanced characterization of bitumens.

Bitumen characterization is one of the first stages in the project. Bitumens showing the best performance at this stage were selected for their utilization on asphaltic mixes characterization in the second stage, which is currently under execution.

2. Classification according to performance level (PG XX-YY) superpave

2.1 Test Conditions

Classification tests including all bitumens according to their performance levels, were developed by using the Dynamic Shear Rheometer (DSR) and by following the procedure described in section 8.302.00 of the Chilean Highways Manual, as well as the ASTM D7175-08 standard. Each asphaltic bitumen was tested under original condition and with primary ageing (RTFOT) and secondary ageing (PAV).

For bitumens under original conditions and primary ageing (RTFOT), test temperatures varied from 46°C to 82°C. For bitumens with secondary ageing (PAV), temperatures decrease in the course of the test; such temperature varies from 40°C to 4°C. Test frequency was established in 10[rad/s] by the Superpave standard.

The test stops when it achieves a $G^/\sin(\delta)$ minimum parameter value and a $G^*\sin(\delta)$ maximum parameter value. G^* is the complex shear module and δ is the phase angle.*

- Bitumen under normal conditions: $G^*/\sin(\delta) \geq 1$ [KPa]
- Bitumen aged with RTFOT: $G^*/\sin(\delta) \geq 2,2$ [KPa]
- Bitumen aged with PAV: $G^*\sin(\delta) \leq 5000$ [KPa]

The classification according to performance level at low temperatures was developed by employing the results achieved by the Bending Beam Rheometer (BBR) tests, which were carried out at the National Highway Administration’s laboratory.

The classification for intermediate temperatures was obtained by means of the failure parameter $G^\sin(\delta)$ for bitumens with secondary ageing (PAV).*

The classification at high temperatures was obtained by means of the failure parameter criteria $G^/\sin(\delta)$ for bitumens under original conditions and with primary ageing (RTFOT), considering the most conservative case between them.*

The Table 1 shows the classification according to performance level, considering the exact value where failure criteria and the approximate value specified in the section 8.301.8 of Highways Manual are met. It also shows the intermediate temperatures for bitumens with secondary ageing (PAV) and the expected pavement temperature,

la cual se obtiene como la semisuma entre la mínima y la máxima temperatura más 4°C.

which is obtained by means of the semi sum between the minimum, and maximum temperature plus 4°C.

Tabla 1. Resultados clasificación por grado de desempeño
Table 1. Classification Results according to performance level

Datos del Betún/ <i>Bitumen Information</i>			Clasificación Superpave/ <i>SuperPave Classification</i>				Temperatura Intermedia/ <i>Intermediate temperature</i> [°C]	
Betún Asfáltico / <i>Asphaltic bitumens</i>	Tipo de Betún / <i>Type of Bitumens</i>	Empresa / <i>Manufacturer</i>	MC 8.301.8		Exacta/ <i>Exact</i>		De cumplimiento del parámetro de Fatiga / <i>Fatigue fulfillment parameter</i>	Requerida por Superpave / <i>Required by SuperPave</i>
			PG-XX	PG-YY	PG XX	PG YY		
CA 24	Tradicional <i>Traditional</i>	1	64	-22	67	-23	23	26
CA 24	Tradicional <i>Traditional</i>	2	64	-22	69	-26	23	26
CA 24	Tradicional <i>Traditional</i>	3	64	-22	67	-23	22	26
60-80	Modificado <i>Modified</i>	1	70	-22	74	-27	21	28
60-80	Modificado <i>Modified</i>	2	70	-28	74	-29	16	27
60-80	Modificado <i>Modified</i>	3	70	-22	75	-27	20	28

2.2 Comentarios Clasificación por Grado de Desempeño Superpave

Para betunes tradicionales se aprecia que los tres tienen la misma clasificación de acuerdo a las categorías definidas por el Manual de Carreteras. Sin embargo los resultados exactos de cumplimiento de las especificaciones indican que el betún II presenta una susceptibilidad térmica levemente menor, con una mayor rigidez a altas temperaturas y una mayor fluidez a bajas temperaturas. Las temperaturas de cumplimiento de las temperaturas intermedias son muy similares para los tres betunes.

En los betunes modificados se mantiene esta leve diferencia donde el betún II presenta menor susceptibilidad térmica. Respecto de las temperaturas intermedias, el betún II presenta una temperatura mucho más baja para el cumplimiento del parámetro comparado a los otros dos modificados, lo que podría ser un indicador de mejor desempeño ante agrietamiento a temperaturas intermedias para el betún II.

Al comparar betunes tradicionales y modificados se puede establecer que: es evidente el mayor rango de temperatura de los betunes modificados, en particular tienen una mayor temperatura alta de falla, indicando un mejor comportamiento al deterioro de ahuellamiento. Para bajas temperaturas los betunes modificados alcanzan menores temperaturas de falla. Los dos anteriores se traducen en susceptibilidades térmicas significativamente menores para los betunes modificados.

2.2 Classification Comments on Superpave Performance Level

It is observed that these three traditional bitumens have the same classification in accordance with the categories defined by the Highways Manual. However, the exact results of specifications fulfillment indicate that bitumen II shows a lower thermal susceptibility and it has a greater stiffness at high temperatures and, lower fluidity at low temperatures. Fulfillment temperatures for intermediate temperatures are quite similar for the three bitumens.

Modified bitumens also maintain such slight difference, where bitumen II has the lowest thermal susceptibility. In regards to intermediate temperatures, bitumen II shows a far lower temperature of parameter fulfillment compared to the other two modified bitumens, which might be an indicator of better bitumen II performance against pavement cracking at intermediate temperatures.

By comparing traditional and modified bitumens it is possible to establish that: the highest temperature level achieved by modified bitumens is clear; in particular they have a higher failure temperature thus showing a better behavior against rutting failures. At low temperatures modified bitumens reach lower failure temperatures. Thermal susceptibilities are significantly lower for modified bitumens.

3. Curvas maestras

El módulo dinámico es una propiedad fundamental de los betunes asfálticos y de las mezclas asfálticas. Este último constituye uno de los datos de entrada más importantes en el diseño mecanicista de pavimentos flexibles mediante la utilización de modelos elásticos multicapas (Wahr et al., 2008, Wahr et al., 2009). Las fórmulas más modernas de estimación del módulo dinámico (Christensen et al., 2003, Bari et al., 2006) utilizan el módulo complejo del betún para estimar el módulo de la mezcla. Curvas maestras fueron desarrolladas para los distintos betunes, obtenidas a partir de ensayos de módulo complejo a diversas temperaturas y frecuencias.

3.1 Condiciones de Ensayo

Las curvas maestras fueron confeccionadas considerando el betún asfáltico en estado original, con envejecimiento primario (RTFOT) y con envejecimiento secundario o (PAV). Los barridos de frecuencias fueron realizados para temperaturas desde los 5 hasta los 55°C, en intervalos de 5°C. Por ende abarcando tanto altas como bajas temperaturas. Se consideró un rango de frecuencias que no implicara un riesgo para el DSR y que permitiera obtener resultados sin que el equipo se viera expuesto a errores de medición.

Una frecuencia muy baja (menores a 0,1 [rad/seg]) toma bastante tiempo en la obtención de los parámetros, por otro lado una alta frecuencia (por sobre los 100 [rad/seg]) provoca errores de medición, dado que la muestra de asfalto comienza a desintegrarse a bajas temperaturas. Por esta razón se utilizó frecuencias en el rango [0,1- 73] [rad/seg].

El comportamiento del módulo complejo de corte (G^*) tiene mayores variaciones a frecuencias bajas y tiende a mantenerse a frecuencias altas, por esto cada barrido de frecuencias se realizó en una escala logarítmica, de manera de tomar una mayor cantidad de frecuencias bajas para las mediciones.

No hay requisitos del nivel de esfuerzos a aplicar durante los barridos de frecuencias del ensayo, salvo que deben encontrarse en el rango elástico y debe realizarse a deformación constante. Para estos barridos se consideró una temperatura de 5°C, frecuencia de 10 [rad/seg] y un rango de deformaciones variable desde 0,1% hasta 100%. Obteniendo que los betunes asfálticos tradicionales y modificados presentan un comportamiento lineal hasta niveles de deformaciones del 1%. Razón por la cual se consideró una deformación constante de 0,5% para los barridos de frecuencias.

3.2 Confección Curvas Maestras

Estas fueron confeccionadas a una temperatura de referencia de 20°C, los factores de corrimiento o (Shift-Factors) fueron determinados de forma manual para cada una de las temperaturas en el rango 5-55 [°C], cada 5°C.

La Figura 1 muestra las curvas maestras obtenidas para cada uno de los seis betunes asfálticos en su estado original, en escala logarítmica. Los gráficos de envejecimiento primario (RTFOT) y secundario (PAV) no se muestran por limitaciones de espacio, pero pueden ser encontradas en el trabajo original (González, 2012).

3. Master curves

Dynamic modulus is an essential property of asphaltic bitumen and asphaltic mixes. The latter is one of the most relevant input data for flexible pavements mechanistic design by means of the utilization of multi-layer elastic models (Wahr et al., 2008, Wahr et al., 2009). Up-dated estimation formulas used to calculate dynamic modulus (Christensen et al., 2003, Bari et al., 2006) employ the complex modulus to estimate the mix modulus. Master curves were developed for different bitumens, which were obtained from complex modulus tests at different temperatures and frequencies.

3.1 Test Conditions

Master curves were designed considering an asphaltic bitumen under normal conditions, with primary ageing (RTFOT) and secondary ageing (PAV). Frequency scans were carried out at temperatures ranging from 5 to 55°C, at intervals of 5°C. Thus frequency scans covered high temperatures as much as low temperatures. A frequency range was established considering it would not affect DSR and would enable us to obtain results without exposing the equipment to measurement errors.

A very low frequency (less than 0.1 [rad/seg]) takes a very long time before achieving the parameters results. On the other hand, a high frequency (above 100 [rad/seg]) provokes measurement errors, since the asphalt sample begins to disintegrate at low temperatures. That is the reason why frequencies were set within a range of [0.1- 73] [rad/seg].

The behavior of complex shear modulus (G^) shows greater variations at low frequencies, but it tends to keep high frequencies. Therefore, each frequency scan was carried out at a logarithmic scale, in order to cover the greatest amount of low frequencies for measurements.*

There are not requirements for stresses levels to be applied during a frequency scan test, excepting that they must be at an elastic range and they have to be executed at constant deformation. A temperature at 5°C, frequency at 10 [rad/seg] and a variable deformation range from 0.1% up to 100% were considered for these frequency scan tests. Consequently, traditional and modified asphaltic bitumens show a linear behavior up to 1% of deformation levels. That is the reason why a constant deformation of 0.5% was considered for frequency scan tests.

3.2 Elaboration of master curves

They were elaborated at a referential temperature of 20°C, shift-factors were manually determined for each temperature at a 5-55 [°C] range, every 5°C.

Figure 1 shows the master curves obtained for each one of the six asphaltic bitumens under original conditions at a logarithmic scale. Primary ageing (RTFOT) and secondary ageing (PAV) graphs are not shown due to space restrictions, but they can be obtained from the original research job (González, 2012).

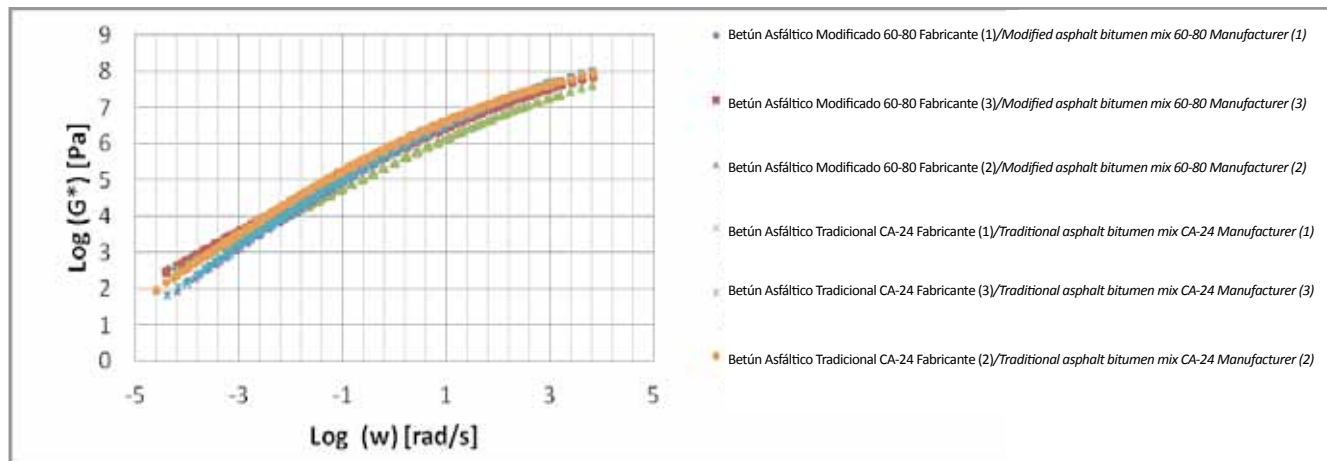


Figura 1. Curva maestra betunes en estado original con G^* en escala logarítmica

Figure 1. Master Curve for bitumens under original conditions with G^* at logarithmic scale

3.3 Comentarios Curvas Maestras

Los betunes tradicionales I y III presentan un comportamiento similar entre sí, en particular cuando poseen envejecimiento secundario (PAV), además se tiene para el betún III la mayor susceptibilidad térmica. El betún II posee valores altos de G^* en gran parte del rango de frecuencias analizado, en especial para frecuencias menores a 100 [rad/seg].

Los betunes asfálticos modificados I y III tienen un comportamiento similar, obteniéndose valores de G^* muy parecidos en todas las temperaturas analizadas.

El betún modificado II destaca por ser el menos susceptible térmicamente de todos los betunes ensayados, característica deseable para un asfalto.

El envejecimiento de los betunes provoca un aumento en la rigidez de los betunes asfálticos, lo cual se aprecia en el aumento del módulo complejo de corte G^* . Diferencia notoria al comparar los valores de G^* con envejecimiento secundario (PAV) con los betunes en estado original. El efecto del envejecimiento primario es menos notorio y en el caso de los betunes tradicionales y el betún modificado III, prácticamente despreciables.

4. Diagramas de black

Los diagramas de Black son gráficos del ángulo de fase versus el módulo complejo. Son herramientas útiles para identificar tipos de betunes y tipos de modificadores. Además, permiten detectar posibles errores en las mediciones.

4.1 Condiciones de ensayo

Las condiciones son las mismas que las utilizadas para la confección de las Curvas Maestras, debido a que ambos parámetros se obtienen del mismo barrido de frecuencias. Los diagramas de Black fueron confeccionadas considerando el betún asfáltico en estado original, con envejecimiento primario (RTFOT) y con envejecimiento secundario (PAV).

3.3 Comments on Master Curves

Traditional bitumens I and III have a similar behavior, particularly when they have a secondary ageing (PAV). Besides, bitumen III has the highest thermal susceptibility. Bitumen II has high G^* values during a great portion of the analyzed frequency range, especially for frequencies lower than 100 [rad/seg].

Modified bitumens I and III have a similar behavior achieving G^* values quite similar for all analyzed temperatures.

The modified bitumen II stands out for having the less thermal susceptibility of all tested bitumens, which is an expected characteristic for asphalts.

The ageing on bitumens provokes an increase of stiffness on bitumens, which is observed with the increase of complex shear modulus (G^*). There is an outstanding difference when comparing G^* values with secondary ageing (PAV) to bitumens under normal conditions. The effect of primary ageing is less evident and in the case of traditional bitumen and modified bitumen III, it is practically insignificant.

4. Black's diagrams

Black's diagrams are phase angle graphs versus complex modulus. They are useful tools for identifying bitumens and modifier agent types. Besides, they enable the identification of potential measurement errors.

4.1 Test Conditions

Test conditions are the same as those employed for the elaboration of Master curves because both parameters are obtained from the same frequency scan. Black diagrams were elaborated considering bitumen under original condition, with primary ageing (RTFOT) and secondary ageing (PAV).

Las temperaturas abarcadas en los barridos de frecuencias fueron desde 5 hasta 55°C, midiendo cada 5°C. Cada barrido de frecuencias consideró una frecuencia inicial de 0,1 [rad/seg] y una frecuencia final de 73 [rad/seg]. Al igual que con las Curvas Maestras no hay limitaciones para los esfuerzos aplicados. Sin embargo, este ensayo debe realizarse a deformación constante, que se estableció igual a 0,5%.

4.2 Comentarios Diagramas de Black

El Diagrama de Black cumplió satisfactoriamente su objetivo, ya que fue un medio efectivo para la determinación de errores de medición (Marastinou et al., 2001, Airey et al., 2002) y permitió mostrar los efectos de los aditivos poliméricos de los betunes modificados.

La mayor fuente de error en las mediciones se produjo como consecuencia del cambio de geometría del reómetro del ensayo (platos paralelos de 8 y 25 mm), lo que queda de manifiesto al observar los Diagramas de Black del betún Modificado 60-80 de la empresa 2 en estado original. En éste se aprecia que las mediciones realizadas con el plato de 8 mm se encuentran desplazadas verticalmente respecto a las mediciones realizadas con el plato paralelo de 25 mm. Un ejemplo de ello se aprecia en la Figura 2, en que al cambiar las geometrías de ensayo, se genera una separación vertical señalada en el Diagrama de Black.

En la Figura 3 se observa que los betunes tradicionales generan curvas suaves, mientras que los betunes modificados producen curvas con un tramo irregular, situación que se atribuye a la presencia de polímero modificador en dichos betunes.

Temperatures considered for frequency scan vary from 5 up to 55°C, measuring every 5°C. Each frequency scan considered an initial frequency of 0.1[rad/seg] and final frequency of 73 [rad/seg]. There are not restrictions for applied stresses as it is the case for Master Curves. However this test must be carried out at constant deformation, which was established equal to 0.5%

4.2 Comments on Black's Diagrams

Black's Diagram satisfactorily fulfilled its purpose, because it was an effective tool for determining measurement errors (Marastinou et al., 2001, Airey et al., 2002) and it showed the effects of polymeric additives of modified bitumens.

The greatest measurement errors source was generated as a consequence of the geometry change of test rheometer (parallel plates of 8 and 25 mm), which is evidenced by observing the Black's Diagramming for Modified Bitumen mix 60-80 from manufacturer 2, under original conditions. It shows that developed measurements carried out with the 8mm-plate are vertically displaced in regards to measurements performed with the parallel 25mm-plate. An example is shown on Figure 2, where the change of test geometry generates a vertical distance indicated by Black's Diagram.

Figure 3 indicates that traditional bitumens generate soft curves, while modified bitumens produce irregular section curves. This situation is explained by the presence of a modifier polymer in such bitumens.

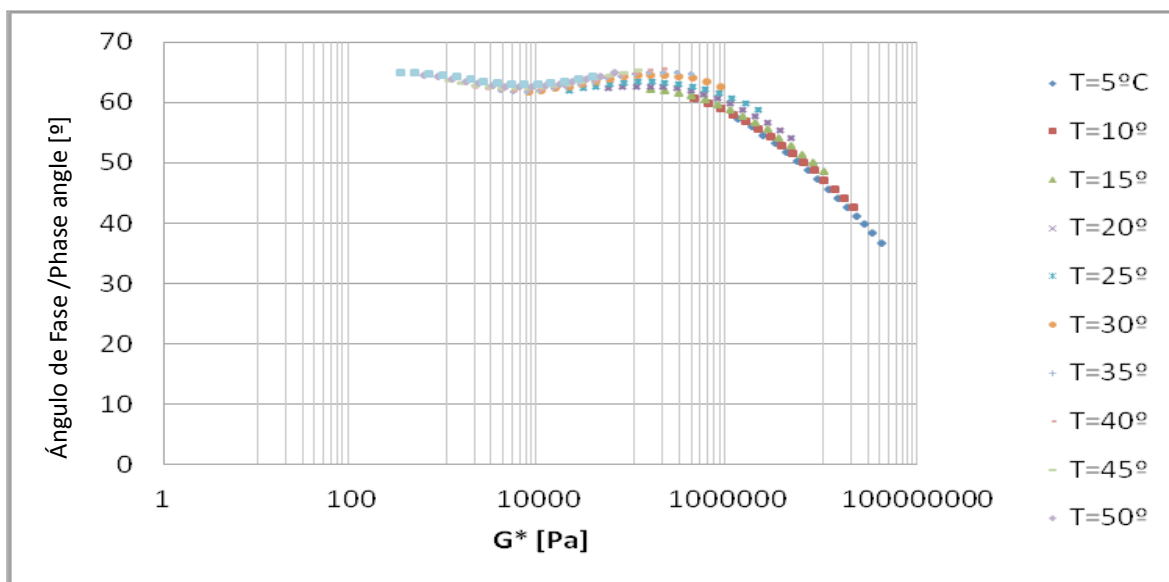


Figura 2. Diagrama de Black betún asfáltico modificado II, estado original
Figure 2. Black's Diagram for modified bitumen II under normal conditions

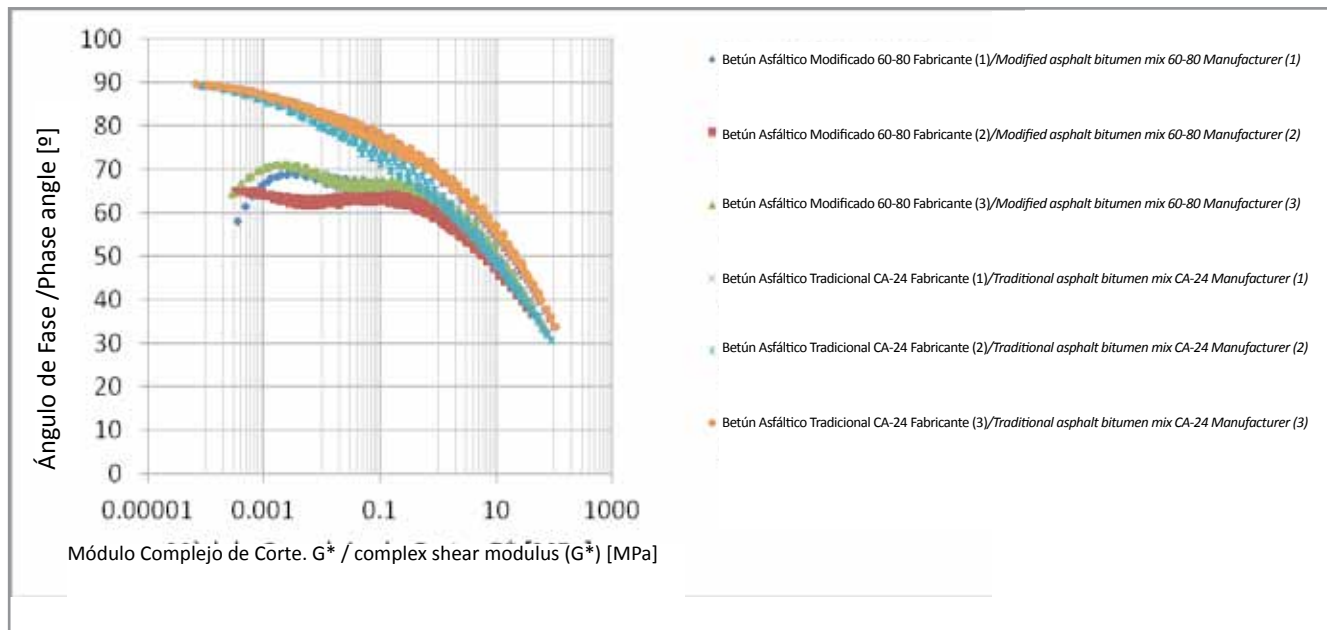


Figura 3. Diagrama de Black todos los betunes, en estado original.

Figure 3. Black's diagramming for all bitumens under original conditions

5. Fluencia y recuperación

5.1 Condiciones de Ensayo

Se utilizó el Reómetro de Corte Dinámico (DSR), donde se realizaron cinco mediciones por cada betún dicho procedimiento se desarrollo acorde a la norma ASTM D7405-10a. Los ensayos se realizaron en los betunes con envejecimiento primario (RTFOT). Este ensayo se realizo a una temperatura de 64°C, la cual se considera representativa de las altas temperaturas.

Según la norma ASTM D7405-10a el ensayo consta de veinte intervalos, cada uno con un ciclo de carga y otro de descanso, los primeros diez intervalos se realizan aplicando un esfuerzo de 100[Pa] en cada ciclo de carga y en los segundos diez intervalos se aplica un esfuerzo de 3200[Pa] durante los ciclos de carga.

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos para el ensayo de fluencia y recuperación (creep and recovery). Las columnas cuatro y cinco muestran los resultados de flexibilidad en fluencia (creep compliance) no recuperable para los betunes.

5. Creep and recovery test

5.1 Test Conditions

A Dynamic Shear Rheometer (DSR) was employed, which carried out five measurements on each bitumen. This procedure was developed in accordance with ASTM D7405-10a standard. Tests were applied on primary ageing bitumens (RTFOT). This test was executed at a temperature of 64°C, which is considered representative of high temperatures.

In accordance with ASTM D7405-10a standard, the test consists of twenty intervals, each one having a loading cycle and an off-time cycle. The first ten intervals are executed by applying a stress of 100[Pa] in each loading cycle, while for the following ten intervals a stress of 3200 [Pa] is applied during loading cycles.

Table 2 shows the results achieved by the creep and recovery test. Columns four and five show the creep compliance, which is not recoverable for bitumens.

Tabla 2. Resumen resultados ensayo flexibilidad y recuperación**Table 2.** Summary of creep and recovery test results

Resumen Creep and Recovery (valores promedios)/Summary of Creep and Recovery Test (average values)						
Betún Asfáltico/ Asphaltic Bitumen mix	R 0,1 [Kpa] [%]	R 3,2 [Kpa] [%]	Jnr 0,1 [Kpa] [1/Kpa]	Jnr 3,2 [Kpa] [1/Kpa]	R dif. %	Jnr dif%
	Porcentaje de/ Recovery	Porcentaje de/ Recovery	Flexibilidad en/ Flexibility in	Flexibilidad en/ Flexibility in	Diferencia de/ Recovery	Diferencia de Flexibilidad/Flexibility difference
	recuperación/ percentage	recuperación/ percentage	fluencia no recuperable/non- recoverable creep	fluencia no recuperable/non- recoverable creep	recuperación/ difference	en fluencia no recuperable/non- recoverable creep
CA 24 Empresa/ Manufacturer (1)	3,65	0,46	2,60	2,86	87,53	9,89
CA 24 Empresa/ Manufacturer (2)	6,45	1,31	2,04	2,32	79,67	13,59
CA 24 Empresa/ Manufacturer (3)	3,38	0,06	2,93	3,26	98,27	11,13
60-80 Empresa/ Manufacturer (1)	38,77	20,03	0,71	1,03	48,13	44,95
60-80 Empresa/ Manufacturer (2)	68,28	62,12	0,39	0,50	9,06	26,93
60-80 Empresa/ Manufacturer (3)	51,79	34,14	0,51	0,77	34,03	51,24

En la Figura 4 se muestra el comportamiento de los betunes tradicionales y modificados.

Figure 4 shows the behavior of traditional and modified bitumen mixes.

**Figura 4.** Resultados de Fluencia y Recuperación (Creep and Recovery) betunes tradicionales y modificados.**Figure 4.** Results of Creep and Recovery tests on traditional and modified bitumens

5.2 Comentarios Fluencia y Recuperación

Entre los betunes tradicionales no existen grandes diferencias, siendo el betún II el que presenta levemente mejor desempeño. Entre los betunes modificados sí existe una diferencia mayor, donde el de mejor desempeño (betún II) presenta niveles de deformación menores al 50% de la deformación del betún de peor desempeño (betún I).

Los betunes modificados presentan deformaciones significativamente menores que los tradicionales. Lo anterior debido fundamentalmente a la recuperación de deformación existente en los ciclos de descanso, mientras que los betunes tradicionales no evidencian esta recuperación.

5.2 Comments on Creep and Recovery Test

There are no significant differences among traditional bitumens and, bitumen II is the one showing a slight better performance. However, there is a significant difference among modified bitumens, where bitumen mix II shows deformation levels lower than 50% compared to the deformation of bitumen I, which is the worst performance.

Modified bitumens show deformations significantly lower than traditional bitumens. This is mainly because of the existing deformation recovery taking place at off-time cycles, while traditional bitumens do not show such recovery.

6. Ensayos tradicionales

6.1 Condiciones de Ensayo

Se realizaron ensayos tradicionales a la totalidad de los betunes asfálticos estudiados. Para el caso de los betunes tradicionales CA 24, éstos fueron ensayados en tres distintos estados: condición original, envejecimiento primario o (RTFOT) y envejecimiento secundario o (PAV). Se consideran estas tres etapas de envejecimiento del betún dado que de esta forma es posible caracterizar representativamente el comportamiento del betún durante la vida útil de éste.

Para el caso de los betunes modificados de tipo 60-80 modificado con SBS, éstos también son ensayados en tres distintos estados: condición original, envejecimiento primario o (RTFOT) y envejecimiento secundario o (PAV), para este tipo de betún también se realizó el ensayo para estabilidad al almacenamiento.

Los resultados se muestran en las Tabla 3 y 4 respectivamente.

6. Traditional tests

6.1 Test Conditions

Traditional tests were executed on the total amount of studied bitumens. In the case of traditional bitumens CA 24, they were tested under three different conditions: original condition, primary ageing (RTFOT) and secondary ageing (PAV). These three ageing stages of bitumen were considered because in this way it is possible to representatively characterize the behavior during the bitumen life span.

In the case of modified bitumens 60-80, modified with SBS, they are also tested under three different conditions: original condition, primary ageing (RTFOT) and secondary ageing (PAV). A storage stability test was also carried out for this bitumen type.

The results are shown on Table 3 and 4, respectively.

Tabla 3. Resultados betunes tradicionales

Table 3. Results from traditional bitumens

Betún Asfáltico Tradicional - CA 24/Traditional Bitumen Mix – CA 24					
N°/#	Ensayo/Test	Unidad/ Unit	Betún I/ Bitumen mix I	Betún II/ Bitumen mix II	Betún III/ Bitumen mix III
ORIGINAL – CA24					
1	Penetración a 25°C, 100gr, 5seg, 0,1mm/Penetration at 25°C, 100 gm, 5 sec, 0.1m	[dmm]	66	65	64
2	Penetración a 40°C/Penetration at 40°C	[dmm]	300	265	240
3	Ensayo de la Mancha [% Xilol]/Spot test (% Xilol)	[%Xilol]	<20	<30	<20
4	Ductilidad a 25°C, 5cm/min, [cm]/Bending performance at 25°C, 5cm/min, [cm]	[cm]	>150	>150	>150
5	Ductilidad a 15°C, 5cm/min, [cm]/Bending performance at 15°C, 5cm/min, [cm]	[cm]	>150	83	>150
6	Ductilidad a 5°C, 5cm/min, [cm]/Bending performance at 5°C, 5cm/min, [cm]	[cm]	3	1	1
7	Punto de Inflamación, [°C]/Flash point, [°C]	[°C]	316	324	301
8	Solubilidad en Tricloroetileno, [%]/Trichloroethylene Solubility, [%]	[%]	100,0	99,99	99,95
9	Viscosidad Cinemática a 135°C [Centistokes]/Cinematic viscosity at 135°C [centistokes]	[cSt]	445	518	408
10	Viscosidad Absoluta a 60°C, 300mm Hg, [poise]/Absolute viscosity at 60°C, 600 mm Hg, [poise]	[poise]	2729	3029	2575
11	Punto de Ablandamiento, [°C]/Yielding point, [°C]	[°C]	48,6	49,8	49,0
12	Punto de Fragilidad de Fraas/Fraas brittle point	[°C]	-11	-13	-14
13	Índice de Penetración/Penetration index	IP	-0,9	-0,6	-0,9
RTFOT – CA24					
14	Penetración a 25°C, 100gr, 5seg, 0,1mm/Penetration at 25°C, 100 gm, 5 sec, 0.1m	[dmm]	36	37	43
15	Ductilidad a 25°C, 5cm/min, [cm]/Bending performance at 25°C, 5cm/min, [cm]	[cm]	>150	103	>150
16	Ductilidad a 15°C, 5cm/min, [cm]/Bending performance at 15°C, 5cm/min, [cm]	[cm]	24	11	85
17	Ductilidad a 5°C, 5cm/min, [cm]/Bending performance at 5°C, 5cm/min, [cm]	[cm]	1	0	0
18	Punto de Ablandamiento, [°C]/Yielding point, [°C]	[°C]	53,4	55,6	52,0
19	Variación Punto de Ablandamiento, [°C]/Variation of yielding point [°C]	[°C]	4,8	5,8	3,0
20	Punto de Fragilidad de Fraas/Fraas brittle point	[°C]	-11	-10	-14
21	Pérdida por Calentamiento, Variación Masa [%]/Loss due to heating, Mass variation [%]	[%]	0,02	0,08	0,02
22	Viscosidad Absoluta a 60°C, 300mm Hg, [poise]/Absolute viscosity at 60°C, 300 mm Hg, [poise]	[poise]	6521	8938	5929
23	Índice de Durabilidad/Durability index	ID	2,4	3,0	2,3
23	Penetración, ([%] del original)/Penetration ([%] of the original)	[%]	54,5	56,6	67,2
PAV CA24					
24	Penetración a 25°C, 100gr, 5seg, 0,1mm/Penetration at 25°C, 100 gm, 5 sec, 0.1m	[dmm]	19	22	25
25	Ductilidad a 25°C, 5cm/min, [cm]/Bending performance at 25°C, 5cm/min, [cm]	[cm]	44	22	130
26	Ductilidad a 15°C, 5cm/min, [cm]/Bending performance at 15°C, 5cm/min, [cm]	[cm]	6	4	6
27	Ductilidad a 5°C, 5cm/min, [cm]/Bending performance at 5°C, 5cm/min, [cm]	[cm]	0	0	0
29	Viscosidad Absoluta a 60°C, 300mm Hg, [poise]/Absolute viscosity at 60°C, 300 mm Hg, [poise]	[poise]	31667	31117	21733
29	Punto de Ablandamiento, [°C]/Yielding point, [°C]	[°C]	61,6	64,0	58,2
30	Punto de Fragilidad de Fraas/Fraas brittle point	[°C]	-7	-3	-9



6.2 Comentarios Ensayos Tradicionales

Los resultados obtenidos para los betunes tradicionales establecen que en el estado original, analizando para temperaturas intermedias, la penetración a 25°C obtenida es similar pues I,II y III presentan nivel muy similares de penetración con diferencias de solo 2 dmm entre la mayor y la menor. En cambio la ductilidad a 15°C entrega diferencias, ya que, el valor del betún II es mucho menor en comparación a los otros dos, lo cual según el criterio de (Kandhal 1977) indicaría un probable menor desempeño al agrietamiento por fatiga a lo largo del tiempo. Para altas temperaturas analizando la viscosidad absoluta se puede notar que los tres betunes están dentro del rango de viscosidad de 3000 ± 600 poises, viscosidad especificada para un AC 30 según la norma ASTM D3381-05. Respecto del punto de ablandamiento, los tres betunes presentan valores similares con variaciones de un poco más de 1°C entre el mayor y el menor de los tres.

6.2 Comments on tradition Tests

The results obtained for traditional bitumens established that penetration at 25°C (under original conditions, analysis that performed at intermediate temperatures) is quite similar, because I, II and III bitumens have a similar penetration level showing differences of only 2 dmm, between the highest and lowest temperature. Contrarily, bending performance at 15°C delivers differences, because the bitumen II value is much lower in comparison to the two others. According to (Kandhal 1977) standard, it would indicate a potential lower fatigue cracking performance throughout time. By analyzing absolute viscosity at high temperatures, it can be observed that three bitumens are within a viscosity range of 3000 ± 600 poises, which is the specified viscosity for an AC 30 according to the ASTM D3381-05 standard. As far as yielding point is concerned, the three bitumens showed similar values, with variations of 1°C between the highest and the lowest of them.

Tabla 4. Resultados betunes modificados

Table 4. Results from modified bitumens

Nº/#	Betún Asfáltico Modificado 60-80/Modified Bitumen Mix – 60-80				
	Ensayo/Test	Unidad/ Unit	Betún I/Bitumen mix I	Betún II/Bitumen mix II	Betún III/ Bitumen mix III
Original - Betún Asfáltico Modificado 60-80/ Original - Modified Bitumen Mix – 60-80					
1	Penetración a 25°C, 100g, 5s, 0,1mm/Penetration at 25°C, 100 gm, 5 sec, 0.1mm	[dm]	62	77	64
2	Ductibilidad a 25°C, 5cm/min, [cm]/Bending performance at 25°C, 5cm/min, [cm]	[cm]	118	110	124
3	Ductibilidad a 15°C, 5cm/min, [cm]/Bending performance at 15°C, 5cm/min, [cm]	[cm]	>150	100	136
4	Ductibilidad a 5°C, 5cm/min, [cm]/Bending performance at 5°C, 5cm/min, [cm]	[cm]	44	58	51
5	Punto de Inflamación, [°C]/Flash point, [°C]	[°C]	309	315	307
6	Punto de Ablandamiento, [°C]/Yielding point, [°C]	[°C]	69,9	68,0	68,8
7	Punto de Fragilidad de Fraas/Fraas brittle point	[°C]	-17	-22	-17
8	Recuperación Elástica, 13°C [%]/Elastic recovery, 13°C [%]	[%]	88	87	87
9	Recuperación Elástica, torsión,25°C, [%]/Elastic recovery from tensile stress, 25°C, [%]	[%]	62	79	71
10	Recuperación Elástica, torsión,40°C, [%]/Elastic recovery from tensile stress, 40°C, [%]	[%]	48	73	45
11	Índice de Penetración/Penetration index	IP	3,3	3,8	3,3
12	Perfil Viscosidad Rotacional (135/150/170/190°C)/ Rotational viscosity profile (135/150/170/190°C)	[poise]	135/150/170/190 12.6/5.43/2.55/1.29	135/150/170/190 18.06/8.82/4.36/2.42	135/150/170/190 1141/523/255/130
Estabilidad al Almacenamiento / STORAGING ESTABILITY					
13	Viscosidad Rotacional (170°C), Superior/Inferior/Rotational viscosity (170°C). Highest/lowest	[poise]	2,33 / 2,33	4,56 / 4,59	240 / 240
	Ensayo de Separación (Dif. Visc. Rotacional 170°C)/Separation test (Dif. Rotational Viscosity 170°C)	[%]	0	0,7	0,2
14	Punto de Ablandamiento, [°C]. Superior/Inferior/Yielding point, [°C]. Highest/lowest	[°C]	56,0 / 56,2	69,0 / 69,8	55,8 / 55,5
	Diferencia Punto de Ablandamiento/Yielding point difference	[°C]	0,2	0,8	0,3
15	Penetración a 25°C, 100g, 5s, 0,1. Superior/Inferior/Penetration at 25°C, 100 gm, 5 sec, 0.1mm. Highest/lowest	[dm]	59 / 59	75 / 75	60 / 56
	Diferencia Penetración/Penetration difference	[dm]	0	0	4
RTFOT - Betún Asfáltico Modificado 60 -80 / RTFOT - MODIFIED ASPHALT MIX 60-80					
16	Variación de la Masa/Mass variation [%]	[%]	0,03	0,04	0,03
17	Penetración a 25°C, 100gr, 5seg, 0,1mm/Penetration at 25°C, 100 gm, 5 sec, 0.1mm	[dmm]	44	61	43
18	Variación Penetración a 25°C/Penetration variation at 25°C, [%]	[%]	71	79	67
19	Ductibilidad a 25°C, 5cm/min, [cm]/Bending performance at 25°C, 5cm/min, [cm]	[cm]	108	95	101
20	Ductibilidad a 15°C, 5cm/min, [cm]/Bending performance at 15°C, 5cm/min, [cm]	[cm]	105	65	87
21	Ductibilidad a 5°C, 5cm/min, [cm]/Bending performance at 5°C, 5cm/min, [cm]	[cm]	23	30	19
22	Punto de Ablandamiento, [°C]/Yielding point, [°C]	[°C]	65,6	63,6	66,7
	Variación Punto de Ablandamiento, [°C]/Yielding point variation, [°C]	[°C]	-3,4	-4,4	-2,1
23	Recuperación Elástica, 13°C [%]/Elastic recovery, 13°C [%]	[%]	83	83	82
24	Recuperación Elástica, torsión, 25°C, [%]/Elastic recovery from tensile stress, 25°C, [%]	[%]	64	72	67
25	Recuperación Elástica, torsión, 40°C, [%]/Elastic recovery from tensile stress, 40°C, [%]	[%]	56	57	58
	Punto de Fragilidad de Fraas/Fraas brittle point	[°C]	-13	-20	-15
PAV - Betún Asfáltico Modificado 60 - 80 / PAV - MODIFIED ASPHALT MIX 60-80					
26	Penetración a 25°C, 100gr, 5seg, 0,1mm/Penetration at 25°C, 100 gm, 5 sec, 0.1mm	[dmm]	26	29	22
27	Ductibilidad a 25°C, 5cm/min, [cm]/Bending performance at 25°C, 5cm/min, [cm]	[cm]	66	33	75
28	Ductibilidad a 15°C, 5cm/min, [cm]/ Bending performance at 15°C, 5cm/min, [cm]	[cm]	32	24	45
29	Ductibilidad a 5°C, 5cm/min, [cm]/ Bending performance at 5°C, 5cm/min, [cm]	[cm]	6	7	5
30	Punto de Ablandamiento, [°C]/Yielding point, [°C]	[°C]	65,6	69,0	68,7
31	Recuperación Elástica, 13°C [%]/Elastic recovery, 13°C [%]	[%]	71	74	68
32	Recuperación Elástica, torsión, 25°C, [%]/Elastic recovery from tensile stress, 25°C, [%]	[%]	35	54	37
33	Recuperación Elástica, torsión, 40°C, [%]/Elastic recovery from tensile stress, 40°C, [%]	[%]	42	75	59
34	Punto de Fragilidad de Fraas/Fraas brittle point	[°C]	-9	-15	-11



En estado de envejecimiento primario o (RTFOT) para temperaturas intermedias, las penetraciones a 25°C muestran mayores diferencias que para el betún original, con variaciones de 7dm entre el más blando (betun III, 43 dmm) y el más duro (betún I, 36 dmm), pero siempre dentro de un rango bajo. La ductilidad a 15°C está todavía dentro de un rango aceptable para los betunes I y III, pero bastante baja para el betún II, con un valor de 11. Este último valor indica una alta susceptibilidad al agrietamiento en un futuro cercano para el betún II, considerando que un valor menor a 10 es considerado negativo (Kandhal 1977).

En estado de envejecimiento secundario o (PAV), las diferencias en las penetraciones se mantienen muy parecidas al estado RTFO. Nuevamente la ductilidad a 15°C del betún II resulta ser el menor, con un valor de 4, que de acuerdo a la literatura (Kandhal 1977) existente indica un riesgo importante de agrietamiento. Los otros dos betunes tienen una ductilidad a 15°C igual a 6, lo que indicaría algún riesgo pérdida superficial de material en edades avanzadas del pavimento.

Para bajas temperaturas el punto de fragilidad Fraas del betún II es 6°C más alto que el betún III y 4° más alto que el betún I, indicando un peor probable desempeño a bajas temperaturas.

De los tres betunes tradicionales, el betún III mostró los menores niveles de envejecimiento, evidenciado por las penetraciones retenidas y los índices de durabilidad.

Los betunes modificados en estado original indican que para temperaturas intermedias, según las penetraciones obtenidas a 25°C, el betún II resulta ser más blando, cercano a las 80 dmm, mientras los otros dos están más cercanos a las 60 dmm. La ductilidad a 15°C del betún II nuevamente es menor que los otros dos.

En estado de envejecimiento primario (RTFOT), para temperaturas intermedias, la penetración a 25°C del betún II nuevamente es significativamente mayor, superando en 17 y 18 dmm a los otros betunes. En ductilidad a 15°C nuevamente el betún II es menor que el resto. Para bajas temperaturas nuevamente el betún II tiene el valor inferior para el punto de fragilidad de fraas. Para altas temperaturas se tiene que el punto de ablandamiento de los tres betunes es similar.

En envejecimiento secundario o (PAV) para temperaturas intermedias la penetración indica que el betún II es el más blando. Para ductilidad a 15°C el betún III destaca por tener un valor más alto que el resto, aunque según el criterio de Kandhal los tres betunes presentarían un comportamiento satisfactorio.

Para el punto de fragilidad de Fraas el betún II posee un valor 5°C por debajo de los otros dos, indicando probable mejor comportamiento a baja temperatura.

Comparando resultados entre betunes tradicionales y modificados se puede establecer que los niveles de penetración no difieren mucho para el estado original en los seis betunes. Sin embargo hay diferencias fundamentales a altas y bajas temperaturas, donde los betunes modificados demuestran susceptibilidades térmicas significativamente menores. Al envejecer los betunes modificados conservan valores más altos de ductilidad lo cual indicaría mejores resistencias al agrietamiento por fatiga.

For the primary ageing condition (RTFOT) at intermediate temperatures, penetrations at 25°C show greater differences than for original bitumens, with variations of 7dmm between the softest (bitumen III, 43dmm) and the hardest (bitumen I, 36 dmm), but always within a low range. Bending performance at 15°C is still within an acceptable range for bitumens I and III, but quite lower for bitumen II, which value is at 11. The latter value indicates a high cracking susceptibility in a near future for bitumen II, considering that a value lower than 10 is considered as negative (Kandhal 1977).

In secondary ageing condition (PAV), penetration differences are also quite similar to RTFOT condition. Once again bending performance of bitumen II happens to be the lowest, delivering a value of 4, which in accordance to the existing literature (Kandhal 1977) indicates there is a relevant cracking risk. The other two bitumens have a bending performance equal to 6 at 15°C, which would indicate some surface material loss risk at older pavement ages.

Fraas brittle point at low temperatures for bitumen II is 6°C higher than bitumen III, 4°C higher than bitumen I, thus showing a potential worse performance at low temperatures.

From three traditional bitumen mixes, the bitumen mix III showed the lowest ageing levels, which is evidenced by the three held back penetrations and durability indexes.

Modified bitumens under original conditions indicate that for intermediate temperatures, the bitumen II happens to be the softest, close to 80 dmm, in accordance with penetrations obtained at 25°C; while the other two bitumens are close to 60 dmm. Bending performance at 15°C for bitumen II is once again lower than the two other bitumens.

Under primary ageing condition (RTFOT) for intermediate temperatures, the penetration at 25 °C of bitumen II is once again significantly higher, exceeding by 17 and 18 dmm the other bitumen mixes. Bending performance at 15°C of bitumen II is lower than the others. At low temperatures, the bitumen II has the lowest value of Fraas brittle point. At high temperatures it was found that the yielding point is similar for the three bitumens.

Under secondary ageing condition (PAV) for intermediate temperatures, penetration indicates that bitumen II is the softest. For bending performance at 15°C, the bitumen stands for having the highest value of all bitumens, although according to Kendal's standard the tree bitumens have a satisfactory behavior.

For Fraas brittle point, the bitumen II has a value 5°C lower than the other two bitumens, thus showing a better potential behavior at low temperature.

By comparing results between traditional and modified bitumens, it can be concluded that penetration levels do not greatly differ for the original condition of the six bitumens. However, there are remarkable differences at high and low temperatures, where modified bitumens have significantly lower thermal susceptibility. By ageing modified bitumens, they maintain the highest bending performance values, which might indicate a better fatigue cracking resistance.

7. Conclusiones

La caracterización por desempeño Superpave permitió determinar las propiedades fundamentales (módulo complejo y ángulo de fase) de los betunes a altas temperaturas, temperaturas intermedias y bajas temperaturas. Los tres betunes tradicionales clasificaron como PG64-22. Dos de los betunes modificados clasificaron como PG70-22 y uno como PG70-28. Esta diferencia, sin embargo, no fue tan significativa cuando se considera las temperaturas exactas de cumplimiento de los parámetros de la especificación en vez de las categorías discretas propuestas (-27 y -29°C, respectivamente). Estas clasificaciones de grado PG, en conjunto con una adecuada zonificación climatológica de nuestro país, podría ser utilizada para confeccionar una especificación de betunes más moderna para nuestro país.

Las curvas maestras construidas para cada uno de los betunes permite determinar la rigidez y elasticidad de estos ligantes para cualquier combinación de temperatura y frecuencia de carga. El módulo complejo de cada betún puede ser utilizado, por ejemplo, en la estimación del módulo dinámico de la capa asfáltica para los diseños de pavimentos a través de programas multicapas elásticos. Las curvas maestras permitieron además visualizar la menor susceptibilidad térmica de los betunes modificados.

Los diagramas de Black fueron una herramienta muy útil para la puesta en marcha del reómetro de corte dinámico, pues permitieron analizar los datos y detectar errores de medición para hacer las correcciones pertinentes. Además, a partir de estos gráficos fue posible detectar la utilización del modificador SBS en los ligantes modificados.

Los ensayos de fluencia y recuperación permitieron evidenciar las importantes diferencias de elasticidad existentes entre los betunes tradicionales y los modificados, al ser sometidos a cargas repetidas como las cargas de tráfico en los pavimentos viales. Esta recuperación elástica se traduce en menores deformaciones permanentes en los betunes modificados a altas temperaturas.

8. Agradecimientos

Esta investigación fue financiada parcialmente por Conicyt, a través del proyecto Fondef D09I1174. Se agradece también el aporte del Laboratorio Nacional de Vialidad, Constructora Asfalcura S.A., Ruta del Maipo S.A., OHL Concesiones Chile, Sociedad Concesionaria Autopista Central S.A. Se reconoce también el aporte a la investigación de los siguientes alumnos tesistas de la Universidad Técnica Federico Santa María: María Paz Castillo, Felipe Flores y Mauricio Toro.

7. Conclusions

The SuperPave performance characterization enabled the determination of essential properties (complex modulus and phase angle) of bitumens at high temperatures, intermediate temperatures and low temperatures. The three traditional bitumens were classified as PG64-22. Two modified bitumens were classified as PG70-22 and one as PG70-28. However, such difference is not quite significant if the exact temperatures of fulfillment parameters in the specification are considered, instead of the proposed discrete categories (-27 y -29°C, respectively). These PG classifications levels, together with a proper climatologically zoning of Chile could be used to elaborate an up-dated bitumens specification for our country.

Master curves elaborated for each bitumens enables the determination of binders stiffness and elasticity at any temperature and loading frequency combination. The complex model of each bitumen can be used, for example, for the estimation of the dynamical modulus of the asphaltic layer in pavement designs by means of elastic multi-layers programs. The master curves also enabled the visualization of thermal susceptibility for modified bitumens.

Black's diagrams became a very useful tool for starting up the dynamic shear rheometer, because they enabled the development of data analysis and the detection of measurement errors, which were consequently corrected. Besides, by means of these diagrams it was possible to detect the use of SBS modifier agent in modified binders.

Creep and recovery tests enabled us to witness relevant existing elasticity differences between traditional and modified bitumens, when they were subject to repetitive loads, such as road pavement traffic loads. This elastic recovery turns into less permanent deformations on modified bitumens at high temperatures.

8. Acknowledgments

This research job was partially financed by Conicyt, by means of Fondef D09I1174 project. The contribution made by Laboratorio Nacional de Vialidad, Constructora Asfalcura S.A., Ruta Del Maipo S.A., OHL Concesiones Chile, Sociedad Concesionaria Autopista Central S.A. is highly appreciated. Our public recognition to the following thesis students: Maria Paz Castillo, Felipe Flores y Mauricio Toro from the Universidad Técnica Federico Santa Maria, who contributed in this research job.

9. Referencias/References

- Airey G. (2002)**, Use of Black Diagrams to Identify Inconsistencies in Rheological Data, Road Materials and Pavement Design, Vol.3, 2002, p 403-424.
- Christensen D. W., T. Pellien y R. F. Bonaquist (2003)**, "Hirsch Model for Estimating the Modulus of Asphalt Concrete". Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.72 2003.
- Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación (2008)**, Ministerio de Vivienda y Urbanismo. División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional. 2008.
- Delgadillo R., Wahr C. Zuñiga. y Silva J. (2009)**, "En Busca de una Especificación Moderna de Ligantes Bituminosos para Chile". Anales XV Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto CILA, 22 - 27 Nov 2009, Lisboa, Portugal.
- Delgadillo R. y Bahia H. (2005)**, "Rational Fatigue Limits For Asphalt Binders Derived From Pavement Analysis". Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 74, 2005, p.97-137.
- Delgadillo R., Nam K. y Bahia H. (2006)**, "Why do we Need to Change G*/sin and How?" Road Materials and Pavement Design, Vol. 7, No. 1, 2006.
- Gonzalez A. (2012)**, Determinación de las Propiedades Viscoelásticas de Betunes Asfálticos Tradicionales y Modificados Mediante la Utilización del Reómetro de Corte Dinámico (DSR). Memoria de Titulación de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, 2012.
- Kandhal P. S. (1977)**, "Low Temperature Ductility in Relation to Pavement Performance. American Society of Testing Materials, SPT 628, 1977, p. 95-106.
- Manual de Carreteras (2012)**, Ministerio de Obras Públicas. Dirección de Vialidad. 2012.
- Marasteanu M. and Anderson D. (2001)**, Techniques for Determining Errors in Asphalt Binder Rheological Data, Journal of Transportation Research Board, Vol.1766,2001,p.32-39.
- Wahr C. y R. Delgadillo R. (2008)**, "Comparación de diseños pavimentos flexibles: AASHTO 93 - Manual de Carreteras (PAVIAL) - Guía de Diseño Empírico Mecanicista NCHRP 1-37a (ME-PDG versión 1.0)". Anales del 9º Congreso Internacional PROVIAL, Puerto Varas, Chile, 3 al 7 de Noviembre de 2008.
- Wahr C. Delgadillo, R. y Rodriguez R. (2009)**, "Estudiando la Aplicabilidad en Chile de la Guia de Diseño Empírico Mecanicista NCHRP 1-37 A". Anales XV Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto CILA, 22 – 27. Nov 2009, Lisboa, Portugal.
- Bari J. y M. W. Witczak (2006)**, Development of a New Revised Version of the Witczak E* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol 75, 2006, p. 381-417.