

COORDINACIÓN DE INFRAESTRUCTURA

INFORME DE INVESTIGACIÓN

PROYECTO No.: IE 14/08

Comparación de valores de fricción con péndulo británico y de pulido de agregados en tramos carreteros críticos del estado de Coahuila"

Responsable del proyecto:

M.C Mayra Plores Flores

Investigadora del Área de Mecánica de Rocas, Agregados y Concretos

Aprobó:

Dr Paul Gamica Anguas

Jefe de la División de Laboratorios de

Infraestructura

Autorizó:

M.C Rodolfo Téllez Gutiérrez Coordinador de Infraestructura

21 de diciembre de 2010

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 1 DE 76 F1 RI-003

Reconocimientos

Esta investigación fue realizada en la División de Laboratorios de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, por los investigadores M.C Mayra Flores Flores y el M.I José Antonio Gómez López

Se agradece la participación de los técnicos Luis Alberto. Pérez Cortes y Mario Antonio Pérez González por la realización de los ensayos de laboratorio.

Además los autores agradecen la colaboración del personal de la Dirección General de Servicios Técnicos por la realización de las mediciones de fricción con equipo Mu meter.

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 2 DE 74 F1 RI-003

Índice

ĺno	dice d	e figu	uras	5
ĺno	dice d	e tab	olas	7
1.	Intr	oduc	ción	11
	1.1		ecedentes	
	1.2 1.3	•	etivoance	
2.	Tec	ría c	le la resistencia al deslizamiento	13
	2.1		resistencia al deslizamiento y sus componentes	
	2.2		ctores que afectan la resistencia al deslizamiento del pavimento	
	2.3 2.4		iación de la resistencia al deslizamiento	
	2. 4 2.5		piedades del agregado resistente al pulidodelos para estimar la resistencia al deslizamiento	
3.	Equ	ıipos	y métodos de prueba utilizados para medir la resistencia al deslizamiento	24
į	3.1	Equ	uipos para medir la resistencia al deslizamiento	24
	3.1.	1	Péndulo británico	24
	3.1.		Mu meter	
	3.2 agreg		todos de prueba utilizados para evaluar las propiedades friccionantes del grueso	26
	3.2. 3.2.		Pulimento acelerado (Tex 438-A)Residuo insoluble en ácido (Tex 612-J)	26 30
5	Tra	bajo	experimental	31
,	5.1	Eva	aluación de la fricción en campo	31
	5.1.		Selección de los tramos evaluados	
	5.1.	2	Datos del volumen de tránsito	35
,	5.2	Eva	aluación de la resistencia al pulido del agregado	35

6.	Res	sultados y análisis	37
		Mediciones de fricción	
	6.2	Mezclas de agregado	42
		nclusiones	
		ecomendaciones	
Ο.	110	scone idadiones	0
9.	Ref	erencias	60
Ar	nexo		62

Índice de figuras

Figura 1	Componentes de la fricción (Hall et al, 2009)	13
Figura 2	Características de textura de la superficie de rodamiento	
Figura 3	Correlación entre la macrotextura, microtextura, resistencia al deslizamiento y velocid 14	ad.
Figura 4	Modelo generalizado de pulido del pavimento	16
Figura 5	Péndulo británico de fricción	
Figura 6	Mu meter	25
Figura 7	Colocación del agregado en el molde	
Figura 8	Llenado del molde con resina epóxica	
Figura 9	Molde y pastillas de agregado fabricadas	28
Figura 10	Montaje de las pastillas alrededor de la rueda metálica	28
Figura 11	Colocación de la rueda metálica en la máquina de pulimento	29
Figura 12	Máquina de pulimento acelerado	
Figura 13	Tramo km 8+700 Riego de sello con escoria (Bco. Planta Ahmsa)	32
Figura 14	Tramo km 16+000 Riego de sello escoria (Planta Ahmsa)	32
Figura 15	Tramo km 21+000 Riego de sello con escoria (Planta Ahmsa)	33
Figura 16	Vista del Riego de sello con escoria (Planta Ahmsa)	
Figura 17	Tramo km 48+500 carpeta de mezcla de agregados escoria-caliza	
Figura 18	Vista de la mezcla de agregados escoria-caliza (Planta Ahmsa/Contrisa)	34
Figura 19	Tramo km 108+000 riego de sello de riolita (Bco. Gravamil)	
Figura 20	Mediciones de fricción con péndulo británico	
Figura 21	Evolución del coeficiente de fricción determinado con el Péndulo británico	
Figura 22	Evolución del coeficiente de fricción determinado con el Mu meter	
Figura 23	Coeficiente de fricción, NPB y valor de pulido de escoria	
Figura 24	Coeficiente de fricción, NPB y valor de pulido de la mezcla escoria/caliza	
Figura 25	Coeficiente de fricción, numero del péndulo británico y valor de pulido de la riolita	
Figura 26	Especimenes fabricados	
Figura 27	Evolución del valor de pulido agregado A1 (Contrisa)	43
Figura 28	Evolución del valor de pulido agregado B2 (Secovisa)	
Figura 29	Evolución del valor de pulido agregado A1 (Ahmsa)	
Figura 30	Evolución del valor de pulido agregado A2 (Gravamil)	
Figura 31	Evolución del valor de pulido agregado mezcla A1-B1 50/50 (Ahmsa-Contrisa)	
Figura 32	Evolución del valor de pulido agregado mezcla A1-B1 60/40 (Ahmsa-Contrisa)	
Figura 33	Evolución del valor de pulido agregado mezcla A1/B1 70-30 (Ahmsa-Contrisa)	
Figure 34	Evolución del valor de pulido agregado mezcla A1-B1 80/20 (Ahmsa-Contrisa)	
Figure 35	Evolución del valor de pulido agregado mezcla A2-B2 50/50 (Gravamil-Secovisa)	
Figura 36 Figura 37	Evolución del valor de pulido agregado mezcla A2-B2 50/50 (Gravamil-Secovisa)	
Figura 37	Evolución del valor de pulido agregado mezcla A2-B2 50/50 (Gravamil-Secovisa)	
•	Evolución del valor de pulido agregado mezcla A2-B2 50/50 (Gravamil-Secovisa)	
Figura 39 Figura 40	Evolución del valor de pulido para los agregados individuales Evolución del valor de pulido para la mezcla A1/B1	
Figura 40	Evolución del valor de pulido para la mezcla A1/B1	
Figura 41	Tasa de pulido para los agregados individuales y mezcla A1/B1	
Figura 42 Figura 43	Tasa de pulido para los agregados individuales y mezcla A1/B1	
Figura 44	Mejoramiento del valor de pulido residual mezcla A1-B1	
Figura 45	Mejoramiento del valor de pulido residual mezcla A2-B2	
Figura 46	Gráfica de clasificación del agregado TxDOT	
94.4 10	Cranca de diadinidación del agregado TADOT	55

Figura 47	Correlación entre el valor de pulido residual y la proporción de mezclado5	57
Figura 48	Correlación entre el valor de pulido residual y la proporción de mezclado5	57

Índice de tablas

Tabla 1	Factores que afectan la fricción disponible del pavimento	15
Tabla 2	Valores de resistencia al deslizamiento para pistas de aterrizaje	
Tabla 3	Información de los tramos evaluados en campo	
Tabla 4	Nomenclatura de los agregados y mezclas de agregados	36
Tabla 5	Mediciones de fricción con Mu meter	37
Tabla 6	Mediciones de fricción con Péndulo británico	37
Tabla 7	Volumen de tránsito de los tramos evaluados	41
Tabla 8	Resultados de los ensayos de los agregados individuales	42
Tabla 9	Resultados del ensayo de pulimento acelerado de las mezclas de agregado	

Resumen

Esta investigación fue llevada a cabo entre los años 2008 y 2010 en la División de Laboratorios de Infraestructura.

Antecedentes

En el 2008 se inició el proyecto denominado "IE 14/08 Comparación de valores de fricción con péndulo británico y de pulido de agregados en tramos carreteros críticos del estado de Coahuila" para la Unidad General de Servicios Técnicos de Coahuila. Se seleccionaron ocho tramos de 500 m aproximadamente que corresponden a la carretera libre Saltillo-Torreón del estado de Coahuila, para realizar mediciones de fricción con péndulo británico y Mu meter y evaluar la evolución del coeficiente de fricción.

En un inicio el proyecto consistió en la medición de la resistencia al deslizamiento en campo y la evaluación en laboratorio de la resistencia al pulido del agregado colocado en los tramos seleccionados para determinar una correlación entre el valor de pulido y el coeficiente de fricción. Sin embargo, en las mediciones de fricción del 2008 con Mu meter los valores obtenidos en algunos tramos fueron bajos, inferiores a 0,4 que es el mínimo recomendado y de acuerdo con información proporcionada por personal de la UGST de Coahuila en dichos tramos se colocó carpeta elaborada con una mezcla de agregado en una proporción de 50% caliza-50% escoria de horno de arco eléctrico, la que al parecer no es suficiente para mejorar la resistencia al deslizamiento. Por lo anterior, se advirtió la necesidad de realizar un estudio complementario, al proyecto inicial, para determinar la mezcla de agregado adecuada que ayude a mejorar la resistencia al deslizamiento.

Objetivos

Uno de los objetivos de este estudio fue determinar la etapa de pulido de los tramos seleccionados para establecer una correlación entre las mediciones de fricción en campo con el péndulo británico, Mu meter y el valor de pulido obtenido en laboratorio.

Otro de los objetivos fue investigar la factibilidad de mejorar la resistencia al deslizamiento mediante la mezcla de agregados y encontrar la proporción de mezclado más adecuada.

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 8 DE 74 F1 RI-003

Actividades de la investigación

La investigación se enfocó en los tramos seleccionados y los bancos de agregado utilizados para la mezcla asfáltica o riego de sello colocado en los tramos en estudio.

La investigación comprendió las siguientes actividades:

- Mediciones anuales de fricción con péndulo británico y Mu meter de los tramos seleccionados
- Determinar el valor de pulido del agregado utilizado en los tramos en estudio
- Determinar el valor de pulido de las mezclas de agregado para definir la proporción de mezclado que mejore la resistencia al deslizamiento.

Conclusiones

En cuanto a la evaluación del coeficiente de fricción en campo:

 El volumen de tránsito que ha experimentado los tramos evaluados es bajo y en las mediciones efectuadas aún no se define claramente la etapa de pulido o equilibrio del coeficiente de fricción. Debido a lo anterior, todavía no se puede establecer una correlación entre el valor de pulido y el coeficiente de fricción, es necesario realizar más mediciones hasta que el coeficiente de fricción se estabilice.

En lo que se refiere a las mezclas de agregado:

- Para todos los casos, agregados individuales y mezclas de agregados, la mayor pérdida de valor de pulido ocurre en la primera hora del ensayo, en las horas subsecuentes la pérdida es poco significativa hasta llegar a un valor prácticamente constante al final de las nueve horas de pulido. Lo anterior, equivale a que en campo la mayor pérdida de resistencia al deslizamiento ocurre en un período corto de tiempo; para definir dicho período de tiempo, es necesario realizar mediciones anuales de fricción para determinar el volumen de tránsito para el cual el agregado alcanza la etapa de pulido.
- La tasa de pulido total para los agregados individuales evaluados está en un rango de 25 a 44% y la mayor pérdida de valor de pulido ocurre en la primera hora de pulido, siendo ésta de 18 a 35%. Para las mezclas de agregado, la tasa de pulido total está en un rango de 31 a 37% y en la primera hora la pérdida de valor de pulido fue de 17 a 27 %.
- Por cada 10% de incremento en la proporción de agregado con valor de pulido alto, el valor de pulido residual se incrementa aproximadamente 2 unidades en la mezcla escoria de arco eléctrico/caliza (A1/B1) y una unidad en la mezcla riolita/caliza (A2-B2).
- De acuerdo con la metodología del Tx DOT, el agregado calizo evaluado no es apropiado para mezclas de agregado destinadas a volúmenes de tránsito mayor a 20 millones de vehículos por carril. Para volúmenes de tránsito de 12-20 millones de vehículos por carril

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 9 DE 74 F1 RI-003

parece ser que la mezcla de agregado 60%/40% puede considerarse una alternativa viable para mejorar el valor de pulido residual del agregado con valor de pulido bajo (menores a 25).

 La metodología del TxDOT no puede ser aplicada completamente en México, puesto que fue desarrollada para equipo de medición de campo (locked Wheel skid ASTM E 274) diferente al utilizado en México (Mu meter) y las mediciones de ambos equipos no son comparables directamente sin un estudio de correlación.

Recomendaciones

- Continuar realizando mediciones de fricción en los tramos evaluados hasta que el coeficiente de fricción se estabilice.
- Considerar la evaluación de más tramos de prueba para contar con un gran número de datos para establecer una mejor correlación entre el valor de pulido y el coeficiente de fricción.
- Las ecuaciones de regresión obtenidas para estimar el valor de pulido residual de las mezclas de agregado son válidas para agregados con características mineralógicas similares a las del agregado evaluado en este estudio.
- En el presente estudio el agregado fue evaluado con respecto a su resistencia al
 deslizamiento, también es necesario realizar otros ensayos que determinen su calidad y
 la compatibilidad con el asfalto para garantizar que la mezcla asfáltica sea resistente y
 durable. La evaluación de la calidad del agregado es solo una de las etapas que
 comprende el proceso de diseño de mezclas asfálticas.

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 10 DE 74 F1 RI-003

1. Introducción

1.1 Antecedentes

En el año 2008 se inició el proyecto denominado "IE 14/08 Comparación de valores de fricción con péndulo británico y de pulido de agregados en tramos carreteros críticos del estado de Coahuila" para la Unidad General de Servicios Técnicos de Coahuila. Se seleccionaron ocho tramos de 500 m aproximadamente que corresponden a la carretera libre Saltillo-Torreón del estado de Coahuila, en los cuales se realizaron mediciones de fricción con péndulo británico y Mu meter para evaluar la evolución del coeficiente de fricción y correlacionar el valor de pulido con las mediciones de fricción en campo . En los tramos seleccionados la superficie de rodamiento fue reconstruida o tratada unos meses antes de realizar las mediciones y los materiales utilizados fueron escoria, riolita y una mezcla 50% escoria-50% riolita.

En un inicio el proyecto consistió en la medición de la resistencia al deslizamiento en campo y la evaluación en laboratorio de la resistencia al pulido del agregado colocado en los tramos seleccionados para determinar una correlación entre el valor de pulido y el coeficiente de fricción. Sin embargo, en las mediciones de fricción del 2008 con Mu meter los valores obtenidos en algunos tramos fueron bajos, inferiores a 0,4 que es el mínimo recomendado y de acuerdo con información proporcionada por personal de la UGST de Coahuila en dichos tramos se colocó carpeta elaborada con una mezcla de agregado en una proporción de 50% caliza-50% escoria de horno de arco eléctrico, la que al parecer no es suficiente para mejorar la resistencia al deslizamiento. Por lo anterior, se advirtió la necesidad de realizar un estudio complementario, al proyecto inicial, para determinar la mezcla de agregado adecuada que ayude a mejorar la resistencia al deslizamiento.

1.2 Objetivo

Uno de los objetivos de este estudio es determinar la etapa de pulido de los tramos seleccionados para establecer una correlación entre las mediciones de fricción en campo con el péndulo británico, Mu meter y el valor de pulido obtenido en laboratorio.

Investigar la factibilidad de mejorar la resistencia al deslizamiento mediante la mezcla de agregados y encontrar la proporción de mezclado más adecuada.

1.3 Alcance

Esta investigación contempla realizar mediciones de fricción con el péndulo británico y Mu meter en tramos carreteros de la carretera libre Saltillo-Torreón del estado de Coahuila.

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 11 DE 74 F1 RI-003

En cuanto a las mezclas de agregado comprende evaluar cuatro bancos de agregado del estado de Coahuila, dos con valores de pulido alto y dos con valores de pulido bajo, y elaborar mezclas de agregados en diferentes proporciones.

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 12 DE 74 F1 RI-003

2. Teoría de la resistencia al deslizamiento

2.1 La resistencia al deslizamiento y sus componentes

La resistencia al deslizamiento es la capacidad que tiene la superficie del pavimento, particularmente cuando está mojado, para resistir el deslizamiento de las ruedas de los vehículos.

La resistencia al deslizamiento tiene dos componentes la adherencia e histéresis. La primera resulta del corte de la unión molecular formado cuando el neumático es comprimido en el área de contacto con las partículas de la superficie del pavimento y depende principalmente de la microtextura. En cuanto a la histéresis, resulta de la disipación de energía cuando el neumático se deforma al pasar a través de las asperezas de la superficie rugosa del pavimento y depende principalmente de la macrotextura (Noyce David A et al, 2005), Figura 1.

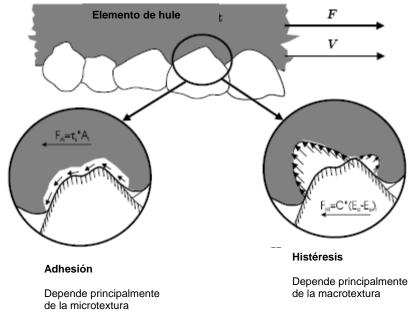


Figura 1 Componentes de la fricción (Hall et al, 2009)

La microtextura y la macrotextura son características superficiales del pavimento. La microtextura se refiere a las irregularidades en la superficie de las partículas de agregado (textura en escala fina) que afectan la adherencia, Figura 2. Estas irregularidades son las que hacen que las partículas de agregado se sientan lisas o ásperas al tacto. La magnitud de la microtextura depende de la rugosidad inicial en la superficie del agregado y de la capacidad del agregado de retener su rugosidad contra el pulimento debido a la acción del tránsito. Por tanto, la microtextura es una propiedad del agregado que puede controlarse a través de la selección de agregados con características de resistencia al pulido adecuadas. La microtextura y la adherencia contribuyen a la resistencia al deslizamiento para todas las velocidades e influyen predominantemente en velocidades menores a 50 km/h (Janoo Vincent C, 1999).

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 13 DE 74 F1 RI-003

La macrotextura se refiere a irregularidades más grandes en la superficie del pavimento, que afectan la histéresis. Esta clase de irregularidades se asocian con los espacios entre las partículas de agregado, Figura 2 La magnitud de esta componente dependerá de varios factores. La macrotextura inicial en la superficie del pavimento será determinada por el tamaño, forma y granulometría del agregado grueso usado en la construcción del pavimento, así como también de las técnicas de construcción empleadas en la colocación de la superficie de rodamiento del pavimento. La macrotextura es también esencial para proporcionar canales de salida al agua en la interacción neumático-pavimento, para de esta manera reducir el hidroplaneo. La macrotextura y la histéresis son menos importantes para velocidades bajas, pero a medida que se incrementa la velocidad se requiere una mayor macrotextura (Janoo Vincent C, 1999). Para velocidades mayores a 50 km/h, la resistencia al deslizamiento depende principalmente del espaciamiento proporcionado por el agregado, es decir, de la macrotextura (Liang Y Robert, 2003).

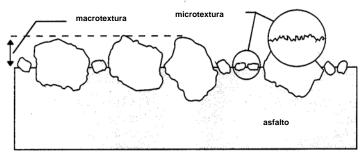


Figura 2 Características de textura de la superficie de rodamiento (Janoo Vincent C et al, 1999)

La Figura 3 ilustra el efecto de la macro y microtextura en la resistencia al deslizamiento como una función de la velocidad. Se puede observar que para mantener un valor de resistencia al deslizamiento alto en varios niveles de velocidad, la superficie de rodamiento del pavimento obliga a una buena micro y macrotextura (Liang Y Robert, 2003).

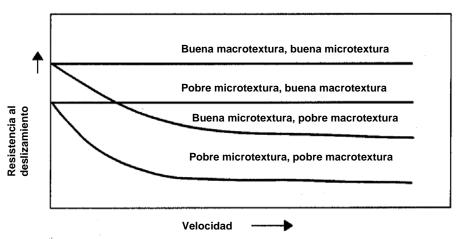


Figura 3 Correlación entre la macrotextura, microtextura, resistencia al deslizamiento y velocidad (Liang Y Robert, 2003).

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 14 DE 74 F1 RI-003

2.2 Factores que afectan la resistencia al deslizamiento del pavimento

Los factores que influencian las fuerzas de fricción del pavimento pueden ser agrupados en cuatro categorías: las características superficiales del pavimento, operación del vehiculo, las condiciones del neumático y los factores ambientales. Debido a que cada factor juega un papel en la definición de la fricción, ésta debe ser vista como un proceso, en lugar de una propiedad inherente del pavimento. Cuando todos esos factores son completamente especificados la fricción toma un valor definitivo (Hall et al 2009).

La Tabla 1 contiene los factores que comprenden cada categoría, los más críticos son indicados en negrita, entre estos factores los únicos que se encuentran bajo control de los organismos encargados de la construcción, conservación y administración de las carreteras son los relacionados con las características superficiales del pavimento, la micro y macrotextura, y la velocidad de deslizamiento (Hall et al 2009).

Tabla 1 Factores que afectan la fricción disponible del pavimento (Wallman and Astrom, 2001 citado por Hall et al)

Características superficiales del pavimento	Parámetros de operación del vehículo	Propiedades del neumático	Factores climáticos	
Microtextura	Velocidad de	• Huella	• Clima	
 Macrotextura 	deslizamiento	 Diseño y 	≻Viento	
 Megatextura 	➤ Velocidad de	condición	>Temperatura	
 Propiedades 	vehiculo	 Composición 	≻Agua (Iluvia,	
del material	➤Acciones de	y dureza del	condensación)	
 Temperatura 	frenado	hule	≻Nieve y hielo	
	 Maniobras de 	 Presión de 	 Contaminantes 	
	conducción	inflado	➤ Material	
	≽Giros	 Carga 	antiderrapamient	
	> Alcances	 Temperatura 	o (sal, arena)	
		-	≻Polvo, lodo	

2.3 Variación de la resistencia al deslizamiento

Las propiedades de resistencia al deslizamiento de un pavimento disminuyen con el tiempo si no se deteriora la superficie de rodamiento (Lee et al, 2005 citado por Masad et al, 2008). En un pavimento nuevo la fricción es máxima después de unos meses de estar abierto al tránsito, Después la resistencia disminuye a una velocidad rápida cuando el agregado expuesto es desgastado y su microtextura y macrotextura se pierden cuando las cargas de transito pulen la superficie de rodamiento en la huella de contacto. Luego disminuye más lentamente y alcanza el estado de equilibrio en el cual pequeñas desviaciones en la resistencia son experimentadas mientras los niveles de tránsito sean constantes y no haya

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 15 DE 74 F1 RI-003

un deterioro evidente. Esto generalmente pasa después de 1 millón de ejes equivalentes (Kokalis, 1998 citado por Cenek et al 2006), 1 a 5 millones de pases de vehículos (Masad et al, 2009), o dos años de servicio (Masad et al, 2009; Kokalis, 1998 citado por Cenek et al 2006). La caída típica entre los valores de fricción inicial y de equilibrio de resistencia al deslizamiento es de aproximadamente 40% (Cenek et al, 2006). Una vez que se ha alcanzado el estado de equilibrio hay pequeñas variaciones del coeficiente de fricción debido a cambios estacionales. En el verano se presentan los niveles más bajos de fricción, debido a que el clima seco permite la acumulación de partículas finas y polvo que aceleran el pulido de la superficie del pavimento. En invierno, la lluvia lava las partículas finas y esto da como resultado una microtextura y macrotextura más alta y consecuentemente la superficie del pavimento presenta una fricción alta (Masad et al, 2009). La Figura 4 muestra el modelo de pulido del pavimento.

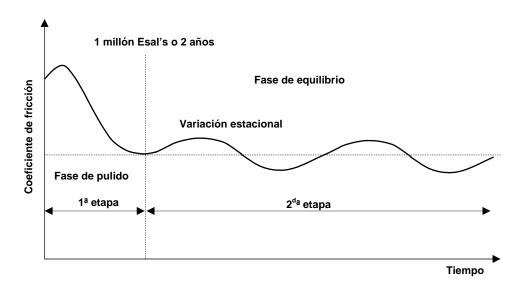


Figura 4 Modelo generalizado de pulido del pavimento (alter Chelliah et al 2001 citado por Masad et al, 2009).

El valor final al que tiende el coeficiente de fricción es función tanto del valor de pulido del agregado como del tránsito de vehículos pesados en la carretera (mayor coeficiente de fricción para valores de pulido más elevados, y menor valor de pulido para intensidades de tránsito pesado elevados). Esto hace que no se pueda pretender tener en las carreteras en servicio, un coeficiente de fricción tan alto como al principio de su vida; y que, por tanto, en ellas no sean aplicables los valores mínimos establecidos para pavimentos nuevos (Achútegui Viada Francisco, 2001).

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 16 DE 74 F1 RI-003

2.4 Propiedades del agregado resistente al pulido

El diseño por fricción requiere un entendimiento completo de los factores que influencian la fricción y el conocimiento de los materiales y técnicas constructivas (incluyendo el equipo) que finalmente dictan la fricción inicial y a largo plazo (Hall et al, 2009).

Las propiedades del agregado son el factor predominante que determina el comportamiento friccionante de una superficie de concreto hidráulico o asfáltico. El agregado es el principal componente en la mezcla de concreto hidráulico o asfáltico, y por lo tanto, en ambos tipos de pavimento el agregado esta en contacto con los neumáticos de los vehículos (Hall et al, 2009).

Los ensayos y caracterización del agregado deben ser realizados en la fracción de agregado que controlará el comportamiento friccionante. En general, los agregados gruesos controlan las propiedades de las mezclas asfálticas, mientras que el agregado fino controla las propiedades friccionantes de las mezclas de concreto hidráulico (Hall et al, 2009).

En términos de diseño por fricción y comportamiento, las propiedades más importantes del agregado son:

- Propiedades mineralógicas y petrográficas: Composición/estructura y dureza de los minerales del agregado
- Propiedades geométricas y físicas: angularidad, forma y textura
- Propiedades mecánicas: resistencia a la abrasión/desgaste y características de pulido
- Propiedades de durabilidad: sanidad

> Composición / Estructura y dureza de los minerales del agregado.

Una de las propiedades más importantes del agregado usado en superficies de rodamiento es la composición de los minerales que constituyen las partículas de agregado. Los agregados que presentan los niveles más altos de resistencia al pulido y al desgaste típicamente están compuestos de cristales (grano grueso) duros, cementados fuertemente embebidos en una matriz de minerales blandos. Las diferencias en el tamaño del grano y dureza proporcionan una superficie abrasiva renovada constantemente debido a las tasas de desgaste diferencial y la rotura de los granos más duros de la matriz de minerales más suaves (Hall et al, 2009).

Para determinar la dureza de los minerales se recomienda el ensayo de la dureza de Mohs o una inspección visual del agregado (usando la nomenclatura descriptiva de la norma ASTM C 294) puede proporcionar un entendimiento básico de la composición mineralógica y estructura. Si se requiere información más detallada se puede recurrir al análisis petrográfico. Es importante mencionar que se han observado comportamientos diferentes en agregado con mineralogía similar pero de diferentes sitios (Hall et al, 2009).

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 17 DE 74 F1 RI-003

Los agregados constituidos de minerales duros (Dureza de Mohs > 6) típicamente resisten el desgaste y otras formas de degradación y pueden pulirse fácilmente cuando están sujetos al trafico. Los agregados constituidos de minerales moderadamente suaves (dureza de Mohs de 3 a 6) solo resisten el pulido y se desgastan rápidamente cuando son sujetos al tráfico. Las agencias en Estados Unidos consideran que el agregado grueso ideal consiste de 50 a 70 por ciento de grano grueso y minerales duros embebidos en una matriz de 30 a 50 por ciento de minerales blandos (Hall et al, 2009).

> Angularidad, forma y textura del agregado.

La angularidad del agregado, forma y textura son parámetros importantes para definir la microtextura y macrotextura. El agregado fino que presenta lados angulosos y cúbicos o formas irregulares generalmente proporciona niveles más altos de microtextura, mientras que aquel con lados redondeados o formas alargadas generalmente produce una baja microtextura. En el agregado grueso, la trabazón de partículas angulares y ásperas produce una macrotextura profunda. En las mezclas asfálticas las partículas de agregado planas y alargadas tienden a orientarse horizontalmente dando como resultado profundidades de macrotextura bajas.

El ensayo de vacíos sin compactar (AASHTO T 304 y ASTM C 1252) es el mas comúnmente usado para evaluar la angularidad, esfericidad y textura del agregado fino. Para evaluar el agregado grueso se utiliza comúnmente el ensayo de caras fracturadas (ASTM D 5821) (Hall et al, 2009)

> Resistencia al desgaste/abrasión

El uso de agregado resistente a la abrasión es importante para evitar el rompimiento cuando se somete a las fuerzas cortantes del tráfico o durante el manejo, almacenamiento, mezclado, colocación y compactación. El rompimiento de las partículas de agregado fino y/o grueso puede alterar la granulometría significativamente, y por lo tanto afectar las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica, resistencia del concreto hidráulico y en general la porosidad y macrotextura de la mezcla (Hall et al, 2009)

La resistencia al desgaste en agregado grueso es determinada usualmente a través del ensayo de desgaste de los ángeles, aunque en años recientes ha sido reportado que el ensayo Microdeval es un mejor indicador del potencial de rompimiento de agregado grueso. En el caso del agregado fino se recomienda utilizar el ensayo Microdeval (Hall et al, 2009)

> Resistencia al pulido.

La resistencia del agregado fino y grueso al pulido debido al paso de los vehículos es el principal factor en el comportamiento a largo plazo.

Los ensayos recomendados para evaluar la resistencia al pulido son el residuo insoluble en acido (ASTM D 3042) y valor de pulido o pulimento acelerado (ASTM D 3319). En el caso del agregado fino no hay un ensayo para evaluar de manera directa las características de pulido

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 18 DE 74 F1 RI-003

y por lo tanto, se utiliza el ensayo de residuo insoluble en ácido (AIR, por sus siglas en inglés), el cual indica la cantidad de carbonatos en el agregado (Hall et al, 2009)

Para el agregado grueso, tanto el ensayo de residuo insoluble en acido como el ensayo de pulimento acelerado (PSV, por sus siglas en inglés) son usados (Hall et al, 2009)

> Sanidad

La sanidad se refiere a la capacidad de un agregado a resistir la degradación causada por los efectos climáticos y ambientales (por ejemplo el humedecimiento y secado, congelamiento y deshielo). Las propiedades de sanidad en el agregado son importantes para evitar el rompimiento, particularmente cuando se utiliza en climas extremosos (Hall et al, 2009)

El método de ensayo que se considera caracteriza mejor la sanidad del agregado es el ensayo de sanidad por el uso de sulfato (ASTM C 88, AASHTO T 104). Este ensayo fue desarrollado para simular, sin la necesidad de un equipo de refrigeración, los efectos de la acción del congelamiento y deshielo del agua en las partículas de agregado (Hall et al, 2009)

El ensayo puede realizarse por el uso de sulfato de sodio o de magnesio, este último es preferido debido a que produce menos variación en la perdida de masa y es un mejor indicador de agregado grueso resistente y débil (Hall et al, 2009)

Los ensayos de laboratorio no garantizan un adecuado comportamiento a la fricción en campo, de manera que es esencial que sean usados en conjunto con el historial de comportamiento en campo para identificar los tipos de agregado aceptables (Hall et al. 2009).

2.5 Modelos para estimar la resistencia al deslizamiento

Una manera de estimar la resistencia al deslizamiento es a través de modelos que correlacionan algunas características del agregado, como el valor de pulido, la sanidad, el desgaste de los Ángeles entre otros, y el volumen de transito.

Rusell desarrolló un modelo para estimar el número de fricción (FN) de las propiedades del material, edad, tránsito y clima:

FN=41,4-0,00075D²-1,45ln(LAVP)+0,245LAWEAR

Donde

FN número de fricción calculado a 40 mph (64 km/h)

D porcentaje de dolomita en la mezcla

LAVP pasadas de vehículos acumulados por carril

LAWEAR desgaste de los Ángeles

El Departamento de Transporte de Wisconsin, actualmente emplea este modelo para estimar el FN. El modelo al igual que muchos otros, no diferencia la macrotextura y la microtextura (Noyce et al, 2005).

Otro modelo utilizado para estimar la fricción es el modelo desarrollado en los años setentas por el Transport Research Laboratory (TRL) del Reino Unido. Se basó en el análisis de regresión llevado a cabo en 139 secciones de carretera en el Reino Unido con densidades de tránsito mayores a 4 000 vehículos comerciales por día. Este modelo expresa el valor mínimo de fricción en verano a esperar durante la vida en servicio de una determinada superficie y solo aplica a tramos rectos.

Donde

- SFC coeficiente de fricción transversal medio medido con equipo SCRIM a 50 km/h (calculado como el promedio de tres mediciones realizadas durante los meses de verano, cuando el coeficiente es mínimo)
- CVD número de vehículos comerciales por día (considera todos los vehículos, que descargados, exceden 1,5 ton)
- CPA coeficiente de pulimento acelerado del agregado, de acuerdo con la Norma BS812, Part 114

Este modelo tampoco toma en cuenta la influencia de la macrotextura. Debido a que el modelo anterior no reflejaba la situación real para tránsitos elevados, el TRL desarrolló una nueva ecuación en 1998, la cual se ajusta mucho mejor al comportamiento real de las superficies de carreteras, sobre todo para tránsitos elevados.

$$SFC=K-[B \times Ln(CVD)] + [A \times CPA]$$

Donde

A, B y C son constantes que dependen del trazado geométrico de la carretera, para el caso de autopistas y carreteras con trazos geométricos sin grandes complicaciones: A=0,000618, B=0,0225, y K=0,252.

Este modelo introduce un peso ponderado en forma logarítmica del tránsito; asimismo, define los requisitos de pulido que deben poseer los agregados para formar parte de la superficie de rodamiento, y así asegurar un adecuado coeficiente de fricción mínimo a lo largo de la vida de diseño, bajo tránsito, medido con el equipo SCRIM (Pagola et al, 2002).

Cenek Meter y Jamieson Neil J (2006), desarrollaron un modelo para estimar la resistencia al deslizamiento en riegos de sello en carreteras de Nueva Zelanda. El modelo se basó en el análisis de 47 tramos rectos en carreteras estatales todos los tramos tuvieron una edad de tres años o más. De los 47 tramos, 24 fueron construidos con agregado aluvial con un valor de pulido de 52 a 62 y tránsitos de vehículos comerciales pesados entre 12 y 468 por carril por día. Los 23 sitios restantes se construyeron con agregado de roca dura proveniente de

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 20 DE 74 F1 RI-003

bancos con valores de pulido de 43 a 65, y un tránsito de vehículos comerciales pesados por carril por día de 22 y 380. En este estudio se concluyó que los factores que determinan el comportamiento de la resistencia al deslizamiento en los pavimentos en servicio fueron el espaciamiento entre las partículas de agregado y el número de vehículos comerciales pesados (HCV). Asimismo, se aseveró que el estado de equilibrio de pulido de superficie de riegos de sello se alcanza después de 1 millón de vehículos comerciales pesados. El modelo desarrollado fue:

$$MSSC_{av} = 0.0013PSV + 0.10e^{-CHCV} - 0.007ALD + 0.44$$

Donde

MSSC_{av} coeficiente promedio en verano del SCRIM

PSV valor de pulido del agregado de acuerdo con la norma BS 812, Part 114

CHVC tránsito acumulado de vehículos comerciales pesados por carril en millones =

tránsito de vehículos comerciales >3,5 ton/carril/día*edad de la superficie

(años)*días operacionales por año (=300/10⁶)

ALD la separación mínima promedio del riego de sello (macrotextura), (mm)

Este modelo proporcionó un coeficiente de determinación (r^2) de 0,35; un error estándar de estimación de 0,04 para un 95% de confianza de que el valor estimado de resistencia al deslizamiento, en términos del coeficiente del SCRIM, estará dentro de \pm 0,08 de los valores observados. Este modelo a diferencia de los anteriores, toma en cuenta tanto la microtextura como la macrotextura.

Gandhi Poduru M. et al (1991), desarrollaron un modelo de regresión basado en el análisis de datos de laboratorio y campo de 20 tramos de carreteras de Puerto Rico. El trabajo de campo consistió en medir el coeficiente de fricción (μ) a 64 km/h (40 mph) con el equipo Mumeter, y en extraer muestras representativas de pavimento flexible. En laboratorio se determinó el BPN y la macrotextura de losas de pavimento flexible de 60 x 60 cm. El agregado de la mezcla asfáltica se recuperó por extracción, y se le realizaron ensayos de pulimento acelerado y de AIR. Las ecuaciones desarrolladas son:

$$\mu = 47,034 - 0,288$$
 Sol

$$\mu = -23.0 + 1.325 PSV$$

Donde

μ coeficiente de fricción mínimo

Sol solubilidad del agregado en el ácido, de acuerdo con la Norma ASTM D 3042-86, en porcentaje. Donde la solubilidad es 100%-AIR%

PSV valor de pulido del agregado medido con la escala auxiliar de acuerdo con la Norma ASTM D 3319.

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 21 DE 74 F1 RI-003

En las ecuaciones anteriores, el coeficiente de correlación (r²) de la ecuación del AIR fue de 0,836 y su significancia estadística p=0,0001 y para la ecuación que involucra el PSV el coeficiente de correlación resultó de 0,472 para una significancia estadística p= 0,041.

Del estudio surgieron recomendaciones para las especificaciones de PSV y solubilidad. Se recomendó especificar un PSV de 48 para autopistas y áreas de alto riesgo; y un PSV de 45 para áreas de bajo riesgo. Asimismo, se recomendó incluir en la especificación el contenido de carbonato; un 10% máximo de solubilidad en el agregado para autopistas y áreas de alto riesgo; y 25% máximo de solubilidad del agregado para carreteras primarias.

Chien N Fue y Hua Chen (1998), desarrollaron un modelo de regresión múltiple para estimar el número de resistencia al deslizamiento (SN40) por medio de características del agregado como el valor de pulido (PV), y la pérdida de sanidad en cinco ciclos por el uso de sulfato de magnesio. Este modelo se deriva de un número limitado de datos de campo y de laboratorio. En campo, se realizaron mediciones de fricción con el remolque de rueda bloqueada (ASTM E 274) en tramos de carretera sometidos a más de 8 millones de vehículos por carril.

$$SN40 = 19 - 0.40*(pérdida de sanidad)+0.83*RPV$$

Donde

SN40 número de resistencia al deslizamiento a 64 km/h (40 mph)

Pérdida de sanidad en cinco ciclos por el uso de sulfato de

magnesio del agregado que pasa la malla de 9,5 mm (3/8") y se

retiene en la malla de 4,75 mm (No. 4), en porcentaje.

RVP valor de pulido residual de acuerdo con el método de prueba TEX

438-A

El coeficiente de determinación (r²) obtenido fue de 0,98. Este modelo considera únicamente la microtextura.

Otro modelo desarrollado para estimar la fricción en pavimentos es el modelo de la AIPCR (Asociación Mundial de Carreteras), conocido como Índice de Fricción Internacional (IFI). El modelo es de tipo exponencial, y se describe en función de una constante (FR60) referida a la velocidad de deslizamiento de 60 km/h. La ecuación del IFI es la siguiente:

$$IFI = A + B * F * e^{\left(\frac{S-60}{Sp}\right)} + C * Tx$$

donde

IFI índice de Fricción Internacional a 60 km/h

F valor de la fricción medido en campo

- Sp constante de velocidad, Sp= a+b*Tx
- a y b constantes del equipo utilizado para evaluar la macrotextura
- Tx medida de la macrotextura
- A,B y C Constantes del equipo utilizado para medir la fricción. La constante C es igual a cero para neumáticos lisos

El IFI se indica por dos números expresados entre paréntesis separados por una coma (F,M); el primero representa la fricción (F); y el segundo la macrotextura (M). El primero es un número adimensional, y el segundo un número positivo sin límites determinados y unidades de velocidad (km/h). El valor cero de fricción indica deslizamiento perfecto, y el valor uno adherencia perfecta .

El IFI es una escala de referencia (que relaciona la fricción con la velocidad de deslizamiento); que sirve para estimar la constante de referencia de velocidad (Sp) y la de fricción a 60 km/h (F60) de un pavimento. El par de valores (F60 y Sp) expresan el IFI de un pavimento, y permiten calcular el valor de fricción, F(S), a cualquier velocidad de deslizamiento (S) (De Soliminihac, 2001).

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 23 DE 74 F1 RI-003

3. Equipos y métodos de prueba utilizados para medir la resistencia al deslizamiento

3.1 Equipos para medir la resistencia al deslizamiento

Los siguientes equipos de fricción fueron usados en esta investigación y son explicados brevemente a continuación.

3.1.1 Péndulo británico

El péndulo británico fue desarrollado por el Laboratorio de Investigación en Carreteras y Transporte (TRRL por sus siglas en inglés) del Reino Unido y mide la resistencia a la fricción entre la superficie de rodamiento y un deslizador de hule, Figura 5. Es un aparato de tipo impacto que mide la pérdida de energía cuando un lado del deslizador de hule es desplazado sobre la superficie de rodamiento (ASTM E 303).



Figura 5 Péndulo británico de fricción

La fricción medida por el péndulo simula el comportamiento de un vehiculo con neumáticos estriados frenando con las ruedas bloqueadas a 50 km/h en una carretera mojada (ELE)

El aparato consta de un brazo con un deslizador de hule montado en un extremo, una escala graduada y una aguja indicadora.

La cantidad de energía absorbida por el deslizador de hule pasando sobre la superficie de ensayo es reflejada en el ángulo del brazo del péndulo al final de su recorrido. La escala graduada y la aguja indicadora indican la medición numérica de la fricción.

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 24 DE 74 F1 RI-003

El aparato puede ser utilizado tanto en campo como en laboratorio y enfatiza la contribución de la microtextura a la fricción (Henderson et al, 2006). En campo se usa para determinar el coeficiente de fricción de la superficie de rodamiento y en laboratorio para medir el valor de pulido de especimenes ensayados en la rueda de pulimento acelerado.

3.1.2 Mu meter

El Mu meter es un remolque de peso ligero con tres neumáticos que mide las condiciones de fricción de la superficie de rodamiento. El equipo es remolcado por un vehículo y consiste de un marco triangular con dos ruedas de ensayo que miden la fricción y una trasera que conduce un registrador y da estabilidad, un transductor y un mecanismo de registro, Figura 6. En condiciones de operación las ruedas de ensayo son configuradas a un ángulo de 7.5°con respecto a la línea de arrastre. Durante las mediciones el Mu meter registra continuamente la fuerza de fricción lateral entre la superficie de rodamiento y las ruedas de ensayo.



Figura 6 Mu meter

El Mu meter fue diseñado para pistas de aterrizaje y los valores de fricción recomendados por la Agencia Federal de Aviación (FAA por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos ⁽²⁾ se presentan en la Tabla 2

Tabla 2 Valores de resistencia al deslizamiento para pistas de aterrizaje

Requisito	64 km/h	96 km/h
Mínimo	0,42	0,26
Planear mantenimiento	0,52	0,38
Diseño nuevo/construcción	0,72	0,66

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 25 DE 74 F1 RI-003

3.2 Métodos de prueba utilizados para evaluar las propiedades friccionantes del agregado grueso

Hay varios métodos para evaluar el potencial de un agregado para resistir el pulido debido al paso de los vehículos. Estos métodos son clasificados principalmente en dos grupos: los métodos que miden la abrasión del agregado (pérdida de la angularidad y rompimiento) debido a las cargas del tránsito y los métodos que miden el pulido del agregado (pérdida de textura). Además, en estos métodos el cambio de una de las características del agregado, por ejemplo en la pérdida de sanidad con sulfato de magnesio o el valor de pulido, es medido después de someterse a una condición especial y los cambios son atribuidos al pulido del agregado o su capacidad para resistir el rompimiento. Estos cambios en el agregado son relacionados con respecto al potencial para resistir el pulido (Masad et al, 2009).

Para evaluar las propiedades friccionantes del agregado en esta investigación se realizaron los ensayos de pulimento acelerado, residuo insoluble en ácido y sanidad del agregado. Los dos primeros se describen brevemente a continuación.

3.2.1 Pulimento acelerado (Tex 438-A)

El ensayo de pulimento acelerado es utilizado para clasificar a los agregados de acuerdo a su susceptibilidad al pulido. El ensayo consta de tres pasos principales: la preparación de los especímenes, el pulido de los especímenes en la máquina de pulimento acelerado y el ensaye de fricción con el péndulo británico.

El ensayo de pulimento acelerado, de acuerdo con la norma Tex 438-A, consiste en elaborar pastillas con agregado que pasa la malla de 3/8" y se retiene en la malla de ¼". Se elaboran cuatro pastillas por cada tipo de agregado a evaluar y dos con agregado de referencia, un ensayo requiere la fabricación de catorce pastillas, es decir, se pueden evaluar tres diferentes agregados y el de referencia en la misma prueba. El agregado se coloca en moldes, previamente cubiertos con un agente desmoldante (gel lubricante a base de agua), y los huecos que quedan entre las partículas de agregado son llenados con arena de Ottawa, que pasa la malla del No. 20 y retiene en la malla No. 30, hasta una profundidad entre 6 y 12 mm (1/4 y ½ pulgada). Los moldes con agregado son llenados con una resina epóxica y se dejan fraguar por aproximadamente cuatro horas. Una vez que la resina fragua las pastillas son retiradas del molde se cepillan y lavan con agua para retirar los residuos de arena, con una lija se talla la parte trasera del espécimen para ajustarlos y que entren en la rueda metálica.

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 26 DE 74 F1 RI-003



Figura 7 Colocación del agregado en el molde



Figura 8 Llenado del molde con resina epóxica

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 27 DE 74 F1 RI-003



Figura 9 Molde y pastillas de agregado fabricadas

Con un marcador permanente se identifican los especímenes en la parte trasera y uno de sus lados se marca con un punto. Enseguida se determina el coeficiente de fricción inicial, para lo cual se coloca el espécimen en el péndulo británico con el lado marcado hacia atrás, con un aspersor se aplica suficiente agua para cubrirlo y se suelta el brazo del péndulo, esta operación se repite cinco veces y se registra de la segunda a la quinta lectura. Luego los especimenes se colocan alrededor de la periferia de la rueda metálica con el punto hacia el frente y ésta se monta en la máquina de pulimento acelerado.



Figura 10 Montaje de las pastillas alrededor de la rueda metálica

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 28 DE 74 F1 RI-003



Figura 11 Colocación de la rueda metálica en la máquina de pulimento



Figura 12 Máquina de pulimento acelerado

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 29 DE 74 F1 RI-003

Se enciende la máquina, se alimenta de abrasivo de carburo de silicio, tamaño No. 150, en una cantidad de 6 ± 2 g por minuto y un flujo de agua de 50 a 75 ml por minuto, y los especímenes se pulen durante 9 horas continuas con el neumático liso de hule macizo. Transcurridas las nueve horas los especímenes son retirados de la rueda metálica y lavados con agua para retirar el abrasivo. Se dejan sumergidos en agua por lo menos una hora. Después se determina el valor de pulido de la siguiente manera, se coloca un espécimen en el péndulo británico, con el lado marcado hacia atrás, con un aspersor se aplica suficiente agua para cubrirlo y se realiza el deslizamiento; se continúan realizando deslizamientos hasta que se obtengan cuatro lecturas consecutivas iguales y el promedio de éstas se registra como el valor de pulido residual (Tex 438-A, April 2006).

3.2.2 Residuo insoluble en ácido (Tex 612-J)

Este ensayo es rápido, fácil de ejecutar y se recomienda como una prueba preliminar para evaluar las propiedades de desgaste-pulido del agregado. Proporciona el porcentaje de material sin carbonatos (residuo insoluble) en agregados calcáreos. El ensayo consiste en colocar en un recipiente de vidrio una muestra representativa de 25 g de agregado que pasa la malla de 3/8"; previamente lavado y secado, lentamente se agrega ácido clorhídrico y con una varilla de vidrio se revuelve el agregado hasta que la reacción termine. Una vez que la reacción termina, se adicionan 25 ml más de ácido clorhídrico para asegurar que la reacción ha terminado completamente. Cuando la reacción termina se decanta la solución y se filtra el residuo a través de un papel filtro del No. 12, se lava con agua destilada y se seca en el horno a una temperatura de 105 °C durante dos horas. Transcurrido el tiempo de secado se deja enfriar el agregado y se determina su masa. El residuo insoluble en ácido se expresa como la relación entre la masa del residuo y la masa inicial de agregado, en porcentaje (Tex 612-J, April 2006).

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 30 DE 74 F1 RI-003

4 Trabajo experimental

4.1 Evaluación de la fricción en campo

4.1.1 Selección de los tramos evaluados

Se seleccionaron tramos rectos y de los cuales se conociera el tipo de mezcla o tratamiento, procedencia del agregado, fecha de construcción y puesta en servicio. Los tramos evaluados corresponden a la carretera libre Saltillo-Torreón, tienen una longitud de 500 m aproximadamente y la superficie de rodamiento fue reconstruida unos meses antes de iniciar las mediciones. La información relacionada con los tramos se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3 Información de los tramos evaluados en campo

Tramo	Сро	Carril	kı	m	Fecha de puesta en servicio	Agregado utilizado	Banco	Mezcla o tratamiento	
1	Α	Der	8+720	9+220		Escoria de		Riego de	
2	Α	Der	15+550	16+000	30/06/08		horno arco	Ahmsa	sello
3	Α	Der	21+000	21+500			eléctrico		Sello
4	Unico	Der	48+500	49+000	30/08/08	Mezcla	Ahmaa/	Carpeta sin	
5	Unico	Der	54+000	54+500	30/06/06	50%	Ahmsa/ Contrisa	sello	
6	Unico	Der	60+000	60+500		escoria/50%caliza	Continsa	Sello	
7	Unico	Der	103+000	111+000	31/08/08	Riolita	Gravamil	Carpeta con	
8	Unico	Der	108+000	108+500	31/06/06	Niolita	Gravarilli	sello	

Se realizaron mediciones de fricción con péndulo británico y con Mu meter en el sentido Saltillo-Torreón en la rodada externa. Las mediciones de fricción con péndulo fueron realizadas por personal del IMT de acuerdo con la norma ASTM E 303 y las mediciones con Mu Meter por personal de Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT a una velocidad de 64 km/h de acuerdo con la norma ASTM E 670. Las mediciones se realizaron durante tres años en los meses de octubre y noviembre.

En las Figuras 13 a 19 se presentan fotografías de los tramos seleccionados.

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 31 DE 74 F1 RI-003



Figura 13 Tramo km 8+700 Riego de sello con escoria (Bco. Planta Ahmsa)



Figura 14 Tramo km 16+000 Riego de sello escoria (Planta Ahmsa)

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 32 DE 74 F1 RI-003



Figura 15 Tramo km 21+000 Riego de sello con escoria (Planta Ahmsa)



Figura 16 Vista del Riego de sello con escoria (Planta Ahmsa)

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 33 DE 74 F1 RI-003



Figura 17 Tramo km 48+500 carpeta de mezcla de agregados escoria-caliza (Planta Ahmsa/Contrisa)



Figura 18 Vista de la mezcla de agregados escoria-caliza (Planta Ahmsa/Contrisa)

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 34 DE 74 F1 RI-003



Figura 19 Tramo km 108+000 riego de sello de riolita (Bco. Gravamil)

4.1.2 Datos del volumen de tránsito

Para el estudio es necesario calcular el volumen de tránsito que circuló por los tramos evaluados y para lo cual los datos de transito fueron obtenidos de la página electrónica de la DGST. Los reportes de datos viales tienen un año de retraso, es decir en el 2010 se reporta el Transito Diario Promedio Anual (TDPA) del 2009, por esta razón el volumen de transito correspondiente al 2010 se proyectó. El volumen de vehículos que circuló por los tramos evaluados se calculó con los datos del 2009, 2010 y los proyectados para el 2010.

4.2 Evaluación de la resistencia al pulido del agregado

Al agregado de los bancos en estudio se le realizó el ensayo de gravedad específica, residuo insoluble en ácido, sanidad por el uso de sulfato de magnesio y la resistencia al pulido se evalúo por medio del ensayo de pulimento acelerado. En cuanto a las mezclas de agregado solo se evalúo la resistencia al pulido y la pérdida de sanidad se calculó a partir del porcentaje de pérdida individual de cada componente ponderada con respecto al porcentaje presente en la mezcla.

Los agregados evaluados fueron caliza del Banco Contrissa y Secovisa, escoria de horno de arco eléctrico de la Planta Ahmsa y riolita del Banco Gravamil.

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 35 DE 74 F1 RI-003

En lo que respecta a las mezclas de agregado, para evaluar la mejora de la resistencia al pulido los agregados se mezclaron en diferentes porcentajes. Los agregados del Banco Gravamil y Secovisa se mezclaron en porcentajes respecto a la masa del agregado. En el caso del banco Contrissa y Ahmsa la mezcla de agregado se realizó en base a volumen, debido a la diferencia significativa entre las densidades relativas (gravedad específica) de los agregados.

Las proporciones de mezclado usadas fueron 50/50, 60/40, 70/30 y 80/20 por ciento de agregado con valor de pulido residual alto y bajo, respectivamente.

A los agregados individuales y las mezclas se les asignó una nomenclatura y en lo sucesivo serán identificados como se indica en la Tabla 4.

Tabla 4	Nomenclatura de los agregados	v mezclas de agregados
		,==:

Descripción	Nomenclatura
Agregado con valor de pulido alto, banco Ahmsa	A1
Agregado con valor de pulido alto, banco Gravamil	A2
Agregado con valor de pulido bajo, banco Contrissa	B1
Agregado con valor de pulido bajo, banco Secovisa	B2
Mezcla 50/50 de A1 y B1	50/50-1
Mezcla 60/40 de A1 y B1	60/40-1
Mezcla 70/30 de A1 y B1	70/30-1
Mezcla 80/20 de A1 y B1	80/20-1
Mezcla 50/50 de A2 y B2	50/50-2
Mezcla 60/40 de A2 y B2	60/40-2
Mezcla 70/30 de A2 y B2	70/30-2
Mezcla 80/20 de A2 y B2	80/20-2

Se ensayaron un total de cuatro probetas por cada agregado y mezclas de agregado. A cada agregado y sus mezclas se les determinó la fricción inicial con el péndulo británico, de acuerdo con el método de prueba ASTM E 303; y después fueron pulidos durante nueve horas en la máquina de pulimento acelerado de acuerdo con el método de prueba Tex 438-A. Durante el ensaye después de cada hora de pulido se determinó el valor de pulido de cada probeta.

Es importante aclarar que antes del pulido los valores medidos son registrados como Número de Péndulo Británico (NPB) y después del pulido como valor de pulido. El NPB es el promedio de cuatro deslizamiento consecutivos con el péndulo y el valor de pulido residual es el valor constante obtenido después de cuatro deslizamiento consecutivos con el péndulo británico.

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 36 DE 74 F1 RI-003

5. Resultados y análisis

5.1 Mediciones de fricción en campo

Los coeficientes de fricción obtenidos con las mediciones de Mu meter se presentan en la Tabla 5 y los resultados obtenidos con el péndulo de fricción se presentan en la Tabla 6.

Tabla 5 Mediciones de fricción con Mu meter

				Trai	nos		Mu	
Agregado	Banco	Сро	Carril	evalu	2008	2009	2010	
Escoria de	Dlanta			8+720	9+260	0,46	0,46	0,39
horno arco	Planta Ahmsa	Α	Der	15+550	16+100	0,51	0,51	0,50
eléctrico	Allilloa			21+000	21+600	0,53	0,54	0,53
	Ahmsa/			48+500	49+500	0,37	0,25	0,22
Mezcla Escoria/caliza	Contrisa	Único	Der	54+000	54+500	0,30	0,26	0,19
E3coria/caliza	Continsa			60+060	60+660	0,42	0,33	0,28
Riolita	Gravamil	Único	Der	103+100	103+700	0,63	0,55	0,48
Riolita	Gravarriii	Offico	Dei	108+000	108+600	0,56	0,55	0,52

Tabla 6 Mediciones de fricción con Péndulo británico

				Trai	nos		NPB	
Agregado	Banco	Сро	Carril	evalu	2008	2009	2010	
Escoria de	Dianta			8+720	9+260	79	66	65
horno arco	Planta Ahmsa	Α	Der	15+550	16+100	80	70	69
eléctrico	Allilisa			21+000	21+600	78	70	70
	A boss of			48+500	49+500	62	54	53
Mezcla Escoria/caliza	Ahmsa/ Contrisa	Único	Der	54+000	54+500	64	62	57
L3coria/canza	Continsa			60+060	60+660	66	58	55
Riolita	Gravamil	Único	Der	103+100	103+700	83	75	72
Niolita	Giavailiii	UTIICO	Dei	108+000	108+600	80	74	72

El coeficiente de fricción para capas de rodadura recién construidas, medido con el equipo Mu meter en la rodada externa debe ser igual a seis décimas (0,6) o mayor de acuerdo con las normas de la SCT N CTR CAR 1 04 008/09 "Capas de rodadura con mezcla asfáltica en frío" párrafo H 3 y N CTR CAR 1 04 006/09 "Carpetas asfálticas con mezcla en caliente" párrafo H.4 inciso H.4.1. En la Tabla 5 puede verse que en las mediciones iniciales, del 2008, en los tramos del km 8+700 al 60+060 se obtuvieron coeficientes de fricción inferiores al especificado en las normas mencionadas y en particular en el tramo 48+500 al 60+600 el coeficiente de fricción inicial fue inferior al mínimo recomendado (Tabla 5), solo los tramos del km 103+000 al 108+000 cumplen con dicho criterio.

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 37 DE 74 F1 RI-003



Figura 20 Mediciones de fricción con péndulo británico

Por otra parte el objetivo principal de la investigación es establecer una correlación entre el coeficiente de fricción y el valor de pulido, para lo cual se requiere que la superficie de rodamiento haya alcanzado la etapa de equilibrio o pulido, es decir el coeficiente de fricción mínimo que permanecerá durante la vida de diseño, para definir el volumen de transito necesario para pulir la superficie del pavimento.

Considerando que las mediciones de fricción fueron realizadas prácticamente en el mismo mes, para evitar variaciones debido a cambios estacionales, se parte de la premisa de que la etapa de pulido se ha alcanzado cuando no haya o se presenten pequeñas variaciones en el coeficiente de fricción. En las figuras 21 y 22 se aprecia que el coeficiente de fricción de los tramos con riego de sello de escoria, hasta la última medición, permanece prácticamente constante y en los tramos de riolita y la mezcla de agregado escoria/caliza disminuye con el tiempo pero aún no se define claramente la etapa de pulido. Por lo anterior, todavía no se puede establecer una correlación entre el valor de pulido y el coeficiente de fricción, es necesario realizar más mediciones hasta que el coeficiente de fricción se estabilice.

En las figuras 23 a 25 se muestran de manera grafica los valores del coeficiente de fricción determinados con Mu meter, péndulo y el valor de pulido residual del agregado.

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 38 DE 74 F1 RI-003



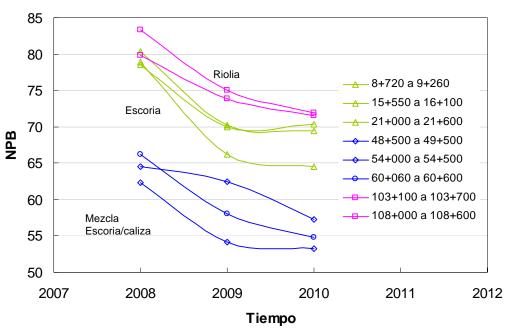


Figura 21 Evolución del coeficiente de fricción determinado con el Péndulo británico

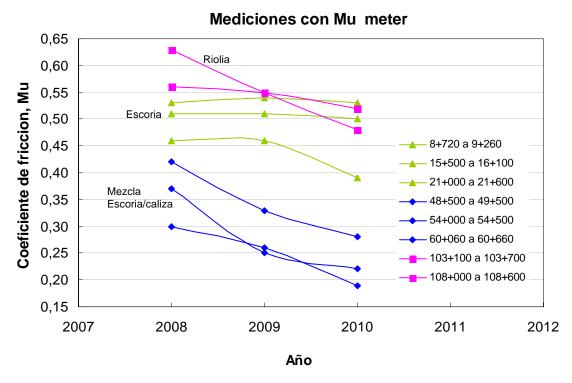


Figura 22 Evolución del coeficiente de fricción determinado con el Mu meter

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 39 DE 74 F1 RI-003

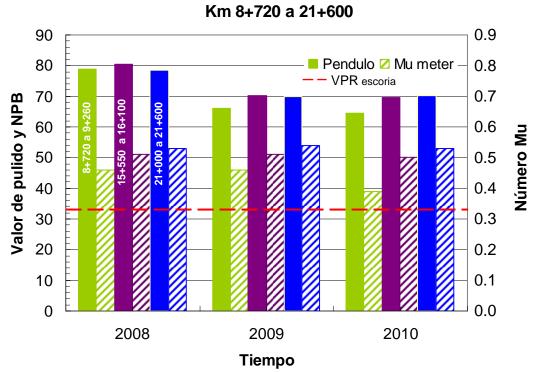


Figura 23 Coeficiente de fricción, numero del péndulo británico y valor de pulido de escoria

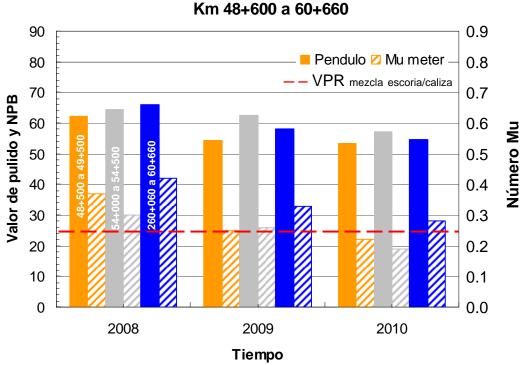


Figura 24 Coeficiente de fricción, numero del péndulo británico y valor de pulido de la mezcla escoria/caliza

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 40 DE 74 F1 RI-003

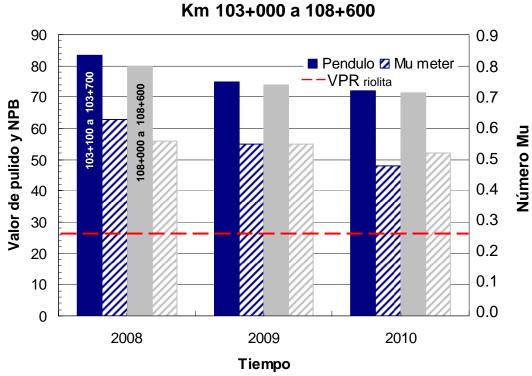


Figura 25 Coeficiente de fricción, numero del péndulo británico y valor de pulido de la riolita

El volumen de tránsito calculado para los tramos evaluados se presenta en la Tabla 7. En ésta puede notarse que los volúmenes de tránsito que han experimentado los tramos, desde que iniciaron las mediciones a la fecha, son bajos. En el caso del criterio del TxDOT se considera que el agregado se ha pulido cuando la superficie de rodamiento ha experimentado más de 8 millones de vehículos por carril.

Tabla 7 Volumen de tránsito de los tramos evaluados

	No.	km			TDPA		Volumen de transito						
Cuerpo	Carriles	, ,		2008	2009	2010	2008	2009	2010	Acumulado	Por carril		
		8+720	9+260	9666	10022	10500	3528090	3658030	3832500	11018620	5 509 310		
Α	2	15+400	15+950	9666	10022	10500	3528090	3658030	3832500	11018620	5 509 310		
		21+000	21+600	9666	10022	10500	3528090	3658030	3832500	11018620	5 509 310		
		48+500	49+500	2672	2895	3250	975098	1056493	1186250	3217840	3 217 840		
Único	2	54+000	54+550	2672	2895	3250	975098	1056493	1186250	3217840	3 217 840		
		60+000	60+600	2672	2895	3250	975098	1056493	1186250	3217840	3 217 840		
Único	2	103+100	103+700	2970	3222	3450	1083868	1176030	1259250	3519148	3 519 148		
		108+000	108+600	2970	3222	3450	1083868	1176030	1259250	3519148	3 519 148		

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 41 DE 74 F1 RI-003

5.2 Mezclas de agregado

Los resultados de los ensayos realizados a los agregados individuales se presentan en la Tabla 8. Es importante mencionar que las muestras de agregado fueron obtenidas de los bancos en estudio y no del material utilizado durante la construcción o conservación de los tramos evaluados.

Tabla 8	Resultados de los ensayos de los agregados individua	ales
i abia c	riocalidado do los cilicayos do los agrogados irlaividas	2100

Banco	Valor de pulido residual	Residuo Insoluble en ácido %	Gravedad específica	Pérdida de Sanidad MgSO ₄	Desgaste de los Ángeles %
Contrissa	23	1	2,663	1	24
Secovisa	22	2	2,652	2	22
Gravamil	31	100	2,368	4	18
Ahmsa	33	60	3,038	0	22





Ahmsa Gravamil

Contrissa Secovisa

Figura 26 Especimenes fabricados

Durante el ensayo de pulimento acelerado después de cada hora de pulido se determinó el valor de pulido de cada probeta. Los resultados del valor de pulido de los agregados individuales después de 9 horas se indican en las Tablas A1 a A4 del anexo, y en las figuras 27 a 30 se presentan en forma gráfica los resultados.

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 42 DE 74 F1 RI-003

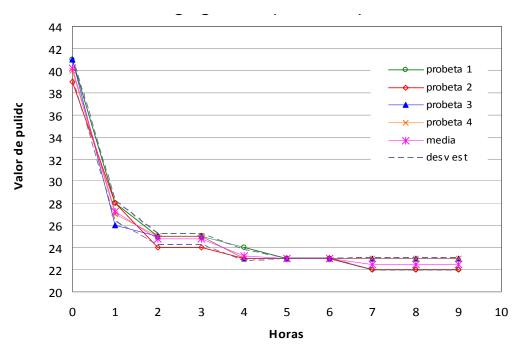


Figura 27 Evolución del valor de pulido agregado A1 (Contrisa)

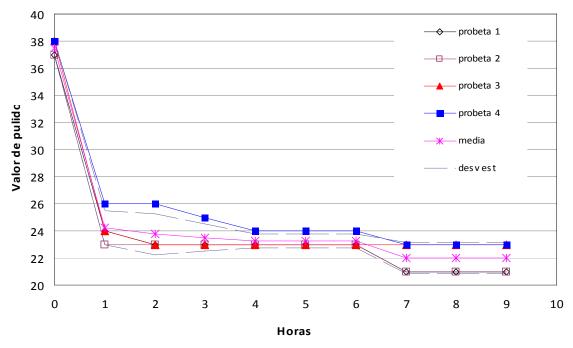


Figura 28 Evolución del valor de pulido agregado B2 (Secovisa)

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 43 DE 74 F1 RI-003

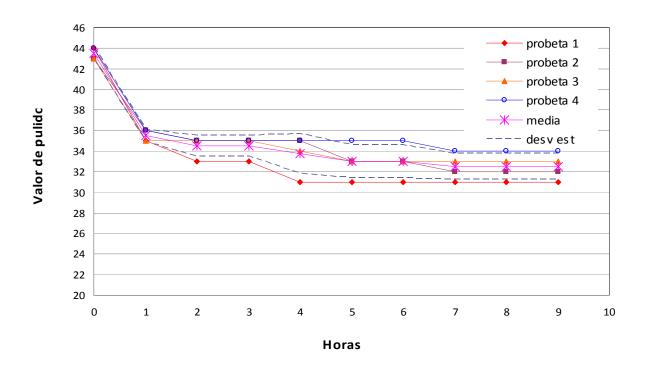


Figura 29 Evolución del valor de pulido agregado A1 (Ahmsa)

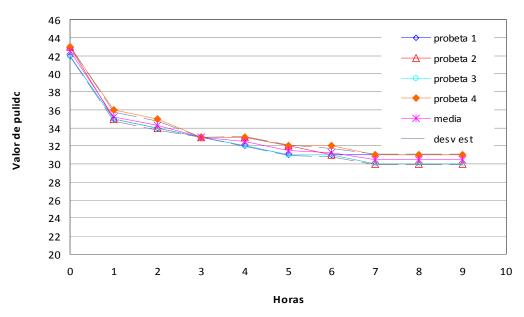


Figura 30 Evolución del valor de pulido agregado A2 (Gravamil)

En cuanto a las mezclas de agregados como se mencionó anteriormente solo se realizó el ensayo de pulimento acelerado y al igual que los agregados individuales durante el ensaye después de cada hora de pulido se determinó el valor de pulido de cada probeta. En lo que

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 44 DE 74 F1 RI-003

se refiere a la perdida de sanidad, se calculó a partir del porcentaje de pérdida individual de cada componente ponderada con respecto al porcentaje presente en la mezcla. Los resultados del valor de pulido después de 9 horas y la perdida de sanidad de las mezclas de agregado se indican en la Tabla 9. En las Tablas A5 a A12 del anexo se muestran los valores de pulido a cada hora para un total de nueve horas de pulido, y en las figuras 31 a 38 se presentan en forma gráfica los datos de dichas tablas.

Tabla 9 Resultados del ensayo de pulimento acelerado de las mezclas de agregado

Descripción	Nomenclatura	NPB	Valor de pulido residual	Pérdida de Sanidad MgSO ₄ (%)
Mezcla 50/50 de A1 y B1	50/50-1	39	25	0,5
Mezcla 60/40 de A1 y B1	60/40-1	42	27	0,4
Mezcla 70/30 de A1 y B1	70/30-1	43	28	0,3
Mezcla 80/20 de A1 y B1	80/20-1	44	30	0,2
Mezcla 50/50 de A2 y B2	50/50-2	38	25	3,0
Mezcla 60/40 de A2 y B2	60/40-2	42	26	3,0
Mezcla 70/30 de A2 y B2	70/30-2	41	27	3,0
Mezcla 80/20 de A2 y B2	80/20-2	42	29	4,0

MEZCLA A1-B1 50/50

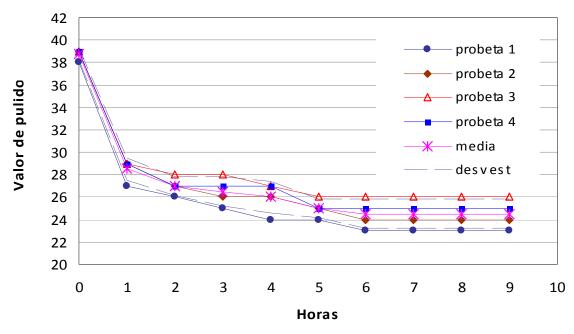
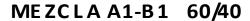


Figura 31 Evolución del valor de pulido agregado mezcla A1-B1 50/50 (Ahmsa-Contrisa)

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 45 DE 74 F1 RI-003



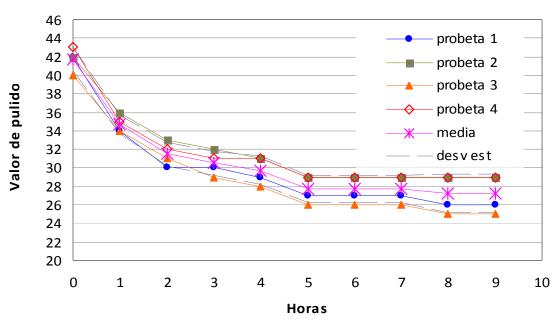


Figura 32 Evolución del valor de pulido agregado mezcla A1-B1 60/40 (Ahmsa-Contrisa)

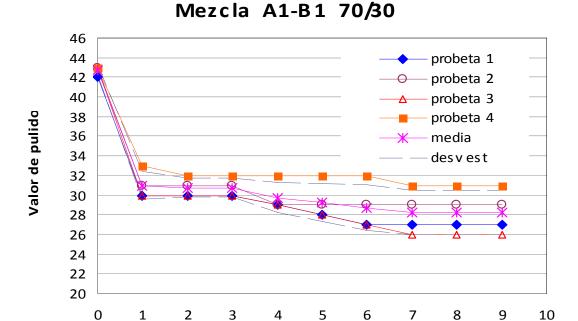


Figura 33 Evolución del valor de pulido agregado mezcla A1/B1 70-30 (Ahmsa-Contrisa)

Horas

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 46 DE 74 F1 RI-003

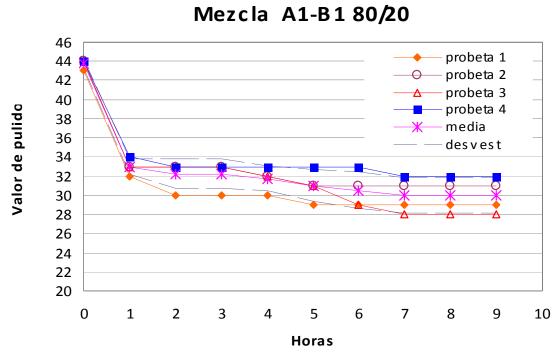


Figura 34 Evolución del valor de pulido agregado mezcla A1-B1 80/20 (Ahmsa-Contrisa)

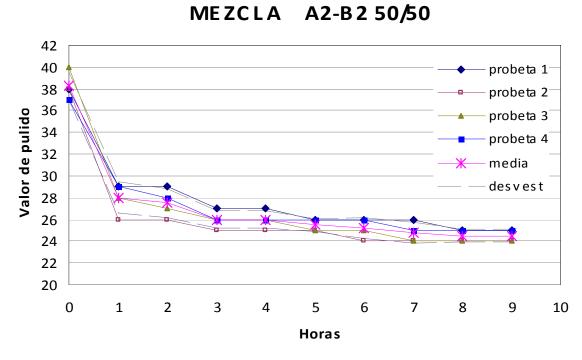


Figura 35 Evolución del valor de pulido agregado mezcla A2-B2 50/50 (Gravamil-Secovisa)

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 47 DE 74 F1 RI-003

MEZCLA A2-B2 60/40

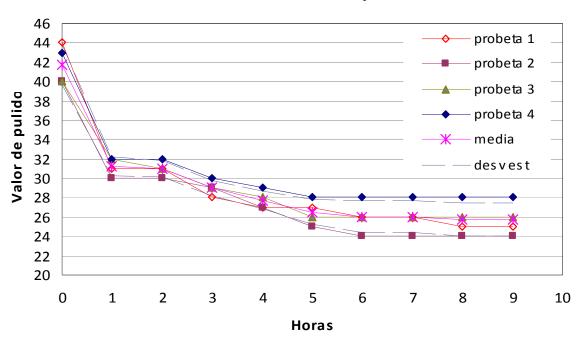


Figura 36 Evolución del valor de pulido agregado mezcla A2-B2 50/50 (Gravamil-Secovisa)

Mezcla A2-B2 70/30

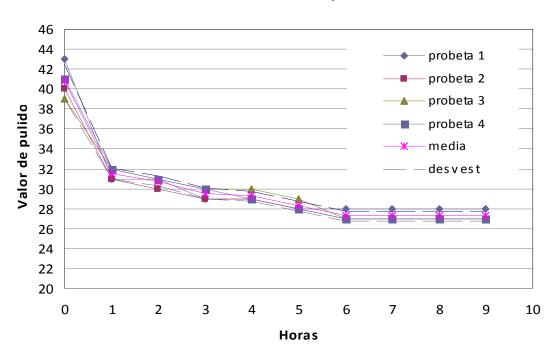


Figura 37 Evolución del valor de pulido agregado mezcla A2-B2 50/50 (Gravamil-Secovisa)

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 48 DE 74 F1 RI-003

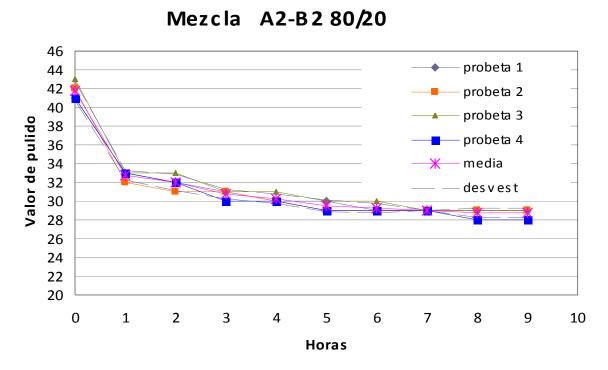


Figura 38 Evolución del valor de pulido agregado mezcla A2-B2 50/50 (Gravamil-Secovisa)

De los resultados obtenidos fue encontrado que para los agregados individuales y mezclas de agregado el valor de pulido residual es alcanzado al final de las 9 horas de pulido.

Las figuras 27 a 38 muestran las graficas de valor de pulido contra el tiempo de pulido. En dichas gráficas la tendencia general fue que hubo una disminución rápida en el NPB en la primera hora de pulido. Después de la primera hora de pulido y hasta la sexta, la disminución del valor de pulido es muy poca y a partir de la séptima y hasta el final del ensayo el valor de pulido es prácticamente constante. En la primer hora, el valor de pulido disminuyó 7 y 13 unidades en el agregado con alto (Ahmsa y Gravamil) y bajo valor de pulido (Contrisa y Secovisa), respectivamente; de la segunda a la sexta hora, a partir de la cual el valor permanece prácticamente constante, la disminución del valor de pulido fue de dos unidades para todos los agregados, Figura 39.

Para el caso de todas las mezclas la disminución del valor de pulido en la primera hora fue de 10 unidades aproximadamente y menor a uno de la segunda a la sexta hora, Figuras 40 y 41.

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 49 DE 74 F1 RI-003

Agregados individuales

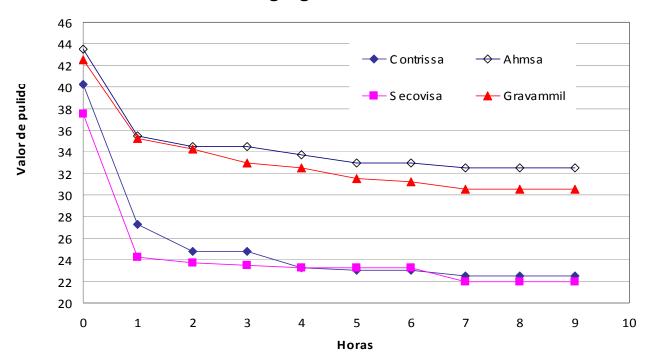


Figura 39 Evolución del valor de pulido para los agregados individuales

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 50 DE 74 F1 RI-003

MEZCLA A1/B1

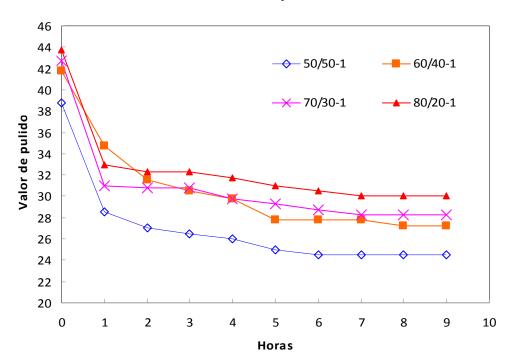


Figura 40 Evolución del valor de pulido para la mezcla A1/B1

MEZCLA A2/B2

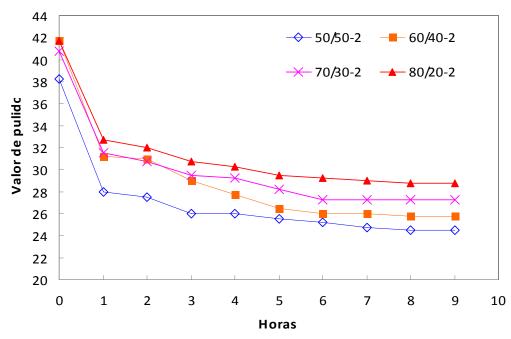


Figura 41 Evolución del valor de pulido para la mezcla A2/B2

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 51 DE 74 F1 RI-003

También, se determinó la tasa de pulido de cada agregado y de las mezclas de agregado para cada hora que duró el ensayo. La tasa de pulido es la diferencia entre el coeficiente de fricción inicial (NPB) y el valor de pulido (VP), dividido entre el coeficiente de fricción inicial. Las figuras 42 y 43 muestran la tasa de pulido de cada agregado y de las mezclas de agregado para cada hora que duró el ensayo. Para los agregados individuales, la tasa de pulido total obtenida se encuentra en un rango de 25 a 44%, mientras que la tasa de pulido en la primera hora está entre 18 y 35 %; en el caso de las mezclas de agregado la tasa de pulido total obtenida se encuentra en un rango de 31 a 37%, y la tasa de pulido en la primera hora está entre 17 y 27 %. Puede observarse que en la primera hora la tasa de pulido del agregado calizo es de casi el doble respecto al agregado con valor de pulido alto (escoria de alto horno y la riolita).

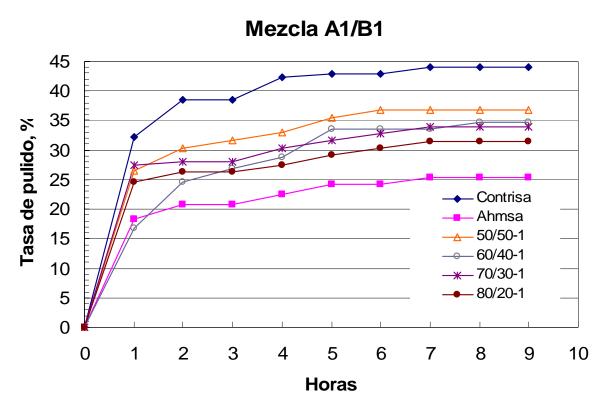


Figura 42 Tasa de pulido para los agregados individuales y mezcla A1/B1

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 52 DE 74 F1 RI-003



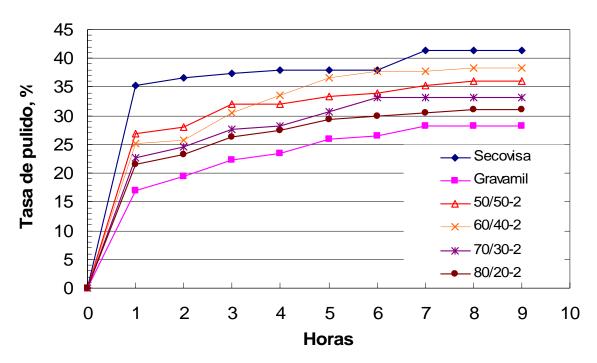


Figura 43 Tasa de pulido para los agregados individuales y mezcla A2/B2

En cuanto al efecto de la proporción de mezclado en el valor de pulido, en la figuras 44 y 45 puede verse que el valor de pulido residual se incrementa con el incremento de la proporción de agregado con valor de pulido alto. Para la mezcla A1-B1 el valor de pulido residual se incrementa aproximadamente 2 unidades y en la mezcla A2-B2 se incrementa aproximadamente una unidad por cada incremento de 10% en la proporción de agregado con valor de pulido alto. Para ambas mezclas el incremento máximo en el valor de pulido es de 7 unidades con la proporción 80%-20%.

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 53 DE 74 F1 RI-003

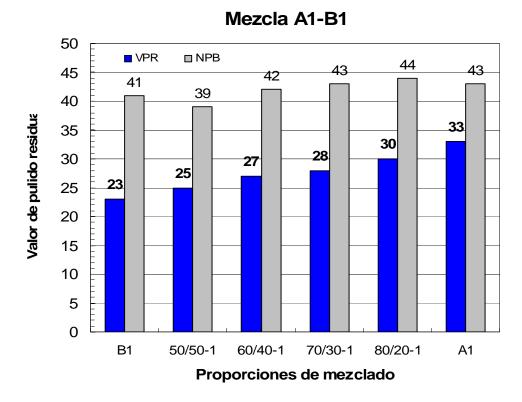


Figura 44 Mejoramiento del valor de pulido residual mezcla A1-B1

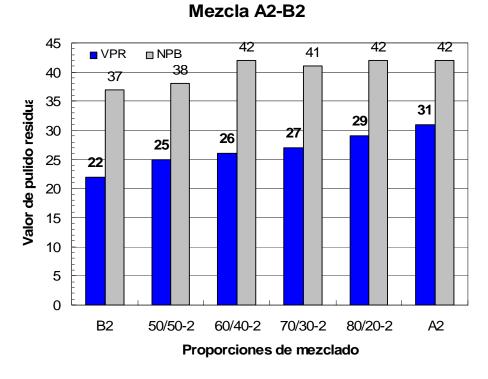


Figura 45 Mejoramiento del valor de pulido residual mezcla A2-B2

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 54 DE 74 F1 RI-003

Para definir la proporción de mezclado más adecuada es necesario referirse a una especificación de valor de pulido. La especificación del valor de pulido depende del volumen de tránsito que solicita el pavimento. Para volúmenes de tránsito altos se requiere un valor de pulido alto.

En México, no existe una especificación de valor de pulido y es arriesgado referirse a especificaciones de otros países. Sin embargo, para el presente estudio se toma como referencia la especificación del TxDOT que considera la UGST de Coahuila.

El Tx DOT tiene como práctica para controlar la resistencia al deslizamiento de sus carreteras, evaluar las propiedades friccionantes del agregado a través de pruebas de laboratorio y el comportamiento en campo del agregado.

El agregado grueso utilizado en la elaboración de mezcla asfáltica en caliente se clasifica, con base en los resultados de los ensayos de pulimento acelerado y sanidad del agregado por el uso del sulfato de magnesio, en cuatro categorías: A, B, C y D, como es mostrado en la Figura 46. El agregado clase A y B es requerido para volúmenes de tránsito ≥ 20 000 000 de pasadas de vehículos por carril, respectivamente.

En campo monitorean el comportamiento del agregado (evolución del pulido del agregado) a través de mediciones de fricción con el skid trailer (ASTM E 274). Con el historial de datos de las mediciones de fricción en campo se determina el volumen de tránsito para el cual el agregado alcanza su estado de equilibrio o pulido.

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 55 DE 74 F1 RI-003

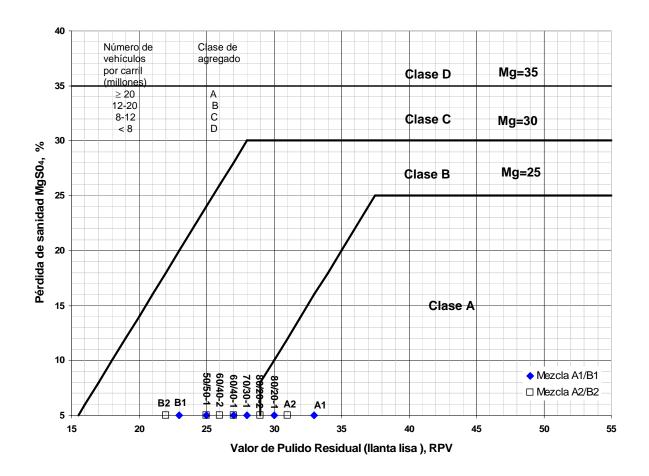


Figura 46 Gráfica de clasificación del agregado superficial mezcla asfáltica en caliente, TxDOT (Masad et al, 2009)

En la Figura 46 se presenta en forma gráfica los resultados de valor de pulido y pérdida de sanidad de las mezclas de agregado evaluadas, en la Tabla 9 se nota que todas las mezclas presentaron perdidas de sanidad menores al 5% por lo que para fines de clasificación de las mezclas se consideró una pérdida de sanidad de 5%, en dicha figura puede verse que la mezcla 80/20 es la que cumple con la especificación de valor de pulido para volúmenes de tránsito mayor a 20 000 000 de pasadas de vehículos por carril, pero desde el punto de vista económico dicha mezcla no es factible, porque se requiere un porcentaje elevado de agregado con valor de pulido alto, el cual es importado de otros sitios lo que incrementa el costo de la mezcla asfáltica. Para volúmenes de transito de 12 millones a a-20 millones de pasadas de vehículos por carril la proporción 60/40 en ambas mezclas, cumple con la especificación de valor de pulido del Tx DOT y desde el punto de vista económico la proporción de agregado con valor de pulido alto es razonable.

Finalmente, para establecer la correlación entre el valor de pulido residual y las proporciones de mezclado se realizó una regresión lineal con los resultados de los ensayos. Las Figuras

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 56 DE 74 F1 RI-003

47 y 48 presentan los modelos obtenidos. Con dichos modelos puede estimarse el valor de pulido residual para una determinada proporción de agregado con valor de pulido alto.

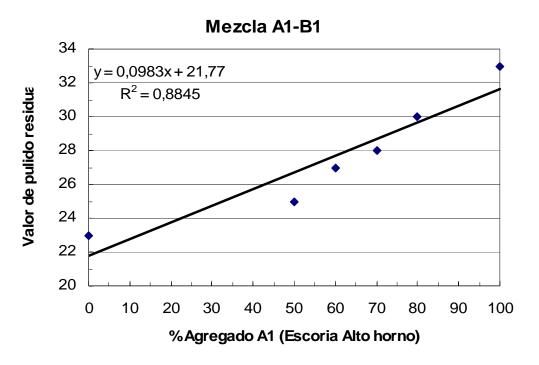


Figura 47 Correlación entre el valor de pulido residual y la proporción de mezclado.

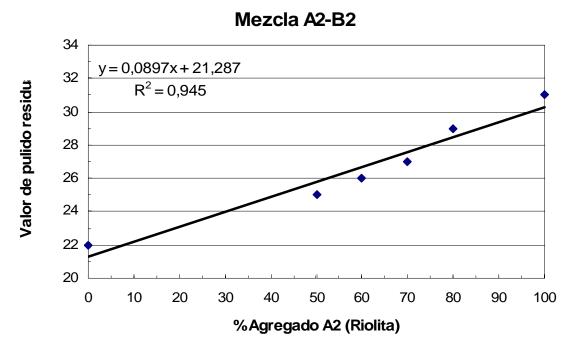


Figura 48 Correlación entre el valor de pulido residual y la proporción de mezclado.

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 57 DE 74 F1 RI-003

6. Conclusiones

En cuanto a la evaluación del coeficiente de fricción en campo:

 El volumen de tránsito que ha experimentado los tramos evaluados es bajo y en las mediciones efectuadas aún no se define claramente la etapa de pulido o equilibrio del coeficiente de fricción. Debido a lo anterior, todavía no se puede establecer una correlación entre el valor de pulido y el coeficiente de fricción, es necesario realizar más mediciones hasta que el coeficiente de fricción se estabilice.

En lo que se refiere a las mezclas de agregado:

- Para todos los casos, agregados individuales y mezclas de agregados, la mayor pérdida de valor de pulido ocurre en la primera hora del ensayo, en las horas subsecuentes la pérdida es poco significativa hasta llegar a un valor prácticamente constante al final de las nueve horas de pulido. Lo anterior, equivale a que en campo la mayor pérdida de resistencia al deslizamiento ocurre en un período corto de tiempo; para definir dicho período de tiempo, es necesario realizar mediciones anuales de fricción para determinar el volumen de tránsito para el cual el agregado alcanza la etapa de pulido.
- La tasa de pulido total para los agregados individuales evaluados está en un rango de 25 a 44% y la mayor pérdida de valor de pulido ocurre en la primer hora de pulido, siendo ésta de 18 a 35%. Para las mezclas de agregado, la tasa de pulido total está en un rango de 31 a 37% y en la primer hora la pérdida de valor de pulido fue de 17 a 27 %.
- Por cada 10% de incremento en la proporción de agregado con valor de pulido alto, el valor de pulido residual se incrementa aproximadamente 2 unidades en la mezcla escoria de arco eléctrico/caliza (A1/B1) y una unidad en la mezcla riolita/caliza (A2-B2).
- De acuerdo con la metodología del Tx DOT, el agregado calizo evaluado no es apropiado para mezclas de agregado destinadas a volúmenes de tránsito mayor a 20 millones de vehículos por carril. Para volúmenes de tránsito de 12-20 millones de vehículos por carril parece ser que la mezcla de agregado 60%/40% puede considerarse una alternativa viable para mejorar el valor de pulido residual del agregado con valor de pulido bajo (menores a 25).
- La metodología del TxDOT no puede ser aplicada completamente en México, puesto que fue desarrollada para equipo de medición de campo (locked Wheel skid ASTM E 274) diferente al utilizado en México (Mu meter) y las mediciones de ambos equipos no son comparables directamente sin un estudio de correlación.

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 58 DE 74 F1 RI-003

7. Recomendaciones

- Continuar realizando mediciones de fricción en los tramos evaluados hasta que el coeficiente de fricción se estabilice.
- Considerar la evaluación de más tramos de prueba para contar con un gran número de datos y establecer una mejor correlación entre el valor de pulido y el coeficiente de fricción.
- Las ecuaciones de regresión obtenidas para estimar el valor de pulido residual de las mezclas de agregado son válidas para agregados con características mineralógicas similares a las del agregado evaluado en este estudio.
- En el presente estudio el agregado fue evaluado con respecto a su resistencia al deslizamiento, también es necesario realizar otros ensayos que determinen su calidad y la compatibilidad con el asfalto para garantizar que la mezcla asfáltica sea resistente y durable. La evaluación de la calidad del agregado es sólo una de las etapas que comprende el proceso de diseño de mezclas asfálticas.

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 59 DE 74 F1 RI-003

8. Referencias

- Achútegui Viada Francisco; La adherencia neumático-pavimento y la seguridad en la circulación, Revista Ingeniería Civil No 124, Revista Técnica de la Asociación de Ingenieros Civiles Españoles (2001)
- 2. Ashby Joseph T, Blended Aggregate Study Final Report, Louisiana Highway Research, Report No. FHWA/LA-80/145, (March, 1980).
- 3. ASTM C88, Standard Test Method for Soundness of Aggregate by use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate, ASTM designation C 88-99a (2005)
- ASTM C 131, Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, ASTM designation C 131-03 (2005)
- 5. Cenek Meter D, and Jamieson Neil J, Sensitivity of In-service Skid Resistance Performance of Chipseal Surfaces to Aggregate and Texture Characteristics, 2006.
- 6. De Solminihac T, Hernan; Índice de Fricción Internacional, Revista Bit, Revista Técnica de la Construcción, Edición No 22, Chile (Jun, 2001)
- 7. ELE, Operating Instructions EL42-6000 Friction Tester.
- 8. Fu Chien N; Chen Hua, Alternate Polish Value and Soundness Specifications for Bituminous Coarse Aggregate, Report Number 7-3994, Texas Department of Transportation in cooperation with FHWA (Dec,1998)
- 9. Gandhi Poduru, M; Colucci Benjamín, and Ghandi Srinivas, P; Polishing of Aggregates and Wet-weather Accident Rates for Flexible Pavements, Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, TRB No. 1300, National Research Council, Washington DC (1991)
- 10. Hall W Jim Dr, Titus Leslie, Smith Kelly and Evans Lynn, Wambold James, Guide for pavement friction, 2009.
- 11. Henderson R, Cook G, Cenek P, Patrick J, Potter S, The effect of crushing on the skid resistance of chipseal roads, Land Transport New Zealand Research Report 295, New Zealand, 2006
- 12. Janoo Vincent C, and Coronen Charles, Performance Testing of Hot Mix Asphalt Aggregates, Special Report 99-20, US Army Corps of Engineers (Dec, 1999)

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 60 DE 74 F1 RI-003

- 13. Liang Y Robert, Blending Proportions of High Skid and Low Skid Aggregate, Final Report, Department of Civil Engineering, University of Akron, Ohio Department of Transportation (August 2003).
- 14. Masad Eyad, Rezai Arash, Chowdhury Arif, Harris Pat, Predicting asphalt mixture skid resistance based on aggregate characteristics, Report 0-5627-1, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, August 2009.
- 15. Noyce David A; Bahia Hussain U; Yambó Josué, M; Guisk Kim, Incorporating Road Safety into Pavement Management: Maximizing Asphalt Pavement Surface Friction for Road Safety Improvements, Midwest Regional University Transportation Center, Traffic Operations and Safety (TOPS) Laboratory (April, 2005)
- 16. Pagola, Marta; Giovanon Oscar; Poncino Hugo, Relación entre el coeficiente de fricción y pulimento de agregados, Memorias de la XXXII Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto de Argentina (2002)
- 17. Texas Department of Transportation, Tex-612-J Acid Insoluble Residue for Fine Aggregate, 600-J Chemical Test Procedure, Revised April del 2006
- 18. Texas Department of Transportation, Tex-438-A Accelerated Polish Test for Coarse Aggregate, 400-A Concrete Test Procedure, Revised July del 2005.

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 61 DE 74 F1 RI-003

Anexo

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 62 DE 74 F1 RI-003

Tabla A1 NPB y valores de pulido para el agregado B1 (Bco. Contrissa)

Probotas	Lecturas					НОІ	RAS				
Fiobelas	Lecturas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	42	33	28	30	27	26	26	26	26	26
Probetas 1 2 3	2	42	33	27	29	26	25	25	25	25	25
1	3	41	33	26	27	25	25	24	24	24	24
'	4	40	31	25	26	24	24	24	23	23	23
	NPB	41									
	Valor de pulido		28	25	25	24	23	23	22	22	22
	1	40	31	27	29	26	25	25	25	24	24
	2	39	30	26	28	25	24	24	24	23	23
2	3	39	29	25	27	24	24	23	23	23	23
	4	39	28	25	25	24	24	23	23	22	22
	NPB	39									
	Valor de pulido		28	24	24	23	23	23	22	22	22
-	1	43	31	29	30	26	25	26	26	26	26
	2	41	30	28	29	26	24	25	25	25	25
3	3	41	29	27	28	25	23	24	24	24	24
	4	40	28	26	26	24	23	24	24	23	23
	NPB	41									
	Valor de pulido		26	25	25	23	23	23	23	23	23
	1	41	31	29	29	26	25	25	25	25	25
	2	40	30	27	28	26	24	24	24	24	25
4	3	40	29	26	27	25	23	24	24	24	24
	4	40	29	25	26	24	23	23	24	24	24
	NPB	40									
	Valor de pulido		27	25	25	23	23	23	23	23	23
	NPB	41									
	VPR		27	25	25	23	23	23	23	23	23

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 63 DE 74 F1 RI-003

Tabla A2 Valores de pulido para el agregado B2 (Bco. Secovisa)

Probetas	Lecturas					НОГ	RAS				
Fioneias	Lecturas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	38	29	26	26	24	26	26	25	25	25
	2	37	28	25	25	23	25	25	24	24	24
1	3	37	27	24	25	23	24	24	23	23	23
'	4	37	26	24	24	23	24	24	22	22	22
	NPB	37									
	Valor de pulido		24	23	23	23	23	23	21	21	21
	1	38	27	26	26	24	26	26	25	25	24
	2	38	26	25	25	23	25	25	24	24	24
2	3	37	24	24	24	23	24	24	23	23	23
_	4	36	24	24	24	23	24	23	23	23	22
	NPB	37									
	Valor de pulido		23	23	23	23	23	23	21	21	21
	1	39	29	26	26	25	25	25	25	25	25
	2	38	28	26	25	24	24	25	24	24	24
3	3	37	27	25	25	23	23	24	24	23	23
	4	36	26	25	24	23	23	24	23	23	23
	NPB	38									
	Valor de pulido		24	23	23	23	23	23	23	23	23
	1	39	29	29	27	27	26	26	26	26	26
	2	38	28	28	26	26	25	25	25	25	25
4	3	37	27	27	26	26	24	25	24	24	24
	4	37	26	27	25	25	24	24	23	23	23
	NPB	38									
	Valor de pulido		26	26	25	24	24	24	23	23	23
	NPB	37									
	VPR		24	24	24	23	23	23	22	22	22

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 64 DE 74 F1 RI-003

Tabla A3 Valores de pulido para el agregado A1 (Planta Ahmsa)

Probetas	Lecturas					НОІ	RAS				
Fioneias	Lecturas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	44	37	35	34	35	35	33	34	34	34
	2	44	36	34	34	34	34	32	33	33	33
1	3	44	36	34	33	33	33	32	32	32	32
'	4	43	36	34	33	33	32	32	32	32	32
	NPB	44									
	Valor de pulido		35	33	33	31	31	31	31	31	31
	1	44	39	37	37	36	35	35	34	34	34
	2	43	38	36	36	36	34	34	34	34	34
2	3	43	38	36	36	35	34	34	33	32	32
_	4	42	37	36	36	35	34	33	33	32	32
	NPB										
	Valor de pulido	43	36	35	35	35	33	33	32	32	32
	1	44	39	38	38	36	35	35	35	35	35
	2	43	38	37	37	35	34	34	34	34	34
3	3	43	37	36	36	34	34	34	34	33	33
	4	42	37	35	36	34	33	33	33	33	33
	NPB	43									
	Valor de pulido		35	35	35	34	33	33	33	33	33
	1	44	37	39	36	37	37	37	36	36	36
	2	44	36	37	36	36	36	36	35	34	34
4	3	43	36	37	36	36	36	35	34	34	34
	4	43	36	36	35	36	36	35	34	34	34
	NPB	44									
	Valor de pulido		36	35	35	35	35	35	34	34	34
	NPB 43										
	VPR		36	35	35	34	33	33	33	33	33

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 65 DE 74 F1 RI-003

Tabla A4 Valores de pulido para el agregado A2 (Bco. Gravamil)

Probetas	Lecturas					НОІ	RAS				
Frobelas	Lecturas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	42	36	36	35	35	34	34	34	33	33
	2	42	36	35	34	34	33	33	33	33	32
1	3	42	35	35	34	34	33	33	32	32	32
'	4	41	35	35	34	33	32	33	32	32	32
	NPB	42									
	Valor de pulido		35	34	33	32	31	31	31	31	31
	1	44	36	36	34	34	34	34	33	33	34
	2	43	36	36	34	34	33	33	33	32	32
2	3	43	36	35	34	34	33	33	32	32	32
	4	42	35	35	33	33	32	32	32	31	31
	NPB	43									
	Valor de pulido		35	34	33	33	32	31	30	30	30
	1	42	36	36	34	34	34	33	33	33	33
	2	42	36	36	34	34	33	33	32	32	32
3	3	41	36	35	34	34	33	32	32	32	32
	4	41	35	35	33	34	32	32	32	31	31
	NPB	42									
	Valor de pulido		35	34	33	32	31	31	30	30	30
	1	43	37	36	34	34	34	34	34	33	34
	2	43	37	36	34	34	34	33	33	32	32
4	3	42	36	36	34	34	33	33	32	32	31
	4	42	36	35	33	34	32	32	32	31	31
	NPB	43									
	Valor de pulido		36	35	33	33	32	32	31	31	31
	NPB	42									
	VPR		35	34	33	33	32	31	31	31	31

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 66 DE 74 F1 RI-003

Tabla A5 Valores de pulido mezcla 50/50-1 (Ahmsa-Contrissa)

Probetas	Lecturas					НОІ	RAS				
Probetas	Lecturas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	38	31	29	29	26	26	25	26	27	27
	2	38	30	28	28	25	25	24	25	25	25
1	3	37	29	27	27	24	24	24	24	25	25
'	4	37	28	27	26	24	24	23	24	24	24
	NPB	38									
	Valor de pulido		27	26	25	24	24	23	23	23	23
	1	39	32	31	30	28	29	26	27	28	28
	2	39	31	31	29	27	28	26	26	27	27
2	3	38	30	30	29	27	27	25	25	26	26
2	4	38	29	29	28	26	27	24	24	25	25
	NPB	39									
	Valor de pulido		29	27	26	26	25	24	24	24	24
	1	40	33	31	31	30	29	29	29	29	29
	2	39	32	29	29	29	29	28	28	28	28
3	3	38	31	29	29	28	28	27	27	27	27
	4	38	30	29	29	27	27	26	27	26	26
	NPB	39									
	Valor de pulido		29	28	28	27	26	26	26	26	26
	1	40	33	30	30	29	28	27	27	28	28
	2	39	32	29	29	28	27	26	26	27	27
4	3	39	31	28	29	28	26	26	25	26	26
, T	4	39	30	27	28	27	26	25	25	26	26
	NPB	39									
	Valor de pulido		29	27	27	27	25	25	25	25	25
	NPB	39									
	VPR		29	27	27	26	25	25	25	25	25

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 67 DE 74 F1 RI-003

Tabla A6 Valores de pulido mezcla 60/40-1 (Ahmsa-Contrissa)

Probetas	Lecturas					НОІ	RAS				
Probetas	Lecturas	0	1	2	3	4	5	6	7	31 30 30 30 29 30 28 29 27 26 33 33 33 32 27 27 28 27 28 27 28 27 27 28 27 28 27 28 27 27 28 27 28 27	9
	1	43	38	34	33	33	32	32	31	30	30
	2	42	37	33	33	32	31	31	30	29	29
1	3	41	36	32	32	31	30	30	30	28	28
'	4	41	35	31	31	30	29	29	29	27	27
	NPB	42									
	Valor de pulido		34	30	30	29	27	27	27	26	26
	1	44	38	35	34	34	31	32	33	33	33
	2	43	38	34	34	33	31	31	32	32	32
2	3	41	37	34	33	32	31	31	31	31	31
	4	41	37	34	33	32	30	30	30	29	29
	NPB	42									
	Valor de pulido		36	33	32	31	29	29	29	29	29
	1	41	37	34	31	32	30	27	29	30	30
	2	41	37	33	30	31	29	28	28	29	29
3	3	40	36	33	30	30	28	27	27	28	28
3	4	39	36	32	29	29	27	27	27	27	27
	NPB	40									
	Valor de pulido		34	31	29	28	26	26	26	25	25
	1	44	38	34	34	34	33	33	33	33	33
	2	43	37	34	34	33	32	32	32	32	32
4	3	42	37	33	33	32	31	31	31	31	31
	4	42	36	33	32	32	30	30	30	30	30
	NPB	43									
	Valor de pulido		35	32	31	31	29	29	29	29	29
	NPB	42									
	VPR		35	32	31	30	28	28	28	27	27

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 68 DE 74 F1 RI-003

Tabla A7 Valores de pulido mezcla 70/30-1 (Ahmsa-Contrissa)

Probetas	Lecturas	HORAS										
	Lecturas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	1	42	33	34	34	31	31	29	29	31	31	
	2	41	32	33	33	30	30	28	28	30	30	
1	3	40	31	32	32	30	29	27	27	29	29	
'	4	43	30	31	31	30	29	27	27	28	28	
	NPB	42										
	Valor de pulido		30	30	30	29	28	27	26	27	27	
	1	44	34	34	34	33	32	32	33	34	33	
	2	43	34	34	33	32	31	31	32	32	32	
2	3	42	33	33	33	31	30	31	30	31	31	
	4	42	33	32	32	31	30	30	30	30	30	
	NPB	43										
	Valor de pulido		31	31	31	29	29	29	29	29	29	
	1	43	33	33	33	33	31	30	29	31	31	
	2	43	32	32	32	32	30	29	27	29	29	
3	3	42	31	31	31	32	30	28	26	28	28	
3	4	42	31	30	30	31	29	28	26	27	27	
	NPB	43										
	Valor de pulido		30	30	30	29	28	27	26	26	26	
	1	44	35	35	35	33	35	34	34	35	34	
	2	43	35	34	34	32	34	33	33	34	34	
4	3	43	34	34	34	32	34	33	32	33	33	
4	4	43	34	33	33	31	33	33	31	33	33	
	NPB	43										
	Valor de pulido		33	32	32	30	32	32	31	31	31	
NPB		43										
	VPR		31	31	31	29	29	29	28	28	28	

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 69 DE 74 F1 RI-003

Tabla A8 Valores de pulido mezcla 80/20-1 (Ahmsa-Contrissa)

Probetas	Lecturas					НОІ	RAS				
	Lecturas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	44	34	34	33	32	33	34	32	33	33
	2	43	33	33	32	32	32	33	32	32	32
1	3	43	33	32	31	31	31	32	31	31	31
'	4	43	32	31	30	30	30	30	29	30	30
	NPB	43									
	Valor de pulido		32	30	30	30	29	29	29	29	29
	1	45	35	34	36	34	34	33	34	34	33
	2	44	34	34	36	33	33	32	33	33	33
2	3	44	34	33	35	33	32	31	32	33	33
	4	44	33	33	34	32	31	31	31	32	32
	NPB	44									
	Valor de pulido		33	33	33	32	31	31	31	31	31
	1	44	34	34	35	34	34	33	30	31	30
	2	44	33	34	33	34	33	32	29	30	30
3	3	43	33	33	33	33	32	30	28	29	29
3	4	43	33	32	33	33	32	30	27	28	28
	NPB	44									
	Valor de pulido		33	33	33	32	31	29	28	28	28
	1	45	36	35	35	35	36	36	34	35	35
	2	44	35	34	34	34	35	35	33	34	34
4	3	44	35	34	34	34	35	34	33	33	33
	4	44	34	33	33	33	34	34	32	32	32
	NPB	44									
	Valor de pulido		34	33	33	33	33	33	32	32	32
NPB		44									
	VPR		33	32	32	32	31	31	30	30	30

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 70 DE 74 F1 RI-003

Tabla A9 Valores de pulido mezcla 50/50-2 (Gravamil-Secovisa)

Probetas	Lecturas					НОЕ	RAS				
Probetas	Lecturas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	39	32	30	30	30	29	29	29	29	29
	2	39	31	30	29	29	28	28	28	28	28
1	3	38	30	29	28	28	28	28	28	28	28
'	4	37	30	29	27	27	27	27	27	27	27
	NPB	38									
	Valor de pulido		29	29	27	27	26	26	26	25	25
	1	39	30	29	27	27	27	27	27	27	27
	2	38	30	28	27	27	26	26	26	26	26
2	3	38	29	28	26	26	26	25	25	25	25
	4	37	28	27	25	26	25	25	25	25	25
	NPB	38									
	Valor de pulido		26	26	25	25	25	24	24	24	24
	1	40	30	29	27	29	27	28	27	27	27
	2	40	29	28	26	28	27	27	26	26	26
3	3	39	29	28	25	27	26	26	25	25	25
	4	39	28	27	25	26	26	25	25	25	25
	NPB	40									
	Valor de pulido		28	27	26	26	25	25	24	24	24
	1	38	31	30	28	29	28	28	27	27	27
	2	37	30	29	27	28	27	27	26	26	26
4	3	37	29	28	27	27	26	26	26	26	26
	4	36	29	28	26	26	26	26	26	26	26
	NPB	37									
	Valor de pulido		29	28	26	26	26	26	25	25	25
	NPB										
	VPR		28	28	26	26	26	25	25	25	25

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 71 DE 74 F1 RI-003

Tabla A10 Valores de pulido mezcla 60/40-2 (Gravamil-Secovisa)

Probetas	Lecturas					НОГ	RAS				
Probetas	Lecturas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	44	34	34	31	31	30	29	29	29	29
	2	44	34	33	30	30	30	29	29	28	28
1	3	43	33	31	30	29	29	28	28	27	27
'	4	43	32	31	29	28	28	27	27	26	26
	NPB	44									
	Valor de pulido		31	31	28	27	27	26	26	25	25
	1	41	34	33	33	29	27	28	28	28	28
	2	40	33	32	32	29	26	27	27	27	27
2	3	40	32	31	31	28	26	27	26	26	26
	4	39	30	30	30	27	26	26	25	25	25
	NPB	40									
	Valor de pulido		30	30	29	27	25	24	24	24	24
	1	41	34	34	33	30	29	29	28	29	29
	2	41	34	33	32	30	28	28	27	28	28
3	3	40	33	32	31	29	27	27	26	28	28
	4	39	33	31	30	28	27	27	26	27	27
	NPB	40									
	Valor de pulido		32	31	29	28	26	26	26	26	26
	1	44	35	34	33	32	31	31	31	31	31
	2	44	34	34	33	31	30	30	30	30	30
4	3	43	34	33	32	30	29	29	30	30	30
	4	42	34	33	31	29	28	28	29	29	29
	NPB	43									
	Valor de pulido		32	32	30	29	28	28	28	28	28
ı	NPB	42									
,	VPR		31	31	29	28	27	26	26	26	26

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 72 DE 74 F1 RI-003

Tabla A11 Valores de pulido mezcla 70/30-2 (Gravamil-Secovisa)

Probetas	Lecturas					НС	RAS				
	Lecturas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	43	32	34	30	30	32	30	30	30	30
	2	43	31	33	29	30	31	29	29	29	29
1	3	42	31	32	29	29	31	28	28	28	28
'	4	42	31	31	29	29	30	28	28	27	27
	NPB	43									
	Valor de pulido		31	31	29	29	28	28	28	28	28
	1	40	34	33	31	31	31	29	30	29	29
	2	39	33	32	30	31	30	28	29	29	28
2	3	38	32	32	29	30	29	28	28	28	28
	4	37	31	31	29	30	29	27	27	27	27
	NPB	40									
	Valor de pulido		31	30	29	29	28	27	27	27	27
	1	39	34	33	31	32	32	30	30	29	29
	2	38	34	32	30	32	31	29	29	29	28
3	3	38	33	32	30	31	30	28	28	28	27
3	4	38	33	31	30	31	30	27	27	27	27
	NPB	39									
	Valor de pulido		32	31	30	30	29	27	27	27	27
	1	42	34	32	31	31	31	30	30	29	29
	2	41	33	32	31	31	30	29	29	29	29
4	3	41	32	31	30	30	29	28	28	28	28
	4	41	32	31	30	30	29	27	28	28	27
	Valor de pulido	41	32	31	30	29	28	27	27	27	27
NPB		41									
VPR			32	31	30	29	28	27	27	27	27

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 73 DE 74 F1 RI-003

Tabla A12 Valores de pulido mezcla 80/20-2 (Gravamil-Secovisa)

Probetas	Lecturas					НОІ	RAS				
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	42	35	34	32	32	32	31	31	31	31
	2	41	34	33	32	31	31	30	30	30	30
1	3	41	33	33	31	31	31	30	30	30	30
'	4	41	33	32	31	30	30	29	29	29	29
	NPB	41									
	Valor de pulido		33	31	31	30	30	29	29	29	29
	1	42	34	33	32	33	32	31	30	30	31
	2	42	33	32	31	33	31	30	30	30	30
2	3	41	32	32	31	32	31	30	29	29	29
	4	41	32	31	30	32	31	29	29	29	29
	NPB	42									
	Valor de pulido		32	31	31	31	29	29	29	29	29
	1	43	34	34	32	33	33	31	31	31	30
	2	43	34	33	32	33	32	31	30	30	30
3	3	42	34	33	31	32	31	30	29	29	29
3	4	42	33	33	31	32	31	30	29	29	29
	NPB	43									
	Valor de pulido		33	33	31	31	30	30	29	29	29
	1	42	34	33	31	31	32	30	30	30	30
	2	42	34	33	31	31	31	30	30	30	29
4	3	41	33	32	30	30	31	29	29	29	29
4	4	40	33	32	30	30	31	29	29	29	28
	NPB	41									
	Valor de pulido		33	32	30	30	29	29	29	28	28
N	NPB	42									
	/PR		33	32	31	31	30	29	29	29	29

REV 00, FECHA: 20060621 HOJA 74 DE 74 F1 RI-003