

# Análisis del efecto de daño por humedad en mezclas asfálticas mediante el módulo dinámico

Omar Adame Hernández, omar.adame@lasfalto.com.mx

Enrique Villa, evilla@lasfalto.com.mx

Pedro Limón, pedro@surfax.com.mx

Israel Sandoval, israel@surfax.com.mx

Ignacio Cremades, cremades@surfax.com.mx

En México y Latinoamérica el daño por humedad que sufren los pavimentos es importante, esto debido a que la temporada de lluvias puede extenderse por meses incluyendo huracanes y tormentas tropicales que someten los pavimentos por largos periodos de exposición a la humedad causando daños severos a las mezclas asfálticas. Actualmente, en Latinoamérica son usados métodos como el de resistencia conservada "TSR" y el ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo, ensayos empíricos en los que el daño que se induce ha dejado de ser representativo y difícil de identificar por los nuevos métodos de diseño donde una mezcla puede cumplir con el mínimo especificado teniendo en campo un desempeño no tan adecuado.

Es por eso que en este trabajo se propone un análisis de daño por humedad a través de una propiedad fundamental de las mezclas asfálticas, como lo es el módulo dinámico y la afectación que este puede sufrir, en este método se someten a un periodo de acondicionamiento sumergidos en agua durante 24 y 72 Horas, después de cada periodo de acondicionamiento se realizó una medición de módulo dinámico a 20 grados centígrados, el daño de la mezcla ha sido evidente en la reducción del módulo dependiendo del tipo de asfalto, lo cual demuestra la importancia de tener mezclas asfálticas que se apliquen de forma correcta para cada tipo de aplicación y clima.

**Palabras Clave:** Módulo dinámico, Susceptibilidad a la humedad, granulometría.

In Mexico and Latin America, moisture damage suffered by pavements is important, This is because the rainy season can last for months, including hurricanes and tropical storms, which subject the pavements to long periods of exposure to the moisture, causing several damage to asphalt mixtures. Actually, in latin America methods such as Tensile Strength Ratio (TSR) and the Hamburg Wheel Tracking, empirical tests in which the damage that is induced is not enough and difficult to identify by the new design methods where a mixture can meet the specified minimum in the field having a not so adequate performance.

That is why in this work an analysis of moisture damage is proposed through a fundamental property of asphalt mixtures, as the dynamic modulus and the affectation that this can suffer, In this method the mixtures are subjected to a conditioning period submerged in water for 24 and 72 hours. After each conditioning period, a dynamic modulus measurement was made at 20 Celsius degrees, the damage of the mixture has been evident in the reduction of the modulus depending on the type of asphalt, which demonstrates the importance of having asphalt mixtures that are applied correctly for each type of application and weather.

**Keywords:** Dynamic modulus, moisture susceptibility, particle size distribution.

# Análisis del efecto de daño por humedad en mezclas asfálticas mediante el módulo dinámico

## 1. Introducción

En México el ciclo de lluvias que se presenta año tras año es cada vez de mayor intensidad debido al cambio climático, las lluvias intensas además de generar daños materiales e inundaciones en zonas urbanas generan un daño importante sobre los pavimentos flexibles, urbanos y autopistas. Sin embargo, no se sabe de manera precisa como afecta a las mezclas asfálticas la humedad generada por las lluvias. En México de acuerdo a los últimos informes presentados por la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), en la temporada de ciclones tropicales durante el 2016 se tuvieron 8 más que el promedio, para un total de 36 registrados durante ese año, de los cuales 18 llegaron a categoría de Huracán. Además, se tuvo el impacto directo de 6 ciclones en el territorio nacional, tres por el Océano Pacífico y tres por el Atlántico. Mientras que la temporada de lluvias 2016 se comportó conforme al promedio histórico, precipitó 744 milímetros en todo el territorio nacional.

De acuerdo con varios estudios, estos señalan varias razones como las fuentes del fenómeno que se presenta entre la interfaz del mástico, la superficie del agregado y en la estructura interna del agregado (falla por adhesión y falla por cohesión), así, estas fallas dependen directamente de la calidad y propiedades de los materiales utilizados (agregado y ligante). Sin embargo, estas propiedades pueden ser mejoradas con el uso de agentes anti-desprendimiento líquidos, asfaltos modificados o el uso de cal hidratada (Howson et al., 2007). También, se ha observado que incrementando el pH del agua presente en la interfaz entre el mástico y el agregado tiene un efecto importante en el detrimento de la calidad del enlace por adhesión entre los agregados (Scott, 1982) [4].

Al menos 6 mecanismos de fallas son los que se asocian con los daños por humedad y los desprendimientos de agregado, pudiendo estos presentarse en forma individual o simul-

tánea. Estos mecanismos son: separación, desplazamiento, emulsificación espontánea, presión de poro, socavación hidráulica y efectos ambientales.

*La separación* es el efecto en que el agua que penetra en el agregado es debido a una discontinuidad en la película de asfalto que recubre al mismo, la cual puede ser debido a un recubrimiento parcial o de una ruptura en la película asfáltica.

*Desplazamiento* es el efecto en el que el agua no penetra en el agregado, en cambio desplaza al asfalto que recubre al mismo penetrando en el agregado y generando daño.

*La emulsificación espontánea* ocurre cuando el asfalto y el agua se combinan para formar una emulsión, un fenómeno que se maximiza con la presencia de emulsificantes como arcillas minerales.

*La presión de poro* puede también generar un daño por humedad en mezclas asfálticas con altos contenidos de vacíos, como es el caso de las mezclas abiertas (open graded friction course), en las que el agua puede circular entre los poros interconectados.

*La socavación hidráulica* ocurre únicamente en la superficie del pavimento y ocurre a partir del efecto de los neumáticos de los vehículos sobre un pavimento mojado, sobre los cuales se generan altas presiones delante del neumático y succión detrás del mismo (Fromm, 1974; Scott, 1982) [4].

*Los efectos ambientales*, son los efectos que genera la actividad humana, en este caso sobre los pavimentos como son: derrame de aceites, combustibles entre muchos otros.

Todos los mecanismos antes mencionados son el resultado en el que la energía superficial libre del agua es inferior a la del asfalto, es decir, el agua presenta mayor capacidad de humectar el agregado que el asfalto (Majidzadra et al., 1968) [4].



Figura 1. Daño por humedad en vías mexicanas (Excélsior, 2015)

## 2. Metodología

En este trabajo se hace uso de las metodologías de diseño de mezclas densas propuestas por el protocolo AMAAC (PA-MA 01/2013) [3], metodología vigente en México. Después, se utilizó la prueba de módulo dinámico como parámetro de calidad de las mezclas asfálticas analizadas para las que se construyó su respectiva curva maestra con temperaturas desde los 0 hasta los 40°C con frecuencias desde 0.1 hasta 10 Hz. Posteriormente los especímenes se acondicionaron en agua a una temperatura de 60°C durante 24 y 72 horas respectivamente.

## 3. Análisis y resultados

### 3.1 Caracterización del agregado y asfalto

Respecto al agregado, se hizo uso de un agregado proveniente del estado de jalisco, del cual se tienen los siguientes resultados y que cumple con todas las especificaciones requeridas por dicha metodología.

Tabla 1. Caracterización del agregado.

Tipo de prueba	Basalto	Valor de Normativa
Partículas alargadas	1.60%	15% máx.
Partículas Lajeadas	0.34%	15% máx.
Densidad	2.66	N/A
Desgaste de los Angeles	10%	
Absorción	1.28%	N/A
Tipo de prueba	Basalto	Valor de Normativa
Equivalente de arena	70%	50% mín.
Densidad	2.6	N/A
Absorción	2.04%	N/A
Azul de metileno	11ml/g	15ml/g máx.
Angularidad	40.72%	40 mín.

Para el asfalto se usó como base el asfalto Ekbé-Salamanca clasificado con un grado PG (64-16), a continuación, se presentan las pruebas básicas del asfalto, así como las pruebas para grado PG. Como modificador se usó un Terpolímero RET de Surfáx con el cual se obtuvo un asfalto modificado PG 76-22 y con una capacidad para soportar un nivel "extremo" (E) de acuerdo al parámetro Jnr.

### 3.2 Parámetros volumétricos de la mezcla

Con el uso de estos componentes base (asfalto Ekbé y basalto) se procedió a fabricar especímenes por triplicado para la realización de la prueba de módulo dinámico, para los cuales se obtuvieron las siguientes combinaciones y propiedades por cada tipo de mezcla:

### 3.3 Módulo dinámico

En una mezcla asfáltica existen dos componentes fundamentales: agregado pétreo y asfalto, las cuales aportan diferentes propiedades en la mezcla y le dan un comportamiento visco-elástico a la mezcla.

#### Agregado Mineral:

- Comportamiento lineal elástico
- Forma el esqueleto mineral de la mezcla
- Aporta propiedades importantes que define la deformación

#### Asfalto:

- Comportamiento visco elástico
- A diferentes temperaturas la propiedad cambia
- A diferentes razones de carga su comportamiento varía
- Importante en el desempeño a la fatiga.

## Análisis del efecto de daño por humedad en mezclas asfálticas mediante el módulo dinámico

Un material como una mezcla asfáltica en el que sus propiedades como el módulo de rigidez dependen de las temperaturas de ensayo y de las razones de carga (velocidad de aplicación en campo o frecuencia en laboratorio), es importante saber que las propiedades no son constantes con respecto al tiempo como se han asumido en los diseños clásicos, esto comprobado a través de varios estudios en los que se le da importancia y que se asume principalmente que el pavimento cambia sus propiedades y envejece debido a:

- La edad del pavimento
- El clima

- El periodo de oxidación con el que cambia el módulo en el tiempo

- Propiedades volumétricas

Es por eso por lo que en este trabajo se decidió estudiar la variación del módulo dinámico provocada por el daño por humedad. Esto a través de un acondicionamiento en baño maría a 60°C en el que se simula el efecto de la humedad con respecto al tiempo.

Inicialmente se fabricaron probetas después de determinar su contenido óptimo y se mezclaron a una temperatura de 165°C para la mezcla con Terpolímero RET, mientras que pa-

Tabla 2. Caracterización del asfalto

TIPO DE PRUEBA -----	Resultado asfalto modificado	Resultado asfalto convencional	Especificación particular	Método de prueba
Recuperación elástica por torsión a 25°C (%)	49	--	40 mín.	M-MMP-4-05-024/02 SCT
Punto de reblandecimiento, 5°C/min. (°C)	64	--	55 mín.	M-MMP-4-05-009/00 SCT
Punto de inflamación Cleveland (°C)	>300	>300	230 mín.	ASTM D 92
Viscosidad Brookfield a 135°C (cP)	1747	404	3000 máx.	ASTM D 4402
Módulo reológico de corte dinámico a $[G^*/\text{sen}\delta]$ (kPa)	1.395 (76°C)	1.335 (64°C)	1 mín.	ASTM D 7175
Ángulo de fase ( $\delta$ ) (°)	68.85 (76°C)	83.51 (64°C)	----	ASTM D 7175
Análisis del residuo de la prueba de la película delgada RTFO ASTM D 2872				
Pérdida de masa por calentamiento a 163°C, (%)	0.21	0.45	1 máx.	ASTM D 2872
Módulo reológico de corte dinámico a $[G^*/\text{sen}\delta]$ (kPa)	3.579 (76°C)	3.67 (64 °C)	2,2 mín.	ASTM D 7175
Ángulo de fase ( $\delta$ ) (°)	58.48 (76°C)	77.35 (64°C)	----	ASTM D 7175
Análisis del residuo de la prueba de envejecimiento a presión PAV ASTM D 6521				

Módulo reológico de corte dinámico A 25°C [G*senδ] (KPa)	1248	2558	5000 máx.	ASTM D 7175
Rigidez en creep A -12°C, 60s S(t), (MPa)	71.94	112.69	300 máx.	ASTM D 6648
Valor m(t) A -12°C, 60s S(t), (adimensional)	0.313	0.293	0,3 mín.	ASTM D 6648
DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DE TRÁFICO Jnr (RTFO)				
Respuesta elástica a 100 Pa , (%)	72.25 (76°C)	14.08 (64°C)		M-MMP-4-05-009/00 SCT
Respuesta elástica a 3200 Pa (%)	66.87	3.26		ASTM D 92
Diferencia en respuesta elástica (%)	7.54 (76°C)	76.87		ASTM D 4402
Creep compliance Jnr100 a 64 °C	0.386 (76 °C)	2.003 (64 °C)		ASTM D 7175
Creep compliance Jnr3200 a 64 °C	0.377 (76 °C)	2.546 (64 °C)		ASTM D 7175
Diferencia creep compliance Jnr a 64 °C, (%)	-2.26	27.07		ASTM D 7175
<b>Asfalto convencional Grado PG 64-16 Asfalto Modificado grado PG 76-22 E</b>				

Tabla 3. Propiedades por cada tipo de mezcla

Variable	% Contenido de asfalto	% Contenido de asfalto en el RAP	% Vacíos
Asfalto Ekbé + Basalto	5.5	N/A	6.84
Asfalto Ekbé + Basalto + Terpolímero RET	5.5	N/A	5.98
Asfalto Ekbé + Basalto + 15% de RAP	5.1	0.7	9.16
Asfalto Ekbé + Basalto + 30% de RAP	4.0	1.53	7.17
Asfalto Ekbé + Basalto + 45% de RAP	3.1	2.29%	7.55

## Análisis del efecto de daño por humedad en mezclas asfálticas mediante el módulo dinámico

ra las mezclas con asfalto convencional y RAP se mezcló a una temperatura de 155°C. Es importante mencionar que el RAP fue manejado por separado a una temperatura de 40°C con el objeto de no afectar su estado y propiedades iniciales. Posteriormente la compactación se realizó a una temperatura de 155°C para el asfalto modificado con Terpolímero RET mientras que para las restantes se compactó a 145°C, en todas las probetas se empleó el compactador giratorio SUPERPAVE con un número de giros de entre 30 y 40, esto para garantizar el porcentaje de vacíos de alrededor del 7% para que el agua pueda ingresar en mayor cantidad y generar un daño significativo en la mezcla asfáltica.

Después se realizaron las curvas maestras para cada una de las variables fabricando para esto 3 especímenes por cada tipo de mezcla, posteriormente se ensayaron a diferentes temperaturas y diferentes frecuencias como se indica en la siguiente tabla:

**Tabla 4. Frecuencias y temperaturas de ensayo para curvas maestras**

Frecuencias de ensayo (Hz)	Temperaturas de ensayo (°C)
0.1 0.5 1.0 5.0 10.0	0, 10, 20, 30 y 40.

Para la construcción de las curvas maestras se utilizó el principio de superposición de tiempo-temperatura. Se aplica un factor o una constante de cambio con respecto al logaritmo del tiempo para obtener una curva suavizada. Esto con el objetivo de observar gráficamente la rigidez y la elasticidad de cada tipo de mezcla.

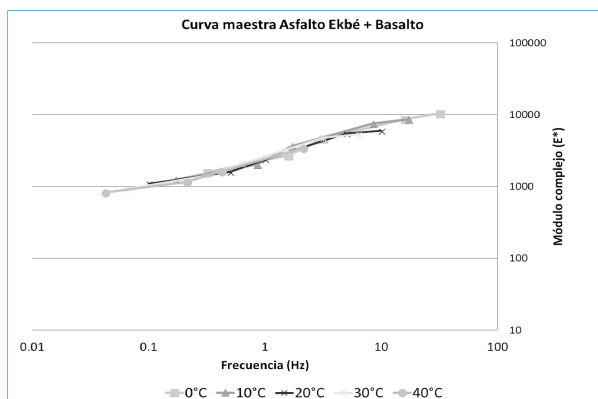


Figura 2. Curva maestra asfalto Ekbé + basalto

La curva maestra realizada para un asfalto convencional Ekbé y basalto presenta una buena curvatura lo cual indica que tiene un buen comportamiento elástico a diferentes temperaturas y frecuencias de ensayo, aunque presenta valores relativamente bajos.

El uso de Terpolímeros RET promueve mezclas más elásticas como se muestra en la curva maestra de la figura 3. En la que se observa una curvatura tenue y valores favorables de módulo dinámico a altas, bajas y medianas temperaturas además de una menor susceptibilidad en el valor de módulo con diferentes velocidades o frecuencias de aplicación de carga.

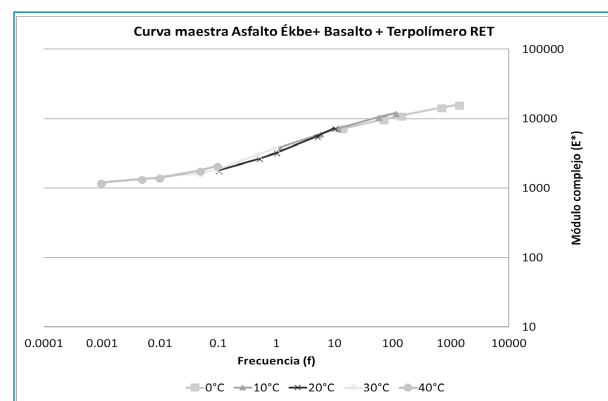


Figura 3. Curva maestra asfalto Ekbé+ Basalto + Terpolímero RET

Con el uso de 15% de material de RAP para una mezcla de granulometría densa, la curva maestra muestra un ligero aumento de rigidez en los valores, además de una pérdida de curvatura y valores altos de módulo en comparación a una mezcla con asfalto convencional.

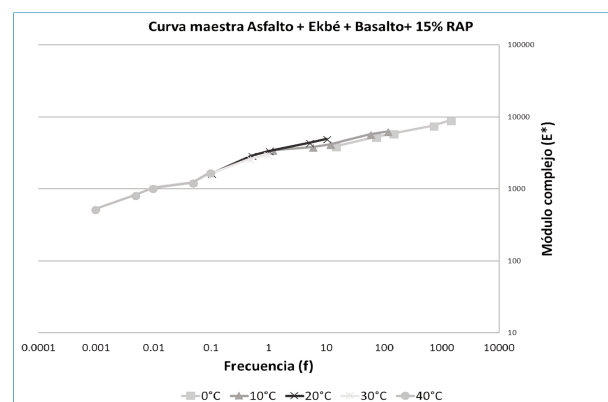


Figura 4. Curva maestra asfalto Ekbé + basalto + 15% RAP

Para la mezcla con 30% de RAP el comportamiento tiende a ser lineal con la superposición de tiempo-temperatura ade-

más de un aumento en los valores de módulo y por lo tanto en la rigidez de la mezcla, aumentando también la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga.

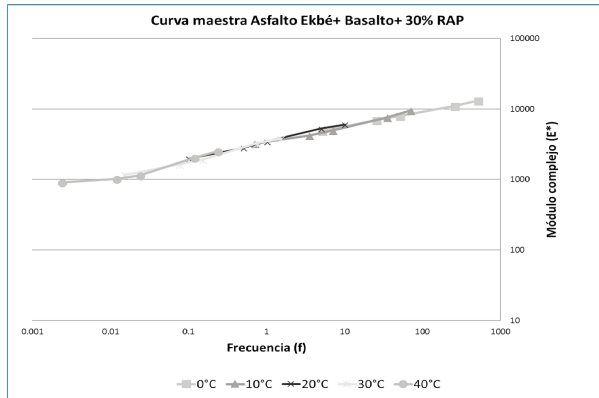


Figura 5. Curva maestra asfalto Ekbé + basalto + 30% RAP

Finalmente, para mezclas con 45% de RAP la rigidez se ve aumentada casi el doble con respecto a una mezcla con asfalto convencional, por lo que no precisamente el presentar valores de módulo altos garantizará un buen desempeño ante los mecanismos de falla de las mezclas asfálticas.

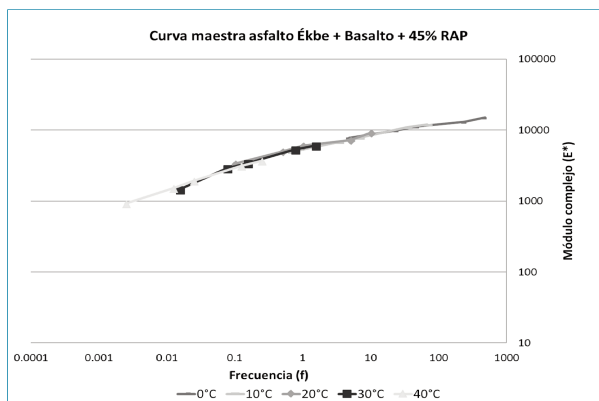


Figura 6. Curva maestra asfalto Ekbé + basalto + 45% RAP

De acuerdo con las curvas maestras obtenidas se observó que la curva que presenta un mejor comportamiento es la fabricada con asfalto modificado con Terpolímero RET+ basalto. Aunque las muestras de asfalto convencional así como la mezcla con 15% de RAP también presentaron comportamientos aceptables, mientras que las mezclas con 30 y 45% de RAP presentan una tendencia a la rigidez en la medida en la que aumenta el contenido de RAP.

Después de determinadas las curvas maestras, los especímenes fueron acondicionados y sumergidos en un baño Ma-

ria a una temperatura de 60°C con el propósito de generar un daño por humedad que modifique el valor de módulo, además de determinar que mezclas presentan mayor daño.

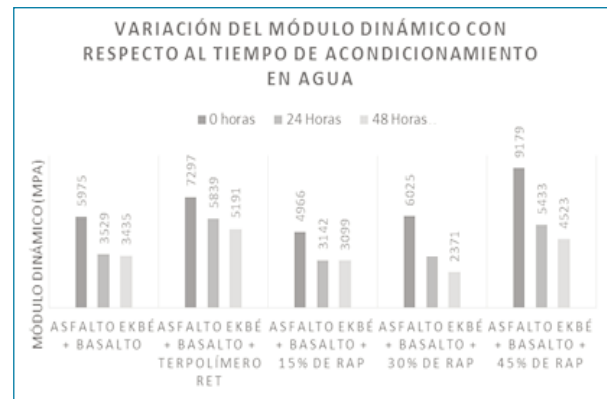


Figura 7. Variación del módulo dinámico con respecto al tiempo de acondicionamiento en agua.

De acuerdo a lo observado en la figura 7. Con respecto a las mezclas con asfalto convencional Ekbé+ basalto el daño importante se genera en las primeras 24 horas de acondicionamiento, periodo en el que los especímenes perdieron el 40% en promedio, esto tomando como referencia el valor inicial.

Para el asfalto modificado con Terpolímero RET + basalto el daño generado en los especímenes es de casi el 20% con respecto al valor inicial, mientras que en las siguientes 48 horas apenas perdió el 8%, manteniendo además valores altos con respecto a las demás mezclas asfálticas.

En cuanto a las mezclas con RAP iniciando con las mezclas que tienen el 15% de RAP, el porcentaje de pérdida de valor de modulo después de 72 horas es del 38%, muy similar al daño generado en una mezcla con asfalto convencional.

Para las mezclas con 30% de RAP el daño por humedad después de las 72 horas de acondicionamiento es mayor con respecto a la mezcla que contiene 15% de material recuperado, alcanzando el 60% de pérdida con respecto al valor inicial. Finalmente para las mezclas con 45% de RAP el porcentaje de pérdida supera el 50% de pérdida con respecto al valor inicial, aunque es importante mencionar que los valores se mantienen altos con respecto a las demás variables analizadas en este estudio.

#### 4. Conclusiones

En cuanto al efecto de la humedad es más que claro que

## Análisis del efecto de daño por humedad en mezclas asfálticas mediante el módulo dinámico

genera un daño en mezclas asfálticas, sobre todo en la edad temprana del pavimento, etapa en la que de acuerdo con los resultados en este trabajo se llega a perder hasta el 50% de su módulo inicial para mezclas convencionales provocando también deformaciones permanentes importantes.

- En general hay evidencia de que el efecto de la humedad depende de la calidad del tipo de asfalto que se aplique en la mezcla asfáltica. El asfalto modificado en este estudio presenta un desempeño superior ante el efecto de la humedad.
- El porcentaje de RAP en la mezcla también es un factor importante en el comportamiento elástico de una mezcla, para este caso el 15% de RAP utilizado en la mezcla resulta ser el porcentaje óptimo, mientras que para el 30 y 45% de RAP puede resultar en contra de un buen desempeño de la mezcla ante los efectos del agua y de un comportamiento elástico en la mezcla.
- También es evidente que la mezcla hecha con Terpolímero RET es la que presenta un mejor desempeño, caso en el que apenas se llegó a un 20% de pérdida del módulo en la etapa inicial.

### 5. Bibliografía

- [1] Charles E. Dougan, E\* - DYNAMIC MODULUS Test Protocol – Problems and Solutions. University of Connecticut. April 2003.
- [2] W. Witczak. DEVELOPMENT OF A MASTER CURVE (E\*) DATABASE FOR LIME MODIFIED ASPHALTIC MIXTURES. Arizona State University, July 2004.
- [3] PA-MA 01 (2013). DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA Densa DE ALTO DESEMPEÑO (AMAAC).
- [4] J. Aguiar. CARACTERIZACIÓN DEL DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS. Universidad de Costa Rica, Marzo 2014.
- [5] F. Leiva. MÓDULO DINÁMICO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS. Universidad de Costa Rica, Marzo 2004.