

ESTUDIO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DE TIPO SMA. ANALISIS ESTADÍSTICO APLICANDO HERRAMIENTAS Y TÉCNICAS MULTIVARIABLES.

Autor: Ing. Fabricio Leiva Villacorta

Universidad de Costa Rica. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME)

Tel: (506) 207-5423 correo electrónico: fleiva@lanamme.ucr.ac.cr

2^{do} Autor: MSCE. MBA. Candidato a Dr. Pedro Castro Fernández,
Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica

Resumen

El desempeño de la mezcla asfáltica se evalúa por medio de ensayos de deformación permanente y durabilidad. Se analiza la deformación a escala de laboratorio mediante el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA), la durabilidad se analiza por medio de ensayos de tensión indirecta, ensayos de módulo resiliente por tensión indirecta y ensayos de compresión uniaxial tanto en estado seco como condicionado. Los resultados obtenidos se analizan por medio multivariable, de los cuales se concluye que estas mezclas son sensibles a pequeñas modificaciones en contenido de ligante, pero no muy influenciadas por el tipo de ligante y granulometría, la mezcla con mejor desempeño cuenta con el mayor contenido de agregado grueso, el mayor contenido de relleno mineral y el ligante de mayor rigidez.

1. Introducción

Este proyecto pretende evaluar un tipo de mezcla asfáltica nuevo para nuestro medio (SMA), pero prometedor en cuanto a desempeño (deformación plástica y durabilidad) y beneficio / costo (en otras latitudes ha habido beneficio social asociado con las mezclas de matriz de agregado grueso); lo anterior en vista de desarrollo de estabilidad con base en fricción interparticular del agregado grueso, a la vez que un incremento en contenido de asfalto efectivo favorece la resistencia al daño por humedad.

2. Descripción de materia prima y diseño de mezcla volumétrico Superpave

Los ligantes asfálticos usados para este proyecto de investigación fueron suministrados por RECOPE y fueron muestreados por personal del LANAMME. A continuación se presentan las propiedades físicas más representativas de los ligantes usados incluyendo la reología de los mismos.

La Tabla 1 muestra la información de la fecha de muestreo de los ligantes asfálticos de este proyecto. Cabe destacar que ambos ligantes provienen de la misma fuente de petróleo crudo (Boscan, Venezuela).

La Tabla 2 muestra las propiedades físicas de los ligantes asfálticos del proyecto, el asfalto AC30 es menos rígido que el PG70 (AC40), en todas las temperaturas y condiciones de envejecimiento evaluadas.

La Tabla 3 presenta el grado de desempeño y las propiedades medidas por medio del reómetro dinámico de cortante a varios escenarios de envejecimiento.

Tabla 1. Ligantes asfálticos del proyecto

Ligante	Fecha de muestreo	Punto de muestreo	Temperatura de muestreo (°C)	
			Promedio	Desviación
AC30	10/25/02	RECOPE / Moín	143.3	1.2
PG70(22)	12/6/02	RECOPE / Moín	143.5	2.4

Las graduaciones SMA son graduaciones bastante abiertas (gran contenido de agregado grueso) y presentan una cantidad alta de relleno mineral; en la Tabla 4 y la Figura 1 se encuentran las granulometrías usadas. La fuente de agregados es La Esmeralda, la cual suministra material de río (grava), siendo un material bastante limpio.

Tabla 2. Propiedades físicas de los ligantes asfálticos

Estado de envejecimiento	Propiedad	Unidad	Ligante Asfáltico	
			AC30	PG70(22)
Original	Densidad a 25°C	g/cm ³	1.024	1.031
	Penetración a 15°C	1/100 mm	28.0	21.8
	Penetración a 25°C	1/100 mm	84.0	62.0
	Penetración a 35°C	1/100 mm	234.0	164.0
	Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	2460	3691
	Viscosidad cinemática a 125°C	centiPoise	920	1204
	Viscosidad cinemática a 135°C	centiPoise	541	716
	Viscosidad cinemática a 145°C	centiPoise	346	447
RTFO	Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	5807	10300

Tabla 3. Evaluación de grado de desempeño Superpave

Estado de envejecimiento	Temperatura	Parámetro	Unidad	Ligante Asfáltico	
				AC30	PG70(22)
Original	58°C	G*/sen(δ)	KPa	3.156	4.710
		δ	°	82.1	80.3
	70°C	G*/sen(δ)	KPa	0.732	1.036
		δ	°	85.4	84.5
	82°C	G*/sen(δ)	KPa	0.243	0.306
		δ	°	88.4	86.6
RTFO	58°C	G*/sen(δ)	KPa	7.907	13.335
		δ	°	76.5	74.4
	70°C	G*/sen(δ)	KPa	1.793	3.033
		δ	°	81.4	79.0
	82°C	G*/sen(δ)	KPa	0.521	0.888
		δ	°	85.2	83.6
PAV	16°C	G* sen(δ)	KPa	5177	7133
		δ	°	45.5	44.5
	22°C	G* sen(δ)	KPa	2796	4452
		δ	°	49.3	47.5
	28°C	G* sen(δ)	KPa	1312	2176
		δ	°	53.3	51.8

Grado de desempeño	Temperatura máxima original	68.19	71.13
	Temperatura máxima RTFO	68.95	73.63
	Temperatura intermedia PAV	16.50	19.99
	PG	64 (19)	70 (22)

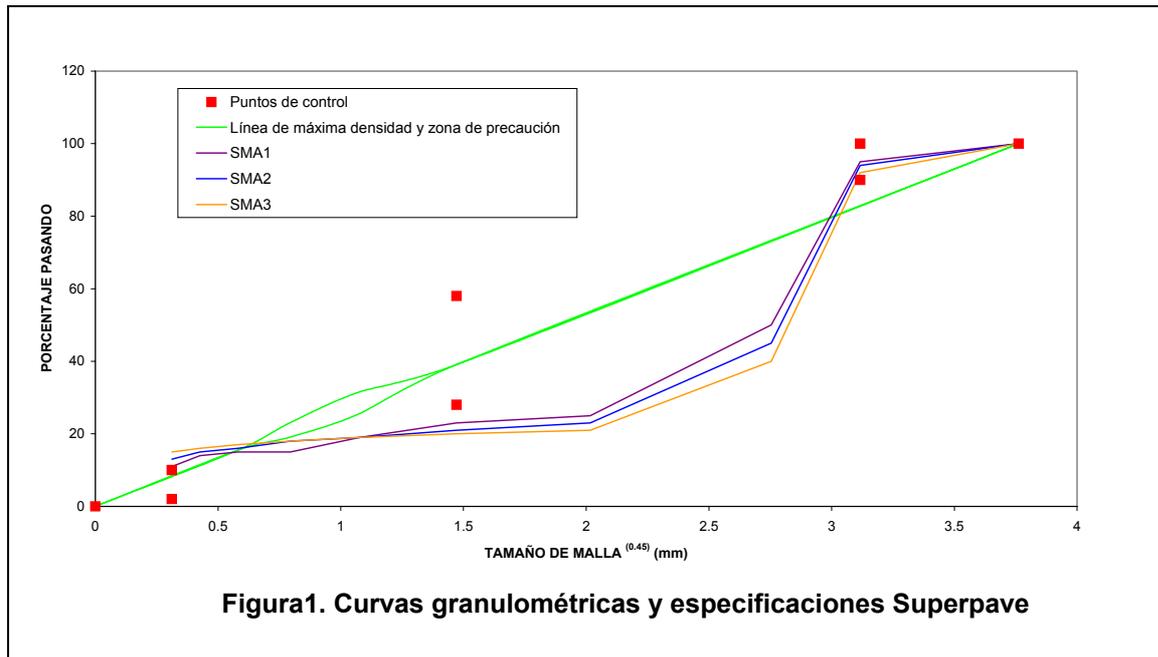


Tabla 4. Propiedades de los agregados

Propiedad	Resultados de Laboratorio			Criterio establecido
	SMA1	SMA2	SMA3	
Agregado Grueso				
Gravedad específica bruta (ASTM C-127)	2.62	2.62	2.62	
Gravedad específica aparente (ASTM C-127)	2.75	2.75	2.75	
Absorción (ASTM C-127)	1.75	1.80	1.78	
Abrasión de L.A. (ASTM C-131)	25.15	25.15	25.15	30 máx
Partículas planas y alargadas (ASTM D 4791)	8.00	8.00	8.00	3:1, 20% Máx
	0.00	0.00	0.00	5:1, 5% Máx
Porcentaje de caras fracturadas (ASTM D 5821)				
Una o más	100.00	100.00	100.00	100% Mín
Dos o más	96.70	96.70	96.70	90% Mín
Peso unitario envarillado (ASTM C-29)	1481.20	1482.75	1484.48	
Agregado Fino				
Gravedad específica bruta (ASTM C-128)	2.62	2.61	2.63	
Gravedad específica aparente (ASTM C-128)	2.79	2.78	2.78	
Absorción (ASTM C-128)	2.35	2.27	2.10	
Angularidad (AASHTO TP 33)	48.24	51.37	55.51	45% Mín
Gravedad Específica Filler (ASTM C-188)	2.73	2.73	2.73	
Gravedad específica aparente combinada	2.76	2.76	2.75	
Absorción combinada	1.97	1.94	1.85	2% Máx
Gravedad específica bruta combinada	2.63	2.63	2.63	

A continuación se presenta el resumen de resultados de los diseños de mezcla SUPERPAVE para las 3 granulometrías empleadas con los 2 tipos de ligantes empleados. El procedimiento empleado para diseño se realizó, compactando los especímenes al número de giros de diseño para obtener el porcentaje de vacíos de aire cercano a 4%; y

luego se compactan un par de especímenes con el contenido óptimo de asfalto al número máximo de giros.

Tabla 5. Resultados de diseño de mezcla Superpave

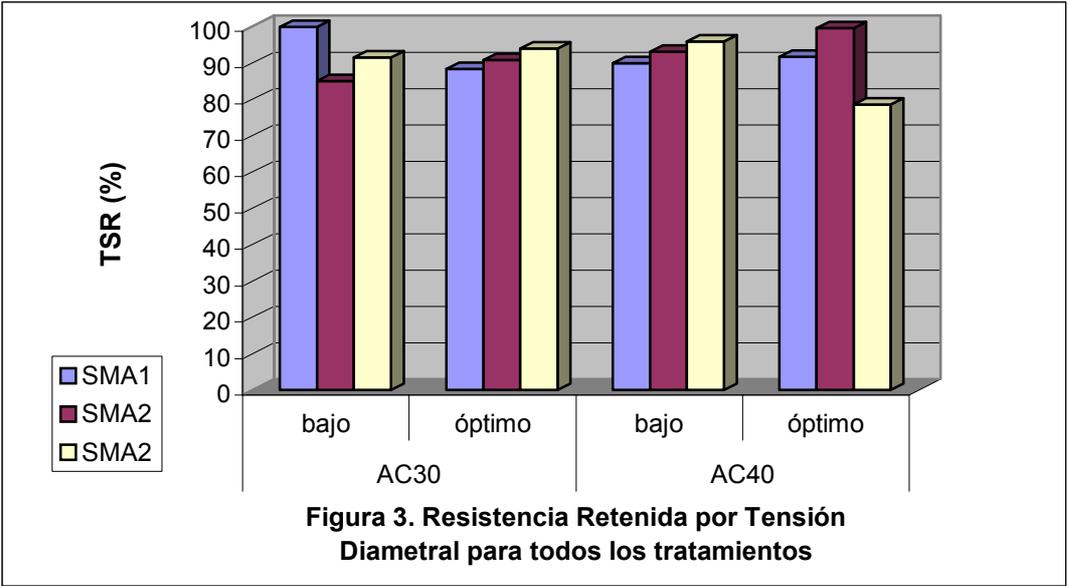
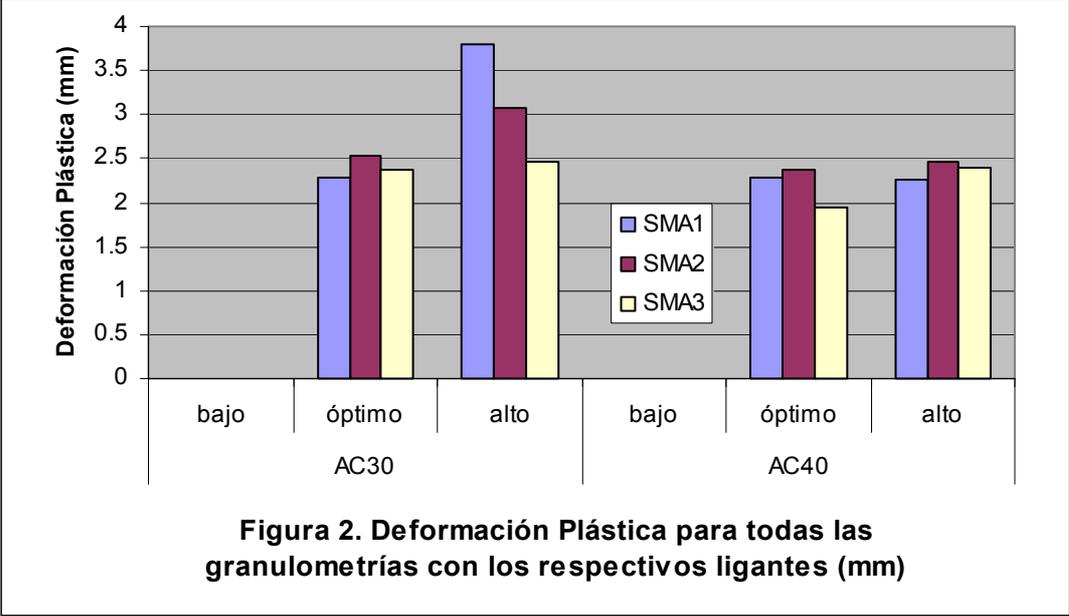
Ligante asfáltico	Granulometría	Vacios (%)	contenido óptimo de Asfalto (%PTM)	VMA (%)	VFA (%)	%Gmm @Nini	VCA (DRC) (%)	VCA mix (%)	%Gmm @Nmax
AC-30	SMA1	3.75	6.00	16.0	77.0	84.6	43.35	37.0	97.46
	SMA2	3.80	6.00	16.0	76.0	84.6	43.20	35.4	96.81
	SMA3	4.00	6.70	18.0	78.0	84.5	43.18	35.3	97.68
PG-70	SMA1	3.70	5.95	15.5	76.0	84.7	43.35	36.6	96.25
	SMA2	3.90	6.10	15.9	77.0	85.0	43.20	36.0	96.73
	SMA3	3.90	6.30	16.8	77.0	85.0	43.18	34.1	97.23

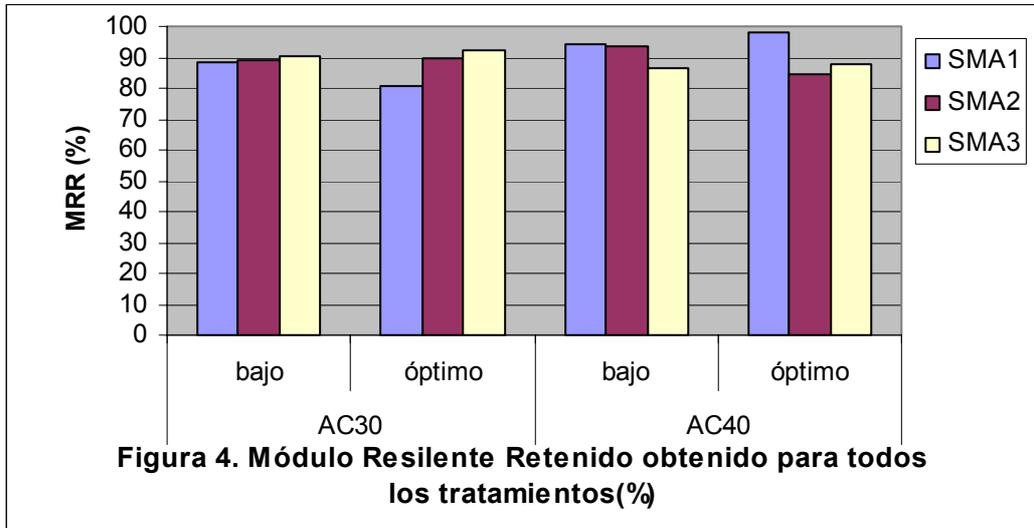
3. Resultados de ensayos de Deformación permanente (Analizador de Pavimentos Asfálticos) y Susceptibilidad al daño por humedad (Ensayo tensión indirecta, compresión simple y módulo resiliente)

La primera etapa del experimento consistió en la realización de ensayos de deformación permanente y ensayos para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad en la mezcla asfáltica.

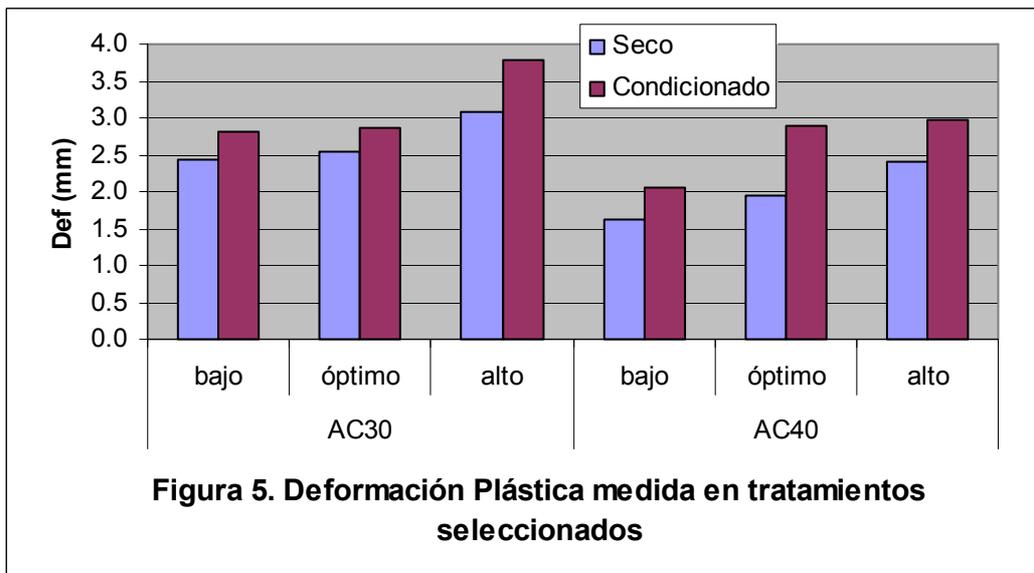
La Figura 2 muestra los resultados de deformación permanente realizados en el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) para 8000 ciclos de carga a una temperatura de 60°C, considerando el contenido óptimo de ligante y el contenido óptimo +0.5%, para todos los tratamientos. De igual forma, para todos los tratamientos en las Figuras 3 y 4 se muestran los resultados del ensayo de resistencia retenida por tensión indirecta y módulo resiliente retenido por tensión indirecta, considerando contenidos de ligante óptimo y óptimo -0.5%.

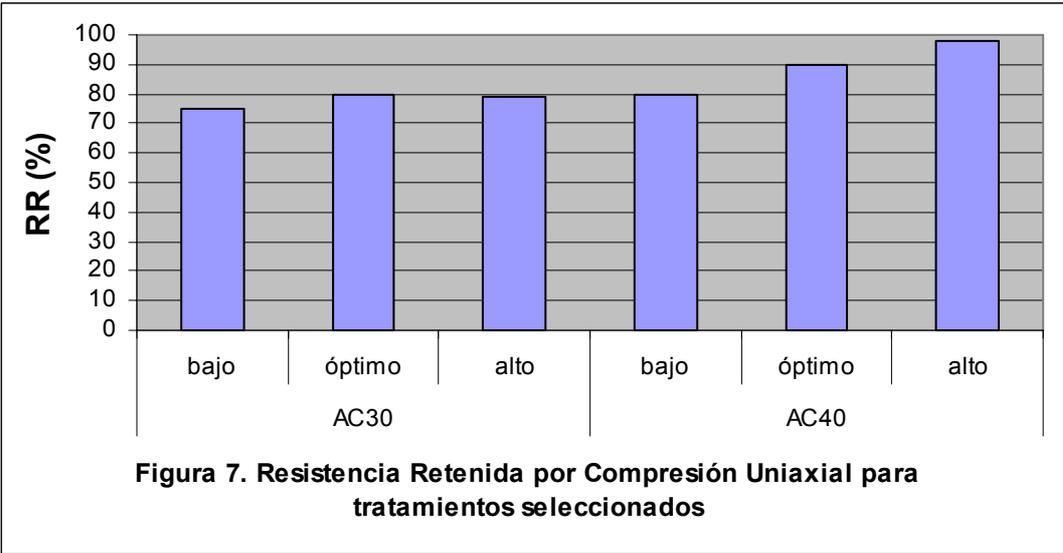
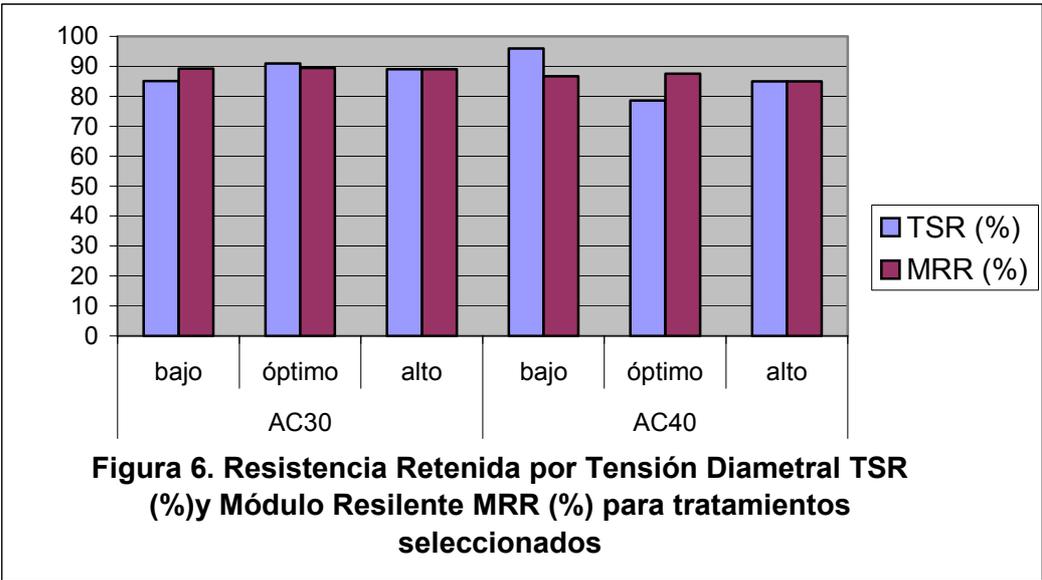
La segunda etapa del experimento consiste en la selección de un par de tratamientos (uno por cada tipo de ligante) que presentan un mejor desempeño, incluyendo propiedades volumétricas, con el fin de ampliar el número de ensayos para todos los contenidos de ligante (óptimo y óptimo $\pm 0.5\%$) e incluir otro tipo de ensayo como el de compresión inconfiada o uniaxial.





La Figura 5 muestra los resultados de deformación permanente realizados en el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) para 8000 ciclos de carga a una temperatura de 60°C, considerando el contenido óptimo de ligante y el contenido óptimo $\pm 0.5\%$. Las Figuras 6 y 7 muestran los resultados del ensayo de resistencia retenida por tensión indirecta, módulo resiliente retenido por tensión indirecta y resistencia retenida por compresión uniaxial, considerando contenidos de ligante óptimo y óptimo $\pm 0.5\%$.





4. ANÁLISIS DE RESULTADOS POR MEDIO DE ANÁLISIS MULTIVARIABLE.

La evaluación de resultados se realiza por análisis multivariable de correlación canónica, segmentación jerárquica y análisis factorial. El software usado es el Sistema de Análisis Estadístico (SAS) y el SPSS.

Análisis de correlación canónica.

Se hizo un análisis de correlación canónica, con el propósito de evaluar los efectos de parámetros volumétricos como los vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral y el volumen de ligante efectivo; en un caso sobre la resistencia a la deformación permanente. Por otro lado se evaluó el efecto de parámetros de resistencia al daño por humedad sobre la deformación permanente, con esto además se evalúa la relación entre los diferentes ensayos de desempeño aplicados en este proyecto.

El análisis de correlación canónica permite establecer variables compuestas a partir de variables pre-existentes, con dos propósitos fundamentales: que las variables compuestas, expresadas en pares de variables respuesta / independientes, expliquen en alto grado las diferencias cuantificadas en las unidades de observación; y que las variables pre-existentes dentro de cada par de variables respuesta / independiente correlacionen a su vez, unas con otras, en alto grado.

La Tabla 6 presenta los dos grupos de variables introducidas en los diferentes modelos.

La Tabla 7 presenta los resultados del análisis de correlación canónica, ejecutado a partir de dos grupos de variables: las variables independientes son VACIOS, VMA y Vb, las variables respuesta son RUT8000, RUT1000, RUT500, TASA1 y TASA2. Para especímenes de todos los diseños a los contenidos de ligante óptimo y alto. Este análisis se llamó DEFORMACIÓN.

La Tabla 8 presenta los resultados del análisis de correlación canónica, ejecutado a partir de dos grupos de variables: las variables independientes son MRSECO, MRCOND, TD25 y MRR, las variables respuesta son RUT8000, RUT1000, RUT500, TASA. Para especímenes de todos los diseños a los contenidos bajo y óptimo de ligante. Este análisis se llamó DURABILIDAD.

Tabla 6. Variables usadas en correlación canónica

	Variables independientes	Variables respuesta
VARIABLES aplicadas en todos los análisis.	<ul style="list-style-type: none"> · Vacíos de aire (VACIOS). · Volumen efectivo de ligante (Vb). · Vacíos en el agregado mineral (VMA). · Módulo resiliente seco y condicionado (MRSECO Y MRCOND). · Módulo resiliente retenido (MRR). · Resistencia a la tensión diametral (TD25). · Resistencia a la compresión uniaxial (CU25). 	<ul style="list-style-type: none"> · Deformación en mm a 8000 ciclos de carga (RUT8000). · Deformación en mm a 1000 ciclos de carga (RUT1000). · Deformación en mm a 500 ciclos de carga (RUT500). · Tasa de deformación entre los 0 y 500 ciclos de carga (TASA1 o TASA) · Tasa de deformación entre los 1000 y 8000 ciclos de carga (TASA2)

Tabla 7. Resultados de análisis de correlación canónica. DEFORMACIÓN.

Pares canónicos (pares de variables compuestas)	Coeficientes canónicos para variables (Modelo significativo al 90% de confianza)				Variabilidad en las observaciones explicada a partir del par canónico (acumulada).
	Variables respuesta		Variables independientes		
	Variable	Coficiente	Variable	Coficiente	
1	RUT8000	0.882	VACIOS	0.801	82.70%
	RUT1000	0.767			
	RUT500	0.792			
	TASA1	0.752			
2	RUT8000	-0.439	VMA	-0.744	97.70%
	TASA1	-0.495			
	TASA2	-0.443	Vb	-0.678	

La Tabla 9 presenta los resultados del análisis de correlación canónica, ejecutado a partir de dos grupos de variables: las variables independientes son MR25, CU25 y TD25, las variables respuesta son RUT8000, RUT1000, RUT500, TASA1 y TASA2.

Para los especímenes pertenecientes a los diseños seleccionados para la segunda etapa y para todos los contenidos de ligante (bajo, óptimo y alto). El análisis se llamó ÓPTIMOS.

El significado de los pares de variables canónicas (variables respuesta – variables independientes) se evalúa de la siguiente forma:

Par canónico 1 DEFORMACIÓN. La variable independiente correlaciona con el contenido de vacíos de aire, que a la vez se asocia con la estructura granulométrica y el contenido de ligante aplicado. La variable respuesta correlaciona con los valores de deformación obtenidos a diferentes ciclos de carga y con una tasa de deformación inicial, que se asocian con la rigidez del mastique y la estructura granulométrica. Un aumento en los vacíos de aire en la mezcla se asocia con un incremento en la deformación plástica.

Tabla 8. Resultados de análisis de correlación canónica. DURABILIDAD.

Pares canónicos (pares de variables compuestas)	Coeficientes canónicos para variables (Modelo significativo al 98% de confianza)				Variabilidad en las observaciones explicada a partir del par canónico (acumulada).
	Variables respuesta		Variables independientes		
	Variable	Coeficiente	Variable	Coeficiente	
1	RUT8000	-0.8572	MRSECO	0.8835	74.90%
	RUT1000	-0.9776	MRCOND	0.7909	
	RUT500	-0.9259	TD25	0.8522	
	TASA	-0.9257			
2	RUT500	0.3718	MRR	0.945	96.10%
	TASA	0.3720			

Par canónico 2 DEFORMACIÓN. La variable independiente correlaciona con el contenido de vacíos en el agregado mineral (VMA), como indicativo del acomodo interparticular de la estructura granulométrica. La variable respuesta correlaciona de alguna forma con la deformación al largo plazo y la forma en que la mezcla se deforma (con las tasas de deformación). La disminución de el contenido de vacíos en el agregado mineral se asocia con una disminución en la deformación plástica.

Par canónico 1 DURABILIDAD. La variable independiente correlaciona con mecanismo de evaluación de la resistencia a la tensión de la mezcla, que se asocia con la rigidez del mastique. La variable respuesta correlaciona con los valores de deformación obtenidos a diferentes ciclos de carga y con una tasa de deformación inicial, que se asocian con la rigidez del mastique y la estructura granulométrica. Con forme se cuenta con mezclas de mastique más rígido se aprecia un incremento de la resistencia a la deformación plástica.

Par canónico 2 DURABILIDAD. La variable independiente correlaciona con el índice de resistencia retenida medido a partir del ensayo de módulo resiliente. La variable respuesta,

en menor grado, correlaciona de alguna forma con la deformación a corto plazo y la forma en que la mezcla se deforma (tasa de deformación inicial).

Tabla 9. Resultados de análisis de correlación canónica. ÓPTIMAS.

Pares canónicos (pares de variables compuestas)	Coeficientes canónicos para variables (Modelo significativo al 99% de confianza)				Variabilidad en las observaciones explicada a partir del par canónico (acumulada).
	Variables respuesta		Variables independientes		
	Variable	Coeficiente	Variable	Coeficiente	
1	RUT8000	-0.9862	MR25	0.9332	90.90%
	RUT1000	-0.7875	TD25	0.9678	
	RUT500	-0.7660	CU25	0.8978	
	TASA1	-0.7656			

Par canónico 1 OPTIMAS. La variable independiente correlaciona con mecanismo de evaluación de la resistencia a la tensión de la mezcla y con la resistencia a la compresión uniaxial, que se asocian con la rigidez del masticque y rigidez de la estructura granulométrica, respectivamente. La variable respuesta correlaciona con los valores de deformación obtenidos a diferentes ciclos de carga y con una tasa de deformación inicial. En este caso un incremento en la rigidez del masticque y la rigidez de la estructura granulométrica determinan un incremento de la resistencia a la deformación plástica.

La Figura 8 muestra la alta correlación entre la variable compuesta independiente y la variable compuesta respuesta, del par canónico 1 y para el análisis OPTIMOS.

Segmentación jerárquica

Se hace una segmentación jerárquica para la totalidad de observaciones disponibles, con el propósito de valorar cuáles elementos de cambio permiten explicar mejorar las diferencias de resistencia mecánica y resistencia al daño por humedad. La segmentación jerárquica permite separar unidades de observación en grupos homogéneos, a partir del análisis multivariable.

Las Tablas 10 a 12 presentan los promedios de variables pre-existentes relevantes para los diversos segmentos diferenciados. Además se presenta el número óptimo de grupos, de acuerdo con el criterio de separación de grupos por distancias al cubo (CCC).

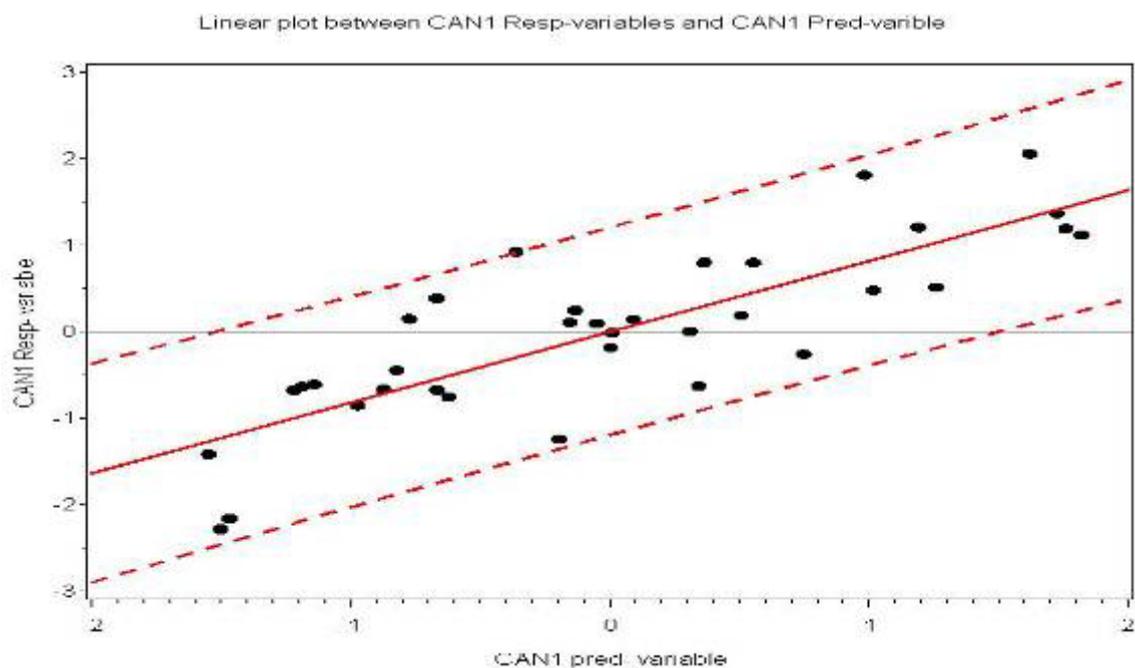


Figura 8. Correlación de variables para par canónico 1.

Tabla 10. Características de los grupos diferenciados. DEFORMACIÓN.

Grupo	Promedios y desviaciones estándar de variables relevantes para segmentación																Elemento de diferencia
	RUT8000		RUT1000		RUT500		TASA1		TASA2		VACIOS		VMA		Vb		
	Pr. (mm)	Dv. (mm)	Pr. (mm)	Dv. (mm)	Pr. (mm)	Dv. (mm)	Pr.	Dv.	Pr.	Dv.	Pr. (%)	Dv. (%)	Pr. (%)	Dv. (%)	Pr. (%)	Dv. (%)	
1	2.23	0.31	1.42	0.29	1.17	0.26	0.16	0.04	0.06	0.02	6.76	0.35	19.2	0.6	12.5	0.77	Contenido de ligante óptimo y ligante PG70
2	2.72	0.33	1.49	0.28	1.23	0.24	0.22	0.05	0.11	0.02	6.74	0.45	19.7	0.74	12.9	1.06	Contenido de ligante alto y ligante AC30

Tabla 11. Características de los grupos diferenciados. DURABILIDAD.

Grupo	Promedios y desviaciones estándar de variables relevantes para segmentación																Elemento de diferencia
	RUT8000		RUT1000		RUT500		TASA		MRSECO		MRCOND		MRR		TD25		
	Pr. (mm)	Dv. (mm)	Pr. (mm)	Dv. (mm)	Pr. (mm)	Dv. (mm)	Pr.	Dv.	Pr. (MPa)	Dv. (MPa)	Pr. (MPa)	Dv. (MPa)	Pr. (%)	Dv. (%)	Pr. (Pa)	Dv. (Pa)	
1	2.31	0.24	1.46	0.14	1.23	0.14	2.45	0.48	2797	676	2454	666	88	9.6	500	72.8	Contenido de ligante óptimo y ligante AC30
2	2.97	0.25	1.93	0.19	1.58	0.15	3.16	0.31	2268	573	1979	317	88.6	9.3	406	59.5	Contenido de ligante alto y ligante AC30
3	1.82	0.3	1.1	0.17	0.93	0.14	1.86	0.29	5134	695	4666	641	91.1	9.4	905	96.6	Contenido de ligante bajo y PG70
4	2.34	0.29	1.24	0.15	0.99	0.13	1.97	0.26	3794	292	3195	258	84.3	3.8	683	41.9	Contenido de ligante óptimo y PG70

Tabla 12. Características de los grupos diferenciados. ÓPTIMAS.

Grupo	Promedios y desviaciones estándar de variables relevantes para segmentación																Elemento de diferencia
	RUT8000		RUT1000		RUT500		TASA1		TASA2		MR25		TD25		CU25		
	Pr. (mm)	Dv. (mm)	Pr. (mm)	Dv. (mm)	Pr. (mm)	Dv. (mm)	Pr.	Dv.	Pr.	Dv.	Pr. (MPa)	Dv. (MPa)	Pr. (Pa)	Dv. (Pa)	Pr. (Pa)	Dv. (Pa)	
1	2.58	0.32	1.29	0.09	1.06	0.09	2.11	0.19	0.1	0.05	3096	602	591	96.1	151	31.1	Contenidos óptimos-bajos de ligante, estado saturado
2	1.76	0.31	1.06	0.21	0.9	0.2	1.8	0.41	0.05	0.03	5173	723	888	79	200	21.8	Contenido bajo de ligante, PG70, seco
3	3.5	0.42	2.15	0.21	1.78	0.21	3.56	0.42	0.08	0.06	1990	143	340	18.6	125	14	Contenido alto de ligante y AC20, saturado
4	2.83	0.37	1.73	0.17	1.38	0.06	2.64	0.49	0.1	0.05	3370	315	647	37.5	158	23.5	Contenidos óptimos-bajos de ligante, estado seco

Así, con respecto a la resistencia mecánica y la resistencia al daño por humedad, para las diversas combinaciones de estado de los especímenes (secos o condicionados), tipo de ligante, granulometría y contenido de ligante, se concluye lo siguiente:

Las mezclas con contenidos de ligante óptimos y con ligantes más rígidos presentan en general, deformaciones bajas y comportamiento a lo largo de los ciclos de carga menos fuerte (menores pendientes en la curva de deformación vs. Ciclos de carga), con respecto a mezclas con contenidos de ligante altos y de menor rigidez.

Las mezclas con contenidos de ligante bajos a óptimos, aplicando un ligante más rígido, presentan las menores deformaciones y curvas de deformación versus ciclos de carga con menos pendiente a lo largo del período de carga, y a la vez, mayor resistencia mecánica y mayor resistencia retenida.

Las mezclas con contenidos de ligante bajos, con un ligante más rígido y evaluados en condición seca, presentan menores deformaciones y curvas de deformación versus ciclos de carga con menos pendiente a lo largo del período de carga, y a la vez, mayor resistencia mecánica evaluada por medio de mecanismos de tensión diametral y mayor resistencia por compresión uniaxial.

En la Figura 9 se ilustran las diferencias entre los segmentos diferenciados en el análisis llamado ÓPTIMOS.

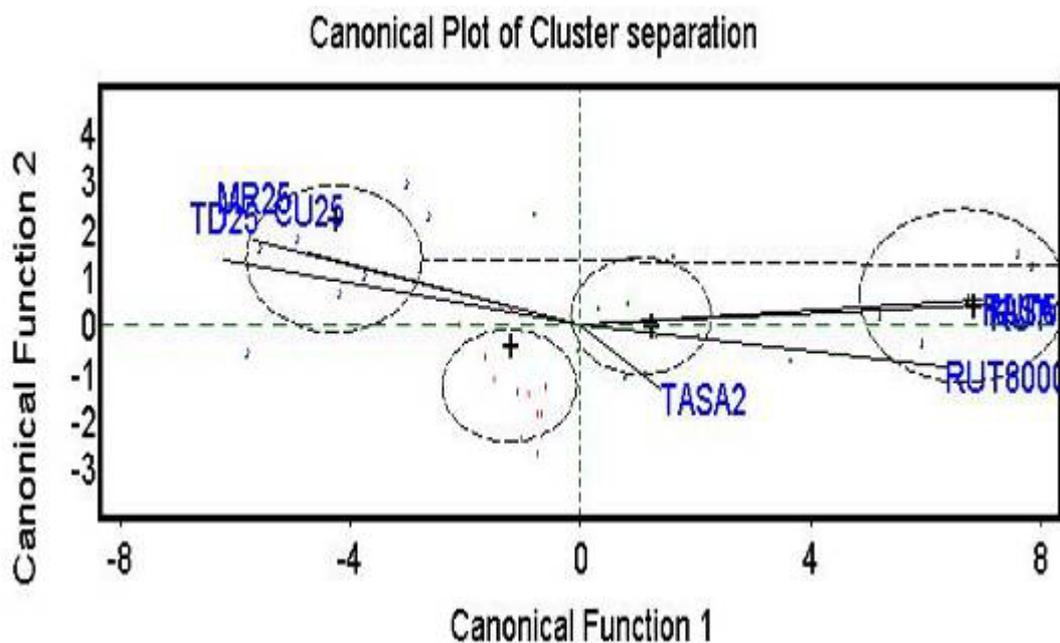


Figura 9. Separación de grupos por variables canónicas 1 y 2 .

Análisis Factorial

Análisis Factorial: este análisis permite evaluar como las propiedades de la mezcla están relacionadas entre sí; de igual forma permite interpretar propiedades que influyen a otras.

Tabla 13: Variables usadas en el análisis factorial.

	Deformación	Durabilidad	Optimas
Variabes	RUT8000	RUT8000	RUT8000
	RUT1000	RUT1000	RUT1000
	RUT500	RUT500	RUT500
	TASA1	TASA	TASA1
	TASA2	MRSECO	TASA2
	VACIOS	MRCOND	MR25
	VMA	MRR	TD25
	VB	TD25	CU25

La Tabla 14 muestra los resultados de los diferentes experimentos factoriales.

Tabla 14: Análisis experimental factorial

Factores	Variables que muestran mayor peso en los factores (*) / Variabilidad acumulada explicada por factores (%)					
	Deformación		Durabilidad		Optimas	
Factor 1	RUT8000(+) RUT1000(+) RUT500(+) VACIOS(+)	35.1	RUT8000(+) RUT1000(+) RUT500(+) TASA(+) MRSECO(-)	50.3	RUT8000(+) RUT1000(+) RUT500(+) TASA1(+)	46.2
Factor 2	VACIOS(-) VMA(+) VB(+)	62.5	MRSECO(+) MRCOND(+) MRR(+) TD25(+)	84.9	RUT8000(-) TASA2(-) MR25(+) TD25(+) CU25(+)	82.2
Factor 3	RUT8000(+) TASA1(+) TASA2(+)	88.4				

(**) Los análisis consideran rotación-Varimax, mostrando factores significativos.

Para el escenario DEFORMACIÓN con el primer factor se confirma la relación de vacíos con deformación plástica, un aumento en vacíos es proporcional a un aumento en deformación permanente. El factor 2 tiene que ver con las propiedades volumétricas de este tipo de mezclas como el contenido efectivo de ligante, que entre mayor contenido efectivo menor

contenido de vacíos en la mezcla y vacíos en el agregado mineral. El tercer factor tiene que ver con deformación plástica y que tan rápido crece con la aplicación de las cargas.

Para el escenario DURABILIDAD se cuenta con dos factores, el primero que explica un poco la relación de resistencia por deformación permanente y la resistencia mecánica del ligante, se observa que entre menos resistencia (cohesión interparticular y adherencia con el agregado) presenta el ligante, es de esperar menor resistencia a la deformación plástica. El segundo factor tiene que ver con la durabilidad de la mezcla o resistencia al efecto que produce la presencia de humedad, con la resistencia del ligante, los cuales mantienen una misma proporcionalidad.

El tercer escenario OPTIMAS el cual involucra los tratamientos seleccionados, con el primer factor, explica el incremento en deformación plástica debido a la alta velocidad de deformación en términos de aplicaciones de carga producida tempranamente, lo cual se relaciona con el acomodo de las partículas y reducción de vacíos previo a la verdadera resistencia. El factor 2 explica la relación entre el incremento en resistencia mecánica del ligante y del la resistencia del esqueleto de agregado inmerso en la mezcla, para producir una disminución en la deformación plástica debido a la aplicación de cargas cíclicas.

5. Conclusiones

La resistencia a la deformación plástica en estado seco se asocia directamente con el contenido de vacíos de aire. Mayores contenidos de vacíos de aire se asocian con mayores deformaciones (menor resistencia). En menor grado la resistencia a la deformación plástica se asocia con el contenido de vacíos en el agregado mineral (VMA); al disminuir este contenido de vacíos se aprecia una disminución en la deformación (mayor resistencia).

La resistencia a la tensión diametral en estado seco y el módulo resilente, tanto en estado seco como condicionado, se asocian directamente con la resistencia a la deformación plástica. Un incremento en la resistencia a la tensión diametral y módulos resilentes altos implican menores deformaciones en la mezcla.

Por otro lado, la resistencia por compresión uniaxial tanto en estado seco como condicionado, la resistencia a la tensión diametral y el módulo resilente en estado seco, para

todos los contenidos de ligante analizados (bajo, óptimo y alto), se relacionan con la resistencia a la deformación plástica. Mayores resistencias de parámetros de medición de la susceptibilidad de la mezcla al daño por humedad implican mayor resistencia a la deformación plástica, lo que implica que tanto la rigidez del masticque como la rigidez de la estructura granulométrica aportan a la resistencia a la deformación plástica.

Al comparar ensayos de deformación permanente con ensayos de durabilidad se tiene que al corto plazo (500 ciclos de carga) las mezclas SMA con un relleno mineral calizo presentan deformaciones tempranas altas, relacionado principalmente con la rigidez del masticque y en menor grado con la rigidez de la estructura granulométrica. A la vez, esto se relaciona con bajas resistencias por tensión diametral, mientras que al largo plazo (8000 ciclos de carga) una disminución en la deformación permanente se relaciona mejor con la estructura granulométrica y la rigidez del masticque, que a la vez se asocia con las altas resistencias por compresión uniaxial. En general, se puede afirmar que un incremento en la rigidez del masticque asfáltico, se asocia con un incremento en resistencia mecánica (resistencia a la deformación plástica, resistencia a la tensión diametral y resistencia por compresión uniaxial) y resistencia al daño por humedad (resistencia retenida).

Para el caso de evaluación de la deformación permanente, se procuró que los vacíos de aire no solamente se mantuvieran en el rango de 6.0 a 8.0%, sino también que fueran lo más cercano a 7.0%, o que los valores fueran lo más parecidos posible. En este caso no se consideró en los análisis el efecto del factor vacío de aire para la variable respuesta deformación permanente, por lo que se recomienda mantener esta uniformidad en los ensayos de este tipo. Aunque en los ensayos de durabilidad sí se observa mayor dispersión en los vacíos de aire, no se tiene evidencia de que este factor determine cambios significativos en los parámetros de durabilidad.

Se ha encontrado que para las mezclas evaluadas en este proyecto, la rigidez del ligante es un factor importante en la evaluación de desempeño, ya que se ha demostrado que al corto plazo en el ensayo de deformación permanente (500 ciclos de carga), el componente que resiste los esfuerzos aplicados es el masticque que se asocia con la rigidez del ligante y a la vez se asocia con los ensayos de tensión diametral, y es por esto que la metodología de condicionamiento empleada de saturación de poros para el ensayo de deformación permanente (mismo mecanismo de condicionamiento de ensayo de resistencia retenida por tensión diametral) incrementa significativamente los valores de deformación plástica obtenidos, con respecto a los ensayos no condicionados. Además, se determinó que no

existe variación en la tasa de deformación al largo plazo (de 5000 a 8000 ciclos de carga), ya sea en estado seco o condicionado, dado que es en este punto donde la resistencia de la estructura granulométrica es la que resiste los esfuerzos aplicados, y esto, a la vez, se presenta por una reducción en los contenidos de vacíos de aire, producto de los ciclos de carga aplicados. Es entonces que se comprueba que una reducción en el contenido de vacíos de aire a utilizar en los especímenes de evaluación de desempeño deben reducirse como indican algunos investigadores, los cuales recomiendan aplicar contenidos de vacíos de aire de $6.0 \pm 1.0\%$.

6. Referencias Bibliográficas

1. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). **Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing**. Tomos 1 y 3. Edición N° 18. 1994.
2. Asphalt Institute, **Superpave mix design**, series No2, SP-2.
3. ASTM. **American Society for Testing and Material**. Vol 4.02 Concrete and aggregates, 4.03. Road and Paviment Management Technologies.
4. Brown, Haddock y otros, **DEVELOPMENT OF A MIXTURE DESIGN PROCEDURE FOR STONE MATRIX ASPHALT (SMA)**, NCAT, 1997.
5. Roberts, Freddy y otros, **Hot mix asphalt materials, mixture desing and construction**. NAPA, Maryland. Second Edition. 1996.
6. Kandhal y Mallick. **Evaluation of Asphalt Pavement Analyzer for HMA mix design**. NCAT, 1999.
7. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. **SUPERPAVE Asphalt Mixture Design Workshop**. No 90. Version 6.2, 1999.
8. Devore L. Jay. **Probability and statistics for Engineering and the Sciences**. Duxbury, 2000.
9. Huang H. Yang. **Pavement Analysis and Design**. Prentice Hall, 1993.