



Reporte de Investigación LM- PI - PV- IN- 07e - 04

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA PÉRDIDA DE MASA POR CALENTAMIENTO SOBRE LAS PROPIEDADES DE LIGANTES Y MEZCLAS ASFÁLTICAS

INFORME DE AVANCE

Investigador principal

Ing. Laura Ramírez

Investigadores asociados

Ing. Mario Arce

Quím. Diego Moreira

Ing. Mónica Jiménez

Julio 2005

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA PÉRDIDA DE MASA POR CALENTAMIENTO SOBRE LAS PROPIEDADES DE LIGANTES Y MEZCLAS ASFÁLTICAS

1. INTRODUCCIÓN.

El presente estudio tiene como propósito valorar el efecto de un cambio en el parámetro de pérdida de masa por calentamiento para ligantes asfálticos, con respecto a las restantes propiedades del ligante asfáltico y las propias de la mezcla asfáltica resultante de su dosificación en conjunto con agregado patrón.

Por medio del artículo 1º del Decreto 30911-MEIC-MOPT, publicado en la Gaceta del viernes 10 de enero del 2003, se modificó el Reglamento Técnico RTCR 248:1997 Productos del petróleo, cementos asfálticos en su artículo 1º, parte 3, Requisitos obligatorios, Tabla No.1, en los siguientes valores:

Ensayo	AC 2.5 AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Pérdida por calentamiento % peso máx.	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Para efectos del estudio, considérese que los resultados presentados corresponden exclusivamente a los crudos de origen específico a partir de los cuales se obtuvieron, en refinería, las muestras aquí evaluadas, y al rango de pérdida de masa por calentamiento de las mismas. Adicionalmente, se presenta la limitación de que los ligantes asfálticos no sólo evidencian diferencias en el parámetro de pérdida de masa por calentamiento, sino que también en otras propiedades físico – químicas; de manera que se evalúan diferentes ligantes, que presentan diferentes pérdidas de masa por calentamiento.

2. MUESTRAS DE LIGANTE ASFÁLTICO CONSIDERADAS.

Inicialmente fueron suministradas para este estudio, tres muestras de ligante asfáltico por la Refinería Costarricense de Petróleo, en el entendido de que son producto del refinamiento del mismo crudo de petróleo (ligantes 1, 2 y 3); adicionalmente se muestrearon ligantes de aplicación en obras de pavimentación en Costa Rica durante el 2002, 2003, 2004 y lo que va del 2005 (ligantes 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23). Las propiedades de las muestras se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Muestras de ligantes asfálticos evaluadas.

Propiedad	Ligante 1 _M	Ligante 2 _M	Ligante 3 _M	Ligante 4 _A	Ligante 5 _M	Ligante 6 _A	Ligante 7 _A	Ligante 8 _B	Ligante 9 _B	Ligante 10 _A	Ligante 11 _B	Ligante 12 _B
Pérdida de masa por calentamiento en horno TFO (%) (*)	0,55	0,54	0,70	0,75	0,72	0,99	1,00	0,32	0,34	0,97	0,20	0,33
Pérdida de masa por calentamiento en RTFO (%) (**)	0,71	0,67	0,89	1,12	0,97	1,13	1,20	0,48	0,47	1,38	0,32	0,54
Viscosidad absoluta a 60°C (Poise)	5988	3751	4951	3159	2760	2920	3044	3343	3536	2987	3170	3225
Penetración a 25°C (1/10 mm)	43	58	47	64	69	68	67	67	66	70	60	67

Propiedad	Ligante 13 _B	Ligante 14 _M	Ligante 15 _A	Ligante 16 _A	Ligante 17 _B	Ligante 18 _A	Ligante 19 _A	Ligante 20 _A	Ligante 21 _M	Ligante 22 _B	Ligante 23 _B
Pérdida de masa por calentamiento en horno TFO (%) (*)	0,38	0,69	0,95	0,85	0,48	0,76	0,81	0,87	0,74	0,46	0,45
Pérdida de masa por calentamiento en RTFO (%) (**)	0,73	1,00	1,24	1,16	0,72	0,99	1,15	1,36	0,91	0,74	0,60
Viscosidad absoluta a 60°C (Poise)	3869	3588	3320	2890	3325	3281	3318	3338	3400	3087	2833
Penetración a 25°C (1/10 mm)	64	77	76	74	69	64	69	70	66	64	59

(*) Horno rotatorio horizontal de película delgada.

(**) Horno rotatorio vertical de película delgada.

3. EFECTO SOBRE LA RESISTENCIA AL EFECTO DEL AGUA EN LA MEZCLA ASFÁLTICA.

Considerando que la pérdida de masa por calentamiento, en el contexto teórico de su definición y reglamentación, tiene relación con la susceptibilidad al envejecimiento de los ligantes asfálticos, se ha valorado el efecto de diversas magnitudes de pérdida de masa por calentamiento sobre la resistencia al efecto del agua, considerando el envejecimiento experimentado por el ligante durante la preparación de la mezcla, curado (4 horas a temperatura de compactación) y durante la compactación.

Así, se ha valorado la resistencia retenida, al contrastar el estado sin condicionar y el estado condicionado con humedad, en los siguientes casos:

- Falla por compresión uniaxial. Condicionamiento con humedad a 60°C por 24 horas.
- Falla por tensión diametral. Saturación de poros (55 a 80%), seguida por condicionamiento con humedad a 60°C por 24 horas.

3.1 Resistencia a la tensión diametral retenida.

Considérese que en contraste con el ensayo de resistencia a la compresión uniaxial retenida, el ensayo de resistencia a la tensión diametral retenida da mayor importancia relativa a la rigidez y cohesión del mastique asfáltico (ligante y polvo mineral más fino).

La Tabla 2 presenta los resultados correspondientes a la falla de especímenes preparados con el mismo contenido de asfalto, el mismo agregado patrón (mineralogía y granulometría) y cada uno de los tipos de ligantes específicos de este estudio. Se incluyen los resultados individuales tanto para el estado sin condicionar como para el estado condicionado con humedad. En el gráfico 1 se presenta la tendencia seguida por las resistencias dependiendo del nivel de pérdida de masa en TFO (baja, intermedia y alta).

La Tabla 3 presenta los promedios de resultados y los porcentajes de resistencia retenida para cada uno de los tipos de ligantes asfálticos aplicados.

La Tabla 4 presenta los resultados del análisis de variancia llevado a cabo con el propósito de evaluar la significancia estadística de tres factores experimentales, con respecto a las diferencias cuantificadas en resistencia a la tensión diametral.

Los factores experimentales considerados son:

- Ligante: descritos en la Tabla 1.
- Contenido de vacíos de la mezcla asfáltica: bajos (menores a 8.0 %), altos (mayores a 8.0 %).
- Estado : mezcla asfáltica condicionada y no condicionada.

Tabla 2: Resultados comparativos para tensión diametral retenida.

Estado	Resistencia a la tensión diametral (kPa)											
	Ligante 1 _M	Ligante 2 _M	Ligante 3 _M	Ligante 4 _A	Ligante 5 _M	Ligante 6 _A	Ligante 7 _A	Ligante 8 _B	Ligante 9 _B	Ligante 10 _A	Ligante 11 _B	Ligante 12 _B
Sin condicionar	1482	1438	1576	1314	1377	1252	1217	1094	1521	1181	1227,0	1202
	1783	1318	1465	1229	1334	1331	1207	1175	1308	1174	1253	1139
	1587	1473	1577	1349	1312	1296	1391	1287	1409	1116	1218	1156
	1774	1342	1568	1271	1405	1423	1104	1301	1411	1187	1169	1190
	1925	1501	1629	1373	X	X	X	X	X	X	X	X
Condicionado	1195	880	1192	1145	1067	990	953	843	910	643	889	771
	1230	1246	1439	1151	1337	1084	1041	771	981	959	984	995
	1438	1127	1206	1160	1302	955	1018	932	1029	890	1017	970
	1647	1271	1216	1121	1318	1152	1067	945	1018	1065	1042	947
	1400	1260	1346	1091	X	X	X	X	X	X	X	X

Tabla 2: Resultados comparativos observados para tensión diametral retenida (continuación).

Estado	Resistencia a la tensión diametral (kPa)										
	Ligante 13 _B	Ligante 14 _M	Ligante 15 _A	Ligante 16 _A	Ligante 17 _B	Ligante 18 _A	Ligante 19 _A	Ligante 20 _A	Ligante 21 _M	Ligante 22 _B	Ligante 23 _B
Sin condicionar	1260	1220	1376	1193	999	1222	1218	1396	1406	1356	1348
	1244	1482	1181	1324	992	1304	1263	1574	1406	1473	1357
	1330	1655	1324	1172	992	1373	1524	1434	1566	1881	1519
	1298	1584	1366	1252	1036	1301	1380	1458	1346	1563	1080
Condicionado	994	1219	1027	687	820	903	770	1058	965	1355	1080
	1253	1390	1006	844	698	956	896	946	1120	1502	1119
	1173	1320	1015	1028	722	995	1033	1156	1131	1456	974
	1000	1032	979	1030	772	900	1029	1122	1159	1383	1160

Tabla 3: Resultados observados de resistencia retenida a la tensión diametral.

Parámetro	Ligante 1 _M		Ligante 2 _M		Ligante 3 _M		Ligante 4 _A		Ligante 5 _M		Ligante 6 _A		Ligante 7 _A		Ligante 8 _B	
	Prom.	Desv. Est.														
Resistencia en estado sin condicionar (kPa)	1710	175	1414	81	1577	72	1307	58	1357	65	1325	73	1230	119	1214	98
Resistencia en estado condicionado (kPa)	1382	182	1157	165	1280	108	1134	28	1256	65	1045	90	1019	49	873	81
Resistencia retenida (%)	81		82		81		87		93		79		83		72	

Parámetro	Ligante 9 _B		Ligante 10 _A		Ligante 11 _B		Ligante 12 _B		Ligante 13 _B		Ligante 14 _M		Ligante 15 _A		Ligante 16 _A	
	Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.
Resistencia en estado sin condicionar (kPa)	1412	87	1165	33	1217	35	1172	29	1283	39	1485	191	1312	90	1235	68
Resistencia en estado condicionado (kPa)	984	54	889	179	983	67	921	102	1105	129	1240	156	1007	21	897	165
Resistencia retenida (%)	70		76		81		79		86		84		77		73	

Parámetro	Ligante 17 _B		Ligante 18 _A		Ligante 19 _A		Ligante 20 _A		Ligante 21 _M		Ligante 22 _B		Ligante 23 _B	
	Prom.	Desv. Est.												
Resistencia en estado sin condicionar (kPa)	1005	21	1300	62	1347	137	1465	77	1431	94	1568	225	1326	182
Resistencia en estado condicionado (kPa)	753	54	938	46	932	125	1070	92	1093	87	1424	67	1083	80
Resistencia retenida (%)	75		72		69		73		76		91		82	

Tabla 4: Análisis de variancia para resultados de resistencia a la tensión diametral (1) (2).

Fuente de variabilidad	Conclusión
Ligante	Significativo a más del 99%
Estado	Significativo a más del 99%
Vacíos	Significativo a más del 99%

(1) Coeficiente de determinación (R^2) de 0.86.

(2) Las interacciones no son significativas al 95% de confianza.

Tabla 5: Análisis de contrastes para resultados de resistencia a la tensión diametral.

Contraste	Conclusión
Diferencia entre ligantes de menor pérdida en TFO respecto a pérdida intermedia en TFO	Diferencia significativa al 95% de confianza.
Diferencia entre ligantes de menor pérdida en TFO respecto a mayor pérdida en TFO	Diferencia no significativa al 95% de confianza.
Diferencia entre ligantes de pérdida intermedia en TFO respecto a mayor pérdida en TFO	Diferencia no significativa al 95 % de confianza.

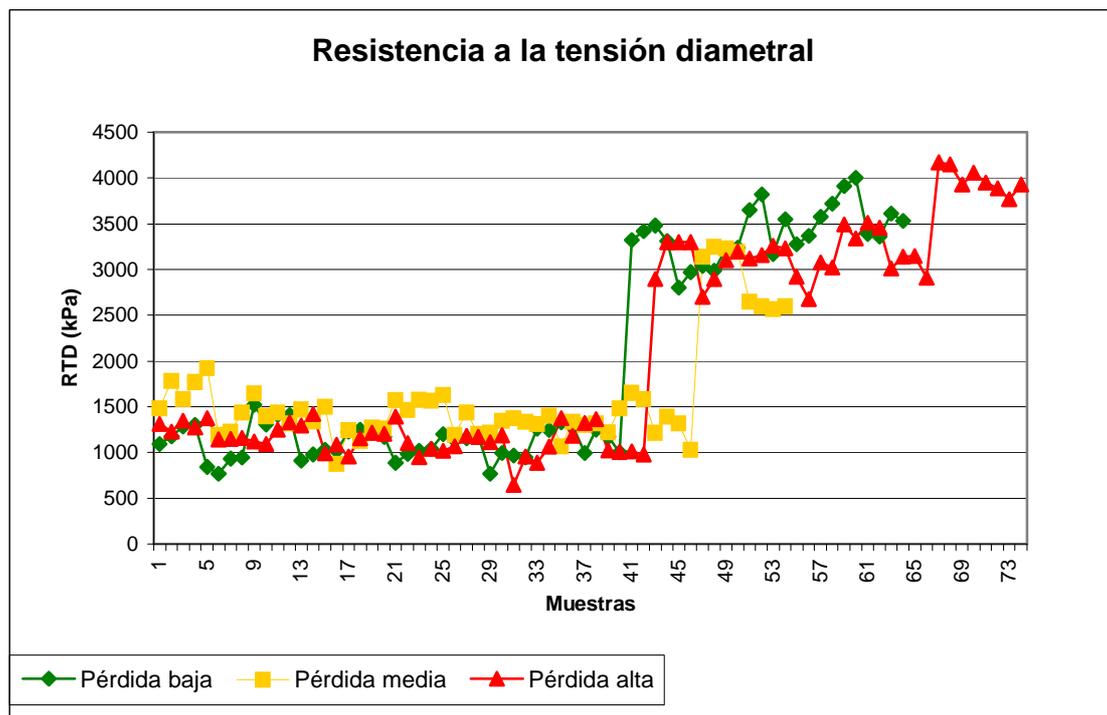
Dado un nivel de confianza mínimo para consideración de significancia del 95%, se ha encontrado evidencia estadística de que los factores ligante, estado y porcentaje de vacíos, son significativos para explicar los cambios presentados por los especímenes de ensayo en el parámetro de resistencia a la tensión diametral.

Por tanto, hay diferencias específicas asociadas con el uso de uno u otro ligante asfáltico, con el nivel de vacíos del espécimen así como con la aplicación de uno u otro estado de condicionamiento.

La Tabla 5 presenta los resultado de contrastes estadísticos para los ligantes asfálticos de mayor pérdida en el horno TFO, respecto a ligantes de menores pérdidas en el horno TFO. Se puede concluir que:

- Los ligantes de menor pérdida de masa por calentamiento, determinan una menor resistencia a la tensión diametral que los ligantes de mayor pérdida.
- Los ligantes de mayor pérdida de masa por calentamiento determinan mayor resistencia a la tensión diametral que los ligantes de pérdida de masa por calentamiento intermedia y los de menor pérdida de masa

Gráfico No. 1: Resistencia a la tensión diametral.



3.2 Resistencia a la compresión uniaxial retenida.

Considerando que, en contraste con el ensayo de resistencia a la tensión diametral retenida, el ensayo de resistencia a la compresión uniaxial retenida da mayor importancia relativa a la rigidez de la estructura granulométrica (trabazón interna del agregado) y a la adhesión ligante – agregado, de manera que es relativamente menos sensible a cambios en el tipo de ligante asfáltico (al menos en cuanto a cohesión del mastic se refiere).

La Tabla 6 presenta los resultados correspondientes a la falla de especímenes preparados con el mismo contenido de asfalto, el mismo agregado patrón (mineralogía y granulometría) y cada uno de los tipos de ligantes específicos de este estudio. Se incluyen los resultados individuales tanto para el estado sin condicionar como para el estado condicionado con humedad. En el gráfico 2 se presenta la tendencia seguida por las resistencias dependiendo del nivel de pérdida de masa en TFO (baja, intermedia y alta).

La Tabla 7 presenta los promedios de resultados y los porcentajes de resistencia retenida para cada uno de los tipos de ligantes asfálticos aplicados.

La Tabla 8 presenta los resultados del análisis de variancia llevado a cabo con el propósito de evaluar la significancia estadística de tres factores experimentales, con respecto a las diferencias cuantificadas en resistencia a la compresión uniaxial. Los factores experimentales considerados son:

- Ligante: caracterizados en la Tabla 1
- Contenido de vacíos de la mezcla asfáltica: bajos (menores a 8.0 %), altos (mayores a 8.0 %).
- Estado : mezcla asfáltica condicionada y no condicionada.

Tabla 6: Resultados comparativos observados para compresión uniaxial retenida.

Estado	Resistencia a la compresión uniaxial (kPa)											
	Ligante 1 _M	Ligante 2 _M	Ligante 3 _M	Ligante 4 _A	Ligante 5 _M	Ligante 6 _A	Ligante 7 _A	Ligante 8 _B	Ligante 9 _B	Ligante 10 _A	Ligante 11 _B	Ligante 12 _B
Sin condicionar	6700	4571	5876	3714	5577	3692	3885	3884	4659	3863	3394	4842
	6475	4277	5611	3694	5703	4087	3995	4006	4363	3700	3476	5015
	7485	4660	5817	3163	5741	4524	3858	4027	4363	3965	3262	5025
	6847	4817	6251	4265	5654	4744	3954	3914	3884	3843	3558	5066
Condicionado	5180	3826	4454	3418	4757	3417	3610	2987	2946	3609	3068	4241
	4993	3796	4934	3622	4903	3720	3582	2936	3252	3721	2977	4557
	5042	4042	4993	3480	5009	4221	3541	2936	3262	3639	3119	4251
	5248	3836	4925	3836	4803	5588	3472	3293	3598	3792	3078	3976

Tabla 6: Resultados comparativos observados para compresión uniaxial retenida (cont.).

Estado	Resistencia a la compresión uniaxial (kPa)										
	Ligante 13 _B	Ligante 14 _M	Ligante 15 _A	Ligante 16 _A	Ligante 17 _B	Ligante 18 _A	Ligante 19 _A	Ligante 20 _A	Ligante 21 _M	Ligante 22 _B	Ligante 23 _B
Sin condicionar	3925	3900	3600	2900	3320	3120	3490	4170	3140	3230	3580
	3955	4100	3800	3300	3420	3160	3340	4150	3250	3240	3720
	4098	3700	3800	3300	3480	3260	3510	3930	3230	3650	3910
	4118	4000	3900	3300	3310	3230	3460	4060	3190	3820	4000
Condicionado	3690	3600	2800	2700	2800	2920	3010	3950	2650	3170	3390
	3639	3400	3300	2900	2970	2680	3140	3890	2600	3550	3360
	3710	3700	2900	3100	3040	3080	3150	3770	2570	3280	3610
	3761	3800	3600	3200	2990	3020	2910	3930	2600	3370	3530

Tabla 7: Resultados de resistencia retenida a la compresión uniaxial.

Parámetro	Ligante 1 _M		Ligante 2 _M		Ligante 3 _M		Ligante 4 _A		Ligante 5 _M		Ligante 6 _A		Ligante 7 _A		Ligante 8 _B	
	Prom.	Desv. Est.														
Resistencia en estado seco (kPa)	6877	433	4581	227	5864	222	3709	450	5669	71	4262	468	3923	63	4312	316
Resistencia en estado condicionado (kPa)	5166	118	3875	112	4827	250	3589	185	4868	112	4237	960	3551	60	3262	265
Resistencia retenida (%)	75		84		82		97		86		99		91		76	

Parámetro	Ligante 9 _B		Ligante 10 _A		Ligante 11 _B		Ligante 12 _B		Ligante 13 _B		Ligante 14 _M		Ligante 15 _A		Ligante 16 _A	
	Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.
Resistencia en estado seco (kPa)	4312	316	3843	102	3425	133	4985	102	4027	102	3820	190	3690	140	3110	210
Resistencia en estado condicionado (kPa)	3262	265	3690	82	3058	61	4251	234	3700	51	3540	170	3080	370	2900	180
Resistencia retenida (%)	76		96		89		85		92		93		83		93	

Parámetro	Ligante 17 _B		Ligante 18 _A		Ligante 19 _A		Ligante 20 _A		Ligante 21 _M		Ligante 22 _B		Ligante 23 _B	
	Prom.	Desv. Est.												
Resistencia en estado seco (kPa)	3380	80	3190	60	3450	80	4080	110	3200	50	3480	290	3800	190
Resistencia en estado condicionado (kPa)	2950	100	2920	170	3050	110	3880	80	2600	30	3340	160	3470	120
Resistencia retenida (%)	87		92		89		95		81		96		91	

Tabla 8: Análisis de variancia para resultados de resistencia a la compresión uniaxial. (1), (2)

Fuente de variabilidad	Conclusión
Ligante	Significativo al 99%
Estado	Significativo al 99%
Interacción ligante * Estado	Significativo al 99%

(1) Las restantes interacciones no son significativas al menos al 95 % de confianza.

(2) Coeficiente de determinación (R^2) de 0.943

Tabla 9: Análisis de contrastes para resultados de resistencia a la compresión uniaxial.

Contraste	Conclusión
Diferencia entre ligantes de menor pérdida en TFO respecto a pérdida intermedia	Diferencia significativa al 95%
Diferencia entre ligante de menor pérdida en TFO respecto a mayor pérdida	Diferencia significativa al 95%
Diferencia entre ligante de pérdida intermedia en TFO respecto a mayor pérdida	Diferencia significativa al 95%

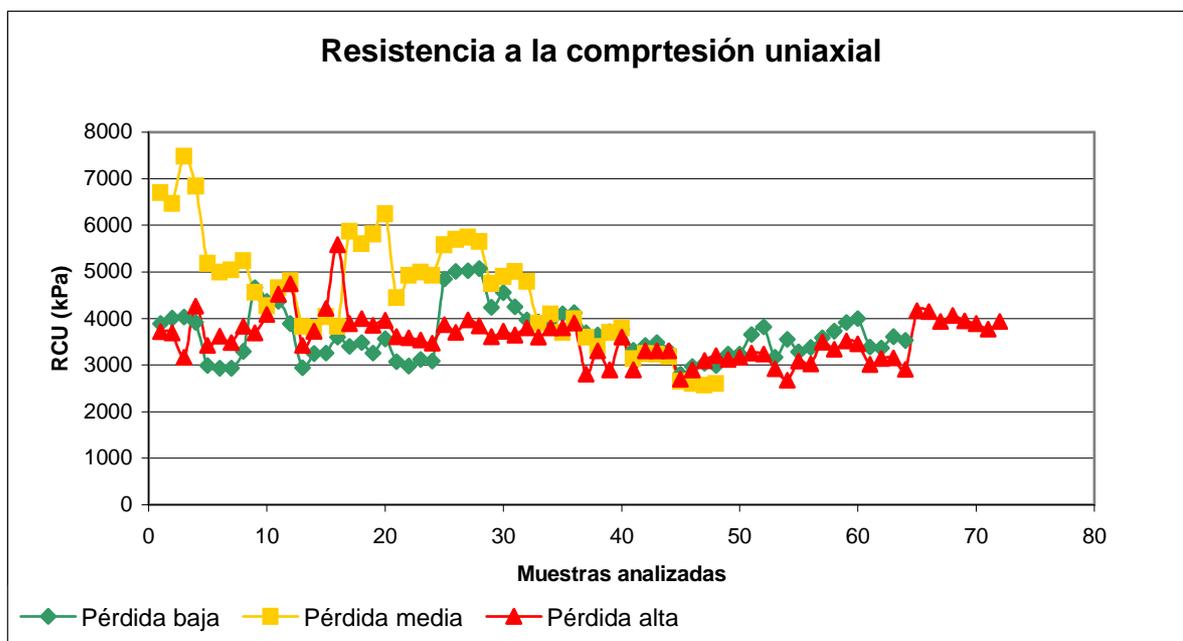
Considerando un nivel de confianza mínima para significancia del 95%, se ha encontrado evidencia estadística de que los factores ligante, estado e interacción ligante*estado, son significativos para explicar los cambios presentados por los especímenes de ensayo en el parámetro de resistencia a la compresión uniaxial. Nótese que el factor contenido de vacíos no es significativo; es decir, los cambios que presentan los especímenes evaluados en cuanto a contenido de vacíos no determinan diferencias significativas en la resistencia cuantificada.

Así, hay diferencias específicas asociadas con el uso de uno u otro ligante asfáltico, así como con la aplicación de uno u otro estado de condicionamiento. Adicionalmente, el efecto de combinaciones específicas de tipo de ligante y estado determina igualmente diferencias significativas, adicionales a las propias para cada tipo de ligante y estado de condicionamiento. En otras palabras, el efecto del condicionamiento es diferente para diversos tipos de ligantes asfálticos, con respecto a la resistencia a la compresión uniaxial.

La Tabla 9 presenta los resultados de los contrastes estadísticos para los ligantes de menor pérdida de masa en el horno TFO, respecto a los ligantes de mayor pérdida de masa en el horno TFO. Así, se puede observar como:

- Los ligantes de menor pérdida de masa por calentamiento, determinan mayor resistencia a la compresión uniaxial, que los ligantes de mayor pérdida.
- Los ligantes de pérdida de masa por calentamiento intermedia, determinan mayor resistencia a la compresión uniaxial, que los ligantes de menor pérdida de masa por calentamiento.

Gráfico No. 2: Resistencia a la compresión uniaxial.



4. EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES DE LOS LIGANTES.

Considerando que las diferencias en pérdida de masa por calentamiento (TFO) se asocian fundamentalmente con diferencias en susceptibilidad al envejecimiento, se han valorado las propiedades de los ligantes asfálticos de este estudio bajo diversos estados de envejecimiento simulado en el laboratorio.

Los diferentes estados de envejecimiento simulado considerados en este estudio son:

- Original.
- Envejecido en horno de película delgada (TFO). Envejecimiento simulado, similar a aquel crítico durante el proceso productivo de mezcla asfáltica.
- Envejecido en horno rotatorio vertical de película delgada (RTFO). Envejecimiento simulado similar a aquel crítico durante el proceso productivo y la colocación de mezcla asfáltica.
- Envejecido en dispositivo de envejecimiento a presión (PAV). Envejecimiento simulado, similar a aquel experimentado en sitio por un período de 5 a 10 años (variable dependiendo de las condiciones particulares del pavimento).

4.1 Caracterización de los ligantes asfálticos.

Las muestras de ligantes asfálticos disponibles fueron caracterizadas de acuerdo con los ensayos convencionales de consistencia, para diferentes estados de envejecimiento simulado de laboratorio. Los resultados se presentan en la Tabla 10.

De los resultados obtenidos no se evidencia ninguna relación entre el porcentaje de pérdida de masa y la viscosidad a 60°C tanto en condición original como en condición envejecida en TFO, RTFO y PAV.

Gráfico No. 3: Viscosidad vrs tipo de ligante

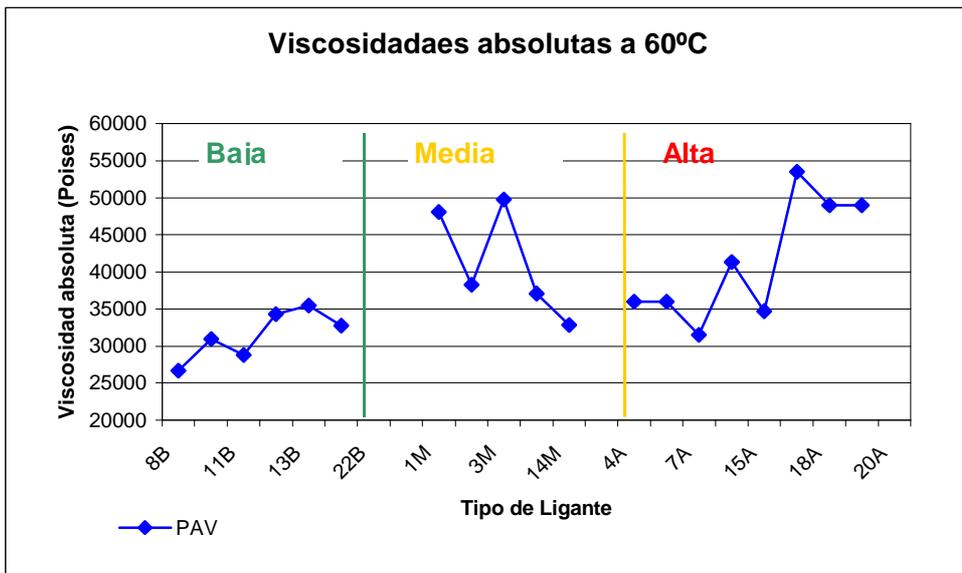
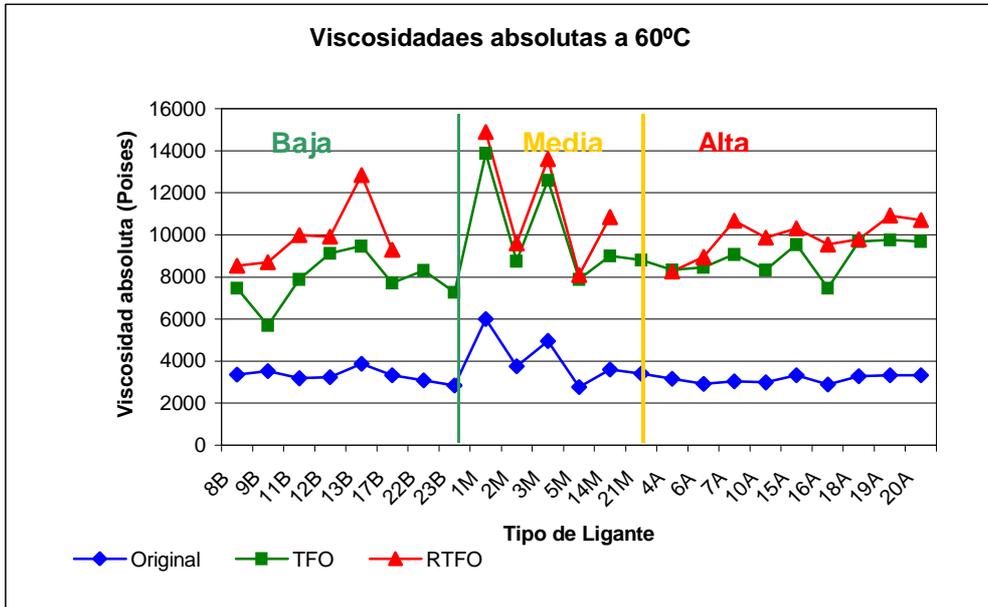


Tabla 10: Resultados de ensayos para caracterización de los ligantes asfálticos.

Cond. Envej.	Parámetro	Und.	Ligante 1 _M	Ligante 2 _M	Ligante 3 _M	Ligante 4 _A	Ligante 5 _M	Ligante 6 _A	Ligante 7 _A	Ligante 8 _B	Ligante 9 _B	Ligante 10 _A	Ligante 11 _B	Ligante 12 _B
Original	Densidad a 25°C	g/cm3	1,032	1,028	1,033	1,029	1,030	1,029	1,028	1,025	1,033	1,021	1,034	1,024
	Penetración a 25°C	1/10 mm	43	58	47	64	69	68	67	67	66	70	60	67
	Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	5988	3751	4951	3159	2760	2920	3044	3343	3536	2987	3170	3225
	Viscosidad rot. a 125°C	Poise	16,1	11,5	13,8	9,6	10,4	9,1	9,7	9,4	9,5	9,9	9,8	9,9
	Viscosidad rot. a 135°C	Poise	9,3	6,8	8,2	5,1	5,3	4,1	5,2	5,1	5,0	5,2	4,9	5,1
	Viscosidad rot. I a 145°C	Poise	5,5	4,3	4,8	3,7	3,8	2,5	3,8	3,6	3,6	3,7	3,5	3,6
Envejecido TFO	Penetración a 25°C	1/10 mm	29	37	31	37	38	39	35	48	46	42	38	39
	Ductilidad a 25°C	cm	84	100	100	100	x	x	62	100	100	100	100	100
	Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	13880	8742	12600	8323	7889	8461	9069	7477	5695	8337	7885	9129
	Pérdida de masa	%	0,55	0,54	0,7	0,75	0,72	0,99	1,00	0,32	0,34	0,97	0,20	0,33
Envejecido RTFO	Penetración a 25°C	1/10 mm	28	37	30	35	36	39	37	38	40	36	36	35
	Ductilidad a 25°C	cm	62	100	67	99	x	100	76	100	100	100	100	100
	Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	14900	9601	13600	8261	8085	8956	10668	8532	8694	9870	9996	9919
	Pérdida de masa	%	0,71	0,67	0,89	1,12	0,97	1,13	1,20	0,48	0,47	1,38	0,32	0,54
Envejecido PAV	Penetración a 25°C	1/10 mm	14	19	16	17	18	18	18	27	35	17	23	20
	Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	48090	38260	49790	35950	37060	35970	31514	26692	30930	41296	28800	34300

Tabla 10: Resultados de ensayos para caracterización de los ligantes asfálticos (continuación).

Cond. Envej.	Parámetro	Und.	Ligante 13 _B	Ligante 14 _M	Ligante 15 _A	Ligante 16 _A	Ligante 17 _B	Ligante 18 _A	Ligante 19 _A	Ligante 20 _A	Ligante 21 _M	Ligante 22 _B	Ligante 23 _B
Original	Densidad a 25°C	g/cm ³	1,029	1,032	1,027	1,026	1,029	1,029	1,030	1,031	1,030	1,025	1,024
	Penetración a 25°C	1/10 mm	64	77	76	74	69	64	69	70	66	64	59
	Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	3869	3588	3320	2890	3325	3281	3318	3338	3400	3087	2833
	Viscosidad rotacional a 125°C	Poise	9,7	9,1	8,9	8,8	9,5	9,2	9,5	10,5	9,1	8,2	8,3
	Viscosidad rotacional a 135°C	Poise	5,6	5,7	5,2	5,1	5,6	5,3	5,7	5,9	6,1	4,9	5,0
	Viscosidad rotacional a 145°C	Poise	3,4	3,4	3,2	3,2	3,4	3,2	3,7	3,9	4,0	3,3	3,3
Envejecido TFO	Penetración a 25°C	1/10 mm	41	43	-	-	41,4	33,5	38	37,5	-	-	-
	Ductilidad a 25°C	cm	100	100	100	100	100	100	93	100	100	100	100
	Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	9461	8994	9538	7468	7707	9693	9753	9686	8797	8296	7266
	Porcentaje de pérdida de masa	%	0,38	0,69	0,95	0,85	0,48	0,76	0,81	0,87	0,74	0,46	0,45
Envejecido RTFO	Penetración a 25°C	1/10 mm	38	40	0	0	36,6	32	34,4	34,5	-	-	-
	Ductilidad a 25°C	cm	96	100	100	100	100	100	100	100	-	-	-
	Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	12840	10840	10310	9538	9297	9791	10932	10705	-	-	-
	Porcentaje de pérdida de masa	%	0,73	1,00	1,24	1,16	0,72	0,99	1,15	1,36	0,91	0,74	0,60
Envejecido PAV	Penetración a 25°C	1/10 mm	20	23	PEND	PEND	19,5	12	21	-	-	-	-
	Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	35500	32800	34700	53500	32730	48980	49010	-	-	-	-

4.2 Caracterización para grado de desempeño de ligantes asfálticos.

Las muestras de ligantes asfálticos disponibles fueron caracterizadas de acuerdo con los ensayos de grado de desempeño Superpave, para diferentes estados de envejecimiento simulado de laboratorio. Los resultados se presentan en la Tabla No. 11.

En el gráfico No.4 se presentan las relaciones de los distintos ligantes con la tangente del ángulo δ a distintas temperaturas de ensayo.

Gráfico No. 4: Algunas propiedades reológicas

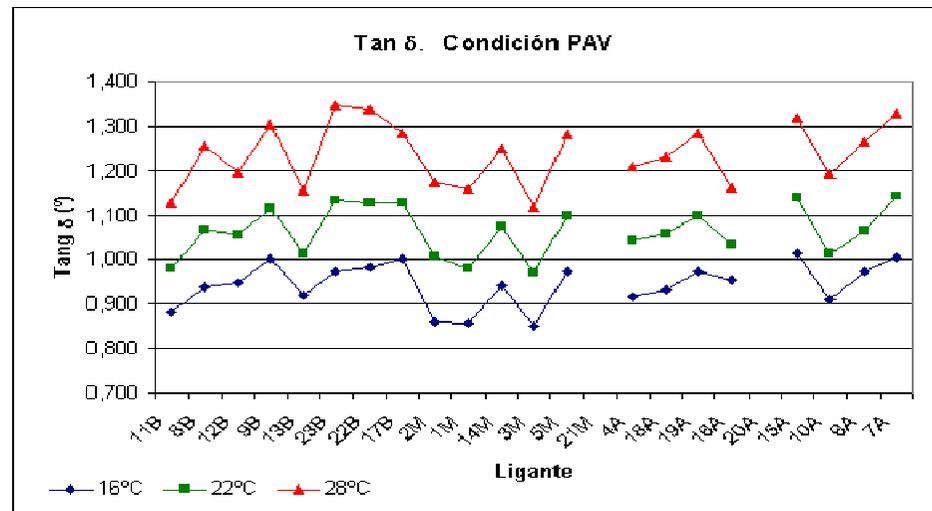
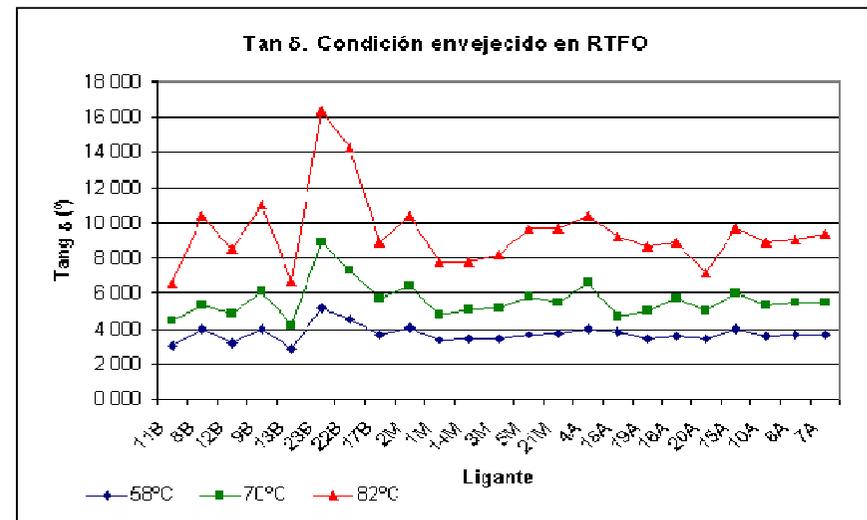
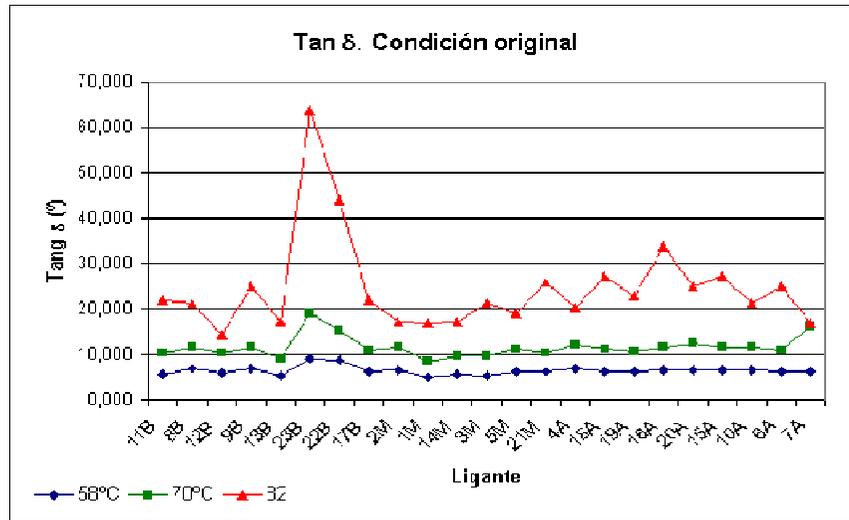


Tabla 11: Resultados de ensayos para caracterización reológica de ligantes asfálticos

Condición de envejecimiento	Temp.	Parámetro	Ligante 1 _M	Ligante 2 _M	Ligante 3 _M	Ligante 4 _A	Ligante 5 _M	Ligante 6 _A	Ligante 7 _A	Ligante 8 _B	Ligante 9 _B	Ligante 10 _A	Ligante 11 _B	Ligante 12 _B
Original	58°C	G*/senδ (kPa)	7,97	4,95	6,60	4,18	3,90	4,04	4,08	4,49	4,59	3,88	4,21	4,26
		δ (°)	78,9	81,4	79,5	81,7	80,8	81,1	81,1	81,6	81,7	81,3	79,8	80,5
	70°C	G*/senδ (kPa)	1,726	1,046	1,426	0,904	0,845	0,910	0,950	1,070	1,230	0,970	1,030	1,040
		δ (°)	83,3	85,1	84,1	85,3	84,9	84,8	86,5	85,0	85,0	85,0	84,5	84,4
	82°C	G*/senδ (kPa)	0,524	0,333	0,433	0,282	0,270	0,260	0,270	0,300	0,370	0,290	0,310	0,280
		δ (°)	86,6	86,7	87,3	87,2	87	87,7	86,6	87,3	87,7	87,3	87,4	86
Envejecido RTFO	58°C	G*/senδ (kPa)	19,87	12,77	17,88	10,70	11,74	12,15	11,83	11,16	11,50	13,09	13,36	13,06
		δ (°)	73,1	76,0	73,6	75,8	74,7	74,7	74,8	75,9	75,9	74,4	71,5	72,6
	70°C	G*/senδ (kPa)	4,403	2,809	3,857	2,309	2,584	3,040	3,030	2,720	2,750	3,190	3,290	3,260
		δ (°)	78,2	81,1	79	81,4	80,2	79,6	79,6	79,4	80,7	79,3	77,4	78,3
	82°C	G*/senδ (kPa)	1,330	0,892	1,126	0,683	0,732	0,800	0,800	0,690	0,740	0,880	1,020	0,860
		δ (°)	82,7	84,5	83,0	84,5	84,1	83,7	83,9	84,5	84,8	83,6	81,4	83,3
Envejecido PAV	16°C	G* senδ (kPa)	11435	9005	9876	6006	6466	6285	6443	6052	6021	6964	5152	6239
		δ (°)	40,6	40,7	40,4	42,5	44,2	44,2	45,1	43,2	45,0	42,3	41,4	43,5
	22°C	G* senδ (kPa)	6114	4528	5322	3184	3269	3335	3257	3116	3238	3768	2755	3397
		δ (°)	44,4	45,2	44,1	46,2	47,7	46,8	48,8	46,9	48,1	45,4	44,4	46,5
	28°C	G* senδ (kPa)	3380	2373	2965	1751	1724	1810	1689	1670	1803	2109	1528	1912
		δ (°)	49,2	49,6	48,2	50,4	52,0	51,7	53,0	51,5	52,5	50,0	48,4	50,1

Tabla 11: Resultados de ensayos para caracterización reológica de ligantes asfálticos (continuación)

Condición de envejecimiento	Temp.	Parámetro	Ligante 13 _B	Ligante 14 _M	Ligante 15 _A	Ligante 16 _A	Ligante 17 _B	Ligante 18 _A	Ligante 19 _A	Ligante 20 _A	Ligante 21 _M	Ligante 22 _B	Ligante 23 _B
Original	58°C	G*/senδ (kPa)	4,98	5,03	4,27	3,63	1,029	1,029	1,030	1,031	1,030	1,025	1,024
		δ (°)	79,4	80,1	81,2	81,5	69	64	69	70	66	64	59
	70°C	G*/senδ (kPa)	1,230	1,230	1,070	0,940	3325	3281	3318	3338	3400	3087	2833
		δ (°)	83,7	84,1	85,1	85,1	9,5	9,2	9,5	10,5	9,1	8,2	8,3
	82°C	G*/senδ (kPa)	0,340	0,330	0,300	0,260	5,6	5,3	5,7	5,9	6,1	4,9	5,0
		δ (°)	86,7	86,7	87,9	88,3	3,4	3,2	3,7	3,9	4,0	3,3	3,3
Envejecido RTFO	58°C	G*/senδ (kPa)	17,19	14,13	12,24	12,53	41,4	33,5	38	37,5	-	-	-
		δ (°)	70,6	73,8	75,8	74,4	100	100	93	100	100	100	100
	70°C	G*/senδ (kPa)	4,430	3,920	4,200	3,180	7707	9693	9753	9686	8797	8296	7266
		δ (°)	76,5	78,9	80,6	80,1	0,48	0,76	0,81	0,87	0,74	0,46	0,45
	82°C	G*/senδ (kPa)	1,170	1,350	1,640	0,840	36,6	32	34,4	34,5	-	-	-
		δ (°)	81,5	82,7	84,1	83,6	100	100	100	100	-	-	-
Envejecido PAV	16°C	G* senδ (kPa)	3446	14356	5295	6433	9297	9791	10932	10705	-	-	-
		δ (°)	42,6	43,3	45,4	43,7	0,72	0,99	1,15	1,36	0,91	0,74	0,60
	22°C	G* senδ (kPa)	1886	7465	2788	3705	19,5	12	21	-	-	-	-
		δ (°)	45,4	47	48,7	45,9	32730	48980	49010	-	-	-	-
	28°C	G* senδ (kPa)	1069	4024	1524	2193	1,921	1,956	1,917	-	-	1,992	3,372
		δ (°)	49,1	51,3	52,8	19,2	52,1	50,9	52,1	-	-	53,2	53,4

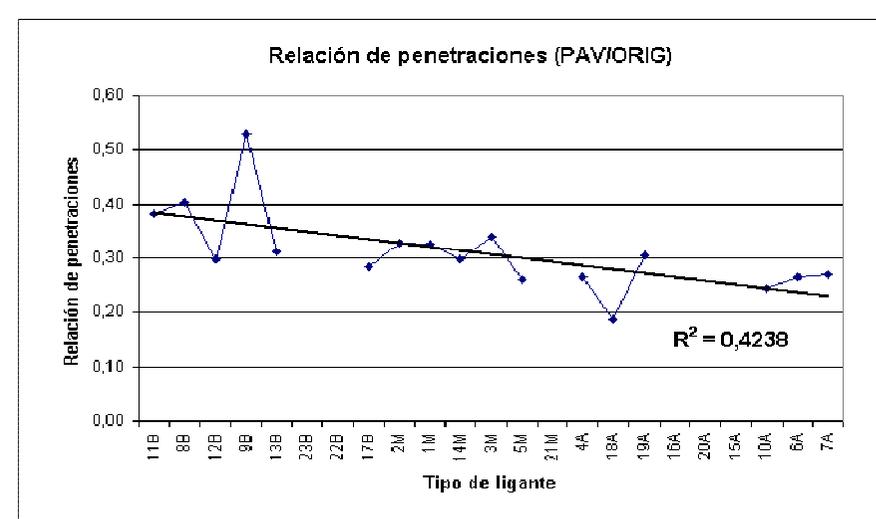
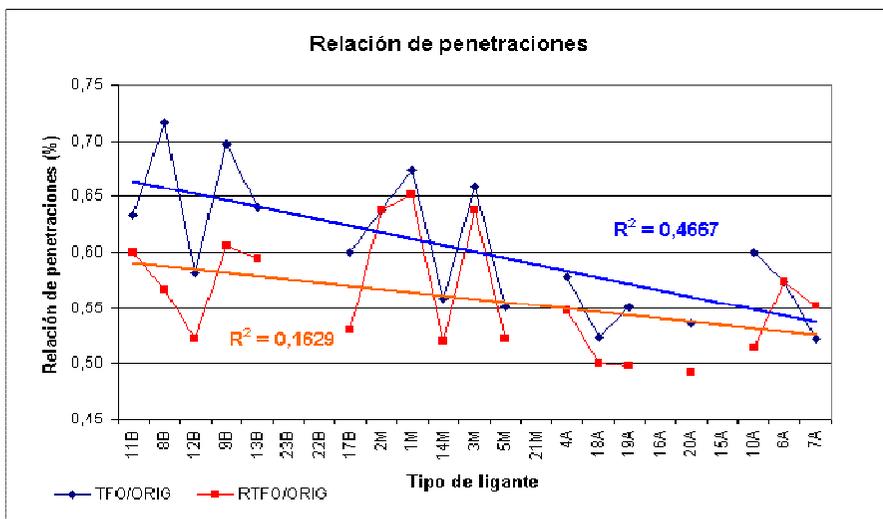
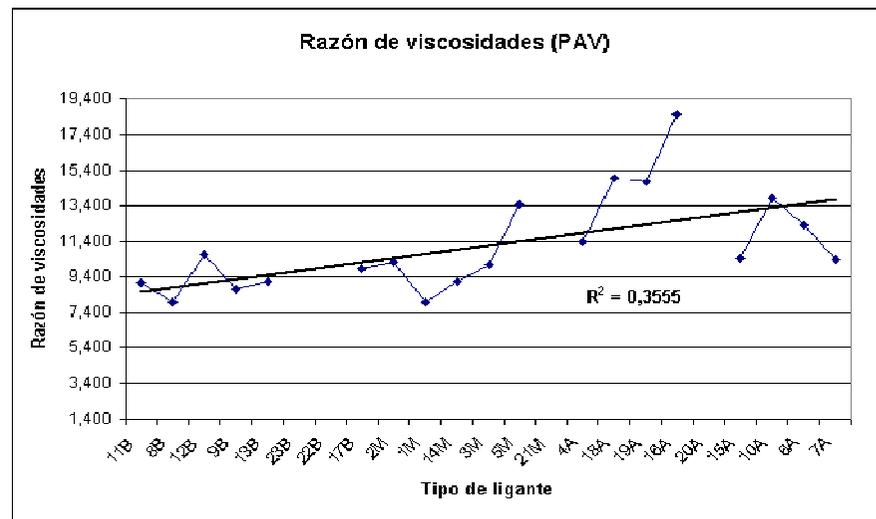
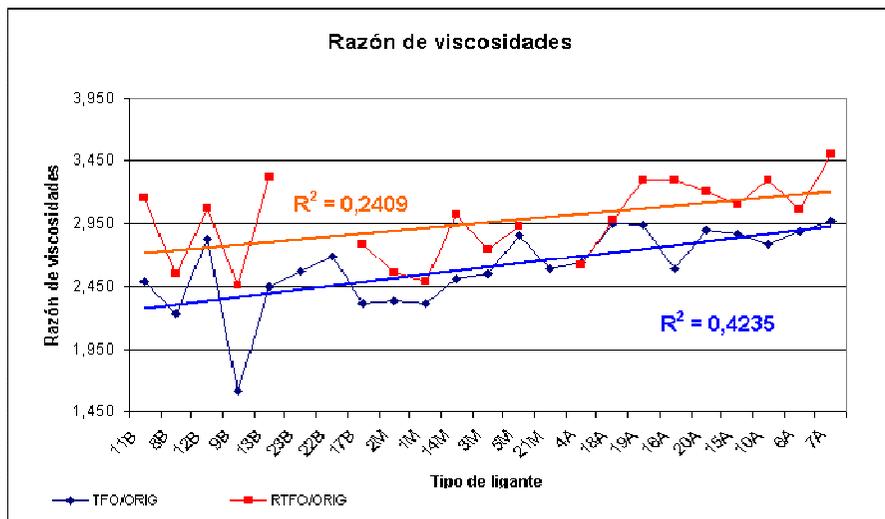
4.3 Susceptibilidad al envejecimiento de ligantes asfálticos.

La Tabla 12 y el Gráfico No. 5 presentan las razones de viscosidad y las relaciones de penetración para muestras envejecidas, con respecto a la condición original.

Tabla 12: Resultados de susceptibilidad al envejecimiento para ligantes asfálticos.

Ligante	Razón de viscosidades absolutas			Razón de penetraciones		
	TFO/orig	RTFO/orig	PAV/orig	TFO/orig	RTFO/orig	PAV/orig
11 _B	2,487	3,153	9,085	0,63	0,60	0,38
8 _B	2,237	2,552	7,984	0,72	0,57	0,40
12 _B	2,831	3,076	10,636	0,58	0,52	0,30
9 _B	1,611	2,459	8,747	0,70	0,61	0,53
13 _B	2,445	3,319	9,175	0,64	0,59	0,31
23 _B	2,565	-	-	-	-	-
22 _B	2,687	-	-	-	-	-
17 _B	2,318	2,796	9,844	0,60	0,53	0,28
2 _M	2,331	2,560	10,200	0,64	0,64	0,33
1 _M	2,318	2,488	8,031	0,67	0,65	0,33
14 _M	2,507	3,021	9,142	0,56	0,52	0,30
3 _M	2,545	2,747	10,057	0,66	0,64	0,34
5 _M	2,858	2,929	13,428	0,55	0,52	0,26
21 _M	2,587	-	-	-	-	-
4 _A	2,635	2,615	11,380	0,58	0,55	0,27
18 _A	2,954	2,984	14,928	0,52	0,50	0,19
19 _A	2,939	3,295	14,771	0,55	0,50	0,30
16 _A	2,584	3,300	18,512	-	-	-
20 _A	2,902	3,207	PEND	0,54	0,49	-
15 _A	2,873	3,105	10,452	-	-	-
10 _A	2,791	3,304	13,825	0,60	0,51	0,24
6 _A	2,898	3,067	12,318	0,57	0,57	0,26
7 _A	2,979	3,505	10,353	0,52	0,55	0,27

Gráfico No. 5: Susceptibilidad al envejecimiento



En general se observa que los indicadores de susceptibilidad al envejecimiento evidencian la mayor susceptibilidad térmica de los ligantes conforme se incrementa la pérdida de masa por calentamiento.

4.4 Susceptibilidad térmica de ligantes asfálticos.

La Tabla 13 presenta el parámetro VTS, que permiten evaluar la susceptibilidad térmica de los ligantes evaluados.

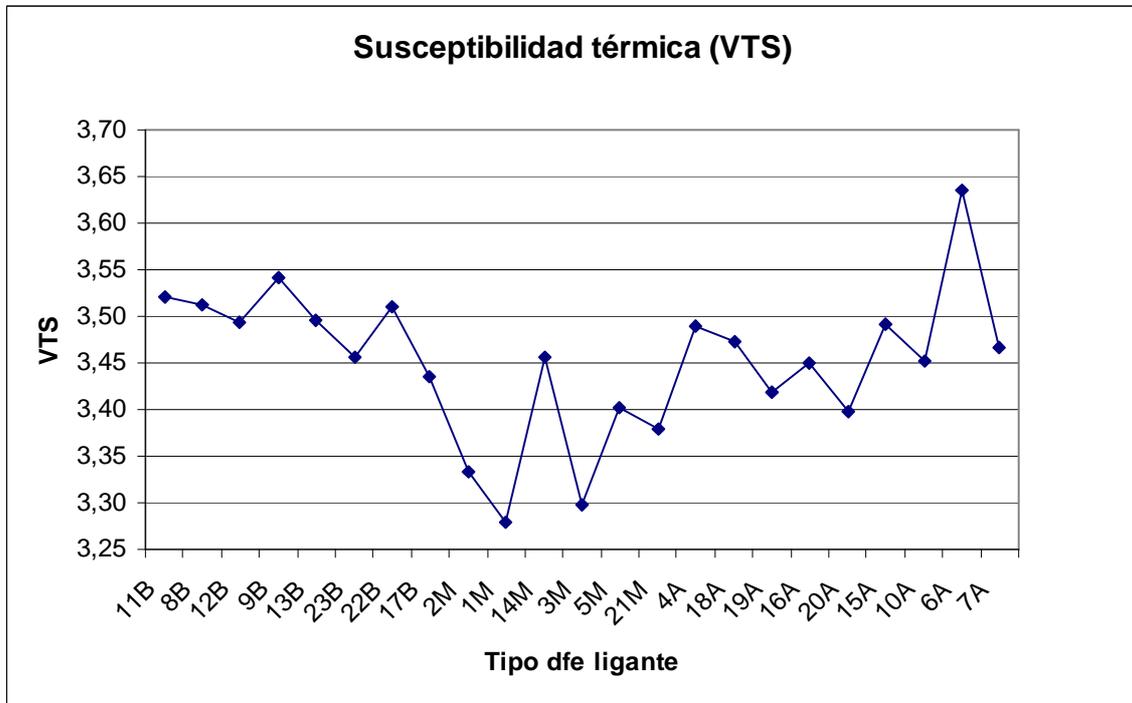
Tabla 13: Resultados de susceptibilidad térmica para ligantes asfálticos.

Ligante	VTS
11 _B	3,52
8 _B	3,51
12 _B	3,49
9 _B	3,54
13 _B	3,50
23 _B	3,46
22 _B	3,51
17 _B	3,44
2 _M	3,33
1 _M	3,28
14 _M	3,46
3 _M	3,30
5 _M	3,40
21 _M	3,38
4 _A	3,49
18 _A	3,47
19 _A	3,42
16 _A	3,45
20 _A	3,40
15 _A	3,49
10 _A	3,45
6 _A	3,64
7 _A	3,47

El rango típico de variación VTS para ligantes AC-30 según la normativa nacional es de 3.3 a 3.9.

En el gráfico No. 6 se presenta la relación entre los ligantes según su pérdida de masa y el índice VTS.

Gráfico No. 6: Susceptibilidad térmica (VTS) según el tipo de ligante.



De pruebas de hipótesis realizadas al 95% de confianza se obtuvo que los ligantes con pérdida de masa por calentamiento en TFO altas y bajas, determinan mayores susceptibilidades térmicas que los ligantes con pérdidas de masa intermedias.

5. CONCLUSIONES.

Según los resultados obtenidos y para las características propias de este estudio, se puede comentar lo siguiente:

En cuanto resistencia al efecto del agua:

- El tipo de ligante, el estado de condicionamiento y el porcentaje de vacíos producen cambios significativos en la resistencia a la tensión diametral
- Las mezclas fabricadas con los ligantes con pérdidas de masa en horno TFO intermedias (0.50-0.74) presentaron menores resistencias a la tensión diametral
- El tipo de ligante, el estado de condicionamiento y la interacción tipo de ligante*estado de condicionamiento producen cambios significativos en la resistencia a la compresión uniaxial.
- Las mezclas fabricadas con los ligantes con pérdidas de masa en horno TFO intermedias (0.50-0.74) presentaron mayores resistencias a la compresión uniaxial.
- Las mezclas fabricadas con los ligantes con pérdidas de masa en horno TFO bajas (0.2-0.49) presentaron mayores resistencias a la compresión uniaxial que las mezclas fabricadas con los ligantes con pérdidas de masa altas (0.85-1.00).

A pesar de que se ha encontrado un efecto significativo del ligante asfáltico sobre la susceptibilidad al efecto del agua en la mezcla, que incluso interactúa con el contenido de vacíos y el estado (seco o condicionado), para determinar diferencias significativas en la resistencia a la falla, dicho efecto del ligante no puede asociarse particularmente a diferencias en el porcentaje de pérdida de masa por calentamiento, sino que es mucho más complejo, involucrando propiedades físico-químicas y reológicas. Lo que si queda claro es la gran importancia relativa del ligante sobre el desempeño de la mezcla asfáltica.

En cuanto a la caracterización reológica:

- Los gráficos de tangente del ángulo no evidencian diferencias entre los distintos niveles de pérdida de masa por calentamiento en TFO

En cuanto a la susceptibilidad al envejecimiento:

- Se observó en el gráfico No.5 que los ligantes que presentan mayores pérdidas de masa en TFO determinaron mayores susceptibilidades al envejecimiento

En cuanto a la susceptibilidad térmica:

- Los ligantes con pérdida de masa por calentamiento en TFO altas y bajas, determinan mayores susceptibilidades térmicas que los ligantes con pérdidas de masa intermedias.

Índice general

	Página
1. Introducción.....	2
2. Muestras de ligante asfáltico consideradas.	2
3. Efecto sobre la resistencia al efecto del agua en la mezcla asfáltica.....	4
3.1 Resistencia a la tensión diametral retenida.....	4
3.2 Resistencia a la compresión uniaxial retenida.	10
4. Efecto sobre las propiedades de los ligantes.	16
4.1 Caracterización de los ligantes asfálticos.	16
4.2 Caracterización reológica de ligantes asfálticos.	20
4.3 Susceptibilidad al envejecimiento de ligantes asfálticos.	25
4.4 Susceptibilidad térmica de ligantes asfálticos.	27
5. Conclusiones.....	29

Índice de gráficos

	Página
Gráfico No. 1: Resistencia a la tensión diametral. Valores promedio.....	9
Gráfico No. 2: Resistencia a la compresión uniaxial.	15
Gráfico No. 3: Viscosidad vrs tipo de ligante.....	17
Gráfico No. 4: Algunas propiedades reológicas	21
Gráfico No. 5: Susceptibilidad al envejecimiento.....	26
Gráfico No. 6: Susceptibilidad térmica (VTS) según el tipo de ligante.	28