

2014

Afectación de la salinidad en la vida útil de las mezclas asfálticas en caliente de las carreteras costeras; caso Yucatán

Ing. Alejandro Alberto Euán Avilés



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Afectación de la salinidad en la vida útil de las mezclas
asfálticas en caliente de las carreteras costeras; caso
Yucatán

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres

Presenta
Ing. Alejandro Alberto Euán Avilés

Dirigido por:
Dra. María de la Luz Pérez Rea

C. U. Querétaro, Qro. Octubre de 2014



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres

Afectación de la salinidad en la vida útil de las mezclas asfálticas en caliente de las carreteras costeras; caso Yucatán

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres

Presenta:

Ing. Alejandro Alberto Euán Avilés

Dirigido por:

Dra. María de la Luz Pérez Rea

Co-dirigido por:

Dra. Genoveva Hernández Padrón

SINODALES


Dra. María de la Luz Pérez Rea
Presidente

Dra. Genoveva Hernández Padrón
Secretario

Dr. J. Jesús Alonso Mota
Vocal

Dr. Paul Garnica Anguas
Suplente

Dr. Mauricio Centeno Ortiz
Suplente



Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad



Firma

Firma


Firma

Firma


Firma


Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Octubre 2014
México

RESUMEN

Las carreteras costeras son aquellos caminos construidos cerca de la costa y son afectados por diversos factores climáticos. La sal es uno de esos factores y su origen es el agua de mar o el agua freática. Esta tesis presenta un estudio de los efectos del cloruro de sodio –el principal compuesto en el agua de mar– sobre un tipo de pavimento flexible, las mezclas asfálticas en caliente; diseñada usando el Protocolo A.M.A.A.C., cemento asfáltico y agregado procedente de Yucatán, México. Las carreteras costeras muestran fallas excesivas de un estado temprano de la vida del pavimento, a diferencia de las no costeras. Estas fallas son: desprendimiento de la película de asfalto del agregado, desprendimiento de agregados, agrietamiento, desintegración y baches. Primero, la sal de cloruro de sodio de diferentes núcleos de carreteras costeras fue encontrada y observada. La evaluación de los efectos del cloruro de sodio se realizó mediante la prueba de susceptibilidad a la humedad a través de la resistencia a la tensión indirecta; esto fue hecho cambiando el tiempo de inmersión y la concentración de cloruro de sodio adicionando sal no procesada de Yucatán, México. Se observó un cambio en la resistencia a la tensión indirecta y su relación, por lo tanto se concluyó que la mezcla asfáltica en caliente fue afectada por agua salada, dicha afectación fue mínima, por lo que esta interacción no puede ser considerada la principal causa de los efectos negativos sobre las carreteras afectadas. Se realizó un análisis estadístico para encontrar significancia en los factores de prueba y con microscopía electrónica de barrido se refuerzan las conclusiones. Estudios posteriores deberán ser enfocados sobre los efectos del crecimiento de cristales de cloruro de sodio y sus presiones sobre el concreto asfáltico.

(Palabras clave: carretera costera, sal, cloruro de sodio, efecto, mezcla asfáltica en caliente, resistencia a la tensión indirecta)

SUMMARY

Coastal highways are those roads built near the coast and they are affected by diverse climate factors. Salt is one of those factors and its origin is sea water or groundwater. This thesis presents a study of sodium chloride effects - the main compound in sea water - on one type of flexible pavement, the hot mixed asphalt; it was designed using the A.M.A.A.C.* Protocol, bitumen and aggregate from Yucatan, Mexico. Coastal highways show more excessive failures of an early stage of pavement life unlike the non-coastal ones. These failures are: stripping, detachment of aggregates, cracking, disintegration and potholes. First, sodium chloride salt from different coastal highway cores was found and observed. The evaluation of the sodium chloride effects was performed by the moisture susceptibility test through the indirect tensile strength; this was made changing the soaking time and the sodium chloride concentration adding non-processed salt from Yucatán, México. It was observed a change in the indirect tensile strength and its ratio so it was concluded that hot mixed asphalt was affected by salt water, this affectation was minimum, therefore it cannot be considered the main cause of the negative effects on highways affected. A statistical analysis was made to find significance in the test factors and scanning electron microscopy was used to reinforce the conclusions. Further studies should be focused on the effects of sodium chloride crystal growth and its pressures on the asphalt concrete.

(Key words: coastal highway, salt, sodium chloride, effect, hot mixed asphalt, indirect tensile strength)

* A.M.A.A.C.: Mexican Association of Asphalt, Civil Association (A.M.A.A.C. in Spanish)

A los alumnos de los posgrados de la
Universidad Autónoma de Querétaro

Al Ing. Raúl Ancona Riestra (†)
Un ejemplo a seguir como profesionalista, empresario
y principalmente, como ser humano

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme concluir esta etapa de mi formación profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por haberme otorgado la beca que me permitió cubrir los gastos de estancia e inscripciones durante la maestría. Así mismo, a los profesores de la maestría por cambiar mi visión y aportarme conocimiento en sus áreas de especialidad. Especial agradecimiento al CONACyT, por los fondos proporcionados a través del proyecto QRO-2012-C01-193364 para la adquisición de equipo utilizado en este trabajo.

A mis padres Jorge e Isabel, mis hermanos Jorge y María, mis sobrinas Montserrat y Ximena, y a mi esposa Mirtha por brindarme siempre su apoyo y respaldo, además de darme la fuerza para seguir adelante. Particular agradecimiento a mi esposa por su paciencia y cariño que respaldo y fortaleció mi camino hacia este objetivo.

A la Dra. M. de la Luz Pérez, quien dirigió la presente investigación estando siempre al pendiente del trabajo que se realizaba, aportando ideas y soluciones en beneficio de la investigación. Le agradezco por haber sido además de directora de tesis, una tutora y consejera a lo largo de mi estancia en Querétaro.

A la Dra. Genoveva Hernández del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la UNAM Campus Juriquilla por haber codirigido el presente trabajo resolviendo las dudas e inquietudes personales en el área de Química y por su aportación en la interpretación de las micrografías de microscopía electrónica de barrido; así como a la Dra. Marina Vega del Centro de Geociencias de la UNAM Campus Juriquilla por la ejecución de la técnica de microscopía electrónica de barrido en las muestras.

Al Dr. Paul Garnica por sus aportaciones a mi conocimiento y por haber facilitado el desarrollo de la presente investigación en el Laboratorio de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte.

Al Dr. Mauricio Centeno y al Dr. J. Jesús Alonso por sus acertadas observaciones y comentarios en la revisión del presente documento.

A mis compañeros de generación ingenieros Favio, Jorge y Gilberto, y a mis compañeros de la maestría ingenieros Yelitza, Juan, Gerardo Q., Gerardo M., Eugenio, Fabiola, entre otros, por su apoyo a lo largo de estos dos años y con quienes compartí gratos momentos.

Al Ing. Raúl Ancona (Q.E.P.D.) por haber sembrado en mí la semilla de siempre buscar superarme y a quien eternamente le estaré agradecido por motivarme a estudiar mi maestría y también por todo su aprecio y cariño que tuvo hacia mí mientras trabajé con él; a Doña Mercedes Bates viuda de Ancona por su apoyo

incondicional y al Ing. Agustín Palomo quien más que ser un compañero de trabajo se volvió un gran amigo siempre aconsejándome para tomar las mejores decisiones.

A los investigadores Dr. Horacio Delgado, M. C. Mayra Flores y Dra. Natalia Pérez, y al técnico Ing. Aldo del Laboratorio de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte por su apoyo durante la ejecución de las pruebas resolviendo las dudas que me surgían y quienes siempre me brindaban las mejores recomendaciones para la interpretación de los resultados.

Al Ing. Arturo Bates de Emulsín por facilitar su laboratorio de asfaltos para el desarrollo de una parte de la presente investigación y a la I.Q.I. Leticia Vázquez quién siempre tuvo la disposición de ayudar y resolver mis dudas en el desarrollo de las pruebas.

Finalmente, al Ing. Francisco Rubio de la Unidad General de Servicios Técnicos y al Ing. José Lara de la Unidad de Laboratorios del Centro S.C.T. Yucatán por haberme facilitado la información necesaria de las carreteras costeras de Yucatán.

ÍNDICE

RESUMEN	i
SUMMARY	ii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
1. INTRODUCCION	1
1.1 Hipótesis y objetivos	4
2. REVISION DE LITERATURA	6
2.1 Infraestructura carretera en México	6
2.2 Pavimentos y mezclas asfálticas en caliente	8
2.3 Efectos de la humedad en las mezclas asfálticas.....	15
2.4 Salinidad y sus afectaciones a las vías terrestres.....	18
2.5 Investigaciones recientes.....	28
2.6 Área de estudio: Yucatán.....	33
3. METODOLOGÍA	37
3.1 Secuencia metodológica.....	37
3.2 Carreteras costeras y su caracterización.....	39
3.3 Diseño de mezclas.....	44
3.4 Afectación por sales marinas	48
3.5 Curvas esfuerzo-deformación	52
3.6 Análisis de microscopía electrónica de barrido	53
3.7 Análisis estadístico de los resultados	53
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
4.1 Muestreo en Yucatán.....	55
4.2 Muestras de agua	59
4.3 Absorción atómica de los núcleos.....	60
4.4 Microscopía electrónica de barrido de los núcleos	63
4.5 Calidad de agregados pétreos	64
4.6 Calidad de cementos asfálticos	65
4.7 Nivel de tránsito para el diseño de mezcla	66

4.8 Diseño de mezcla asfáltica de granulometría densa.....	68
4.9 Afectación de NaCl a agregados	71
4.10 Afectación de NaCl a cementos asfálticos	72
4.11 Afectación de NaCl a mezclas asfálticas	75
4.12 Curvas esfuerzo-deformación	85
4.13 Análisis de microscopía electrónica de barrido	91
4.14 Daño inducido por el crecimiento de cristales.....	91
4.15 Análisis estadístico de los resultados	93
5. CONCLUSIONES	95
LITERATURA CITADA	100
ANEXOS	106
Anexo A - Normativa empleada en las pruebas.....	107
Anexo B - Clasificación de asfalto por grado PG	109
Anexo C - Fórmulas para la obtención del contenido de asfalto inicial (Pbi)	110
Anexo D - Fórmulas para la obtención de los parámetros volumétricos de la mezcla	111
Anexo E - Resultados en extenso de la resistencia a la tensión indirecta ..	113
GLOSARIO	125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1	Longitud y características de la red carretera por entidad federativa según su superficie de rodamiento.	8
2	Descripción de las respuestas del sistema a los daños por humedad.	16
3	iones más comunes de las sales.	18
4	Grupos de la primera fase de la experimentación.	50
5	Grupos de la segunda fase de la experimentación.	51
6	H.R. mínima y máxima promedio mensual en cada uno de los años para distintas localidades.	58
7	Puntos muestreados en Yucatán con su tipo de muestra.	58
8	Resultados del análisis de las muestras de agua.	60
9	Resultados del análisis de los núcleos para estimar las concentraciones de NaCl.	62
10	Resultados de los requisitos de calidad del agregado pétreo.	64
11	Resultados de la clasificación grado PG de los cementos asfálticos.	65
12	Temperaturas de mezclado y compactación.	66
13	Ejes equivalentes en las carreteras costeras de Yucatán y su nivel de diseño de acuerdo al Protocolo A.M.A.A.C.	67
14	Granulometría empleada con sus respectivos puntos de control.	68
15	Requisitos y parámetros volumétricos de la mezcla.	71
16	Porcentajes de cubrimiento de asfalto.	72

17	Resultados de las características del cemento asfáltico a las distintas concentraciones.	73
18	Resultados de las propiedades reológicas del cemento asfáltico a las distintas concentraciones.	74
19	Resultados de resistencia a la tensión indirecta.	76
20	Resultados de la relación de resistencia a la tensión.	81
21	Estimación de los módulos elásticos secantes.	89
22	Promedio de los módulos elásticos secantes.	89
23	Resultados del análisis estadístico.	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	a y b. Carreteras con desprendimiento de la película de asfalto del agregado.	2
2	Carretera con desprendimiento de agregados.	3
3	Carretera con agrietamientos longitudinales.	3
4	a y b. Carreteras con desintegraciones que propician la formación de baches.	4
5	Orígenes del agua que podría moverse junto con las sales solubles.	22
6	Ciclo de disolución/cristalización de cristales de NaCl.	24
7	Cristalización del NaCl, H.R. < H.R.D.	25
8	Disolución del NaCl, H.R. > H.R.D.	25
9	Imágenes de agregados de NaCl secos	26
10	Esquema de la secuencia desarrollada en la primera parte.	37
11	Esquema de la secuencia desarrollada en la segunda parte.	38
12	Esquema de la secuencia desarrollada en la tercera parte.	39
13	Ejemplo de una carretera en un ambiente costero de Yucatán.	40
14	Extracción de núcleos de carpeta asfáltica.	41
15	Seccionamiento de un núcleo de carpeta asfáltica.	42
16	Espectrómetro de absorción atómica marca Perkin Elmer.	43
17	Microscopio electrónico de barrido marca Hitachi.	44
18	Compactador giratorio Servopac marca IPC.	47

19	Probeta montada en la prensa Marshall marca ELE.	48
20	Proceso de inmersión de las probetas.	49
21	Probeta montada en la prensa para obtener la <i>R. T. I.</i>	52
22	a y b. Prensa servo-hidráulica marca GCTS y probeta montada.	53
23	Localización de las estaciones meteorológicas automáticas.	56
24	Cambios de H.R. a lo largo del día de seis localidades costeras.	57
25	Localización de los puntos muestreados.	59
26	Micrografía SEM donde se observa un cristal cúbico de NaCl.	63
27	Curva granulométrica empleada de la mezcla de agregados.	69
28	Gráfica de <i>R.T.I.</i> para la primera fase.	78
29	Gráfica de <i>R.T.I.</i> para la segunda fase.	79
30	Gráfica de <i>R.R.T.</i> para la primera fase.	83
31	Gráfica de <i>R.R.T.</i> para la segunda fase.	84
32	Curvas esfuerzo-deformación para el Grupo 1.	86
33	Curvas esfuerzo-deformación para el Grupo 4.	86
34	Curvas esfuerzo-deformación para el Grupo 20.	87
35	Curvas esfuerzo-deformación para el Grupo 10.	87
36	Curvas esfuerzo-deformación para el Grupo 13.	88
37	Curvas esfuerzo-deformación para el Grupo 22.	88
38	Curvas esfuerzo-deformación promedio.	90
39	Micrografía SEM de una muestra del Grupo 20.	91

1. INTRODUCCION

Los diseños de mezclas asfálticas, involucran la selección de los agregados pétreos disponibles en la región y los cementos asfálticos, y se basan en obtener como resultado mezclas que sean más durables y con mejor desempeño. Por eso resulta importante que las actividades de diseño, fabricación y colocación de las mezclas asfálticas se realicen con el más alto nivel.

Los antiguos métodos en comparación de los recientes, sólo se centraban en obtener el contenido de asfalto en la mezcla, y los recientes consideran además, analizar y establecer predicciones del desempeño de la mezcla.

Sin embargo, siempre se darán casos particulares en los diferentes ambientes geográficos en los que se esté desarrollando el diseño de la mezcla. En Yucatán, México resulta de interés el caso de las carreteras que se encuentran en ambientes costeros, que como lo reporta El-Maaty (2013) en Egipto, usualmente muestran daños excesivos en su estado temprano de la vida del pavimento y entre los factores que los promueven son la temperatura y la humedad; además se tiene la cercanía de las aguas freáticas y el aerosol marino transportado desde el mar, lo anterior se refleja en daños por humedad en el pavimento, ya sea por agua con sales o sin ellas. Es de destacar que las carreteras costeras en ocasiones se encuentran a escasa distancia del cuerpo de agua y a menos de dos metros por encima de las aguas freáticas.

Dentro de los daños observados en las carreteras costeras que son más frecuentes que en las carreteras del interior del Estado de Yucatán y de acuerdo a las definiciones establecidas por Caro et al. (2008) y el Consejo de Directores de Carreteras (2011), tenemos:

- Desprendimiento de la película de asfalto del agregado: es el proceso que resulta en una separación física del asfalto y el agregado debido a la pérdida de adhesión en la interfase de estos, en presencia de agua en forma líquida o de vapor. Las Figura 1a y 1b son ejemplos de dicho daño.



Figura 1a y 1b. Carreteras con desprendimiento de la película de asfalto del agregado.

- Desprendimiento de agregados: es identificado por la pérdida y remoción de partículas de agregados en la mezcla de la superficie (Ver Figura 2).



Figura 2. Carretera con desprendimiento de agregados.

- Agrietamientos (longitudinales, transversales o de piel de cocodrilo): es una serie de grietas causadas por la falla a la fatiga de las mezclas asfálticas bajo cargas repetidas. Como se puede observar en la Figura 3.



Figura 3. Carretera con agrietamientos longitudinales.

- Desintegración y baches: como consecuencia de los daños anteriores, empiezan a formarse depresiones pequeñas en la superficie del pavimento y que termina penetrando hasta la capa de la base. (Ver Figura 4).



Figura 4a y 4b. Carreteras con desintegraciones que propician la formación de baches.

1.1 Hipótesis y objetivos

El proceso de la interacción de las sales marinas con las mezclas asfálticas en caliente afecta su desempeño en las carreteras costeras, modificando su resistencia al daño por humedad.

El objetivo general de este trabajo es analizar el proceso de afectación debido al contacto del agua salada con las mezclas asfálticas a través de procesos de inmersión, los cuales promueven posibles daños por susceptibilidad a la humedad en las mezclas asfálticas por efectos de las sales disueltas en el agua de poro.

De este modo, los objetivos particulares son:

1. Comprobar la presencia del cloruro de sodio en carreteras de Yucatán y caracterizar la salinidad de algunos ambientes a los que se encuentran sometidos.
2. Analizar la variación de la resistencia de las mezclas asfálticas por los daños generados por humedad a distintos tiempos de inmersión y concentraciones de cloruro de sodio.

Para ello el trabajo está comprendido por cinco capítulos. En el Capítulo 2, se hace una revisión de la literatura iniciando con la infraestructura carretera de México y luego a algunos conceptos básicos y clasificaciones de los pavimentos y las mezclas asfálticas. Posteriormente se expone brevemente lo que es la salinidad y sus afectaciones en las vías terrestres, para cerrar dicho capítulo con la recopilación de las investigaciones más recientes que han involucrado el cloruro de sodio.

En el Capítulo 3 referente a la metodología, se presenta a modo general una descripción del Estado de Yucatán, destacando la importancia de sus carreteras costeras; posteriormente se explica el procedimiento que se siguió para seleccionar y muestrear algunas de ellas, así como también la caracterización de algunos elementos muestreados. Se prosigue con la caracterización de agregados y asfaltos a utilizar en el diseño volumétrico de la mezcla asfáltica. Después sigue la afectación de las mezclas y sus componentes por la acción de las sales marinas. Se establece el análisis estadístico que se le realizará a los resultados de resistencia obtenidos y análisis de microscopía electrónica de barrido para reforzar las conclusiones.

Los resultados y la discusión de la investigación son presentados en el Capítulo 4 conforme al orden que fue establecido en la metodología. Por último en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo, recomendaciones y las futuras líneas a las que dieron pauta esta investigación.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1 Infraestructura carretera en México

Debe reconocerse que los requerimientos de los pavimentos que México necesita en sus carreteras no son hoy los mismos que fueron en otras épocas. Circunscribiendo las ideas a la red nacional pavimentada, debe aceptarse un muy importante cambio de circunstancias entre el momento actual y las épocas en que las carreteras mexicanas empezaron a ser construidas y fueron desarrolladas. La red nacional comenzó a formarse en el sentido actual a partir de la época 1920 – 1930, a la par de la producción en serie de los vehículos automotores, y creció a un ritmo relativamente moderado hasta 1950. Entre 1950 y 1970, la red fue objeto de un desarrollo muy importante dado el crecimiento de los vehículos motorizados y la interconexión del país; y a partir de 1980 continuó creciendo significativamente, pero probablemente con un gradiente menor y fue hasta los últimos años (en el periodo 1990 - 1995) cuando se dio la incorporación de una red de modernas autopistas con longitud del orden de los 5,000 kilómetros (Rico et al., 1998).

La Dirección General de Servicios Técnicos (D.G.S.T.) (2011) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (S.C.T.) establece que el desarrollo económico de un país está ligado directamente a su infraestructura carretera, ya que a través de ella se logra unir a los diversos sectores de la sociedad y promover el intercambio de productos y mercancías, movimiento de personas y cubrir necesidades de servicios de toda la población. Para cumplir con los anteriores objetivos, debe existir una adecuada planeación, operación, y conservación de la red carretera nacional, todo esto en armonía con el medio ambiente, para que el usuario transite por la red con la mayor seguridad y confort.

El proyecto de una carretera está compuesto de distintas etapas que se encuentran ligadas entre sí y que en su conjunto darán como producto final un elemento de desarrollo fundamental en el crecimiento de un país. Está integrado

básicamente por las etapas de planeación, selección de ruta, proyecto geométrico de la ruta definitiva y estudios y proyectos de ingeniería de detalle. Cada una de las etapas del proyecto ejecutivo de una carretera, se deben llevar a cabo cumpliendo una serie de estudios y proyectos, sin dejar de realizar alguno de ellos, ya que se encuentran ligadas entre sí como un todo.

La Dirección General de Planeación (D.G.P.) (2012) de la S.C.T. destaca que la Administración Central invirtió 60,188 millones de pesos en infraestructura, que sumados a los 5,433 millones de pesos ejercidos en el sector paraestatal, significó una inversión pública en el sector de 65,621 millones de pesos en ese año. A su vez, establece en la Tabla 1 mostrada a continuación, la longitud y las características de la red carretera por entidad federativa según su superficie de rodamiento.

Tabla 1. Longitud y características de la red carretera por entidad federativa según su superficie de rodamiento.

Entidad Federativa	Total	Pavimentada			Revestida	Terracería	Brechas mejoradas
		Subtotal	Cuatro o más carriles	Dos carriles			
Estados Unidos Mexicanos	377 660	146 221	14 499	131 722	145 576	11 266	74 597
Aguascalientes	2 325	1 288	148	1 140	704	0	333
Baja California	11 749	2 825	395	2 430	4 178	462	4 284
Baja California Sur	5 724	2 185	185	2 000	1 745	738	1 056
Campeche	5 553	3 716	57	3 659	380	849	608
Coahuila de Zaragoza	8 486	4 788	805	3 983	3 698	0	0
Colima	2 209	1 192	183	1 009	792	84	141
Chiapas	22 976	6 781	306	6 475	15 125	1 011	59
Chihuahua	13 272	5 448	1 679	3 769	6 761	1 063	0
Distrito Federal	149	149	70	79	0	0	0
Durango	15 559	5 119	439	4 680	8 098	1 418	924
Guanajuato	12 785	6 427	541	5 886	4 977	0	1 381
Guerrero	18 612	6 100	316	5 784	6 432	0	6 080
Hidalgo	11 573	4 184	532	3 652	5 935	180	1 274
Jalisco	27 895	7 196	851	6 345	6 358	185	14 156
México	13 326	6 542	647	5 895	6 784	0	0
Michoacán de Ocampo	15 468	6 970	436	6 534	4 498	0	4 000
Morelos	2 862	1 688	322	1 366	265	0	909
Nayarit	9 309	3 239	263	2 976	2 739	0	3 331
Nuevo León	7 333	4 778	772	4 006	2 522	6	27
Oaxaca	22 572	7 227	152	7 075	12 918	0	2 427
Puebla	10 127	5 517	225	5 292	4 405	0	205
Querétaro de Arteaga	3 295	1 897	228	1 669	1 398	0	0
Quintana Roo	5 443	2 939	300	2 639	2 504	0	0
San Luis Potosí	11 580	5 415	405	5 010	6 061	104	0
Sinaloa	16 951	5 086	779	4 307	2 980	3 325	5 560
Sonora	25 161	7 273	833	6 440	4 412	0	13 476
Tabasco	8 653	4 315	259	4 056	3 788	550	0
Tamaulipas	13 986	5 144	306	4 838	8 680	162	0
Tlaxcala	2 769	1 668	247	1 421	1 101	0	0
Veracruz de Ignacio de la Llave	25 887	7 449	783	6 666	7 855	1 129	9 454
Yucatán	12 112	5 982	404	5 578	2 511	0	3 619
Zacatecas	11 959	5 694	631	5 063	4 972	0	1 293

(Fuente: D.G.P. de la S.C.T., 2012)

2.2 Pavimentos y mezclas asfálticas en caliente

De acuerdo a la Administración Federal de Carreteras (2006) de Estados Unidos (F.H.W.A. por sus siglas en inglés) el modo más común para categorizar los pavimentos es por su tipo de estructura: rígidos, flexibles, compuestos y no pavimentados.

- Los pavimentos rígidos en términos más simples son los que tienen una capa de rodadura de concreto de cemento Portland (C.C.P.). Las losas de

concreto de cemento Portland constituyen el componente dominante de absorción de cargas en un sistema de pavimento rígido.

- Los pavimentos flexibles, en contraste, tienen una capa superficial asfáltica, sin losas de cemento Portland subyacentes. La capa de la superficie asfáltica puede consistir de alta calidad, concreto de mezcla asfáltica en caliente, o puede ser de algún tipo de tratamiento de superficie asfáltica de menor fuerza y rigidez. En cualquiera de los casos, los pavimentos flexibles se basan en gran medida en la resistencia y rigidez de las capas subyacentes para complementar la capacidad de carga de la capa de superficie asfáltica.

- Los pavimentos compuestos combinan elementos de ambos sistemas de pavimentos flexibles y rígidos, por lo general consiste en una superficie de concreto asfáltico que se coloca sobre C.C.P. o de una base estabilizada.

- Los caminos no pavimentados o caminos naturalmente aflorados, simplemente no están pavimentados, confiando en las capas granulares y la subbase para llevar la carga. Capas sellantes se aplican a veces para mejorar su resistencia a los factores ambientales.

En la presente investigación, el objeto de estudio se encuentra dentro de los pavimentos flexibles y al respecto la F.H.W.A. (2006) establece que los pavimentos flexibles, en general consisten en una capa de rodadura de asfalto o una capa no consolidada en la parte superior de las capas granulares de base y subbase sobre el suelo de la subrasante. En algunos casos, las capas de subbase y/o de base pueden estar ausentes (por ejemplo, en los pavimentos de concreto asfáltico tipo full-depth), mientras que en otros las capas de base y/o subbase se pueden estabilizar utilizando mezclas de cemento Portland o asfáltico. Capas drenantes pueden servir para eliminar el agua rápidamente de la estructura del pavimento.

La mezcla de concreto asfáltico en caliente producida por una planta de asfalto, es el material de la capa superficial más común para los pavimentos flexibles, especialmente para carreteras de tráfico de moderados a pesados. En

las mezclas de graduación densa (es decir, bien graduada con una baja relación de vacíos) y con agregados de tamaño total máximo de unos 25 mm (1 pulgada) son las mezclas más utilizadas, aunque existe una amplia variedad de otros tipos de gradaciones que también se han utilizado con éxito para las condiciones especializadas.

La capa de superficie de asfalto en un pavimento flexible se puede dividir en sub-capas. Subcapas típicas, procediendo de la parte superior hacia abajo, son las siguientes:

- Capa de sello: un tratamiento superficial asfáltico delgado que se usa para aumentar (o restaurar) la resistencia al deslizamiento y al agua de la superficie de la carretera. Capas sellantes pueden estar cubiertas con agregados cuando se usa para aumentar la resistencia al deslizamiento.

- Capa superficial (también llamada capa de rodadura): la subcapa superior (en la ausencia de una capa de sellado) del pavimento. Éste se construye típicamente de concreto asfáltico de granulometría densa. Los principales objetivos de diseño para la capa de rodadura son la impermeabilización, la resistencia al deslizamiento, la resistencia a roderas y la suavidad.

- Capa aglutinante (también llamada capa de base asfáltica): la capa de mezcla asfáltica en caliente inmediatamente debajo de la capa de rodadura. La capa de base tiene en general una granulometría más gruesa y con frecuencia un contenido de asfalto más bajo que la capa de rodadura. Una capa aglutinante puede ser utilizada como parte de una capa de asfalto ya sea para la economía o si el espesor total de la capa superficial es demasiado grande para ser pavimentada en una sola etapa.

Particularmente, el objeto de estudio son las mezclas asfálticas en caliente (M.A.C., o H.M.A. por sus siglas en inglés), cuyo caso serán mezclas asfálticas de granulometría densa. De acuerdo a Asphalt Institute (2001) el concreto asfáltico o M.A.C. es un material que consiste de un aglutinante asfáltico y agregado mineral. El aglutinante asfáltico, cualquiera de los dos, cemento asfáltico o cemento

asfáltico modificado, actúa como un agente aglutinante para pegar las partículas de los agregados en una masa densa e impermeabilizar la mezcla. Cuando son unidos, el agregado mineral actúa como una estructura de roca para impartir resistencia y dureza al sistema. El desempeño de la mezcla es afectada por las propiedades de ambos componentes individuales y su reacción combinada en el sistema.

Cuando se aplica una carga de la rueda al pavimento, dos esfuerzos se transmiten a la M.A.C.: el esfuerzo de compresión vertical dentro de la capa de asfalto, y el esfuerzo de tensión horizontal en la parte inferior de la capa de asfalto. La M.A.C. debe ser internamente fuerte y elástica para resistir los esfuerzos de compresión y evitar la deformación permanente dentro de la mezcla. De la misma manera, el material debe tener suficiente resistencia a la tensión para resistir las fuerzas de tensión en la base de la capa asfáltica, y también ser resistente para soportar muchas aplicaciones de carga sin agrietamiento por fatiga.

La mezcla asfáltica también debe resistir las tensiones experimentadas por las temperaturas que disminuyen rápidamente y temperaturas extremadamente frías. Aunque las propiedades individuales de los componentes de las M.A.C. son importantes, el comportamiento de la mezcla asfáltica se explica mejor considerando al cemento asfáltico y al agregado mineral actuando juntos. Una manera de entender el comportamiento de la mezcla asfáltica es considerar los tipos principales de fallas de los pavimentos asfálticos que los ingenieros tratan de evitar: la deformación permanente, el agrietamiento por fatiga, y el agrietamiento por baja temperatura.

De acuerdo a Garnica et al. (2005) el diseño de una mezcla asfáltica consiste básicamente en la selección del tipo y granulometría del agregado a emplear, y de la selección del tipo y contenido de asfalto, de tal manera que se obtengan las propiedades deseadas en la mezcla y se satisfagan los requisitos específicos del proyecto. La selección apropiada de los materiales (con la calidad suficiente) que constituirán la mezcla y de sus proporciones correctas, requiere el

conocimiento de las propiedades más significativas de las mezclas, y de su influencia en el comportamiento del pavimento. Para una aplicación específica e independientemente del procedimiento de diseño empleado, las propiedades relevantes en una mezcla asfáltica en caliente son:

- a) *Estabilidad o resistencia a las deformaciones plásticas.* Esta propiedad se refiere a la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir la deformación y el desplazamiento, debidos a las cargas que resultan del tránsito vehicular. Un pavimento es estable cuando conserva su forma; y es inestable cuando desarrolla deformaciones permanentes, corrugaciones y otros signos de desplazamiento de la mezcla. La estabilidad depende sobre todo, de la fricción interna y la cohesión. La fricción interna depende de la textura superficial, forma de la partícula, y granulometría del agregado; así como de la densidad de la mezcla, y la cantidad y tipo de asfalto; mientras que la cohesión depende del contenido de asfalto. La cohesión se incrementa con el incremento del contenido de asfalto, hasta un punto óptimo, después del cual el aumento en el contenido de asfalto forma una película demasiado gruesa en las partículas de asfalto, lo que produce una pérdida de fricción entre las partículas de agregado.
- b) *Durabilidad.* Es la propiedad de la mezcla asfáltica que describe su capacidad para resistir los efectos perjudiciales del aire, agua, temperatura y tránsito que pueden provocar envejecimiento del asfalto, desintegración del agregado y desprendimiento de la película de asfalto del agregado. Una buena mezcla asfáltica no debe sufrir envejecimiento excesivo durante la vida en servicio. Esta propiedad se relaciona con el espesor de la película de asfalto, y con los vacíos de aire.
- c) *Flexibilidad.* Es la capacidad de la mezcla asfáltica para amoldarse, sin sufrir agrietamiento o fisuración, a los asentamientos y movimientos graduales de la base y la subrasante. En ocasiones esta propiedad presenta conflictos con los requerimientos de estabilidad.

- d) *Resistencia a la fatiga.* Es la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir cargas repetidas causadas por el paso de los vehículos. El agrietamiento por fatiga está relacionado con el contenido y la rigidez del asfalto. Por su parte, los contenidos de asfalto muy altos harán que la mezcla tienda más a deformarse elásticamente (o a deformarse menos) que a fracturarse bajo carga repetida. Aunque también debe señalarse que la resistencia a la fatiga depende en gran medida de la relación entre el espesor estructural de la capa y la carga.
- e) *Resistencia al fracturamiento por baja temperatura.* Es la capacidad de la mezcla asfáltica para no agrietarse en condiciones de bajas temperaturas. Depende principalmente de la rigidez del asfalto a bajas temperaturas.
- f) *Resistencia al daño por humedad o impermeabilidad.* Es la resistencia al paso de agua y aire hacia el interior, o a través de la mezcla asfáltica. La resistencia al daño por humedad se relaciona con las propiedades químicas del agregado mineral y el contenido de vacíos de aire en la mezcla compactada, y por tanto con los procesos de oxidación del asfalto, su adherencia y el drenaje del pavimento.
- g) *Resistencia al deslizamiento.* Es la capacidad de la mezcla asfáltica para no perder adherencia entre el neumático y la superficie de rodamiento, en particular cuando está húmeda. Una resistencia al deslizamiento baja se relaciona generalmente con las características del agregado y el contenido de asfalto.
- h) *Trabajabilidad.* Es la propiedad relacionada con la facilidad con que la mezcla asfáltica es colocada y compactada in situ. Una buena mezcla debe ser capaz de permitir su colocación y compactación, sin que se requiera un esfuerzo demasiado grande. Esta propiedad, generalmente depende de uno, o una combinación, de los siguientes factores: características del agregado, la granulometría, el contenido y la viscosidad del asfalto.

El clima se define como las condiciones climáticas normales para una zona. La manifestación día a día de este clima es a lo que llamamos condición

meteorológica, o simplemente tiempo. El clima tiene una gran influencia en la construcción y mantenimiento de pavimentos. Actualmente, el historial del clima es utilizado para planificar las actividades de construcción y mantenimiento. Sin embargo, los cambios en el clima hacen que aquellas prácticas puedan no ser apropiadas para predecir el clima en el futuro y por lo tanto para la vida plena de un pavimento. Nuevas carreteras son diseñadas y construidas con una vida útil nominal de hasta 40 años, con la expectativa de que la conservación periódica de la capa de rodadura sea cada 10 o 20 años.

El tiempo (climatológico) siempre ha sido uno de los principales factores que afectan el desempeño de carreteras. Sin embargo, el grado en que el clima afecta al pavimento también depende de muchos otros factores tales como las características del pavimento (materiales, estructura y condición), el tráfico, la geología subyacente, la geografía y la topografía. Cada uno de estos puede en sí mismo, presentar un peligro para el pavimento. En general, las consecuencias de estos riesgos son el deterioro de la superficie, de las capas subyacentes y de la estructura del pavimento, y de vez en cuando, en el caso de los riesgos extremos, tales como el clima o el tráfico de carga, una falla catastrófica. Los factores que también están relacionados entre sí, por ejemplo un mayor tráfico en el pavimento cuando está mojado, producirá mayor daño. Del mismo modo, las altas temperaturas y un gran volumen de tráfico de vehículos pesados pueden no ser suficientes por separado para causar deformaciones, pero cuando se experimentan juntos pueden dar lugar a la deformación.

En general, el cambio climático no introducirá nuevas consecuencias para el pavimento, pero aumenta la probabilidad y la magnitud de deterioro o fallo catastrófico que ocurre como resultado de la serie de peligros que se presentan (Willway et al., 2008).

2.3 Efectos de la humedad en las mezclas asfálticas

De acuerdo a Caro et al. (2008), una definición generalizada para el término daño es el grado de pérdida de funcionalidad de un sistema, De este modo, daño por humedad en mezclas asfálticas es ampliamente definido como la degradación de las propiedades mecánicas de un material debido a la presencia de humedad en un estado líquido o de vapor.

Quizá la definición más completa de daño por humedad es como un deterioro progresivo y funcional de una mezcla en un pavimento por la pérdida del enlace adhesivo entre el cemento asfáltico y la superficie de los agregados y/o la pérdida de la resistencia cohesiva con el cemento asfáltico principalmente por la acción del agua.

Fallas adhesivas y cohesivas son el último paso en un proceso que inicia con diferentes modos de transporte de humedad y resulta en la generación de daño por humedad. Un mecanismo de daño por humedad consiste en los siguientes pasos:

- Transporte de humedad: procesos por los cuales la humedad en estado líquido o de vapor, se infiltra en la mezcla asfáltica tanto en el cemento asfáltico o la mezcla y llega a la interfase del cemento asfáltico-agregado.
- Respuesta del sistema: cambios en la estructura interna conduciendo a una pérdida de resistencia del material.

Los materiales y atributos del sistema (físico, químico y geométrico) controlan los modos de transporte de humedad en la masa de la mezcla y la respuesta del sistema. Es importante remarcar que las condiciones ambientales también afectan los mecanismos de daño por humedad. Por ejemplo, alta humedad relativa, intensos periodos de lluvia, severos ciclos de congelamiento-descongelamiento y otras condiciones ambientales extremas incrementarán el grado y la cantidad de humedad que puede conducir el material,

consecuentemente incrementando el daño potencial. De este modo, se tienen entre los atributos del sistema:

- Energía superficial de los materiales, puesto que de ella depende el fenómeno termodinámico de la adhesión físico-química entre dos materiales.
- Propiedades químicas de los materiales.
- Forma, textura y angularidad de los agregados.
- Porcentaje de vacíos de aire, tamaño y conectividad/permeabilidad.

Así mismo, los estados de humedad que pueden ser encontrados como atributo del sistema son: flujo no saturado, flujo saturado y/o difusión. En la Tabla 2 se presenta una descripción de las respuestas del sistema.

Tabla 2. Descripción de las respuestas del sistema a los daños por humedad.
(Caro et al., 2008)

Respuesta del sistema	Descripción	Naturaleza del proceso
Desprendimiento/des-enlace	Separación de una película de asfalto de la superficie de un agregado por una delgada película de agua sin un obvio rompimiento en la capa asfáltica	Química, termodinámica
Desplazamiento	Pérdida de material desde la superficie del agregado a través de un rompimiento en la película de asfalto y/o posible separación del agregado o la mezcla	Mecánica
Dispersión de la mezcla	Debilitamiento de la cohesión en el cemento asfáltico debido a largos periodos de difusión y pérdida de material debido a la presencia de flujos	Química, termodinámica
Ruptura de la película/microgrietas	Ruptura en la mezcla o agregados. El efecto de las microgrietas es un deterioro general de la integridad estructural del material y la generación de nuevas trayectorias para el transporte de humedad	Mecánica, termodinámica
Desorción	Lavado de las capas externas de mezclas debido a la presencia de un flujo	Mecánica después de otros procesos
Emulsificación espontánea	Emulsificación invertida de gotas de agua en el cemento asfáltico	Química

La caracterización de daño por humedad es esencial para cuantificar la pérdida de funcionalidad de las mezclas asfálticas. En consecuencia, permite la determinación de los umbrales que se pueden utilizar en forma de especificaciones para separar materiales o mezclas aceptables de inaceptables.

Aunque el problema de susceptibilidad a la humedad ha sido ampliamente estudiado, su complejidad ha hecho difícil encontrar una prueba única o método analítico para cuantificar exhaustivamente el daño y predecir con exactitud el comportamiento de los materiales en el campo.

Caro et al. (2008) establecen que un enfoque ampliamente usado para cuantificar el daño por humedad es la relación o variación de un parámetro (o parámetros) derivado de evaluar especímenes secos o de control a los mismos parámetro(s) derivados de evaluar especímenes condicionados con humedad. El objetivo del proceso de condicionamiento con humedad es simular los efectos detrimentales de la humedad sobre el material durante un corto periodo de tiempo. El condicionamiento con humedad puede ser considerado un proceso acelerado de daño. Ésta variación de los parámetros afectados por condicionamiento con humedad al estado de control, es referido como relación de daño por humedad (R.D.H.).

Además de ser una medida cuantitativa de daño por humedad, la R.D.H. también puede ser usada para evaluar la influencia de diferentes factores sobre el daño por humedad (p.e. vacíos de aire o aditivos) y para seleccionar mezclas basadas sobre un aceptable nivel de daño. Un valor de R.D.H. aceptable, o rango de este, es usualmente determinado por una comparación de valores de R.D.H. obtenidos en el laboratorio y daño por humedad observada en el campo para varias mezclas. Dicha R.D.H. puede ser simplemente derivada como la relación o variación de una propiedad del material, o llamada también R.D.H. de simple parámetro; o puede ser derivada de la relación de una combinación de múltiples propiedades del material, o también llamada R.D.H. de múltiples parámetros.

La evaluación del daño por humedad basado en una R.D.H. de simple parámetro es logrado por conducir pruebas mecánicas comúnmente usada (por ejemplo resistencia a la tensión, fatiga, módulo dinámico, etc.). Ejemplos típicos de parámetros usados para determinar la R.D.H. son la rigidez, resistencia, módulo resiliente o número de ciclos a la falla. Aunque la R.D.H. de simple parámetro captura el deterioro de una propiedad de la mezcla asfáltica debido al condicionamiento por humedad a una macroescala, normalmente no provee una explicación para las causas de su deterioro. Tampoco proporciona el entendimiento de la interacción entre las diferentes propiedades químicas y físicas influenciadas por el daño por humedad (Caro et al., 2008).

2.4 Salinidad y sus afectaciones a las vías terrestres

La salinidad puede ser definida como la medición de la masa de las sales disueltas en una solución de masa dada. Las sales se componen de una combinación de iones cargados positiva y negativamente conocidos como cationes y aniones respectivamente, los más comunes se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Iones más comunes de las sales.

Cationes	Aniones
Sodio (Na^+)	Cloruro (Cl^-)
Potasio (K^+)	Sulfato (SO_4^{2-})
Magnesio (Mg^{2+})	Nitrato (NO_3^{2-})
Calcio (Ca^{2+})	Carbonato (CO_3^{2-})

La salinización es el proceso que se refiere a un aumento de la concentración en agua, o en el suelo, de forma natural de iones minerales, en particular los de sodio (Na^+), cloruro (Cl^-) y sulfato (SO_4^{2-}). El proceso de salinización puede ser impulsado por ambas actividades, naturales y antropogénicas (Browne, 2005).

En las zonas costeras y bajo ciertas condiciones climáticas, las sales pueden permanecer en el pavimento y cristalizar durante el largo período de

sequía, y es probable que cambie la calidad de la escorrentía y tengan además, un efecto en la estructura del pavimento en sí. El aerosol marino puede ser transportado a grandes distancias. La adhesión del material bituminoso se reduce y las partículas pequeñas puede ser desprendidas de la base de la carretera destruida (Antunes y Ramísio, 2011).

De acuerdo al Instituto Nacional de Ecología (2000) México es un país con una situación geográfica muy diversa donde se conjuntan diferentes climas y áreas biogeográficas que dan origen a una gran variedad de hábitats, entre los que destacan los ambientes costeros presentes a lo largo de aproximadamente 11,500 km de franja litoral, bañados por aguas del Océano Pacífico, Golfo de México y Mar Caribe. En ellos se observan playas arenosas y rocosas de espectacular belleza, bahías, estuarios, ensenadas, zonas de manglar, praderas de pastos marinos, humedales y arrecifes de coral. Cuenta con una superficie territorial de 1,953,161 km², de los cuales, 1,947,946 km² son de zona continental y 6,606 km² de islas. Está conformado por 32 estados, 17 de ellos con límites costeros: 11 en el Océano Pacífico y Golfo de California (Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas), cinco en el Golfo de México (Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán) y uno en el Mar Caribe (Quintana Roo). La costa mexicana se extiende por 11,122.5 km de los cuales el 68% corresponden al Océano Pacífico incluyendo el Mar de Cortés, y 32% al Golfo de México y Mar Caribe en el Océano Atlántico; además la zona marítima mexicana cuenta con 500,000 km² de plataforma continental, 16,000 km² de superficie estuarina y 12,000 km² de lagunas costeras. Asimismo el área de la Zona Económica Exclusiva de México es de 3, 149 920 km². México comprende a las regiones biogeográficas Neártica y Neotropical, con características de intercambio entre elementos de origen boreal y tropical, cuyo resultado es la organización de especies y hábitats en una gran variedad de climas y ecosistemas costeros. Destacan entre ellos más de 130 lagunas costeras, así como un gran número de cuencas hidrológicas cuyos principales ríos se distinguen por la cantidad de agua que drenan; el Río Balsas en

el Océano Pacífico, y los ríos Pánuco, Papaloapan y Grijalva-Usumacinta en el Golfo de México.

Las carreteras costeras son aquellos caminos influenciados por su presencia en o cerca del nivel del agua, las olas, y el transporte de arena, medio ambiente único de una costa. Mientras que normalmente se asocian con los océanos, el medio ambiente costero incluye también los lagos y otros cuerpos de agua no ribereños que puedan resultar afectados por las tormentas costeras.

Cada localidad costera tiene carreteras que son inundadas y dañadas por las tormentas costeras. Algunos de estos caminos son perpendiculares a la costa y sirven de acceso y rutas de evacuación. Otros caminos son paralelos a la costa, ya sea a lo largo o tierra adentro de la costa. Algunas de estas carreteras son los principales caminos que atraviesan o que se encuentran a lo largo de las bahías o estuarios.

Muchos diferentes procesos naturales y fuerzas impactan en carreteras y puentes cerca de la costa. Las fuerzas naturales sobre la costa son un reto hoy y pueden estar aumentando en cierto número de maneras. Otros procesos costeros que pueden afectar a las carreteras costeras incluyen problemas comunes de hielo en los climas del norte, las inundaciones, y el aerosol marino (F.H.W.A., 2008).

El daño a superficies bituminosas de carreteras y pistas de aterrizaje en los ambientes costeros, áridos, semi-áridos y cálidos, en algunos casos ha sido atribuido a la acción de las sales solubles. El daño por sales sólo se producirá en zonas climáticas donde la evaporación exceda a la precipitación. Bajo tales condiciones, la humedad migra a la superficie en la que precipitan las sales solubles presentes en solución. Estas zonas climáticas cubren grandes áreas de Australia, África, Oriente Medio y el Norte y Sur de América; a este tipo de sales y por su origen se le conoce como salinidad de tierras secas (Obika et al., 1992). El

daño por este tipo de sales también ha sido reportado por Vorobieff (2001), Roads Department of Botswana (2001), Institute of Public Works Engineering Australia (2002), Austroads (2004, 2007), Biggs y Mahony (2005), y Graham (2005). En general concluyen que se debe poner atención cuando el nivel freático es menor a dos metros.

Debido al clima de invierno más severo que produce más nieve y hielo, los países nórdicos y Canadá utilizan más descongelantes o anticongelantes en las carreteras y pistas de aeropuertos que los Estados Unidos, Japón o China, encabezando una investigación más extensa realizada en estas áreas. La investigación fundamental en estos países ha sido conducida para investigar las posibles reacciones entre mezclas asfálticas y varios descongelantes o anticongelantes. El agrietamiento térmico y la pérdida de la capacidad de carga durante el deshielo de la primavera, a menudo se identifican como los principales mecanismos de deterioro del pavimento en los climas fríos. La acción de las heladas dentro de las capas granulares del pavimento puede ser agravada por un proceso de enriquecimiento de hielo y por las condiciones de congelación diferencial asociado con la contaminación del material de base por sales descongelantes o anticongelantes, donde el cloruro de sodio es la sal más comúnmente usada en el mundo (Transportation Association of Canada, 2003; Shi et al., 2009; Yu et al., 2013).

Los fenómenos asociados a la presencia de sales marinas tienen diferentes procesos, envolviendo diferencias estacionales considerables en la concentración media o la mediana de cloruros. Las sales pueden permanecer en el pavimento y cristalizar durante el período de seca prolongada (3-4 meses), lo que es probable que cambie la calidad de la escorrentía y tienen, además, un efecto en la estructura del pavimento en sí. En áreas con alta salinidad y donde la evaporación es sistemáticamente mayor a la precipitación, la cristalización de sales en la superficie superior de los materiales del pavimento tiende a provocar una mayor degradación del pavimento de la carretera, con consecuencias estructurales

correspondientes a la ingeniería de caminos. Si los fenómenos asociados a la alta salinidad en la escorrentía de carreteras de las zonas costeras fueran mejor entendidos y cuantificados, esto representaría una nueva y valiosa contribución a los conocimientos actuales, y de esta manera se proporcionaría información valiosa para la gestión de la escorrentía de carreteras en países como Portugal y Egipto, con una línea costera significativa (Antunes y Ramísio, 2011; El-Maaty, 2013).

Sólo sales solubles en agua pueden moverse a través de un pavimento para causar daño. Como las sales generalmente son disueltas en el agua, todas las fuentes de agua mostradas en la Figura 5 tendrán algún contenido de sales y podrán también movilizar sales presentes en el sitio.

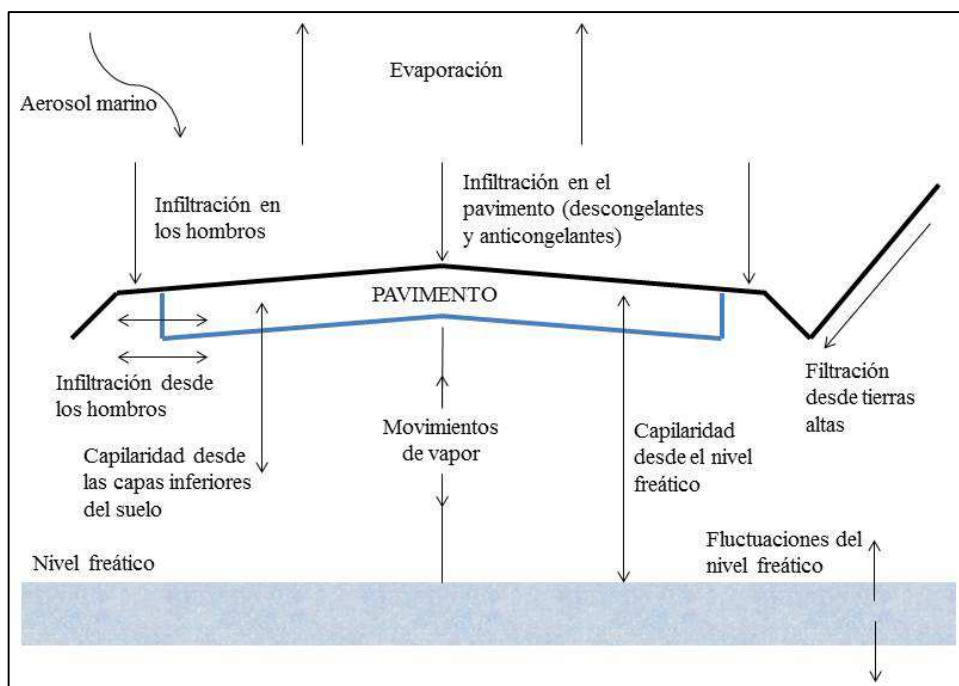


Figura 5. Orígenes del agua que podría movilizarse junto con las sales solubles.

Lombardo et al. (2004) establecieron que los cristales cúbicos aparecen como una fase de equilibrio, mientras que las fases de no equilibrio (por ejemplo dendritas) a menudo cristalizan al final del ciclo de cristalización de acuerdo a los cambios de la relación superficie de la solución/volumen.

El tamaño del cristal y la humedad relativa (H. R.) son factores clave en la cinética de disolución/cristalización del cloruro de sodio (NaCl). En el campo, se espera que la presencia de abundantes cristales de tamaño nanométrico den lugar a una alta presión de cristalización y produzcan un daño significativo. La concentración de sal de la solución parece jugar un papel importante en la cinética de cristalización del NaCl. Dado que las sales en el campo se concentran generalmente en o cerca de la superficie del objeto, la cristalización se puede facilitar, como consecuencia de los ciclos de humedad diarias. En ambientes donde los grandes cambios de H.R. son comunes, la cristalización puede ocurrir rápidamente y producir un gran daño.

El deterioro por sal se produce como resultado de consecuentes transiciones de fase entre la solución acuosa y los estados sólidos, que se activan por los cambios de los parámetros ambientales. En el caso del NaCl esta transición se produce en el punto de deliquesencia (humedad relativa de deliquesencia, H.R.D. 75%, sobre un amplio rango de forma independiente a la temperatura). Las formas de no-equilibrio aparecen preferentemente como resultado de gran magnitud y de cambios abruptos de H.R. Estas formas cristalinas corresponden a una mayor relación de supersaturación en la solución y por lo tanto a una mayor presión de cristalización, que puede resultar en un daño mayor. El efecto de otras variables sobre la cinética de cristalización tales como el flujo de aire y la temperatura debería ser investigado a mayor profundidad.

Dentro de la experimentación llevada a cabo y sus resultados obtenidos está el análisis de un ciclo de disolución/cristalización de cristales de NaCl (entre 0.9 y 2 mm) que originalmente fueron mantenidos al 70% de H.R. Las imágenes obtenidas se muestran en la Figura 6.

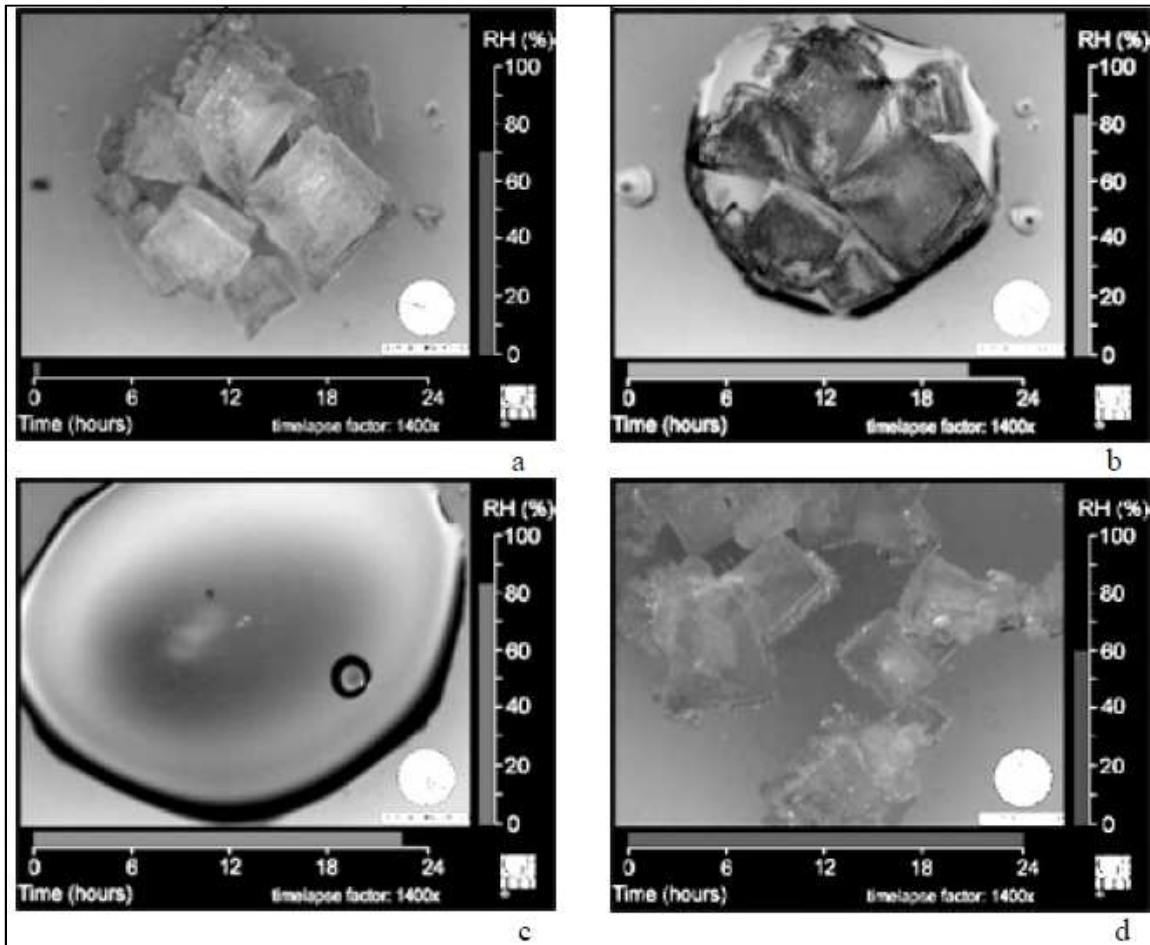


Figura 6. Ciclo de disolución/cristalización de cristales de NaCl. (Fuente: Lombardo et al., 2004)

Así, la disolución total de los cristales tomó lugar en aproximadamente 20 horas a una H.R. de entre 80 y 85%. Posteriormente y en menos de cuatro horas se tuvo la cristalización de la solución saturada a 60% de H.R. De este modo, la cristalización parece tener lugar más rápidamente que la disolución, sobre todo cuando la magnitud del cambio de H.R. es grande.

Langlet et al. (2011) establecieron que una sustancia cristalina se dice que es deliquescente si forma una solución acuosa cuando la H.R. del ambiente llega a un cierto valor de umbral. Por debajo de esta H.R.D., el cristal rodeado por el vapor de agua es termodinámicamente favorecido como se observa en la Figura 7 y permite su cristalización, mientras que por encima de la H.R. crítica, la solución

acuosa es la fase termodinámicamente favorecida como se observa en la Figura 8, permitiendo su disolución.

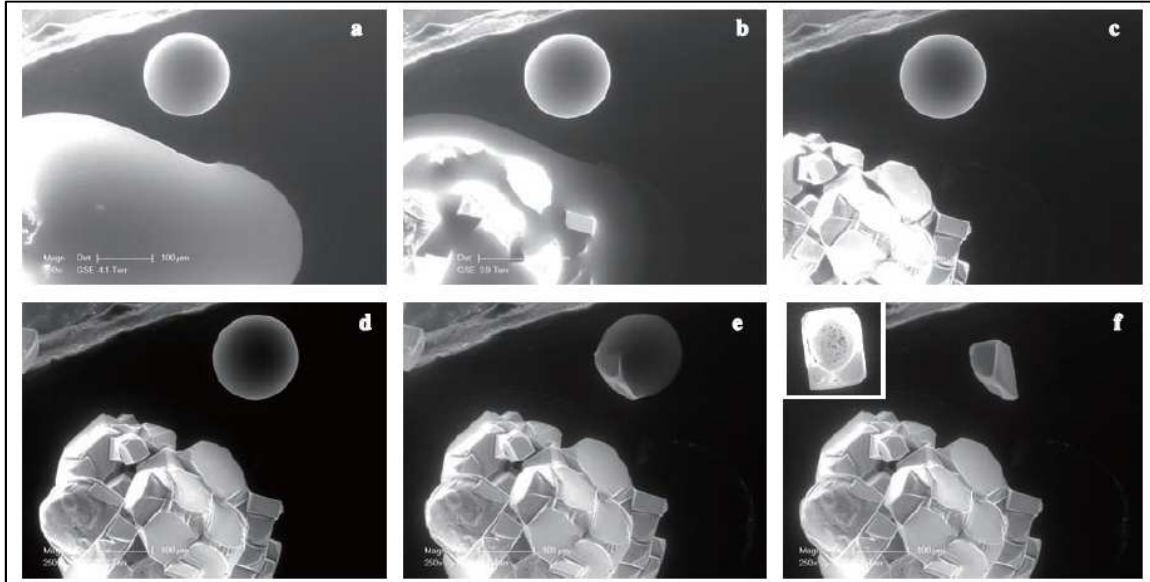


Figura 7. Cristalización del NaCl, H.R. < H.R.D. (Fuente: Langlet et al., 2011)

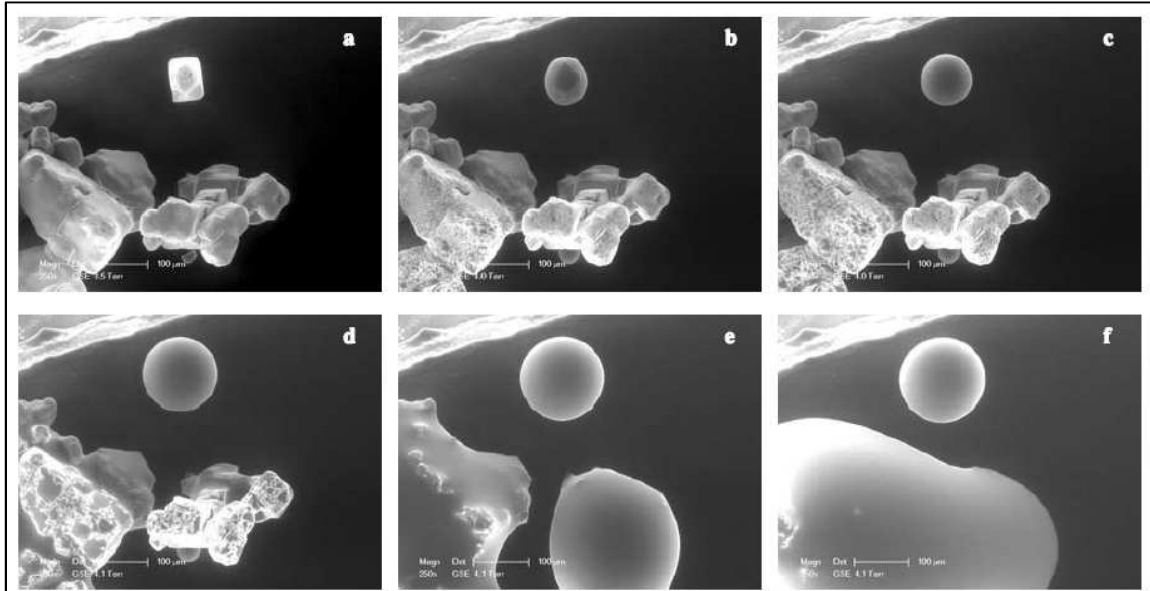


Figura 8. Disolución del NaCl, H.R. > H.R.D. (Fuente: Langlet et al., 2011)

Obteniendo la tasa de cambio de absorción/pérdida de agua (disolución/cristalización) por parte del NaCl, ésta puede ser usada para determinar la cantidad de polvo higroscópico disuelto o el tiempo requerido para

su aglutinamiento por recristalización. En este contexto Langlet et al. (2011) simularon el proceso en el cual cierto elemento contenía NaCl y fue almacenado por cuatro días simulando un clima lluvioso seguido por un periodo seco; así, le fue posible determinar la cantidad de NaCl disuelta y el tiempo necesario para la recristalización como una función de la H.R. Considerando la masa de 0.1 g de NaCl, encontró que:

- Después de 4 días y a 25 °C, el porcentaje disuelto fue de 25.5, 57.3 y 80.3%, para una H.R. de 80, 85 y 90% respectivamente.
- El tiempo requerido para la recristalización a 25 °C y una solución de NaCl al 57.3%, es de 3, 1.5 y 1 día, para una H.R. de 60, 45 y 30% respectivamente.

De este modo se tiene que a mayor H.R. es mayor el porcentaje de NaCl disuelta, y que a menor H.R. es menor el tiempo de recristalización. También observó que debido a la disolución/recristalización de cristales, el aglutinamiento es acompañado por cambios significantes de tamaño y forma de las partículas con respecto al inicial. De este modo, encontró dos fenómenos distintos responsables para el aglutinamiento: el primero corresponde al crecimiento de cristales parcialmente disueltos de agregados más grandes, mientras que el segundo representa la formación de un cristal de solución homogénea acuosa formada previamente por una completa disolución de los pequeños cristales. Lo anterior se muestra en la Figura 9.

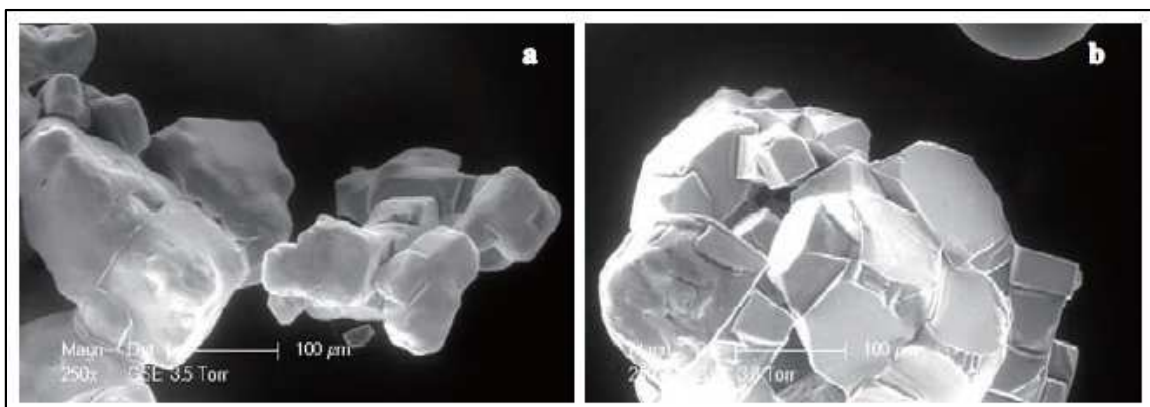


Figura 9. Imágenes de agregados de NaCl secos: a) antes de la disolución, y b) después de la recristalización. (Fuente: Langlet et al., 2011)

De este modo el Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources de Australia (2003) ha identificado que la degradación por la introducción y concentración de sales en las carreteras pavimentadas es un proceso que consta de dos estados.

1. *Crecimiento de la presión en los agregados o la mezcla.* El cloruro de sodio disuelto en agua, entra en los vacíos de la mezcla o los poros de los agregados, reaccionando con los constituyentes químicos de éstos, y formando cristales de diferentes compuestos químicos que tienen más grandes volúmenes. La presión que esta cristalización e incremento de volumen ejercida sobre los agregados o la mezcla, causa el desarrollo de grietas, permitiendo que más humedad entre. Como los niveles o contenidos de humedad fluctúan, el cambio en las condiciones promueven un ciclo de la cristalización de las sales, disolviendo y recristalizando de acuerdo al cambio de las condiciones. La presión generada por la cristalización y la presión de vapor (por la evaporación de la humedad) puede llegar a ser suficiente para deformar los agregados o las mezclas asfálticas. En los sistemas de riego, este daño puede iniciar como ampollas, y si estas estallan, la capa impermeable se rompe, permitiendo la infiltración del agua superficial e incrementando la tasa de evaporación. Esto acelera el proceso de cristalización, promoviendo con mayor velocidad el deterioro del pavimento.
2. *Degradación de los agregados o de la mezcla asfáltica.* Además del crecimiento y expansión de los cristales de sal que aumentan la existencia de grietas, finalmente causan que las partículas se rompan. La velocidad a la cual este deterioro ocurre dependerá del tipo y resistencia de la roca o concreto asfáltico, de la cantidad y diámetro de los poros o vacíos y de la accesibilidad de la humedad y la sal. El crecimiento de cristales filamentosos de halita (NaCl) han llegado a ser identificados, aunque no es conocido qué tan frecuente se presentan en campo, pues su identificación ha sido en laboratorios. Este tipo de cristales generan un mayor esfuerzo, y proceden de la acumulación de cristales cúbicos que son más débiles.

Los procesos de las sales han sido descritos y estudiados por Obika et al. (1992), Grossi y Esbert (1994), Rodríguez y Doehne (1999), De Carteret et al. (2011), y Horak et al. (2011), en algunos casos a mayor detalle y profundidad que otros.

2.5 Investigaciones recientes

Hanz et al. (2007) han sugerido que el fenómeno de daño de la humedad es demasiado complejo para ser investigado a través de únicamente ensayos de mezclas asfálticas del campo. La comprensión de cómo la humedad afecta el vínculo entre el asfalto/agregado y asfalto/asfalto es necesaria para caracterizar el comportamiento de la mezcla total. Por lo tanto, las propiedades de adherencia de asfalto/agregado y la cohesión del asfalto, inicialmente deben ser estudiadas por separado para desarrollar sistemas para determinar estas propiedades e incorporar estas mediciones en la consideración de la susceptibilidad a la humedad en la mezcla asfáltica completa.

Shi et al. (2009) centraron sus investigaciones sobre los efectos de los descongelantes sobre pavimentos asfálticos de diferentes tipos de mezcla. Un amplio estudio de laboratorio evaluó los efectos destructivos relativos de varios anticongelantes en el pavimento asfáltico, teniendo en cuenta el efecto de los ciclos de congelación/descongelación. La exposición a ciclos de congelación/descongelación y descongelantes permitió encontrar la afectación de la viscosidad del cemento asfáltico recuperado y la gradación de agregados recuperados. La extensión del daño a pavimentos asfálticos debido a los ciclos de congelación/descongelación en el agua destilada era menor que la causada por cualquier descongelante utilizado (urea, NaCl, otros). Se encontró un intervalo crítico de la concentración entre 1 % y 2 % en peso de descongelante sólido a la solución, en el que se observó el máximo efecto perjudicial para todos los tipos de sustancias y agregados. Los agregados de piedra caliza mostraron una mayor resistencia a la desintegración que los agregados de cuarcita cuando se someten

a ciclos de congelación/descongelación en presencia de los descongelantes. Se encontró que la urea tiene el efecto perjudicial más alto, en ambos los agregados y probetas de concreto asfáltico. Sugirieron preferir cementos asfálticos duros o modificado, utilizar agregados alcalinos y evitar filler calizo.

Decheng et al. (2010) expusieron que en algunas regiones de la parte noreste de China, más de 1,000 km de carretera arterial están cerca o incluso llegan a través del mar. Así que el agua de mar puede invadir fácilmente en la estructura de pavimento bajo el efecto de la marea y las tormentas. Estos caminos también están en la región congelada estacional de China, y así el agua de mar se congela y descongela como los cambios de temperatura causando cambios regulares en su volumen. La sal y el ciclo de congelación/descongelación inevitablemente tendrán su influencia en la durabilidad de las M.A.C. Cinco concentraciones diferentes de sal en asfalto se prepararon con una cantidad pesada de 1, 2, 3, 4 y 5 por ciento de sal en peso de asfalto. Se prepararon dos grupos de muestras. El primer grupo fue etiquetado como no condicionado. El segundo grupo (condicionado) fue primero condicionado por la saturación de vacío con agua destilada o agua de mar, después se sometió a 8 ciclos sucesivos de congelación/descongelación. Las resistencias a la tensión indirecta, el volumen y el peso se determinaron al final de 0, 2, 4, 6 y 8 ciclos o hasta el fallo para los especímenes condicionados y no condicionados. Llegaron a la conclusión de que la sal juega un papel importante en el rendimiento de cemento asfáltico a bajas temperaturas. Resultados de relación de resistencia a la tensión para todas las mezclas indican que la sal tiene un efecto más significativo en la resistencia a la tensión cuando el porcentaje de sal es más de 3%. El daño por congelamiento/descongelamiento de las mezclas asfálticas incluye principalmente dos fases. La primera es el daño causado por la expansión del agua que resulta en la disminución de la resistencia a la tensión indirecta. Y la otra es el daño interfacial entre el asfalto y el agregado o la fractura del concreto asfáltico, que produce un mayor aumento de la pérdida de peso.

Deniz et al. (2012) examinaron los efectos de los productos químicos anticongelantes en los pavimentos de asfalto para observar cambios en M.A.C., mezclas tipo Stone Mastic Asphalt (S. M. A.) y en asfalto modificado con polímero, dadas las prácticas de construcción y los procedimientos de mantenimiento de invierno. Se llevaron a cabo dos procesos de condicionamiento diferentes. La primera fue condicionada con agua a 5 °C durante 5 días, y la segunda fue condicionada con una solución salina que contiene 23% de sal, para la misma temperatura y duración. Se utilizaron dos tipos de agregado, basalto y caliza. Pruebas de desprendimiento, absorción y resistencia a la congelación y descongelación se aplicaron al agregado. El último paso fue analizar las mezclas. Pruebas para determinar la sensibilidad al agua se aplicaron a los tres tipos de mezcla comunes. Los autores concluyeron que: las muestras de asfalto se ven afectadas por las soluciones de sal; el grado de penetración disminuye aproximadamente cuatro unidades; las concentraciones de NaCl representan una reducción de aproximadamente el 5% en el cemento modificado, con respecto a la utilizada en los pavimentos condicionados con agua, que se ensayaron utilizando el mismo método; las soluciones de sal afectaron poco a la muestra de asfalto modificado. Al final, las soluciones de sal (NaCl) parecen estar a un nivel insignificante de efectividad para las aplicaciones de M.A.C. y S. M. A. opuestos a la visión común de que dañan los pavimentos.

Özgan et al. (2013) produjeron muestras que fueron expuestas a 1, 3, y 4 molar de NaCl, 1 molar de CaCl₂ y también agua pura como ambientes corrosivos; sin embargo, no especifican tiempos de exposición. Los efectos de estos ambientes corrosivos sobre la estabilidad Marshall (E.M.) de las muestras de M.A.C. se investigaron experimentalmente mediante la comparación de los valores de E.M. de las muestras de referencia. De acuerdo con los resultados de las pruebas experimentales, los efectos más importantes de la E.M. de las muestras de M.A.C. se produjeron en el entorno de agua pura con 15.47 % de estabilidad pérdida, y los otros efectos ambiente corrosivo se produjeron en la 4 molar de NaCl con 13.70% de pérdida, 3 molar de NaCl con 11.22% de pérdida, y 1 molar

de NaCl con 10.28% de pérdida. El menor efecto sobre la estabilidad de las muestras se produjo en los ambientes de 1 molar CaCl_2 con 1.42% de pérdida. Debido al aumento de NaCl, los valores de estabilidad disminuyeron. Estos resultados indicaron que la sal que se usa para evitar la formación de hielo en la carretera es perjudicial para el concreto asfáltico.

El-Maaty (2013) estableció que los pavimentos en Egipto suelen ser atacados por dos tipos de agua, incluida el agua de mar, y el agua pura. En el laboratorio, se simularon las condiciones para evaluar el efecto del grado de saturación, vacíos de aire y medios de ataque con la resistencia a la tensión indirecta y el módulo de elasticidad. Esto le dio una medida cuantitativa de las condiciones de durabilidad de M.A.C. utilizadas en Egipto. Por otra parte, ayudó a predecir daños por humedad en las áreas que sufren daños por agua. Las muestras se sumergieron en dos tipos de agua, incluida el agua del grifo y el agua de mar, sin indicar la concentración de esta última. Se realizaron todas las pruebas para evaluar el efecto de estos medios de ataque para diferentes períodos de acondicionamiento (1, 3, 7, y 14 días). Obtuvo que los especímenes acondicionados en agua de mar obtuvieron menor estabilidad Marshall, flujo, cociente Marshall, menor módulo de elasticidad, la resistencia de extracción más baja, desplazamiento lateral inferior, relación de resistencia a la tensión y menor estabilidad retenida Marshall, donde 7 días de acondicionamiento en agua de mar tenía aproximadamente el mismo efecto que 14 días de acondicionamiento en el agua del grifo en lo que respecta a los daños por humedad. Esta reducción aumentó con el incremento tanto del período de acondicionamiento y de los vacíos de aire.

Chowdhury et al. (2013) trataron de determinar y comparar las propiedades de la sal mezclada con asfalto y asfalto puro, e investigar el comportamiento de mezclas asfálticas en su estabilidad con asfalto modificado dado el aumento del porcentaje de sal en el cemento. Las muestras se prepararon mediante la adición de cloruro de sodio con el cemento puro. La sal se agregó con respecto a 0, 2, 4,

6, 8 y 10 por ciento en peso de cemento puro. El cloruro de sodio jugó un papel importante en la mejora de las diferentes propiedades de los cementos y diseño de la mezcla asfáltica. Se concluyó que el valor de la penetración y la gravedad específica aumenta y el punto de reblandecimiento, el punto de inflamación, la solubilidad y la ductilidad del cemento disminuyen con el aumento de sal; las propiedades de adhesión y de cohesión del concreto asfáltico se redujeron con el aumento del porcentaje de sal en el cemento. El contenido óptimo de asfalto también se incrementó con el aumento de porcentaje de contenido de sal y se encontró superior a 4% de contenido de sal. De la prueba de Marshall, en cuanto a la consideración de la estabilidad y la durabilidad del pavimento flexible, se podría permitir en la construcción de carreteras la cantidad de sal máxima del 2% en cementos puros.

Yu et al. (2013) estudiaron asfalto no modificado y asfalto modificado con SBS después de envejecimiento a largo plazo en el que se sumergieron en diferentes concentraciones de sal en varias duraciones y se analizaron posteriormente las propiedades reológicas. Los tipos de asfalto incluyen asfalto convencional y asfalto modificado con SBS. NaCl fue elegido como la sal para el condicionamiento, cuyas concentraciones elegidas fueron de 0.3, 1, 3 y 5%. Las duraciones de inmersión fueron de 1, 7, 15 y 30 días. Cuando los tiempos de inmersión son fijos, el cemento convencional envejecido, no presentó diferencias en el G^* y δ entre los especímenes inmersos y sin inmersión a excepción de aquellos de 30 días de inmersión, que hicieron caer ligeramente G^* a baja frecuencia y disminuir δ a alta frecuencia. Para el asfalto modificado con SBS después del envejecimiento a largo plazo, también hay diferencias en G^* y δ entre los especímenes inmersos y sin inmersión. A altas temperaturas, la sal puede mejorar el rendimiento de asfalto envejecido. En comparación con el cemento convencional envejecido, las propiedades de las muestras inmersas en sal después del PAV a baja temperatura disminuyeron significativamente, especialmente cuando la inmersión es en 3% de concentración de agua salina durante 15 días. En asfalto modificado con SBS y envejecido, la sal reduce el

rendimiento a bajas temperaturas. La sal también puede reducir las propiedades de fatiga después del envejecimiento a largo plazo, evaluada por el factor de la fatiga ($G^* \cdot \sin \delta$). Basado en los resultados de las pruebas, los autores concluyen que la sal tiene, un efecto sobre las propiedades reológicas de los asfaltos no modificados y modificados con SBS después de PAV, especialmente en el rendimiento a baja temperatura.

2.6 Área de estudio: Yucatán

La presente investigación se desarrolló considerando las condiciones y generalidades de las carreteras costeras del Estado de Yucatán, en México.

De acuerdo al Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2013), Yucatán ocupa el lugar número 20 por la extensión de su superficie territorial, con 106 municipios, y una superficie de 39,612 kilómetros cuadrados que equivale al 2.0% del territorio nacional. También cuenta con 340 km de litorales, lo que representa el 3.1% del total nacional. Según datos del Censo Nacional de Población del 2010, Yucatán tiene una población estimada en 1 955 577 habitantes, o sea el 1.74% del total nacional de la población.

El estado se encuentra situado en la parte norte de la península del mismo nombre específicamente al extremo este de la República Mexicana; colindando al norte con el Golfo de México; al este con Quintana Roo; al sur con Campeche y Quintana Roo y al oeste con el Golfo de México y Campeche. Sus límites extremos son: al norte $21^{\circ} 38'$; al sur $19^{\circ} 32'$ de latitud norte; al este $87^{\circ} 22'$; al oeste $90^{\circ} 24'$ de longitud oeste.

Las costas son una fuente importante de alimentos y recursos económicos, entre los que destacan la pesca de diferentes especies y actividades turísticas, además de proporcionar zonas de playa ampliamente aprovechadas por el turismo.

Los sistemas marinos y costeros contemplan una compleja interacción de ecosistemas, con una gran biodiversidad; éstos sirven de criadero para la reproducción de diversas especies y generan ingresos económicos.

La zona costera representa gran importancia en actividades recreativas como: observación de las aves, caza y pesca. Además de su atractivo físico, tiene gran importancia ecológica como filtrado de diversos contaminantes, asimismo capta y provee de agua dulce y protección contra los fenómenos naturales.

La Península de Yucatán pertenece a la zona del trópico húmedo, por lo que el estado posee un clima que favorece a la formación de selvas tropicales. En la entidad se identifican tres tipos de clima: El 85.65% de la superficie del estado presenta clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, semiseco muy cálido y cálido con 12.88% y seco muy cálido y cálido con 1.47%, que se localiza en la parte norte del estado.

En el Estado de Yucatán la roca sedimentaria cubre 95.8% de su territorio y sólo 4.2% es de suelo. La roca sedimentaria del periodo Terciario abarca 82.6%, se localiza en todo el estado excepto en su parte norte; donde aflora la roca sedimentaria del Cuaternario con 13.2% y paralelamente a la línea de costa se ubica el suelo. Toda la superficie estatal queda comprendida en la era del Cenozoico con una edad aproximada de 63 millones de años.

La constitución geológica de la superficie del Estado de Yucatán es en su totalidad de rocas sedimentarias marinas-calizas y derivadas de éstas. Las calizas en la superficie se encuentran formando una coraza calcárea o reblandecida. La coraza calcárea es de extrema dureza y constituye la superficie del relieve en grandes territorios; es conocida con el nombre común de laja (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2013).

El suelo en la entidad está representado por Leptosol con 61.70%, Luvisol con 19.21%, el Phaeozem con 12.51% y un 6.58% restante de diferentes tipos de suelos. Dadas las características del suelo, la entidad tiene grandes extensiones de tierra dedicadas a la agricultura y pastizal cultivado. También a lo largo de su costa existe el manglar, además de otros tipos de vegetación costera. La constitución de los manglares es de elementos hidrófitos muy tolerantes a la salinidad.

La parte norte de la península es la que tiene mayores periodos de seca, en esta parte se da vida a la selva baja caducifolia, la cual está conformada por árboles (entre 4 y 15 m de altura), los cuales pierden su follaje en la temporada seca. En esta área se presenta hoy agricultura y pastizales de cultivo (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2013).

La característica de los suelos yucatecos, es que en su mayoría son de roca cárstica, lo que no permite la presencia de ríos o lagos pero sí que la lluvia se filtre y descienda al subsuelo, la cual se concentra en acuíferos subterráneos. Ésta puede salir a la superficie como manantiales que bañan la gran extensión costera; este flujo se combina con el agua del mar en algunos casos formando lagunas y ciénagas.

Los cuerpos de agua en Yucatán se clasifican en dos tipos, los esteros y las lagunas. Los principales esteros que se encuentran en la península son: Celestún, Yucalpetén, Ría Lagartos, El Islote y Yolvé; y las lagunas son: Flamingos y Rosada.

De la Tabla 1, se tiene que Yucatán cuenta con poco más de 12,000 km de carreteras, de las cuales el 50% son pavimentadas. Los 340 kilómetros de litoral del estado, se desarrollan a lo largo de 14 municipios y de acuerdo a la Dirección General de Planeación (2013), dentro de esos municipios el estado cuenta con nueve puertos de cabotaje (Celestún, Sisal, Chuburná, Telchac, Dzilam de Bravo,

San Felipe, Chabihaú, Río Lagartos y El Cuyo), con dos puertos de altura y cabotaje (Yucalpetén y Las Coloradas) y una Administración Portuaria Integral (Progreso). De acuerdo al Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2011), dentro de la franja costera comprendida por dichos municipios y puertos, las carreteras costeras tienen una longitud de 1,000 kilómetros aproximadamente con el objeto de tener en comunicación y brindar servicios a esa zona.

El clima tropical marino del norte de la Península de Yucatán ha sido caracterizado por su agresividad atmosférica ubicándose en la escala de 5 de la ISO, considerado el de más alta corrosividad por el daño generado al hierro, cobre y zinc; es el ambiente más agresivo en lo que se refiere a cloruros y dióxido de azufre (Torres et al., 2005).

El rango de salinidad en los diferentes mares en el mundo va aproximadamente de treinta a cuarenta gramos de sal por litro de solución. La salinidad en las costas de Península de Yucatán se encuentra en el rango entre 35,500 mg/L y 36,500 mg/L (Solís et al., 2008).

3. METODOLOGÍA

3.1 Secuencia metodológica

A continuación se muestra de modo general la secuencia metodológica que se siguió para este trabajo. La parte experimental puede ser dividida en tres partes, teniendo así en la Figura 10 el diagrama correspondiente a las carreteras costeras y su caracterización, en la Figura 11 lo relacionado al diseño de mezcla, y finalmente en la Figura 12 la afectación por sales marinas.

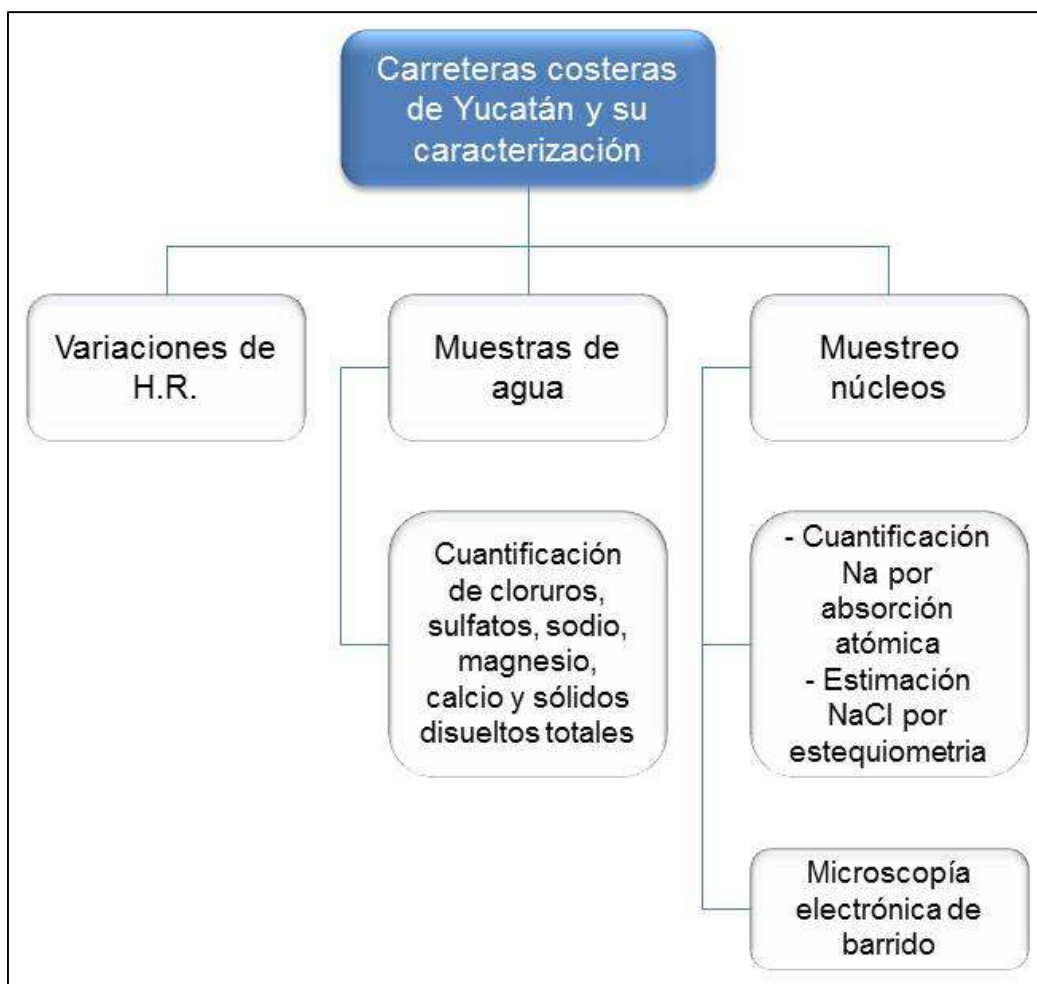


Figura 10. Esquema de la secuencia desarrollada en la primera parte.

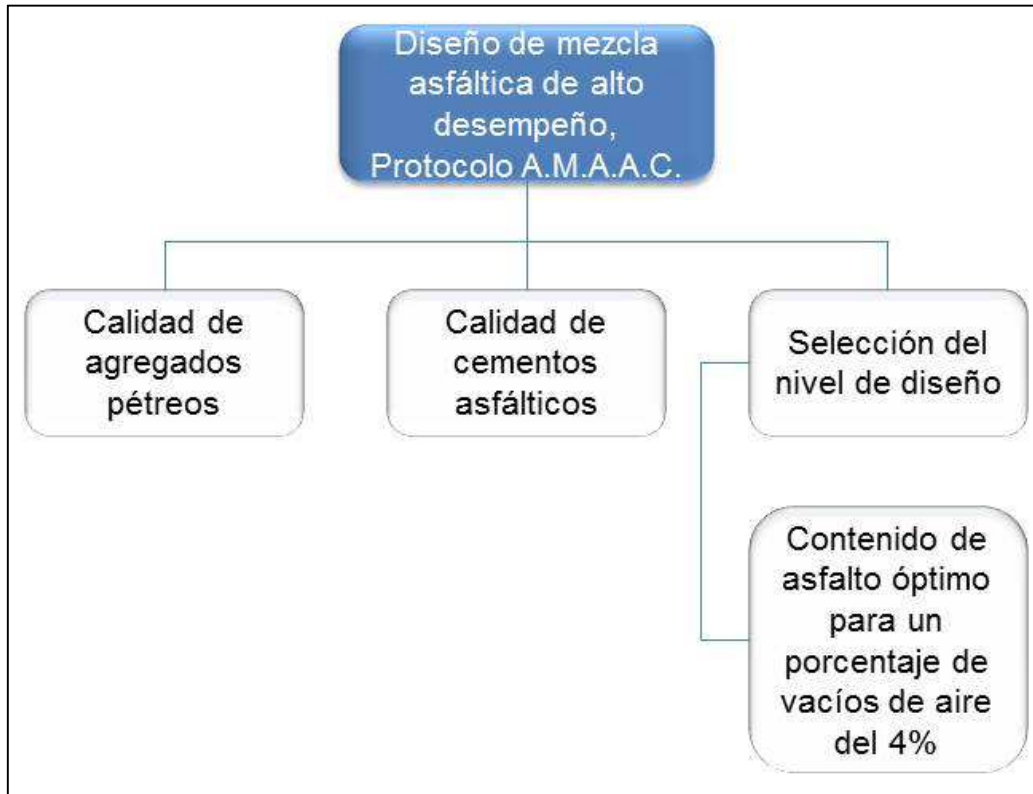


Figura 11. Esquema de la secuencia desarrollada en la segunda parte.

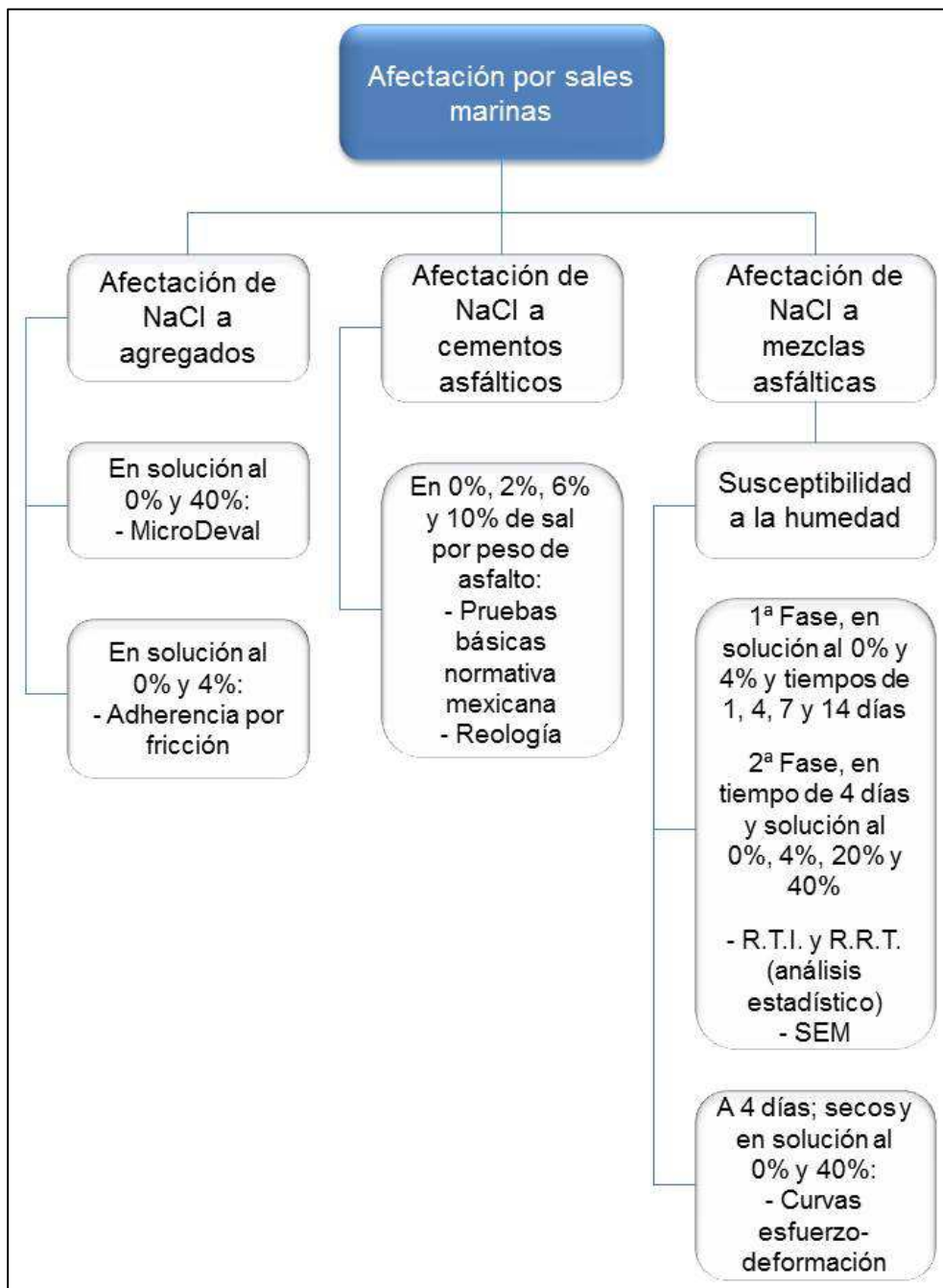


Figura 12. Esquema de la secuencia desarrollada en la tercera parte.

3.2 Carreteras costeras y su caracterización

Se realizó una inspección en todas las carreteras costeras de Yucatán, para identificar qué tipo de pavimento eran, sus fallas y el ambiente marino al cual se encontraban sometidos. En la Figura 13 se muestra una de estas carreteras. Así

mismo, se realizó un análisis de la variación de la H.R. en la costa, la cual es una característica particular de los ambientes costeros.



Figura 13. Ejemplo de una carretera en un ambiente costero de Yucatán.

Posteriormente y dado el objetivo de la investigación, se seleccionaron aquellas carreteras costeras que hayan sido construidas con mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa. Dicha información del tipo de pavimento flexible, fue corroborada con la Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes – Centro Yucatán. Así mismo, dicha Dirección proporcionó la información relacionada a fechas de finalización de las obras y los diseños de mezclas asfálticas con las que fueron construidas.

Una vez seleccionadas las carreteras, se procedió a tomar muestras del concreto asfáltico mediante la extracción de núcleos de carpeta y se tomaron muestras del cuerpo de agua más próximo (mar, de los esteros o de las rías, siendo estas últimas una extensión de los esteros pero que se terminan incorporando al mar). En la Figura 14 se observa el equipo utilizado para extraer dichos núcleos.



Figura 14. Extracción de núcleos de carpeta asfáltica.

A algunas muestras de agua se les realizaron pruebas para obtener los siguientes parámetros: cloruros, sodio, sulfatos, magnesio, calcio y sólidos disueltos totales (como salinidad). Lo anterior, en base a los procedimientos de prueba establecidos en una serie de Normas Mexicanas, NMX; dicho conjunto de normas y otras empleadas a lo largo de la investigación, se encuentran especificadas en el Anexo A. Fueron seleccionadas tres muestras de agua de acuerdo a su naturaleza: mar, laguna y ría; esto para obtener una variabilidad general de dichos parámetros.

Los núcleos de concreto asfáltico extraídos, fueron seccionados transversalmente para obtener tres partes de cada uno: la superior, la intermedia y la inferior. En la Figura 15 se muestra una de estas secciones de uno de los núcleos. Fueron seleccionados dos núcleos para obtener el cloruro de sodio presente en cada uno de ellos, tomando en cuenta que fuesen diferentes los cuerpos de agua que estaban en contacto con ellos y que hayan tenido diferente fecha de terminación de obra para así observar variaciones en las concentraciones.



Figura 15. Seccionamiento de un núcleo de carpeta asfáltica.

Para la cuantificación del cloruro de sodio se utilizó la técnica de espectrometría de absorción atómica. De acuerdo a Perkin Elmer (1996), cada elemento tiene un número específico de electrones asociados con su núcleo. La configuración orbital normal y más estable de un átomo es conocido como el estado fundamental. Si energía es aplicada a un átomo, la energía será absorbida y un electrón exterior será promovido a una configuración menos estable conocido como el estado excitado. Dado que este estado es inestable, el átomo inmediatamente volverá al estado fundamental, liberando energía de luz.

En la técnica de absorción atómica el proceso es el siguiente: el estado fundamental del átomo absorbe energía luminosa de una longitud de onda específica cuando entra en el estado excitado. Como el número de átomos en la trayectoria luminosa aumenta, la cantidad de luz absorbida también aumenta. Se realiza una determinación cuantitativa de la cantidad de analito al medir la cantidad de luz absorbida. El uso de fuentes de luz especiales y una cuidadosa selección de longitudes de onda permite la determinación específica de elementos individuales.

Así, el sodio fue cuantificado con un espectrófotometro de absorción atómica marca Perkin Elmer modelo AAnalyst 100 de acuerdo al método analítico AY-3 de Perkin Elmer (1996); sin embargo, cabe mencionar que no existe alguna

metodología establecida para cuantificar iones en mezclas asfálticas. El equipo se muestra en la Figura 16.



Figura 16. Espectrómetro de absorción atómica marca Perkin Elmer.

De este modo se obtuvo por una parte, la caracterización del ambiente marino que incide en el concreto asfáltico a través de la identificación de ciertos parámetros de los cuerpos de agua, y por otra, la concentración de NaCl presente en los núcleos fue estimada una vez cuantificado el sodio.

También se realizó un análisis cualitativo con la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés), sobre fragmentos de los núcleos para observar el NaCl en forma de cristales, así como la interfase entre las sales y la mezcla asfáltica; para esto se utilizó el microscopio electrónico de barrido marca Hitachi modelo Tabletop Microscope TM-1000, mostrado en la Figura 17.



Figura 17. Microscopio electrónico de barrido marca Hitachi.

De acuerdo a Goldstein et al. (2003) el microscopio electrónico de barrido es uno de los instrumentos más versátiles para el examen y análisis de las características microestructurales de los sólidos.

El microscopio electrónico de barrido utiliza electrones en lugar de ondas de luz visible (200-750 nm de longitud de onda) para la formación de imágenes, lo que permite la observación de muestras relativamente grandes a bajas magnificaciones o muy finos detalles (alta resolución) a altas magnificaciones. El microscopio electrónico de barrido también ofrece una gran profundidad de campo que ofrece un buen enfoque sobre las superficies de las muestras en bruto, o sin tratamientos. La gran profundidad proporciona un aspecto tridimensional de la muestra en un microscopio de este tipo en comparación con la formación de imágenes casi planas o bidimensionales encontrado en los microscopios ópticos.

3.3 Diseño de mezclas

De acuerdo a Asphalt Institute (2001), en 1987 el Strategic Highway Research Program (S.H.R.P.) fue establecido por el Congreso de los Estados Unidos, con un presupuesto de 150 millones de dólares en programas de investigación, a fin de mejorar el desempeño y duración de las carreteras,

volviéndolas más seguras tanto para automovilistas como para los trabajadores de las mismas.

Iniciando el desarrollo de un nuevo sistema para especificar materiales asfálticos, el producto final del programa es un nuevo sistema llamado Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement) el cual quedó establecido en el Superpave mix design, SP-2 (2001). Representa una tecnología de tal manera provista que pueda especificar cemento asfáltico y agregado mineral, desarrollar diseños de mezclas asfálticas; analizar y establecer predicciones del desempeño del pavimento. Este método evalúa los componentes de la mezcla asfáltica en forma individual (agregado mineral y asfaltos) y su interacción cuando están mezclados.

En México, la Asociación Mexicana del Asfalto A. C. (A.M.A.A.C.) estableció un Protocolo, el cual tiene sus bases en el sistema Superpave. En lo que se refiere al diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño, se utilizó lo especificado en el Protocolo A.M.A.A.C. PA-MA 01 (2013), el cual contiene la metodología necesaria para diseñar una mezcla que se utilizará en la construcción de pavimentos para carreteras en donde se desea obtener altos niveles de desempeño, refiriéndose a las deformaciones plásticas, al fenómeno de fatiga y al daño por humedad.

El agregado pétreo utilizado corresponde a un banco de materiales de Yucatán que se localiza cerca de la costa, y cuyo tamaño nominal es de 19 mm (3/4"). Al agregado se le realizaron las pruebas de consenso establecidas en el Protocolo A.M.A.A.C. PA-MA 01 (2013).

Los cementos asfálticos utilizados corresponden a los que son usados en Yucatán, a saber, el cemento asfáltico natural AC-20 (o PG 64-22) y el cemento asfáltico modificado con copolímero SBS al 3% (PG 70-22). A ambos se les

realizaron las pruebas de caracterización establecidas en el Protocolo A.M.A.A.C. PA-MA 01 (2013), esto conforme a la especificación ASTM D6373 (2013).

El sistema Superpave tiene como producto final el diseño volumétrico de la mezcla asfáltica de alto desempeño y como paso final evaluar su susceptibilidad a la humedad. El método de diseño propuesto por A.M.A.A.C., establece diferentes niveles de diseño para una mezcla asfáltica densa en función de la importancia de la carretera determinada por el nivel de tránsito o el desempeño deseado para la infraestructura que se requiere, a saber, dichos niveles son:

- Nivel I, tránsito bajo: diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad.
- Nivel II, tránsito medio: los del Nivel I y susceptibilidad a la deformación permanente.
- Nivel III, tránsito alto: los del Nivel II y módulo dinámico.
- Nivel IV, tránsito muy alto: los del Nivel III y fatiga.

Para determinar el nivel de tránsito, considerando la información de la Dirección General de Servicios Técnicos y sus datos viales (2012), se obtuvieron los niveles de tránsito de diseño de tramos carreteros costeros donde se tuviese la información, se estimaron con los factores de daño del Asphalt Institute (1991) y considerando un período de diseño de 20 años y una tasa de crecimiento de 2.5%.

De este modo, el diseño de mezcla se realizó para el agregado de la costa y para ambos cementos asfálticos. La mezcla del agregado pétreo utilizada, fue aquella combinación que se obtuvo al muestrear el banco. El contenido de asfalto óptimo fue el necesario para obtener un porcentaje de vacíos de aire (V_a) en la mezcla del 4%, además de cumplir con otros requisitos establecidos. Para el contenido de asfalto inicial se tomó en cuenta la información recopilada de los tramos carreteros de Yucatán. Para esto se utilizó un compactador giratorio Servopac marca IPC, el cual se muestra en la Figura 18.



Figura 18. Compactador giratorio Servopac marca IPC.

Independiente del nivel obtenido para la evaluación del desempeño de la mezcla y que sirvió para establecer algunos parámetros en el diseño de la mezcla, se decidió evaluar únicamente la susceptibilidad a la humedad, como se ha realizado en investigaciones anteriores para demostrar el daño por sales; para esto, las probetas se ajustaron a un porcentaje de vacíos de aire (V_a) en la mezcla del 7%, y en su condicionamiento se involucra una saturación entre el 55% y el 80%, un posterior proceso de congelamiento a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ y finalmente la inmersión de las probetas a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. La prueba de resistencia debe ser ejecutada a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Al respecto, el diseño volumétrico fue realizado con probetas de 15.24 cm (6") de diámetro, sin embargo las probetas para susceptibilidad a la humedad fueron de 10.16 cm (4") de diámetro por 6.35 cm (2.5") de altura aproximadamente.

La prueba de susceptibilidad a la humedad fue acorde al procedimiento de prueba ASTM D4867M (2009) en función de la relación de la resistencia a la tensión indirecta entre probetas condicionadas y no condicionadas. Dicha resistencia fue obtenida en una prensa Marshall marca ELE que cumple con la velocidad establecida en la norma como se muestra en la Figura 19.



Figura 19. Probeta montada en la prensa Marshall marca ELE.

3.4 Afectación por sales marinas

Como se comentó anteriormente, el efecto de las sales marinas, en este caso el cloruro de sodio, fue analizado mediante los resultados de susceptibilidad a la humedad, sin embargo, algunas pruebas de caracterización de asfaltos y de agregados fueron modificadas. En el caso de los agregados se modificó la prueba de MicroDeval y desprendimiento por fricción ejecutándolas con una solución de NaCl; a los asfaltos se les realizaron pruebas a distintas concentraciones de NaCl en donde la sal fue adicionada en porcentajes con respecto al peso del asfalto.

La prueba de susceptibilidad a la humedad fue modificada en tiempos de inmersión y concentraciones de NaCl, considerando que la prueba original es en una solución con una concentración al 0% de sales y a un día de inmersión, para las probetas condicionadas.

De este modo, y considerando la revisión bibliográfica y los resultados obtenidos en las muestras de agua, las concentraciones utilizadas fueron de 0%,

4% (concentración promedio del agua de mar), 20% y 40% (solubilidad máxima del cloruro de sodio en agua); y los tiempos de inmersión de 1, 4, 7 y 14 días. La sal que se utilizó es la sal de grano o sal común, libre de procesos químicos obtenida de Yucatán, México y las concentraciones son referidas en porcentaje de sal de grano por gramo de agua.

La primera fase consistió en que para ambos cementos asfálticos se realizaron las probetas sin condicionar y en las primeras condicionadas se conservó la concentración de 0% y 4% de NaCl y se sometieron a los diferentes tiempos de inmersión, es decir, 1, 4, 7 y 14 días. En la Figura 20 se muestra una serie de probetas en proceso de condicionamiento de inmersión.



Figura 20. Proceso de inmersión de las probetas.

Cada grupo de probetas constó de triplicados y se obtuvo la resistencia a la tensión promedio. Posteriormente, se calculó la relación de resistencia a la tensión entre los grupos que se sometieron a inmersión o grupos condicionados y el grupo seco o no condicionado. Lo anterior a como lo establece la norma ASTM D4867M (2009).

Así, los grupos realizados en la primera fase son mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Grupos de la primera fase de la experimentación.

Grupo	Cemento asfáltico	Concentración, %	Tiempo, días
1*	PG 64-22	NA	NA
2	PG 64-22	0	1
3	PG 64-22	4	1
4	PG 64-22	0	4
5	PG 64-22	4	4
6	PG 64-22	0	7
7	PG 64-22	4	7
8	PG 64-22	0	14
9	PG 64-22	4	14
10*	PG 70-22	NA	NA
11	PG 70-22	0	1
12	PG 70-22	4	1
13	PG 70-22	0	4
14	PG 70-22	4	4
15	PG 70-22	0	7
16	PG 70-22	4	7
17	PG 70-22	0	14
18	PG 70-22	4	14

*Nota: Los grupos 1 y 10 corresponden a los no condicionados o secos. La nomenclatura PG 64-22 se refiere al cemento asfáltico sin modificar y PG 70-22 al modificado con copolímero.

Posteriormente se definió el tiempo de inmersión que se utilizaría en la segunda fase, el cual fue de cuatro días, y con dicha duración se sometió el resto de los grupos de las probetas a las concentraciones restantes de cloruro de sodio, es decir, 20% y 40%.

Cada grupo de probetas se hizo por triplicados para obtener la resistencia a la tensión promedio de acuerdo a la norma ASTM D4867M (2009). Posteriormente, se calculó la relación de resistencia a la tensión entre los grupos que se sometieron a inmersión (condicionados) y el grupo seco (no condicionado).

Así, los grupos elaborados en la segunda fase son los mostrados en la Tabla 5, en donde algunos grupos habían sido indicados en la primera fase.

Tabla 5. Grupos de la segunda fase de la experimentación.

Grupo	Cemento asfáltico	Concentración, %	Tiempo, días
4	PG 64-22	0	4
5	PG 64-22	4	4
19	PG 64-22	20	4
20	PG 64-22	40	4
13	PG 70-22	0	4
14	PG 70-22	4	4
21	PG 70-22	20	4
22	PG 70-22	40	4

El cálculo de la resistencia a la tensión indirecta (*R.T.I.*) es con la siguiente fórmula:

$$R.T.I. = \frac{2\,000\,P}{\pi\,t\,D}$$

Donde:

R.T.I. = resistencia a la tensión indirecta, kPa

P = carga máxima, N

t = altura del espécimen inmediatamente antes de la prueba de resistencia, mm

D = diámetro del espécimen, mm

Por otra parte, la relación de resistencia a la tensión (*R.R.T.*) está dada por la siguiente fórmula:

$$R.R.T. = \frac{R.T.I._{CH}}{R.T.I._S} * 100$$

Donde:

R.R.T. = relación de resistencia a la tensión, %

R.T.I._{CH} = resistencia a la tensión indirecta promedio del grupo condicionado por humedad, kPa

R.T.I._S = resistencia a la tensión indirecta promedio del grupo seco o no condicionado, kPa

En la Figura 21 se muestra el montaje de las probetas y la mordaza para aplicar la carga diametralmente y así poder obtener la resistencia a la tensión indirecta.



Figura 21. Probeta montada en la prensa para obtener la *R. T. I.*

Cabe mencionar que particularmente en esta investigación, y dado el análisis gráfico y estadístico llevado a cabo, la *R.R.T.* se obtuvo por cada una de las *R.T.I.* de los especímenes del grupo condicionado por humedad en relación a la *R.T.I.* promedio del grupo en seco o no condicionado.

3.5 Curvas esfuerzo-deformación

Los grupos 1, 4 y 20 para el cemento PG 64-22 y los grupos 10, 13 y 22 para el cemento PG 70-22 de las Tablas 4 y 5, fueron seleccionados para ser repetidos y obtener sus curvas esfuerzo-deformación con el mismo procedimiento de aplicación de carga diametralmente obteniendo sus esfuerzos a la tensión indirecta y así observar alguna modificación en su rigidez si fuese el caso; al igual que en la sección anterior, se hicieron por triplicado. Para esto, fue utilizada una prensa servo-hidráulica ATM-025 marca GCTS mostrada en la Figura 22a, que cuenta con el equipo necesario para la adquisición de datos. El montaje de la probeta se muestra en la Figura 22b.



Figura 22a y 22b. Prensa servo-hidráulica marca GCTS y probeta montada en el equipo para recopilar la información y así obtener su curva esfuerzo-deformación.

3.6 Análisis de microscopía electrónica de barrido

Al igual que en los núcleos extraídos, se realizó un análisis cualitativo a través de imágenes de microscopía electrónica de barrido para observar la presencia de cristales de NaCl, así como la interfase entre las sales y la mezcla asfáltica en fragmentos de algunas probetas utilizadas en la prueba de susceptibilidad a la humedad.

3.7 Análisis estadístico de los resultados

De acuerdo a Montgomery y Runger (2003), muchas aplicaciones de análisis de regresión involucran situaciones en las cuales hay más de una variable; un modelo de regresión de este tipo es llamado modelo de regresión múltiple. Ocasionalmente se requiere incorporar variables categóricas o cualitativas en un modelo de regresión en el cual existen los niveles de los factores.

Por otra parte, muchos experimentos de uno o más factores requieren que más de dos niveles del factor sean considerados, para esto el análisis de varianza (comúnmente abreviado como ANOVA) puede ser utilizado. Al usar experimentos diseñados, los ingenieros pueden determinar cuál grupo de variables de un proceso tiene la más grande influencia sobre el proceso desarrollado.

El ANOVA parte de un análisis de regresión donde se tiene un número total de observaciones bajo ciertos tratamientos. En el análisis se cuenta con una hipótesis nula y si está es verdad, cambiar los niveles del factor o los factores, estos no tienen efecto en la media de las respuestas. La prueba de hipótesis particiona la variabilidad en los datos de la muestra en dos partes a los componentes. Así, dicha prueba se basa en una comparación de dos estimaciones independientes de la varianza de la población.

Los resultados fueron analizados estadísticamente a través del análisis de varianza, a través de la herramienta Modelo Lineal General (M.L.G.) del software estadístico Minitab 16. En los resultados del análisis, el valor P es la probabilidad de que la prueba estadística se enfrentará a un valor que sea al menos tan extremo como el valor observado de la estadística cuando la hipótesis nula es verdadera. Por lo tanto, un valor P transmite mucha información sobre el peso de la evidencia en contra de la hipótesis nula, de otro modo, es el nivel mínimo de significancia que daría lugar a la desestimación de la hipótesis nula con los datos dados.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Muestreo en Yucatán

De información recopilada de estaciones meteorológicas automáticas de la costa de Yucatán, propiedad de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV), las cuales se muestran en la Figura 23, se obtuvieron los cambios de H.R. en un día tomado al azar, siendo este el 7 de Agosto de 2011, y son mostrados en la Figura 24.

Las coordenadas de localización para cada una de las estaciones son las siguientes:

- Celestún: 20° 51.517'N, 90° 24.017'O
- Sisal: 21° 9.818'N, 90° 2.848'O
- Chelem: 21° 15.856'N, 89° 44.499'O
- Telchac Puerto: 21° 20.452'N, 89° 18.286'O
- Dzilam de Bravo: 21° 23.550'N, 88° 53.633'O
- Río Lagartos: 21° 34.300'N, 88° 8.633'O



Figura 23. Localización de las estaciones meteorológicas automáticas; la terminación CA son para las de la CONAGUA y la terminación CV son para las del CINVESTAV. (Fuente: Google earth, 2014)

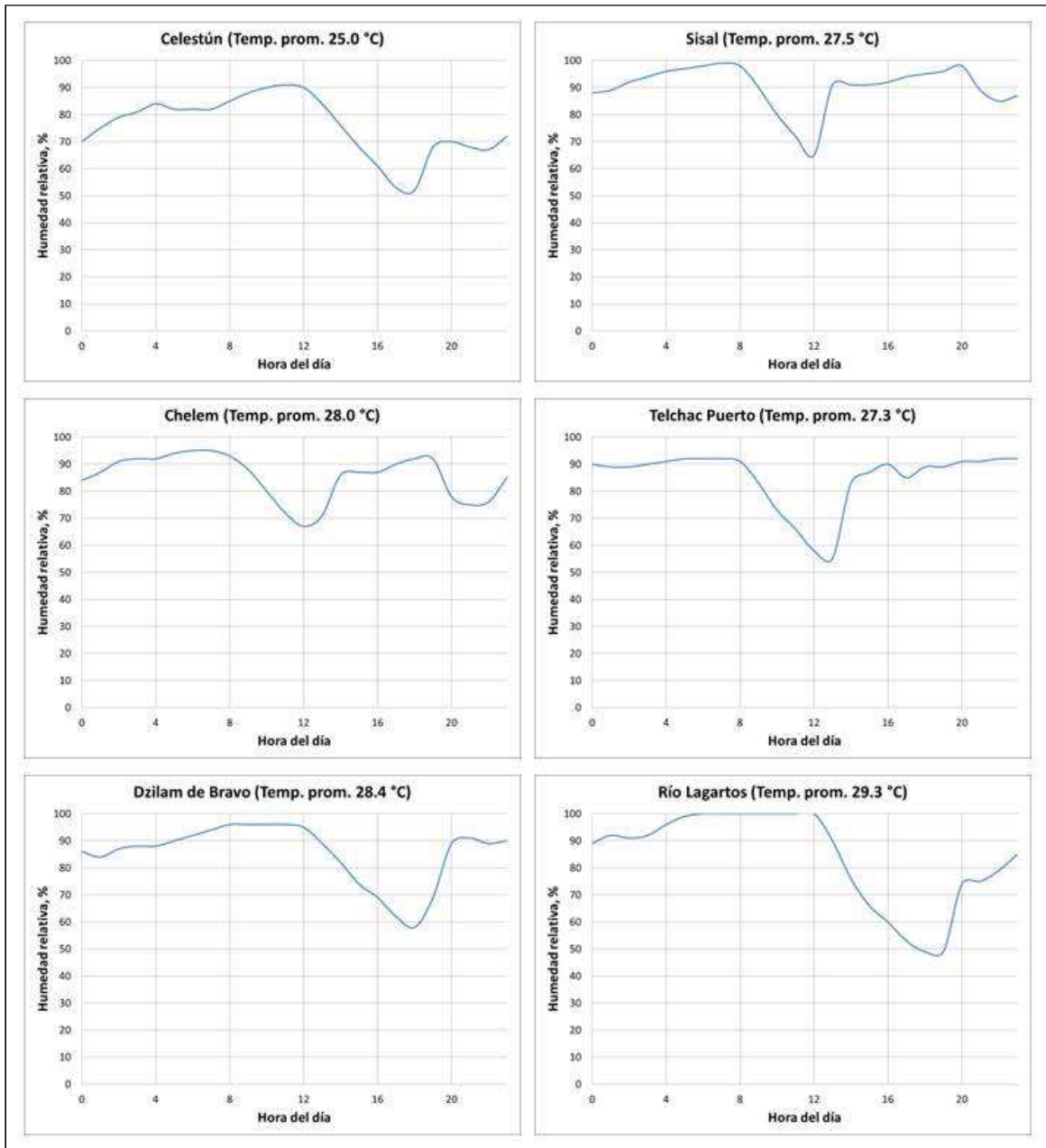


Figura 24. Cambios de H.R. a lo largo del día de seis localidades costeras.

En general se tiene que dependiendo de la región de la costa en la cual se encuentre la estación, las máximas H.R. ocurren entre las 4 y 8 horas o entre las 8 y 12 horas, y las mínimas H.R. ocurren entre las 10 y 14 horas o entre las 16 y 20 horas. Por otra parte y haciendo uso de la misma información estadística, se tiene que la H.R. mínima y máxima promedio mensual en cada uno de los años con los que se contaba información, son las mostradas en la Tabla 6.

Tabla 6. H.R. mínima y máxima promedio mensual en cada uno de los años para distintas localidades.

	H.R.mínima / H.R.máxima, %				
	2008	2009	2010	2011	2012
Celestún	31 / 100	31 / 100	36 / 100	20 / 99	24 / 93
Sisal	43 / 98	29 / 98	33 / 100	29 / 100	35 / 100
Chelem	31 / 96	28 / 96	35 / 100	33 / 97	37 / 98
Telchac Puerto	30 / 100	29 / 100	32 / 99	31 / 100	34 / 96
Dzilam de Bravo	28 / 98	23 / 98	28 / 98	25 / 98	33 / 98
Río Lagartos	41 / 100	44 / 100	29 / 100	26 / 100	46 / 100

Después de realizar un recorrido por las carreteras costeras de Yucatán, los puntos importantes en los cuales se tomaron muestras de agua o núcleos de concreto asfáltico son los mostrados en la Tabla 7. Como se ha mencionado anteriormente, las principales fallas encontradas en las carreteras fueron: el desprendimiento de la película de asfalto del agregado, el desprendimiento de agregados, agrietamientos y baches.

Tabla 7. Puntos muestreados en Yucatán con su tipo de muestra.

Punto No	Carretera	Referencia	Terminación obra	Muestreo
1	Valladolid-Río Lagartos	PSV Las Coloradas	Julio-2012	Agua de la ría
2	Telchac Puerto-Dzilam de Bravo	San Crisanto	Octubre-2012	Agua de mar
3	Mérida-Progreso	Chelem	Noviembre-2006	Agua de laguna y núcleo
4	Progreso-Telchac Puerto	Chicxulub Puerto	Abril-2002	Núcleo

La localización de dichos puntos sobre las carreteras se muestran en la Figura 25, y sus coordenadas son las siguientes:

- Punto No 1: 21° 35.608'N, 88° 3.365'O
- Punto No 2: 21° 20.647'N, 89° 14.676'O
- Punto No 3: 21° 16.093'N, 89° 42.122'O
- Punto No 4: 21° 17.635'N, 89° 35.135'O



Figura 25. Localización de los puntos muestreados. (Fuente: Google earth, 2014)

4.2 Muestras de agua

Los resultados de las muestras de agua se presentan en la Tabla 8. Adicionalmente, la muestra de agua con sal natural fue una solución preparada con 3.5% de NaCl con granos de sal de una laguna de evaporación de la costa yucateca. La muestra de agua con sal comercial fue una solución preparada a la misma concentración, pero en este caso se utilizó la sal de grano o sal común comercializada y libre de procesos químicos, y que fue la usada en la experimentación de la presente investigación.

Tabla 8. Resultados del análisis de las muestras de agua.

Parámetro	Unidad	Muestra de agua del Punto No 1	Muestra de agua del Punto No 2	Muestra de agua del Punto No 3	Muestra de agua con sal natural	Muestra de agua con sal comercial
Cloruros	mg/L	20,121.42	17,834.89	21,036.03	18,292.20	18,292.20
Sodio	mg/L	13,002.60	12,996.90	13,820.40	12,912.10	11,430.00
Sulfatos	mg/L	2,483.83	2,721.74	3,483.06	174.95	163.20
Magnesio	mg/L	1,275.00	1,215.00	1,435.00	82.80	76.30
Calcio	mg/L	569.00	560.10	690.30	62.48	61.38
Suma anteriores	mg/L	37,451.85	35,328.63	40,464.79	31,524.53	30,023.08
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	41,644.00	45,388.00	45,766.00	33,936.00	34,280.00

De este modo se observa que la concentración de sales, entendida como los sólidos disueltos totales, varía aproximadamente entre 41,000 mg/L y 46,000 mg/L, lo que equivaldría a 4.1% y 4.6% de concentración de sales. Así, se tiene que al preparar las soluciones de NaCl con las sales de grano, estas pierden en gran parte los sulfatos, el magnesio y el calcio, sin embargo en las cinco muestras los principales componentes son el cloruro y el sodio; y cuyo efecto como NaCl sobre las M.A.C. es el objetivo de esta investigación.

Se considera válido hacer uso de la sal común o sal de grano de Yucatán para reproducir el efecto del agua salada proveniente de los distintos cuerpos de agua propios de la costa: dicha sal se encuentra libre de todo proceso químico, incluido el lavado.

4.3 Absorción atómica de los núcleos

Considerando que hay NaCl en los núcleos de las muestras 3 y 4 de la Tabla 7, se cuantificó el Na⁺ para después estimar el NaCl. Previo a obtener las lecturas para el Na⁺ en la muestra, se realizaron curvas de calibración de concentración de Na⁺ contra su absorbancia usando una solución estándar de Na⁺. Para esto se utilizó una lámpara de cátodo hueco para Na⁺ y con las

siguientes condiciones en el equipo: una longitud de onda de 589.0 nm, un slit de 0.2 nm y una flama de aire-acetileno.

El análisis fue realizado en cada una de las tres secciones de los núcleos y para esto fue necesario triturar y moler los fragmentos de mezcla asfáltica para que el objeto de análisis fuese el polvo resultado de dichos procesos. En cada sección se cuantificó el Na⁺ por triplicado.

Así, para cada réplica se calcinó 1.00 ± 0.05 g de la muestra de polvo en un crisol a 400 °C por 1.25 ± 0.25 horas. Posteriormente, las cenizas fueron vaciadas a un vaso de precipitados y el crisol fue lavado con 10 mL de ácido clorhídrico recuperándolo en el vaso. Seguido a esto el vaso es tapado con un vidrio de reloj y se procede a la digestión sobre una parrilla por una hora a 60-80 °C; después de dejarlo enfriar se procede al lavado del vidrio de reloj y del vaso con agua destilada, se filtran con un papel Whatman No 1 y se recupera en un matraz aforado de 100 mL. Finalmente, dicho residuo almacenado en el matraz aforado es del que se obtuvo su absorbancia para luego compararla con las curvas de calibración y cuantificar su concentración de Na⁺.

Una vez obtenida la cantidad de Na⁺, se utilizó estequiometria considerando las masas atómicas, m_a (Na = 22.99 g/mol, Cl = 35.45 g/mol) para estimar las concentraciones de NaCl con la siguiente fórmula:

$$[NaCl] = \frac{[Na]}{\frac{m_a Na}{m_a Na + m_a Cl}}$$

Donde:

$[NaCl]$ = concentración de NaCl, mg NaCl / kg muestra

$[Na]$ = concentración de Na, mg Na / kg muestra

$m_a Na$ = masa atómica del Na, g/mol

$m_a Cl$ = masa atómica del Cl, g/mol

Los resultados se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados del análisis de los núcleos para estimar las concentraciones de NaCl.

Referencia de muestreo	Sección de la probeta	Réplica	Concentración de Na, mg Na / kg muestra	Promedio de conc. de Na, mg Na / kg muestra	Concentración de NaCl, mg NaCl / kg muestra
Chicxulub Puerto	Superior	1	168.8	91.3	232.1
		2	54.4		
		3	50.8		
	Intermedia	1	113.4	128.9	327.7
		2	*		
		3	144.5		
	Inferior	1	395.7	227.5	578.3
		2	194.6		
		3	92.1		
Chelem	Superior	1	210.9	144.9	368.3
		2	74.8		
		3	149.0		
	Intermedia	1	325.6	381.8	970.5
		2	509.6		
		3	310.3		
	Inferior	1	261.5	540.4	1,373.7
		2	715.4		
		3	644.4		

* Notas: - no pudo ser obtenida la segunda réplica por falta de muestra.

Cabe mencionar que en este caso, se considera que el Na⁺ se encuentra solamente en el NaCl al realizar la estimación, sin embargo, el sodio cuantificado es debido también a otros compuestos que están presentes en las muestras.

Se tiene que el núcleo con mayores concentraciones de NaCl fue la que ha tenido un menor tiempo de exposición a las sales. Así mismo, se observa que en ambos núcleos la concentración de NaCl aumenta con la profundidad desde la superficie.

La menor concentración de sales podría deberse al paso de los vehículos y a las condiciones ambientales en la parte superior, y por otra parte los valores más altos podría deberse a que en dicho análisis la muestra tuviese restos de la base hidráulica la cual posiblemente acumula una mayor cantidad de sales. Dado lo anterior, podría representar un valor más significativo los de la parte intermedia del núcleo.

4.4 Microscopía electrónica de barrido de los núcleos

Las micrografías de SEM fueron obtenidas en el microscopio marca Hitachi a través de electrones electro dispersos. Las muestras fueron fragmentos de los núcleos observados sin preparación y se colocaron sobre un portamuestras adheridos a cinta con carbón. La observación se realizó a 15 kV y en un intervalo de magnificaciones de 300x a 8000x.

La Figura 26 es una micrografía SEM obtenida del núcleo de Chelem.

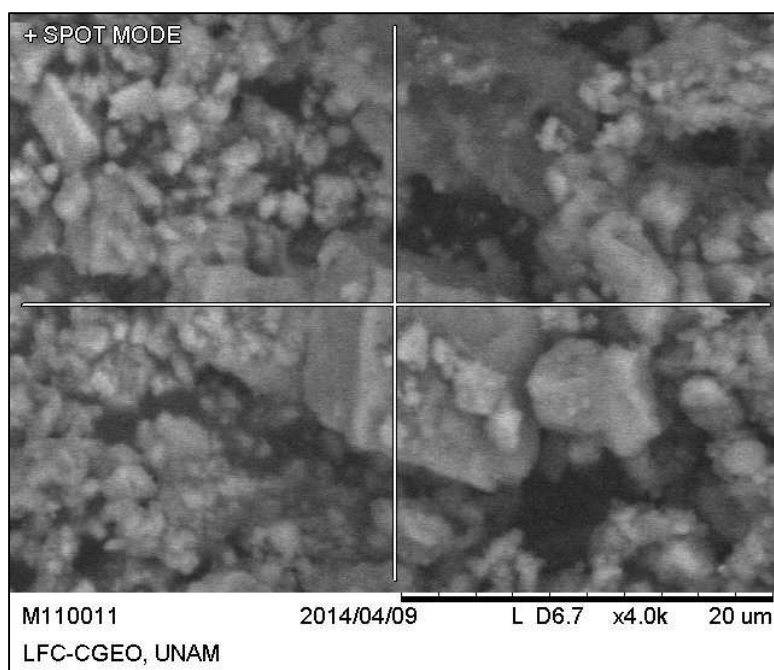


Figura 26. Micrografía SEM donde se observa un cristal cúbico de NaCl.

Lombardo et al. (2004) establecieron que en el campo se espera la presencia de abundantes cristales de tamaño nanométrico y que dan lugar a una alta presión de cristalización produciendo un daño significativo. Debido a la resolución del microscopio no se pudieron observar cristales de ese tamaño, sin embargo en la presente investigación se encontraron cristales mucho más grandes, del orden de micrones; esto indica la presencia de estas fases cristalinas que pueden existir en tamaño nanométrico y que conducen a la aparición del daño, como lo plantea Lombardo. Dado que las sales en el campo se concentran generalmente en o cerca de la superficie del objeto, la cristalización se puede facilitar, como consecuencia de los ciclos de humedad diarias. En ambientes donde los grandes cambios de humedad relativa son comunes, la cristalización puede ocurrir rápidamente y producir un gran daño, tal es el caso de Yucatán en donde los ciclos de H.R. van aproximadamente del 40 al 100%.

4.5 Calidad de agregados pétreos

Conforme a lo establece el Protocolo A.M.A.A.C. PA-MA 01 (2013), al agregado le fueron realizadas una serie de pruebas para revisar si cumple o no con las características físicas básicas. Los resultados son mostrados en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados de los requisitos de calidad del agregado pétreo.

Característica	Norma	Especificación	Resultado
Desgaste Los Ángeles, %	ASTM C131 (2006)	25 máx	29
Desgaste MicroDeval, %	ASTM D6928 (2010)	15 máx	22
Intemperismo acelerado, %	ASTM C88 (2013)	15 máx	4
Caras fracturadas (2 o más), %	ASTM D5821 (2013)	90 mín	74
Partículas planas y alargadas, %	ASTM D4791 (2010)	10 máx	1
Adherencia con el asfalto, % cubrimiento	A.M.A.A.C. RA-08 (2010)	90 mín	85/80*
Equivalente de arena, %	ASTM D2419 (2009)	55 mín	27
Angularidad, %	AASHTO T304 (2011)	40 mín	60
Azul de metileno, ml/g	A.M.A.A.C. RA-05 (2010)	12 máx	16

* Nota: el primer dato corresponde al PG 64-22 y el segundo al PG 70-22.

Puede observarse que no todas los requisitos de calidad se cumplen, sin embargo muchos de estos resultados han sido atribuidos comúnmente en Yucatán a la naturaleza del agregado y a la geología del estado. El caso de caras fracturadas puede ser atribuido a un incorrecto procedimiento de trituración y el del equivalente de arena podría ser un reflejo de la granulometría seleccionada al realizar la prueba.

4.6 Calidad de cementos asfálticos

De acuerdo al Protocolo A.M.A.A.C. PA-MA 01 (2013) y conforme a la especificación ASTM D6373 (2013), los cementos asfálticos fueron caracterizados y los resultados se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Resultados de la clasificación grado PG de los cementos asfálticos.

Propiedad	Norma	Cemento asfáltico			
		PG 64-22		PG 70-22	
		Obtenido	Requisito	Obtenido	Requisito
Condición Original					
Punto de inflamación, °C, mínimo	ASTM D92 (2012)	315	230	328	230
Corte dinámico, G*/sinδ (kPa) @ temperatura, mínimo	ASTM D7175 (2008)	1.12	1.00	1.50	1.00
Condición RTFO (ASTM D2872, 2012)					
Pérdida de masa, %, máxima	-	0.48	1.00	0.38	1.00
Corte dinámico, G*/sinδ (kPa) @ temperatura, mínimo	ASTM D7175 (2008)	5.05	2.20	6.15	2.20
Condición PAV (ASTM D6521, 2013)					
Corte dinámico, G*·sinδ (kPa), máximo	ASTM D7175 (2008)	1680	5000 @ 25 °C	1878	5000 @ 28 °C
Rigidez, S (MPa), máximo @ valor m < 0.300	ASTM D6648 (2008)	97.30	300 @ -12 °C	109.00	300 @ -12 °C

De este modo se confirma la clasificación antes comentada de los cementos asfálticos a utilizar siendo los más empleados en Yucatán, a saber, el cemento asfáltico natural AC-20 (o PG 64-22) y el cemento asfáltico modificado con copolímero SBS, en este caso con el 3% (PG 70-22). Para el caso particular

de la investigación, el interés recae en ver la diferencia entre el comportamiento de cementos asfálticos con y sin copolímero.

El Protocolo A.M.A.A.C. PA-MA 01 (2013) establece las temperaturas de mezclado y de compactación de acuerdo a un rango de viscosidad determinado con un viscosímetro rotacional conforme a lo establece la norma ASTM D4402M (2013). Los rangos de viscosidad y dichas temperaturas son indicadas en la Tabla 12, esto para ambos cementos.

Tabla 12. Temperaturas de mezclado y compactación.

Característica	Rango de viscosidad, Pa.s	PG 64-22	PG 70-22
Temperatura de mezclado, °C	0.15 a 0.19	160 - 167	180 - 186
Temperatura de compactación, °C	0.25 a 0.31	148 - 154	168 - 173

4.7 Nivel de tránsito para el diseño de mezcla

Como se mencionó anteriormente, para el diseño de la mezcla asfáltica de alto desempeño se utilizó el Protocolo A.M.A.A.C. PA-MA 01 (2013) el cual establece 4 niveles de diseño, sin embargo independiente del nivel del mismo, la presente investigación se centra en la prueba de susceptibilidad a la humedad que se encuentra en el Nivel 1 de dicha metodología.

El nivel de diseño fue seleccionado en base al nivel de tránsito y de acuerdo a sus ejes equivalentes. Para tal selección se consideró una serie de carreteras costeras de Yucatán y sus datos viales, se estimaron con los factores de daño del Asphalt Institute (1991), considerando un período de diseño de 20 años y una tasa de crecimiento de 2.5%. Los tramos y sus ejes equivalentes son mostrados en la Tabla 13, donde se indican también los 4 niveles de diseño y sus rangos de nivel de tránsito.

Tabla 13. Ejes equivalentes en las carreteras costeras de Yucatán y su nivel de diseño de acuerdo al Protocolo A.M.A.A.C.

Estaciones por obtener sus ejes equivalentes				Ejes equivalentes en el Carril de Diseño	Designación del nivel de tránsito
Punto No	Tramo No	Carretera	Estación		
1	4	Conkal-Puerto Chicxulub	Puerto Chicxulub	1,281,956	Nivel I
2	7	Hunucmá-Sisal	Sisal	944,048	Tránsito bajo menor a 300,000 EE
3	8	Libramiento de Progreso	T.C. Mérida-Progreso	1,178,092	
4	8	Libramiento de Progreso	Yucalpetén	1,186,260	
5	9	Mérida-Celestún	Celestún	1,694,784	Nivel II Tránsito medio de 300,000 a 3,000,000 EE
6	10	Mérida-Dzilam de Bravo	Dzilam de Bravo	1,397,676	
7	11	Mérida-Progreso	Progreso	31,425,676	
8	38	Progreso-Telchac Puerto	Progreso	6,323,938	
9	38	Progreso-Telchac Puerto	Chicxulub Puerto	4,206,985	Nivel III Tránsito alto de 3,000,000 a 30,000,000 EE
10	38	Progreso-Telchac Puerto	Telchac Puerto	1,340,767	
11	41	Ramal a San Felipe	San Felipe	1,023,837	
12	47	Telchac Puerto-Dzilam de Bravo	Telchac Puerto	590,501	
13	47	Telchac Puerto-Dzilam de Bravo	Chabihau	290,054	
14	47	Telchac Puerto-Dzilam de Bravo	Santa Clara	161,544	Nivel IV Tránsito muy alto más de 30,000,000
15	47	Telchac Puerto-Dzilam de Bravo	Dzilam de Bravo	158,029	
16	56	Progreso-Celestún	T. C. Mérida-Progreso	5,540,403	
17	56	Progreso-Celestún	Yucalpetén	4,963,182	

El 95% de los tramos analizados son cubiertos por el Nivel 3, considerado con aplicaciones típicas de tránsitos medios a altos en calles de ciudades, caminos estatales e interestatales.

4.8 Diseño de mezcla asfáltica de granulometría densa

El tamaño nominal (T.N.) de la muestra, considerado como la malla inmediata superior a la primera malla que retiene más del 10% de las partículas del agregado, en este caso corresponde a un T. N. de ¾" o 19 mm.

La granulometría del agregado correspondió a la que presentaba el banco al combinar el agregado grueso, el sello y los finos. La granulometría y los límites establecidos por el Protocolo A.M.A.A.C. PA-MA 01 (2013) de acuerdo al T. N. de 19 mm son mostrados en la Tabla 14 y en la Figura 27.

Tabla 14. Granulometría empleada con sus respectivos puntos de control.

Designación malla	Abertura, mm	Abertura^{0.45}, mm	Mínimo, %	Máximo, %	Gradación, %
1"	25	4.26	100	100	100
¾"	19	3.76	90	100	100
½"	12.5	3.12		90	90
3/8"	9.5	2.75			84
N° 4	4.75	2.02			62
N° 8	2.36	1.47	23	49	38
N° 16	1.18	1.08			23
N° 30	0.6	0.79			15
N° 50	0.3	0.58			10
N° 100	0.15	0.43			7
N° 200	0.075	0.31	2	8	4

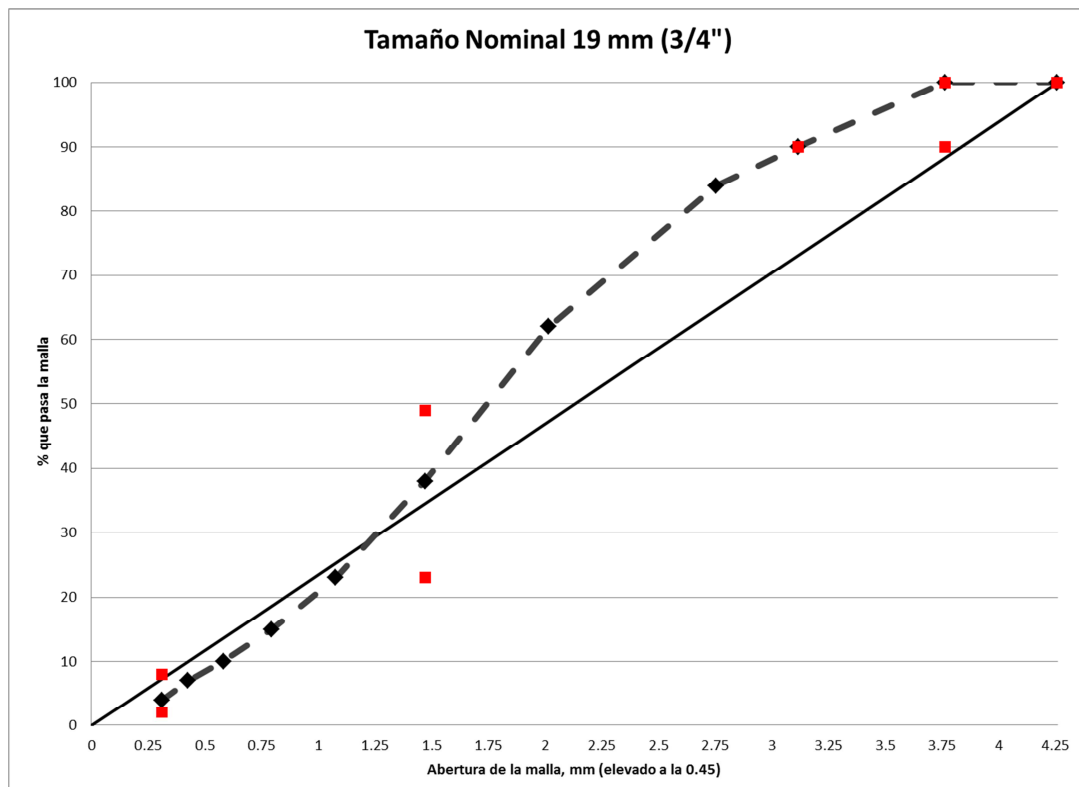


Figura 27. Curva granulométrica empleada de la mezcla de agregados.

El esfuerzo requerido para la compactación giratoria de acuerdo al tránsito establecido, son los siguientes parámetros:

- N_{ini} , número de giros iniciales: 8
- N_{dis} , número de giros de diseño: 100
- N_{max} , número de giros al final de la vida útil: 160

Para el cálculo del contenido óptimo de asfalto (P_b), es necesario considerar un contenido de asfalto inicial (P_{bi}) que en este caso y con la información recopilada del Centro S.C.T. Yucatán, fue estimado empleando un P_b de 7%. Adicionalmente, fue necesario contar con las gravedades específicas del agregado y del asfalto, tomando en cuenta la granulometría empleada en la mezcla.

- G_{sb} , gravedad específica bruta (ASTM C127, 2012; ASTM C128, 2012): 2.281

- G_{sa} , gravedad específica aparente (ASTM C127, 2012; ASTM C128, 2012): 2.599
- G_b , gravedad específica del asfalto (ASTM D70, 2009): 1.030
- Porcentaje de absorción del agregado (ASTM C127, 2012; ASTM C128, 2012): 5.23%

De este modo, y de acuerdo al Superpave mix design, SP-2 (2001), el Pbi calculado es de 8.3%. En el Anexo C se encuentran las fórmulas necesarias para la obtención del Pbi .

El siguiente paso fue calcular el G_{mm} o gravedad específica máxima teórica de la mezcla asfáltica conforme a la norma ASTM D2041M (2011), los resultados obtenidos fueron:

- Para el PG 64-22: 2.240
- Para el PG 70-22: 2.223

Se prosiguió a realizar las mezclas y la compactación de probetas de 15.25 cm (6") de diámetro de acuerdo lo establecido en el Protocolo A.M.A.A.C. PA-MA 01 (2013), esto con el fin de obtener su G_{mb} o gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada conforme a la norma ASTM D2726 (2013). Los resultados obtenidos fueron:

- Para el PG 64-22: 2.149
- Para el PG 70-22: 2.134

Con el G_{mm} y el G_{mb} se procede a realizar los cálculos necesarios para obtener el porcentaje de vacíos de aire (V_a). El contenido de asfalto óptimo será aquel en el cual se obtenga un V_a del 4%. En este caso, al calcular el porcentaje de V_a , resultó 4% para ambos cementos, por lo que el contenido de asfalto óptimo es de 8.3%.

A continuación se procedió a calcular algunos parámetros de la mezcla que deben cumplirse para el nivel de tránsito en el cual se está diseñando. Los parámetros y sus resultados se muestran en la Tabla 15. En el Anexo D se encuentran las fórmulas necesarias para la obtención de dichos parámetros y otros utilizados anteriormente.

Tabla 15. Requisitos y parámetros volumétricos de la mezcla.

Parámetro	Símbolo	Requisito	PG 64-22	PG 70-22
Gravedad específica efectiva	Gse	$Gsb < Gse < Gsa$	2.506	2.484
Contenido de asfalto efectivo, %	Pbe	NA*	4.58	4.92
Contenido de asfalto absorbido, %	Pba	NA*	4.05	3.69
Contenido de vacíos de aire, %	Va	4	4	4
Vacíos en el agregado mineral, %	VAM	mínimo 13	13.6	14.2
Vacíos llenos con asfalto, %	VFA	65 - 75	70.3	71.6
Relación filler-asfalto	Dp	0.6 - 1.2	0.87	0.81
Densidad requerida, %	% Gmm @ Nini	< 89	85.1	85.3

* Nota: no aplica requisito.

De este modo se concluye que el diseño de mezcla para ambos cementos asfálticos es adecuado con un contenido de asfalto óptimo de 8.3% pues cumple con los parámetros de diseño de acuerdo al Protocolo A.M.A.A.C. PA-MA 01 (2013).

4.9 Afectación de NaCl a agregados

Como se mencionó anteriormente, se desarrolló la prueba de desgaste MicroDeval conforme a la norma ASTM D6928 (2010), y también fue desarrollada con agua a una concentración de 40% de NaCl. La prueba es un indicador que determina la pérdida por abrasión del agregado en presencia de agua y una carga abrasiva.

Aunque si bien, el agregado había demostrado no ser resistente a la abrasión en seco ni en húmedo, al desarrollar la prueba con sales se obtuvo un resultado del 21%, es decir, un 1% menos que en el otro. De este modo, se

concluye que la sal no tiene algún efecto significativo sobre los agregados al analizar su susceptibilidad a la abrasión en húmedo.

Otra prueba desarrollada con una modificación en su procedimiento, fue la de adherencia por fricción, la cual es una recomendación de la A.M.A.A.C.; los resultados son mostrados en la Tabla 16.

Tabla 16. Porcentajes de cubrimiento de asfalto.

	PG 64-22	PG 70-22
0% NaCl	85	80
4% NaCl	81	81

De este modo tenemos que la adherencia solamente es afectada en el PG 64-22 al momento de realizar la prueba con una concentración de sales, aunque el decremento de cubrimiento es pequeño.

4.10 Afectación de NaCl a cementos asfálticos

De acuerdo a los porcentajes de sal por peso de asfalto utilizados por Decheng et al. (2010) y Chowdhury et al. (2013) en sus experimentos, a los cementos asfálticos se les adicionaron el 2%, 6% y 10% de NaCl por peso de asfalto, y como referencia se tienen los cementos al 0% de NaCl. Las pruebas realizadas fueron las establecidas en las normas mexicanas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes para el aseguramiento de la calidad de los materiales, N-CMT-4-05-001 (2006) Calidad de materiales asfálticos y N-CMT-4-05-002 (2006) Calidad de materiales asfálticos modificados, además de las establecidas en la norma ASTM D6373 (2013) anteriormente empleada. Por esto, la sal tuvo que ser añadida en polvo, siendo usada la que pasaba la malla No 100. La Tabla 17 muestra los resultados para las pruebas de la normativa mexicana y la Tabla 18 los resultados de la reología.

Tabla 17. Resultados de las características del cemento asfáltico a las distintas concentraciones.

Característica	PG 64-22 / 0% NaCl	PG 64-22 / 2% NaCl	PG 64-22 / 6% NaCl	PG 64-22 / 10% NaCl
Viscosidad Saybolt Furol 135 °C, Seg.	141	148	166	171
Penetración 100 gr. 5 seg. 25 °C, 10 ⁻¹ mm	86	84	82	77
Punto de Reblandecimiento, °C	49	49	50	48
Punto de Inflamación, °C	315	*	326	*
Punto de Combustión, °C	360	*	360	*
Ductilidad a 25 °C, cm, después de RTFO	48	49	50	48
Característica	PG 70-22 / 0% NaCl	PG 70-22 / 2% NaCl	PG 70-22 / 6% NaCl	PG 70-22 / 10% NaCl
Viscosidad Saybolt Furol 135 °C, Seg.	269	288	286	312
Penetración 100 gr. 5 seg. 25 °C, 10 ⁻¹ mm	63	65	63	62
Penetración 200 gr. 60 seg. 4 °C, 10 ⁻¹ mm	36	30	30	31
Punto de Reblandecimiento, °C	55	56	55	55
Resilencia a 25 °C, %	21	22	22	21
Recuperación elástica por torsión 25 °C, %	40	42	42	41
Recuperación elast. por duct. 25 °C min. %, después de RTFO	68	66	71	71
Ductilidad a 4 °C, cm, después de RTFO	12	13	10	14
Punto de Inflamación, °C	328	*	334	*
Punto de Combustión, °C	364	*	362	*

* Nota: la prueba de inflamación y combustión se desarrolló sólo para el asfalto con concentración de 6% NaCl para determinar si existía algún cambio.

La sal de NaCl tiene efectos en las propiedades de su viscosidad Saybolt Furol incrementándola a una mayor concentración y para ambos cementos. En general la penetración se ve disminuida aunque resulta ser independiente de la concentración aplicada; y en menor parte el punto de inflamación disminuye al agregársele la sal.

Chowdhury et al. (2013) encontraron que el NaCl juega un papel importante dado que el valor de la penetración aumenta, contrario al resultado antes expuesto. Similarmente y con un resultado contrario, fue el punto de inflamación donde ellos observaron que disminuía. En lo que respecta al punto de

reblandecimiento y la ductilidad del cemento determinaron que disminuyen con el aumento de sal, en tanto que en los resultados de esta investigación no presentan cambios significantes.

Tabla 18. Resultados de las propiedades reológicas del cemento asfáltico a las distintas concentraciones.

Característica	PG 64-22 / 0% NaCl	PG 64-22 / 2% NaCl	PG 64-22 / 6% NaCl	PG 64-22 / 10% NaCl
Condición Original				
Módulo de corte G^* , Pa @ 64 °C	1,112	1,122	1,201	1,209
Ángulo de fase δ , ° @ 64 °C	84.0	84.0	84.0	84.0
Condición RTFO (ASTM D2872, 2012)				
Módulo de corte G^* , Pa @ 64 °C	2,353	2,272	2,338	2,371
Ángulo de fase δ , ° @ 64 °C	78.1	78.2	78.0	78.0
Condición PAV (ASTM D6521, 2013)				
Módulo de corte G^* , Pa @ 25 °C	2.63E+06	3.81E+06	3.42E+06	3.19E+06
Ángulo de fase δ , ° @ 25 °C	39.7	38.6	39.6	38.8
Rigidez, Mpa @ -12 °C	97.3	104.0	107.0	106.0
Característica	PG 70-22 / 0% NaCl	PG 70-22 / 2% NaCl	PG 70-22 / 6% NaCl	PG 70-22 / 10% NaCl
Condición Original				
Módulo de corte G^* , Pa @ 70 °C	1,467	1,155	1,326	1,306
Ángulo de fase δ , ° @ 70 °C	78.8	79.9	79.5	78.7
Condición RTFO (ASTM D2872, 2012)				
Módulo de corte G^* , Pa @ 70 °C	5,598	5,872	5,672	6,047
Ángulo de fase δ , ° @ 70 °C	65.5	65.1	65.4	65.2
Condición PAV (ASTM D6521, 2013)				
Módulo de corte G^* , Pa @ 28 °C	3.10E+06	3.22E+06	1.76E+06	1.76E+06
Ángulo de fase δ , ° @ 28 °C	37.3	37.0	38.0	38.0
Rigidez, Mpa @ -12 °C	106.0	109.0	108.0	98.2

Puede observarse que al añadir el NaCl a los cementos asfálticos no cambia su visco-elasticidad, comportamiento reflejado en su ángulo de fase δ ; esto analizando cada una de las condiciones de ambos cementos.

A bajas temperaturas el NaCl aumenta la rigidez del PG 64-22 independiente de la concentración. En el PG 70-22, el efecto es contrario sólo para la concentración de 10% de NaCl, para los otros casos la rigidez no tiene un cambio significativo.

Yu et al. (2013) quienes estudiaron asfalto no modificado y modificado con SBS sumergiendo los cementos en diferentes concentraciones de NaCl y en varias duraciones, encontraron que la sal tiene un efecto sobre las propiedades reológicas de los asfaltos no modificados y modificados después de PAV, especialmente en el rendimiento a baja temperatura. Los resultados de cambiar las propiedades a baja temperatura, son los únicos en los que la presente investigación coincide, puesto que la visco-elasticidad no refleja cambio alguno.

4.11 Afectación de NaCl a mezclas asfálticas

Los grupos establecidos en las Tablas 4 y 5, contienen los grupos evaluados. Cada grupo está conformado por un triplicado de probetas de las medidas antes mencionadas. El cálculo de la resistencia a la tensión indirecta (*R.T.I.* o *I.T.S.* por sus siglas en inglés) y de la relación de resistencia a la tensión (*R.R.T.* o *T.S.R.* por sus siglas en inglés) fueron calculadas de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM D4867M (2009). En la Tabla 19 se presentan los resultados de *R.T.I.* Los resultados referentes la primera fase y la segunda fase son presentadas en conjunto. En la Tabla 19 la concentración de 0% NaCl y tiempo de 0 días representan a los grupos no condicionados o secos.

La primera fase consistió en que para ambos cementos asfálticos se realizaron las probetas sin condicionar y en las primeras condicionadas se conservó la concentración de 0% y de 4% de NaCl, y se sometieron a 1, 4, 7 y 14 días de inmersión.

Tabla 19. Resultados de resistencia a la tensión indirecta.

Cemento asfáltico	Concentración, %	Tiempo, días	Resistencia, kPa	Desviación estándar, kPa	Resistencia promedio, kPa
PG 64-22	0	0	602	29	571
PG 64-22	0	0	567		
PG 64-22	0	0	544		
PG 64-22	0	1	469	29	453
PG 64-22	0	1	420		
PG 64-22	0	1	470		
PG 64-22	4	1	441	15	454
PG 64-22	4	1	470		
PG 64-22	4	1	452		
PG 64-22	0	4	427	10	427
PG 64-22	0	4	417		
PG 64-22	0	4	437		
PG 64-22	4	4	384	13	383
PG 64-22	4	4	370		
PG 64-22	4	4	395		
PG 64-22	0	7	345	27	376
PG 64-22	0	7	390		
PG 64-22	0	7	393		
PG 64-22	4	7	380	40	358
PG 64-22	4	7	312		
PG 64-22	4	7	382		
PG 64-22	0	14	363	34	396
PG 64-22	0	14	431		
PG 64-22	0	14	395		
PG 64-22	4	14	437	12	442
PG 64-22	4	14	433		
PG 64-22	4	14	455		
PG 64-22	20	4	420	17	422
PG 64-22	20	4	406		
PG 64-22	20	4	439		
PG 64-22	40	4	426	4	430
PG 64-22	40	4	431		
PG 64-22	40	4	433		

Cemento asfáltico	Concentración, %	Tiempo, días	Resistencia, kPa	Desviación estándar, kPa	Resistencia promedio, kPa
PG 70-22	0	0	671	34	707
PG 70-22	0	0	738		
PG 70-22	0	0	713		
PG 70-22	0	1	468	41	516
PG 70-22	0	1	543		
PG 70-22	0	1	536		
PG 70-22	4	1	472	40	517
PG 70-22	4	1	545		
PG 70-22	4	1	535		
PG 70-22	0	4	574	38	531
PG 70-22	0	4	520		
PG 70-22	0	4	500		
PG 70-22	4	4	524	15	521
PG 70-22	4	4	504		
PG 70-22	4	4	534		
PG 70-22	0	7	604	12	615
PG 70-22	0	7	614		
PG 70-22	0	7	628		
PG 70-22	4	7	586	29	609
PG 70-22	4	7	642		
PG 70-22	4	7	599		
PG 70-22	0	14	496	9	504
PG 70-22	0	14	514		
PG 70-22	0	14	503		
PG 70-22	4	14	591	24	571
PG 70-22	4	14	545		
PG 70-22	4	14	578		
PG 70-22	20	4	631	33	600
PG 70-22	20	4	603		
PG 70-22	20	4	566		
PG 70-22	40	4	619	21	617
PG 70-22	40	4	637		
PG 70-22	40	4	596		

La norma permite una desviación estándar de 55 kPa en los grupos, sean condicionados o no condicionados, por lo que se cumple dicho aspecto en la experimentación ejecutada. A continuación, en las Figuras 28 y 29 se presentan

las gráficas del comportamiento para la primera y la segunda fase en base a las resistencias individuales de los datos anteriores para un mayor entendimiento del comportamiento.

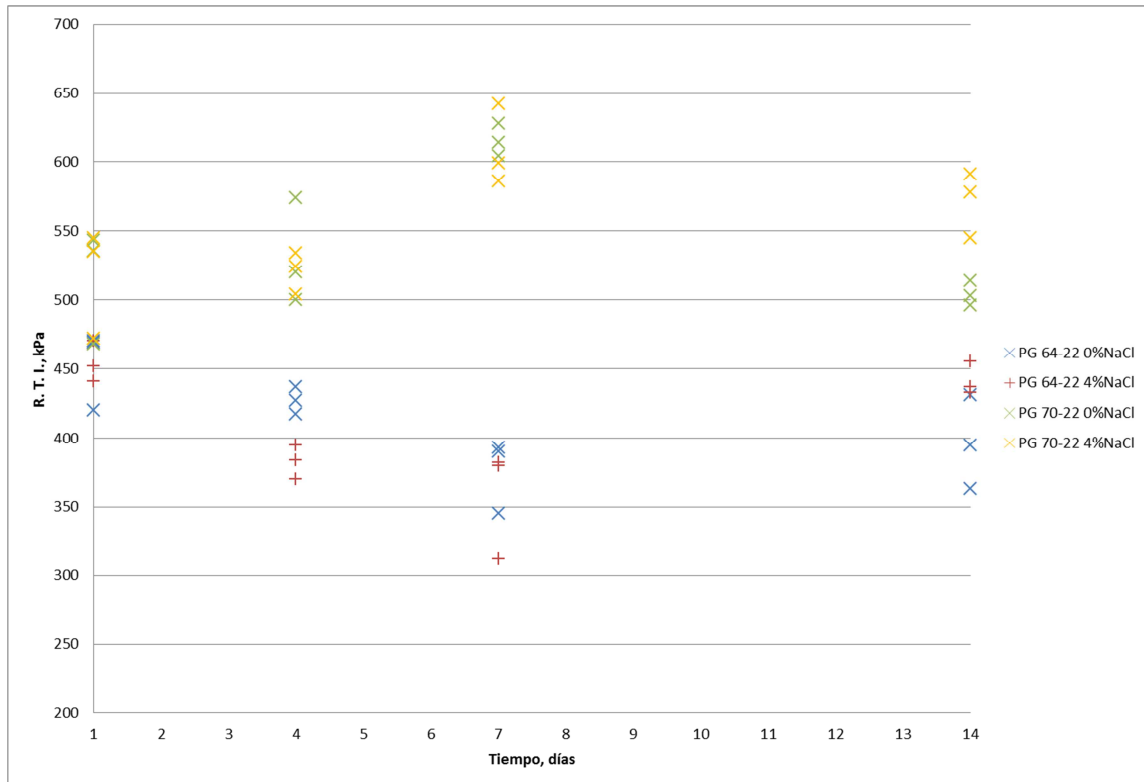


Figura 28. Gráfica de *R.T.I.* para la primera fase.

La resistencia de las probetas del cemento asfáltico modificado con SBS presentan mayores resistencias, lo cual era esperado por su grado PG y como efecto del copolímero. En general se tiene que ambos cementos siguen un mismo comportamiento, independientemente de la concentración del NaCl, dado que si consideramos la desviación de 55 kPa, el conjunto de puntos para un mismo tipo de cemento ya sea que estén afectados por sales o no, se encuentran en un margen de más menos una desviación, o visto de otro modo, la variación entre puntos extremos es de 100 kPa aproximadamente.

Particularmente para el PG 64-22, las resistencias van disminuyendo conforme pasa el tiempo hasta llegar a un mínimo en 7 días y desde esa duración

empieza a incrementar. Para el PG 70-22 y contrario al PG 64-22, las resistencias van incrementando conforme pasa el tiempo hasta llegar a un máximo en 7 días y desde esa duración empezar a disminuir. Aunque para los 14 días pareciera que la *R.T.I.* es mayor para el inmerso en 4% de NaCl que el de 0%, la realidad es que entre los puntos máximos para el PG 64-22 o los mínimos para el PG 70-22, existe apenas o en un valor menor, la separación de una desviación (55 kPa).

Para la segunda fase se decidió llevar a cabo la inmersión a 4 días dado que fue para esta duración cuando se dio una mayor diferencia entre las resistencias de los inmersos en 0% y 4% de NaCl al considerar sus promedios, lo anterior, independiente de la duración a 14 días en donde se desconoce el comportamiento que seguiría a mayores periodos de inmersión. Las concentraciones adicionales a 0% y 4% en esta fase son 20% y 40%.

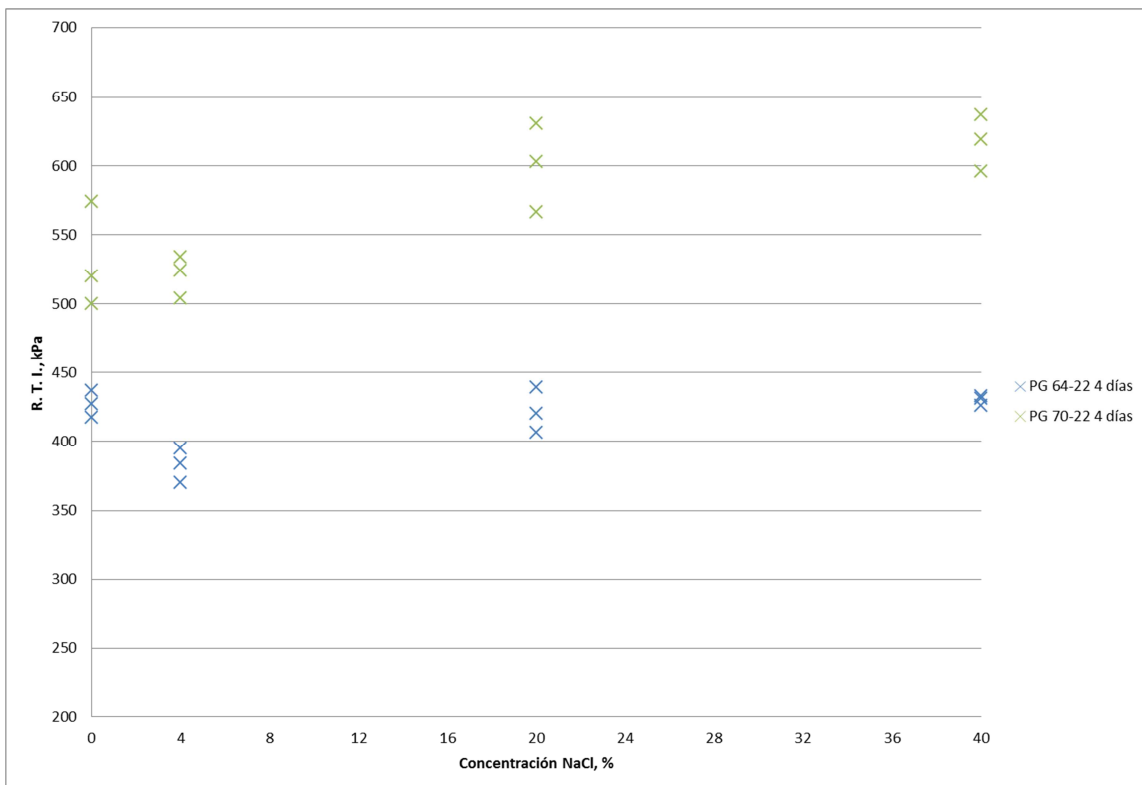


Figura 29. Gráfica de *R.T.I.* para la segunda fase.

Dado el incremento de la concentración de NaCl, el cemento asfáltico modificado con SBS presentó mayores resistencias, comportamiento en general esperado por el mejor comportamiento que le brinda el copolímero al asfalto. En general se tiene que ambos cementos siguen el mismo comportamiento, en el cual disminuyen su resistencia para una concentración de 4% de NaCl y luego se da un incremento al 20% para permanecer casi constante hasta el 40%. La caída de la resistencia es mayor en el PG 64-22, en tanto que la recuperación de la misma es mayor para el PG 70-22, lo anterior dado que uno está modificado con copolímero para mejorar su resistencia.

En la Tabla 20 se presentan los resultados de *R.R.T.* Los resultados referentes a la primera y la segunda fase son presentados en conjunto. En dicha tabla se presentará la información de dos modos; el primero será la *R.R.T.* entre los promedios de los grupos condicionados y los promedios de los grupos no condicionados; el segundo será la *R.R.T.* entre la resistencia de cada probeta condicionada entre el promedio de su respectivo grupo no condicionado, lo anterior de acuerdo al orden en el que están presentados en la tabla anterior; este segundo modo es porque serán los utilizados para el análisis estadístico. Los resultados en extenso de la prueba de susceptibilidad a la humedad se encuentran en el Anexo E.

Tabla 20. Resultados de la relación de resistencia a la tensión.

Cemento asfáltico	Concentración, %	Tiempo, días	Relación de resistencias, % (promedios)	Relación de resistencias, % (individuales)
PG 64-22	0	1	79%	82%
PG 64-22	0	1		74%
PG 64-22	0	1		82%
PG 64-22	4	1	80%	77%
PG 64-22	4	1		82%
PG 64-22	4	1		79%
PG 64-22	0	4	75%	75%
PG 64-22	0	4		73%
PG 64-22	0	4		77%
PG 64-22	4	4	67%	67%
PG 64-22	4	4		65%
PG 64-22	4	4		69%
PG 64-22	0	7	66%	60%
PG 64-22	0	7		68%
PG 64-22	0	7		69%
PG 64-22	4	7	63%	67%
PG 64-22	4	7		55%
PG 64-22	4	7		67%
PG 64-22	0	14	69%	64%
PG 64-22	0	14		75%
PG 64-22	0	14		69%
PG 64-22	4	14	77%	77%
PG 64-22	4	14		76%
PG 64-22	4	14		80%
PG 64-22	20	4	74%	74%
PG 64-22	20	4		71%
PG 64-22	20	4		77%
PG 64-22	40	4	75%	75%
PG 64-22	40	4		75%
PG 64-22	40	4		76%

Cemento asfáltico	Concentración, %	Tiempo, días	Relación de resistencias, % (promedios)	Relación de resistencias, % (individuales)
PG 70-22	0	1	73%	66%
PG 70-22	0	1		77%
PG 70-22	0	1		76%
PG 70-22	4	1	73%	67%
PG 70-22	4	1		77%
PG 70-22	4	1		76%
PG 70-22	0	4	75%	81%
PG 70-22	0	4		74%
PG 70-22	0	4		71%
PG 70-22	4	4	74%	74%
PG 70-22	4	4		71%
PG 70-22	4	4		75%
PG 70-22	0	7	87%	85%
PG 70-22	0	7		87%
PG 70-22	0	7		89%
PG 70-22	4	7	86%	83%
PG 70-22	4	7		91%
PG 70-22	4	7		85%
PG 70-22	0	14	71%	70%
PG 70-22	0	14		73%
PG 70-22	0	14		71%
PG 70-22	4	14	81%	84%
PG 70-22	4	14		77%
PG 70-22	4	14		82%
PG 70-22	20	4	85%	89%
PG 70-22	20	4		85%
PG 70-22	20	4		80%
PG 70-22	40	4	87%	88%
PG 70-22	40	4		90%
PG 70-22	40	4		84%

A continuación, en las Figuras 30 y 31 se presentan las gráficas del comportamiento para la primera y la segunda fase en base a la relación de resistencias individuales de los datos anteriores para un mayor entendimiento del comportamiento.

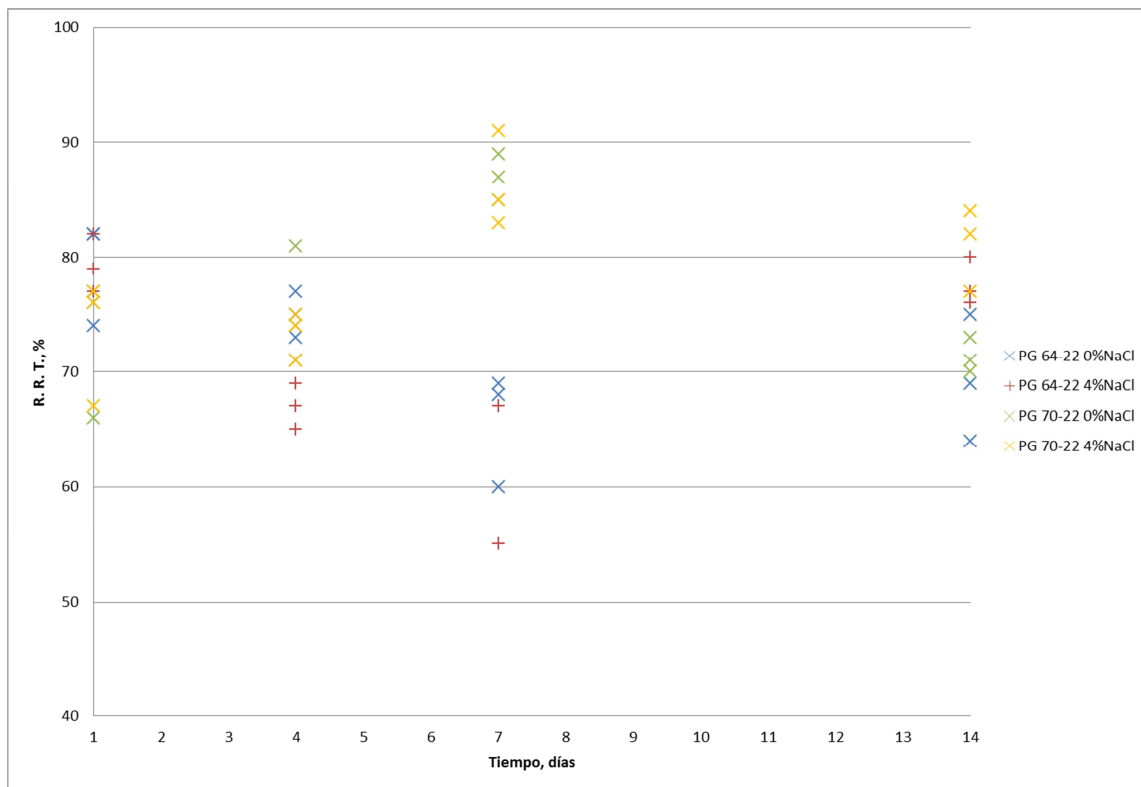


Figura 30. Gráfica de *R.R.T.* para la primera fase.

En este punto cabe recordar que de acuerdo a lo establecido en el Protocolo A.M.A.A.C. PA-MA 01 (2013), una *R.R.T.* de 80% como mínimo, debería ser esperada para prevenir y evitar daños en la susceptibilidad a la humedad. Considerando la prueba original, se tiene que el PG 70-22 es más susceptible a la humedad que el PG 64-22, en donde éste último apenas cumple el requisito. El PG 70-22 cumple con el requisito a los 7 días de inmersión para ambas concentraciones.

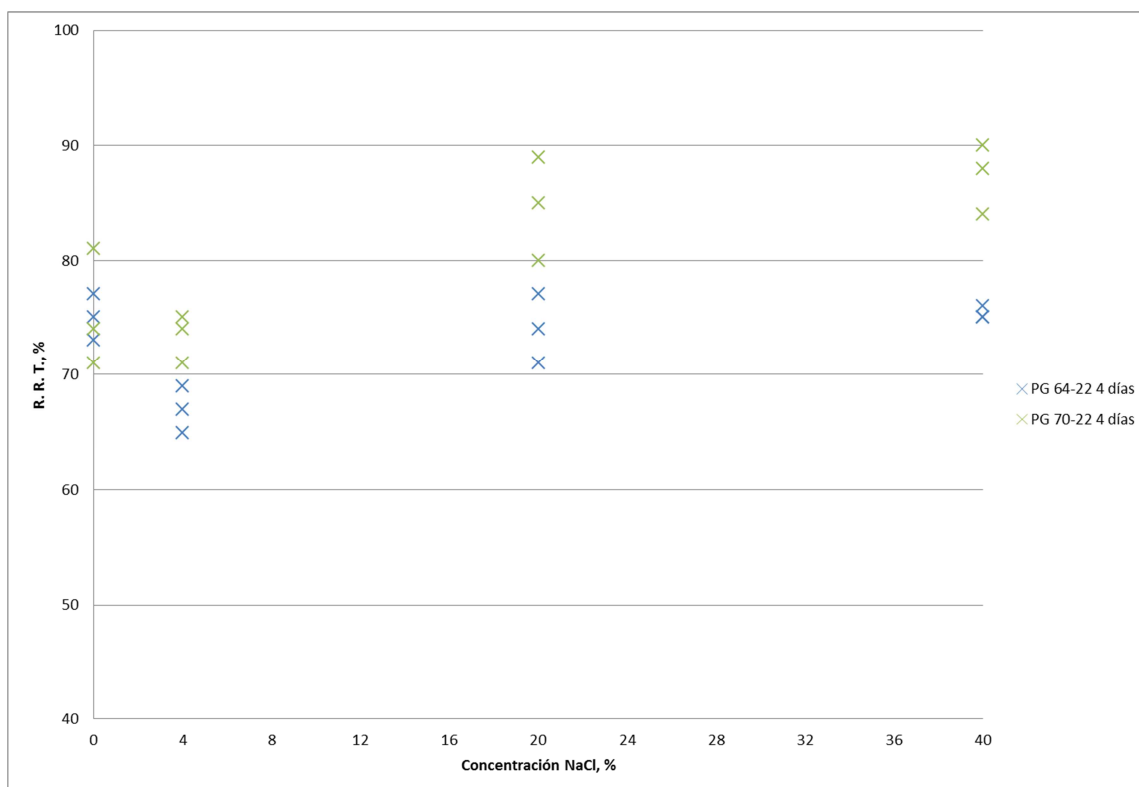


Figura 31. Gráfica de *R.R.T.* para la segunda fase.

Ambos cementos tienen su *R.R.T.* más baja al 4% de NaCl, y para el PG 70-22 a partir de una concentración de 20% NaCl, este obtiene una *R.R.T.* de 80% y llega hasta 90% aproximadamente.

De este modo, y considerando la información anterior, es visible una afectación de las sales de NaCl en las M.A.C., sin embargo no posee un comportamiento definido a mayor tiempo de inmersión ni a mayor concentración, siendo que algunos grupos de probetas incrementan su resistencia con el tiempo o la concentración. Para algunos casos, la *R.T.I.* y la *R.R.T.* es mayor para algunos grupos de probetas inmersos en sal que inmersos en agua sin sal.

En lo que respecta a otros autores El-Maaty (2013) obtuvo resultados similares a los de la presente investigación donde los especímenes condicionados en agua de mar obtuvieron menor relación de resistencia a la tensión, pero no se cumple en su resultado donde siete días de condicionado en agua de mar tenía

aproximadamente el mismo efecto que 14 días de condicionado en el agua del grifo en lo que respecta a los daños por humedad. Donde se dio un resultado opuesto, es en que dicha reducción de resistencia aumentó con el incremento del período de condicionamiento.

Özgan et al. (2013) establecieron que debido al aumento de la concentración de NaCl, los valores de estabilidad disminuyeron. Por su parte Deniz et al. (2012) concluyeron que las soluciones de sal (NaCl) parecen estar a un nivel insignificante de efectividad para tener efectos en las M.A.C. opuestos a la visión común de que dañan los pavimentos. Sin embargo, en la presente investigación, se tiene una combinación de ambos resultados.

4.12 Curvas esfuerzo-deformación

En las Figuras 32, 33, 34, 35, 36 y 37 se presentan las curvas esfuerzo-deformación para los grupos 1, 4, 20, 10, 13 y 22 respectivamente, los cuales se encuentran descritos en las Tablas 4 y 5. Además del grupo de los secos o no condicionados, se repitieron los grupos condicionados al 0% y 40% de concentración de NaCl, para así observar la modificación de la rigidez por el efecto de la sal, siendo dichas concentraciones la menor y la mayor usadas en la presente investigación. Con respecto al tiempo de inmersión para el condicionamiento, se realizaron a cuatro días dado que en éste tiempo se presentó la mayor diferencia de resistencias en las fases anteriores.

Así mismo, en las Tabla 21 se presentan las estimaciones del módulo elástico secante para cada una de las réplicas en los grupos de los cuales se obtuvieron las curvas esfuerzo-deformación. El módulo elástico secante es el módulo elástico definido como la pendiente de la línea desde el origen hasta la resistencia máxima.

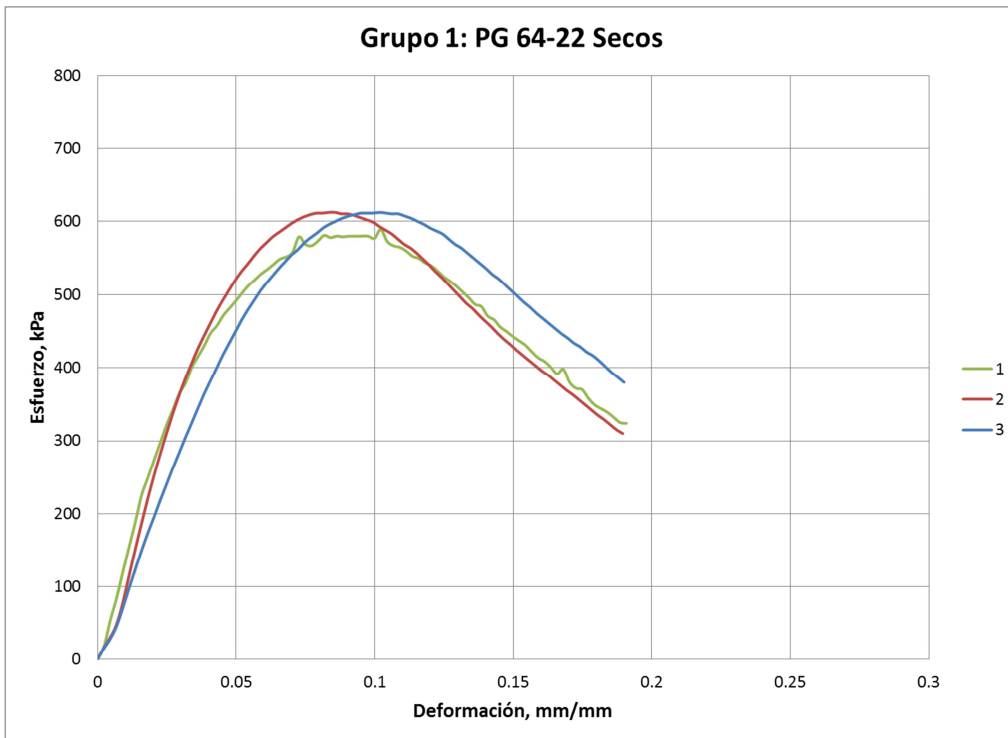


Figura 32. Curvas esfuerzo-deformación para el Grupo 1: PG 64-22 Secos.

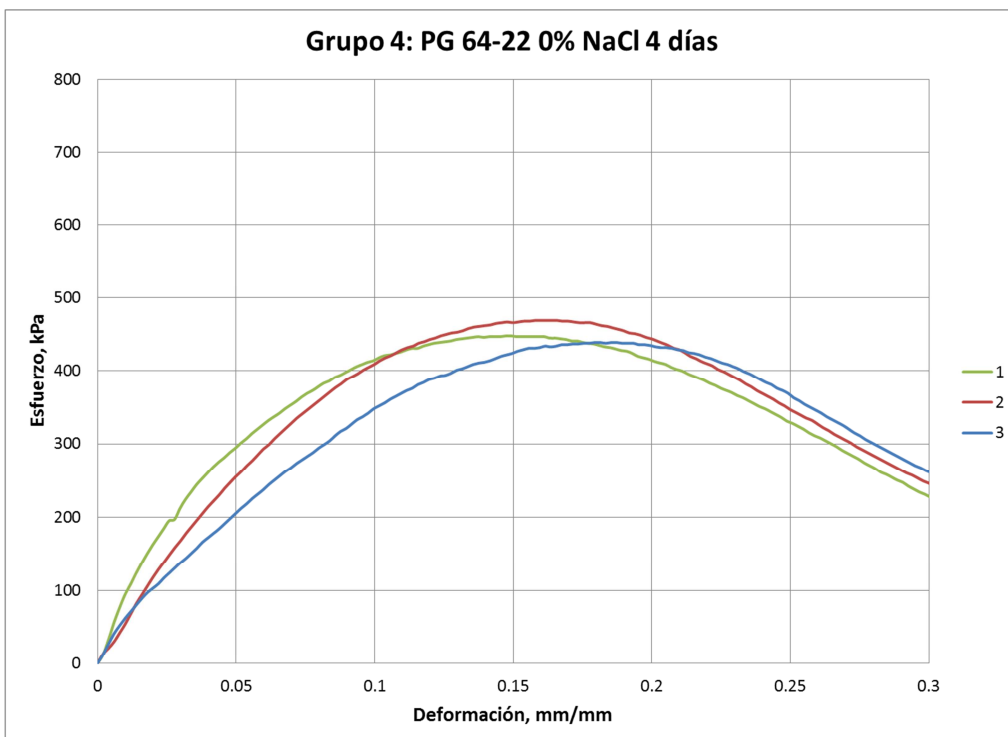


Figura 33. Curvas esfuerzo-deformación para el Grupo 4: PG 64-22 0% NaCl 4 días.

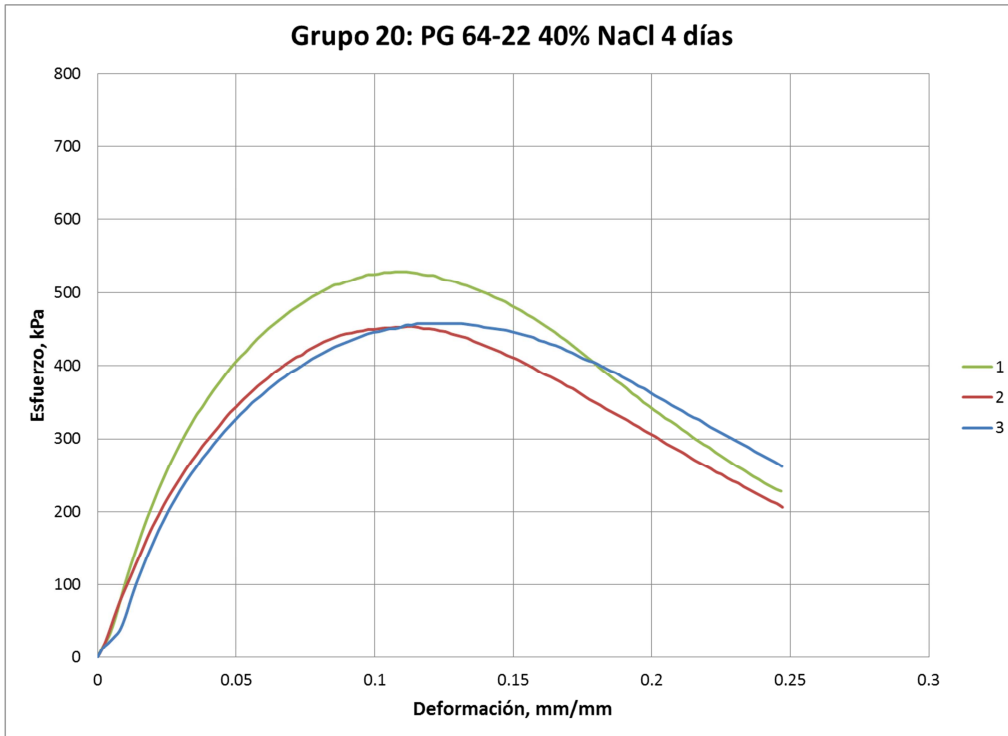


Figura 34. Curvas esfuerzo-deformación para el Grupo 20: PG 64-22 40% NaCl 4 días.

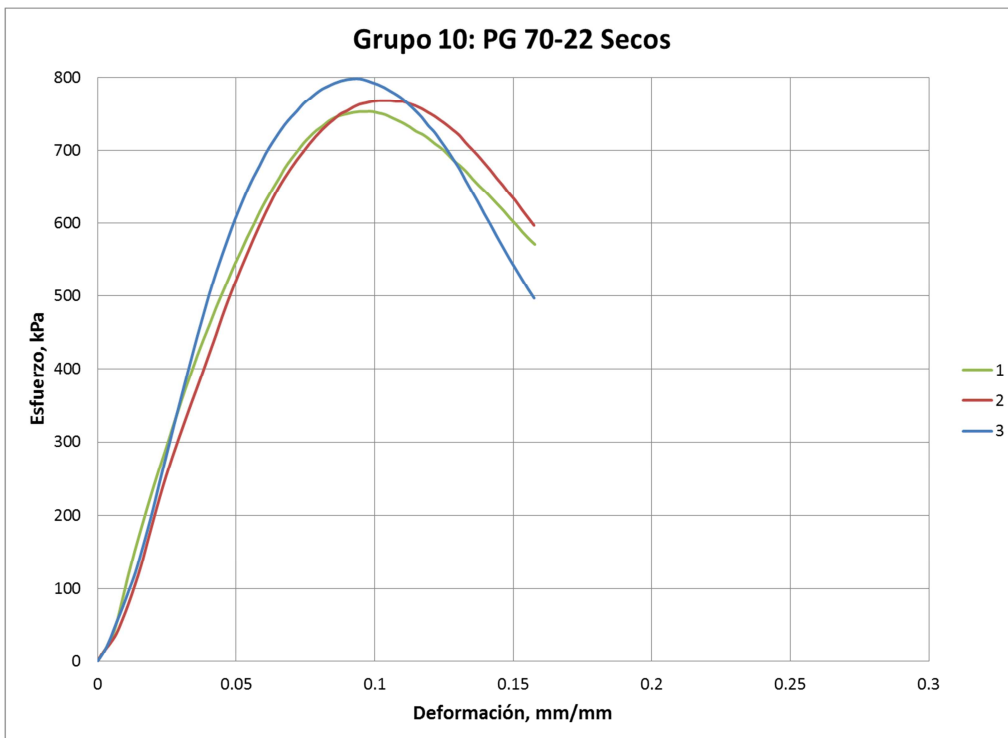


Figura 35. Curvas esfuerzo-deformación para el Grupo 10: PG 70-22 Secos.

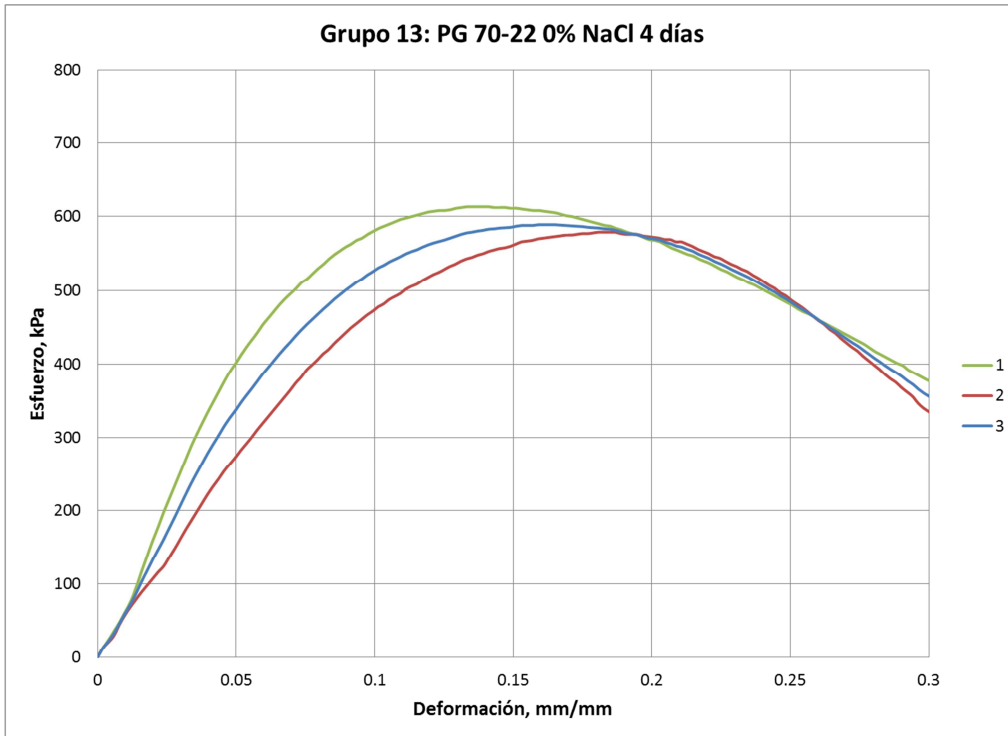


Figura 36. Curvas esfuerzo-deformación para el Grupo 13: PG 64-22 0% NaCl 4 días.

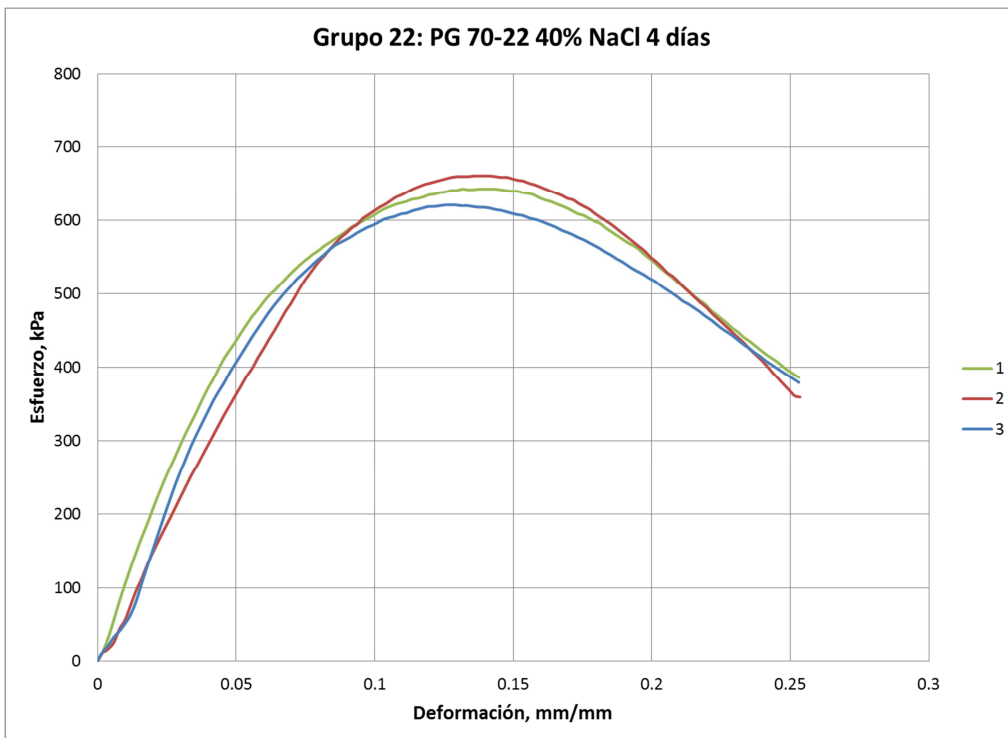


Figura 37. Curvas esfuerzo-deformación para el Grupo 22: PG 64-22 40% NaCl 4 días.

Tabla 21. Estimación de los módulos elásticos secantes.

Grupo	Réplica	Módulo elástico, kPa
1	1	6,444
	2	7,235
	3	6,150
4	1	2,697
	2	2,938
	3	2,444
20	1	4,818
	2	4,136
	3	3,833
10	1	7,947
	2	7,333
	3	8,421
13	1	4,393
	2	3,135
	3	3,606
22	1	4,571
	2	4,714
	3	4,769

En la Tabla 22 se muestra el promedio de los módulos elásticos secantes de dichos grupos.

Tabla 22. Promedio de los módulos elásticos secantes.

Grupo	Módulo elástico, kPa
1: PG 64-22 Secos	6,610
4: PG 64-22 0% NaCl 4 días	2,783
20: PG 64-22 40% NaCl 4 días	4,263
10: PG 70-22 Secos	7,901
13: PG 70-22 0% NaCl 4 días	3,711
22: PG 70-22 40% NaCl 4 días	4,685

En la Figura 38 se presentan las curvas esfuerzo-deformación promedio para cada uno de los grupos mostrados anteriormente.

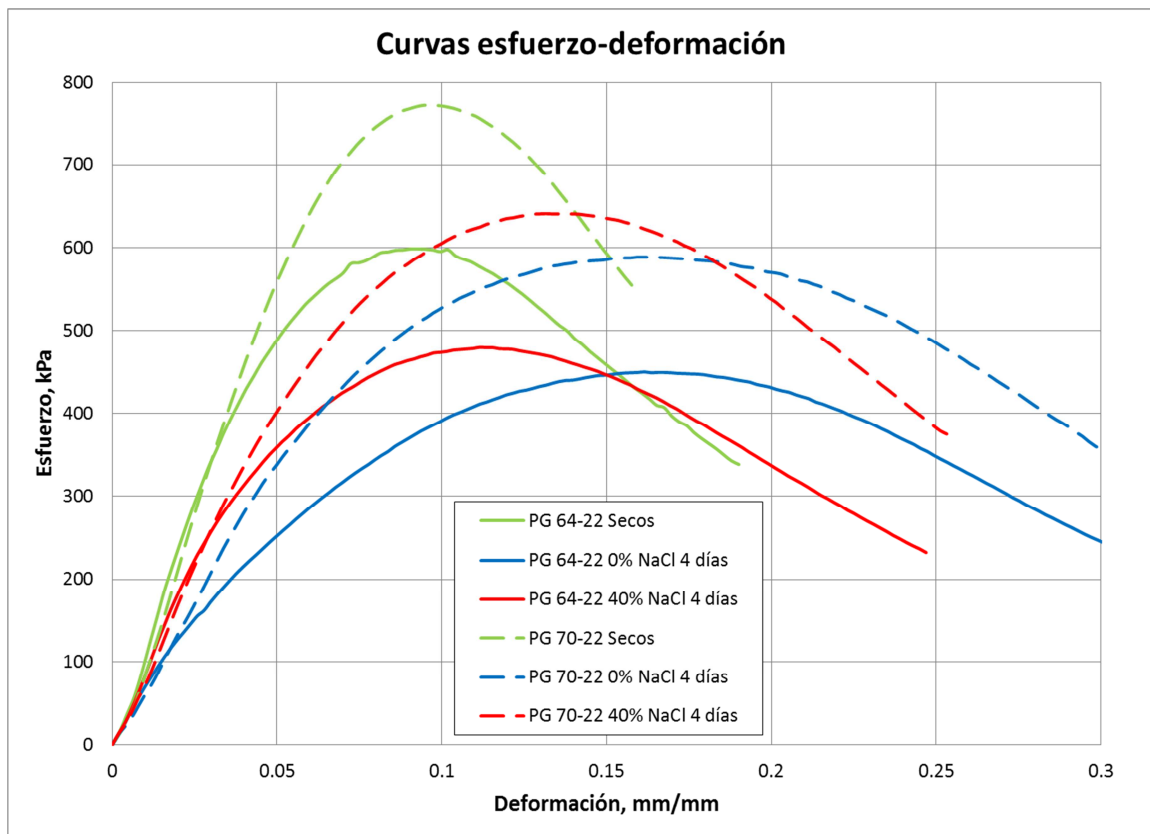


Figura 38. Curvas esfuerzo-deformación promedio.

Para los grupos seleccionados y analizados, el módulo elástico mayor se da en los grupos de las probetas secas. Para el caso de los grupos condicionados, es mayor la rigidez en los condicionados inmersos a una concentración del 40% de NaCl que el de 0%, esto en ambos cementos.

De este modo resulta clara una modificación del módulo elástico por la acción de las sales, sin embargo sería necesario un mayor análisis que involucre a todos los grupos para saber si existe alguna correlación entre los tiempos de inmersión y las concentraciones, o para corroborar como en la *R.T.I.* que existe una afectación pero no un comportamiento definido con respecto a esos dos factores.

4.13 Análisis de microscopía electrónica de barrido

Al igual que en los núcleos extraídos, se realizó un análisis cualitativo a través de imágenes de microscopía electrónica de barrido para observar la presencia de cristales de NaCl. La Figura 39 es un ejemplo de un cristal de NaCl en una de las probetas empleadas para determinar su resistencia.

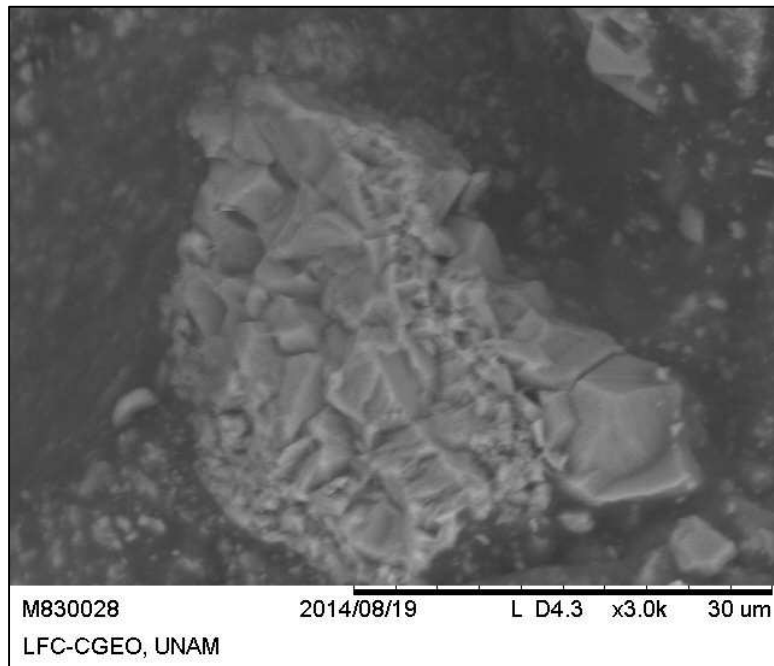


Figura 39. Micrografía SEM de una muestra del Grupo 20 donde se aprecian cristales de NaCl similar a la Figura 7 parte f.

Así mismo, en las probetas que fueron utilizadas para obtener su resistencia, se observó cristales de NaCl de 1 a 2 mm por lado, esto después de ser almacenados unos pares de días. Principalmente fue el caso de las probetas que estuvieron inmersas 14 días o en las que estuvieron a un 40% de NaCl.

4.14 Daño inducido por el crecimiento de cristales

Una vez comprobada la presencia de cristales de NaCl, tanto en los núcleos de campo, como en las probetas sometidas a un condicionamiento con sales, debe tomarse en cuenta el daño que podría ser inducido en campo por el

crecimiento de los cristales dadas las condiciones meteorológicas de Yucatán, particularmente el de la humedad relativa.

Como se mencionó anteriormente y de acuerdo a Lombardo et al. (2004) el tamaño del cristal y la H.R. son factores clave en la cinética de disolución/cristalización del cloruro de sodio (NaCl). En el campo, se espera que la presencia de abundantes cristales de tamaño nanométrico den lugar a una alta presión de cristalización y produzcan un daño significativo. En la investigación se encontraron cristales micrométricos e incluso milimétricos en la superficie.

La concentración de sal de la solución parece jugar un papel importante en la cinética de cristalización del NaCl. Dado que las sales en el campo se concentran generalmente en o cerca de la superficie del objeto, la cristalización se puede facilitar, como consecuencia de los ciclos de humedad diarias.

En ambientes donde los grandes cambios de humedad relativa son comunes, la cristalización puede ocurrir rápidamente y producir un gran daño, tal es el caso de la costa de Yucatán en donde la H.R. oscila entre 40 y 100% de acuerdo a la Tabla 6, en donde si se observa la variación diaria que se presentó en la investigación, da pie a que se facilite la cristalización la cual tiene lugar más rápidamente que la disolución, sobre todo cuando la magnitud del cambio de H.R. es grande.

Por otra parte y como lo estableció el Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources (2003), la degradación por la introducción y concentración de sales en las carreteras pavimentadas es un proceso que consta de dos estados.

1. *Crecimiento de la presión en los agregados o la mezcla.* El NaCl disuelto en agua, entra en los vacíos de la mezcla o los poros de los agregados, reaccionando con los constituyentes químicos de estos, y formando cristales de diferentes compuestos químicos que tienen más grandes volúmenes. La presión

que esta cristalización e incremento de volumen ejerce sobre los agregados o la mezcla, causa el desarrollo de grietas o micro-grietas, permitiendo que más humedad entre. Como los niveles o contenidos de humedad fluctúan, el cambio en las condiciones promueve un ciclo de la cristalización de las sales, disolviendo y recristalizando de acuerdo al cambio de las condiciones. Esto acelera el proceso de cristalización, promoviendo con mayor velocidad el deterioro del pavimento. El deterioro puede ser iniciado, recordando las fallas anteriormente mencionadas, al promoverse la pérdida de la película de asfalto de los agregados por la acción de dichos cristales de NaCl.

2. *Degradación de los agregados o de la mezcla asfáltica.* Además del crecimiento y expansión de los cristales de sal que aumentan la existencia de grietas, finalmente causan que las partículas se rompan. La velocidad a la cual este deterioro ocurre dependerá del tipo y resistencia de la roca o concreto asfáltico, de la cantidad y diámetro de los poros o vacíos y de la accesibilidad de la humedad y la sal.

4.15 Análisis estadístico de los resultados

Los resultados fueron analizados estadísticamente a través del análisis de varianza, conocido como ANOVA, a mediante la herramienta Modelo Lineal General (M.L.G.) del software estadístico Minitab 16. Para ambos análisis se utilizó un nivel de confianza del 95%, por lo tanto, aquellos efectos principales o interacciones que resulten en un valor de P menor al valor alfa de 0.05, resultarán ser factores significativos.

En el análisis todas las variables fueron consideradas categóricas o cualitativas porque así lo requiere el análisis de varianza. Al categorizar las variables, resulta indistinta la diferencia entre los periodos de inmersión o la diferencia entre las distintas concentraciones, puesto que el análisis los considera equidistantes. La Tabla 23 presenta un resumen de los análisis realizados y las variables que resultaron significantes, sea un efecto principal o una interacción de los mismos.

Tabla 23. Resultados del análisis estadístico.

Análisis	Efectos principales	Valores	Interacciones	Variables con significancia
M.L.G./ R.T.I. y R.R.T. para la primera fase	Cemento asfáltico (A)	1 o 2	A*B	A
	%NaCl (B)	0 o 4	B*C	A*C
	Tiempo (C)	1, 4, 7 o 14	A*C	B*C
			A*B*C	
M.L.G./ R.T.I. y R.R.T. para la segunda fase	Cemento asfáltico (A)	1 o 2	A*B	A
	%NaCl (B)	0, 4, 20 o 40		B
				A*B

Para el análisis de la primera fase, el cemento asfáltico fue el único efecto principal con significancia, sin embargo, la interacción de los tres no lo fue. Y aunque el tiempo no tuvo significancia, si lo tiene su interacción con el tipo de cemento y con la concentración de NaCl. En tanto que para la segunda fase, los efectos principales y su interacción son significativos. Al tener efectos o interacciones significativas, se da como válido el diseño de experimentos realizados.

5. CONCLUSIONES

La presente investigación tuvo como objetivo analizar el proceso de afectación del comportamiento mecánico debido al contacto del agua salada con las mezclas asfálticas a través de procesos de inmersión, los cuales promueven daños por susceptibilidad a la humedad en las mezclas asfálticas por efectos de las sales disueltas en el agua de poro.

Con la experimentación desarrollada en este trabajo, se encontró que el cloruro de sodio no afecta a los agregados pétreos ni al cemento asfáltico por separado, tal como lo revelan los ensayos realizados de MicroDeval y desprendimiento por fricción en los agregados y las pruebas de calidad de cementos asfálticos y la reología en los asfaltos, en los cuales sólo cambia su rigidez a bajas temperaturas.

Para el caso de las mezclas asfálticas, se desarrolló el diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño con el Protocolo A.M.A.A.C., ésto con agregados de Yucatán y asfaltos usados en la zona, uno natural y otro modificado con copolímero SBS. El daño por sales fue inducido de acuerdo a la prueba de susceptibilidad a la humedad, en la cual se evaluaron distintos períodos de inmersión (1, 4, 7 y 14 días) a distintas concentraciones de cloruro de sodio (0, 4, 20 y 40%). Los resultados mostraron que existe una interacción físico-química del agua y las sales con el concreto asfáltico. Dicha interacción pudo ser comprobada mecánicamente con las pruebas de tensión indirecta y con los cambios de rigideces.

De este modo y para las mezclas asfálticas, la experimentación se desarrolló en dos fases, la primera a dos concentraciones constantes y a distintos períodos de inmersión, y la segunda a un tiempo constante y a distintas concentraciones. En general las resistencias del cemento modificado con copolímero fueron mayores a las del natural tal como se esperaba. En la primera fase, el PG 64-22 obtuvo la menor resistencia a los 7 días de inmersión y se

observó un aumento progresivo a los 14 días, contrariamente a lo observado en el PG 70-22 que obtuvo su valor máximo de resistencia a los 7 días y que disminuyó a los 14 días. En la segunda fase, las resistencias menores se tienen al 4% de cloruro de sodio y al aumentar la concentración a 20% llegan a un máximo de resistencia para después permanecer constante.

Las carreteras costeras de Yucatán han mostrado excesivas fallas en los pavimentos en su corta vida útil. Algunos factores a los que puede ser atribuido es al ambiente que caracteriza a las costas, siendo éstos la temperatura y la humedad relativa; aunado a esto se tiene que el daño puede ser promovido también por la cercanía del nivel freático y por el aerosol marino que es transportado en el aire. Como característica adicional a las anteriores, se tienen las sales de cloruro de sodio disueltas en el agua que pueden moverse de distintos modos para atacar al pavimento. Estas últimas son un posible factor adicional en los daños por susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas y comprendieron el objetivo de la presente investigación.

Los problemas que acusan las redes carreteras costeras a diferencia de las que se encuentran en el interior del estado, son daños a edades tempranas de las vías, como son el desprendimiento de la película de asfalto de los agregados, el desprendimiento de agregados, los agrietamientos y los baches.

Se comprobó la presencia de las sales de cloruro de sodio en las carreteras costeras de Yucatán, México; a través de las técnicas de absorción atómica y de microscopía electrónica de barrido; observándose que la concentración de sales dentro de los núcleos de concreto asfáltico muestreados en el lugar aumenta desde la superficie en dirección al contacto con la base del pavimento. Se puede considerar que la sal puede llegar disuelta en el agua capilar o depositarse por percolación, producto del aerosol marino y la lluvia.

De acuerdo a la revisión literaria donde se involucraba la afectación de las sales de cloruro de sodio sobre las mezclas asfálticas en caliente, la mayoría de los autores indica que los daños en las carreteras son a causa de la presencia de dichas sales y que el efecto es mayor con el tiempo de exposición con estas sustancias. Así mismo evidenciaron la pérdida de resistencia en pruebas de susceptibilidad a la humedad realizadas con agua salina comparadas con agua pura. Sin embargo Deniz et al. (2012) encontraron resultados opuestos, lo cual indica la variabilidad que se puede tener en las diferentes investigaciones y que puede ser atribuible a la enorme cantidad de factores que influyen en el comportamiento de las mezclas asfálticas.

La microscopía electrónica de barrido permitió comprobar la presencia de cristales de cloruro de sodio en muestras de concreto asfáltico obtenidas de campo y en especímenes fabricados en el laboratorio e inmersos en agua salina. Esto resulta interesante a la luz de los trabajos del Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources (2003) y Lombardo et al. (2004), los cuales asocian la presencia de sales y las condiciones ambientales a los daños en los concretos asfálticos y que resulta congruente con los gradientes de humedad relativa reportados en el Capítulo 4 que se presentan en las costas yucatecas y que de manera indirecta quedan implícitos en las presiones de cristalización desarrolladas en la superficie de contacto del agregado con el cemento asfáltico.

El análisis de la varianza indica que la experimentación es adecuada, pues reveló la naturaleza de las variables involucradas. Es de destacar la significancia del tipo de cemento con la concentración de sales, y que la interacción del cemento, concentración y periodo de inmersión no son significantes.

Por todo lo anterior, se considera que los deterioros que aquejan a las carreteras costeras no pueden ser atribuibles únicamente a la interacción de las mezclas asfálticas con las sales de cloruro de sodio.

Caro et al. (2008) establecieron algunas teorías para los mecanismos de interacción que pueden ocurrir en la interfase del cemento asfáltico y los agregados, las cuales están relacionadas a la adherencia y con un enfoque en los daños por humedad. La primera teoría se refiere a una frontera de capa débil debido a la presencia de una región de interfase de baja resistencia a la cohesión, como la generada por polvo en el agregado o una disolución de agregados promovida por el pH del agua. Otra teoría es relacionada a las fuerzas electrostáticas en la cual las fuerzas de adhesión son regidas por las fuerzas de Coulomb en la superficie de los materiales, así el agua en los poros podría tener iones disueltos con carga opuesta a la de la interfase neutralizando las cargas. La tercera se refiere a los enlaces químicos que surgen de una reacción química entre los grupos funcionales activos del asfalto y el agregado, dada la naturaleza química de cada uno; lo anterior puede ser analizado mediante pruebas de afinidad agregado-asfalto. Otra teoría es la referida a los enlaces mecánicos el cual se relaciona con el entrelace mecánico del asfalto en las irregularidades de la superficie del agregado, para esto deberán ser caracterizadas completamente las propiedades físicas del agregado siendo de importancia la angularidad y la porosidad del mismo. Por último se tiene la energía superficial de los materiales, puesto que de ella depende el fenómeno termodinámico de la adhesión físico-química entre dos materiales y en base a la cual el daño por humedad puede ser cuantificado relacionando la energía entre el asfalto y el agregado, y el cambio en energía libre cuando el agua desplaza al asfalto de la superficie del agregado. Considerando la complejidad del fenómeno de adhesión entre la interfase asfalto-agregado y las teorías que ello conlleva en los mecanismos de daño por humedad, las futuras líneas de investigación dados los resultados del presente trabajo son:

1. Analizar por medio de alguna prueba, la interacción físico-química que sufrieron las mezclas asfálticas después de haber sido sometidas a los procesos de condicionamiento con sales de cloruro de sodio. O en su caso, realizar un estudio más a fondo de los comportamientos mecánicos como es el módulo elástico o el módulo dinámico, para dar un mayor sustento a los cambios de resistencia presentados en este trabajo.

2. Analizar la afectación de las mezclas asfálticas por los ciclos de cristalización y disolución de las sales de cloruro de sodio debida a los cambios de humedad relativa, para lo cual la presente investigación servirá para definir el condicionamiento inicial al que se someterán las probetas antes de iniciar dichos ciclos. La investigación sería también en función de la resistencia a la tensión indirecta.
3. Una vez estudiada y comprendida la afectación por los ciclos de cristalización y disolución de las sales, la última etapa de esta línea de investigación referente a la afectación de las sales en las mezclas asfálticas, será analizar los efectos promovidos por la interacción de las sales, el tránsito y el envejecimiento sobre las mezclas. Este tipo de investigación podría ser llevada a cabo con el seguimiento del cambio de la resistencia en probetas tomadas en campo.

LITERATURA CITADA

- AASHTO T304. 2011. Standard Method of Test for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate.
- Antunes, P., Ramísio, P. 2011. Road runoff characteristics on costal zones – Exploratory data analysis and modeling based on a pilot case study. Proceedings of the 12nd International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre/Brazil, 10-15 September 2011.
- Asociación Mexicana del Asfalto, A. C. 2013. Protocolo A.M.A.A.C. PA-MA 01. Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño. México.
- Asociación Mexicana del Asfalto A. C. 2010. Recomendación A.M.A.A.C. RA 05. Determinación del valor de azul de metileno para Filler y Finos.
- Asociación Mexicana del Asfalto A. C. 2010. Recomendación A.M.A.A.C. RA 08. Desprendimiento por fricción en la fracción gruesa de materiales pétreos para mezclas asfálticas.
- Asphalt Institute. 1991. Thickness Design. Asphalt Pavements for Highways & Streets. Manual Series No. 1 (MS-1). United States of America.
- Asphalt Institute. 2001. Superpave mix design. Superpave Series No. 2 (SP-2). 3rd Ed. United States of America.
- ASTM C88. 2013. Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.
- ASTM C127. 2012. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.
- ASTM C128. 2012. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate.
- ASTM C131. 2006. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.
- ASTM D70. 2009. Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method).
- ASTM D92. 2012. Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester.
- ASTM D2041M. 2011. Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.

- ASTM D2726M. 2013. Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures.
- ASTM D2419 2009. Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate.
- ASTM D2872. 2012. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test).
- ASTM D4402M. 2013. Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer.
- ASTM D4791. 2010. Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate.
- ASTM D4867M. 2009. Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures.
- ASTM D5821. 2013. Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate.
- ASTM D6373. 2013. Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder.
- ASTM D6521. 2013. Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV).
- ASTM D6648. 2008. Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR).
- ASTM D6928. 2010. Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus.
- ASTM D7175. 2008. Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer.
- Austrroads. 2004. Salinity and rising water tables – Risks for road assets. Australia.
- Austrroads. 2007. Managing the impacts of rising watertables and salinity on remaining pavement life: report of 2005/2006 activities. Australia.
- Biggs, A., Mahony, K. 2004. Is soil science relevant to road infrastructure?. Proceeding of the 13th International Soil Conservation Organization Conference – Brisbane, July.

- Browne, S.. The role of acute toxicity data for South African freshwater macroinvertebrates in the derivation of water quality guidelines for salinity. M. S. Thesis, Rhodes University. Sudáfrica.
- Caro, S., Masad, E., Bhasin A., Little, D. 2008. Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms. *International Journal of Pavement Engineering*, 9:2, 81-98.
- Chowdhury, A., Islam, K., Rahaman, M., Sobhan, M. 2013. Multi-faceted investigation of the effect of de-icer chemicals on the engineering properties of asphalt concrete. *Global Journal of Researches in Engineering Civil and Structural Engineering* Volume 13 Issue 8.
- Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica. 2011. M5.1 Catálogo de deterioros de pavimentos flexibles, Vol. No 11.
- De Carteret, R., Buzzi, O., Fityus, S. 2011. An experimental study of salt movement and accumulation within unsaturated granular roads pavement. *Proceedings of the 5th Asia Pacific Conference on Unsaturated Soils*, Pattaya, Thailand, 14-16 November 2011.
- Decheng, J., Dongsheng, L. 2010. Impact of salt and freeze–thaw cycles on performance of asphalt mixtures in coastal frozen region of China. *Cold Regions Science and Technology* 62, 34–41.
- Deniz, M., Eren, B., Yildirim, S., Isfalt, A. 2012. The Effect of Salt Solution on Asphalt Pavements and Road Materials. *Proceeding of the 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, 13-15th June. Estambul.
- Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources. 2003. Roads and salinity. Australia.
- Dirección General de Planeación. 2013. Anuario Estadístico 2012. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. México.
- Dirección General de Servicios Técnicos. 2012. Datos viales de Yucatán. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. México.
- Dirección General de Servicios Técnicos. 2011. Conceptos que conforman un proyecto ejecutivo de carreteras. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. México.
- El-Maaty, A. 2013. Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures. *Ain Shams Engineering Journal* 4, 351–363.

- Federal Highway Administration. 2006. Geotechnical Aspects of Pavements. Publication No. FHWA NHI-05-037. U. S. Department of Transportation. United States of America.
- Federal Highway Administration. 2008. Highways in the Coastal Environment. Publication No. FHWA NHI-07-096. U. S. Department of Transportation. United States of America.
- Garnica, P., Flores, M., Gómez, J., Alamilla, H. 2005. Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas. Publicación Técnica No. 267. Instituto Mexicano del Transporte. México.
- Garnica, P., Romero, S., Gómez, J., Alamilla, H., Alarcón, H. 2004. Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas. Publicación Técnica No. 246. Instituto Mexicano del Transporte. México.
- Goldstein, J., Lyman, C., Newbury, D., Lifshin, E. 2003. Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis (3rd Ed.). Springer, New York.
- Graham, T. 2005. On the Road to Better Management: An investigation into the benefits of managing the impacts of dryland salinity on roads. Proceeding of the 49th Conference of Australian Agricultural and Resource Economics Society.
- Grossi, C., Esbert, R. 1994. Las sales solubles en el deterioro de rocas monumentales. Revisión Bibliográfica. Materiales de construcción. Vol. 44, No. 235, 15-30.
- Hanz, A., Bahia, H., Kanitpong, K., Wen, H. 2007. Test Method to Determine Aggregate/Asphalt Adhesion Properties and Potential Moisture Damage. Wisconsin Highway Research Program.
- Horak, E., Emery, S., Walker, H. 2011. Novel measures to attenuate aggressive salt migration and crystallization on a Namibian Airport runway project. Proceedings of the 10th Conference on asphalt pavements for Southern Africa, Drakensberg, South Africa.
- Institute of Public Works Engineering Australia (IPWEA). 2002. Local government salinity management handbook – A resource guide for the public works professional.
- Instituto Nacional de Ecología. 2000. La calidad del agua en los ecosistemas costeros de México. SEMARNAP. México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2011. Anuario Estadístico de Yucatán. México.

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2013. Estadísticas a propósito del Día Mundial del Medio Ambiente. Datos de Yucatán. México.
- Langlet, M., Nadaud, F., Benali, M., Pezron, I., Saleh, K., Guigon, P. 2011. Kinetics of Dissolution and Recrystallization of Sodium Chloride at Controlled Relative Humidity. KONA Powder and Particle Journal No.29. Japón.
- Lombardo, T., Doehne, E., Simon, S. 2004. The Response of Nacl and Umm Ishrin Sandstone to Humidity Cycling: Mechanisms of Salt Weathering. Proceeding of the 10th International Congress on Detorioration and Conservation of Stone Stockholm, 27 June-2 July.
- Montgomery, D. and Runger, G., 2003. Applied Statistics and Probability for Engineers (3rd Ed.). John Wiley & Sons, New York.
- NMX-AA-051-SCFI-2001. 2001. Análisis de agua – Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-073-SCFI-2001. 2001. Determinación de cloruros en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-074-1981. 1981. Análisis de agua – Determinación de sulfatos.
- NMX-AA-034-SCFI-2001. 2001. Análisis de agua – Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- Obika, B., Freer-Hewish, R., Newill, D. 199). Physico-chemical aspects of soluble salt damage to thin bituminous road surfacing. Pre-Conference Proceedings of International Conference on the Implications of Ground Chemistry and Microbiology for Construction, University of Bristol, 29 June-1 July.
- Özgan, E., Serin, S., Gerengi, H., Arslan, Í. 2013. Multi-faceted investigation of the effect of de-icer chemicals on the engineering properties of asphalt concrete. Cold Regions Science and Technology 87, 59–67.
- Perkin Elmer. 1996. Analytical Methods for Atomic Absorption Spectroscopy.
- Rico, A., Téllez, R., Garnica, P. 1998. Pavimentos flexibles. Problemática, metodologías de diseño y tendencias. Publicación Técnica No. 104. Instituto Mexicano del Transporte. México.
- Roads Departament. 2001. The prevention and repair of salt damage to roads and runways. Botswana.

- Rodriguez, C., Doehne, E. 1999. Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern. *Earth Surface Processes and Landforms* 24, 191-209.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. 2006. Calidad de materiales asfálticos, N-CMT-4-05-001. México.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. 2006. Calidad de materiales asfálticos modificados, N-CMT-4-05-002. México.
- Shi, X., Akin, M., Pan, T., Fay, L., Liu, Y., Yang, Z. 2009. Deicer Impacts on Pavement Materials: Introduction and Recent Developments. *The Open Civil Engineering Journal* 3, 16-27.
- Solís, R., Moreno, E., Jiménez, F., Rosas, V. 2008. *Evaluación de daños por agresión ambiental en viviendas de concreto reforzado*. *Ingeniería* 18 (1, 2): 45-55. San José, Costa Rica.
- Torres, A., Castro, P., Moreno, E., Martínez, M., Pérez, T., Del Valle, A. 2005. El muelle de Progreso Yucatán. Ejemplo de estructura durable. *Ingeniería Civil, Col. De Ing. Civ. De México*, No 433, pp. 30-36.
- Transportation Association of Canada (TAC). 2003. Synthesis of best practices road salt management, 5.0 Pavements and salt management.
- Vorobieff, G., Wallis, M., Murphy, G. 2001. Maintaining the road to minimize structure in saline prone areas. *Proceeding of the National Local Government Salinity Summit*, MDA Inc. Australia.
- Willway, T., Baldachin, L., Reeves, S., Harding, M., McHale, M., Nunn, M. 2008. The effects of climate change on highway pavements and how to minimize them: Technical report. Transport Research Laboratory. United Kingdom.
- Yu, X., Wang, Y., Luo, Y., Yin, L. 2013. The effects of salt on rheological properties of asphalt after long-term aging. *The Scientific World Journal* Volume 2013.

ANEXOS

Anexo A – Normativa empleada en las pruebas

Anexo B – Clasificación de asfalto por grado PG

Anexo C – Fórmulas para la obtención del contenido de asfalto inicial (Pbi)

Anexo D – Fórmulas para la obtención de los parámetros volumétricos de la mezcla

Anexo E – Resultados en extenso de la resistencia a la tensión indirecta

Anexo A

Normativa empleada en las pruebas

Designación	Año	Título	Muestra	Observaciones
AASHTO T304	2011	Standard Method of Test for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate	Agregado	Tipo de prueba: Método B, retenido en No 16, No 30 y No 50
Recomendación A.M.A.A.C. RA 05	2010	Determinación del valor de azul de metileno para Filler y Finos	Agregado	Ninguna
Recomendación A.M.A.A.C. RA 08	2010	Desprendimiento por fricción en la fracción gruesa de materiales pétreos para mezclas asfálticas	Mezcla asfáltica	Ninguna
ASTM C88	2013	Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate	Agregado	Tipo de prueba: retenido en 1/4" y No 4
ASTM C127	2012	Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate	Agregado	Ninguna
ASTM C128	2012	Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate	Agregado	Ninguna
ASTM C131	2006	Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine	Agregado	Tipo de prueba: tipo B, retenido en 1/2" y 3/8"
ASTM D70	2009	Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method)	Cemento asfáltico	Ninguna
ASTM D92	2012	Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester	Cemento asfáltico	Ninguna
ASTM D2041M	2011	Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures	Mezcla asfáltica	Ninguna
ASTM D2726M	2013	Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures	Mezcla asfáltica compacta	Ninguna
ASTM D2419	2009	Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate	Agregado	Tipo de prueba: procedimiento B
ASTM D2872	2012	Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)	Cemento asfáltico	Ninguna

ASTM D4402M	2013	Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer	Cemento asfáltico	Ninguna
ASTM D4791	2010	Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate	Agregado	Tipo de prueba: retenido en 1/2" y 3/8"
ASTM D4867M	2009	Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures	Mezcla asfáltica compacta	Tipo de prueba: probetas de 10.16 cm (4") de diámetro por 6.35 cm (2.5") de altura aprox.
ASTM D5821	2013	Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate	Agregado	Tipo de prueba: retenido en 1/2" y 3/8"
ASTM D6521	2013	Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)	Cemento asfáltico	Ninguna
ASTM D6648	2008	Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)	Cemento asfáltico	Ninguna
ASTM D6928	2010	Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus		Tipo de prueba: T.N. 19 mm, retenido en 5/8", 1/2" y 3/8"
ASTM D7175	2008	Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer	Cemento asfáltico	Ninguna
NMX-AA-051-SCFI-2001	2001	Análisis de agua – Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas	Agua	Ninguna
NMX-AA-073-SCFI-2001	2001	Determinación de cloruros en aguas naturales, residuales y residuales tratadas	Agua	Ninguna
NMX-AA-074-1981	1981	Análisis de agua – Determinación de sulfatos	Agua	Ninguna
NMX-AA-034-SCFI-2001	2001	Análisis de agua – Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas	Agua	Ninguna

Anexo B

Clasificación de asfalto por grado PG

Extracto de: Table 1 Performance Graded Asphalt Binder Specification, de la ASTM D6373 (2013) Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder.

Performance Grade	PG 64						PG 70					
	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40
Average 7-day maximum Pavement Design Temperature, °C	<64						<70					
Minimum Pavement Design Temperature, °C	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40
Original binder												
Flash Point Temp., D92; min °C	230											
Viscosity, D4402: max. 3 Pa.s, Test Temp., °C	135											
Dynamic Shear, D7175: $G^*/\sin\delta$, min. 1.00 kPa 25 mm Plate, 1 mm Gap Test Temp. at 10 rad/s, °C	64						70					
Rolling Thin Film Oven												
Mass Change, max. Percent	1.00											
Dynamic Shear, D7175: $G^*/\sin\delta$, min. 2.20 kPa 25 mm Plate, 1 mm Gap Test Temp. at 10 rad/s, °C	64						70					
Pressure Aging Vessel Residue												
Dynamic Shear, D7175: $G^* \cdot \sin\delta$, max 5000 kPa 8 mm Plate, 2 mm Gap Test Temp. at 10 rad/s, °C	31	28	25	22	19	16	34	31	28	25	22	19
Creep Stiffness, D6648: S, max 300 Mpa, m-value; min. 0.300 Test Temp at 60 s, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

Anexo C

Fórmulas para la obtención del contenido de asfalto inicial (Pbi)

Extracto de: Chapter 6, del Asphalt Institute (2001) Superpave mix design. Superpave Series No. 2 (SP-2).

Fórmula de la propiedad volumétrica	Significado de las variables
$G_{sei} = G_{sb} + 0.8 * (G_{sa} - G_{sb})$	<p>G_{sei} = gravedad específica efectiva inicial del agregado G_{sb} = gravedad específica bruta G_{sa} = gravedad específica aparente</p>
$V_{bai} = \frac{P_s x (1 - V_a)}{\left(\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}}\right)} * \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}}\right)$	<p>V_{bai} = volumen de asfalto absorbido, cm³/cm³ de mezcla P_b = porcentaje de asfalto (considerado como 0.075) P_s = porcentaje de agregado (1 - P_b) G_b = gravedad específica del asfalto V_a = volumen de vacíos de aire (asumido como 0.04 cm³/cm³ de mezcla)</p>
$V_{bei} = 0.176 - 0.0675 \log(S_n)$	<p>V_{bei} = volumen efectivo de asfalto, cm³/cm³ de mezcla S_n = tamaño nominal del agregado en mm (considerado como 19)</p>
$W_{si} = \frac{P_s * (1 - V_a)}{\left(\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{sei}}\right)}$	<p>W_{si} = peso del agregado inicial, gr P_s = porcentaje de agregado (considerado como 0.925) V_a = volumen de vacíos de aire (asumido como 0.04 cm³/cm³ de mezcla) P_b = porcentaje de asfalto (considerado como 0.075) G_b = gravedad específica del asfalto G_{sei} = gravedad específica efectiva inicial</p>
$P_{bi} = \frac{G_b * (V_{bei} + V_{bai})}{(G_b * (V_{bei} + V_{bai})) + W_{si}} * 100$	<p>P_{bi} = contenido de asfalto inicial, % G_b = gravedad específica del asfalto V_{bei} = volumen efectivo de asfalto, cm³/cm³ de mezcla V_{bai} = volumen de asfalto absorbido, cm³/cm³ de mezcla W_{si} = peso del agregado inicial, gr</p>

Anexo D

Fórmulas para la obtención de los parámetros volumétricos de la mezcla

Extracto de: Sección F, del Protocolo A.M.A.A.C. PA-MA 01 (2013), Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño.

Fórmula de la propiedad volumétrica	Significado de las variables
$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}}$	<p>G_{sb} = gravedad específica bruta para el agregado total P_1, P_2, P_N = porcentajes individuales por masa del agregado G_1, G_2, G_N = gravedad específica bruta individual del agregado</p>
$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$	<p>G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado G_{mm} = gravedad específica teórica máxima P_{mm} = porcentaje de masa del total de la mezcla suelta = 100 P_b = contenido de asfalto, porcentaje del total de la masa en la mezcla G_b = gravedad específica del asfalto</p>
$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}}$	<p>G_{mm} = gravedad específica teórica máxima P_{mm} = porcentaje de masa del total de la mezcla suelta = 100 P_s = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla P_b = contenido de asfalto, porcentaje del total de la masa en la mezcla G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado G_b = gravedad específica del asfalto</p>
$G_{mb} = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w}$	<p>G_{mb} = gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada W_a = masa de la probeta en el aire W_w = masa de la probeta en el agua (sin parafina) W_{ss} = masa de la probeta saturada y superficialmente seca</p>
$VAM = 100 - \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}}$	<p>VAM = vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto) G_{mb} = gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada P_s = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla G_{sb} = gravedad específica bruta para el agregado total</p>

$V_a = 100 * \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right)$	<p>V_a = vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total de dicha mezcla G_{mm} = gravedad específica teórica máxima G_{mb} = gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada</p>
$VFA = 100 * \left(\frac{VAM - V_a}{VAM} \right)$	<p>VFA = vacíos llenos de asfalto, porcentaje de VAM VAM = vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto) V_a = vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total de dicha mezcla</p>
$P_{ba} = (100 * G_b) * \left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} \right)$	<p>P_{ba} = asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado G_b = gravedad específica del asfalto G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado G_{sb} = gravedad específica bruta para el agregado total</p>
$P_{be} = P_b - \left(\frac{P_{ba}}{100} * P_s \right)$	<p>P_{be} = contenido de asfalto efectivo, porcentaje del total de la mezcla P_b = contenido de asfalto, porcentaje del total de la masa en la mezcla P_{ba} = asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado P_s = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla</p>
$D_p = \frac{P_{0.075}}{P_{be}}$	<p>D_p = relación filler-asfalto $P_{0.075}$ = porcentaje de material que pasa la malla #200 P_{be} = contenido de asfalto efectivo, porcentaje del total de la mezcla</p>

Anexo E

Resultados en extenso de la resistencia a la tensión indirecta

		Grupo 1		
		PG 64-22	NA	NA
<i>ID pastilla</i>	-	1	2	3
COMPACTADA Y EN SECO		-----		
Diámetro, mm	D	99.47	99.60	99.50
Espesor, mm	t	63.63	63.60	63.60
Masa seca en aire, gr	A	1,002.00	1,002.20	1,001.10
Masa SSS, gr	B	1,004.30	1,005.80	1,004.20
Masa Sumergida, gr	C	523.20	524.50	520.60
Volumen (B - C), cm3	E	481.10	481.30	483.60
Gmb (A / E)	Gmb	2.083	2.082	2.070
Gmm	Gmm	2.240	2.240	2.240
% vacíos aire (100 * (1 - Gmb/Gmm))	Pa	7.02	7.04	7.58
Vol. Va. Aire (PaE / 100), cm3	Va	33.78	33.89	36.68
Carga, N	P	5,985.09	5,641.82	5,407.53
CONDICIONAMIENTO		-----		
Masa SSS, gr	B'			
Volumen abs. de agua (B' - A), cm3	J'			
% saturación (100*J' / Va) (55 y 80%)	S'			
Diámetro, mm	D'			
Espesor, mm	t'			
Masa SSS, gr	B''			
Masa Sumergida, gr	C''			
Volumen (B'' - C''), cm3	E'			
Volumen abs. de agua (B'' - A), cm3	J''			
% saturación (100*J'' / Va)	S''			
Carga, N	P'			
RESISTENCIA A LA TENSIÓN		-----		
Resistencia (2000 * P / pi * t * D), kPa	S1	602	567	544
Desv. Est. Grupo, kPa	-	29		
S1 Promedio, kPa	S1p	571		
Saturación final promedio, %	-	0		

Grupo 2			Grupo 3		
PG 64-22	0%	1 d.	PG 64-22	4%	1 d.
4	5	6	7	8	9
-----			-----		
99.30	99.70	99.30	99.30	99.60	99.50
63.43	63.40	63.40	63.50	63.40	63.50
1,001.90	1,003.80	1,003.10	1,003.60	1,002.10	1,002.80
1,005.30	1,006.80	1,005.70	1,006.80	1,004.90	1,006.00
522.60	524.20	524.50	524.90	522.00	523.10
482.70	482.60	481.20	481.90	482.90	482.90
2.076	2.080	2.085	2.083	2.075	2.077
2.240	2.240	2.240	2.240	2.240	2.240
7.34	7.14	6.94	7.03	7.36	7.29
35.42	34.47	33.39	33.86	35.53	35.22
-----			-----		
1,021.80	1,023.30	1,022.10	1,023.20	1,021.90	1,022.30
19.90	19.50	19.00	19.60	19.80	19.50
56.18	56.56	56.91	57.88	55.72	55.36
99.25	99.40	99.30	99.43	99.60	99.60
63.60	63.80	63.80	63.73	63.70	63.60
1,035.40	1,035.60	1,033.90	1,034.40	1,032.20	1,033.40
548.70	549.50	548.80	550.50	547.90	548.80
486.70	486.10	485.10	483.90	484.30	484.60
33.50	31.80	30.80	30.80	30.10	30.60
94.57	92.24	92.25	90.95	84.71	86.88
4,662.80	4,179.13	4,671.95	4,363.17	4,666.62	4,469.89
-----			-----		
469	420	470	441	470	452
29			15		
453			454		
93			88		

Grupo 4			Grupo 5		
PG 64-22	0%	4 d.	PG 64-22	4%	4 d.
10	11	12	13	14	15
-----	-----	-----	-----	-----	-----
99.46	99.36	99.10	99.40	99.30	99.40
63.46	63.60	63.53	63.56	63.60	63.55
1,002.30	1,000.10	1,002.60	1,003.30	1,004.60	1,003.90
1,006.00	1,004.20	1,006.30	1,006.40	1,009.00	1,007.20
525.40	522.30	523.90	524.70	527.20	524.90
480.60	481.90	482.40	481.70	481.80	482.30
2.086	2.075	2.078	2.083	2.085	2.081
2.240	2.240	2.240	2.240	2.240	2.240
6.90	7.35	7.22	7.02	6.92	7.08
33.14	35.43	34.81	33.80	33.32	34.13
-----	-----	-----	-----	-----	-----
1,020.80	1,020.80	1,021.80	1,023.30	1,023.90	1,023.40
18.50	20.70	19.20	20.00	19.30	19.50
55.82	58.43	55.16	59.17	57.93	57.13
99.40	99.50	99.60	99.65	99.60	99.80
63.90	63.80	63.80	63.90	63.75	63.80
1,039.60	1,039.00	1,039.90	1,038.50	1,036.40	1,035.90
553.50	551.90	552.50	552.80	552.40	550.90
486.10	487.10	487.40	485.70	484.00	485.00
37.30	38.90	37.30	35.20	31.80	32.00
100.00	100.00	100.00	100.00	95.44	93.76
4,229.32	4,136.23	4,337.09	3,807.15	3,672.74	3,906.33
-----	-----	-----	-----	-----	-----
427	417	437	384	370	395
	10			13	
	427			383	
	100			96	

Grupo 6			Grupo 7		
PG 64-22	0%	7 d.	PG 64-22	4%	7 d.
16	17	18	19	20	21
-----	-----	-----	-----	-----	-----
99.47	99.45	99.40	99.50	99.18	99.69
63.26	63.10	63.11	63.15	63.40	63.14
1,004.20	1,004.10	1,005.10	1,003.30	1,003.40	1,004.80
1,006.80	1,006.90	1,008.10	1,006.80	1,004.90	1,006.80
524.80	527.30	526.90	526.00	525.80	528.10
482.00	479.60	481.20	480.80	479.10	478.70
2.083	2.094	2.089	2.087	2.094	2.099
2.240	2.240	2.240	2.240	2.240	2.240
6.99	6.53	6.75	6.84	6.50	6.29
33.70	31.34	32.49	32.90	31.15	30.13
-----	-----	-----	-----	-----	-----
1,027.40	1,021.70	1,023.50	1,021.80	1,021.50	1,023.50
23.20	17.60	18.40	18.50	18.10	18.70
68.85	56.16	56.62	56.23	58.10	62.07
99.86	99.60	99.43	99.70	99.73	99.70
63.76	63.50	63.46	63.50	63.76	63.43
1,048.00	1,043.80	1,046.30	1,040.10	1,040.90	1,041.10
557.90	556.20	557.40	555.40	554.60	556.80
490.10	487.60	488.90	484.70	486.30	484.30
43.80	39.70	41.20	36.80	37.50	36.30
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3,423.81	3,868.93	3,899.55	3,755.99	3,075.45	3,764.16
-----	-----	-----	-----	-----	-----
345	390	393	380	312	382
	27			40	
	376			358	
	100			100	

Grupo 8			Grupo 9		
PG 64-22	0%	14 d.	PG 64-22	4%	14 d.
22	23	24	25	26	27
99.60	99.60	99.53	99.40	99.40	99.30
63.63	63.56	63.65	63.60	63.50	63.53
1,002.40	1,002.40	1,002.40	1,001.00	1,000.50	1,001.20
1,005.20	1,006.40	1,005.40	1,003.30	1,003.40	1,003.60
521.90	524.90	521.70	521.10	521.40	521.60
483.30	481.50	483.70	482.20	482.00	482.00
2.074	2.082	2.072	2.076	2.076	2.077
2.240	2.240	2.240	2.240	2.240	2.240
7.41	7.06	7.48	7.33	7.33	7.27
35.80	34.00	36.20	35.33	35.35	35.04
1,023.20	1,022.30	1,024.50	1,022.40	1,022.20	1,022.80
20.80	19.90	22.10	21.40	21.70	21.60
58.10	58.53	61.05	60.58	61.39	61.65
100.13	99.93	100.20	99.87	99.83	99.83
64.10	63.73	63.87	63.70	64.00	63.80
1,046.20	1,041.50	1,043.10	1,034.20	1,034.50	1,033.40
554.80	552.60	551.60	549.70	549.40	549.10
491.40	488.90	491.50	484.50	485.10	484.30
43.80	39.10	40.70	33.20	34.00	32.20
100.00	100.00	100.00	93.98	96.19	91.91
3,582.80	4,257.07	3,905.47	4,350.33	4,305.77	4,527.76
363	431	395	437	433	455
	34			12	
	396			442	
	100			94	

Grupo 19			Grupo 20		
PG 64-22	20%	4 d.	PG 64-22	40%	4 d.
79	80	81	82	83	84
99.53	99.53	99.70	99.13	99.50	99.30
63.40	63.20	63.20	63.10	63.20	63.13
1,002.60	1,000.70	1,001.00	1,002.80	1,002.50	999.30
1,006.50	1,003.80	1,004.70	1,005.70	1,006.40	1,002.50
526.90	524.40	525.80	526.80	524.60	520.50
479.60	479.40	478.90	478.90	481.80	482.00
2.090	2.087	2.090	2.094	2.081	2.073
2.240	2.240	2.240	2.240	2.240	2.240
6.67	6.81	6.69	6.52	7.11	7.44
32.01	32.66	32.03	31.22	34.26	35.88
1,021.40	1,019.80	1,020.60	1,021.40	1,023.40	1,020.90
18.80	19.10	19.60	18.60	20.90	21.60
58.73	58.48	61.20	59.57	61.01	60.19
99.50	99.70	99.40	99.77	99.70	99.76
63.40	63.37	63.33	63.50	63.53	63.57
1,031.60	1,031.40	1,028.60	1,024.30	1,026.50	1,023.60
550.80	550.80	549.30	546.90	546.90	543.70
480.80	480.60	479.30	477.40	479.60	479.90
29.00	30.70	27.60	21.50	24.00	24.30
90.59	94.00	86.18	68.86	70.06	67.72
4,172.56	4,035.77	4,356.67	4,222.53	4,258.61	4,285.68
420	406	439	426	431	433
	17			4	
	422			430	
	90			69	

		Grupo 10		
		PG 70-22	NA	NA
ID pastilla	-	28	29	30
COMPACTADA Y EN SECO		-----		
Diámetro, mm	D	99.57	99.40	99.27
Espesor, mm	t	63.67	63.60	63.63
Masa seca en aire, gr	A	997.70	995.30	995.60
Masa SSS, gr	B	1,000.70	998.10	998.90
Masa Sumergida, gr	C	518.50	517.30	516.50
Volumen (B - C), cm3	E	482.20	480.80	482.40
Gmb (A / E)	Gmb	2.069	2.070	2.064
Gmm	Gmm	2.223	2.223	2.223
% vacíos aire (100 * (1 - Gmb/Gmm))	Pa	6.92	6.88	7.16
Vol. Va. Aire (PaE / 100), cm3	Va	33.39	33.07	34.54
Carga, N	P	6,681.99	7,328.58	7,074.40
CONDICIONAMIENTO		-----		
Masa SSS, gr	B'			
Volumen abs. de agua (B' - A), cm3	J'			
% saturación (100*J' / Va) (55 y 80%)	S'			
Diámetro, mm	D'			
Espesor, mm	t'			
Masa SSS, gr	B''			
Masa Sumergida, gr	C''			
Volumen (B'' - C''), cm3	E'			
Volumen abs. de agua (B'' - A), cm3	J''			
% saturación (100*J'' / Va)	S''			
Carga, N	P'			
RESISTENCIA A LA TENSIÓN		-----		
Resistencia (2000 * P / pi * t * D), kPa	S1	671	738	713
Desv. Est. Grupo, kPa	-		34	
S1 Promedio, kPa	S1p		707	
Saturación final promedio, %	-		0	

Grupo 11			Grupo 12		
PG 70-22	0%	1 d.	PG 70-22	4%	1 d.
31	32	33	34	35	36
99.37	99.57	99.50	99.53	99.33	99.27
63.80	63.60	63.50	63.80	63.67	63.76
996.00	998.00	995.50	994.90	994.60	993.00
1,000.10	1,000.80	997.00	998.40	997.40	996.90
516.40	518.30	517.30	515.50	514.90	514.70
483.70	482.50	479.70	482.90	482.50	482.20
2.059	2.068	2.075	2.060	2.061	2.059
2.223	2.223	2.223	2.223	2.223	2.223
7.37	6.95	6.65	7.32	7.27	7.36
35.66	33.56	31.88	35.35	35.09	35.51
1,017.70	1,018.80	1,014.30	1,016.30	1,015.80	1,014.20
21.70	20.80	18.80	21.40	21.20	21.20
60.86	61.98	58.97	60.53	60.42	59.71
99.57	99.30	99.43	99.40	99.42	99.60
63.90	63.80	63.67	63.86	63.80	63.66
1,024.70	1,024.20	1,020.90	1,020.90	1,018.80	1,017.30
540.60	542.80	540.70	539.10	537.90	536.70
484.10	481.40	480.20	481.80	480.90	480.60
28.70	26.20	25.40	26.00	24.20	24.30
80.49	78.08	79.67	73.55	68.97	68.44
4,660.46	5,392.17	5,318.20	4,700.43	5,421.28	5,309.71
468	543	536	472	545	535
	41			40	
	516			517	
	79			70	

Grupo 13			Grupo 14		
PG 70-22	0%	4 d.	PG 70-22	4%	4 d.
37	38	39	40	41	42
-----			-----		
99.45	99.60	99.47	99.50	99.70	99.50
63.70	63.60	63.70	63.76	63.86	63.43
997.20	996.00	996.40	996.30	996.30	997.00
1,000.90	998.90	999.50	1,000.50	1,000.00	1,001.00
519.10	515.80	516.20	518.20	515.00	521.00
481.80	483.10	483.30	482.30	485.00	480.00
2.070	2.062	2.062	2.066	2.054	2.077
2.223	2.223	2.223	2.223	2.223	2.223
6.89	7.26	7.26	7.07	7.59	6.56
33.22	35.06	35.08	34.12	36.82	31.51
-----			-----		
1,018.50	1,017.10	1,017.50	1,016.60	1,018.90	1,017.40
21.30	21.10	21.10	20.30	22.60	20.40
64.12	60.19	60.15	59.49	61.38	64.75
99.67	99.56	99.70	99.36	99.60	99.36
63.70	63.90	63.80	63.90	63.70	63.60
1,029.80	1,029.10	1,030.70	1,024.20	1,025.40	1,023.70
546.20	543.40	544.70	543.20	541.70	544.60
483.60	485.70	486.00	481.00	483.70	479.10
32.60	33.10	34.30	27.90	29.10	26.70
98.14	94.42	97.79	81.77	79.03	84.74
5,725.41	5,165.81	4,971.14	5,214.29	5,014.95	5,314.87
-----			-----		
574	520	500	524	504	534
38			15		
531			521		
97			82		

Grupo 15			Grupo 16		
PG 70-22	0%	7 d.	PG 70-22	4%	7 d.
43	44	45	46	47	48
99.60	99.26	99.56	99.40	99.33	99.36
63.16	63.10	63.03	63.56	63.20	63.10
1,000.40	1,003.80	1,000.90	1,002.30	1,003.10	1,001.10
1,003.90	1,006.80	1,004.60	1,004.70	1,005.30	1,003.90
524.90	526.20	525.10	521.60	524.40	523.70
479.00	480.60	479.50	483.10	480.90	480.20
2.089	2.089	2.087	2.075	2.086	2.085
2.223	2.223	2.223	2.223	2.223	2.223
6.05	6.04	6.10	6.67	6.17	6.22
28.98	29.05	29.25	32.22	29.66	29.86
1,017.80	1,020.50	1,018.60	1,022.90	1,021.50	1,019.50
17.40	16.70	17.70	20.60	18.40	18.40
60.05	57.49	60.51	63.93	62.03	61.62
99.60	99.53	99.73	99.70	99.60	99.60
63.30	63.40	63.40	63.76	63.40	63.30
1,035.70	1,037.90	1,036.50	1,032.20	1,035.80	1,030.70
552.90	554.80	553.00	548.20	553.70	550.00
482.80	483.10	483.50	484.00	482.10	480.70
35.30	34.10	35.60	29.90	32.70	29.60
100.00	100.00	100.00	92.79	100.00	99.12
6,019.05	6,140.62	6,225.83	5,790.54	6,316.24	5,904.44
604	614	628	586	642	599
	12			29	
	615			609	
	100			97	

Grupo 17			Grupo 18		
PG 70-22	0%	14 d.	PG 70-22	4%	14 d.
49	50	51	52	53	54
-----	-----	-----	-----	-----	-----
99.50	99.40	99.36	99.60	99.50	99.40
63.60	63.53	63.70	63.50	63.60	63.56
995.60	995.70	995.90	995.40	995.10	995.50
999.90	998.90	999.50	998.50	998.20	999.40
518.90	516.70	516.60	517.50	517.50	517.80
481.00	482.20	482.90	481.00	480.70	481.60
2.070	2.065	2.062	2.069	2.070	2.067
2.223	2.223	2.223	2.223	2.223	2.223
6.89	7.11	7.23	6.91	6.88	7.01
33.14	34.29	34.90	33.23	33.06	33.78
-----	-----	-----	-----	-----	-----
1,016.20	1,016.10	1,017.30	1,015.40	1,015.40	1,016.50
20.60	20.40	21.40	20.00	20.30	21.00
62.17	59.49	61.31	60.19	61.40	62.16
100.17	99.60	99.93	99.70	99.70	99.76
63.97	63.73	63.83	63.73	63.93	63.70
1,034.60	1,034.30	1,034.50	1,025.80	1,026.30	1,026.80
548.10	546.70	547.70	546.60	546.40	546.40
486.50	487.60	486.80	479.20	479.90	480.40
39.00	38.60	38.60	30.40	31.20	31.30
100.00	100.00	100.00	91.49	94.37	92.65
4,922.34	5,068.51	4,953.69	5,874.73	5,406.07	5,746.44
-----	-----	-----	-----	-----	-----
496	514	503	591	545	578
9			24		
504			571		
100			93		

Grupo 21			Grupo 22		
PG 70-22	20%	4 d.	PG 70-22	40%	4 d.
85	86	87	88	89	90
-----	-----	-----	-----	-----	-----
99.50	99.53	99.67	99.37	99.57	99.43
63.30	63.00	63.07	63.27	63.27	63.60
994.90	993.80	993.40	994.80	995.00	995.70
998.00	998.80	996.40	997.80	999.00	999.00
521.00	521.10	518.50	517.70	518.20	515.90
477.00	477.70	477.90	480.10	480.80	483.10
2.086	2.080	2.079	2.072	2.069	2.061
2.223	2.223	2.223	2.223	2.223	2.223
6.17	6.42	6.49	6.79	6.91	7.28
29.45	30.65	31.03	32.60	33.21	35.19
-----	-----	-----	-----	-----	-----
1,012.80	1,013.00	1,012.50	1,014.50	1,015.00	1,017.20
17.90	19.20	19.10	19.70	20.00	21.50
60.78	62.65	61.56	60.44	60.23	61.09
99.53	99.87	99.53	99.70	99.63	99.80
63.27	63.20	63.20	63.23	63.40	63.80
1,017.50	1,017.20	1,016.60	1,017.00	1,018.60	1,022.70
541.80	541.60	540.00	539.90	540.70	541.50
475.70	475.60	476.60	477.10	477.90	481.20
22.60	23.40	23.20	22.20	23.60	27.00
76.74	76.35	74.78	68.11	71.07	76.72
6,199.89	5,956.31	5,573.41	6,124.03	6,274.14	5,885.09
-----	-----	-----	-----	-----	-----
631	603	566	619	637	596
	33			21	
	600			617	
	76			72	

GLOSARIO

- A.M.A.A.C.: Asociación Mexicana del Asfalto A. C.
- ANOVA: Análisis de varianza
- C.C.P.: Concreto de Cemento Portland
- D.G.P.: Dirección General de Planeación
- D.G.S.T.: Dirección General de Servicios Técnicos
- E.M.: Estabilidad Marshall
- F.H.W.A.: Federal Highway Administration
- H.R.: Humedad Relativa
- H.R.D.: Humedad Relativa de Delicuescencia
- M.A.C.: Mezcla Asfáltica en Caliente, H.M.A. por sus siglas en inglés
- M.L.G.: Modelo Lineal General
- NaCl: Cloruro de sodio
- PAV: Pressure Aging Vessel
- R.D.H.: Relación de Daño por Humedad
- R.R.T.: Relación de Resistencia a la Tensión, T.S.R. por sus siglas en inglés
- RTFO: Rolling Thin Film Oven
- R.T.I.: Resistencia a la Tensión Indirecta, I.T.S. por sus siglas en inglés
- SBS: Styrene-Butadiene-Styrene
- S.C.T.: Secretaría de Comunicaciones y Transportes
- SEM: Scanning Electron Microscopy o Scanning Electron Microscope
- S.H.R.P.: Strategic Highway Research Program
- S.M.A.: Stone Mastic Asphalt
- T.N.: Tamaño Nominal