

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE POSGRADO**



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE REGRESIONES A-VTS PARA LA  
PREDICCIÓN DE MÓDULOS ELÁSTICOS EN MEZCLAS  
ASFÁLTICAS MEDIANTE EL MODELO DE WITCZAK**

**PRESENTADO POR:**

**KAREN LISSETTE ARAYA AMAYA  
RICARDO ERNESTO FLORES ESCOTO**

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
MAESTRO EN INGENIERIA VIAL**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, ENERO DE 2020**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

**MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

SECRETARIO GENERAL:

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

**PHD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA**

SECRETARIO:

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

ESCUELA DE POSGRADO

DIRECTOR:

**MSC. MANUEL ROBERTO MONTEJO SANTOS**



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA DE POSGRADO**

Trabajo de Graduación previo a la opción al grado de:

**MAESTRO EN INGENIERIA VIAL**

Título:

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE REGRESIONES A-VTS PARA LA  
PREDICCIÓN DE MÓDULOS ELÁSTICOS EN MEZCLAS  
ASFÁLTICAS MEDIANTE EL MODELO DE WITCZAK**

Presentado por:

**KAREN LISSETTE ARAYA AMAYA**  
**RICARDO ERNESTO FLORES ESCOTO**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

**MSC. RAMÓN FRITZ ALVARADO GLOWER**

SAN SALVADOR, ENERO 2020

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente asesor:

**MSC. RAMÓN FRITZ ALVARADO GLOWER**

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>1. GENERALIDADES</b> .....	<b>1</b>
1.1.    Introducción .....	2
1.2.    Antecedentes .....	4
1.3.    Planteamiento del problema.....	6
1.4.    Objetivos.....	7
1.4.1.    Objetivo general .....	7
1.4.2.    Objetivos específicos .....	7
1.5.    Alcances.....	7
1.6.    Justificación .....	8
<b>2. MARCO REFERENCIAL</b> .....	<b>9</b>
2.1.    Introducción .....	10
2.2.    Reología.....	10
2.2.1.    Aplicaciones reológicas .....	10
2.2.2.    Viscosidad .....	11
2.2.3.    Resistencia de los materiales .....	12
2.3.    Módulo dinámico $E^*$ de mezclas asfálticas .....	18
2.3.1.    Importancia del módulo dinámico $E^*$ .....	23
2.3.2.    Aplicaciones prácticas del módulo dinámico .....	24
2.3.3.    Módulo dinámico definido en el laboratorio .....	31
2.4.    Predicción de $E^*$ a partir de otros parámetros.....	33
2.4.1.    Modelo Witczak 1-37A.....	36
2.5. $E^*$ en la metodología mecánico – empírica .....	39
<b>3. PROPIEDADES DE MATERIAS PRIMAS Y MEZCLAS ASFÁLTICAS</b> .....	<b>44</b>
3.1.    Agregados pétreos .....	45
3.1.1.    Propiedades de los agregados pétreos .....	45

3.1.2.	Muestreo de agregados.....	47
3.1.3.	Control de calidad de agregados.....	48
3.2.	Ligante asfáltico .....	50
3.2.1.	Muestreo de ligantes asfálticos.....	51
3.2.2.	Propiedades de ligantes asfálticos.....	52
3.3.	Mezcla asfáltica en caliente .....	69
3.3.1.	Fecha y lugar de elaboracion.....	69
3.3.2.	Método Superpave .....	69
3.3.3.	Dosificación de agregados.....	70
3.3.4.	Diseño voluemtrico de mezclas asfálticas.....	75
3.4.	Determinación de módulos dinámicos.....	87
<b>4.</b>	<b>INTERPRETACIÓN, EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>95</b>
4.1.	Introducción .....	96
4.1.1.	Consideraciones previas al análisis.....	97
4.1.2.	Metodología del análisis .....	98
4.2.	Aplicación del modelo Witzzak 1-37A.....	99
4.2.1.	Definición de regresión A-VTS.....	99
4.2.2.	Predicciones con modelo witzzak 1-37A.....	107
4.3.	Determinación de curvas maestras .....	114
4.4.	Analisis de resultados .....	122
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>129</b>
5.1.	Conclusiones .....	130
5.2.	Recomendaciones .....	132
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>134</b>
<b>A.</b>	<b>ANEXO A – RESULTADOS DE MODULO DINÁMICO.....</b>	<b>136</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1 – Metodología M-E para el diseño de pavimentos [1].....	3
Ilustración 2.1 – Viscosímetro rotacional [3] .....	12
Ilustración 2.2 – Representación grafica del módulo de corte dinámico y ángulo de fase [2] .....	14
Ilustración 2.3 – Operación de DSR [3].....	15
Ilustración 2.4 – Dependencia del comportamiento visco-elástico de mezcla asfálticas. [4].....	18
Ilustración 2.5 – Retraso de fase entre esfuerzo sinusoidal y deformación inducida [5] .....	21
Ilustración 2.6 – Componentes del módulo dinámico $E^*$ [4] .....	22
Ilustración 2.7 – Planteamiento de diseño analítico convencional [6].....	23
Ilustración 2.8 – Deformación de mezclas asfáltica a diferentes temperaturas .....	26
Ilustración 2.9 – Curva maestra de módulo dinámico [8] .....	29
Ilustración 2.10 – Parámetros de modelo de curva maestra de mezclas asfálticas [8].....	30
Ilustración 2.11 – Esquema de ensayo de módulo dinámico AASHTO T342-11 [9].....	32
Ilustración 2.12 – Nomograma para predicción de rigidez en mezclas asfálticas [10] .....	34
Ilustración 3.1 – Acopio de agregados ASFALCA S.A. de C.V.....	48
Ilustración 3.2 – Tanques de almacenamiento ASFALCA S.A. de C.V.....	51
Ilustración 3.3 – Penetración .....	53
Ilustración 3.4 – Punto de ablandamiento .....	53
Ilustración 3.5 – Curva viscosidad vs. temperatura – Ligante “A”.....	57
Ilustración 3.6 – Curva viscosidad vs. temperatura – Ligante “B” .....	58
Ilustración 3.7 – Curva viscosidad vs. temperatura – Ligante “C”.....	59
Ilustración 3.8 – Clasificación por desempeño Superpave de ligantes asfálticos.....	61
Ilustración 3.9 – Viscosímetro Rotacional .....	62

Ilustración 3.10 – DSR.....	62
Ilustración 3.11 – RTFO .....	62
Ilustración 3.12 – PAV.....	62
Ilustración 3.13 – Distribuciones granulométricas de dosificaciones .....	73
Ilustración 3.14 – Espécimen compactado .....	88
Ilustración 3.15 – Extracción de corazón .....	88
Ilustración 3.16 – Preparación espécimen.....	88
Ilustración 3.17 – UTM.....	88
Ilustración 4.1 – Curvas maestras – MAC A-75.....	116
Ilustración 4.2 – Curvas maestras – MAC A-100.....	117
Ilustración 4.3 – Curvas maestras – MAC B-75.....	118
Ilustración 4.4 – Curvas maestras – MAC B-100.....	119
Ilustración 4.5 – Curvas maestras – MAC C-75.....	120
Ilustración 4.6 – Curvas maestras – MAC C-100.....	121
Ilustración 4.7 – Correlaciones por condición evaluada .....	125
Ilustración 4.8 – Correlación y precisión de predicción.....	126

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 – Relación entre frecuencia de carga y velocidad vehicular .....	28
Tabla 2.2 – Listado de modelos predictivos E* [5] .....	33
Tabla 2.3 – Determinación de E* en los diferentes niveles de diseño ME-PDG. [1].....	40
Tabla 2.4 – Temperaturas y frecuencias recomendadas para E* y G* [1].....	41
Tabla 2.5 – Pruebas convencionales al ligante asfáltico para determinar viscosidad.....	42
Tabla 3.1 – Requerimientos Superpave propiedades de consenso para agregados [11] .....	46
Tabla 3.2 – Fracciones de agregados .....	47
Tabla 3.3 – Distribuciones granulométricas de agregados pétreos.....	48
Tabla 3.4 – Resultados de agregados gruesos .....	49
Tabla 3.5 – Resultados de agregados gruesos .....	50
Tabla 3.6 – Fracciones de agregados .....	51
Tabla 3.7 – Requerimientos para ligantes asfálticos, clasificación por viscosidad a 60°C. [13]..	54
Tabla 3.8 – Resultados para el ligante asfáltico “A” – Clasificación por viscosidad .....	55
Tabla 3.9 – Resultados para el ligante asfáltico “B” – Clasificación por viscosidad .....	56
Tabla 3.10 – Resultados para el ligante asfáltico “C” – Clasificación por viscosidad.....	56
Tabla 3.11 – Especificación de ligantes asfálticos por grado de desempeño [14].....	64
Tabla 3.12 – Resultados ligante asfáltico “A” – Clasificación por desempeño - Adicionales .....	65
Tabla 3.13 – Resultados ligante asfáltico “B” – Clasificación por desempeño - Adicionales .....	65
Tabla 3.14 – Resultados ligante asfáltico “C” – Clasificación por desempeño - Adicionales .....	65
Tabla 3.15 – Resultados DSR* para el ligante asfáltico “A” – Asfalto original .....	66
Tabla 3.16 – Resultados DSR para el ligante asfáltico “A” – Asfalto envejecido en RTFO .....	66
Tabla 3.17 – Resultados DSR para ligante asfáltico “A” – Asfalto envejecido RTFO+PAV.....	66

Tabla 3.18 – Resultados DSR para el ligante asfáltico “B” – Asfalto original .....	67
Tabla 3.19 – Resultados DSR para el ligante asfáltico “B” – Asfalto envejecido en RTFO .....	67
Tabla 3.20 – Resultados DSR para el ligante asfáltico “B” – Asfalto envejecido RTFO+PAV ..	67
Tabla 3.21 – Resultados DSR para el ligante asfáltico “C” – Asfalto original .....	68
Tabla 3.22 – Resultados DSR para el ligante asfáltico “C” – Asfalto envejecido en RTFO .....	68
Tabla 3.23 – Resultados DSR para el ligante asfáltico “C” – Asfalto envejecido RTFO+PAV ..	68
Tabla 3.24 – Dosificación granulométrica por método Bailey – CALUW 75.0% .....	71
Tabla 3.25 – Dosificación granulométrica por método Bailey – CALUW 100.0% .....	72
Tabla 3.26 – Porcentajes para la combinación de agregados pétreos. ....	74
Tabla 3.27 – Porcentajes para la combinación de agregados pétreos. ....	74
Tabla 3.28 – Gravedad específica y absorción de agregados combinados – CALUW75 .....	75
Tabla 3.29 – Gravedad específica y absorción de agregados combinados – CALUW100 .....	75
Tabla 3.30 – Designación de mezclas asfálticas.....	76
Tabla 3.31 – Energía de compactación – Compactador Giratorio Superpave (CGS) [15].....	77
Tabla 3.32 – Requerimientos de diseño Superpave [11].....	78
Tabla 3.33 – Resultados de diseño – “MAC A-75” .....	79
Tabla 3.34 – Resultados de diseño – “MAC A-100” .....	80
Tabla 3.35 – Resultados de diseño – “MAC B-75” .....	81
Tabla 3.36 – Resultados de diseño – “MAC B-100”.....	82
Tabla 3.37 – Resultados de diseño – “MAC C-75” .....	83
Tabla 3.38 – Resultados de diseño – “MAC C-100”.....	84
Tabla 3.39 – Parámetros obtenido con el contenido optimo de asfalto para MAC A-75 .....	85
Tabla 3.40 – Parámetros obtenido con el contenido optimo de asfalto para MAC A-100 .....	85
Tabla 3.41 – Parámetros obtenido con el contenido optimo de asfalto para MAC B-75 .....	86



Tabla 3.42 – Parámetros obtenido con el contenido optimo de asfalto para MAC B-100 .....	86
Tabla 3.43 – Parámetros obtenido con el contenido optimo de asfalto para MAC C-75 .....	86
Tabla 3.44 – Parámetros obtenido con el contenido optimo de asfalto para MAC C-100 .....	87
Tabla 3.45 – Condiciones para la evaluación del módulo dinámico [16] .....	87
Tabla 3.46 – Resumen de resultados de módulo dinámico – MAC A-75 .....	89
Tabla 3.47 – Resumen de resultados de módulo dinámico – MAC A-100 .....	90
Tabla 3.48 – Resumen de resultados de módulo dinámico – MAC B-75 .....	91
Tabla 3.49 – Resumen de resultados de módulo dinámico – MAC B-100 .....	92
Tabla 3.50 – Resumen de resultados de módulo dinámico – MAC C-75 .....	93
Tabla 3.51 – Resumen de resultados de módulo dinámico – MAC C-100 .....	94
Tabla 4.1 – Factores que influyen sobre el módulo dinámico .....	97
Tabla 4.2 – Condiciones para la definición de regresión A-VTS .....	99
Tabla 4.3 – Regresiones A-VTS – Ligante “A” – Parte 1 .....	101
Tabla 4.4 – Regresiones A-VTS – Ligante “A” – Parte 2 .....	102
Tabla 4.5 – Regresiones A-VTS – Ligante “B” – Parte 1 .....	103
Tabla 4.6 – Regresiones A-VTS – Ligante “B” – Parte 2 .....	104
Tabla 4.7 – Regresiones A-VTS – Ligante “C” – Parte 1 .....	105
Tabla 4.8 – Regresiones A-VTS – Ligante “C” – Parte 2 .....	106
Tabla 4.9 – Predicción de módulos elásticos Witczak 1-37A – MAC A-75 .....	108
Tabla 4.10 – Predicción de módulos elásticos Witczak 1-37A – MAC A-100 .....	109
Tabla 4.11 – Predicción de módulos elásticos Witczak 1-37A – MAC B-75 .....	110
Tabla 4.12 – Predicción de módulos elásticos Witczak 1-37A – MAC B-100 .....	111
Tabla 4.13 – Predicción de módulos elásticos Witczak 1-37A – MAC C-75 .....	112
Tabla 4.14 – Predicción de módulos elásticos Witczak 1-37A – MAC C-100 .....	113

Tabla 4.15 – Parámetros de curva maestra – MAC A-75 .....	114
Tabla 4.16 – Parámetros de curva maestra – MAC A-100.....	114
Tabla 4.17 – Parámetros de curva maestra – MAC B-75.....	115
Tabla 4.18 – Parámetros de curva maestra – MAC B-100.....	115
Tabla 4.19 – Parámetros de curva maestra – MAC C-75.....	115
Tabla 4.20 – Parámetros de curva maestra – MAC B-100.....	115
Tabla 4.21 – Índice de sensibilidad.....	127
Tabla 4.22 – Sensibilidad del modelo predictivo Witczak 1-37A.....	128
Tabla A.1 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC A-75 – EP1 .....	ii
Tabla A.2 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC A-75 – EP2 .....	iii
Tabla A.3 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC A-75 – EP3 .....	iv
Tabla A.4 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC A-75 – EP4 .....	v
Tabla A.5 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC A-100 – EP1 .....	vi
Tabla A.6 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC A-100 – EP2 .....	vii
Tabla A.7 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC A-100 – EP3 .....	viii
Tabla A.8 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC A-100 – EP4 .....	ix
Tabla A.9 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC B-75 – EP1 .....	x
Tabla A.10 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC B-75 – EP2.....	xi
Tabla A.11 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC B-75 – EP3.....	xii
Tabla A.12 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC B-75 – EP4.....	xiii
Tabla A.13 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC B-100 – EP1.....	xiv
Tabla A.14 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC B-100 – EP2.....	xv
Tabla A.15 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC B-100 – EP3.....	xvi
Tabla A.16 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC B-100 – EP4.....	xvii

Tabla A.17 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC C-75 – EP1..... xviii

Tabla A.18 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC C-75 – EP2.....xix

Tabla A.19 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC C-75 – EP3.....xx

Tabla A.20 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC C-75 – EP4.....xxi

Tabla A.21 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC C-100 – EP1.....xxii

Tabla A.22 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC C-100 – EP2..... xxiii

Tabla A.23 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC C-100 – EP3.....xxiv

Tabla A.24 – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC C-100 – EP4.....xxv

---

# **CAPITULO 1**

## **GENERALIDADES**

---

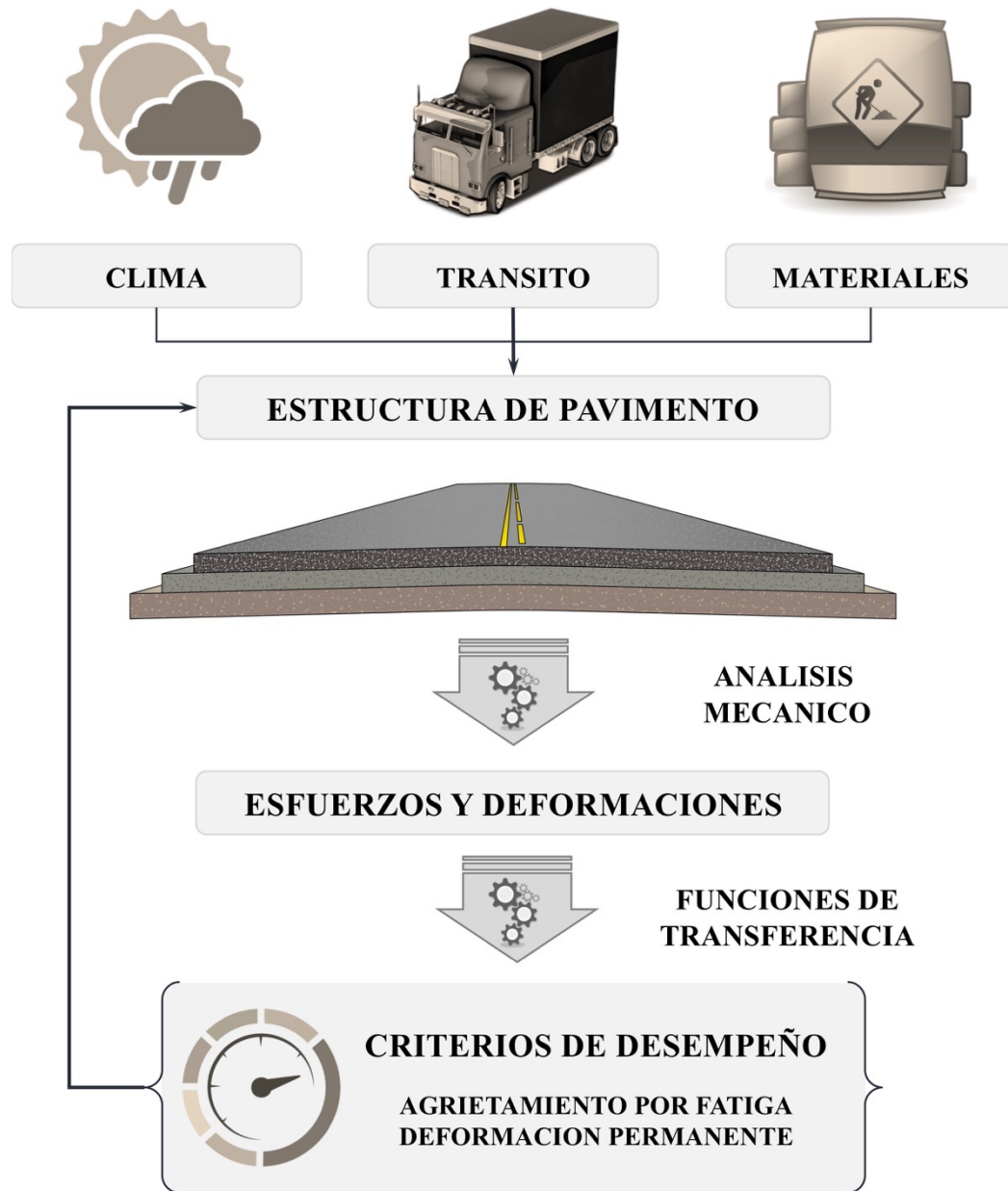
## 1.1. INTRODUCCIÓN

En el marco de la metodología para el diseño de pavimentos mecánico–empírico (M-E), se utilizan cuatro variables principales para predecir las respuestas del pavimento y, en última instancia, el desempeño del pavimento, lo cual facilita el proceso de selección de una sección estructural que cumpla con las solicitaciones a las cuales estará sometida. La metodología de diseño M-E permite que las propiedades mecánicas de los materiales seleccionados se utilicen junto con la información empírica de desempeño y las condiciones del sitio (tránsito y clima), como se muestra en la Ilustración 1.1. Estas variables son utilizadas para predecir las respuestas del pavimento, esfuerzos ( $\sigma$ ) y deformaciones ( $\epsilon$ ), en ubicaciones críticas mediante análisis mecánico. Dichas predicciones se pueden realizar con la ayuda de modelos de análisis de capas elásticas (LEA) o modelos de elementos finitos. Los datos históricos de desempeño son utilizados para crear funciones de transferencia precisas que se utilizan para estimar la cantidad de cargas a aplicar previo a la falla en función de las respuestas mecánicas pronosticadas.

Uno de los elementos clave del diseño de pavimentos flexible bajo la metodología de diseño M-E es la caracterización de las propiedades de los materiales. Entre estas propiedades, el módulo dinámico de las mezclas asfálticas,  $E^*$ , tiene gran influencia en la determinación de las magnitudes de los esfuerzos y deformaciones en estructuras de pavimento flexible, por lo que es necesario investigar esta propiedad para predecir con éxito el desempeño estructural del pavimento.

El valor  $E^*$  puede ser determinado directamente mediante pruebas de laboratorio o puede ser estimado a través de ecuaciones predictivas en función de las propiedades de la mezcla asfáltica y sus materias primas, ambas alternativas válidas para el diseño de pavimentos a través de metodología mecánico–empírica.

**Ilustración 1.1** – Metodología M-E para el diseño de pavimentos [1]



En base a lo anterior, se presenta una investigación sobre la función predictiva de Witczak 1-37A, utilizada por ME-PDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide), en la cual se realizaron comparaciones entre los diversos métodos de caracterización de ligantes asfálticos (viscosidad y reología) contra los resultados de laboratorio para mezclas producidas en laboratorio.

## 1.2. ANTECEDENTES

Bajo la formulación del proyecto NCHRP 1-37A se desarrollo la guía de diseño de pavimentos ME-PDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide). El objetivo de la guía de diseño ME-PDG es identificar las causas físicas de los esfuerzos en las estructuras de pavimento y calibrarlas en función del desempeño observado en el pavimento. Ambos elementos definen el enfoque de diseño del pavimento: El enfoque en las causas físicas es la componente “mecánica”, y el uso del desempeño observado para definir predicciones de comportamiento es la componente “empírica”.

La guía de diseño ME-PDG fue desarrollada para reemplazar a la guía de diseño AASHTO '93, que se basa principalmente en relaciones matemáticas resultado de las observaciones empíricas efectuadas en el AASHTO Road Test, realizado en los años 50's. En contraste, la metodología ME-PDG se basa en los principios de comportamiento mecánico de la estructura de pavimentos, requiriendo para su análisis la definición de diversos parámetros entre los cuales destaca el valor del módulo elástico de la mezcla asfáltica, el cual es necesario para la determinación de los esfuerzos y deformaciones en pavimentos con capas de rodadura compuestas por mezclas asfálticas.

En 1,999, la comisión designada por NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) para la elaboración del proyecto NCHRP 1-37A selecciono el concepto de módulo dinámico,  $E^*$ , para este propósito. La selección de este parámetro se baso en el articulo “A comparison of the dynamic (complex) modulus test ( $E^*$ ) and Indirect Diametral Test ( $M_r$ ) for AC mixtures” escrito por M.W. Witczak en 1,999. En el cual comparo los resultados de la prueba de módulo dinámico ( $E^*$ ) contra los obtenidos bajo la prueba de tensión diametral indirecta ( $M_r$ ).

Brevemente,  $E^*$  se define como el módulo de un material visco-elástico. El módulo dinámico (complejo) de una evaluación visco-elástica es una respuesta desarrollada bajo condiciones de carga sinusoidal. Este valor es un número real complejo, ya que contiene una componente “real” y una componente “imaginaria” de módulo, la cual normalmente se identifica como  $E^*$ , y que por definición es el módulo dinámico. Sin embargo, el término módulo dinámico, también puede ser referido para denotar cualquier tipo de módulo que haya sido determinado en condiciones de carga “no estáticas”.

El protocolo para la determinación de módulo dinámico se define como una evaluación visco-elástica lineal para materiales asfálticos que fue desarrollada originalmente por Coffman y Pagen en la Universidad Estatal de Ohio en los años 60's. La evaluación se puede ejecutar bajo condiciones de carga uniaxial (triaxial) en compresión o tensión, teniendo mayor frecuencia de aplicación en los últimos 30 años los estados de carga bajo compresión durante los proyectos de investigación SHRP (Strategic Highway Research Program) y SuperPave (Superior Performance Pavements), siendo generalmente definidos como  $E^*$ . Este protocolo de evaluación fue adoptado como “Prueba para la selección de módulos” por el Instituto del Asfalto de los Estados Unidos a fines de los años 60's por Kallas, Shook y Witzak. Posteriormente, se convirtió en una prueba ASTM a principio de los años 70's, tomando la designación ASTM D3496. Mas recientemente, el protocolo para la determinación de  $E^*$ , ha sido refinado por Witzak y colaboradores en la Universidad Estatal de Arizona.

Los motivos para llevar a cabo la implementación de  $E^*$ , se encuentran en las deficiencias de las metodologías utilizadas para obtener el módulo de resiliencia ( $M_r$ ), parámetro seleccionado para caracterizar a las mezclas asfálticas en la guía de diseño AASHTO '93.



### **1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Con el fin de promover la implementación de las nuevas metodologías mecánico–empíricas para el diseño de pavimentos, el interés por parte de las agencias estatales responsables de la administración de la red vial de diversos países, se ha centrado en encontrar un método rápido, fácil y confiable para la obtención del valor de módulo dinámico de las mezclas asfáltica.

El ensayo de laboratorio de módulo dinámico es usualmente utilizado para la obtención directa del valor de  $E^*$  a partir de un universo de muestras. Sin embargo, la realización de estas pruebas requiere de equipos costosos, personal de laboratorio experimentado y un tiempo de espera relativamente largo previo al reporte de resultados. Por lo cual, han sido desarrollados modelos de predicción como métodos alternativos para la determinación de los valores de módulo dinámico. Los valores  $E^*$  pueden ser estimados fácilmente a partir de ciertas propiedades básicas de los agregados pétreos, ligante asfáltico y mezcla asfáltica, sin la necesidad de realizar ensayos específicos del valor  $E^*$ .

En tal sentido, esta investigación se centrará en realizar un análisis comparativo de diversas metodologías para la estimación del módulo dinámico a través de la ecuación predictiva de Witzak, las cuales serán evaluadas respecto a la medición directa del parámetro.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. OBJETIVO GENERAL**

- Realizar el análisis comparativo de las predicciones de módulo elástico adquiridos por medio de regresiones A-VTS determinadas a partir del DSR y viscosímetro BROOKFIELD respecto a los resultados obtenidos en maquina universal aplicando la normativa AASHTO T342.

### **1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar las regresiones A-VTS a partir de los resultados del viscosímetro Brookfield para distintos tipos de ligantes asfálticos.
- Determinar las regresiones A-VTS a partir de los resultados del Reómetro de Corte Dinámico (DSR) para distintos tipos de ligantes asfálticos.
- Determinar los módulos elásticos de manera directa aplicando la normativa AASHTO T342, para distintos escenarios de carga y temperatura, y diferentes tipos de mezclas asfálticas.
- Aplicar la ecuación de Witczak para la determinación del módulo elástico utilizando las regresiones A-VTS para distintos ligantes asfálticos y diferentes tipos de mezclas asfálticas.

## **1.5. ALCANCES**

- El análisis será efectuado considerando los ligantes asfálticos vírgenes distribuidos por los 3 proveedores con mas presencia en la región Centroamericana, a los cuales se determinará sus respectivas regresiones A-VTS por medio del Viscosímetro Rotacional Brookfield (RV) y el Reómetro de Corte Dinámico (DSR).

- A partir de las regresiones A-VTS obtenidas por ambos métodos y para los diversos ligantes asfálticos considerados, se realizarán la estimación del módulo dinámico por medio de la función de Witczak 1-37A, en la cual se considerarán dos distribuciones granulométricas de agregados pétreos, estos resultados serán comparados con los obtenidos por medio de Máquina Universal (UTM) bajo la normativa AASHTO T342 y considerando las mismas condiciones.

## **1.6. JUSTIFICACIÓN**

En El Salvador, los últimos años, las agencias estatales han presentado gran interés en determinar ciertas características mecánicas de los materiales que conforman la estructura de pavimentos, con el fin de determinar el desempeño que tendrán durante su periodo de servicio. Este esfuerzo se ha realizado con especial énfasis en las carpetas asfálticas, analizando sus materias primas (asfaltos y agregados) y el producto manufacturado (mezcla asfáltica).

Entre las propiedades que mas atención ha demandado por parte de las agencias se encuentra el módulo dinámico de las mezclas asfálticas,  $E^*$ , ya que su adecuada obtención permite establecer si una estructura de pavimentos presentara o no un adecuado desempeño, por lo cual, su correcta determinación se ha convertido en tema clave para los involucrados en la administración de la infraestructura vial del país. Sin embargo, la obtención de este parámetro presenta ciertas dificultades, entre las cuales destaca la poca presencia en el medio salvadoreño de equipo apropiado para su determinación, por lo cual, el uso de ecuaciones que permiten la predicción del valor del módulo elástico se ha convertido en la opción mas viable.

---

## **CAPITULO 2**

### **MARCO REFERENCIAL**

---

## **2.1. INTRODUCCIÓN**

En el marco de la metodología para el diseño de pavimentos mecánico–empírico (M-E), el módulo dinámico,  $E^*$ , es una de las propiedades más relevantes de las mezclas asfálticas, ya que determina su respuesta tenso–deformacional frente a acciones termo–mecánicas externas, necesarias para predecir las respuestas del pavimento y, en última instancia, el desempeño del mismo.

La dificultad para caracterizar con precisión las propiedades de las mezclas asfálticas radica en la naturaleza visco-elástica del material. En el caso particular del módulo dinámico de la mezcla asfáltica ( $E^*$ ), este refleja la dependencia del material respecto al tiempo y la temperatura. Esta propiedad del material es la relación entre esfuerzo y deformación en el material, y por lo tanto influye en la respuesta cuando es sometido a cargas. Por lo tanto, una comprensión completa de esta propiedad y los factores que la influyen es necesaria para caracterizarla con precisión para su aplicación en procedimientos de diseño estructural para pavimentos.

## **2.2. REOLOGÍA**

La reología se define como la ciencia que estudia la deformación y el flujo de los materiales bajo la aplicación de una carga [2].

### **2.2.1. APLICACIONES REOLÓGICAS**

Dentro de la física, es la ciencia que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir siendo una parte de la mecánica de medios continuos. Su objetivo es determinar la deformación de los cuerpos que no son ni sólidos ni líquidos, es decir, de cuerpos intermedios entre sólido elástico y líquido viscoso, enfocándose en la definición de las siguientes propiedades: la viscosidad, la teoría de la elasticidad y resistencia de los materiales.

### **2.2.2. VISCOSIDAD**

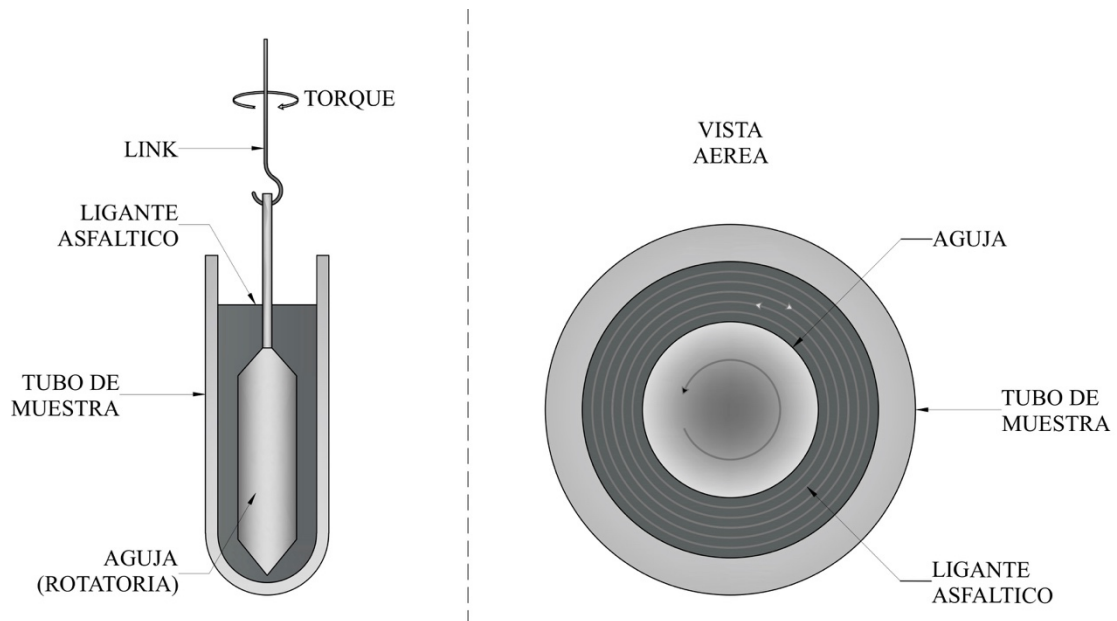
El estudio reología de los ligantes asfálticos se enfoca en la variación de las propiedades del flujo a través del tiempo de aplicación de una carga e incluye una propiedad muy importante: la viscosidad. La viscosidad de asfalto varía con la temperatura en mayor o menor grado (susceptibilidad térmica) y su estudio es muy importante y de interés práctico, porque en todas las aplicaciones del asfalto se debe modificar su viscosidad mediante el calentamiento. A temperaturas altas el asfalto se considera un fluido viscoso, mientras que a temperaturas bajas de servicio se considera un material sólido con propiedades elásticas.

#### **2.2.2.1. VISCOSÍMETRO ROTACIONAL**

Para la definición de la viscosidad, en la actualidad, es utilizada la prueba de viscosidad rotacional para determinar las características de flujo de un ligante asfáltico a altas temperaturas, con el fin de verificar su trabajabilidad durante la fabricación y colocación de mezclas asfálticas. Para tal motivo, se requiere el uso de un viscosímetro de cilindro coaxial rotacional, para la evaluación de los diversos tipos de ligantes asfálticos.

Al utilizar un viscosímetro rotacional, la viscosidad se determina midiendo el par requerido para mantener una velocidad rotacional constante de una “aguja” cilíndrica sumergida en una muestra de ligante asfáltico a una temperatura constante. Debido a que la viscosidad de este ligante asfáltico se utiliza para asegurar que el asfalto sea lo suficientemente fluido a temperaturas normales de operación para bombear y mezclar con el agregado, se mide bajo la condición “original” (no envejecido). El viscosímetro también se puede usar para desarrollar gráficos de temperatura y viscosidad para estimar las temperaturas de mezcla y compactación para usar en el diseño de mezclas.

**Ilustración 2.1 – Viscosímetro rotacional [3]**



### 2.2.3. RESISTENCIA DE LOS MATERIALES

Dentro de la rama de la mecánica, la reología se encarga de analizar el comportamiento de la materia a través del tiempo de aplicación de la carga, mediante el estudio de propiedades de flujo y deformación como la viscosidad, la ductilidad y la fragilidad, permitiendo establecer una relación entre el estado coloidal de los ligantes asfálticos y su composición química.

Cualquier material sometido a un esfuerzo cortante suficientemente grande es capaz de deformarse o fluir. Mientras la mecánica racional considera los cuerpos como elementos indeformables y la mecánica elástica los asimila a sólidos perfectamente elásticos, consecuentes con la ley de Hooke, la reología trata el caso más general en el que las deformaciones producidas, por un agente exterior o por un proceso intrínseco aparecen ligadas íntimamente al factor tiempo.

### 2.2.3.1. REÓMETRO DE CORTE DINÁMICO (DSR)

En la actualidad, se utiliza el reómetro de corte dinámico para determinar las propiedades mecánicas (reológicas) de un ligante asfáltico, incluido el módulo de corte dinámico ( $G_b^*$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ), en un amplio rango de temperaturas. Estos parámetros pueden utilizarse para caracterizar el comportamiento viscoso y elástico de los ligantes asfálticos.

El módulo de corte dinámico ( $G_b^*$ ), es una medida de la resistencia total de un material a la deformación cuando es expuesto a una carga de esfuerzo cortante sinusoidal.  $G_b^*$  consta de un componente elástico (deformaciones recuperables) y viscosos (deformaciones residuales). El ángulo de fase ( $\delta$ ) es un indicador de las cantidades relativas de los componentes elástico y viscoso. Los valores de  $G_b^*$  y  $\delta$  para los ligantes asfálticos dependen en gran medida de la temperatura de ensayo y la frecuencia de carga.

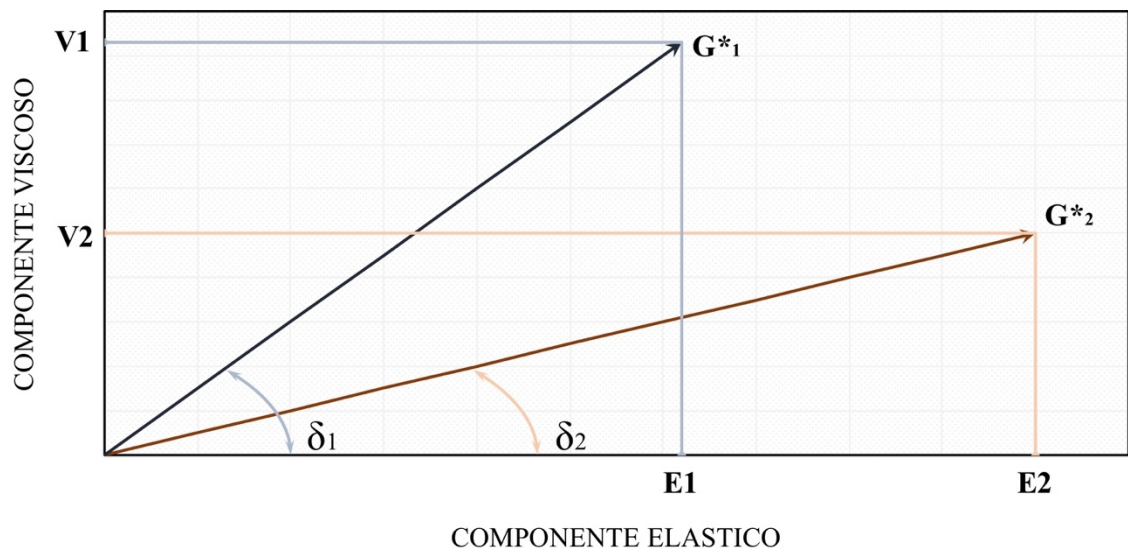
A altas temperaturas (y frecuencias de carga lentas), los ligantes asfálticos se comportan como fluidos viscosos con poca capacidad de recuperación. En este caso, el ligante asfáltico podría ser representado por el eje vertical (únicamente componente viscoso) en la Ilustración 2.2; no habría componente elástico de  $G_b^*$ , ya que  $\delta=90^\circ$ . A temperaturas muy bajas, los ligantes asfálticos se comportan como sólidos elásticos, que se recuperan completamente de la deformación, esta condición esta representada por el eje horizontal (únicamente componente elástico) en la Ilustración 2.2. En este caso, no hay un componente viscoso de  $G_b^*$ , ya que  $\delta=0^\circ$ . Bajo condiciones de temperaturas promedios en los pavimentos y bajo las frecuencias de aplicación de carga por parte del tránsito, los ligantes asfálticos actúan con las características de líquidos viscosos y sólidos elásticos, y se dice que son materiales visco-elásticos. Al medir  $G_b^*$  y  $\delta$ , el



DSR proporciona un indicador del comportamiento del ligante asfáltico en un rango de temperaturas de servicio para el pavimento.

Las líneas vectoriales mostradas en Ilustración 2.2,  $G_1^*$  y  $G_2^*$ , representan los valores de módulo complejo de los ligantes asfálticos 1 y 2. Cuando se someten a carga los ligantes asfálticos, parte de su deformación es elástica (E) y parte es viscosa (V). Aunque los dos ligantes asfálticos mostrados en Ilustración 2.2 son visco-elásticos y tienen el mismo valor de  $G_b^*$ , la muestra 2 es mas elástica que la muestra 1, debido a su menor  $\delta$ . Debido a que la muestra 2 tiene un componente elástico mayor, recuperará mucha mas deformación de una carga aplicada que la muestra 1. Este análisis muestra claramente que únicamente  $G_b^*$  no puede describir el comportamiento del ligante asfáltico, también se requiere el valor de  $\delta$ .

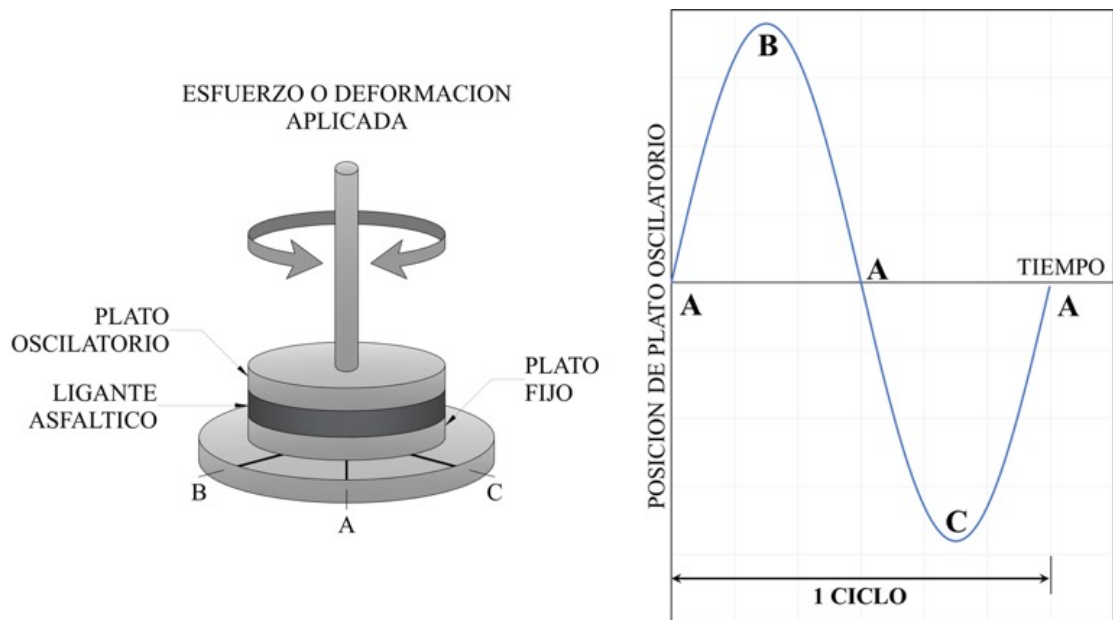
**Ilustración 2.2** – Representación grafica del módulo de corte dinámico y ángulo de fase [2]



La operación de un DSR es bastante básica. Una muestra de ligante asfáltico se coloca entre dos platos paralelos, un plato inferior fijo y un plato superior oscilatorio. A medida que el plato superior oscila, la línea central del plato en el punto A, se mueve al punto B. Desde el punto B, la

línea central del plato se mueve hacia atrás y pasa el punto A al punto C. Desde el punto C, la línea central del plato retrocede al punto A. Esta oscilación es de un ciclo y se repite durante un número específico de ciclos. El número de ciclos completados en un segundo es la frecuencia de carga. Por lo general, las pruebas en el DSR que se ejecutan con fines de especificación se realizan a una frecuencia de aproximadamente 1.59 Hz, equivalente a 10 rad/s. La tensión y la deformación son medidas durante cada ciclo de carga y se utilizan para determinar  $G_b^*$  y  $\delta$ .

**Ilustración 2.3 – Operación de DSR [3]**



$G^*$  y  $\delta$  son utilizados para predecir el ahuellamiento y el agrietamiento por fatiga en una mezcla asfáltica. Al principio de la vida útil del pavimento, el ahuellamiento es la principal preocupación, mientras que después de varios años en servicio, el agrietamiento por fatiga se convierte en el principal problema.

### 2.2.3.2. DESEMPEÑO SOBRE LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

El ahuellamiento es un tipo de falla que se produce en pavimentos flexibles, que consiste en una depresión canalizada en la huella de circulación de los vehículos. Se produce debido a una combinación de altos niveles de tránsito, tránsito pesado y/o lento, y altas temperaturas de servicio.

Para resistir la formación de ahuellamiento en el pavimento, un ligante asfáltico debe ser rígido (no debe deformarse demasiado) y debe ser elástico (debe volver a su forma original después de la deformación ocasionada por la aplicación de carga). Por lo tanto, la porción elástica del módulo de corte complejo  $G^*/\sin(\delta)$  debe ser poseer magnitudes considerables. Cuando la aparición del ahuellamiento es la principal preocupación durante la vida temprana y media de una mezcla asfáltica, se especifica un valor mínimo para el componente elástico del módulo de corte complejo. Intuitivamente, cuanto mayor es el valor de  $G^*$ , más rígido es el ligante asfáltico y cuanto menor es el valor de  $\delta$ , mayor es la proporción elástica de  $G^*$ , siendo capaz de recuperar su forma original después de ser deformado por una carga.

Otra manera de analizar esta situación, es considerar que el ahuellamiento es básicamente un fenómeno de carga cíclica. Con cada ciclo de carga aplicada por el tránsito, se está induciendo trabajo en la superficie del pavimento a deformarse. Parte de este trabajo se recupera por la recuperación elástica de la superficie del pavimento, mientras que parte se disipa en forma de deformación permanente, calor, grietas y propagación de grietas. Para minimizar el trabajo disipado por ciclo de carga, se debe maximizar el parámetro  $G^*/\sin(\delta)$ . Por lo tanto, se especifican valores mínimos para  $G^*/\sin(\delta)$  para las pruebas DSR realizadas en el ligante asfáltico en condición original (no envejecido) y acondicionado por RTFO. Los límites de ensayo son para la condición original requiere que el valor mínimo de  $G^*/\sin(\delta)$  de 1.0 kPa, para los ligantes asfálticos acondicionados en RTFO el  $G^*/\sin(\delta)$  el valor mínimo es 2.2 kPa.

### **2.2.3.3. DESEMPEÑO SOBRE EL AGRIETAMIENTO POR FATIGA**

La falla estructural en un pavimento se presenta cuando los materiales que conforman la estructura, al ser sometida a repeticiones de carga por acción del tránsito, sufren un agrietamiento estructural relacionado con la deformación o la tensión horizontal por tracción en la base de cada capa; esto se denomina falla por fatiga o sea por repeticiones de carga.

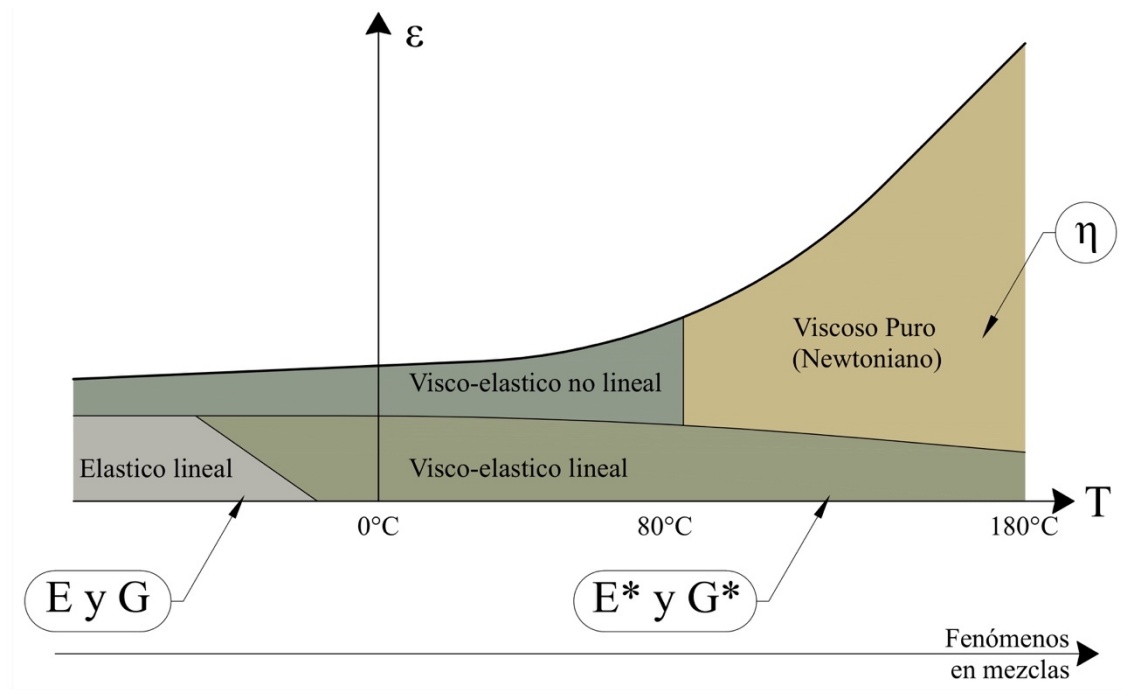
Para resistir el agrietamiento por fatiga un ligante asfáltico este debe ser elástico, siendo capaz de disipar la energía recuperándose y no agrietándose. En contraparte, no debe ser demasiado rígido, ya que los materiales excesivamente rígidos son mas propensos a agrietarse en lugar de deformarse y recuperarse. Por lo tanto, la porción viscosa del módulo de corte complejo  $G^* \cdot \sin(\delta)$  debe ser mínima. Cuando el agrietamiento por fatiga es la mayor preocupación, al final de la vida útil de un pavimento, se especifica un valor máximo para el componente viscoso del  $G_b^*$ .

Desde otra óptica, el agrietamiento por fatiga puede considerarse como un fenómeno controlado por esfuerzos de compresión en carpetas asfálticas gruesas y controlado por esfuerzos a tracción en carpetas asfálticas delgadas. Dado que el agrietamiento por fatiga es mas frecuente en carpetas asfálticas delgadas, el parámetro mas influyente en la resistencia a la fatiga puede considerarse uno controlado por los esfuerzos a tracción. Al igual que en el escenario de deformación permanente, cuanto menor sea la cantidad de trabajo disipado por ciclo de carga, menos probable es el agrietamiento por fatiga. La relación entre  $G^* \cdot \sin(\delta)$  y el agrietamiento por fatiga es más sutil que la relación en el ahuellamiento. Para minimizar el trabajo disipado por ciclo de carga, se debe minimizar el parámetro  $G^* \cdot \sin(\delta)$ . Por lo tanto, se especifican los valores máximos para  $G^* \cdot \sin(\delta)$  para las pruebas DSR realizadas en ligantes asfálticos acondicionados en PAV, donde el valor máximo es 5,000.0 kPa.

### 2.3. MÓDULO DINAMICO $E^*$ DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Como ha sido expuesto en el numeral anterior, el comportamiento y consistencia del ligante asfáltico presenta una dependencia a la temperatura. De este modo, a altas temperaturas se comporta como un fluido Newtoniano (viscoso), y a bajas temperaturas se comporta como un material elástico. Por otro lado, a temperaturas intermedias (comúnmente temperatura ambiente) este material presenta un comportamiento intermedio entre un fluido viscoso y un sólido elástico. Para facilitar el análisis, las mezclas asfálticas suelen ser consideradas como homogéneas, isotrópicas y lineales para ciertos rangos de esfuerzo-deformación. Esta suposición permite considerar las características y propiedades de fracciones de mezclas asfálticas, como representativas de una masa determinada de material, evitando discrepancias en el análisis de las propiedades medidas.

**Ilustración 2.4** – Dependencia del comportamiento visco-elástico de mezcla asfálticas. [4]



La Ilustración 2.4 muestra los diferentes rangos de comportamiento de una mezcla asfáltica, según las deformaciones y temperaturas a las cuales es sometida. En la Ilustración 2.4 se visualiza que, en un amplio margen de temperaturas y bajas deformaciones, las mezclas asfálticas presentan un comportamiento visco-elástico lineal. Además, es notorio que el comportamiento de la mezcla depende de la temperatura. Para bajas temperaturas, el asfalto se comporta como un sólido elástico; razón por la cual, la mezcla hereda este comportamiento. Lo mismo ocurre a altas temperaturas, el asfalto se comporta como un fluido viscoso, proporcionando este comportamiento a la mezcla. Lo anterior manifiesta una clara tendencia a que el componente que más influye en el comportamiento de la mezcla, es el ligante asfáltico.

La naturaleza visco-elástica heredada por las mezclas asfálticas, se puede caracterizar en parte por su módulo dinámico, que es una medida de la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación bajo carga sinusoidal, definido como el valor absoluto del módulo complejo.

El módulo dinámico,  $E^*$ , es empleado para predecir la respuesta estructural del pavimento frente a las cargas del tránsito, así como los esfuerzos desarrollados bajo deformaciones impuestas por los agentes ambientales y los asentamientos de las capas subyacentes. La práctica totalidad de los métodos de diseño analíticos para estructuras de pavimentos se basan en esta variable, en particular los procedimientos mecánico-empíricos recursivo-incrementales de última generación como la guía de diseño mecánico-empírica, típicamente conocida como MEPDG. Además, de ser uno de los ensayos candidatos para complementar al diseño volumétrico Superpave.

El módulo dinámico se determina a partir de el esfuerzo máximo aplicado y la deformación axial máxima recuperable, descrita por la Ecuación 2.1. Cabe señalar que, aunque el módulo dinámico es el valor absoluto del módulo complejo, este se denotara simplemente como  $E^*$ .

**Ecuación 2.1 [5]**

$$E^* = \sqrt{\left(\frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \cdot \cos(\varphi)\right)^2 + \left(\frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \cdot \sin(\varphi)\right)^2} = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o}$$

Donde:

- $E^*$ : Módulo dinámico (psi)
- $\sigma_o$ : Amplitud de esfuerzos (psi)
- $\varepsilon_o$ : Amplitud de deformaciones ( $\mu\varepsilon$ )
- $\phi$ : Angulo de fase (radianes)

Otro parámetro que determina el comportamiento de las mezclas asfálticas es el ángulo de fase,  $\phi$ , que se define como el retraso en la deformación axial inducida en relación con el esfuerzo de compresión aplicado, ilustrado en la Ilustración 2.5, donde el pulso del esfuerzo sinusoidal se define por la velocidad angular, “ $\omega$ ”, y el tiempo, “ $t$ ”. Este retraso de fase ilustra la dependencia del tiempo en las mezclas asfálticas. Debido a las relaciones tiempo-frecuencia, se puede afirmar que las mezclas asfálticas presentan un comportamiento dependiente de la frecuencia de carga. Esto se aclara mediante las ecuaciones que definen la carga sinusoidal (esfuerzo) y la respuesta sinusoidal (deformación) en la Ilustración 2.5. El pulso de esfuerzo y el pulso de deformación resultante están definidos por la frecuencia angular, que a su vez es una función de la frecuencia de carga, determinada por la Ecuación 2.2.

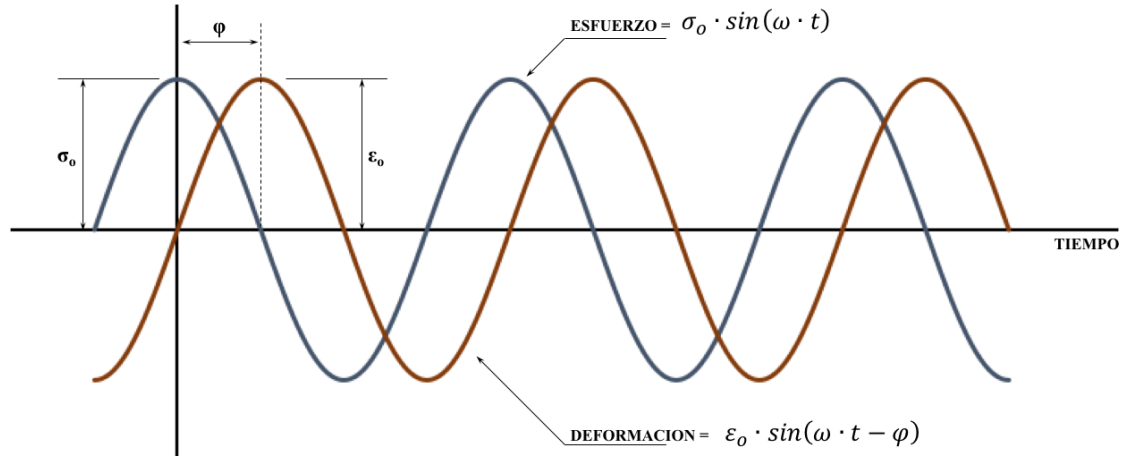
**Ecuación 2.2 [5]**

$$\omega = 2\pi f$$

Donde:

- $\omega$ : Frecuencia angular (rad/seg)
- $f$ : Frecuencia de carga (Hz)

**Ilustración 2.5** – Retraso de fase entre esfuerzo sinusoidal y deformación inducida [5]



Las mezclas asfálticas no solo son dependientes de la frecuencia, también presentan dependencia de la temperatura. Las pruebas de laboratorio de  $E^*$  revelan que la variación de la temperatura en mezclas asfálticas da como resultado diferentes magnitudes de deformación recuperable y, por lo tanto, variaciones en el módulo dinámico.

El módulo complejo consta de dos componentes, la componente real, que representa la rigidez elástica, y la componente imaginaria, que representa la amortiguación interna de los materiales, generalmente conocida como componente viscosa o plástica del material.

**Ecuación 2.3 [4]**

$$E_1 = |E^*| \cdot \cos(\varphi)$$

**Ecuación 2.4 [4]**

$$E_2 = i \cdot |E^*| \cdot \sin(\varphi)$$

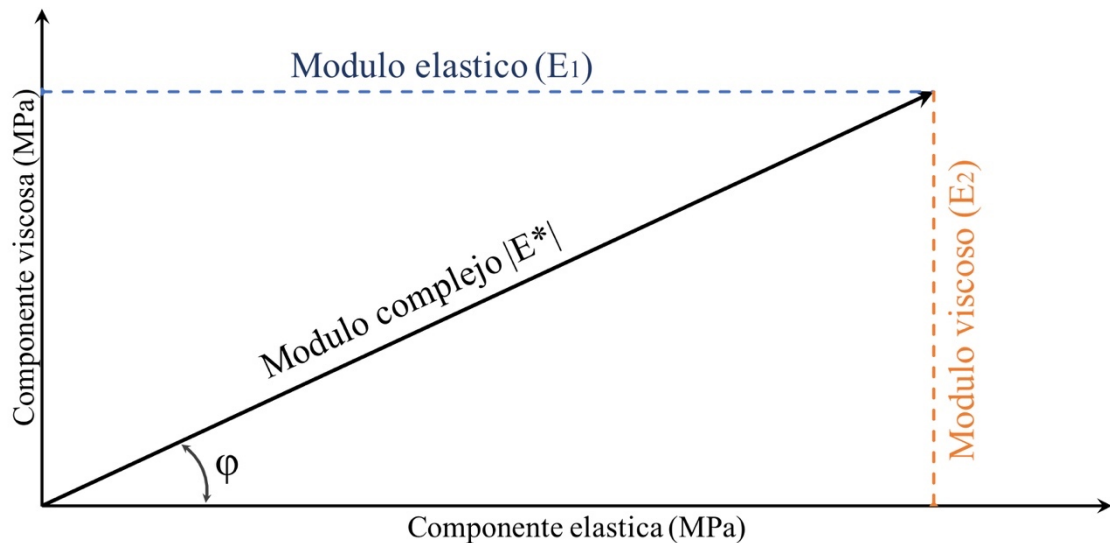
Donde:

- $E_1$ : Componente elástica del material (MPa)
- $E_2$ : Componente viscosa o plástica del material (MPa)



Para materiales puramente elásticos, el ángulo de fase es cero, y en ese caso el módulo complejo se hace igual al módulo de Young. Esto ocurre cuando los materiales asfálticos se encuentran a bajas temperaturas, y/o cuando el asfalto se encuentra envejecido. En este caso el módulo complejo alcanza su máximo valor posible. Este fenómeno, definido por la Ecuación 2.3, condiciona la fisuración por fatiga de la mezcla asfáltica. La componente descrita por la Ecuación 2.4, es a través de la cual se determina la deformación bajo el concepto de ahuellamiento o deformación permanente. Sin embargo, al ser considerada como imaginaria es necesario utilizar funciones que la correlacionen con el módulo elástico.

**Ilustración 2.6 – Componentes del módulo dinámico  $E^*$  [4]**

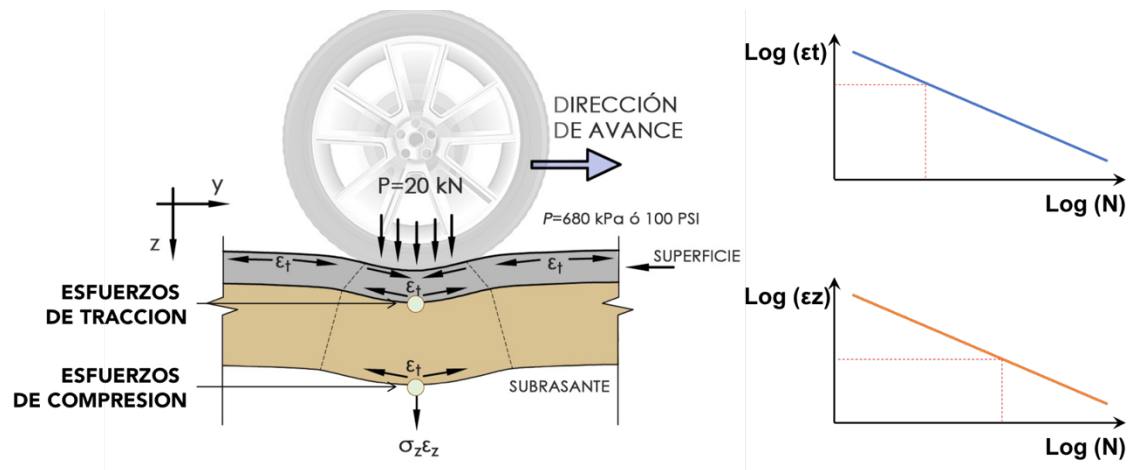


### 2.3.1. IMPORTANCIA DEL MÓDULO DINÁMICO E\*

#### 2.3.1.1. MARCO DE DISEÑO ANALÍTICO

El diseño analítico concibe al pavimento como una estructura multicapa sometida a las cargas de tránsito y a los agentes ambientales. Los esfuerzos y deformaciones determinados bajo los ejes de los vehículos pesados se emplean para estimar la vida de servicio de cada material mediante la aplicación de un modelo de deterioro.

**Ilustración 2.7 – Planteamiento de diseño analítico convencional [6]**



El cálculo de la respuesta estructural se realiza típicamente mediante un modelo elástico lineal (modelo de multicapas elásticas). Este modelo define la rigidez de las capas mediante el correspondiente módulo de Young, para el que se emplean los valores más representativos de cada material considerando el nivel de esfuerzo, la velocidad de aplicación de carga y la temperatura. Los valores típicamente empleados para caracterizar las mezclas asfálticas son los módulos dinámicos a una frecuencia representativa de la velocidad de circulación de la flota de vehículos pesados, típicamente del orden de 10 Hz.

La importancia del módulo dinámico en los procedimientos analíticos radica a que este parámetro es empleado para predecir la respuesta del pavimento bajo las cargas del tránsito e interviene directamente en los modelos de deterioro. Además, en metodologías mecánico-empíricas, como ME-PDG, se considera al módulo dinámico como una variable que evoluciona durante la vida de servicio a consecuencia del envejecimiento del ligante asfáltico, la fatiga y densificación de la mezcla asfáltica bajo las cargas del tránsito.

#### **2.3.1.2. MARCO DEL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.**

El ensayo de módulo dinámico es uno de los recomendados por el proyecto NCHRP 9-19 “Superpave Support and Performance Models Management” para completar al método Superpave de diseño de mezclas asfálticas. La mayor limitación de este procedimiento es, precisamente, la ausencia de un ensayo mecánico relacionado con el comportamiento de la mezcla en servicio. El módulo dinámico fue recomendado en relación con ambos mecanismos de deterioro, fisuramiento por fatiga y deformación permanente, si bien parece claro que es su correlación con el fenómeno de ahuellamiento producido por altas temperaturas lo que hace de este ensayo uno de los más relevantes en el diseño de las mezclas asfálticas, también parece claro que uno de los mayores obstáculos para su implementación práctica es la ausencia de valores de referencia exigibles.

#### **2.3.2. APLICACIONES PRACTICAS DEL MÓDULO DINAMICO**

El módulo dinámico depende de la temperatura de la mezcla asfáltica y de la frecuencia de la carga aplicada. Esta doble dependencia haría engorroso su manejo si no fuera porque, en realidad, ambas variables tienen un efecto equivalente sobre la rigidez: un aumento de la frecuencia es equivalente a una disminución de la temperatura y viceversa. Esta equivalencia, recogida en el principio de superposición tiempo – temperatura, permite definir el módulo dinámico en términos de una única variable, la frecuencia reducida.

### **2.3.2.1. PRINCIPIO DE SUPERPOSICION TIEMPO – TEMPERATURA**

La rigidez de las mezclas asfálticas disminuye al aumentar la temperatura y al disminuir la frecuencia de la carga aplicada. Este hecho es conocido desde hace décadas. También es conocida la naturaleza reológica de este material, que implica la existencia de una equivalencia entre ambas variables. En términos mecánicos, para la mezcla es indistinto aumentar (o reducir) la temperatura que comprimir (dilatarse) la escala temporal.

El principio de superposición tiempo-temperatura es la base de una técnica para, sustancialmente, aumentar el rango de tiempo o frecuencia sobre el cual el comportamiento lineal puede ser determinado. La esencia de la superposición tiempo-temperatura es que, si todo el fenómeno de relajación tiene la misma dependencia con la temperatura, entonces cambiar la temperatura tendrá el mismo efecto al mover los valores horizontalmente en el eje de logaritmo de frecuencia o tiempo. Haciendo analogía a un reloj interno de la mezcla, el tiempo corre muy despacio a altas temperaturas y muy rápido a bajas temperaturas; por eso en el primer caso tiene más tiempo para deformarse que, en el segundo, lo cual se interpreta como una menor rigidez. Este hecho se muestra en el ejemplo de la Ilustración 2.8, que refleja la deformación medida en un espécimen de mezcla asfáltica bajo el mismo nivel de carga aplicado a distintas temperaturas.

Por ejemplo, la deformación experimentada por la mezcla asfáltica a 40°C es la misma que la que experimenta a 20°C si redujésemos la escala temporal (frecuencia de carga) dividiéndola por aproximadamente 20. Del mismo modo, la que experimenta a 10°C es la que experimentaría a 20°C si aumentásemos la escala temporal multiplicándola por aproximadamente 10. El factor de escala temporal, “aT”, es conocido como factor de correlación tiempo – temperatura, y es una función que depende únicamente de la temperatura y es característica de cada mezcla asfáltica. La variable tiempo pasa a denominarse “frecuencia reducida” tras la aplicación del factor “aT”.

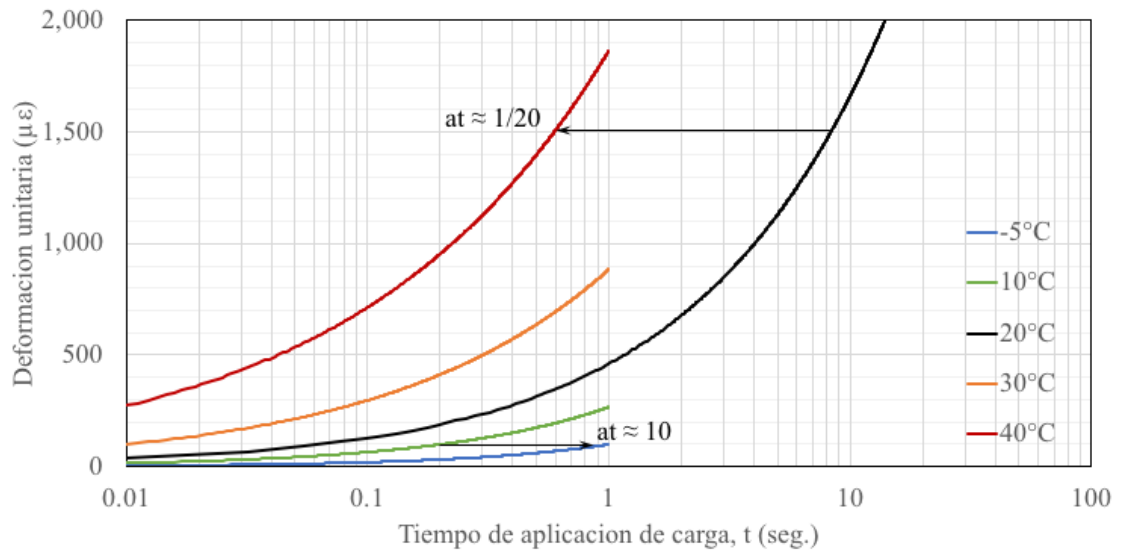
### Ecuación 2.5 [5]

$$f_r = \frac{f}{aT}$$

Donde:

- $T_r$ : Frecuencia reducida (Hz.)
- $aT$ : Factor tiempo – temperatura

**Ilustración 2.8** – Deformación de mezclas asfáltica a diferentes temperaturas



#### 2.3.2.2. DURACIÓN DE CARGA

Es sumamente conocido que el módulo dinámico de las mezclas asfálticas es dependiente de la frecuencia y la temperatura. En el campo, el módulo dinámico caracteriza como una mezcla en particular responde a una carga en movimiento bajo diferentes temperaturas del pavimento.

Ni  $E^*$ , ni la frecuencia pueden ser medidas directamente en el campo, sin embargo, el tiempo de carga si es posible medirlo. Debido a las relaciones tiempo-frecuencia, el tiempo de carga influye significativamente en la rigidez de la mezcla asfáltica. La respuesta del pavimento bajo cargas

móviles depende en gran medida del módulo dinámico de la mezcla asfáltica. A partir de la ecuación que define a  $E^*$  (Ecuación 2.1), es evidente que la deformación esta inversamente influenciada por  $E^*$ .

Históricamente, el tiempo de carga ha sido definido por un pulso de esfuerzo o por un pulso de deformación, y se ha determinado que depende de la velocidad de los vehículos y la profundidad. Mediante la aplicación de análisis de elementos finitos y la teoría de capas elásticas, se estima la forma y la longitud de los pulsos de esfuerzos a compresión bajo una carga dinámica de rueda, definiendo que estos pulsos son una función de la profundidad del pavimento y la velocidad del vehículo, caracterizado por medio de un pulso sinusoidal o triangular para velocidades vehiculares de hasta 70 kph, dependiendo de la profundidad del pavimento. Este mismo principio, aplicado a pulsos de esfuerzo a compresión en 3 dimensiones, fue utilizado para el desarrollo de la Ecuación 2.6, conocida como ecuación de Barksdale, en la cual, el tiempo de carga representa los tiempos de pulso promedio de los tres esfuerzos ortogonales (vertical, radial y tangencial). Para relacionar el tiempo con la frecuencia de aplicación de carga, se aplica una función comúnmente utilizada en el campo de la reología (Ecuación 2.7).

**Ecuación 2.6 [7]**

$$\log(t) = 0.5 \cdot d - 0.2 - 0.94 \cdot \log(v)$$

**Ecuación 2.7**

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot t}$$

Donde:

- t: Tiempo de carga (seg.)
- f: Frecuencia de carga (Hz)
- d: Profundidad (m.)
- v: Velocidad vehicular (kph)

Esta relación es aplicada para correlacionar las frecuencias de carga con velocidades de operación vehicular. A continuación, se presentan las velocidades vehiculares en función de una serie de frecuencias de carga estipuladas, considerando un espesor de 10.0cm de carpeta asfáltica.

**Tabla 2.1** – Relación entre frecuencia de carga y velocidad vehicular

<b>Frecuencia de carga</b>	<b>Velocidad vehicular</b>
25.0 Hz	150 kph
10.0 Hz	57 kph
5.0 Hz	27 kph
1.0 Hz	5 kph
0.5 Hz	2 kph
0.1 Hz	1 kph

### **2.3.2.3. CURVA MAESTRA DE MÓDULO DINÁMICO**

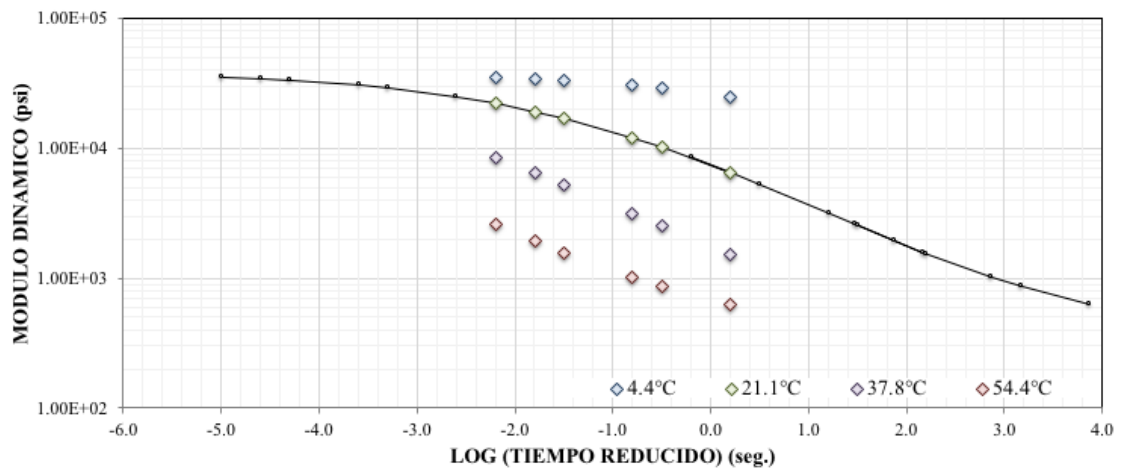
La Ilustración 2.9 muestra el módulo dinámico medido en un espécimen de mezcla asfáltica a diferentes temperaturas y frecuencias. Los datos reflejan la susceptibilidad de este material respecto a ambas variables, temperatura y frecuencia. El principio de superposición tiempo – temperatura es aplicado en la Ilustración 2.9.

Teniendo en cuenta que una ampliación o reducción de la escala temporal implica un desplazamiento en la escala logarítmica, y por eso los conjuntos de módulos medidos a las diferentes temperaturas pueden desplazarse horizontalmente hasta converger en una única curva, la curva maestra de módulo dinámico. Esta es, en definitiva, el módulo dinámico de la mezcla asfáltica a una temperatura de referencia que, por lo general, es de 21°C. Se han propuesto diferentes expresiones para la misma, pero la mas ampliamente aceptada es la expresión sigmoideal reflejada en la Ecuación 2.8.

Las curvas maestras son muy útiles para comprender el comportamiento reológico de las mezclas. El proceso de superposición separa dos de las variables principales como lo son el tiempo (o frecuencia) y la temperatura de las cuales dependen las propiedades viscoelásticas, expresándolos en términos de una función para cada una.

La curva maestra muestra la dependencia con el tiempo del material a una temperatura constante de referencia ( $T_0$ ); la dependencia con la temperatura de las propiedades viscoelásticas se muestra por la variación del factor desplazamiento con la temperatura. El principio de superposición tiempo- temperatura es aplicado sobre la frecuencia o el tiempo, por medio del factor de ajuste  $a_T$ , el cual provoca un desplazamiento horizontal en esos ejes (Ilustración 2.9), convirtiéndolas en frecuencia o tiempo reducido respectivamente.

**Ilustración 2.9 – Curva maestra de módulo dinámico [8]**



$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{[\beta + \gamma \cdot \log(f_r)]}} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

---


$$\log(f_r) = \log(f) + \log(a_t) \quad \text{Ecuación 2.9}$$

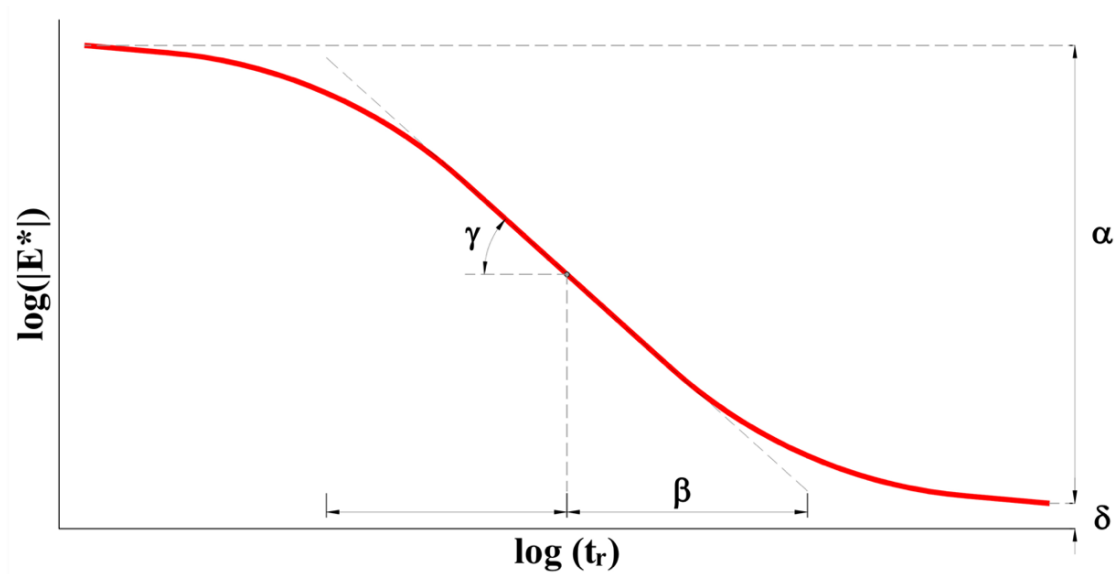


Donde:

- $f_r$ : Frecuencia reducida
- $f$ : Frecuencia (Hz).
- $aT$ : Factor de correlación tiempo – temperatura a 21°C
- $\delta, \alpha, \beta, \gamma$ : Parámetros de modelo

Cada uno de los parámetros de la curva maestra tiene un significado físico. “ $\delta$ ” representa el módulo mínimo de la mezcla asfáltica ( $10^\delta$ ), esto es, la asíntota inferior de la curva. “ $\delta+\alpha$ ” representa el módulo máximo ( $10^{\delta+\alpha}$ ), la asíntota superior. “ $\beta$ ”, conocido como parámetro de localización, determina la posición horizontal del punto de inflexión de la curva sigmoideal. Finalmente, “ $\gamma$ ” representa la pendiente máxima de la curva, que tiene lugar en el punto de inflexión.

**Ilustración 2.10** – Parámetros de modelo de curva maestra de mezclas asfálticas [8]



Respecto al factor “ $aT$ ”, se han propuesto diferentes expresiones, algunas basadas en las formulas de Arrhenius y Williams-Landel-Ferry. No obstante, en la practica se obtienen los mismos resultados empleando una sencilla expresión, que depende de un único parámetro, “ $c$ ”.

#### **Ecuación 2.10**

$$\log(aT) = c \cdot (t - T_r)$$

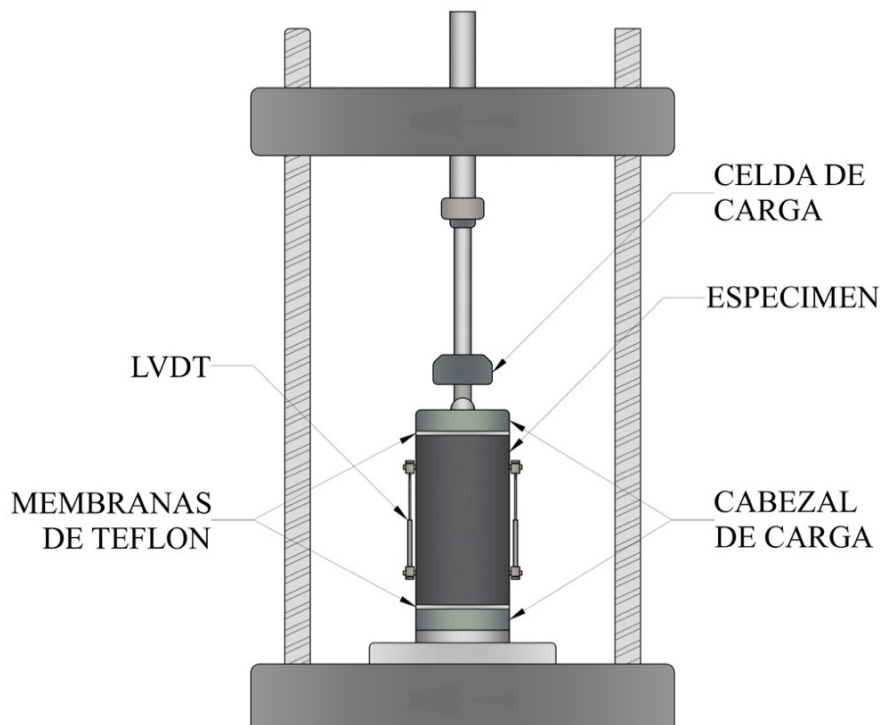
### **2.3.3. MÓDULO DINÁMICO DEFINIDO EN EL LABORATORIO**

Las pruebas iniciales de laboratorio para la determinación de  $E^*$  consistieron en ensayos de flexión con 2 puntos de apoyo, en los que las muestras trapezoidales se cargaban bajo un esfuerzo a compresión sinusoidal.

A partir de la prueba a flexión con 2 puntos de apoyo desarrollada por Shell Laboratories, el módulo de elasticidad pudo ser determinado de dos maneras. Primero,  $E^*$ , podría determinarse a partir de un calculo simple utilizando la carga medida aplicada y el desplazamiento medido en el extremo libre de la muestra. El segundo método utilizo la deformación medida y el esfuerzo aplicado para la determinación de  $E^*$ . Al probar múltiples mezclas asfáltica a tres frecuencias de carga (4, 40 y 50 Hz) y tres temperaturas (-15, 9 y 30°C), se concluyo que el tiempo de carga y la temperatura eran parámetros significativos para las deformaciones a flexión de las mezclas asfálticas, ya que, en condiciones típicas de servicio, la rigidez podría variar entre 1,400 a 6,000,000 psi. Se reporto, adicionalmente, que el aumento de la temperatura o el tiempo de carga dio lugar a una disminución de la rigidez, definida por  $E^*$ . Además, se determino que existía una equivalencia entre estos dos factores, de modo que las curvas  $E^*$  de diferentes temperaturas y frecuencias podrían superponerse (Ahora denominadas curvas de superposición tiempo-temperatura), lo que permite crear una curva maestra para una temperatura de referencia.

Desde entonces, las pruebas de laboratorio han evolucionado, siendo pionera la especificación ASTM D3497-79 (2003) “Método de ensayo estándar para módulo dinámico de mezclas asfálticas”, retirada en 2,009. Este método requería la aplicación de un pulso de esfuerzo a compresión tipo Haversine a una muestra cilíndrica a tres temperaturas (41, 77 y 104°F), así como a tres frecuencias (1, 4 y 16 Hz). La carga sinusoidal se aplicaba a la muestra durante un periodo entre 30 a 45 segundos. Los medidores de deformación adheridos a media altura de la muestra cilíndrica, registraban la deformación axial a partir de la cual era determinado el valor de módulo dinámico como la relación entre el esfuerzo axial y la deformación axial recuperable.

**Ilustración 2.11** – Esquema de ensayo de módulo dinámico AASHTO T342-11 [9]



La prueba de laboratorio mas reciente y ampliamente utilizada para la determinación de  $E^*$ , es el método estándar AASHTO T342-11 (2015). De nuevo, se utiliza una muestra cilíndrica, a la que

se aplica un esfuerzo a compresión axial a una temperatura y frecuencia determinadas. Cuatro temperaturas (40, 70, 100 y 130°F) y seis frecuencias (0.1, 0.5, 1.0, 5.0, 10 y 25 Hz) se especifican en el ensayo. Los deformímetros LVDT (Linear Variable Differential Transformers) se montan como mínimo en dos ubicaciones para medir la deformación axial, a partir de la cual se calcula la deformación recuperable. El módulo dinámico se define en este procedimiento como la relación entre la magnitud del esfuerzo y la magnitud de la recuperación promedio.

#### 2.4. PREDICCIÓN DE E\* A PARTIR DE OTROS PARÁMETROS.

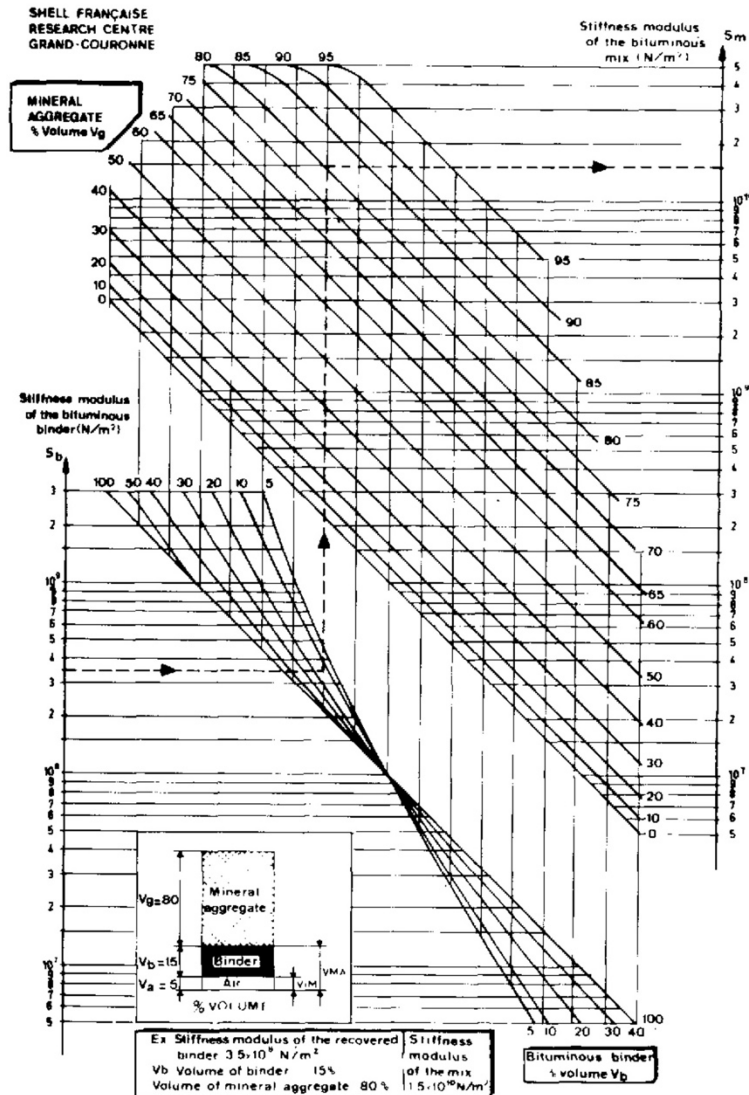
Si bien, E\* puede determinarse en el laboratorio, requiere de mucho tiempo, equipo especializado de alto costo y de personal operativo entrenado. Como consecuencia de los anterior, se han realizado esfuerzo para el desarrollo de ecuaciones predictivas para la determinación del valor de E\*, basadas estrictamente en las propiedades de la mezcla asfáltica. A continuación, se enumeran los modelos predictivos para E\* desarrollados en los últimos 60 años.

**Tabla 2.2** – Listado de modelos predictivos E\* [5]

No. modelo	Modelo predictivo E*	Año
1	Modelo Bonnaure	1,977
2	Modelos de Shook & Kalla	1,969
3	Modelo preliminar de Witczak	1,972
4	Modelo de Witczak & Shook	1,978
5	Modelo de Witczak '81	1,981
6	Modelo de Witczak, Miller & Uzan	1,983
7	Modelo de Witczak & Akhter	1,984
8	Modelo de Witczak, Leahy, Caves & Uzan	1,989
9	Modelo de Witczak & Fonseca	1,996
10	Modelo de Andrei, Witczak & Mirza (Modelo I-37A)	1,999
11	Modelo Hirsch de Christensen, Pellinen & Bonaquist	2,003
12	Modelo revisado de Witczak (Modelo I-40D)	2,006

Aunque no es el primer intento de modelar  $E^*$ , en 1,977 Bonnaure desarrollo un nomograma para modelar  $E^*$  en función del volumen de ligante asfáltico, el volumen de agregado mineral y el módulo de rigidez del ligante asfáltico. Este nomograma se conoce comúnmente como el nomograma de Shell, ya que fue desarrollado para Shell International Petroleum. Además, a partir de la misma investigación, Bonnaure, desarrollo un software informático, “Module”, para predecir el módulo de rigidez (módulo dinámico) de la mezcla asfáltica.

**Ilustración 2.12 – Nomograma para predicción de rigidez en mezclas asfálticas [10]**



Por su parte, el Instituto del Asfalto de los Estados Unidos (A.I.) desarrollo un método de diseño en el que el módulo dinámico se determina a partir de las siguientes ecuaciones:

$$|E^*| = 100,000 \cdot (10)^{\beta_1} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

$$\beta_1 = \beta_3 + 0.000005 \cdot \beta_2 - 0.00189 \cdot \beta_2 \cdot f^{-1.1} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

$$\beta_2 = \sqrt{\beta_4} \cdot (T)^{\beta_5} \quad \text{Ecuación 2.13}$$

$$\beta_3 = 0.553833 + 0.028829 \cdot (P_{200} \cdot f^{-0.1703}) - 0.03476 \cdot V_a \\ + 0.070377 \cdot \lambda + 0.931757 \cdot f^{-0.02774} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

$$\beta_4 = 0.483 \cdot V_b \quad \text{Ecuación 2.15}$$

$$\beta_5 = 1.3 + 0.49825 \cdot \log(f) \quad \text{Ecuación 2.16}$$

$$\lambda = 29,508.2 \cdot (P_{77°F})^{-2.1939} \quad \text{Ecuación 2.17}$$

Donde:

- E\*: Módulo dinámico (psi)
- f: Frecuencia de carga (Hz)
- T: Temperatura (°F)
- Va: Volumen de vacíos (%)
- λ: Viscosidad del asfalto a 70°F
- P<sub>200</sub>: Pasante malla No.200 (%)
- Vb: Volumen de asfalto (%)
- P<sub>77°F</sub>: Penetración a 77°F

Mientras que el nomograma desarrollado para obtener el Módulo de rigidez incorpora el volumen de todo el agregado pétreo, las ecuaciones del Instituto del Asfalto (A.I.) únicamente utilizan el volumen de los finos (% pasante de la malla No.200). Esto indica una posible dependencia del % de finos, lo que es contrastante con los resultados de laboratorio obtenidos en el estudio del WSDOT, en el que se determino que pequeñas variaciones en P200 (Porcentaje de material

pasante de la malla No.200) no afectaron significativamente los valores de módulo dinámico. Aunque ambos (nomograma Shell y ecuaciones de A.I.) consideran el porcentaje de ligante asfáltico, las ecuaciones de A.I. también incorporan la viscosidad del ligante asfáltico, así como la temperatura. Además, el Instituto del Asfalto, hace uso de la frecuencia de carga como un factor en la determinación del módulo dinámico de las mezclas asfálticas.

Desde el desarrollo del método del A.I. y el modelo predictivo de  $E^*$  asociado, han sido desarrollados mas modelos. Durante los últimos sesenta años, estos modelos han progresado según los factores utilizados para determinar  $E^*$  y la precisión general de los modelos. Los tres modelos mas recientes incluyen el modelo Hirsch de Christensen, Pellinen y Bonaquist (2,003), la nueva versión revisada del modelo predictivo  $E^*$  de Witczak (2,006) y el modelo revisado de Andrei, Witczak y Mirza (1,999), este último siendo el objeto de análisis de este estudio, y es definido con mas detalle a continuación.

#### **2.4.1. MODELO WITCZAK 1-37A**

El modelo revisado de Andrei, Witczak y Mirza, conocido generalmente como el modelo Witczak 1-37A, se desarrollo en 1,999 como una actualización de la ecuación predictiva de  $E^*$  previamente establecida por Witczak y Fonseca en 1,996 (Modelo original de Witczak). Este modelo ya consideraba las propiedades del ligante por medio de la viscosidad y el contenido efectivo de ligante asfáltico, adicionalmente también incorporaba la frecuencia de carga como variable. Otros parámetros introducidos en el modelo de Witczak y Fonseca 1,996 son el porcentaje de vacíos de aire e información sobre la gradación de agregados pétreos. Para su actualización al modelo Witczak 1-37A, se utilizaron resultados de pruebas de laboratorio para la determinación de  $E^*$  con el fin recalibrar el modelo de Witczak y Fonseca 1,996 mediante la adición de varias propiedades de la mezcla asfáltica.

La recalibración del modelo se realizó mediante el establecimiento de una nueva base de datos que constaba de 56 mezclas asfálticas adicionales, 34 de las cuales estaban elaboradas con ligantes asfálticos modificados, para un total de 1,320 nuevos datos. Si bien la nueva base de datos tenía resultados de pruebas de laboratorio para la determinación de  $E^*$  para solo 5 gradaciones de agregados diferentes, tenía un rango mucho más amplio de valores de viscosidad ya que se probaron 5 temperaturas para los 20 ligantes asfálticos analizados. Al combinar la nueva base de datos con la base de datos utilizada para desarrollar el modelo anterior, se dio como concluida la recalibración del modelo de Witczak y Fonseca 1,996, obteniendo el modelo revisado de la Ecuación 2.18.

### Ecuación 2.18 [1]

$$\log(E^*) = -1.249937 + 0.02932 \cdot \rho_{200} - 0.001767 \cdot (\rho_{200})^2 - 0.002841 \cdot \rho_4 - 0.058097 \cdot v_a - 0.802208 \cdot \left( \frac{v_{beff}}{v_a + v_{beff}} \right) + \frac{3.871977 - 0.0021 \cdot \rho_4 + 0.003958 \cdot \rho_{38} - 0.000017 \cdot (\rho_{38})^2 + 0.005470 \cdot \rho_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.31335 \log(f) - 0.393532 \log(\eta))}}$$

Donde:

- $E^*$ : Módulo dinámico de mezcla asfáltica ( $10^5$  psi)
- $\eta$ : Viscosidad del ligante ( $10^6$  Poise)
- $f$ : Frecuencia de carga (Hz)
- $V_a$ : Porcentaje de volumen de vacíos de aire (%)
- $V_{beff}$ : Porcentaje de volumen efectivo de ligante (%)
- $P_{34}$ : Porcentaje retenido acumulado en el tamiz 3/4"
- $P_{38}$ : Porcentaje retenido acumulado en el tamiz 3/8"
- $P_4$ : Porcentaje retenido acumulado en el tamiz #4
- $P_{200}$ : Porcentaje pasante de la malla No.200



Para la aplicación de este modelo, la viscosidad del ligante asfáltico debe ser determinada mediante una relación lineal entre el logaritmo del logaritmo de la viscosidad ( $\log(\log(\eta))$ ) y el logaritmo de la temperatura ( $\log(T_r)$ ), ilustrada por la Ecuación 2.19. Al trazar el  $\log(\log(\eta))$  frente al  $\log(T_r)$ , la pendiente de la línea es el parámetro “VTS”, y la intersección es “A”. Para la obtención de la viscosidad se debe utilizar la relación entre el módulo de corte complejo ( $G^*$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante asfáltico, relación mostrada en la Ecuación 2.20 u otras medidas de viscosidad directas o por correlaciones.

**Ecuación 2.19 [1]**

$$\log[\log(\eta)] = A + VTS \cdot \log(T_r)$$

Dónde:

- $\eta$ : Viscosidad del ligante asfáltico (cP)
- A y VTS: Variables de regresión
- $T_r$ : Temperatura en grados Rankine ( $^{\circ}R$ )

**Ecuación 2.20 [1]**

$$\eta = \frac{|G^*|}{10} \cdot \left( \frac{1}{\sin(\delta)} \right)^{4.8628}$$

Dónde:

- $G^*$ : Módulo de corte dinámico complejo del ligante asfáltico (psi)
- $\delta$ : Ángulo de fase del ligante asfáltico ( $^{\circ}$ )

Al comparar este modelo con ecuaciones predictivas previas, es evidente que es mucho más detallado en términos de composición de agregados y ligante asfáltico. Similar a las ecuaciones del A.I., el modelo Witczak 1-37A requiere el porcentaje de finos, vacíos de aire y frecuencia de

carga. Al igual que el nomograma de Shell, este modelo también utiliza la rigidez del ligante asfáltico, en términos de módulo de corte dinámico complejo utilizado para determinar la viscosidad. En lugar de considerar el porcentaje de ligante asfáltico como lo hacen las ecuaciones predictivas anteriores, este modelo utiliza el contenido de ligante asfáltico efectivo, incorporando la capacidad del agregado pétreo para absorber el ligante asfáltico. Además, el modelo Witczak 1-37A requiere información de la gradación de los agregados pétreos mas detallada, mas allá del porcentaje de finos que necesitan las funciones anteriores.

## **2.5. E\* EN LA METODOLOGIA MECANICO – EMPIRICA**

La metodología mecánico – empírica para el diseño de pavimentos (ME-PDG) ofrece tres niveles de diseño que dependen de los datos disponibles del usuario y la precisión deseada para el diseño. Una diferencia significativa entre los tres niveles de diseño es la determinación del módulo dinámico de las mezclas asfálticas. Tras la determinación de  $E^*$ , es desarrollada la curva maestra a una temperatura de referencia de 21°C. El grado de complejidad requerido para los insumos sobre las propiedades de los materiales, esta dictado por el nivel de diseño elegido. El nivel de diseño 1, nivel mas alto en complejidad, requiere resultados de laboratorio para los valores de módulo dinámico de las mezclas asfálticas ( $E^*$ ) y para el módulo de corte dinámico del ligante asfáltico ( $G_b^*$ ). En los niveles 2 y 3, los resultados de las pruebas de laboratorio para la determinación de  $E^*$ , son reemplazadas por la estimación  $E^*$  a partir de la ecuación predictiva de Witczak 1-37A.

**Tabla 2.3** – Determinación de  $E^*$  en los diferentes niveles de diseño ME-PDG. [1]

Nivel	Descripción
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizar pruebas de laboratorio para la determinación de <math>E^*</math> (módulo dinámico) a las frecuencias de carga y temperatura de interés.</li> <li>• Realizar pruebas de laboratorio para la determinación de módulo de corte dinámico (<math>G_b^*</math>) y ángulo de fase (<math>\delta_b</math>) al ligante asfáltico propuesto a una frecuencia de 10 rad/s en un rango de temperaturas dado.</li> <li>• A partir de los resultados obtenidos de las pruebas al ligante asfáltico, estimar la relación A-VTS para las temperaturas de compactación y mezclado.</li> <li>• Desarrollar la curva maestra para la mezcla asfáltica que defina con precisión la relación tiempo-temperatura considerando el envejecimiento.</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se requieren pruebas de laboratorio para la determinación de <math>E^*</math>.</li> <li>• Utilizar ecuaciones predictivas para la estimación del valor de <math>E^*</math>.</li> <li>• Realizar pruebas de laboratorio para la determinación de módulo de corte dinámico (<math>G_b^*</math>) y ángulo de fase (<math>\delta_b</math>) al ligante asfáltico propuesto a una frecuencia de 10 rad/s en un rango de temperaturas dado. La viscosidad y la rigidez del ligante asfáltico también pueden ser estimadas utilizando datos de pruebas convencionales como: el punto de ablandamiento, viscosidad absoluta y cinemática, o utilizando el viscosímetro Brookfield.</li> <li>• Desarrollar relación A-VTS para temperaturas de compactación y mezclado.</li> <li>• Desarrollar la curva maestra para la mezcla asfáltica que defina con precisión la relación tiempo-temperatura considerando el envejecimiento.</li> </ul>

Nivel	Descripción
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>No se requieren pruebas de laboratorio para la determinación de E*.</li> <li>Utilizar ecuaciones predictivas para la estimación del valor de E*.</li> <li>Utilizar valores típicos de A-VTS proporcionados por la metodología de diseño mecánico – empírica, basados en la viscosidad, el grado PG o el grado de penetración del ligante asfáltico.</li> <li>Desarrollar la curva maestra para la mezcla asfáltica que defina con precisión la relación tiempo-temperatura considerando el envejecimiento.</li> </ul>

Para el nivel de diseño 1, las pruebas de laboratorio para la determinación de E\* deben ser ejecutadas para un rango de frecuencias y temperaturas. El módulo de corte dinámico G\*, también debe ser determinado, pero, a una sola frecuencia de carga definida en 1.59 Hz (10 rad/s) aplicada a un rango de temperaturas. Las temperaturas y frecuencias recomendadas para estas pruebas se listan en la siguiente tabla:

**Tabla 2.4 – Temperaturas y frecuencias recomendadas para E\* y G\* [1]**

Temperatura (°F)	Mezcla asfáltica, E*				Ligante asfáltico, G*
	0.1 Hz	1.0 Hz	10.0 Hz	25.0 Hz	1.59 Hz
40	x	x	x	x	
55					x
70	x	x	x	x	x
85					x
100	x	x	x	x	x
115					x
130	x	x	x	x	x

En la Tabla 2.3, la relación A-VTS es mencionada como un requerimiento para el nivel de diseño 1, al igual que para los niveles de diseño 2 y 3. La relación A-VTS es descrita por la Ecuación 2.19 y caracteriza el efecto de la temperatura sobre la viscosidad en un ligante asfáltico en particular. Esta relación es aplicada principalmente en el nivel de diseño 1 para desarrollar la curva maestra. Para obtener la viscosidad, las pruebas convencionales deben ser completados sobre el ligante asfáltico, estas se listan en la Tabla 2.5, o puede ser utilizada la Ecuación 2.20 para convertir los resultados de las pruebas para la determinación de  $G_b^*$  (frecuencia de carga 1.59 Hz) a viscosidad. Una vez obtenida la viscosidad es determinada la relación A-VTS a través de una regresión lineal sobre la información de viscosidad y temperatura, permitiendo la determinación de la viscosidad a cualquier temperatura.

**Tabla 2.5** – Pruebas convencionales al ligante asfáltico para determinar viscosidad.

Prueba	Temperatura	Conversión a viscosidad
Penetración	25.0°C	Ecuación 2.21
Viscosidad Brookfield	60°C	-
Viscosidad Brookfield	80°C	-
Viscosidad Brookfield	100°C	-
Viscosidad Brookfield	120°C	-
Viscosidad Brookfield	140°C	-
Viscosidad Brookfield	160°C	-
Punto de ablandamiento	Medida	13,000 Poise

**Ecuación 2.21**

$$\log(\eta) = 10.5012 - 2.2601 \cdot \log(Pen) + 0.00389 \cdot [\log(Pen)]^2$$

Donde:

- Pen: Penetración del ligante asfáltico, aplicando carga 100gr en 5 seg, dmm.
- $\eta$ : Viscosidad del ligante (Poise)

El nivel de diseño 2 utiliza uno de los dos modelos previamente discutido (Witczak 1-37A) para estimar el valor de  $E^*$ , requiriendo propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica, información sobre la gradación de agregados y dependiendo del modelo seleccionado, pruebas de desempeño para la determinación de  $G_b^*$  o pruebas de viscosidad. Para el modelo Witczak 1-37A, la viscosidad es requerida y puede ser obtenida de la misma manera como es descrito para la aplicación del nivel de diseño 1. Aunque la prueba para la determinación de  $G_b^*$  ( $f = 1.59$  Hz) puede ser utilizada para la aplicación del modelo Witczak 1-37A, esta no es obligatoria.

El nivel de diseño 3, también utiliza propiedades volumétricas e información de la gradación de agregados. Sin embargo, no se requieren pruebas de laboratorio. Si se selecciona el modelo Witczak 1-37A para estimar el módulo  $E^*$ , los valores de viscosidad se estiman a partir de las relaciones típicas A-VTS para el grado de ligante seleccionado.

## **CAPITULO 3**

### **PROPIEDADES DE MATERIAS PRIMAS Y MEZCLAS ASFÁLTICAS**

### 3.1. AGREGADOS PÉTREOS

Son materiales granulares sólidos inertes que se emplean para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc.) o con ligantes asfálticos.

#### 3.1.1. PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS PÉTREOS

Las propiedades más comunes para caracterizar adecuadamente un agregado a ser utilizado en la fabricación de mezcla asfáltica de buena calidad, pueden ser clasificadas en dos grandes grupos :

- Propiedades de consenso:
  - Granulometría ..... Norma: AASHTO T11 y T27
  - Pesos volumétrico suelto y compactado ..... Norma: ASTM C-29
  - Contenido de vacíos no compactados ..... Norma: AASHTO T304
  - Limpieza (Equivalente de arena) ..... Norma: AASHTO T176
  - Textura superficial (Caras fracturadas) ..... Norma: ASTM D-5821
  - Forma (Partículas planas y alargadas) ..... Norma: ASTM D-4791
- Propiedades de origen:
  - Gravedad específica y absorción ..... Norma: AASHTO T85 y T85
  - Resistencia a la abrasión ..... Norma: AASHTO T96
  - Sanidad de los agregados ..... Norma: ASTM C-88
  - Índice de durabilidad ..... Norma: AASHTO T210

Para los criterios exigidos como propiedades de consenso, la metodología Superpave para el diseño de mezclas asfálticas, especificado en la normativa AASHTO M323, define una serie de requerimientos para establecer la idoneidad de los materiales pétreos.



**Tabla 3.1** – Requerimientos Superpave propiedades de consenso para agregados [11]

ESAL's <sup>(a)</sup> diseño (Millones)	Caras fracturadas Agregado grueso <sup>(c)</sup> % Mínimo		Vacíos no compactados Agregado fino % Mínimo		Equivalente de arena % Mínimo	Partículas planas y alargadas % Máximo
	Profundidad desde la superficie		Profundidad desde la superficie			
	<100 mm	>100 mm	<100 mm	>100 mm		
< 0.3	55/-	-/-	-	-	40	-
0.3 – 3.0	75/-	50/-	40	40	40	10
3.0 – 10.0	85/80 <sup>(b)</sup>	60/-	45	40	45	10
10.0 – 30.0	95/90	80/75	45	40	45	10
> 30.0	100/100	100/100	45	45	50	10

- a. Nivel de tránsito proyectado del proyecto en el carril de diseño para un periodo de 20 años. Independiente del periodo de diseño real de la carretera, determina los ESAL's de diseño durante 20 años.
- b. 85/80 denota que el 85% del agregado grueso presenta una cara fracturada y el 80% tiene dos o más caras fracturadas.
- c. Este criterio no debe ser aplicado a mezclas con tamaño máximo nominal de 4.75mm.

**Nota:** En el presente estudio, se verificará el cumplimiento de los requerimientos considerando un valor de ESAL's entre 10 – 30 millones.

En el caso de las propiedades de origen, estas deben de satisfacer los criterios establecidos en el Manual Series MS-2 7<sup>ma</sup> edición, del Instituto del Asfalto [12]:

- Resistencia a la abrasión (agregados gruesos) ..... **30.0% máximo**
- Sanidad en sulfato de sodio (agregados gruesos) ..... **15.0% máximo**
- Índice de durabilidad (agregados gruesos y finos) ..... **35.0% mínimo**

### 3.1.2. MUESTREO DE AGREGADOS

El proceso de muestreo de agregados pétreos ha de realizarse de forma adecuada para garantizar que la porción de material extraída de un acopio represente las características y propiedades del agregado en bruto que representa. La muestra seleccionada debe ser verdaderamente representativa de todo el agregado para que los resultados de los ensayos sean confiables.

#### 3.1.2.1. NOMBRE Y UBICACIÓN DE FUENTES DE AGREGADOS PROPUESTAS:

Los agregados pétreos utilizados para la elaboración de esta investigación corresponden a la fuente de material “La Cantera”, ubicada en el Km. 57½ carretera CA02, caserío San Diego, La Libertad.

Las fracciones de agregados utilizados corresponden a:

**Tabla 3.2** – Fracciones de agregados

Fracción	Denominación	TMN	Procedencia
Gruesa	Grava ¾”	19.0 mm	La Cantera
Intermedia	Grava ¾”	9.5 mm	La Cantera
Fina	Arena triturada	4.75 mm	La Cantera

#### 3.1.2.2. FECHA DE MUESTREO Y PROCEDIMIENTO UTILIZADO

Las muestras de cada fracción utilizada para esta investigación, fueron tomadas en el patio de almacenamiento de la planta asfáltica de ASFALCA S.A. de C.V. Las muestras fueron tomadas de cada apilamiento de conformidad con la norma AASHTO T2, el día 20 de febrero de 2,018.

**Ilustración 3.1** – Acopio de agregados ASFALCA S.A. de C.V.



### 3.1.3. CONTROL DE CALIDAD DE AGREGADOS

#### 3.1.3.1. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE AGREGADOS PÉTREOS

A continuación, se muestran la distribución granulométrica de los materiales pétreos utilizados para esta investigación:

**Tabla 3.3** – Distribuciones granulométricas de agregados pétreos

Identificación de agregados			
Nombre	Grava ¾"	Grava ⅜"	Arena triturada
Origen	La Cantera	La Cantera	La Cantera
Localización	ASFALCA	ASFALCA	ASFALCA
Distribución granulométrica (%)			
1"	100.0	100.0	100.0
¾"	98.1	100.0	100.0
½"	48.2	100.0	100.0
⅜"	18.3	100.0	100.0
No4	1.2	15.2	94.6
No8	1.1	4.9	63.8
No16	1.0	3.6	43.4
No30	0.9	3.0	29.8
No50	0.8	2.6	21.0
No100	0.7	2.2	14.4
No200	0.5	1.5	10.0

### 3.1.3.2. AGREGADOS GRUESOS

Este tipo de agregado consiste en piedra triturada proveniente de manto rocoso, sano y no susceptible a ningún tipo de meteorización o alteración fisico-química apreciable bajo las condiciones que puedan darse en la zona. La porción de materiales retenidos en el tamiz No.4 se denominará como “agregados gruesos”. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

**Tabla 3.4 – Resultados de agregados gruesos**

Ensayo	Resultados		Aceptación
	Grava ¾”	Grava ⅜”	
Propiedades de consenso			
Peso volumétrico suelto	1.380 gr/cm <sup>3</sup>	1.433 gr/cm <sup>3</sup>	-
Peso volumétrico compacto	1.468 gr/cm <sup>3</sup>	1.602 gr/cm <sup>3</sup>	-
Caras fracturadas	100/96	100/100	95/90 Mínimo
Partículas planas y alargadas	6.4%	5.9%	10.0% Máximo
Propiedades de origen			
Gravedad específica Bulk	2.532	2.532	-
Absorción	0.7%	2.0%	-
Resistencia a la abrasión	12.8%	14.4%	30.0% Máximo
Sanidad	1.13%	2.70%	15.0% Máximo
Índice de durabilidad	90.0%	89.3%	35.0% Mínimo

### 3.1.3.3. AGREGADO FINO

La porción de agregado que pasa la malla No.4 y es retenida en la malla No.200, constituye el “agregado fino”, el cual debe consistir de partículas limpias, sanas, durables y angulares, producidas de piedra o grava triturada, que cumpla con los requisitos especificados para el agregado fino.

**Tabla 3.5 – Resultados de agregados gruesos**

Ensayo	Resultados Arena triturada	Aceptación
Propiedades de consenso		
Peso volumétrico suelto	1.652 gr/cm <sup>3</sup>	-
Peso volumétrico compacto	1.786 gr/cm <sup>3</sup>	-
Vacios no compactados	48.1%	45.0% Mínimo
Equivalente de arena	72.5%	45.0% Mínimo
Propiedades de origen		
Gravedad específica Bulk	2.540	-
Absorción	1.2%	-
Índice de durabilidad	90.0%	35.0% Mínimo

### **3.2. LIGANTE ASFÁLTICO**

El asfalto es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes, que tiene las propiedades ideales para la construcción de pavimentos cumpliendo las siguientes funciones:

- Impermeabilizar la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra la penetración del agua proveniente de la precipitación.
- Proporciona una fuerte unión y cohesión entre agregados, capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos. Igualmente mejora la capacidad portante de la estructura, permitiendo disminuir el espesor de la carpeta asfáltica.

### 3.2.1. MUESTREO DE LIGANTES ASFÁLTICOS

Es muy importante considerar que la muestra del ligante asfáltico debe ser representativa, y de mantenerse almacenada debe usarse el recipiente adecuado y bajo condiciones de almacenamiento optimas para evitar contaminación o alteración de las propiedades de la muestra.

#### 3.2.1.1. NOMBRE Y UBICACIÓN DE FUENTES DE AGREGADOS PROPUESTAS:

Los ligantes asfálticos utilizados para la elaboración de esta investigación corresponden a las tres fuentes típicamente utilizadas, estas se citan a continuación:

**Tabla 3.6** – Fracciones de agregados

Designación	Clasificación por viscosidad*	Clasificación por desempeño*	Procedencia
A	AC-30	PG64	Nicaragua
B	AC-30	PG64	Honduras
C	AC-30	PG64	Guatemala

\* Según proveedor

#### 3.2.1.2. FECHA DE MUESTREO Y PROCEDIMIENTO UTILIZADO

Las muestras de cada ligante asfáltico utilizado para esta investigación, fueron tomadas de los tanques de almacenamiento de la planta asfáltica de ASFALCA S.A. de C.V. Las muestras fueron tomadas de cada tanque de conformidad con la norma AASHTO R66, el día 05 de marzo de 2,018.

**Ilustración 3.2** – Tanques de almacenamiento ASFALCA S.A. de C.V.



### **3.2.2. PROPIEDADES DE LIGANTES ASFÁLTICOS**

El asfalto puede ser caracterizado de tres maneras: por grado de penetración (exenta de análisis en esta investigación), por grado de viscosidad y por grado de desempeño. Independientemente de cada caracterización, el fin es evaluar la consistencia del asfalto a una o varias temperaturas, así como evaluar propiedades relacionadas con pureza, susceptibilidad al envejecimiento y seguridad.

#### **3.2.2.1. CLASIFICACION POR VISCOSIDAD [2]**

En la década de 1970, la viscosidad comenzó a utilizarse con mayor frecuencia en la clasificación de los ligantes asfálticos. Las normativas ASTM D3381 y AASHTO M226 establecieron los criterios de clasificación utilizando la viscosidad absoluta a 60°C como la principal propiedad física para la clasificación. Además, la viscosidad a 135°C también es generalmente especificada.

El propósito de los dos criterios fue prescribir valores límite de consistencia a dos temperaturas importantes. La temperatura de 60°C se eligió como una aproximación de la temperatura máxima de la superficie de pavimentos asfálticos en servicio en los Estados Unidos y en otras regiones del mundo. La temperatura de 135°C se eligió como una aproximación de la temperatura de colocación de las mezclas asfálticas en caliente. Por lo tanto, la especificación aborda la consistencia del ligante asfáltico durante el proceso de colocación de la mezcla asfáltica, cuando la trabajabilidad es una característica crítica, y la consistencia a temperaturas de verano, cuando se necesita rigidez. La especificación ASTM D-3381 para la clasificación por viscosidad, presenta cuatro tablas que pueden ser utilizadas para clasificar los ligantes asfálticos. Las tablas 1, 2 y 4 utilizan el sistema AC (cemento asfáltico) que consiste en grados AC-2.5, AC-5, AC-10, AC-20, AC-40 y, a veces, AC-30 y AC-42. Los valores numéricos de las designaciones de grado denotan la viscosidad del ligante asfáltico no envejecido en cientos de Poise a 60°C. En cada grado, la tolerancia permitida en la viscosidad es de  $\pm 20\%$ . Para la caracterización por viscosidad, las

propiedades más comunes para definir adecuadamente un ligante asfáltico a ser utilizado en la fabricación de mezcla asfáltica de buena calidad son:

- Evaluación del ligante previo al envejecimiento por RTFOT

- Viscosidad a 60°C ..... Norma: ASTM D-4402
- Viscosidad a 135°C ..... Norma: ASTM D-4402
- Punto de llama, copa de Cleveland ..... Norma: ASTM D-92
- Solubilidad en tricloroetileno ..... Norma: ASTM D-2042
- Penetración a 25°C ..... Norma: ASTM D-5
- Punto de ablandamiento ..... Norma: ASTM D-36
- Gravedad específica ..... Norma: ASTM D-70

- Evaluación del ligante posterior al envejecimiento por RTFOT

- Viscosidad a 60°C ..... Norma: ASTM D-4402
- Ductilidad a 25°C, 5cm/min ..... Norma: ASTM D-113



**Ilustración 3.3 – Penetración**



**Ilustración 3.4 – Punto de ablandamiento**



**Tabla 3.7 – Requerimientos para ligantes asfálticos, clasificación por viscosidad a 60°C. [13]**

Ensayos	Grado de viscosidad <sup>c</sup>				
	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-42
Viscosidad a 60°C, Poise	600 ± 20	1,000 ± 200	2,000 ± 400	3,000 ± 600	4,200 ± 600
Viscosidad a 135°C, cSt, Mínimo	175.0	250.0	300.0	350.0	400.0
Punto de llama, copa de Cleveland, °C, Mínimo	177.0	219.0	232.0	232.0	232.0
Solubilidad en tricloroetileno <sup>b</sup> , %, Mínimo	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Gravedad especifica a 25°C	Reportar				
Índice de penetración	-1.5 a +1.0	-1.5 a +1.0	-1.5 a +1.0	-1.5 a +1.0	-1.5 a +1.0
Pruebas al residuo RTFOT					
Cambio de masa, %, Máximo	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0
Viscosidad a 60°C, Poise, Máximo	3,000	5,000	8,000	12,000	20,000
Ductilidad <sup>a</sup> a 25°C y 5 cm/min, cm, Mínimo	100.0	75.0	50.0	40.0	25.0

- a. Si la ductilidad es menor que 100.0 cm, se aceptara el material si la ductilidad a 15.5°C es mínimo de 100.0 cm a una velocidad de elongación de 5.0 cm/min.
- b. Solubilidad en Bromuro de N-propileno puede ser un método alternativa a la solubilidad en TCE.
- c. Normativa ASTM D-3381-18, tabla 4: La tabla 4 muestra los limites típicamente utilizados en México, Centro y Sudamérica.

Los criterios exigidos, según la normativa ASTM D-3381, en su tabla 4 (Tabla 3.7), dirigida a la caracterización de ligantes asfálticos en las regiones de México, Centro y Sudamérica, define una serie de requerimientos para establecer la idoneidad del ligante asfáltico.

La determinación de las temperaturas de mezclado y compactación del ligante asfáltico, tienen una importancia fundamental en la calidad y desempeño de la mezcla asfáltica, en mayor medida la temperatura de compactación, si esta no es la correcta se puede influir en el desempeño considerablemente. Existen métodos para determinar estas temperaturas para diseños en laboratorio las cuales pueden servir como referencia para campo, el mas utilizado es el recomendado por Asphalt Institute. En este método se recomienda hacer una gráfica viscosidad vs temperatura “tradicional” y determinar las temperaturas de trabajo mediante los rangos de viscosidad establecidos,  $0.17 \pm 0.02$  Pa·s para temperatura de mezclado y  $0.28 \pm 0.03$  Pa·s para temperatura de compactación. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

**Tabla 3.8** – Resultados para el ligante asfáltico “A” – Clasificación por viscosidad

Requerimiento	Aceptación		Resultados
	Mínimo	Máximo	
Penetración, 25°C, 100g, 5s (dmm)	50	-	57
Viscosidad, 60°C (Pa.s)	240	360	247
Viscosidad, 135°C (mm <sup>2</sup> /s)	350	-	381
Punto de llama (°C)	232	-	283
Punto de ablandamiento (°C)	-	-	50.1
Solubilidad en tricloroetileno (%)	99.0	-	99.9
Gravedad específica, 15.6°C	-	-	1.026
Evaluación al residuo después de RTFO			
Viscosidad, 60°C (Pa.s)	-	1,500	728
Ductilidad, 5cm/min, 25°C (cm)	40	-	93

**Tabla 3.9** – Resultados para el ligante asfáltico “B” – Clasificación por viscosidad

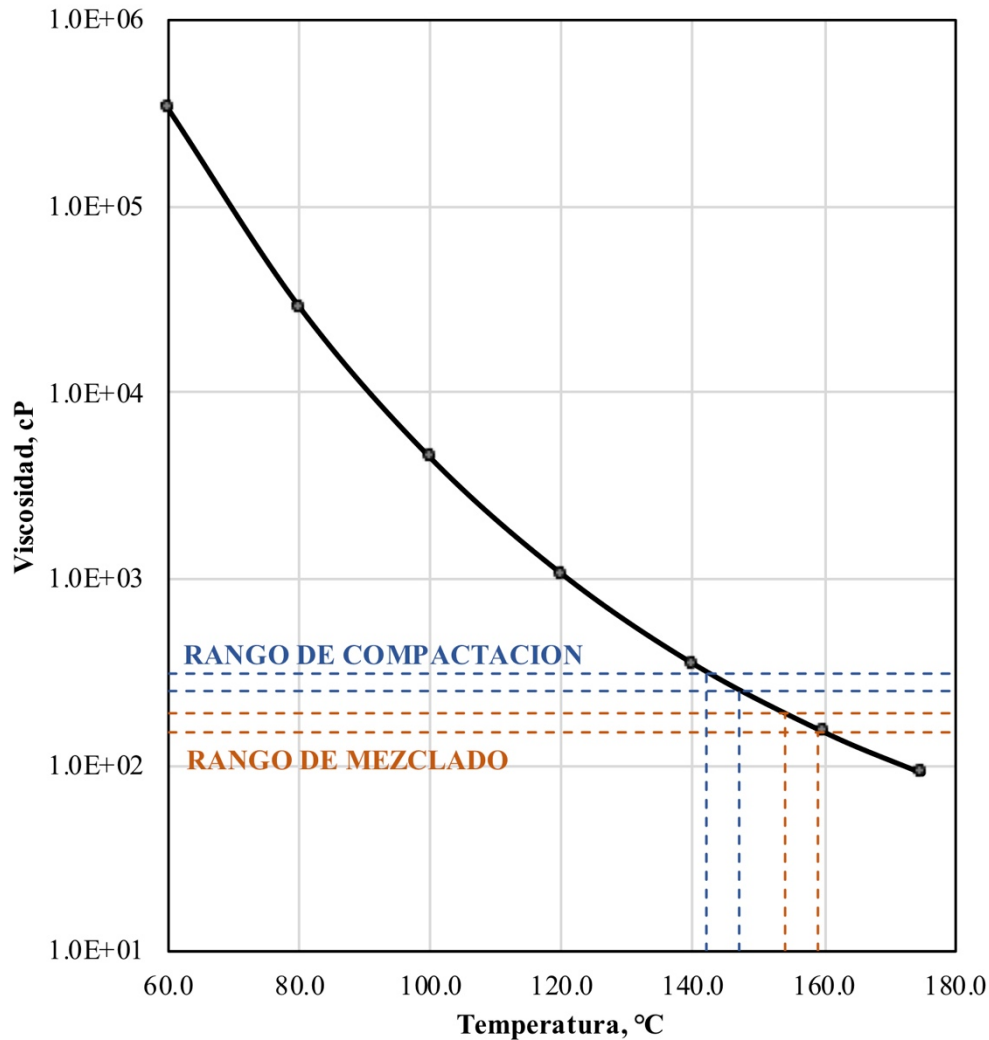
Requerimiento	Aceptación		Resultados
	Mínimo	Máximo	
Penetración, 25°C, 100g, 5s (dmm)	50	-	52
Viscosidad, 60°C (Pa.s)	240	360	283
Viscosidad, 135°C (mm <sup>2</sup> /s)	350	-	465
Punto de llama (°C)	232	-	289
Punto de ablandamiento (°C)	-	-	49.9
Solubilidad en tricloroetileno (%)	99.0	-	99.8
Gravedad específica, 15.6°C	-	-	1.035
Evaluación al residuo después de RTFO			
Viscosidad, 60°C (Pa.s)	-	1,500	555
Ductilidad, 5cm/min, 25°C (cm)	40	-	150

**Tabla 3.10** – Resultados para el ligante asfáltico “C” – Clasificación por viscosidad

Requerimiento	Aceptación		Resultados
	Mínimo	Máximo	
Penetración, 25°C, 100g, 5s (dmm)	50	-	69
Viscosidad, 60°C (Pa.s)	240	360	290
Viscosidad, 135°C (mm <sup>2</sup> /s)	350	-	485
Punto de llama (°C)	232	-	293
Punto de ablandamiento (°C)	-	-	49.4
Solubilidad en tricloroetileno (%)	99.0	-	99.9
Gravedad específica, 15.6°C	-	-	1.065
Evaluación al residuo después de RTFO			
Viscosidad, 60°C (Pa.s)	-	1,500	710
Ductilidad, 5cm/min, 25°C (cm)	40	-	150

Los tres ligantes asfálticos satisfacen los requerimientos de una designación **AC-30**.

**Ilustración 3.5 – Curva viscosidad vs. temperatura – Ligante “A”**

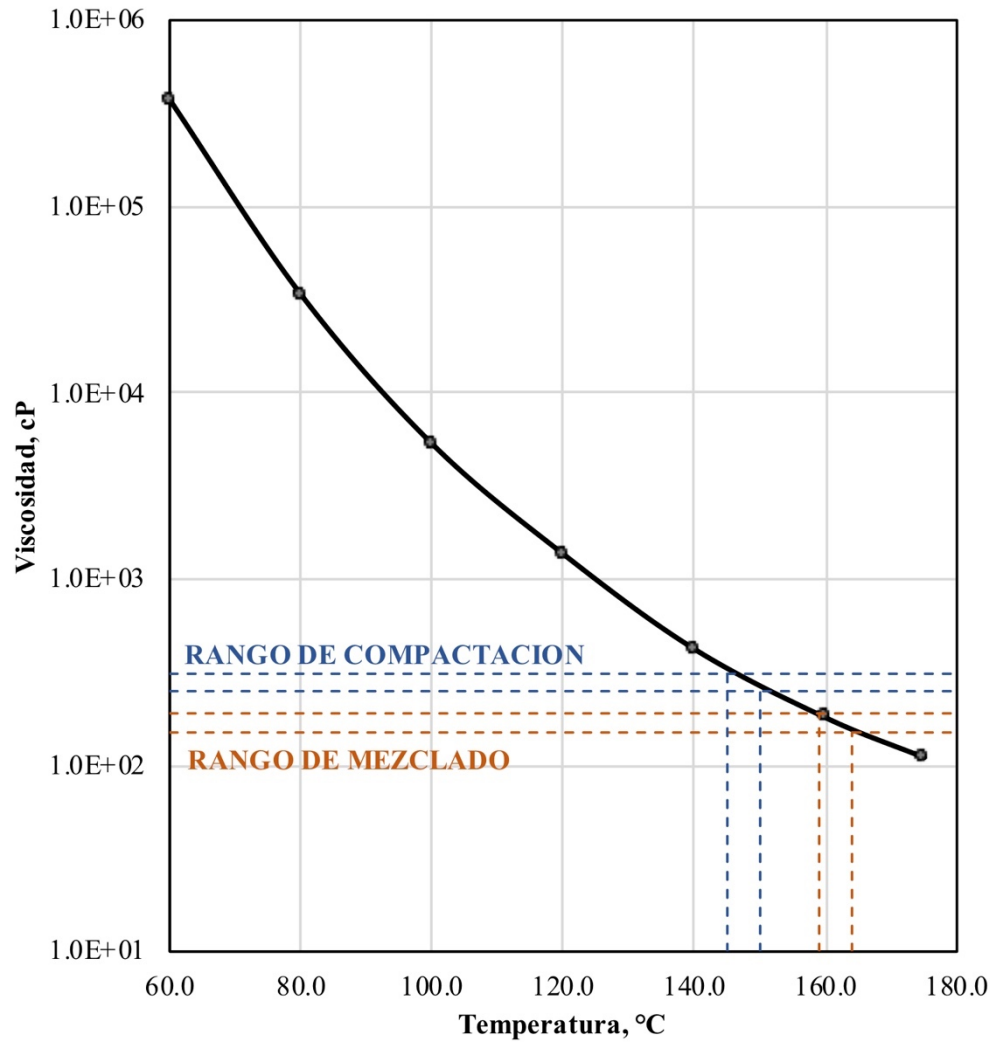


Temperatura	Viscosidad
60°C	332,000.0 cP
80°C	28,700.0 cP
100°C	4,440.0 cP
120°C	1,060.0 cP
140°C	350.0 cP
160°C	150.0 cP
175°C	90.0 cP

**NOTA**  
 Las Temperaturas de compactación y mezclado de laboratorio recomendadas para el diseño de mezclas asfálticas en caliente densas, por el Instituto del Asfalto (MS-2), son aquellas en las que el rango de viscosidad del asfalto se encuentra de 250 cP a 310 cP y de 150 cP a 190 cP, respectivamente.

<b>Curva Reologica</b>	
<b>Minimo</b>	<b>Maximo</b>
Compactacion	
<b>142°C</b>	<b>147°C</b>
Mezclado	
<b>154°C</b>	<b>159°C</b>

**Ilustración 3.6 – Curva viscosidad vs. temperatura – Ligante “B”**



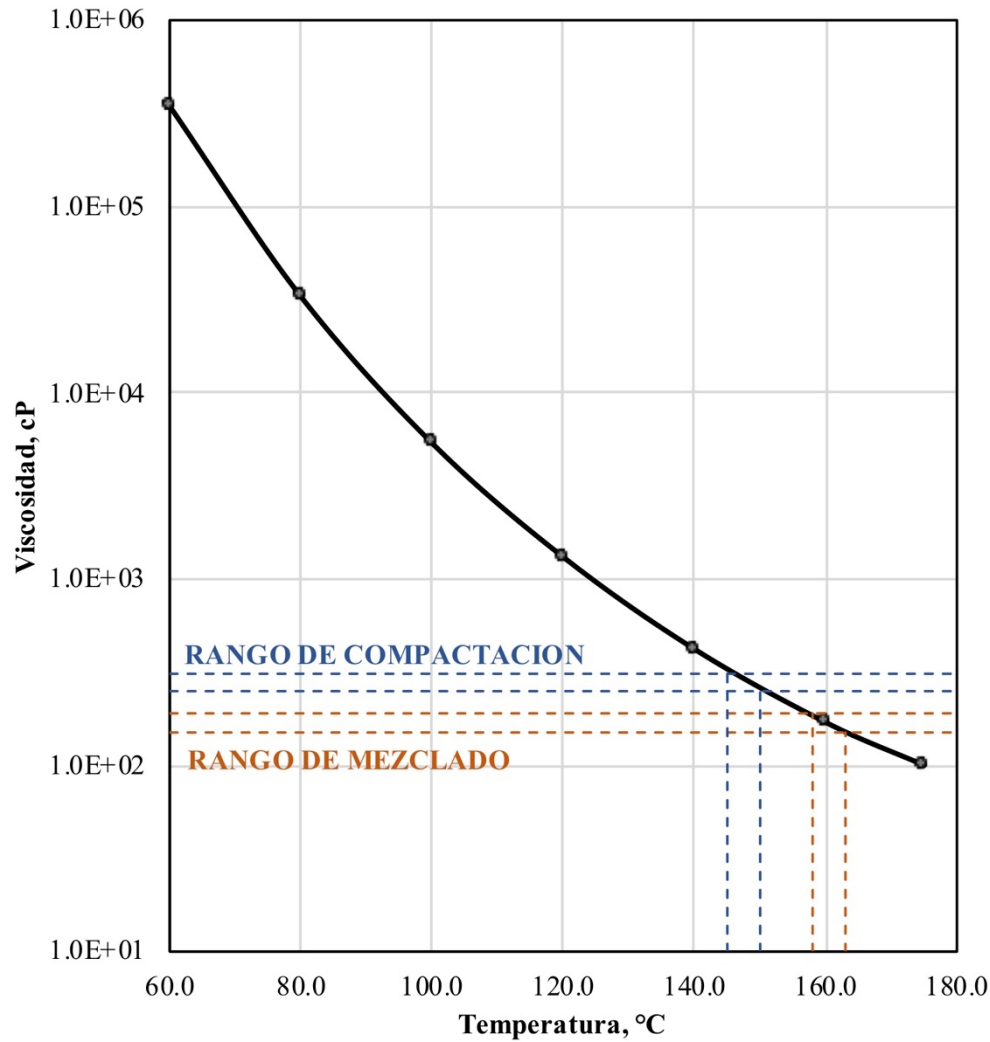
Temperatura	Viscosidad
60°C	374,000.0 cP
80°C	33,667.0 cP
100°C	5,313.0 cP
120°C	1,360.0 cP
140°C	420.0 cP
160°C	180.0 cP
175°C	110.0 cP

**NOTA**

Las Temperaturas de compactación y mezclado de laboratorio recomendadas para el diseño de mezclas asfálticas en caliente densas, por el Instituto del Asfalto (MS-2), son aquellas en las que el rango de viscosidad del asfalto se encuentra de 250 cP a 310 cP y de 150 cP a 190 cP, respectivamente.

<b>Curva Reologica</b>	
<b>Mínimo</b>	<b>Maximo</b>
Compactacion	
<b>145°C</b>	<b>150°C</b>
Mezclado	
<b>159°C</b>	<b>164°C</b>

**Ilustración 3.7 – Curva viscosidad vs. temperatura – Ligante “C”**



Temperatura	Viscosidad
60°C	345,000.0 cP
80°C	32,800.0 cP
100°C	5,357.0 cP
120°C	1,310.0 cP
140°C	420.0 cP
160°C	170.0 cP
175°C	100.0 cP

**NOTA**

Las Temperaturas de compactación y mezclado de laboratorio recomendadas para el diseño de mezclas asfálticas en caliente densas, por el Instituto del Asfalto (MS-2), son aquellas en las que el rango de viscosidad del asfalto se encuentra de 250 cP a 310 cP y de 150 cP a 190 cP, respectivamente.

<b>Curva Reologica</b>	
<b>Mínimo</b>	<b>Maximo</b>
Compactacion	
<b>145°C</b>	<b>150°C</b>
Mezclado	
<b>158°C</b>	<b>163°C</b>

### 3.2.2.2. CLASIFICACION POR DESEMPEÑO [2]

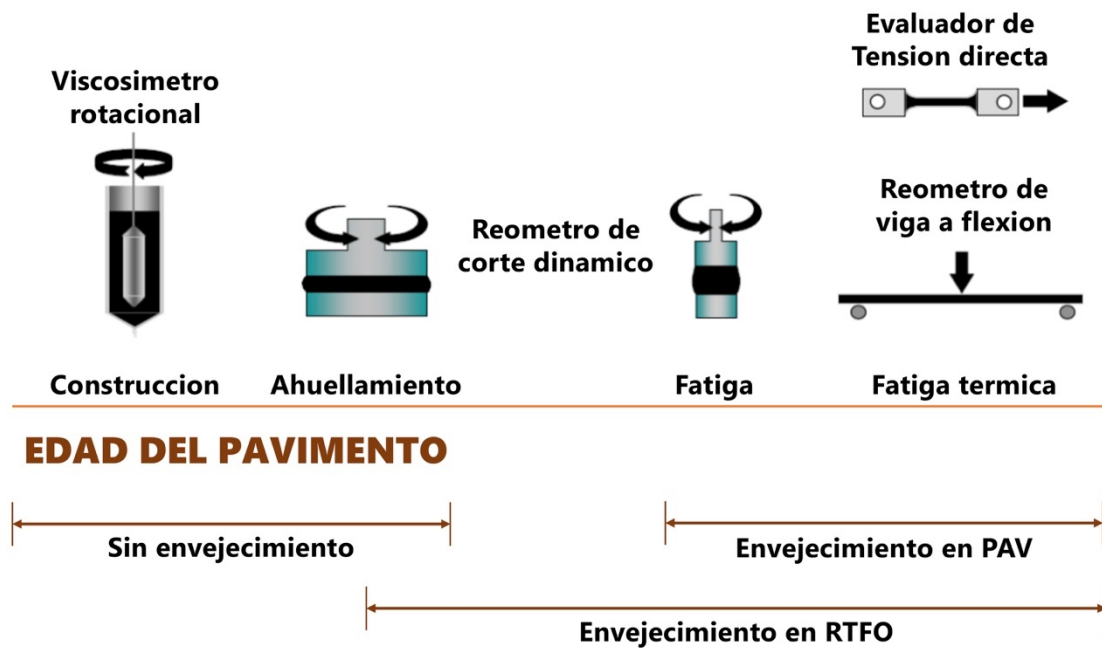
La clasificación por desempeño de ligantes asfálticos Superpave se desarrollo como parte del contrato de investigación SHRP A-002A. Esta especificación se conoce hoy como AASHTO M320 y los ligantes asfálticos se denominan bajo clasificación por desempeño (PG). El sistema de clasificación por desempeño se basa en el concepto de que: los valores de los criterios de especificación que garantizan la resistencia a los deterioros son independientes de la temperatura, pero los valores deben obtenerse a diferentes temperaturas según las condiciones climáticas.

Este concepto requiere que el comportamiento del ligante asfáltico se caracterice en todo su rango de servicio, lo que da como resultado diferentes temperaturas de prueba para los diferentes grados de PG. La intención original de los investigadores de SHRP A-002A era requerir mediciones a tres temperaturas de prueba para definir las propiedades físicas. Posteriormente las mediciones de propiedades físicas se establecieron a tres condiciones de temperaturas para el pavimento: superior, intermedia e inferior. Estas tres condiciones se asociaron con los fenómenos de ahuellamiento, fatiga y grietas por contracción térmica. Se requirieron nuevos procedimientos para medir las propiedades físicas recién seleccionadas. Además, también se requirió una prueba no relacionada con el desempeño para garantizar la trabajabilidad durante el envío y la colocación de la mezcla asfáltica. Así, se desarrollaron nuevos procedimientos de prueba para ligantes asfálticos:

- **Viscosímetro rotacional (RV)**, AASHTO T316: un método de prueba ASTM preexistente adoptado para medir la viscosidad a temperaturas elevadas (Ilustración 3.9).
- **Reómetro de corte dinámico (DSR)**, AASHTO T315: nuevo método de prueba basado en reómetros con grado de investigación preexistentes. Se utiliza para determinar el módulo (rigidez) del ligante asfáltico a temperaturas intermedias y altas del pavimento (Ilustración 3.10).

- **Reómetro de viga a flexión (BBR)**, AASHTO T 313: un nuevo método estándar de prueba y aparato de ensayo utilizado para determinar el módulo (rigidez) de los ligantes asfálticos a temperaturas bajas del pavimento. (exento de esta investigación)
- **Prueba de tensión directa (DTT)**, AASHTO T314: se desarrolló un nuevo método estándar de prueba y aparato de ensayo para determinar la resistencia a la tracción de los ligantes asfálticos a temperaturas bajas del pavimento. (exento de esta investigación)
- **Horno rotacional de película delgada (RTFOT)**, AASHTO T240: se seleccionó un único procedimiento existente (RTFOT) para simular el envejecimiento que ocurre durante el mezclado y la compactación (**Ilustración 3.11**).
- **Vasija de envejecimiento presurizado (PAV)**, AASHTO R28: se adoptó una prueba de investigación preexistente como un medio para simular el envejecimiento en el campo a largo plazo en servicio (**Ilustración 3.12**).

**Ilustración 3.8** – Clasificación por desempeño Superpave de ligantes asfálticos







**Ilustración 3.9 – Viscosímetro Rotacional**



**Ilustración 3.10 – DSR**



**Ilustración 3.11 – RTFO**



**Ilustración 3.12 – PAV**

La clasificación se desarrolló con el supuesto de que las propiedades especificadas deberían medirse en ligantes asfálticos representativos de la estructura en servicio, en las condiciones con mayor probabilidad de ocurrencia de deterioro. Por lo tanto, las propiedades especificadas relacionadas con la formación de ahuellamiento se miden en el ligante asfáltico original y en el residuo RTFO; las propiedades especificadas relacionadas con el agrietamiento por fatiga y el

agrietamiento térmico se miden en residuos de PAV. La clasificación por desempeño mediante la especificación AASHTO 320, se centra en analizar el ligante asfáltico en diferentes edades de operación (Ilustración 3.8), para lo cual utiliza los siguientes ensayos:

- Evaluación del ligante original
  - Punto de llama ..... Norma: ASTM D-92
  - Viscosidad a 135°C ..... Norma: ASTM D-4402
  - Módulo de corte dinámico,  $G^*/\text{sen}(\delta)$  ..... Norma: AASHTO T315
- Evaluación del ligante posterior al envejecimiento por RTFOT
  - Envejecimiento RTFO ..... Norma: AASHTO T240
  - Cambio de masa ..... Norma: AASHTO T240
  - Módulo de corte dinámico,  $G^*/\text{sen}(\delta)$  ..... Norma: AASHTO T315
- Evaluación del ligante posterior al envejecimiento por PAV
  - Envejecimiento PAV ..... Norma: AASHTO R28
  - Módulo de corte dinámico,  $G^*/\text{sen}(\delta)$  ..... Norma: AASHTO T315
  - Rigidez a la fluencia ..... Norma: AASHTO T313
  - Tensión directa ..... Norma: AASHTO T314

A los criterios exigidos para la caracterización del ligante asfáltico por desempeño, establecidos en la normativa AASHTO M320, se es definido los requerimientos para garantizar su idoneidad. A continuación, se presenta un extracto de la normativa en la cual se muestran los requerimientos para un ligante asfáltico clasificado como PG64.

**Tabla 3.11** – Especificación de ligantes asfálticos por grado de desempeño [14]

Grado de desempeño	PG64					
	10	16	22	28	34	40
Temperatura de diseño máxima promedio, °C	<64					
Temperatura de diseño mínima, °C	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40
<b>LIGANTE ASFÁLTICO EN CONDICION ORIGINAL</b>						
Punto de llama, ASTM D-92, Min., °C	230					
Viscosidad, ASTM D-4402 Máx. 3.0 Pa•s, temp. ensayo, °C	135					
Corte dinámico, AASHTO T315 G*/sen(δ), Min. 1.00 kPa Temp. ensayo, 10 rad/s, °C	64					
<b>RESIDUO POSTERIOR A ENVEJECIMIENTO EN RTFO (AASHTO T240)</b>						
Cambio de masa, Máx., %	1.00					
Corte dinámico, AASHTO T315 G*/sen(δ), Min. 2.20 kPa Temp. ensayo, 10 rad/s, °C	64					
<b>RESIDUO POSTERIOR A ENVEJECIMIENTO EN PAV (AASHTO R28)</b>						
Temperatura de envejecimiento PAV, °C	100 (110)					
Corte dinámico, AASHTO T315 G* sen(δ), Máx. 5,000.0 kPa Temp. ensayo, 10 rad/s, °C	31	28	25	22	19	16
Temp. min. critica de agrietamiento, AASHTO R49 Temp. critica de agrietamiento determinada por AASHTO R49, temp. ensayo, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30

El principio fundamental de la clasificación por desempeño es realizar los envejecimientos en el horno de película delgada rotacional (RTFO) y en la vasija de envejecimiento presurizado (RTFO+PAV), medir las propiedades reológicas de la muestra en condición original, la muestra acondicionada RTFO y la muestra acondicionada RTFO+PAV y buscar con base a estos, el rango de clasificación en el cual se cumplen los requerimientos, a los demás ensayos se les debe verificar su cumplimiento. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

**Tabla 3.12** – Resultados ligante asfáltico “A” – Clasificación por desempeño - Adicionales

Requerimiento	Aceptación		Resultados
	Mínimo	Máximo	
Viscosidad, 135°C (Pa.s)	-	3.0	0.38
Punto de llama (°C)	230.0	-	283.0
Cambio de masa (%)	-	1.0	0.2

**Tabla 3.13** – Resultados ligante asfáltico “B” – Clasificación por desempeño - Adicionales

Requerimiento	Aceptación		Resultados
	Mínimo	Máximo	
Viscosidad, 135°C (Pa.s)	-	3.0	0.47
Punto de llama (°C)	230.0	-	289.0
Cambio de masa (%)	-	1.0	0.2

**Tabla 3.14** – Resultados ligante asfáltico “C” – Clasificación por desempeño - Adicionales

Requerimiento	Aceptación		Resultados
	Mínimo	Máximo	
Viscosidad, 135°C (Pa.s)	-	3.0	0.49
Punto de llama (°C)	230.0	-	293.0
Cambio de masa (%)	-	1.0	0.1

**Tabla 3.15** – Resultados DSR\* para el ligante asfáltico “A” – Asfalto original

Frecuencia angular	Temp.	Esfuerzo de corte	%Strain	$\delta$	G*	G/sen( $\delta$ )
10 rad/s	46.0°C	3.15 Pa	12.0	75.4	26.2 kPa	27.0 kPa
10 rad/s	52.0°C	1.27 Pa	12.1	78.3	10.5 kPa	10.8 kPa
10 rad/s	58.0°C	0.52 Pa	12.0	81.1	4.33 kPa	4.38 kPa
10 rad/s	64.0°C	0.22 Pa	12.0	83.5	1.87 kPa	1.88 kPa
10 rad/s	70.0°C	0.10 Pa	12.0	85.4	0.866 kPa	0.869 kPa

**Tabla 3.16** – Resultados DSR para el ligante asfáltico “A” – Asfalto envejecido en RTFO

Frecuencia angular	Temp.	Esfuerzo de corte	%Strain	$\delta$	G*	G/sen( $\delta$ )
10 rad/s	52.0°C	2.75 Pa	10.0	70.8	27.4 kPa	29.0 kPa
10 rad/s	58.0°C	1.22 Pa	10.1	73.9	12.1 kPa	12.6 kPa
10 rad/s	64.0°C	0.54 Pa	10.0	77.0	5.43 kPa	5.57 kPa
10 rad/s	70.0°C	0.25 Pa	10.0	79.8	2.50 kPa	2.54 kPa
10 rad/s	76.0°C	0.12 Pa	10.0	82.2	1.19 kPa	1.20 kPa

**Tabla 3.17** – Resultados DSR para ligante asfáltico “A” – Asfalto envejecido RTFO+PAV

Frecuencia angular	Temp.	Esfuerzo oscilatorio	%Strain	$\delta$	G*	G*sen( $\delta$ )
10 rad/s	31.0°C	24.06 Pa	1.0	45.0	2,600 kPa	1,840 kPa
10 rad/s	28.0°C	35.32 Pa	1.0	42.6	3,630 kPa	2,460 kPa
10 rad/s	25.0°C	51.74 Pa	1.0	40.4	5,160 kPa	3,340 kPa
10 rad/s	22.0°C	76.43 Pa	1.0	38.3	7,590 kPa	4,700 kPa
10 rad/s	19.0°C	111.49 Pa	1.0	36.3	11,000 kPa	6,510 kPa

**Tabla 3.18** – Resultados DSR para el ligante asfáltico “B” – Asfalto original

Frecuencia angular	Temp.	Esfuerzo oscilatorio	%Strain	$\delta$	G*	G/sen( $\delta$ )
10 rad/s	46.0°C	3.84 Pa	12.0	80.8	32.1 kPa	32.5 kPa
10 rad/s	52.0°C	1.48 Pa	12.0	83.1	12.3 kPa	12.4 kPa
10 rad/s	58.0°C	0.60 Pa	12.0	85.1	4.96 kPa	4.98 kPa
10 rad/s	64.0°C	0.26 Pa	12.0	86.6	2.15 kPa	2.15 kPa
10 rad/s	70.0°C	0.12 Pa	12.0	87.8	0.996 kPa	0.997 kPa

**Tabla 3.19** – Resultados DSR para el ligante asfáltico “B” – Asfalto envejecido en RTFO

Frecuencia angular	Temp.	Esfuerzo oscilatorio	%Strain	$\delta$	G*	G/sen( $\delta$ )
10 rad/s	52.0°C	3.35 Pa	10.0	77.1	33.5 kPa	34.4 kPa
10 rad/s	58.0°C	1.36 Pa	10.0	79.9	13.6 kPa	13.8 kPa
10 rad/s	64.0°C	0.57 Pa	10.0	82.4	5.73 kPa	5.78 kPa
10 rad/s	70.0°C	0.26 Pa	10.0	84.4	2.55 kPa	2.56 kPa
10 rad/s	76.0°C	0.12 Pa	10.0	86.1	1.20 kPa	1.20 kPa

**Tabla 3.20** – Resultados DSR para el ligante asfáltico “B” – Asfalto envejecido RTFO+PAV

Frecuencia angular	Temp.	Esfuerzo oscilatorio	%Strain	$\delta$	G*	G/sen( $\delta$ )
10 rad/s	28.0°C	21.19 Pa	1.0	43.8	2,200 kPa	1,520 kPa
10 rad/s	25.0°C	30.90 Pa	1.0	41.9	3,090 kPa	2,060 kPa
10 rad/s	22.0°C	45.19 Pa	1.0	40.3	4,520 kPa	2,920 kPa
10 rad/s	19.0°C	66.27 Pa	1.0	38.6	6,610 kPa	4,120 kPa
10 rad/s	16.0°C	96.06 Pa	1.0	36.9	9,660 kPa	5,800 kPa

**Tabla 3.21** – Resultados DSR para el ligante asfáltico “C” – Asfalto original

Frecuencia angular	Temp.	Esfuerzo oscilatorio	%Strain	$\delta$	G*	G/sen( $\delta$ )
10 rad/s	46.0°C	2.63 Pa	12.0	77.0	21.9 kPa	22.5 kPa
10 rad/s	52.0°C	1.10 Pa	12.0	80.1	9.17 kPa	9.31 kPa
10 rad/s	58.0°C	0.48 Pa	11.9	82.8	4.01 kPa	4.05 kPa
10 rad/s	64.0°C	0.22 Pa	12.0	85.0	1.86 kPa	1.87 kPa
10 rad/s	70.0°C	0.11 Pa	12.0	86.6	0.903 kPa	0.905 kPa

**Tabla 3.22** – Resultados DSR para el ligante asfáltico “C” – Asfalto envejecido en RTFO

Frecuencia angular	Temp.	Esfuerzo oscilatorio	%Strain	$\delta$	G*	G/sen( $\delta$ )
10 rad/s	52.0°C	3.30 Pa	10.1	69.5	32.8 kPa	35.0 kPa
10 rad/s	58.0°C	1.51 Pa	10.0	73.1	15.1 kPa	15.8 kPa
10 rad/s	64.0°C	0.71 Pa	10.0	76.6	7.12 kPa	7.32 kPa
10 rad/s	70.0°C	0.34 Pa	10.0	79.7	3.44 kPa	3.50 kPa
10 rad/s	76.0°C	0.17 Pa	10.0	82.3	1.71 kPa	1.72 kPa

**Tabla 3.23** – Resultados DSR para el ligante asfáltico “C” – Asfalto envejecido RTFO+PAV

Frecuencia angular	Temp.	Esfuerzo oscilatorio	%Strain	$\delta$	G*	G/sen( $\delta$ )
10 rad/s	31.0°C	22.73 Pa	1.0	46.6	2,390 kPa	1,740 kPa
10 rad/s	28.0°C	33.78 Pa	1.0	44.5	3,560 kPa	2,500 kPa
10 rad/s	25.0°C	50.15 Pa	1.0	42.5	4,970 kPa	3,360 kPa
10 rad/s	22.0°C	74.68 Pa	1.0	40.7	7,410 kPa	4,830 kPa
10 rad/s	19.0°C	110.72 Pa	1.0	38.8	10,900 kPa	6,830 kPa

Los tres ligantes asfálticos satisfacen los requerimientos de una designación **PG64-22** según clasificación por desempeño AASHTO M320.

### **3.3. MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE**

Se define como mezcla asfáltica en caliente (MAC) a la combinación de agregados pétreos, incluido el polvo mineral, con un ligante asfáltico, de manera que los agregados queden cubiertos por una película continua de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto desempeño de la MAC y la falta de calidad en alguno de ellos afecta al conjunto. Para su diseño, existen tres métodos para determinar las proporciones de ligante asfáltico y agregados: Método Marshall, método Hveem y método Superpave.

Para la elaboración del presente estudio, las mezclas asfálticas en caliente fueron diseñadas utilizando los procedimientos establecidos en el capítulo 6 del Manual Series, “MS-2: Asphalt mix design Methods, 7th edition”, publicado por Asphalt Institute, acompañado por los lineamientos de las especificaciones técnicas AASHTO R35 y AASHTO M323, propios del método Superpave.

#### **3.3.1. FECHA Y LUGAR DE ELABORACION**

La elaboración de los diseños de mezclas asfálticas inicio con la toma de las muestras de agregados, realizada el 29 de febrero 2018 y finaliza con la emisión de los resultados el día 10 de abril 2018. Los diseños de mezclas asfálticas en caliente fueron efectuados en las instalaciones del laboratorio de Investigación y Desarrollo de ASFALCA S.A., ubicado en el cantón 3 ceibas, Km. 39½ carretera a Sonsonate, Armenia, Sonsonate.

#### **3.3.2. MÉTODO SUPERPAVE**

En 1987, el Strategic Highway Research Program (SHRP) 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.



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). Representa una tecnología de tal manera provista que pueda especificar ligante asfáltico y agregado petreo, 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.

### **3.3.3. DOSIFICACIÓN DE AGREGADOS**

La dosificación de agregados tiene por objeto lograr una mezcla asfáltica cuya gradación se encuentre dentro de los límites recomendados en una especificación determinada. El método más utilizado en el medio nacional corresponde a la metodología Bailey, el cual se base en el empaquetamiento de agregados que sigue un proceso de dosificación a través de propiedades volumétricas, el cual requiere información sobre la granulometría, gravedad específica y pesos volumétricos de cada agregado. En el presente estudio se establecen dos tipos de combinaciones granulométricas, las cuales se diferencia en el valor de CALUW utilizado en la metodología Bailey, la primera combinación corresponde a un valor de CALUW de **75.0%** (mezcla asfáltica densa fina) y la segunda combinación presenta un valor de CALUW de **100.0%** (mezcla asfáltica densa gruesa). A continuación, se presentan el resultado de la aplicación del método Bailey:

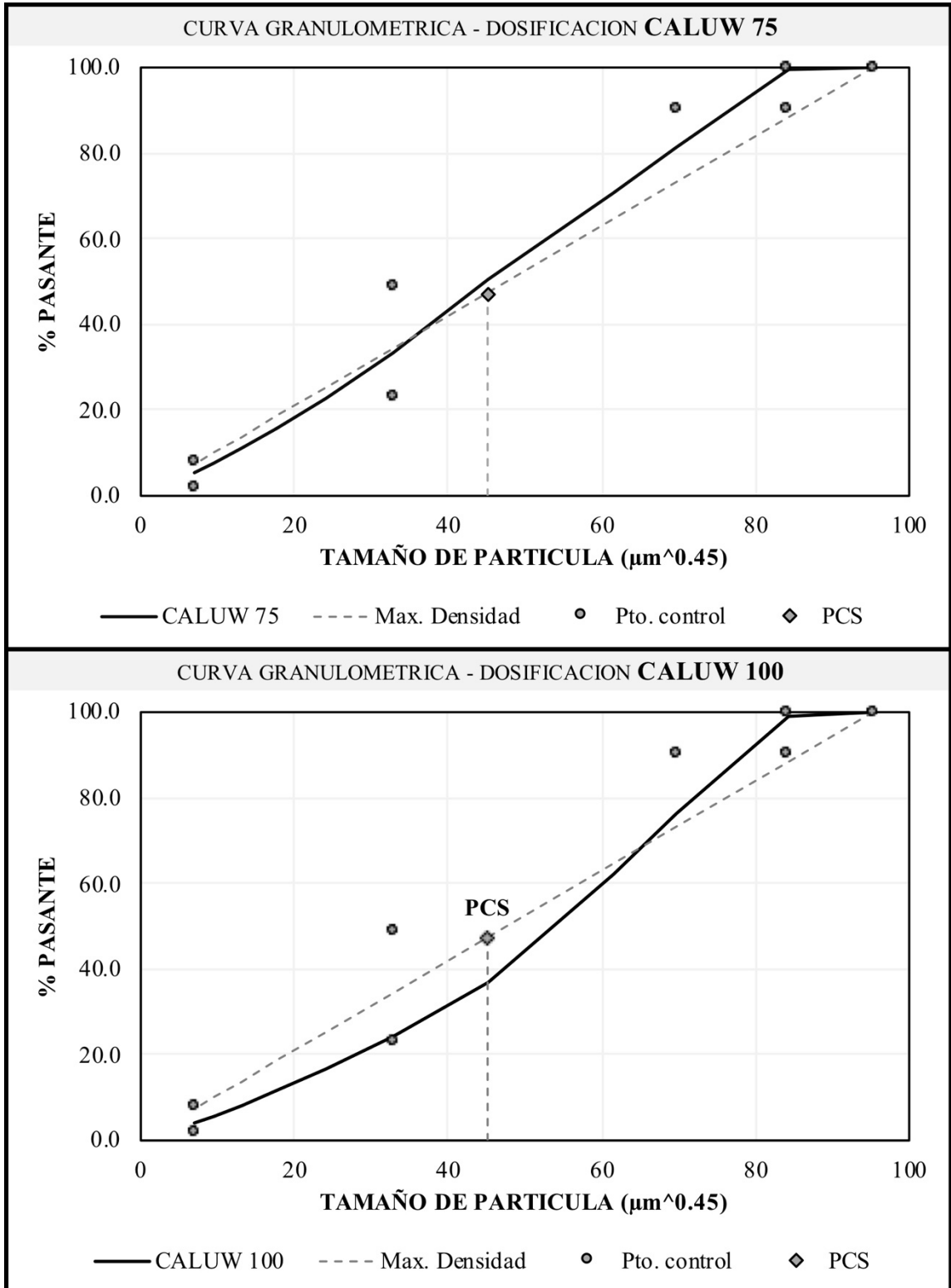
**Tabla 3.24 – Dosificación granulométrica por método Bailey – CALUW 75.0%**

Proyecto:	TRABAJO DE GRADUACION					TMN:	19.00 mm.																		
Material:	MAC TMN 3/4" - CALUW 75.0% - DENSA FINA					CALUW:	75.0																		
Realizó:	KAREN ARAYA & RICARDO FLORES					Fecha:	20/3/18																		
DOSIFICACION GRANULOMETRICA DE AGREGADOS POR METODOLOGIA BAILEY																									
No. de agregado :	#1-AG	#2-AG	#3-AG	#1-AF	#2-AF	#3-AF	FILLER:																		
Codigo de agregado:	AGR-18-105	AGR-18-106	-	AGR-18-107	-	-	4.0																		
Tipo de agregado:	GRAVA ¾"	GRAVA ½"	-	A.T.	-	-	Gs(agua)																		
Localizacion:	LA CANTERA	LA CANTERA	-	LA CANTERA	-	-	1,000.0																		
MALLA		DOSIFICACION DE AGREGADOS VIRGENES																							
in.	mm.	35.5	14.0	0.0	50.5	0.0	0.0	TOTAL																	
1½"	37.5	100.0	100.0		100.0			100.0																	
1"	25.0	100.0	100.0		100.0			100.0																	
¾"	19.0	98.1	100.0		100.0			99.3																	
½"	12.5	48.2	100.0		100.0			81.6																	
¼"	9.50	18.3	100.0		100.0			71.0																	
No.4	4.75	1.2	15.2		94.6			50.3																	
No.8	2.36	1.1	4.9		63.8			33.3																	
No.16	1.18	1.0	3.6		43.4			22.8																	
No.30	0.60	0.9	3.0		29.8			15.8																	
No.50	0.30	0.8	2.6		21.0			11.3																	
No.100	0.15	0.7	2.2		14.4			7.8																	
No.200	0.075	0.5	1.5		10.0			5.4																	
DATOS VOLUMETRICOS DE AGREGADO PETREOS																									
Peso vol. suelto (LUW):	1,380.0	1,433.0		1,652.0																					
Peso vol. escogido (CUW):	1,035.0	1,074.8		1,786.0																					
Peso vol. compacto (RUW):	1,468.0	1,602.0		1,786.0																					
Gravedad Bulk (Gsb):	2.532	2.532		2.540																					
Gravedad aparente (Gsa):	2.578	2.667		2.620																					
Absorcion:	0.7	2.0		1.2																					
Vacios sueltos:	45.5	43.4		35.0																					
Vacios compactos:	42.0	36.7		29.7																					
PESOS VOLUMETRICOS DESEADOS DE MEZCLAS DE AGREGADOS VIRGENES																									
Agregado grueso:	75.0	25.0					100.0																		
Agregado fino:				100.0			100.0																		
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>TAMICES CONTROL</th> <th>GRUESA</th> <th>FINA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>TMN</td> <td>19.00</td> <td>4.75</td> </tr> <tr> <td>HS</td> <td>9.50</td> <td>2.36</td> </tr> <tr> <td>PCS</td> <td>4.75</td> <td>1.18</td> </tr> <tr> <td>SCS</td> <td>1.18</td> <td>0.30</td> </tr> <tr> <td>TCS</td> <td>0.30</td> <td>0.08</td> </tr> </tbody> </table>						TAMICES CONTROL	GRUESA	FINA	TMN	19.00	4.75	HS	9.50	2.36	PCS	4.75	1.18	SCS	1.18	0.30	TCS	0.30	0.08
TAMICES CONTROL	GRUESA	FINA																							
TMN	19.00	4.75																							
HS	9.50	2.36																							
PCS	4.75	1.18																							
SCS	1.18	0.30																							
TCS	0.30	0.08																							
PARAMETROS DE REVISION BAILEY																									
CONDICION	VALOR	RANGO																							
CA	0.618	0.60 - 0.75																							
FAc	0.494	0.35 - 0.50																							
FAf	0.483	0.35 - 0.50																							

**Tabla 3.25 – Dosificación granulométrica por método Bailey – CALUW 100.0%**

Proyecto:	TRABAJO DE GRADUACION					TMN:	19.00 mm.																		
Material:	MAC TMN 3/4" - CALUW 100.0% - DENSA GRUESA					CALUW:	100.0																		
Realizó:	KAREN ARAYA & RICARDO FLORES					Fecha:	20/3/18																		
DOSIFICACION GRANULOMETRICA DE AGREGADOS POR METODOLOGIA BAILEY																									
No. de agregado :	#1-AG	#2-AG	#3-AG	#1-AF	#2-AF	#3-AF	FILLER:																		
Codigo de agregado:	AGR-18-105	AGR-18-106	-	AGR-18-107	-	-	4.0																		
Tipo de agregado:	GRAVA ¾"	GRAVA ½"	-	A.T.	-	-	Gs(agua)																		
Localizacion:	LA CANTERA	LA CANTERA	-	LA CANTERA	-	-	1,000.0																		
MALLA		DOSIFICACION DE AGREGADOS VIRGENES						TOTAL																	
in.	mm.	46.2	18.3	0.0	35.5	0.0	0.0																		
1½"	37.5	100.0	100.0		100.0			100.0																	
1"	25.0	100.0	100.0		100.0			100.0																	
¾"	19.0	98.1	100.0		100.0			99.1																	
½"	12.5	48.2	100.0		100.0			76.1																	
¼"	9.50	18.3	100.0		100.0			62.3																	
No.4	4.75	1.2	15.2		94.6			36.9																	
No.8	2.36	1.1	4.9		63.8			24.1																	
No.16	1.18	1.0	3.6		43.4			16.5																	
No.30	0.60	0.9	3.0		29.8			11.5																	
No.50	0.30	0.8	2.6		21.0			8.3																	
No.100	0.15	0.7	2.2		14.4			5.8																	
No.200	0.075	0.5	1.5		10.0			4.1																	
DATOS VOLUMETRICOS DE AGREGADO PETREOS																									
Peso vol. suelto (LUW):	1,380.0	1,433.0		1,652.0																					
Peso vol. escogido (CUW):	1,380.0	1,433.0		1,786.0																					
Peso vol. compacto (RUW):	1,468.0	1,602.0		1,786.0																					
Gravedad Bulk (Gsb):	2.532	2.532		2.540																					
Gravedad aparente (Gsa):	2.578	2.667		2.620																					
Absorcion:	0.7	2.0		1.2																					
Vacios sueltos:	45.5	43.4		35.0																					
Vacios compactos:	42.0	36.7		29.7																					
PESOS VOLUMETRICOS DESEADOS DE MEZCLAS DE AGREGADOS VIRGENES																									
Agregado grueso:	75.0	25.0					100.0																		
Agregado fino:				100.0			100.0																		
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>TAMICES CONTROL</th> <th>GRUESA</th> <th>FINA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>TMN</td> <td>19.00</td> <td>4.75</td> </tr> <tr> <td>HS</td> <td>9.50</td> <td>2.36</td> </tr> <tr> <td>PCS</td> <td>4.75</td> <td>1.18</td> </tr> <tr> <td>SCS</td> <td>1.18</td> <td>0.30</td> </tr> <tr> <td>TCS</td> <td>0.30</td> <td>0.08</td> </tr> </tbody> </table>						TAMICES CONTROL	GRUESA	FINA	TMN	19.00	4.75	HS	9.50	2.36	PCS	4.75	1.18	SCS	1.18	0.30	TCS	0.30	0.08
TAMICES CONTROL	GRUESA	FINA																							
TMN	19.00	4.75																							
HS	9.50	2.36																							
PCS	4.75	1.18																							
SCS	1.18	0.30																							
TCS	0.30	0.08																							
PARAMETROS DE REVISION BAILEY																									
CONDICION	VALOR	RANGO																							
CA	0.659	0.60 - 0.75																							
FAc	0.448	0.35 - 0.50																							
FAf	0.500	0.35 - 0.50																							

**Ilustración 3.13** – Distribuciones granulométricas de dosificaciones



La Tabla 3.26, presenta las combinaciones de agregados para la fabricación de las mezclas asfálticas, y la Tabla 3.27 las granulometrías de diseño junto con los puntos de control granulométrico establecidos por la metodología de diseño Superpave.

**Tabla 3.26** – Porcentajes para la combinación de agregados pétreos.

Designación	Grava ¾"	Grava ⅜"	Arena triturada
CALUW75	35.5%	14.0%	50.5%
CALUW100	46.2%	18.3%	35.5%

**Tabla 3.27** – Porcentajes para la combinación de agregados pétreos.

Malla	Tolerancia	Granulometría de diseño		Especificación Superpave		
		CALUW75	CALUW100	Mínimo	Máximo	PCS
1"	± 6.0	100.0	100.0	100.0	–	–
¾"	± 6.0	99.3	99.1	90.0	100.0	–
½"	-	81.6	76.1	–	90.0	–
⅜"	± 5.0	71.0	62.3	–	–	–
No.4	± 5.0	50.3	36.9	–	–	47.0
No.8	± 4.0	33.3	24.1	23.0	49.0	–
No.16	-	22.8	16.5	–	–	–
No.30	-	15.8	11.5	–	–	–
No.50	± 4.0	11.3	8.3	–	–	–
No.100	-	7.8	5.8	–	–	–
No.200	± 2.0	5.4	4.1	2.0	8.0	–

Según la metodología Superpave, la gradación de agregados combinado se considerará de gradación gruesa cuando pase por debajo del punto PCS (Tamiz de control primario), definido para mezclas asfálticas de TMN ¾" en la malla No.4 (4.75 mm.) con valor de control de 47.0%, quedando definida como gradación gruesa la designación CALUW100 y gradación fina la designación CALUW75.

Para la realización de los análisis volumétricos de las mezclas asfálticas, es necesario realizar el cálculo de gravedades específicas y absorciones combinadas para las gradaciones de diseño. Los resultados se presentan a continuación:

**Tabla 3.28** – Gravedad específica y absorción de agregados combinados – CALUW75

Material	Aporte	Gravedad Bulk		Absorción	
		Individual	Combinado	Individual	Combinado
Grava ¾"	35.5%	2.532		0.7%	
Grava ⅜"	14.0%	2.532	2.536	2.0%	1.1%
Arena T.	50.5%	2.540		1.2%	

**Tabla 3.29** – Gravedad específica y absorción de agregados combinados – CALUW100

Material	Aporte	Gravedad Bulk		Absorción	
		Individual	Combinado	Individual	Combinado
Grava ¾"	46.2%	2.532		0.7%	
Grava ⅜"	18.3%	2.532	2.537	2.0%	1.1%
Arena T.	35.5%	2.540		1.2%	

### 3.3.4. DISEÑO VOLUETRICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las pruebas más comunes para caracterizar satisfactoriamente una mezcla asfáltica aplicando el método de diseño volumétrico son:

- Compactación de especímenes Superpave .....AASHTO T312
- Gravedad específica teórica máxima (Gmm) .....AASHTO T166
- Gravedad específica Bulk (Gmb) .....AASHTO T209
- Contenido de asfalto (Pb) .....AASHTO R35
- Contenido de vacíos (Va) .....AASHTO R35
- Vacíos en agregado mineral (VMA) .....AASHTO R35

- Vacíos llenos de asfalto (VFA) .....AASHTO R35
- Grado de densificación inicial .....AASHTO R35
- Grado de densificación final .....AASHTO R35
- Relación filler – asfalto (F/A) .....AASHTO R35

La energía de compactación aplicada es especificada en la normativa AASHTO R35 (Tabla 3.31), cuya definición está en función del número de la cantidad de ejes equivalentes (ESAL's) establecidos en el diseño. El método de diseño volumétrico Superpave para el diseño de mezclas asfálticas, especificado en la normativa AASHTO M323 (Tabla 3.32), define una serie de requerimientos para establecer la idoneidad de las mezclas asfálticas.

Para el presente estudio ha sido considerada una condición de diseño entre **10 a 30 millones de ESAL's**. Los resultados del diseño de mezclas asfálticas se muestran entre la Tabla 3.33 a Tabla 3.38. Además, para facilitar la comprensión de los resultados, se presenta a continuación la designación de las mezclas asfáltica evaluadas.

**Tabla 3.30 – Designación de mezclas asfálticas**

Mezcla asfáltica	Ligante asfáltico	Combinación granulométrica
MAC A-75	A	CALUW 75
MAC A-100	A	CALUW 100
MAC B-75	B	CALUW 75
MAC B-100	B	CALUW 100
MAC C-75	C	CALUW 75
MAC C-100	C	CALUW 100

Para la elaboración de la mezcla se determinaron las temperaturas de compactación y mezclado en la Ilustración 3.5, Ilustración 3.6 e Ilustración 3.7.

**Tabla 3.31 – Energía de compactación – Compactador Giratorio Superpave (CGS) [15]**

ESAL's (Millones) <sup>a</sup>	Parámetros de compactación			Aplicaciones típicas <sup>b</sup>
	N <sub>inicial</sub>	N <sub>diseño</sub>	N <sub>max</sub>	
< 0.3	6	50	75	Las aplicaciones incluyen caminos con bajos volúmenes de tránsito, como caminos locales, caminos rurales y caminos urbanos donde el tránsito de vehículos pesados es prohibido. El tránsito en esta ruta se considera de naturaleza local, no regional o interdepartamental.
0.3 – 3.0	7	75	115	Las aplicaciones incluyen rutas colectoras y calles de acceso. Caminos urbanos con volúmenes medios de tránsito y caminos rurales puede ser agrupados en este nivel.
3.0 – 30.0	8	100	160	Las aplicaciones incluyen rutas de dos carriles, rutas multi-carriles, rutas con mediana, y rutas con controles parciales o completos de accesos. Rutas urbanas con volúmenes medios y altos de tránsito, carreteras interdepartamentales y algunas autopistas.
> 30.0	9	125	205	Las aplicaciones incluyen autopistas de naturaleza rural e interurbana. Aplicaciones especiales como estaciones de vehículos pesados o carriles de ascenso en vías de dos carriles pueden ser catalogadas en este nivel.

a. Nivel de tránsito proyectado del proyecto en el carril de diseño para un periodo de 20 años. Independiente del periodo de diseño real de la carretera, determina los ESAL's de diseño durante 20 años.

b. Según lo definido en “A policy on geometric design of Highway and Streets, 2004, AASHTO”.



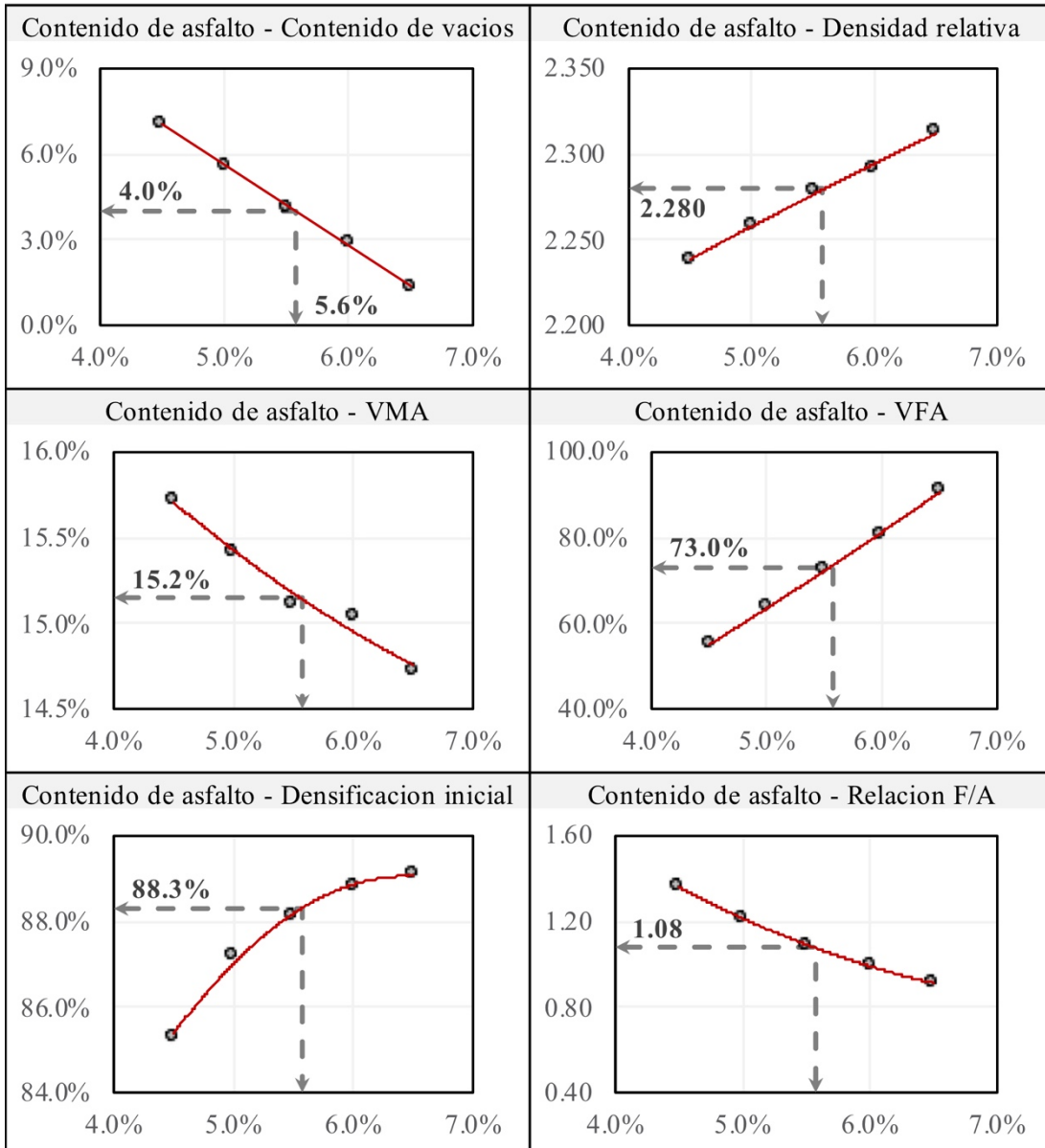
**Tabla 3.32 – Requerimientos de diseño Superpave [11]**

ESAL's (Millones) <sup>a</sup>	Densificación relativa			Vacíos en agregado mineral (VMA), % Min.						Rango <sup>b</sup> VFA, %	Rango <sup>c</sup> Relación F/A, %
	%Gmm			Tamaño máximo nominal del agregado, mm.							
	N <sub>inicial</sub>	N <sub>diseño</sub>	N <sub>max</sub>	37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75		
< 0.3	< 91.5	96.0	< 98.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	70.0 – 80.0 <sup>d</sup>	0.6 – 1.2 <sup>f</sup>
0.3 – 3.0	< 90.5	96.0	< 98.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	65.0 – 78.0	0.6 – 1.2 <sup>f</sup>
3.0 – 10.0	< 89.0	96.0	< 98.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	65.0 – 75.0 <sup>e</sup>	0.6 – 1.2 <sup>f</sup>
10.0 – 30.0	< 89.0	96.0	< 98.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	65.0 – 75.0 <sup>e</sup>	0.6 – 1.2 <sup>f</sup>
> 30.0	< 89.0	96.0	< 98.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	65.0 – 75.0 <sup>e</sup>	0.6 – 1.2 <sup>f</sup>

- a. Nivel de transito proyectado del proyecto en el carril de diseño para un periodo de 20 años. Independiente del periodo de diseño real de la carretera, determina los ESAL's de diseño durante 20 años.
- b. Para TMN de 37.5mm, el limite inferior especificado para el VFA será de 64.0% para todos los niveles de transito de diseño.
- c. Para TMN de 4.75mm, el rango para la relación Filler – Asfalto (F/A) se definirá 0.9 – 2.0
- d. Para TMN de 25.0mm, el limite inferior especificado para el VFA será de 67.0% para el nivel de transito <0.3 millones de ESAL's.
- e. Para el nivel de transito > 30.0 millones de ESAL's, TMN de 9.5mm, el rango especificado para el VFA será 73.0% - 76.0%, y para TMN de 4.75mm. el rango especificado para el VFA será 75.0% - 78.0%
- f. Si la gradación de la combinación granulométrica es clasificada como “Gruesa” el rango especificado para la relación Filler – Asfalto será 0.8 – 1.6

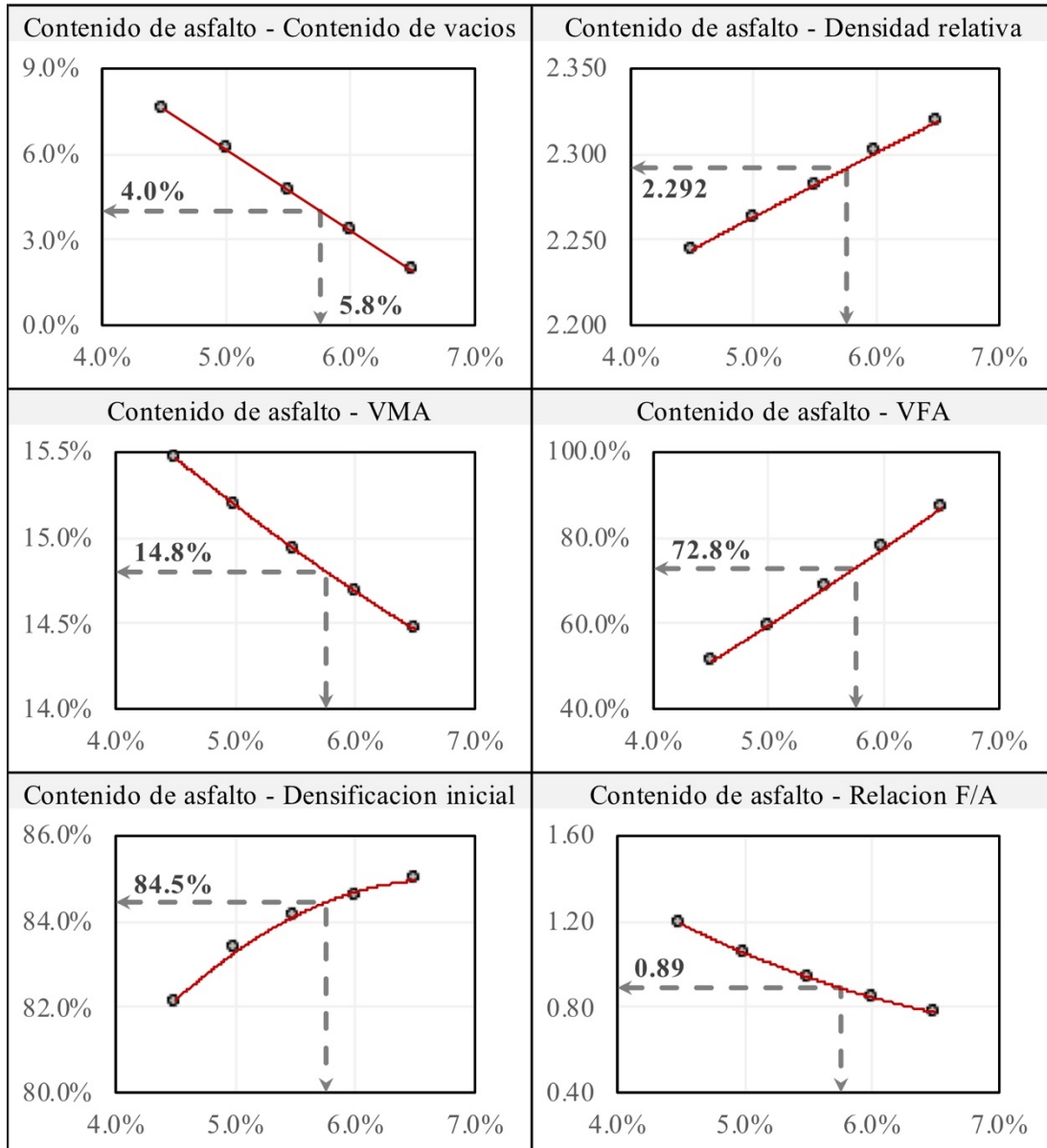
**Tabla 3.33 – Resultados de diseño – “MAC A-75”**

PARAMETRO	PUNTO DE EVALUACION				
Contenido de asfalto (Pb)	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%
Contenido de vacios (Va)	7.1%	5.6%	4.1%	2.9%	1.3%
Densidad relativa	2.238	2.258	2.278	2.292	2.313
VMA	15.7%	15.4%	15.1%	15.0%	14.7%
VFA	55.0%	63.6%	72.7%	80.8%	90.9%
Densificacion inicial	85.3%	87.2%	88.1%	88.8%	89.1%
Relacion filler-asfalto (F/A)	1.36	1.21	1.09	0.99	0.91



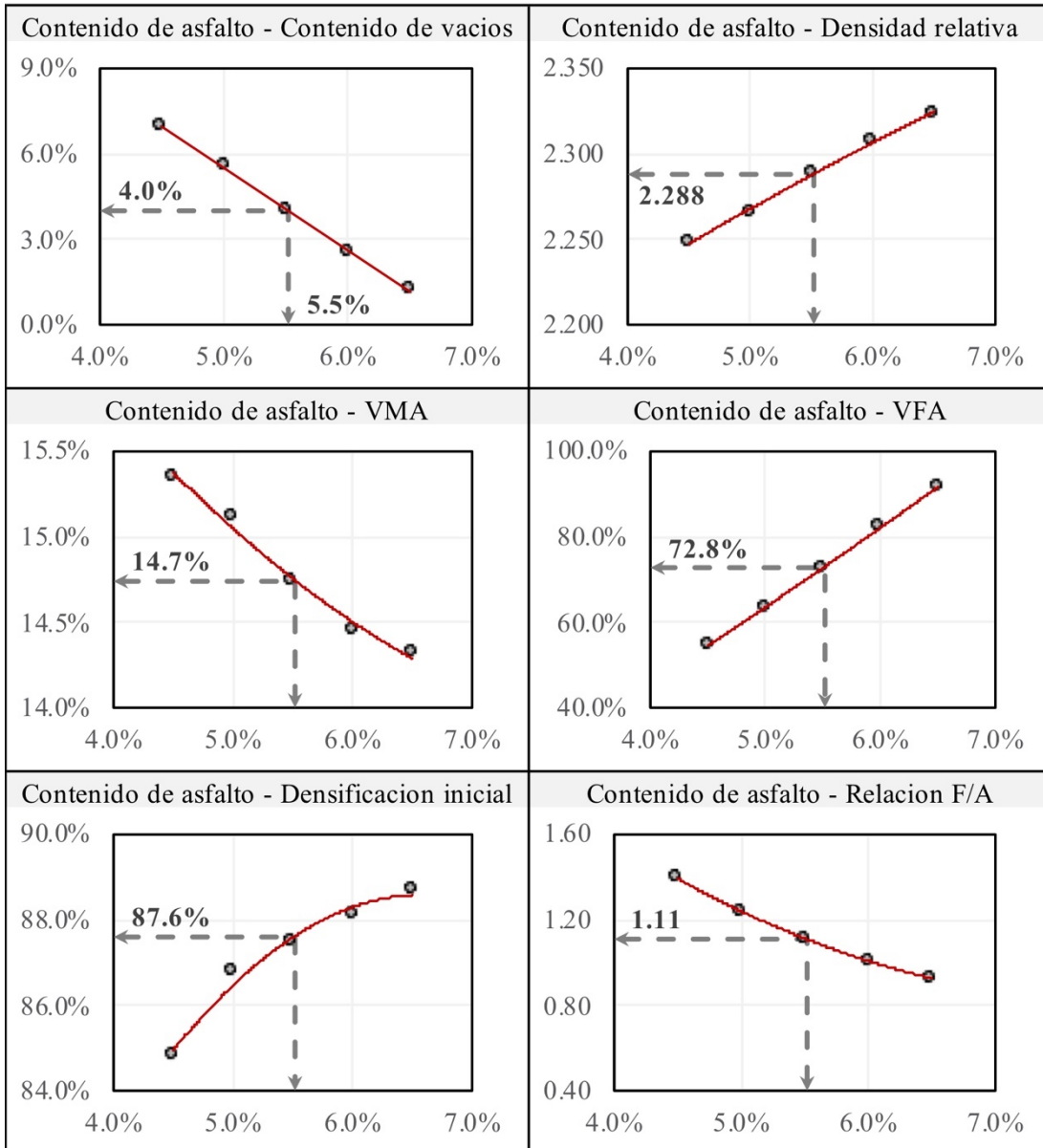
**Tabla 3.34 – Resultados de diseño – “MAC A-100”**

PARAMETRO	PUNTO DE EVALUACION				
Contenido de asfalto (Pb)	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%
Contenido de vacios (Va)	7.6%	6.2%	4.7%	3.3%	1.9%
Densidad relativa	2.244	2.263	2.282	2.301	2.319
VMA	15.5%	15.2%	14.9%	14.7%	14.5%
VFA	51.1%	59.5%	68.3%	77.5%	86.9%
Densificacion inicial	82.1%	83.4%	84.1%	84.6%	85.0%
Relacion filler-asfalto (F/A)	1.19	1.05	0.94	0.85	0.77



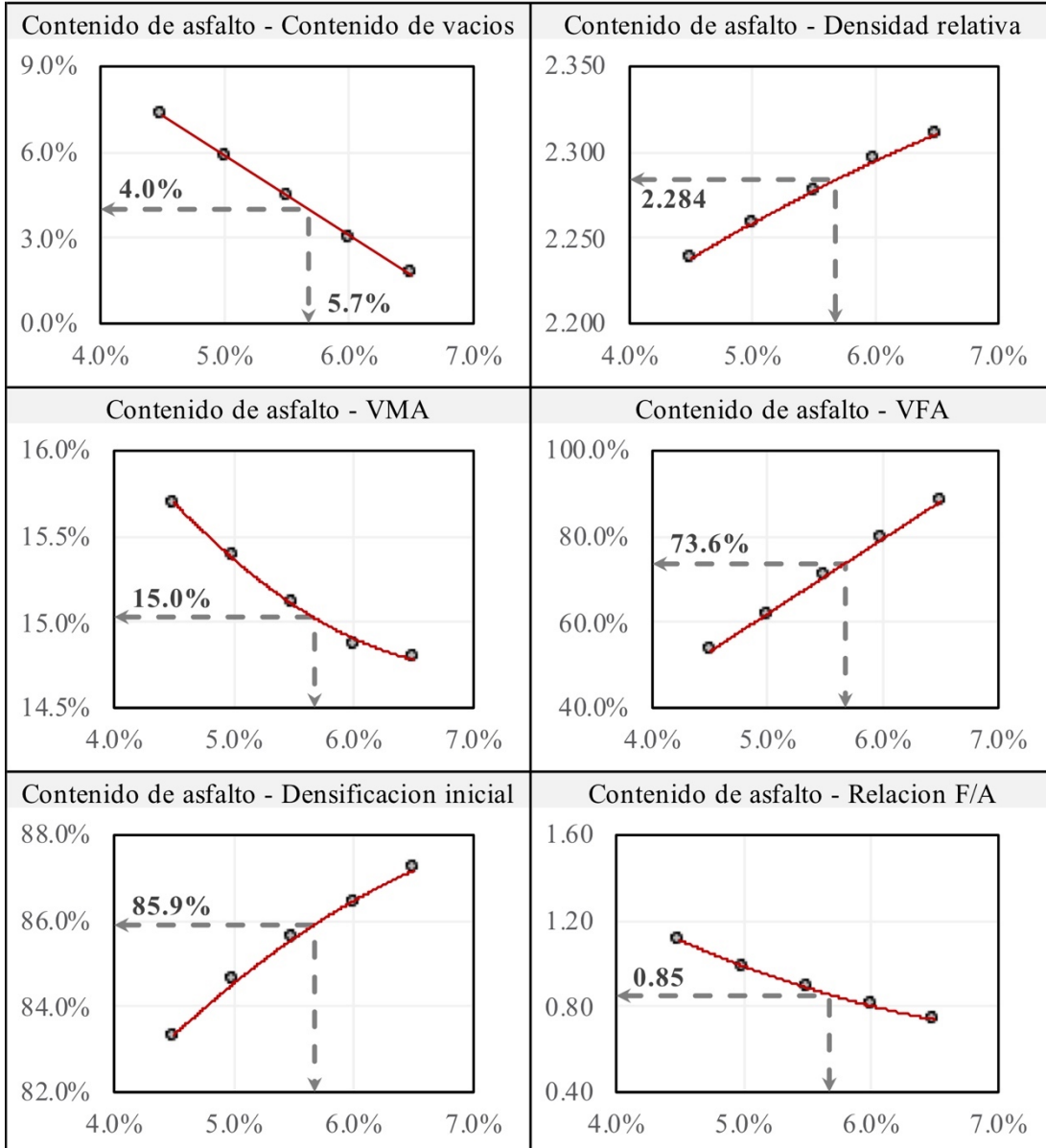
**Tabla 3.35 – Resultados de diseño – “MAC B-75”**

PARAMETRO	PUNTO DE EVALUACION				
Contenido de asfalto (Pb)	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%
Contenido de vacios (Va)	6.9%	5.6%	4.0%	2.5%	1.2%
Densidad relativa	2.248	2.266	2.288	2.308	2.324
VMA	15.3%	15.1%	14.7%	14.5%	14.3%
VFA	54.8%	63.2%	72.8%	82.5%	91.5%
Densificacion inicial	84.8%	86.8%	87.5%	88.1%	88.7%
Relacion filler-asfalto (F/A)	1.40	1.24	1.11	1.01	0.93



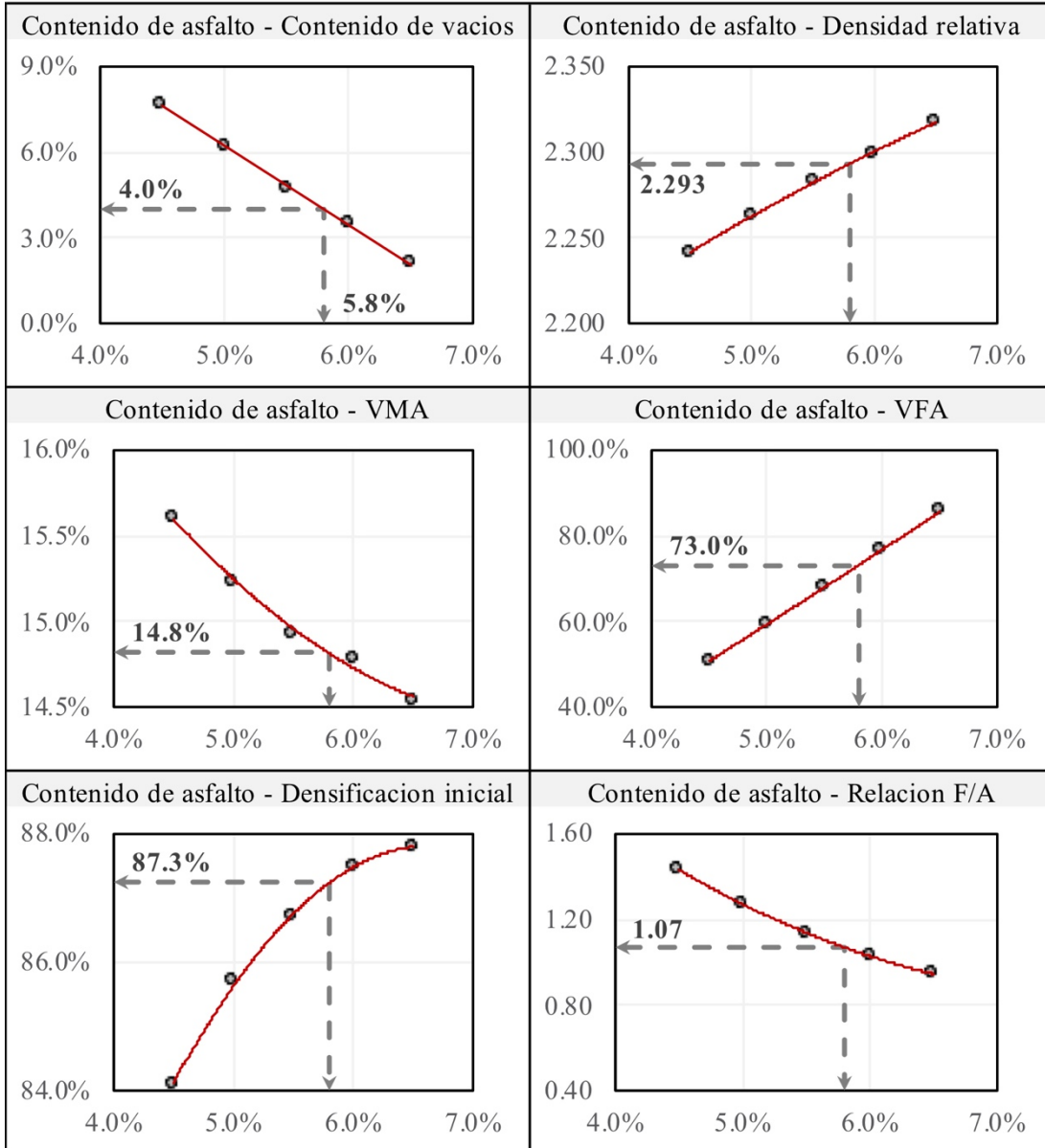
**Tabla 3.36 – Resultados de diseño – “MAC B-100”**

PARAMETRO	PUNTO DE EVALUACION				
Contenido de asfalto (Pb)	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%
Contenido de vacios (Va)	7.3%	5.9%	4.4%	3.0%	1.8%
Densidad relativa	2.238	2.258	2.277	2.296	2.310
VMA	15.7%	15.4%	15.1%	14.9%	14.8%
VFA	53.3%	61.9%	70.6%	79.8%	88.0%
Densificacion inicial	83.3%	84.6%	85.6%	86.4%	87.2%
Relacion filler-asfalto (F/A)	1.11	0.99	0.89	0.80	0.74



**Tabla 3.37 – Resultados de diseño – “MAC C-75”**

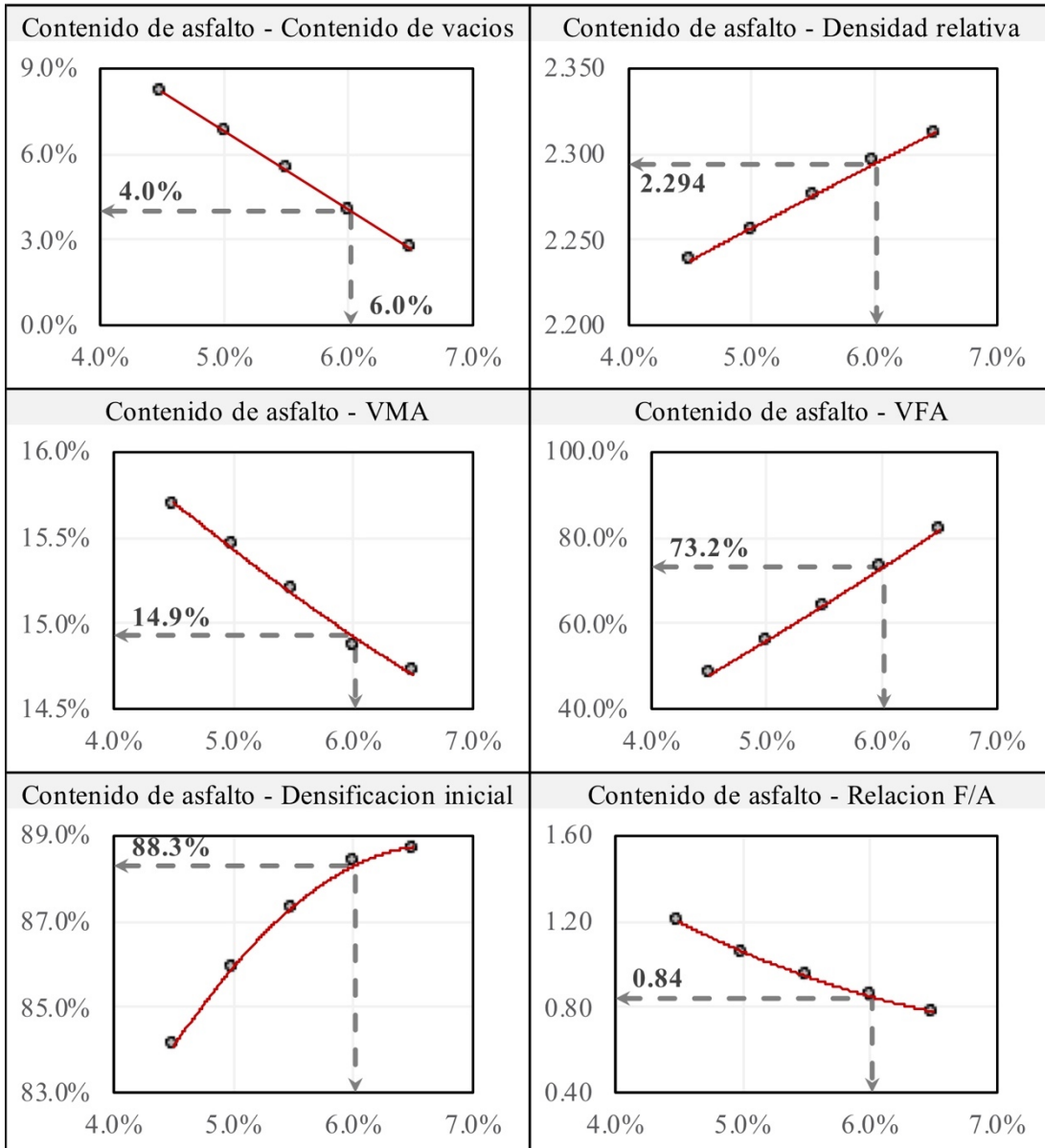
PARAMETRO	PUNTO DE EVALUACION				
Contenido de asfalto (Pb)	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%
Contenido de vacios (Va)	7.7%	6.2%	4.8%	3.5%	2.1%
Densidad relativa	2.241	2.263	2.283	2.299	2.318
VMA	15.6%	15.2%	14.9%	14.8%	14.5%
VFA	50.8%	59.4%	68.2%	76.5%	85.7%
Densificacion inicial	84.1%	85.7%	86.7%	87.5%	87.8%
Relacion filler-asfalto (F/A)	1.43	1.27	1.14	1.03	0.94





**Tabla 3.38** – Resultados de diseño – “MAC C-100”

PARAMETRO	PUNTO DE EVALUACION				
Contenido de asfalto (Pb)	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%
Contenido de vacios (Va)	8.2%	6.8%	5.4%	4.0%	2.7%
Densidad relativa	2.238	2.256	2.275	2.296	2.312
VMA	15.7%	15.5%	15.2%	14.9%	14.7%
VFA	48.0%	55.8%	64.1%	73.2%	81.6%
Densificacion inicial	84.1%	85.9%	87.3%	88.4%	88.7%
Relacion filler-asfalto (F/A)	1.20	1.06	0.94	0.85	0.78



Con base en los valores obtenidos, curvas de tendencia y criterios de diseño establecidos, se define para el presente diseño los contenidos de asfalto optimo sobre las mezclas, basándose en los criterios de vacíos de aire (4.0%) y VMA (Mín. 13.0%). Con estos contenidos de asfalto optimo porcentaje se tienen los siguientes parámetros volumétricos y de diseño conforme al capítulo 6 del Manual Series, “MS-2: Asphalt mix design Methods, 7th edition”, publicado por Asphalt Institute.

**Tabla 3.39** – Parámetros obtenido con el contenido optimo de asfalto para MAC A-75

Parámetro	Valor	Tolerancia
Contenido optimo de asfalto	5.6%	-
Vacíos de aire	4.0%	3.0% – 5.0%
Densidad relativa	2.280	-
Vacíos en agregado mineral (VMA)	15.2%	13.0% Min.
Vacíos llenos de asfalto (VFA)	73.0%	65.0% – 75.0%
Densificación inicial	88.3%	< 89.0%
Densificación máxima	97.7%	< 98.0%
Relación filler-asfalto	1.08	0.60 – 1.20

**Tabla 3.40** – Parámetros obtenido con el contenido optimo de asfalto para MAC A-100

Parámetro	Valor	Tolerancia
Contenido optimo de asfalto	5.8%	-
Vacíos de aire	4.0%	3.0% – 5.0%
Densidad relativa	2.292	-
Vacíos en agregado mineral (VMA)	14.8%	13.0% Min.
Vacíos llenos de asfalto (VFA)	72.8%	65.0% – 75.0%
Densificación inicial	84.5%	< 89.0%
Densificación máxima	96.5%	< 98.0%
Relación filler-asfalto	0.89	0.80 – 1.60



**Tabla 3.41** – Parámetros obtenido con el contenido optimo de asfalto para MAC B–75

Parámetro	Valor	Tolerancia
Contenido optimo de asfalto	5.5%	-
Vacíos de aire	4.0%	3.0% – 5.0%
Densidad relativa	2.288	-
Vacíos en agregado mineral (VMA)	14.7%	13.0% Min.
Vacíos llenos de asfalto (VFA)	72.8%	65.0% – 75.0%
Densificación inicial	87.6%	< 89.0%
Densificación máxima	97.7%	< 98.0%
Relación filler–asfalto	1.11	0.60 – 1.20

**Tabla 3.42** – Parámetros obtenido con el contenido optimo de asfalto para MAC B–100

Parámetro	Valor	Tolerancia
Contenido optimo de asfalto	5.7%	-
Vacíos de aire	4.0%	3.0% – 5.0%
Densidad relativa	2.284	-
Vacíos en agregado mineral (VMA)	15.0%	13.0% Min.
Vacíos llenos de asfalto (VFA)	73.6%	65.0% – 75.0%
Densificación inicial	85.0%	< 89.0%
Densificación máxima	96.9%	< 98.0%
Relación filler–asfalto	0.85	0.80 – 1.60

**Tabla 3.43** – Parámetros obtenido con el contenido optimo de asfalto para MAC C–75

Parámetro	Valor	Tolerancia
Contenido optimo de asfalto	5.8%	-
Vacíos de aire	4.0%	3.0% – 5.0%
Densidad relativa	2.293	-
Vacíos en agregado mineral (VMA)	14.8%	13.0% Min.
Vacíos llenos de asfalto (VFA)	73.0%	65.0% – 75.0%
Densificación inicial	87.3%	< 89.0%
Densificación máxima	97.3%	< 98.0%
Relación filler–asfalto	1.07	0.60 – 1.20

**Tabla 3.44** – Parámetros obtenido con el contenido optimo de asfalto para MAC C-100

Parámetro	Valor	Tolerancia
Contenido optimo de asfalto	6.0%	-
Vacíos de aire	4.0%	3.0% – 5.0%
Densidad relativa	2.294	-
Vacíos en agregado mineral (VMA)	14.9%	13.0% Min.
Vacíos llenos de asfalto (VFA)	73.2%	65.0% – 75.0%
Densificación inicial	88.3%	< 89.0%
Densificación máxima	97.8%	< 98.0%
Relación filler–asfalto	0.84	0.8 – 1.6

### 3.4. DETERMINACIÓN DE MÓDULOS DINÁMICOS

Una vez obtenidos los resultados de los diseños de mezcla, se procedió a la elaboración y ensayo de los especímenes por cada tipo de mezcla asfáltica analizada, de acuerdo con la norma AASHTO T342 “Determination Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)”. Según lo establece el procedimiento de ensayo, los especímenes deben ser compactados en un compactador giratorio. Con el fin de evitar que las variaciones en el contenido de vacíos de las mezclas asfálticas sea una variable incidente en la determinación de los valores de módulo dinámico, se procedió a evaluar especímenes compactado bajo una sola energía de compactación, la cual fue definida al compactar los especímenes para obtener un porcentaje de compactación de **96.0% ± 1.0%**. Finalmente, se determinó el módulo dinámico para 4 temperaturas de ensayo y 6 frecuencias de carga. Los resultados de los ensayos de módulos dinámicos se muestran a continuación:

**Tabla 3.45** – Condiciones para la evaluación del módulo dinámico [16]

Temperatura (°C)	4.4	21.1	37.8	54.4		
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1



**Ilustración 3.14** – Espécimen compactado



**Ilustración 3.15** – Extracción de corazón



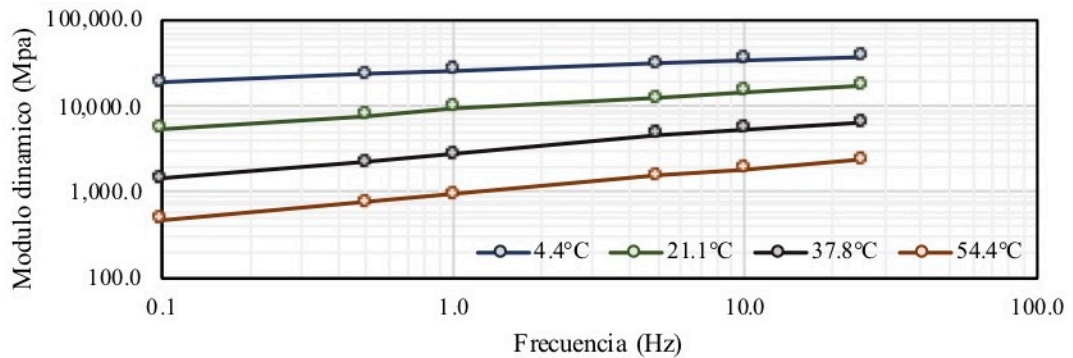
**Ilustración 3.16** – Preparación espécimen



**Ilustración 3.17** – UTM

**Tabla 3.46 – Resumen de resultados de módulo dinámico – MAC A-75**

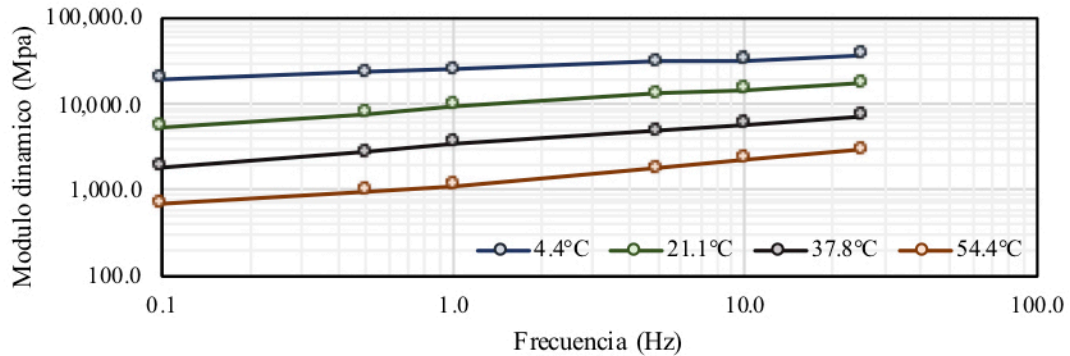
MODULOS DINAMICOS (MPa)							
TEMP.	Mx	FRECUENCIA					
		25.0 Hz.	10.0 Hz.	5.0 Hz.	1.0 Hz.	0.5 Hz.	0.1 Hz.
4.4°C	1	37,790.1	35,676.6	31,897.4	26,230.9	23,930.1	19,281.8
	2	37,308.1	35,351.6	30,578.4	27,478.9	22,691.1	18,532.8
	3	36,051.1	36,648.6	31,219.4	25,416.9	25,327.1	18,518.8
	4	37,847.1	34,241.6	30,830.4	25,646.9	23,239.1	20,104.8
	X	<b>37,249.1</b>	<b>35,479.6</b>	<b>31,131.4</b>	<b>26,193.4</b>	<b>23,796.9</b>	<b>19,109.6</b>
	CV	2.2%	2.8%	1.8%	3.5%	4.8%	3.9%
21.1°C	1	17,213.2	14,678.2	12,414.7	9,810.4	7,596.8	5,611.5
	2	18,331.2	15,078.2	13,134.7	10,003.4	7,571.8	5,302.5
	3	16,739.2	14,159.2	12,620.7	9,192.4	7,980.8	5,341.5
	4	17,168.2	14,522.2	11,890.7	9,301.4	8,009.8	5,446.5
	X	<b>17,363.0</b>	<b>14,609.5</b>	<b>12,515.2</b>	<b>9,576.9</b>	<b>7,789.8</b>	<b>5,425.5</b>
	CV	3.9%	2.6%	4.1%	4.1%	3.1%	2.5%
37.8°C	1	-	-	-	-	-	-
	2	6,737.1	5,494.3	4,535.9	2,808.5	2,225.5	1,443.8
	3	6,334.1	5,354.3	4,607.9	2,735.5	2,191.5	1,440.8
	4	6,346.1	5,667.3	4,757.9	2,678.5	2,177.5	1,499.8
	X	<b>6,472.4</b>	<b>5,505.3</b>	<b>4,633.9</b>	<b>2,740.8</b>	<b>2,198.2</b>	<b>1,461.5</b>
	CV	3.5%	2.8%	2.4%	2.4%	1.1%	2.3%
54.4°C	1	2,363.7	1,836.9	1,547.2	946.5	774.4	475.3
	2	2,364.7	1,935.9	1,494.2	918.5	745.4	478.3
	3	2,494.7	1,841.9	1,480.2	982.5	784.4	462.3
	4	2,441.7	1,917.9	1,639.2	890.5	779.4	479.3
	X	<b>2,416.2</b>	<b>1,883.2</b>	<b>1,540.2</b>	<b>934.5</b>	<b>770.9</b>	<b>473.8</b>
	CV	2.6%	2.7%	4.7%	4.2%	2.3%	1.7%





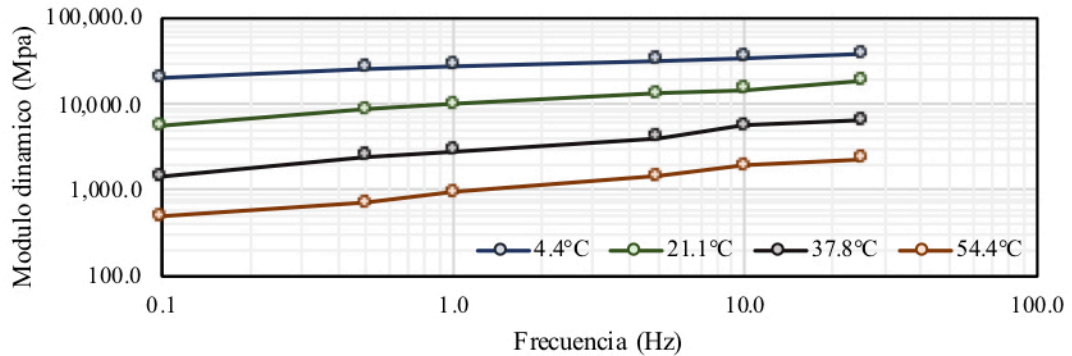
**Tabla 3.47 – Resumen de resultados de módulo dinámico – MAC A-100**

MODULOS DINAMICOS (MPa)							
TEMP.	Mx	FRECUENCIA					
		25.0 Hz.	10.0 Hz.	5.0 Hz.	1.0 Hz.	0.5 Hz.	0.1 Hz.
4.4°C	1	37,163.3	33,338.9	30,980.6	25,938.1	23,739.3	19,241.2
	2	39,415.3	33,378.9	32,379.6	24,438.1	25,061.3	18,500.2
	3	36,414.3	32,357.9	30,935.6	24,267.1	22,547.3	19,865.2
	4	35,096.3	32,978.9	30,996.6	26,754.1	22,510.3	20,245.2
	X	<b>37,022.3</b>	<b>33,013.7</b>	<b>31,323.1</b>	<b>25,349.4</b>	<b>23,464.6</b>	<b>19,463.0</b>
	CV	4.9%	1.4%	2.3%	4.7%	5.1%	3.9%
21.1°C	1	17,580.0	14,937.2	12,924.0	9,725.2	7,985.2	5,314.1
	2	18,382.0	14,686.2	13,564.0	9,811.2	7,512.2	5,383.1
	3	18,229.0	14,828.2	13,552.0	9,836.2	7,984.2	5,434.1
	4	16,607.0	14,341.2	12,338.0	9,747.2	7,538.2	5,406.1
	X	<b>17,699.5</b>	<b>14,698.2</b>	<b>13,094.5</b>	<b>9,780.0</b>	<b>7,755.0</b>	<b>5,384.4</b>
	CV	4.6%	1.8%	4.5%	0.5%	3.4%	1.0%
37.8°C	1	7,075.9	5,805.3	4,851.9	3,626.8	2,716.2	1,810.7
	2	7,338.9	5,921.3	5,120.9	3,565.8	2,840.2	1,807.7
	3	7,211.9	5,691.3	4,627.9	3,804.8	2,811.2	1,874.7
	4	7,209.9	6,059.3	5,024.9	3,427.8	2,726.2	1,875.7
	X	<b>7,209.2</b>	<b>5,869.3</b>	<b>4,906.4</b>	<b>3,606.3</b>	<b>2,773.5</b>	<b>1,842.2</b>
	CV	1.5%	2.7%	4.4%	4.3%	2.2%	2.1%
54.4°C	1	2,998.4	2,270.1	1,811.2	1,154.6	981.8	701.0
	2	2,888.4	2,366.1	1,696.2	1,095.6	1,018.8	708.0
	3	2,983.4	2,329.1	1,736.2	1,082.6	985.8	723.0
	4	3,089.4	2,161.1	1,833.2	1,214.6	979.8	665.0
	X	<b>2,989.9</b>	<b>2,281.6</b>	<b>1,769.2</b>	<b>1,136.9</b>	<b>991.6</b>	<b>699.3</b>
	CV	2.8%	3.9%	3.6%	5.3%	1.8%	3.5%



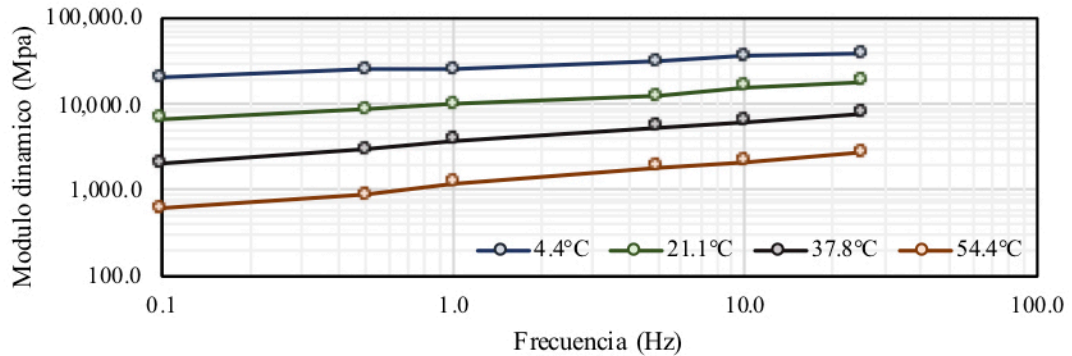
**Tabla 3.48** – Resumen de resultados de módulo dinámico – MAC B-75

MODULOS DINAMICOS (MPa)							
TEMP.	Mx	FRECUENCIA					
		25.0 Hz.	10.0 Hz.	5.0 Hz.	1.0 Hz.	0.5 Hz.	0.1 Hz.
4.4°C	1	37,913.7	35,274.2	32,784.4	28,173.0	25,842.1	20,719.5
	2	37,519.7	35,802.2	33,447.4	29,406.0	26,630.1	21,575.5
	3	38,966.7	33,020.2	30,830.4	26,855.0	25,928.1	19,397.5
	4	39,868.7	33,584.2	33,682.4	26,564.0	25,646.1	19,591.5
	X	<b>38,567.2</b>	<b>34,420.2</b>	<b>32,686.2</b>	<b>27,749.5</b>	<b>26,011.6</b>	<b>20,321.0</b>
	CV	2.8%	3.9%	4.0%	4.7%	1.6%	5.0%
21.1°C	1	18,450.8	15,182.6	13,479.8	9,849.8	8,803.2	5,822.8
	2	18,402.8	14,459.6	12,853.8	10,314.8	8,712.2	5,627.8
	3	19,405.8	15,062.6	12,836.8	9,886.8	9,045.2	5,611.8
	4	18,670.8	14,961.6	14,011.8	10,391.8	8,372.2	5,561.8
	X	<b>18,732.6</b>	<b>14,916.6</b>	<b>13,295.6</b>	<b>10,110.8</b>	<b>8,733.2</b>	<b>5,656.1</b>
	CV	2.5%	2.1%	4.2%	2.8%	3.2%	2.0%
37.8°C	1	6,566.8	5,732.7	4,006.4	2,864.6	2,504.4	1,450.1
	2	6,646.8	5,764.7	4,071.4	2,724.6	2,347.4	1,377.1
	3	6,143.8	5,839.7	4,183.4	2,928.6	2,589.4	1,442.1
	4	6,855.8	5,524.7	3,907.4	2,983.6	2,555.4	1,529.1
	X	<b>6,553.3</b>	<b>5,715.5</b>	<b>4,042.2</b>	<b>2,875.4</b>	<b>2,499.2</b>	<b>1,449.6</b>
	CV	4.6%	2.4%	2.9%	3.9%	4.3%	4.3%
54.4°C	1	2,352.2	1,914.5	1,464.2	944.3	714.2	511.9
	2	2,358.2	2,022.5	1,393.2	981.3	746.2	487.9
	3	2,206.2	1,954.5	1,497.2	931.3	674.2	518.9
	4	2,210.2	1,959.5	1,452.2	915.3	685.2	486.9
	X	<b>2,281.7</b>	<b>1,962.8</b>	<b>1,451.7</b>	<b>943.1</b>	<b>705.0</b>	<b>501.4</b>
	CV	3.7%	2.3%	3.0%	3.0%	4.6%	3.3%



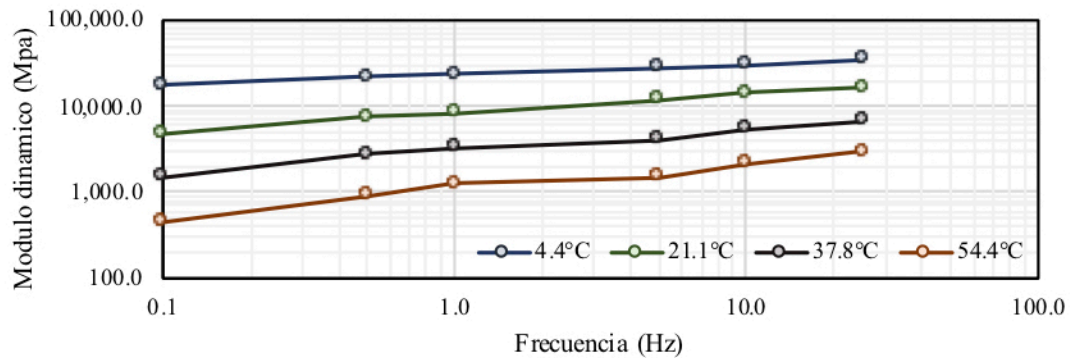
**Tabla 3.49** – Resumen de resultados de módulo dinámico – MAC B-100

MODULOS DINAMICOS (MPa)							
TEMP.	Mx	FRECUENCIA					
		25.0 Hz.	10.0 Hz.	5.0 Hz.	1.0 Hz.	0.5 Hz.	0.1 Hz.
4.4°C	1	39,526.5	35,095.7	31,552.0	26,394.7	25,278.6	21,135.4
	2	38,802.5	35,945.7	32,599.0	25,994.7	25,485.6	19,682.4
	3	39,966.5	35,045.7	30,833.0	25,330.7	26,219.6	19,906.4
	4	37,958.5	36,737.7	32,225.0	24,707.7	25,726.6	21,819.4
	X	<b>39,063.5</b>	<b>35,706.2</b>	<b>31,802.3</b>	<b>25,607.0</b>	<b>25,677.6</b>	<b>20,635.9</b>
	CV	2.3%	2.2%	2.4%	2.9%	1.6%	4.9%
21.1°C	1	18,172.3	15,922.2	12,324.1	10,020.0	8,732.2	6,670.6
	2	17,804.3	16,333.2	12,464.1	10,398.0	8,336.2	6,557.6
	3	18,969.3	15,238.2	12,163.1	10,420.0	8,385.2	7,076.6
	4	17,263.3	16,331.2	12,953.1	9,702.0	8,615.2	6,485.6
	X	<b>18,052.3</b>	<b>15,956.2</b>	<b>12,476.1</b>	<b>10,135.0</b>	<b>8,517.2</b>	<b>6,697.6</b>
	CV	4.0%	3.2%	2.7%	3.4%	2.2%	3.9%
37.8°C	1	7,554.2	6,260.5	5,476.9	3,689.8	2,916.0	1,991.8
	2	7,817.2	6,488.5	5,211.9	3,928.8	2,773.0	2,101.8
	3	7,838.2	5,873.5	5,523.9	3,694.8	3,047.0	2,076.8
	4	-	-	-	-	-	-
	X	<b>7,736.5</b>	<b>6,207.5</b>	<b>5,404.2</b>	<b>3,771.1</b>	<b>2,912.0</b>	<b>2,056.8</b>
	CV	2.0%	5.0%	3.1%	3.6%	4.7%	2.8%
54.4°C	1	2,788.9	2,168.3	1,848.4	1,221.3	891.8	640.2
	2	2,874.9	2,192.3	1,942.4	1,197.3	875.8	614.2
	3	2,747.9	2,111.3	1,818.4	1,259.3	893.8	610.2
	4	2,653.9	2,272.3	1,736.4	1,247.3	864.8	627.2
	X	<b>2,766.4</b>	<b>2,186.1</b>	<b>1,836.4</b>	<b>1,231.3</b>	<b>881.6</b>	<b>623.0</b>
	CV	3.3%	3.1%	4.6%	2.2%	1.6%	2.2%



**Tabla 3.50** – Resumen de resultados de módulo dinámico – MAC C-75

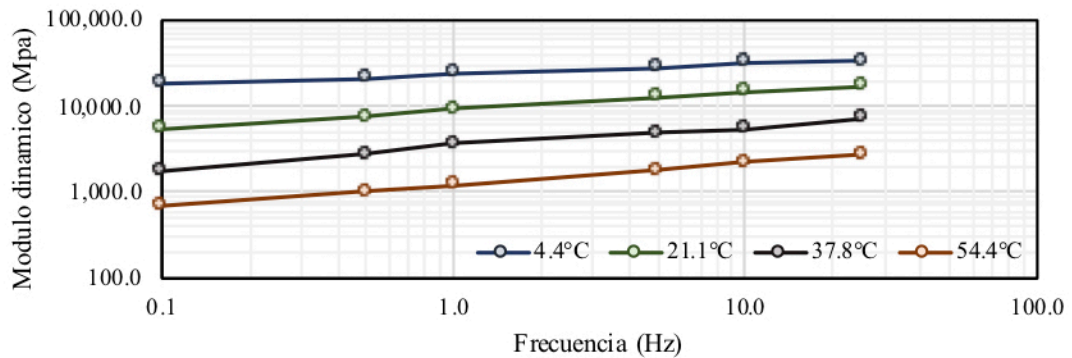
MODULOS DINAMICOS (MPa)							
TEMP.	Mx	FRECUENCIA					
		25.0 Hz.	10.0 Hz.	5.0 Hz.	1.0 Hz.	0.5 Hz.	0.1 Hz.
4.4°C	1	34,114.5	30,835.4	28,110.5	23,529.5	21,254.1	17,765.1
	2	34,516.5	29,191.4	26,756.5	23,388.5	22,067.1	18,848.1
	3	34,882.5	31,395.4	27,988.5	23,279.5	21,462.1	17,834.1
	4	34,699.5	29,159.4	28,751.5	23,372.5	21,613.1	16,763.1
	X	<b>34,553.3</b>	<b>30,145.4</b>	<b>27,901.8</b>	<b>23,392.5</b>	<b>21,599.1</b>	<b>17,802.6</b>
	CV	1.0%	3.8%	3.0%	0.4%	1.6%	4.8%
21.1°C	1	16,608.0	14,422.1	11,860.7	8,283.9	7,642.8	4,793.4
	2	16,176.0	14,463.1	11,510.7	8,163.9	7,372.8	4,771.4
	3	15,987.0	13,828.1	11,469.7	8,299.9	7,174.8	4,997.4
	4	17,567.0	14,294.1	12,168.7	8,242.9	7,320.8	4,512.4
	X	<b>16,584.5</b>	<b>14,251.9</b>	<b>11,752.5</b>	<b>8,247.7</b>	<b>7,377.8</b>	<b>4,768.7</b>
	CV	4.2%	2.0%	2.8%	0.7%	2.7%	4.2%
37.8°C	1	6,482.6	5,244.0	4,003.9	3,217.1	2,643.1	1,467.8
	2	6,877.6	5,482.0	3,867.9	3,318.1	2,789.1	1,460.8
	3	6,363.6	5,509.0	4,233.9	3,348.1	2,812.1	1,517.8
	4	6,824.6	5,273.0	3,749.9	3,226.1	2,477.1	1,439.8
	X	<b>6,637.1</b>	<b>5,411.7</b>	<b>4,035.2</b>	<b>3,294.4</b>	<b>2,748.1</b>	<b>1,482.1</b>
	CV	3.8%	2.5%	5.1%	2.0%	5.6%	2.2%
54.4°C	1	2,990.3	2,153.6	1,544.3	1,230.8	882.8	461.7
	2	3,042.3	2,113.6	1,454.3	1,246.8	903.8	435.7
	3	3,062.3	2,141.6	1,514.3	1,236.8	916.8	464.7
	4	2,971.3	2,221.6	1,564.3	1,250.8	895.8	436.7
	X	<b>3,016.6</b>	<b>2,157.6</b>	<b>1,519.3</b>	<b>1,241.3</b>	<b>899.8</b>	<b>449.7</b>
	CV	1.4%	2.1%	3.2%	0.7%	1.6%	3.5%





**Tabla 3.51** – Resumen de resultados de módulo dinámico – MAC C-100

MODULOS DINAMICOS (MPa)							
TEMP.	Mx	FRECUENCIA					
		25.0 Hz.	10.0 Hz.	5.0 Hz.	1.0 Hz.	0.5 Hz.	0.1 Hz.
4.4°C	1	34,546.5	32,313.5	28,905.5	24,395.7	20,669.9	18,201.7
	2	35,984.5	32,904.5	28,093.5	23,273.7	21,915.9	19,361.7
	3	32,363.5	33,110.5	27,198.5	25,773.7	19,407.9	17,915.7
	4	33,060.5	31,278.5	30,218.5	25,006.7	21,902.9	17,996.7
	X	<b>33,988.8</b>	<b>32,401.8</b>	<b>28,604.0</b>	<b>24,612.5</b>	<b>20,974.2</b>	<b>18,369.0</b>
	CV	4.7%	2.5%	4.5%	4.3%	5.7%	3.7%
21.1°C	1	16,496.5	14,487.9	12,681.4	9,331.2	7,620.2	5,319.8
	2	16,971.5	15,127.9	13,445.4	9,275.2	7,753.2	5,414.8
	3	16,812.5	15,260.9	12,332.4	9,075.2	7,618.2	5,596.8
	4	17,270.5	14,785.9	13,000.4	9,478.2	7,322.2	5,328.8
	X	<b>16,887.8</b>	<b>14,915.7</b>	<b>12,864.9</b>	<b>9,290.0</b>	<b>7,578.5</b>	<b>5,415.1</b>
	CV	1.9%	2.3%	3.7%	1.8%	2.4%	2.4%
37.8°C	1	7,077.3	5,621.6	4,940.5	3,516.7	2,717.6	1,776.5
	2	7,458.3	5,306.6	4,758.5	3,707.7	2,862.6	1,846.5
	3	6,956.3	5,474.6	5,020.5	3,656.7	2,632.6	1,661.5
	4	6,984.3	5,664.6	5,036.5	3,448.7	2,728.6	1,850.5
	X	<b>7,164.0</b>	<b>5,467.6</b>	<b>4,906.5</b>	<b>3,627.0</b>	<b>2,737.6</b>	<b>1,761.5</b>
	CV	3.7%	2.9%	2.7%	2.7%	4.2%	5.3%
54.4°C	1	2,813.5	2,207.7	1,839.3	1,205.3	1,018.3	712.0
	2	2,650.5	2,205.7	1,899.3	1,264.3	1,078.3	667.0
	3	2,810.5	2,200.7	1,813.3	1,141.3	1,069.3	731.0
	4	2,757.5	2,272.7	1,761.3	1,242.3	955.3	679.0
	X	<b>2,758.0</b>	<b>2,221.7</b>	<b>1,828.3</b>	<b>1,213.3</b>	<b>1,030.3</b>	<b>697.3</b>
	CV	2.8%	1.5%	3.1%	4.4%	5.5%	4.2%



---

## **CAPITULO 4**

### **INTERPRETACION, EVALUACION Y ANALISIS DE RESULTADOS**

---

## 4.1. INTRODUCCIÓN

En el marco de diseño mecánico-empírico, existen tres niveles de diseño entre los que se puede escoger para el desarrollo de un diseño de pavimentos flexibles. Una de las diferencias significativa entre estos niveles de diseño, es el método en como se determina el módulo dinámico de las mezclas asfálticas y, por lo tanto, el grado de complejidad de la información de entrada requerida para el material.

En el caso específico del nivel 1, que corresponde al grado de diseño más complejo, requiere resultados de pruebas de laboratorio tanto para el módulo dinámico de la mezcla asfáltica ( $E^*$ ) como para el módulo de corte dinámico del ligante asfáltico ( $G_b^*$ ). Sin embargo, las pruebas de laboratorio de módulo dinámico requieren mucho tiempo y cierta cantidad de recursos. Por lo tanto, muchos usuarios optan por utilizar los niveles 2 y 3 de diseño, ya que no requieren resultados de  $E^*$ , sino que estiman  $E^*$  a partir de ecuaciones predictivas. Los requisitos de información para estos niveles son mínimos y son parámetros que generalmente se miden como parte de una especificación técnica.

El nivel 2, segundo nivel más complejo, utiliza la ecuación predictiva 1-37A de Witzak en función de la información del ligante asfáltico, distribución granulométrica y otra información volumétrica de la mezcla asfáltica. El nivel 3, el nivel menos complejo para el diseño, también utiliza la ecuación predictiva 1-37A de Witzak. Sin embargo, no se requieren resultados de pruebas de laboratorio. Simplemente se le presenta al diseñador de ejecutar cualquiera de las ecuaciones, pero no hay orientación para ayudarlo en esta decisión.

Debido a que es una práctica habitual asociado a la falta de recursos para realizar pruebas de laboratorio exhaustivas, es necesario validar el procedimiento de la metodología mecánico –

empírica para estimar el valor de  $E^*$ . Para evaluar la precisión de este procedimiento, se analizarán las estimaciones obtenidas a través de la ecuación predictiva 1-37A de Witczak, y se comparan con los resultados de las pruebas de laboratorio para la determinación de  $E^*$ .

#### 4.1.1. CONSIDERACIONES PREVIAS AL ANÁLISIS

Ha sido establecido previamente la dependencia del módulo dinámico a dos parámetros: la temperatura y la frecuencia de carga. La disminución en el módulo dinámico con el aumento de temperatura y disminución en la frecuencia de carga han sido reportadas consistentemente por investigadores durante varios años (por ejemplo, Bonnaure, 1977; Flintsch, 2007; Tashman y Elangovan, 2007; Mahammad, 2007). Al observar el espécimen de prueba en sí, es evidente que existen varios parámetros que pueden incidir en la variabilidad al determinar el módulo dinámico.

Las mezclas asfálticas están compuestas por dos partes principales: agregado pétreo y ligante asfáltico. Cada componente presenta numerosas propiedades que influyen en la respuesta general de la mezcla. Por lo tanto, es lógico que las propiedades de cada componente puedan influir en el valor del módulo dinámico. A continuación, se enumeran las variables que mayor influencia presentan sobre el comportamiento del módulo dinámico:

**Tabla 4.1** – Factores que influyen sobre el módulo dinámico

Propiedades de agregado pétreos	Propiedades del ligante asfáltico
Gradación de los agregados	
Cantidad de agregado por volumen	Grado de desempeño PG
Cantidad de vacíos	Contenido de ligante asfáltico
Tamaño máximo nominal	Propiedades reológicas asociadas
Presión de confinamiento de agregados	

Para evitar la incidencia de estas variables sobre los resultados del módulo dinámico, y poder realizar evaluaciones con menor incertidumbre, estas variables han sido consideradas constantes en la medida de lo posible.

#### **4.1.2. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS**

En este estudio, como fue descrito en el numeral 3.4, la realización del ensayo para la determinación del módulo dinámico, fue elaborado bajo los lineamientos establecido por AASHTO T342 “Determination Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)”, posterior a la obtención de los resultados se realiza la formulación de curvas maestras bajo el protocolo establecido por AASHTO R62 “Developing Dynamic Modulus Master Curves for Asphalt Mixtures”, del cual se extrajeron las condiciones de evaluación del módulo dinámico definidas en la Tabla 3.45.

El modelo predictivo Witczak 1-37A, es el único modelo considerado para la evaluación de su precisión bajo la metodología mecánico – empírica. Para su aplicación, la determinación de la viscosidad se realizo por medio de dos procedimientos, medición de la viscosidad rotacional a través del viscosímetro Brookfield a diferentes temperaturas (Ilustración 3.5, Ilustración 3.6 e Ilustración 3.7) en conjunto con los resultados de las pruebas utilizadas para la clasificación de ligantes asfálticos por viscosidad presentados en la Tabla 3.8, Tabla 3.9 y Tabla 3.10. Adicionalmente, se realiza el procedimiento para la obtención de viscosidad a través de del módulo de corte dinámico de ligante asfáltico ( $G_b^*$ ) utilizando el reómetro de corte dinámico (DSR) aplicando la normativa AASHTO T315. Bajo este procedimiento, los tres ligantes asfálticos utilizados para este estudio fueron evaluados en tres condiciones de envejecimiento: condición original, condición envejecida después de RTFO y condición envejecida después de RTFO+PAV.

## 4.2. APLICACIÓN DEL MODELO WITCZAK 1-37A

A partir de las propiedades de la materia prima empleada, las curvas granulométricas desarrolladas, los diseños de mezcla para cada una ellas y los resultados de los módulos obtenidos en el laboratorio, se procede a analizar la aplicabilidad del uso de la ecuación del modelo Witzak 1-37A como una herramienta simplificada para la predicción del módulo dinámico de mezclas asfálticas.

### 4.2.1. DEFINICIÓN DE REGRESIÓN A-VTS

Como se mencionó en el numeral 2.4, la viscosidad del ligante asfáltico a la temperatura de interés es un parámetro de entrada crítico para el modelo predictivo Witzak 1-37A. De esta manera como primer paso se procedió a determinar la regresión lineal A-VTS para la definición de la viscosidad del ligante asfáltico para las siguientes condiciones:

**Tabla 4.2** – Condiciones para la definición de regresión A-VTS

Origen de datos	Condición	Designación
DSR	Original	Original
DSR	Envejecimiento RTFO	RTFO
DSR	Envejecimiento RTFO+PAV	RTFO+PAV
Clasificación por viscosidad	Original	Viscosidad

Estos parámetros son obtenidos a partir de una regresión lineal en escala log-log de viscosidad (cP) y log de temperatura (°R). El parámetro A es el intercepto de la regresión, y el VTS es la pendiente de la línea. Dado que la viscosidad se reduce con la temperatura, la pendiente siempre será negativa.

Para la definición de las regresiones A-VTS definidas a través de los resultados del reómetro de corte dinámico (DSR), se hace necesario la aplicación de la Ecuación 2.20 para determinar la viscosidad en función de los valores de  $G_b^*$  y  $\delta$ , valores presentado entre la Tabla 3.15 y Tabla 3.23.

En el caso de los parámetros establecidos para la clasificación por viscosidad presentados en la Tabla 2.5, únicamente se debe calcular la viscosidad en función del valor de penetración a 25°C utilizando la Ecuación 2.21 y tomar la temperatura obtenida a través del ensayo de punto de ablandamiento asignando el valor de viscosidad de 13,000 Poise, ambos valores deben analizar en conjunto con los valores de viscosidad que detallan las curvas viscosidad – temperatura para cada ligante asfáltico (Ilustración 3.5, Ilustración 3.6 e Ilustración 3.7).

Estos parámetros de regresión, expresan que tan susceptible es el ligante asfáltico a la temperatura. Las regresiones con interceptos (A) y pendientes (VTS) mayores denotan una mayor susceptibilidad al cambio térmico. Inversamente, interceptos y pendientes menores denotan menor susceptibilidad a la temperatura. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

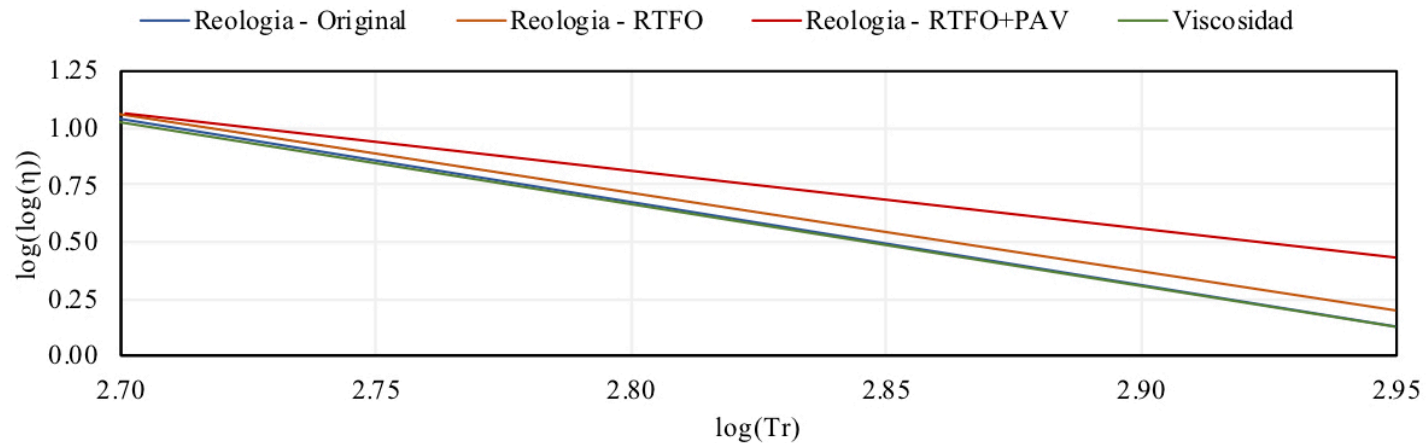
**Tabla 4.3** – Regresiones A-VTS – Ligante “A” – Parte 1

(°C)	Temperatura		Modulo G*		Angulo de fase (δ)	Viscosidad (cP)	log(log(η))	log(Tr)
	(°F)	(°R)	(Pa)	(psi)				
<b>Caracterizacion por desempeño - Condicion de envejecimiento: Original</b>								
46.0	114.8	574.5	26,200.0	3.8000	75.4	4.46E+06	0.822763	2.759290
52.0	125.6	585.3	10,500.0	1.5229	78.3	1.69E+06	0.794280	2.767379
58.0	136.4	596.1	4,330.0	0.6280	81.1	6.66E+05	0.765187	2.775319
64.0	147.2	606.9	1,870.0	0.2712	83.5	2.80E+05	0.736150	2.783117
70.0	158.0	617.7	866.0	0.1256	85.4	1.28E+05	0.708064	2.790778
						A: 10.9016	VTS: -3.6525	
<b>Caracterizacion por desempeño - Condicion de envejecimiento: RTFO</b>								
52.0	125.6	585.3	27,400.0	3.9740	70.8	5.25E+06	0.827375	2.767379
58.0	136.4	596.1	12,100.0	1.7550	73.9	2.13E+06	0.801320	2.775319
64.0	147.2	606.9	5,430.0	0.7876	77.0	8.94E+05	0.774600	2.783117
70.0	158.0	617.7	2,500.0	0.3626	79.8	3.92E+05	0.747650	2.790778
76.0	168.8	628.5	1,190.0	0.1726	82.2	1.81E+05	0.720711	2.798305
						A: 10.3837	VTS: -3.4529	
<b>Caracterizacion por desempeño - Condicion de envejecimiento: RTFO + PAV</b>								
31.0	87.8	547.5	2,600,000	377.0980	45.0	2.03E+09	0.968874	2.738384
28.0	82.4	542.1	3,630,000	526.4868	42.6	3.51E+09	0.979803	2.734079
25.0	77.0	536.7	5,160,000	748.3944	40.4	6.17E+09	0.990783	2.729732
22.0	71.6	531.3	7,590,000	1,100.8360	38.3	1.13E+10	1.002254	2.725340
19.0	66.2	525.9	11,000,000	1,595.4145	36.3	2.04E+10	1.013258	2.720903
						A: 7.9379	VTS: -2.5449	



**Tabla 4.4** – Regresiones A-VTS – Ligante “A” – Parte 2

Temperatura (°C)	Temperatura (°F)	Penetracion (dmm)	Punto de ablandam.	Viscosidad Brookfield	Viscosidad (cP)	log(log( $\eta$ ))	log(Tr)
<b>Caracterizacion por viscosidad - Condicion de envejecimiento: Original</b>							
25.0	77.0	536.7	57.0		3.51E+08	0.931699	2.729732
50.1	122.2	581.9	x		1.30E+06	0.786321	2.764848
60.0	140.0	599.7		x	3.32E+05	0.742029	2.777934
80.0	176.0	635.7		x	2.87E+04	0.649129	2.803252
100.0	212.0	671.7		x	4.44E+03	0.561981	2.827175
120.0	248.0	707.7		x	1.06E+03	0.480769	2.849849
140.0	284.0	743.7		x	3.50E+02	0.405529	2.871398
160.0	320.0	779.7		x	1.50E+02	0.337677	2.891928
175.0	347.0	806.7		x	9.00E+01	0.290978	2.906712
A: 10.7417						VTS: -3.5987	

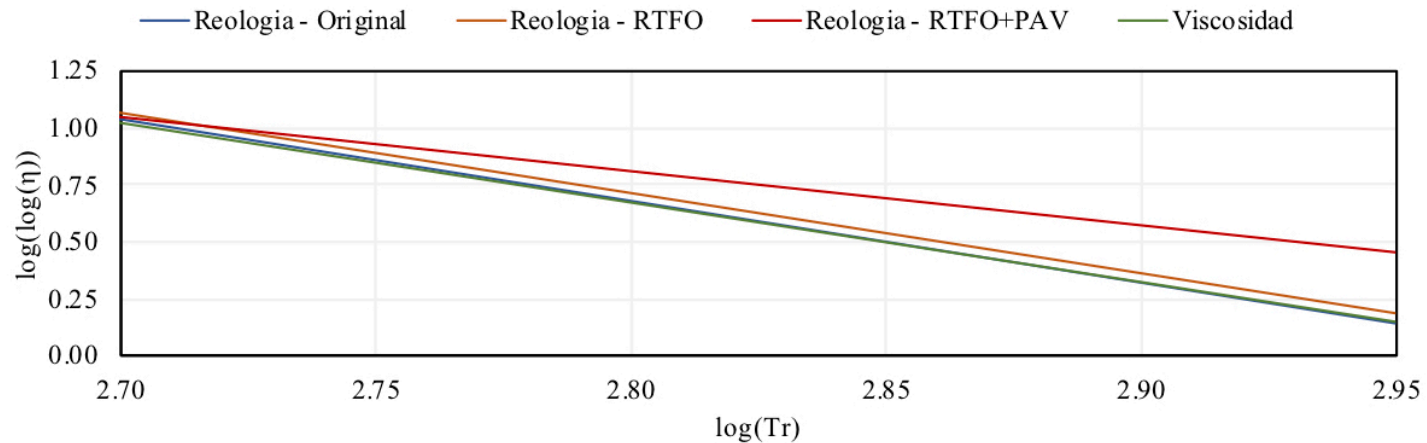


**Tabla 4.5 – Regresiones A-VTS – Ligante “B” – Parte 1**

(°C)	Temperatura		Modulo G*		Angulo de fase (δ)	Viscosidad (cP)	log(log(η))	log(Tr)
	(°F)	(°R)	(Pa)	(psi)				
<b>Caracterizacion por desempeño - Condicion de envejecimiento: Original</b>								
46.0	114.8	574.5	32,100.0	4.6557	80.8	4.96E+06	0.825772	2.759290
52.0	125.6	585.3	12,300.0	1.7840	83.1	1.85E+06	0.797042	2.767379
58.0	136.4	596.1	4,960.0	0.7194	85.1	7.32E+05	0.768246	2.775319
64.0	147.2	606.9	2,150.0	0.3118	86.6	3.14E+05	0.740173	2.783117
70.0	158.0	617.7	996.0	0.1445	87.8	1.45E+05	0.712770	2.790778
A: 10.7419						VTS: -3.5937		
<b>Caracterizacion por desempeño - Condicion de envejecimiento: RTFO</b>								
52.0	125.6	585.3	33,500.0	4.8588	77.1	5.50E+06	0.828693	2.767379
58.0	136.4	596.1	13,600.0	1.9725	79.9	2.13E+06	0.801267	2.775319
64.0	147.2	606.9	5,730.0	0.8311	82.4	8.68E+05	0.773661	2.783117
70.0	158.0	617.7	2,550.0	0.3698	84.4	3.79E+05	0.746484	2.790778
76.0	168.8	628.5	1,200.0	0.1740	86.1	1.76E+05	0.719782	2.798305
A: 10.5863						VTS: -3.5258		
<b>Caracterizacion por desempeño - Condicion de envejecimiento: RTFO + PAV</b>								
28.0	82.4	542.1	2,200,000	319.0829	43.8	1.91E+09	0.967595	2.734079
25.0	77.0	536.7	3,090,000	448.1664	41.9	3.19E+09	0.977909	2.729732
22.0	71.6	531.3	4,520,000	655.5703	40.3	5.46E+09	0.988418	2.725340
19.0	66.2	525.9	6,610,000	958.6991	38.6	9.51E+09	0.999046	2.720903
16.0	60.8	520.5	9,660,000	1,401.0640	36.9	1.67E+10	1.009612	2.716421
A: 7.4812						VTS: -2.3824		

**Tabla 4.6 – Regresiones A-VTS – Ligante “B” – Parte 2**

Temperatura (°C)	Temperatura (°F)	Penetracion (dmm)	Punto de ablandam.	Viscosidad Brookfield	Viscosidad (cP)	log(log( $\eta$ ))	log(Tr)
<b>Caracterizacion por viscosidad - Condicion de envejecimiento: Original</b>							
25.0	77.0	536.7	52.0		4.31E+08	0.936228	2.729732
49.9	121.8	581.5	x		1.30E+06	0.786321	2.764550
60.0	140.0	599.7		x	3.74E+05	0.746079	2.777934
80.0	176.0	635.7		x	3.37E+04	0.655830	2.803252
100.0	212.0	671.7		x	5.31E+03	0.571166	2.827175
120.0	248.0	707.7		x	1.36E+03	0.496035	2.849849
140.0	284.0	743.7		x	4.20E+02	0.418840	2.871398
160.0	320.0	779.7		x	1.80E+02	0.353199	2.891928
175.0	347.0	806.7		x	1.10E+02	0.309927	2.906712
A: 10.4696						VTS: -3.4990	

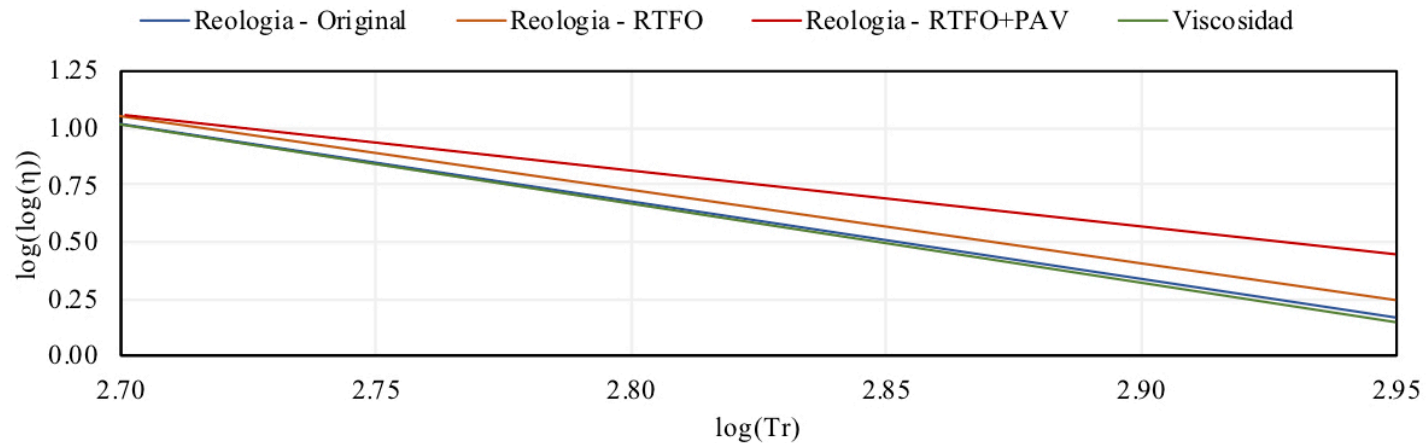


**Tabla 4.7 – Regresiones A-VTS – Ligante “C” – Parte 1**

(°C)	Temperatura		Modulo G*		Angulo de fase (δ)	Viscosidad (cP)	log(log(η))	log(Tr)
	(°F)	(°R)	(Pa)	(psi)				
<b>Caracterizacion por desempeño - Condicion de envejecimiento: Original</b>								
46.0	114.8	574.5	21,900.0	3.1763	77.0	3.60E+06	0.816689	2.759290
52.0	125.6	585.3	9,170.0	1.3300	80.1	1.43E+06	0.789266	2.767379
58.0	136.4	596.1	4,010.0	0.5816	82.8	6.04E+05	0.762029	2.775319
64.0	147.2	606.9	1,860.0	0.2698	85.0	2.75E+05	0.735527	2.783117
70.0	158.0	617.7	903.0	0.1310	86.6	1.32E+05	0.709354	2.790778
A: 10.2257						VTS: -3.4099		
<b>Caracterizacion por desempeño - Condicion de envejecimiento: RTFO</b>								
52.0	125.6	585.3	32,800.0	4.7572	69.5	6.54E+06	0.833499	2.767379
58.0	136.4	596.1	15,100.0	2.1901	73.1	2.71E+06	0.808461	2.775319
64.0	147.2	606.9	7,120.0	1.0327	76.6	1.18E+06	0.783351	2.783117
70.0	158.0	617.7	3,440.0	0.4989	79.7	5.40E+05	0.758331	2.790778
76.0	168.8	628.5	1,710.0	0.2480	82.3	2.59E+05	0.733485	2.798305
A: 9.7875						VTS: -3.2354		
<b>Caracterizacion por desempeño - Condicion de envejecimiento: RTFO + PAV</b>								
31.0	87.8	547.5	2,390,000	346.6401	46.4	1.67E+09	0.964799	2.738384
28.0	82.4	542.1	3,560,000	516.3341	44.5	2.91E+09	0.976049	2.734079
25.0	77.0	536.7	4,970,000	720.8373	42.5	4.85E+09	0.986147	2.729732
22.0	71.6	531.3	7,410,000	1,074.7292	40.7	8.60E+09	0.997135	2.725340
19.0	66.2	525.9	10,900,000	1,580.9107	38.8	1.53E+10	1.008007	2.720903
A: 7.7011						VTS: -2.4599		

**Tabla 4.8** – Regresiones A-VTS – Ligante “C” – Parte 2

Temperatura (°C)	Temperatura (°F)	Temperatura (°R)	Penetracion (dmm)	Punto de ablandam.	Viscosidad Brookfield	Viscosidad (cP)	log(log( $\eta$ ))	log(Tr)
<b>Caracterizacion por viscosidad - Condicion de envejecimiento: Original</b>								
25.0	77.0	536.7	69.0			2.28E+08	0.922122	2.729732
49.4	120.9	580.6		x		1.30E+06	0.786321	2.763877
60.0	140.0	599.7			x	3.45E+05	0.743339	2.777934
80.0	176.0	635.7			x	3.28E+04	0.654742	2.803252
100.0	212.0	671.7			x	5.36E+03	0.571583	2.827175
120.0	248.0	707.7			x	1.31E+03	0.493775	2.849849
140.0	284.0	743.7			x	4.20E+02	0.418840	2.871398
160.0	320.0	779.7			x	1.70E+02	0.348392	2.891928
175.0	347.0	806.7			x	1.00E+02	0.301030	2.906712
						A: 10.4147	VTS: -3.4809	



#### **4.2.2. PREDICCIONES CON MODELO WITCZAK 1-37A**

En contexto, el modelo original de Witczak fue desarrollado utilizando 149 mezclas asfálticas en caliente no envejecidas. Los tipos de ligantes asfálticos utilizados en la fabricación de las mezclas asfálticas eran únicamente ligantes asfálticos convencionales (es decir, no modificados), lo que limita severamente el uso de este modelo.

Esta ecuación fue revisada en 1999, al expandir el conjunto de datos y derivar una ecuación que ajustase con mayor precisión un rango mas amplio de gradaciones, rigideces de ligantes asfálticos y vacíos de aire. La ecuación revisada, ecuación predictiva 1-37A de Witczak, presentada en la Ecuación 2.18, es una función de las siguientes variables:

- Gradación de agregados pétreos
- Vacíos de aire
- Volumen de ligante asfáltico efectivo
- Viscosidad del ligante asfáltico
- Frecuencia de carga.

La predicción de módulos elástico a través del modelo Witczak 1-37A, se efectúa al contar con los parámetros de las regresiones A-VTS, definidos en el numeral anterior, en conjunto con los resultados del diseño volumétrico de las mezclas asfálticas, presentado entre la Tabla 3.33 y Tabla 3.38, y la gradación de agregados mostrada en la Tabla 3.24 y Tabla 3.25. A continuación, se presentan los resultados:

**Tabla 4.9** – Predicción de módulos elásticos Witzcak 1-37A – MAC A-75

<b>DATOS GENERALES DE LOS MATERIALES</b>						
Mezcla:	MAC A-75	Ligante:	A	Gradación:	CALUW 75	
Gba:	1.026	Gbs:	2.536	P34:	0.7%	
P200:	5.4%	P38:	29.0%	P4:	49.7%	
Va:	4.0%	Pb:	5.8%	Vbeff:	10.8%	
<b>DEFINICIÓN DE MÓDULOS DE ELASTICIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS</b>						
<b>MODELO DE WITCZAK 1-37A</b>						
Condicion		Original	RTFO	RTFO+PAV	Viscosidad	
A		10.9016	10.3837	7.9379	10.7417	
VTS		-3.653	-3.453	-2.545	-3.599	
Temperatura		4.4°C				
Viscosidad		1,226.7xE6	4,278.1xE6	5,671.9xE6	524.0xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	32,079.6	37,262.2	38,407.4	28,511.3
		10.0 Hz.	29,017.9	34,251.8	35,422.4	25,479.2
		5.0 Hz.	26,714.3	31,944.1	33,125.4	23,229.7
		1.0 Hz.	21,512.7	26,580.3	27,753.9	18,259.5
		0.5 Hz.	19,378.6	24,309.2	25,464.6	16,267.7
		0.1 Hz.	14,788.6	19,256.3	20,334.2	12,088.4
Temperatura		21.1°C				
Viscosidad		9.0221xE6	31.9001xE6	134.2219xE6	4.8336xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	13,114.5	17,395.7	22,906.1	11,240.5
		10.0 Hz.	10,940.7	14,847.1	20,038.0	9,271.0
		5.0 Hz.	9,455.0	13,056.3	17,962.7	7,943.8
		1.0 Hz.	6,544.9	9,407.4	13,547.7	5,394.8
		0.5 Hz.	5,519.2	8,066.5	11,848.9	4,514.6
		0.1 Hz.	3,621.6	5,487.0	8,429.8	2,915.9
Temperatura		37.8°C				
Viscosidad		0.2104xE6	0.7203xE6	6.3527xE6	0.1326xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	4,486.0	6,615.0	12,040.1	3,845.3
		10.0 Hz.	3,509.8	5,275.8	9,980.2	2,989.5
		5.0 Hz.	2,896.1	4,411.3	8,583.4	2,456.4
		1.0 Hz.	1,820.5	2,844.4	5,877.7	1,532.7
		0.5 Hz.	1,481.8	2,334.4	4,934.9	1,245.0
		0.1 Hz.	911.8	1,453.7	3,208.9	764.7
Temperatura		54.4°C				
Viscosidad		0.0114xE6	0.0367xE6	0.5140xE6	0.0081xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	1,594.6	2,454.6	5,966.9	1,401.6
		10.0 Hz.	1,211.6	1,880.8	4,732.6	1,063.4
		5.0 Hz.	982.4	1,531.6	3,941.8	861.8
		1.0 Hz.	603.4	942.9	2,522.1	530.0
		0.5 Hz.	490.2	764.2	2,064.4	431.1
		0.1 Hz.	305.8	470.8	1,280.1	270.4

**Tabla 4.10** – Predicción de módulos elásticos Witzak 1-37A – MAC A-100

<b>DATOS GENERALES DE LOS MATERIALES</b>						
Mezcla:	MAC A-100	Ligante:	A	Gradación:	CALUW 100	
Gba:	1.026	Gbs:	2.537	P34:	0.9%	
P200:	4.1%	P38:	37.7%	P4:	63.1%	
Va:	4.0%	Pb:	5.6%	Vbeff:	11.1%	
<b>DEFINICIÓN DE MÓDULOS DE ELASTICIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS</b>						
<b>MODELO DE WITZAK 1-37A</b>						
Condicion		Original	RTFO	RTFO+PAV	Viscosidad	
A		10.9016	10.3837	7.9379	10.7417	
VTS		-3.653	-3.453	-2.545	-3.599	
Temperatura		4.4°C				
Viscosidad		1,226.7xE6	4,278.1xE6	5,671.9xE6	524.0xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	31,712.2	36,835.6	37,967.6	28,184.7
		10.0 Hz.	28,685.5	33,859.6	35,016.7	25,187.3
		5.0 Hz.	26,408.2	31,578.3	32,746.0	22,963.5
		1.0 Hz.	21,266.1	26,275.7	27,436.0	18,050.2
		0.5 Hz.	19,156.4	24,030.7	25,172.8	16,081.2
		0.1 Hz.	14,619.1	19,035.6	20,101.1	11,949.7
Temperatura		21.1°C				
Viscosidad		9.0221xE6	31.9001xE6	134.2219xE6	4.8336xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	12,964.1	17,196.3	22,643.7	11,111.5
		10.0 Hz.	10,815.2	14,676.8	19,808.3	9,164.6
		5.0 Hz.	9,346.5	12,906.6	17,756.8	7,852.6
		1.0 Hz.	6,469.8	9,299.4	13,392.3	5,332.8
		0.5 Hz.	5,455.8	7,973.9	11,713.0	4,462.7
		0.1 Hz.	3,579.9	5,424.0	8,333.0	2,882.4
Temperatura		37.8°C				
Viscosidad		0.2104xE6	0.7203xE6	6.3527xE6	0.1326xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	4,434.4	6,539.1	11,902.0	3,801.1
		10.0 Hz.	3,469.5	5,215.2	9,865.7	2,955.1
		5.0 Hz.	2,862.8	4,360.6	8,484.9	2,428.1
		1.0 Hz.	1,799.5	2,811.7	5,810.2	1,515.1
		0.5 Hz.	1,464.7	2,307.6	4,878.2	1,230.7
		0.1 Hz.	901.3	1,437.0	3,172.0	755.9
Temperatura		54.4°C				
Viscosidad		0.0114xE6	0.0367xE6	0.5140xE6	0.0081xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	1,576.2	2,426.4	5,898.4	1,385.5
		10.0 Hz.	1,197.6	1,859.2	4,678.3	1,051.1
		5.0 Hz.	971.1	1,514.0	3,896.5	851.9
		1.0 Hz.	596.5	932.1	2,493.1	523.9
		0.5 Hz.	484.5	755.4	2,040.6	426.1
		0.1 Hz.	302.3	465.4	1,265.3	267.3



**Tabla 4.11** – Predicción de módulos elásticos Witzak 1-37A – MAC B-75

<b>DATOS GENERALES DE LOS MATERIALES</b>						
Mezcla:	MAC B-75	Ligante:	B	Gradación:	CALUW 75	
Gba:	1.035	Gbs:	2.536	P34:	0.7%	
P200:	5.4%	P38:	29.0%	P4:	49.7%	
Va:	4.0%	Pb:	5.5%	Vbeff:	10.7%	
<b>DEFINICIÓN DE MÓDULOS DE ELASTICIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS</b>						
<b>MODELO DE WITZAK 1-37A</b>						
Condicion		Original	RTFO	RTFO+PAV	Viscosidad	
A		10.7419	10.5863	7.4812	10.4696	
VTS		-3.594	-3.526	-2.382	-3.499	
Temperatura		4.4°C				
Viscosidad		1,155.3xE6	6,159.5xE6	1,870.8xE6	440.9xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	31,936.4	38,871.6	33,960.4	27,884.5
		10.0 Hz.	28,864.6	35,884.8	30,893.7	24,854.9
		5.0 Hz.	26,555.6	33,583.9	28,571.0	22,614.0
		1.0 Hz.	21,349.4	28,193.9	23,272.8	17,685.6
		0.5 Hz.	19,216.9	25,892.3	21,074.9	15,720.2
		0.1 Hz.	14,638.2	20,723.7	16,291.7	11,617.7
Temperatura		21.1°C				
Viscosidad		9.2271xE6	39.0959xE6	63.9040xE6	4.7206xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	13,230.0	18,201.4	20,057.9	11,210.8
		10.0 Hz.	11,041.6	15,590.6	17,328.5	9,242.6
		5.0 Hz.	9,545.1	13,748.3	15,382.6	7,916.9
		1.0 Hz.	6,611.9	9,970.8	11,332.7	5,372.7
		0.5 Hz.	5,577.3	8,573.4	9,810.6	4,494.8
		0.1 Hz.	3,661.9	5,867.9	6,817.5	2,901.5
Temperatura		37.8°C				
Viscosidad		0.2264xE6	0.7921xE6	3.9761xE6	0.1423xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	4,610.6	6,829.7	10,726.0	3,951.7
		10.0 Hz.	3,611.1	5,455.7	8,815.3	3,075.1
		5.0 Hz.	2,981.8	4,566.9	7,533.3	2,528.3
		1.0 Hz.	1,876.8	2,951.4	5,086.3	1,579.2
		0.5 Hz.	1,528.2	2,424.1	4,246.7	1,283.1
		0.1 Hz.	940.8	1,511.6	2,730.3	788.3
Temperatura		54.4°C				
Viscosidad		0.0126xE6	0.0375xE6	0.3951xE6	0.0092xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	1,663.0	2,482.4	5,514.6	1,476.7
		10.0 Hz.	1,264.2	1,902.5	4,355.7	1,120.9
		5.0 Hz.	1,025.3	1,549.4	3,617.3	908.6
		1.0 Hz.	629.7	954.0	2,301.4	558.4
		0.5 Hz.	511.3	773.2	1,880.2	454.0
		0.1 Hz.	318.5	476.3	1,162.6	284.2

**Tabla 4.12** – Predicción de módulos elásticos Witzak 1-37A – MAC B-100

<b>DATOS GENERALES DE LOS MATERIALES</b>						
Mezcla:	MAC B-100	Ligante:	B	Gradación:	CALUW 100	
Gba:	1.035	Gbs:	2.537	P34:	0.9%	
P200:	4.1%	P38:	37.7%	P4:	63.1%	
Va:	4.0%	Pb:	5.7%	Vbeff:	11.1%	
<b>DEFINICIÓN DE MÓDULOS DE ELASTICIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS</b>						
<b>MODELO DE WITZAK 1-37A</b>						
Condicion		Original	RTFO	RTFO+PAV	Viscosidad	
A		10.7419	10.5863	7.4812	10.4696	
VTS		-3.594	-3.526	-2.382	-3.499	
Temperatura		4.4°C				
Viscosidad		1,155.3xE6	6,159.5xE6	1,870.8xE6	440.9xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	31,463.6	38,296.3	33,457.6	27,471.6
		10.0 Hz.	28,437.3	35,353.6	30,436.3	24,486.8
		5.0 Hz.	26,162.3	33,086.8	28,148.0	22,279.1
		1.0 Hz.	21,033.2	27,776.4	22,928.1	17,423.6
		0.5 Hz.	18,932.2	25,508.9	20,762.8	15,487.3
		0.1 Hz.	14,421.2	20,416.8	16,050.4	11,445.5
Temperatura		21.1°C				
Viscosidad		9.2271xE6	39.0959xE6	63.9040xE6	4.7206xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	13,033.9	17,931.7	19,760.8	11,044.7
		10.0 Hz.	10,877.9	15,359.6	17,071.8	9,105.5
		5.0 Hz.	9,403.6	13,544.6	15,154.7	7,799.5
		1.0 Hz.	6,513.9	9,823.0	11,164.8	5,293.0
		0.5 Hz.	5,494.6	8,446.3	9,665.1	4,428.1
		0.1 Hz.	3,607.5	5,780.8	6,716.4	2,858.4
Temperatura		37.8°C				
Viscosidad		0.2264xE6	0.7921xE6	3.9761xE6	0.1423xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	4,542.2	6,728.4	10,566.9	3,893.0
		10.0 Hz.	3,557.5	5,374.8	8,684.5	3,029.4
		5.0 Hz.	2,937.5	4,499.1	7,421.6	2,490.7
		1.0 Hz.	1,848.9	2,907.6	5,010.9	1,555.8
		0.5 Hz.	1,505.5	2,388.1	4,183.7	1,264.1
		0.1 Hz.	926.8	1,489.1	2,689.7	776.6
Temperatura		54.4°C				
Viscosidad		0.0126xE6	0.0375xE6	0.3951xE6	0.0092xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	1,638.3	2,445.5	5,432.8	1,454.8
		10.0 Hz.	1,245.4	1,874.2	4,291.0	1,104.2
		5.0 Hz.	1,010.1	1,526.4	3,563.6	895.1
		1.0 Hz.	620.3	939.9	2,267.2	550.1
		0.5 Hz.	503.7	761.7	1,852.3	447.2
		0.1 Hz.	313.8	469.2	1,145.3	279.9

**Tabla 4.13** – Predicción de módulos elásticos Witzak 1-37A – MAC C-75

<b>DATOS GENERALES DE LOS MATERIALES</b>						
Mezcla:	MAC C-75	Ligante:	C	Gradación:	CALUW 75	
Gba:	1.065	Gbs:	2.536	P34:	0.7%	
P200:	5.4%	P38:	29.0%	P4:	49.7%	
Va:	4.0%	Pb:	5.8%	Vbeff:	10.8%	
<b>DEFINICIÓN DE MÓDULOS DE ELASTICIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS</b>						
<b>MODELO DE WITZAK 1-37A</b>						
Condicion		Original	RTFO	RTFO+PAV	Viscosidad	
A		10.2257	9.7875	7.7011	10.4147	
VTS		-3.410	-3.235	-2.460	-3.481	
Temperatura		<b>4.4°C</b>				
Viscosidad		363.1xE6	2,433.1xE6	3,586.7xE6	314.1xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	26,981.3	34,938.5	36,540.6	26,378.4
		10.0 Hz.	23,979.2	31,891.9	33,516.7	23,391.0
		5.0 Hz.	21,766.2	29,575.3	31,204.4	21,194.6
		1.0 Hz.	16,924.6	24,258.4	25,850.6	16,408.5
		0.5 Hz.	15,004.7	22,038.0	23,593.4	14,518.7
		0.1 Hz.	11,020.5	17,171.1	18,594.2	10,614.2
Temperatura		<b>21.1°C</b>				
Viscosidad		4.4697xE6	26.4641xE6	101.3813xE6	3.6556xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	11,017.6	16,724.8	21,788.3	10,457.8
		10.0 Hz.	9,074.3	14,227.0	18,971.5	8,581.8
		5.0 Hz.	7,767.0	12,479.0	16,944.6	7,325.5
		1.0 Hz.	5,262.4	8,937.8	12,667.6	4,933.8
		0.5 Hz.	4,399.6	7,644.4	11,036.4	4,115.3
		0.1 Hz.	2,836.4	5,170.9	7,781.8	2,640.7
Temperatura		<b>37.8°C</b>				
Viscosidad		0.1475xE6	0.7662xE6	5.4683xE6	0.1172xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	3,986.0	6,739.1	11,597.4	3,687.0
		10.0 Hz.	3,103.3	5,380.3	9,586.9	2,861.8
		5.0 Hz.	2,552.3	4,502.0	8,228.3	2,349.0
		1.0 Hz.	1,595.1	2,907.2	5,608.8	1,463.1
		0.5 Hz.	1,296.2	2,387.1	4,700.6	1,188.0
		0.1 Hz.	796.4	1,487.8	3,045.2	729.5
Temperatura		<b>54.4°C</b>				
Viscosidad		0.0101xE6	0.0460xE6	0.4874xE6	0.0079xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	1,524.4	2,660.1	5,869.3	1,391.3
		10.0 Hz.	1,157.6	2,042.7	4,651.3	1,055.4
		5.0 Hz.	938.4	1,665.5	3,871.7	855.4
		1.0 Hz.	576.6	1,027.0	2,474.3	526.1
		0.5 Hz.	468.6	832.3	2,024.5	428.0
		0.1 Hz.	292.9	512.1	1,254.6	268.5

**Tabla 4.14** – Predicción de módulos elásticos Witczak 1-37A – MAC C-100

<b>DATOS GENERALES DE LOS MATERIALES</b>						
Mezcla:	MAC C-100	Ligante:	C	Gradación:	CALUW 100	
Gba:	1.065	Gbs:	2.537	P34:	0.9%	
P200:	4.1%	P38:	37.7%	P4:	63.1%	
Va:	4.0%	Pb:	6.0%	Vbeff:	10.9%	
<b>DEFINICIÓN DE MÓDULOS DE ELASTICIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS</b>						
<b>MODELO DE WITCZAK 1-37A</b>						
Condicion		Original	RTFO	RTFO+PAV	Viscosidad	
A		10.2257	9.7875	7.7011	10.4147	
VTS		-3.410	-3.235	-2.460	-3.481	
Temperatura		4.4°C				
Viscosidad		363.1xE6	2,433.1xE6	3,586.7xE6	314.1xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	26,848.0	34,766.0	36,360.2	26,248.0
		10.0 Hz.	23,860.6	31,734.4	33,351.2	23,275.3
		5.0 Hz.	21,658.5	29,429.2	31,050.3	21,089.8
		1.0 Hz.	16,840.8	24,138.5	25,722.9	16,327.2
		0.5 Hz.	14,930.4	21,929.1	23,476.7	14,446.8
		0.1 Hz.	10,965.9	17,086.1	18,502.2	10,561.5
Temperatura		21.1°C				
Viscosidad		4.4697xE6	26.4641xE6	101.3813xE6	3.6556xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	10,963.0	16,642.0	21,680.5	10,405.9
		10.0 Hz.	9,029.2	14,156.5	18,877.6	8,539.2
		5.0 Hz.	7,728.4	12,417.1	16,860.7	7,289.1
		1.0 Hz.	5,236.2	8,893.4	12,604.9	4,909.3
		0.5 Hz.	4,377.8	7,606.5	10,981.6	4,094.8
		0.1 Hz.	2,822.2	5,145.2	7,743.2	2,627.5
Temperatura		37.8°C				
Viscosidad		0.1475xE6	0.7662xE6	5.4683xE6	0.1172xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	3,966.2	6,705.7	11,539.9	3,668.6
		10.0 Hz.	3,087.9	5,353.6	9,539.4	2,847.6
		5.0 Hz.	2,539.5	4,479.6	8,187.5	2,337.3
		1.0 Hz.	1,587.1	2,892.7	5,581.0	1,455.8
		0.5 Hz.	1,289.7	2,375.2	4,677.2	1,182.0
		0.1 Hz.	792.4	1,480.4	3,030.0	725.9
Temperatura		54.4°C				
Viscosidad		0.0101xE6	0.0460xE6	0.4874xE6	0.0079xE6	
Frecuencias	Modulos (Mpa)	25.0 Hz.	1,516.8	2,646.9	5,840.2	1,384.3
		10.0 Hz.	1,151.8	2,032.5	4,628.1	1,050.2
		5.0 Hz.	933.8	1,657.2	3,852.4	851.1
		1.0 Hz.	573.7	1,021.8	2,462.0	523.5
		0.5 Hz.	466.2	828.1	2,014.4	425.8
		0.1 Hz.	291.4	509.5	1,248.3	267.2

### 4.3. DETERMINACIÓN DE CURVAS MAESTRAS

A partir de los resultados obtenidos de los ensayos de módulo dinámico a 4 temperaturas y 6 frecuencias de aplicación de carga definidas en la Tabla 3.45, es posible generar las curvas maestras para el módulo dinámico. En este estudio, las curvas maestras fueron construidas con el ajuste a una función sigmoïdal de los resultados de las mediciones del módulo dinámico empleando técnicas de regresión no lineales de mínimos cuadrados. Lo cual puede hacerse con la solución simultanea de cambios de factores con los coeficientes de la función sigmoïdal. La función sigmoïdal esta definida por Ecuación 2.8. Empleando los resultados mostrados en la Tabla 3.46 hasta Tabla 3.51 y los presentado entre la Tabla 4.9 y Tabla 4.14, y el complemento Solver del software Microsoft® Excel 2016 se ajustaron las curvas maestras para cada uno de los datos. De esta manera se obtienen los resultados que se muestran a continuación:

**Tabla 4.15** – Parámetros de curva maestra – MAC A-75

Parámetros curva maestra	Condición de evaluación				
	AASHTO T342	Original (1-37A)	RTFO (1-37A)	RTFO+PAV (1-37A)	Viscosidad (1-37A)
$\delta$	1.47	1.45	1.48	-12.92	1.31
$\alpha$	4.98	4.99	4.96	5.24	5.03
$\beta$	-0.90	-0.71	-0.92	-2.75	-0.63
$\gamma$	-0.33	-0.34	-0.33	-0.16	-0.31

**Tabla 4.16** – Parámetros de curva maestra – MAC A-100

Parámetros curva maestra	Condición de evaluación				
	AASHTO T342	Original (1-37A)	RTFO (1-37A)	RTFO+PAV (1-37A)	Viscosidad (1-37A)
$\delta$	1.74	1.44	1.48	-16.68	1.30
$\alpha$	4.98	4.98	4.96	5.25	5.03
$\beta$	-0.82	-0.71	-0.92	-2.93	-0.63
$\gamma$	-0.32	-0.34	-0.34	-0.15	-0.31

**Tabla 4.17** – Parámetros de curva maestra – MAC B-75

Parámetros curva maestra	Condición de evaluación				
	AASHTO T342	Original (1-37A)	RTFO (1-37A)	RTFO+PAV (1-37A)	Viscosidad (1-37A)
$\delta$	1.82	1.41	1.58	-154.80	1.19
$\alpha$	4.88	5.00	4.95	5.34	5.07
$\beta$	-0.89	-0.72	-0.93	-4.83	-0.65
$\gamma$	-0.39	-0.33	-0.36	-0.13	-0.30

**Tabla 4.18** – Parámetros de curva maestra – MAC B-100

Parámetros curva maestra	Condición de evaluación				
	AASHTO T342	Original (1-37A)	RTFO (1-37A)	RTFO+PAV (1-37A)	Viscosidad (1-37A)
$\delta$	0.80	1.40	1.57	-136.46	1.18
$\alpha$	5.09	4.99	4.94	5.33	5.06
$\beta$	-1.09	-0.72	-0.93	-4.71	-0.65
$\gamma$	-0.27	-0.33	-0.36	-0.13	-0.30

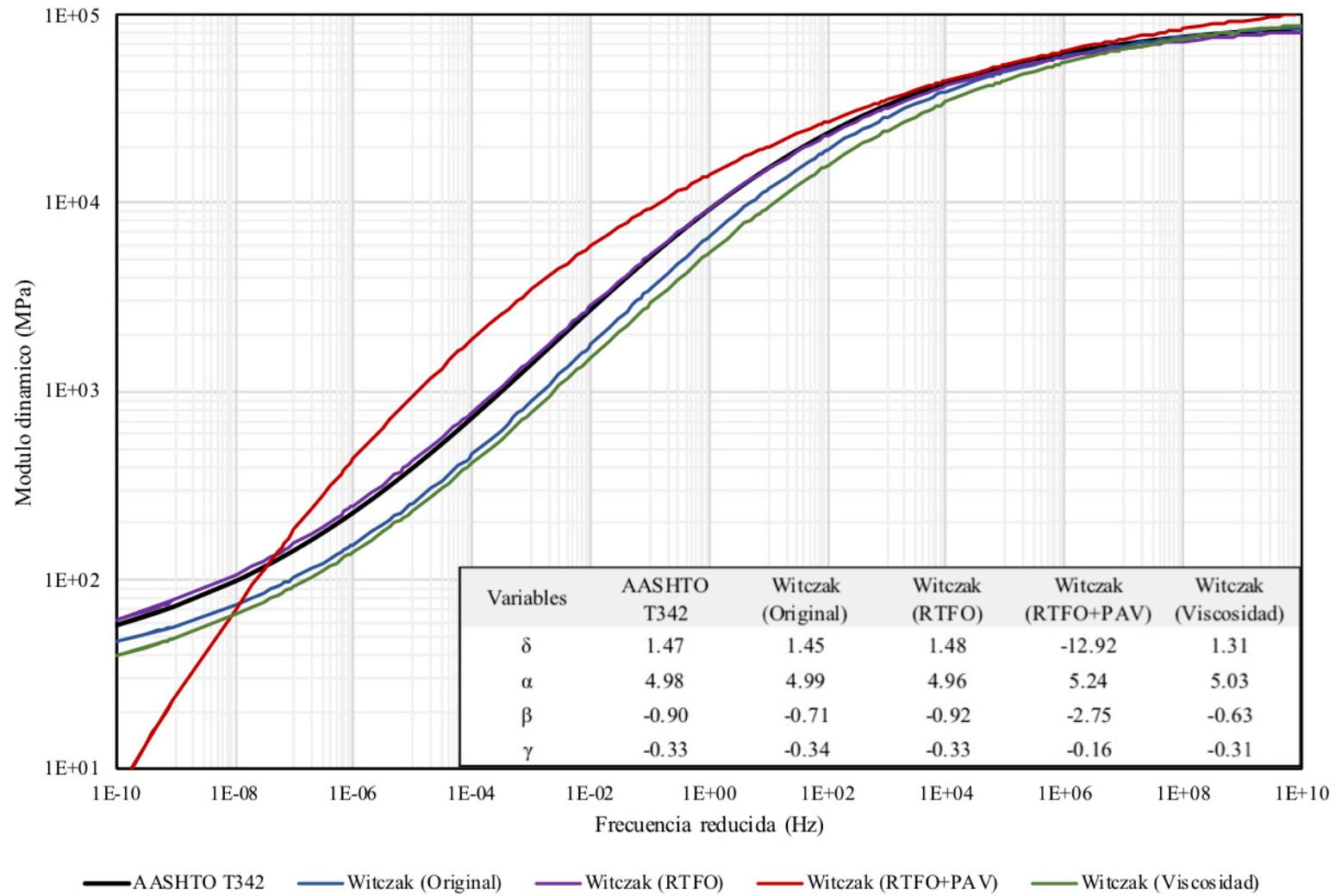
**Tabla 4.19** – Parámetros de curva maestra – MAC C-75

Parámetros curva maestra	Condición de evaluación				
	AASHTO T342	Original (1-37A)	RTFO (1-37A)	RTFO+PAV (1-37A)	Viscosidad (1-37A)
$\delta$	1.47	1.45	1.48	-12.92	1.31
$\alpha$	4.98	4.99	4.96	5.24	5.03
$\beta$	-0.90	-0.71	-0.92	-2.75	-0.63
$\gamma$	-0.33	-0.34	-0.33	-0.16	-0.31

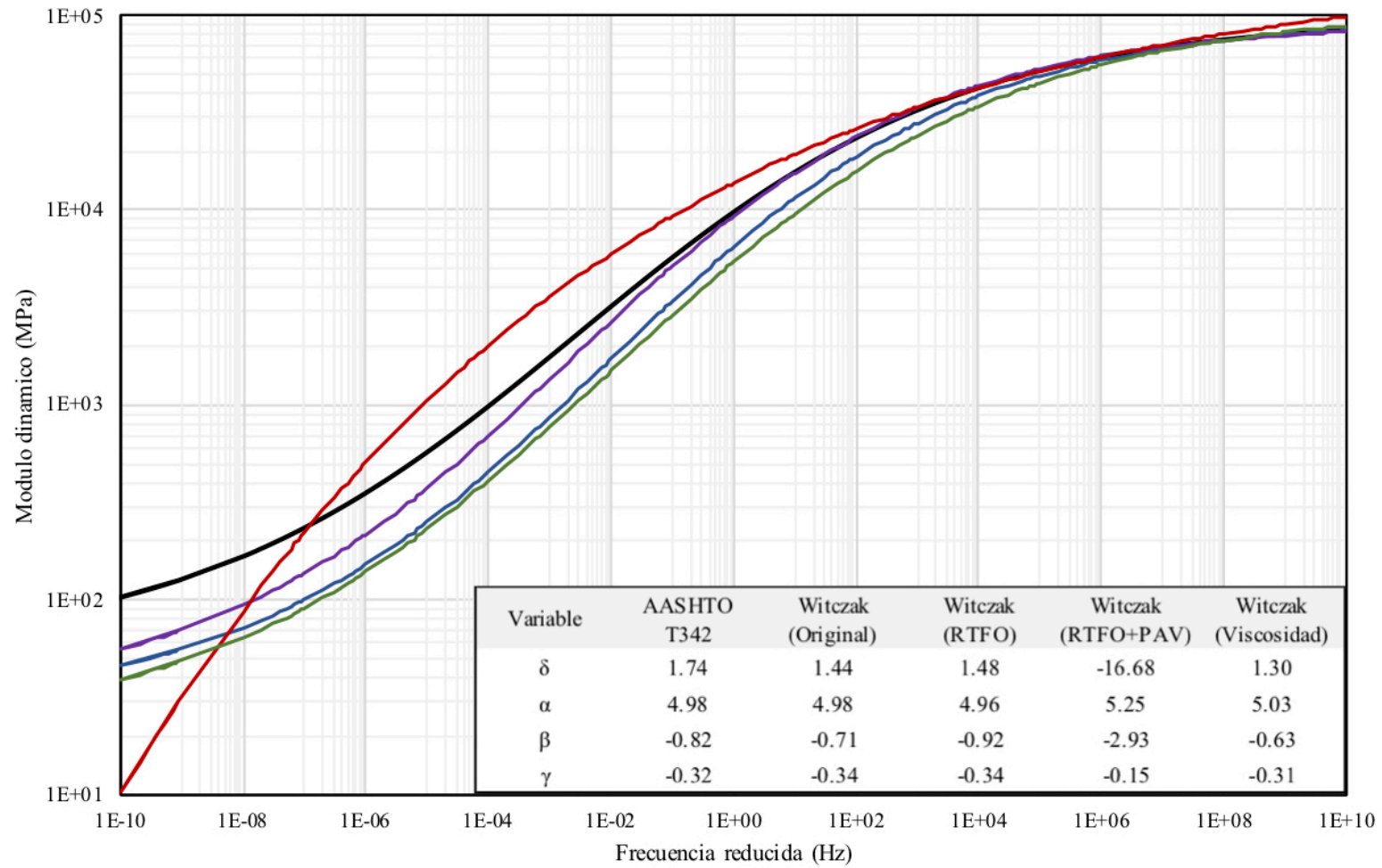
**Tabla 4.20** – Parámetros de curva maestra – MAC B-100

Parámetros curva maestra	Condición de evaluación				
	AASHTO T342	Original (1-37A)	RTFO (1-37A)	RTFO+PAV (1-37A)	Viscosidad (1-37A)
$\delta$	1.47	1.45	1.48	-12.92	1.31
$\alpha$	4.98	4.99	4.96	5.24	5.03
$\beta$	-0.90	-0.71	-0.92	-2.75	-0.63
$\gamma$	-0.33	-0.34	-0.33	-0.16	-0.31

**Ilustración 4.1 – Curvas maestras – MAC A-75**



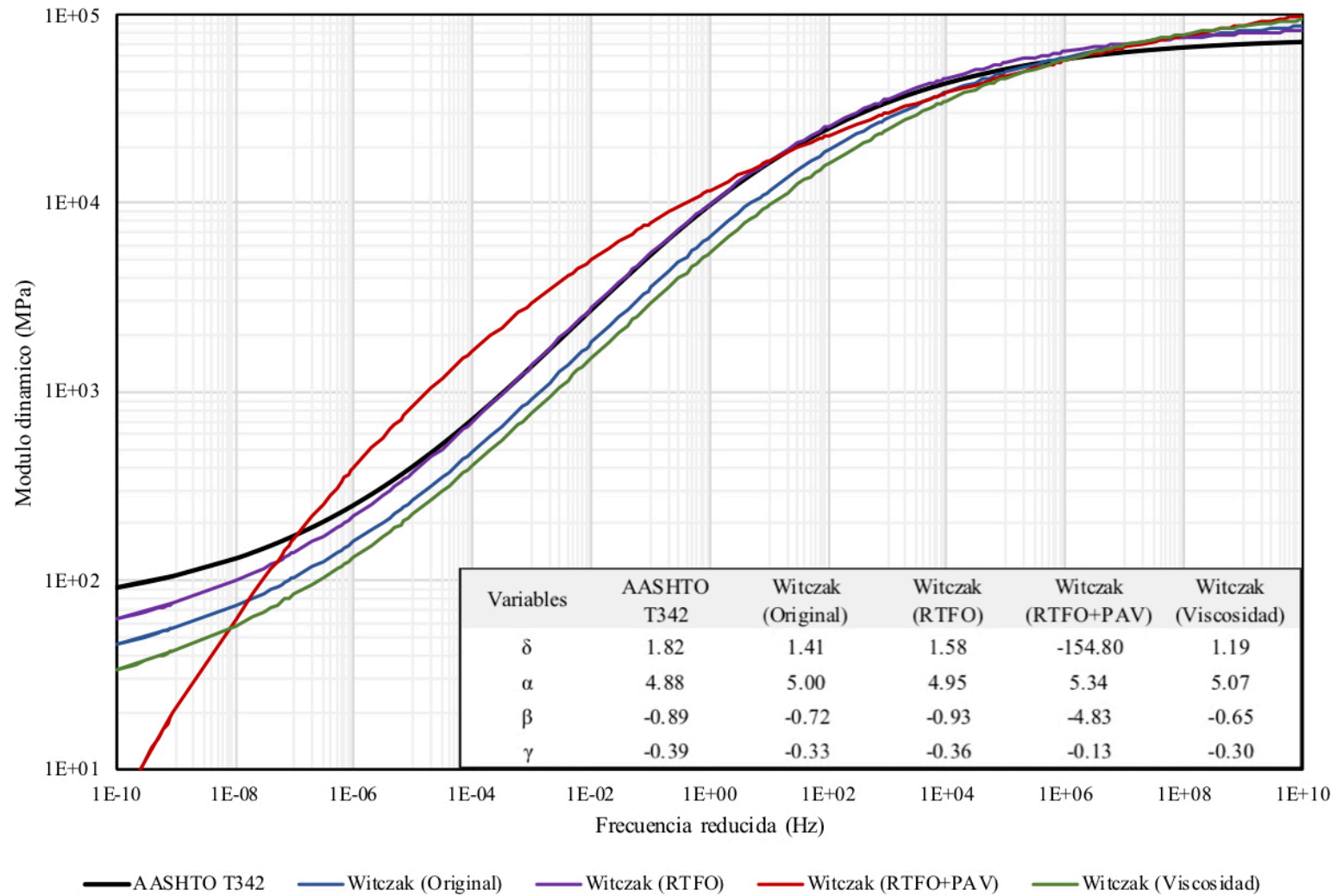
**Ilustración 4.2 – Curvas maestras – MAC A-100**



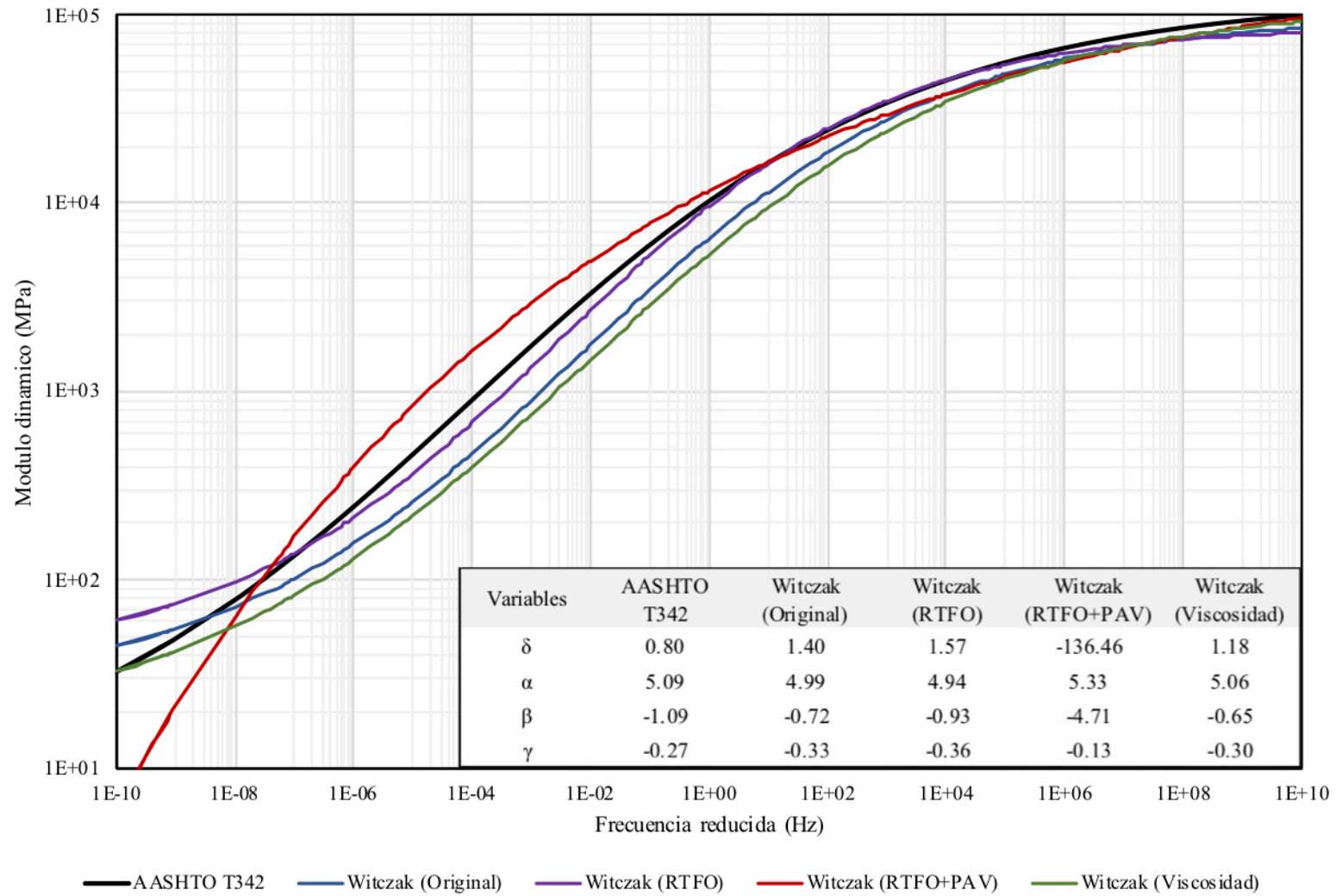
— AASHTO T342    — Witczak (Original)    — Witczak (RTFO)    — Witczak (RTFO+PAV)    — Witczak (Viscosidad)



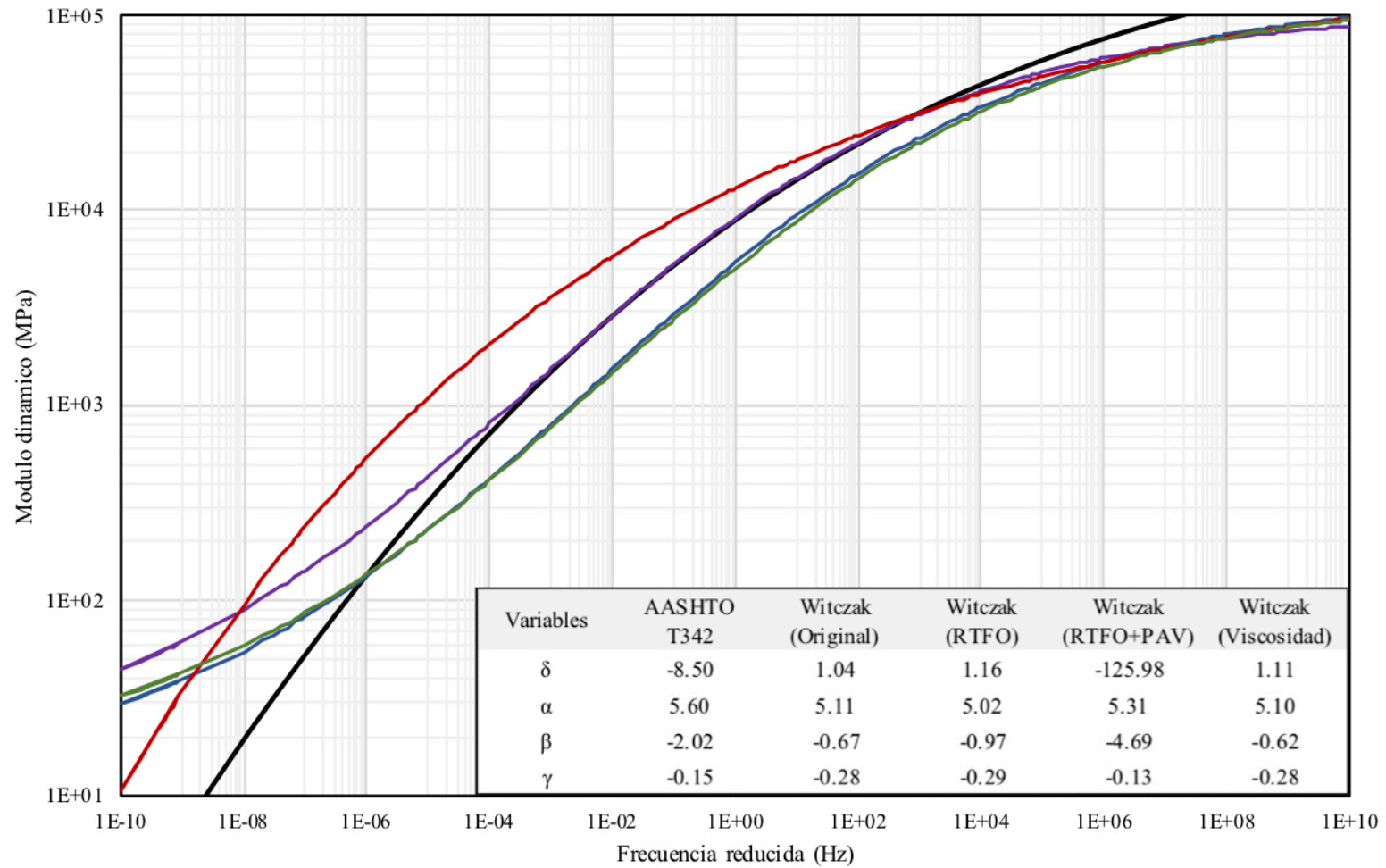
**Ilustración 4.3 – Curvas maestras – MAC B-75**



**Ilustración 4.4 – Curvas maestras – MAC B-100**

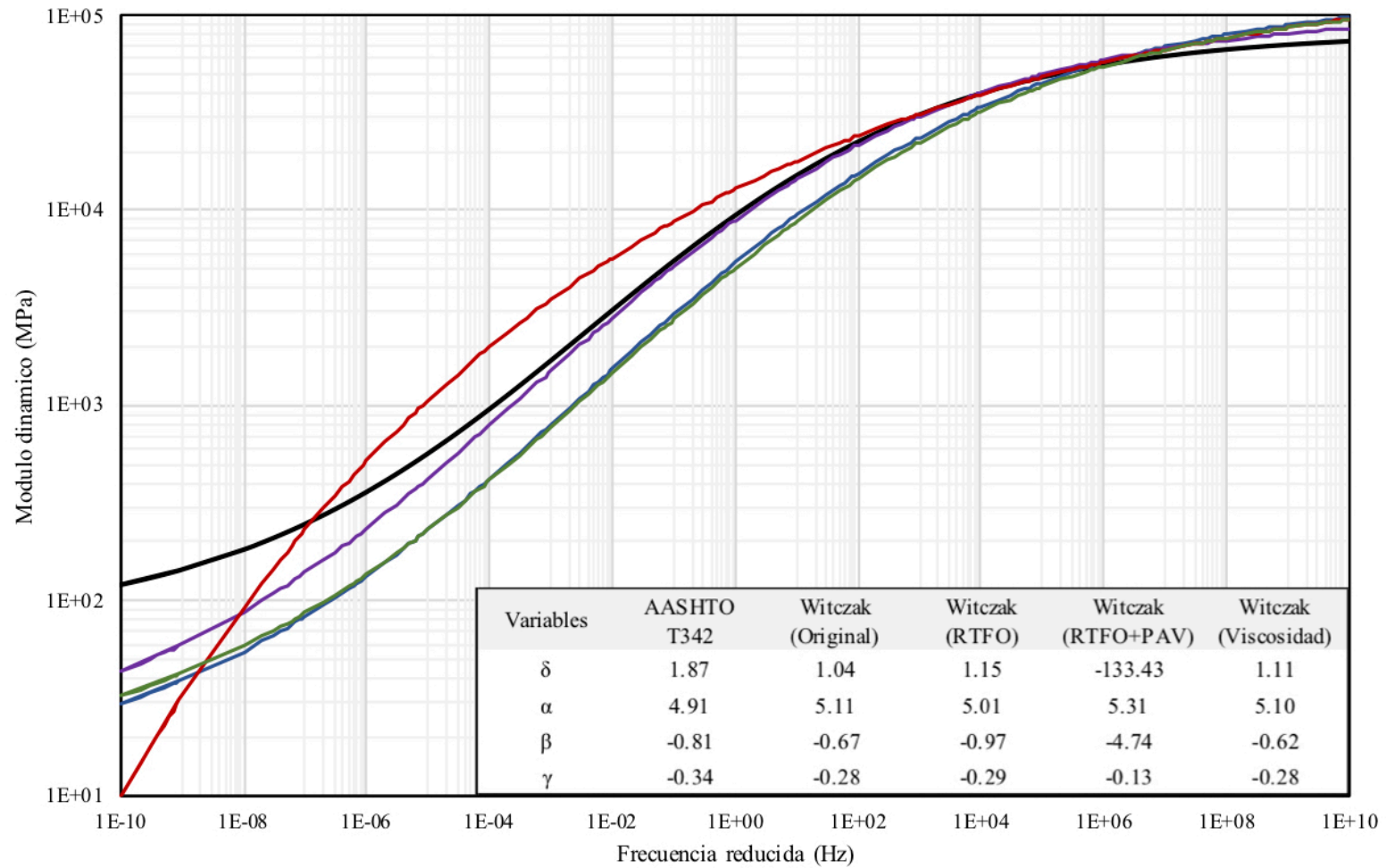


**Ilustración 4.5 – Curvas maestras – MAC C-75**



— AASHTO T342    — Witzak (Original)    — Witzak (RTFO)    — Witzak (RTFO+PAV)    — Witzak (Viscosidad)

**Ilustración 4.6 – Curvas maestras – MAC C-100**



— AASHTO T342    — Witzak (Original)    — Witzak (RTFO)    — Witzak (RTFO+PAV)    — Witzak (Viscosidad)

#### 4.4. ANALISIS DE RESULTADOS

El modelo Witzak 1-37A se desarrollo a través de análisis de regresión basados en módulos dinámico medidos en mezclas asfálticas con variedad de gradaciones granulométricas, ligantes asfálticos y grados de envejecimiento. El análisis determino un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de 0.866 en escala aritmética y 0.941 en escala logarítmica para el modelo. Aunque el modelo demostró predecir con precisión los valores de módulo dinámico de la base de datos utilizada para su formulación, se identifico la necesidad de determinar su capacidad para predecir  $E^*$  para diferentes variaciones de gradaciones granulométricas y ligantes asfálticos no incluidos en la base de datos, previo a su implementación.

Con la finalidad de evaluar la aplicabilidad del modelo predictivo Witzak 1-37A, a partir de los resultados obtenidos, se realizo el análisis estadístico de los datos. Específicamente se realizo un análisis de correlación entre los resultados obtenidos a partir del modelo predictivo Witzak 1-37A contrastados con los resultados obtenidos en las pruebas en laboratorio, siendo evaluados el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y la linealidad de la predicción (Pendiente e intercepto).

En la Ilustración 4.8, se muestra el trazo de los valores de módulo dinámico medido en laboratorio frente a los valores pronosticado de  $E^*$  aplicando el modelo Witzak 1-37A utilizando las propiedades individuales de las mezclas asfálticas analizadas. Idealmente, todos los puntos deberían situarse sobre la línea de igualdad, pero evidentemente no es el caso.

Tras una inspección visual de los gráficos, se puede observar que, en general, la regresión A-VTS obtenida a través de los resultados de DSR en ligantes asfálticos en condición original y los obtenidos con los resultados de la clasificación por viscosidad, sub-dimensionan constantemente los valores medidos, con el 99% de los puntos (datos) por debajo de la línea de igualdad.

Si bien presenta dispersiones significativas de los puntos, la regresión A-VTS obtenida a través de los resultados de DSR en ligantes asfálticos acondicionados en RTFO, generalmente se acomoda convenientemente a la línea de igualdad, con datos tanto por encima como por debajo de la línea.

Del mismo modo, la regresión A-VTS obtenida a través de los resultados de DSR en ligantes asfálticos acondicionados en RTFO+PAV, sigue la línea de igualdad, aunque con mayor dispersión respecto a la condición anterior. Cabe aclarar, que algunas de las dispersiones evidentes pueden estar relacionadas con errores inherentes en los valores de módulo dinámico medidos, ya que las pruebas de laboratorio no son perfectas y tienen limitaciones, particularmente a altas frecuencias.

Al aplicar una regresión lineal para indicar la precisión de los valores pronosticados por el modelo Witzak 1-37A. Las cuatro condiciones para la obtención de la regresión A-VTS produjeron predicciones que se correlacionan bien con los valores medidos por una regresión logarítmica lineal. La condición RTFO produjo el valor de  $R^2$  más alto (0.9949) y la condición RTFO+PAV presentó el valor de  $R^2$  más bajo (0.9780).

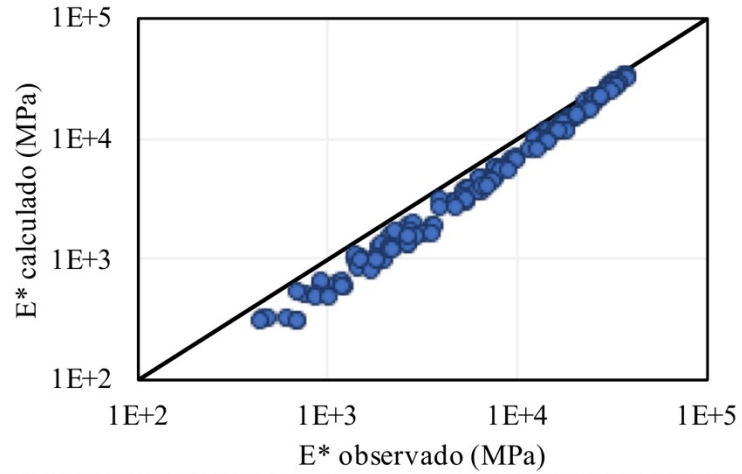
Aunque se encontró que las cuatro condiciones evaluadas se correlacionan linealmente bien con los valores medidos de módulo dinámico, pueden no ser aplicables a condiciones no evaluadas en esta investigación, como puede ser: diferentes contenidos de vacíos y contenidos de ligantes asfálticos, fuentes de materiales distintas a las utilizadas y métodos de diseño alternativos para la mezcla asfáltica. Esta particularidad es importante, ya que el propósito del modelo Witzak 1-37A es proporcionar estimaciones razonables del valor de módulo dinámico, sin la necesidad de ejecutar la prueba en laboratorio.

El índice de linealidad es una medida para evaluar la precisión del modelo predictivo con respecto a la línea de igualdad de los datos medidos en laboratorio. Para que el modelo se considere preciso, la ecuación de regresión lineal deber ser lo mas cercana los posible a la condición  $x = y$ , por la tanto, la pendiente ( $y/x = 1$ ) como el intercepto ( $y_0 = 0$ ) de la regresión lineal deben determinarse. Al igual que el coeficiente de correlación, la condición RTFO presenta mayor precisión en la predicción ( $x/y$ : 0.9596,  $y_0$ : 0.1708).

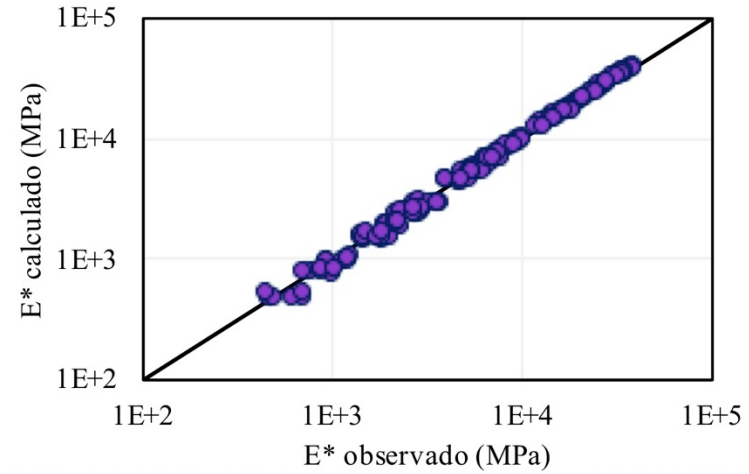
De esta manera, se podría decir que la aplicación del modelo de Witzak 1-37A utilizando la regresión A-VTS obtenida a través de los resultados de DSR en ligantes asfálticos acondicionados en RTFO, presenta una buena correlación, que podría sugerir la aplicación del mismo para las mezclas asfálticas. Sin embargo, las diferencias obtenidas sugieren la necesidad de contar con bases de datos más extensas, y de calibraciones del modelo para otros materiales.

Ilustración 4.7 – Correlaciones por condición evaluada

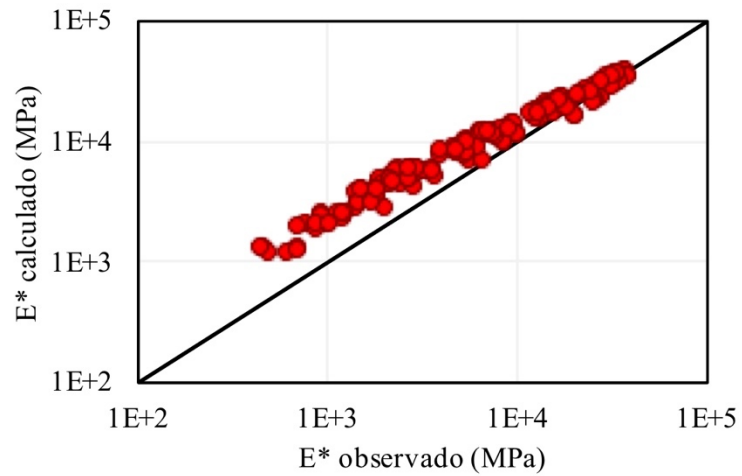
Witczak 1-37A (Condicion Original)



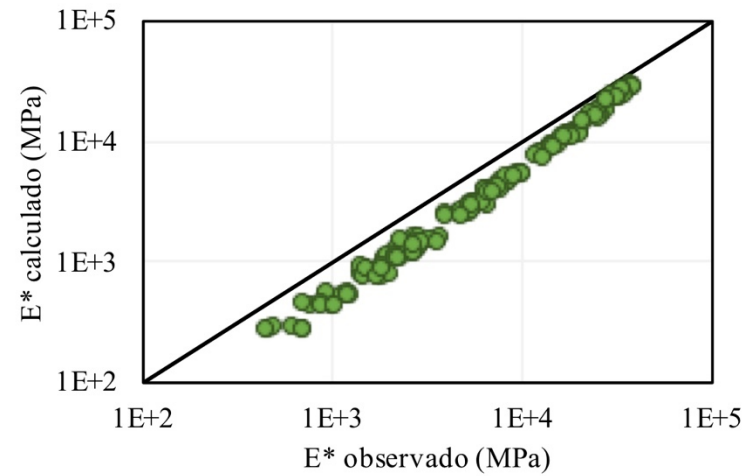
Witczak 1-37A (Condicion RTFO)



Witczak 1-37A (Condicion RTFO+PAV)

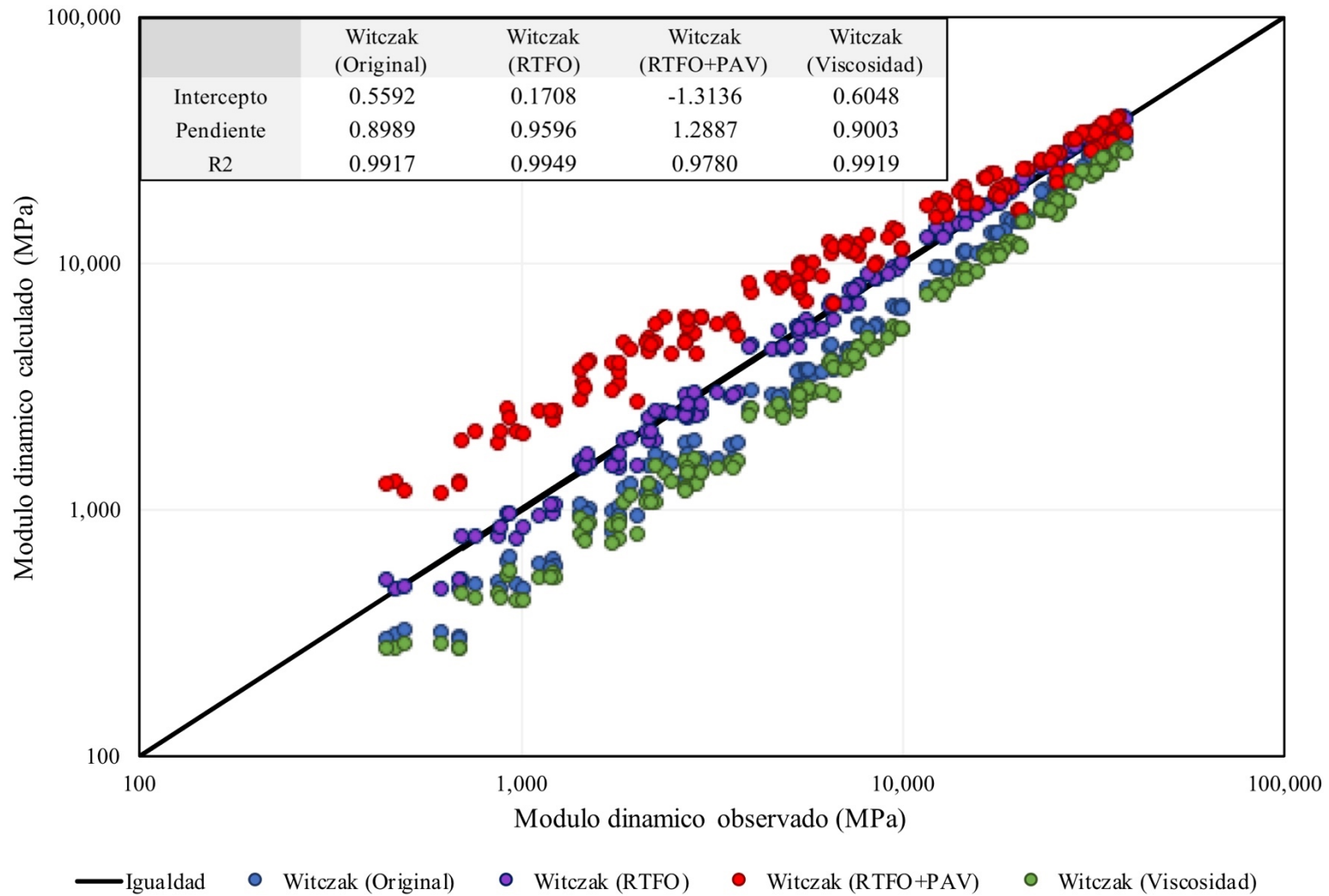


Witczak 1-37A (Condicion Viscosidad)





**Ilustración 4.8** – Correlación y precisión de predicción



Al analizar las tendencias de las curvas maestras determinadas a través del modelo Witzak 1-37A para las diversas condiciones y compararlas con la curva maestra asociada con los resultados de laboratorio, se puede observar, en general, una mayor precisión en la predicción de resultados para la condición evaluada por DSR acondicionada únicamente por RTFO. Sin embargo, el modelo predictivo Witzak 1-37A presenta deficiencias en estimar el aporte de gradaciones mas gruesas para condiciones de alta temperatura y/o bajas frecuencias de aplicación de carga, en el cual se observa que el aporte brindado por el esqueleto pétreo es significativo en el valor de módulo dinámico medido en laboratorio.

Al efectuar un análisis de sensibilidad relativa, el modelo predictivo Witzak 1-37A, presenta poca sensibilidad a los cambios granulométricos en las mezclas asfálticas, en contraposición, los parámetros mas influyentes en la determinación del resultado son la viscosidad del ligante asfáltico y la frecuencia de carga.

Se realiza el análisis de sensibilidad relativa del modelo predictivo Witzak 1-37A, en el cual se establecerá el índice de sensibilidad en función del “efecto” de cada parámetro, este “efecto” indica el impacto de influencia que una variable determinada tiene en el modelo. Este índice de sensibilidad se define en la siguiente tabla:

**Tabla 4.21 – Índice de sensibilidad**

Ancho de banda (AB)	Índice de sensibilidad (IS)
Menor a 5%	1
5% – 20%	2
20% – 50%	3
50% – 100%	4
Mayor a 100%	5

A continuación, se presenta el análisis de sensibilidad del modelo predictivo Witzak 1-37A:



---

## **CAPITULO 5**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

---

## 5.1. CONCLUSIONES

Para determinar la condición de ensayo mas apropiada para la obtención de la regresión A-VTS con el objetivo de predecir módulos dinámicos a través del modelo Witczak 1-37A, se analizaron 4 alternativas: a partir de resultados de DSR para condición original, acondicionamiento en RTFO y acondicionamiento en RTFO+PAV, y a partir de resultados obtenidos de la clasificación por viscosidad de los ligantes asfálticos. Estas condiciones fueron evaluadas para tres tipos de ligantes asfálticos y dos gradaciones granulométricas, siendo analizadas el total de 6 mezclas asfálticas para las diferentes condiciones. Los módulos dinámicos de estas mezclas asfálticas se determinaron en laboratorio a 6 frecuencias de carga (25.0, 10.0, 5.0, 1.0, 0.5 y 0.1 Hz.) y 4 temperaturas (4.4, 21.1, 37.8 y 54.4°C).

En base a los resultados de esta investigación, al comparar los módulos dinámicos pronosticados con los módulos dinámicos medidos, se demostró los siguiente:

- La regresión A-VTS obtenida a partir de los resultados de DSR en ligantes asfálticos acondicionados en RTFO fue la de mayor precisión.
- La regresión A-VTS de los resultados de DSR en ligantes asfálticos acondicionados en RTFO+PAV fue la menos precisa para las mezclas probadas, con notables dispersiones respecto a la línea de igualdad.
- Las regresiones A-VTS obtenidas de los resultados de DSR en ligantes asfálticos en condición original y la obtenida a partir de los resultados de clasificación por viscosidad, consistentemente presentaron valores sub-estimados de módulo dinámico.

Al generar las curvas maestras de los módulos dinámicos medidos y compararlas con las curvas maestras de los módulos dinámicos pronosticados a través del modelo Witczak 1-37A, se observa que ninguna condición captura con precisión la dependencia del tiempo en la escala de frecuencias

reducidas de baja magnitud. Sin embargo, esta tendencia fue mas predominante en mezclas asfálticas con gradaciones granulométricas gruesas, evidenciando que, aunque la gradación granulométrica influye importantemente en la magnitud de los módulos dinámicos medidos, en especial en condiciones de alta temperatura y frecuencias de carga bajas, este parámetro no afecta significativamente la predicción hechas por el modelo Witzak 1-37A.

Esta afirmación se confirma en el análisis de sensibilidad relativa, en el cual las variables asociadas a la gradación granulométrica de las mezclas asfálticas presentan bajo impacto en el modelo predictivo Witzak 1-37A, denotado por un índice de sensibilidad de 1.

A pesar de esta falla, la regresión A-VTS obtenida a partir de los resultados de DSR en ligantes acondicionados en RTFO rondaba la línea de igualdad en todas las mezclas asfálticas analizadas, produciendo los coeficientes de correlación mas altos (0.9949 en escala logarítmica) y el índice de linealidad mas cercano a la unidad ( $x/y$ : 0.9596,  $y_0$ : 0.1708) de las 4 condiciones analizadas. Además, la condición RTFO fue la mas precisa para la determinación de módulos de baja magnitud.

En conclusión, debido a la gran dispersión resultante de las predicciones elaboradas en la condición RTFO+PAV, y las sub-predicciones constantes presentadas por las condiciones “Original” y “Viscosidad”, la condición “RTFO” presenta la regresión A-VTS mas precisa y confiable para la aplicación del modelo predictivo Witzak 1-37A para las mezclas asfálticas evaluadas.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

Inicialmente se quiere resaltar la importancia de desarrollar para el país modelos para la caracterización de las mezclas asfálticas, en aras que el diseñador de pavimentos tenga más herramientas para poder garantizar estructuras de pavimentos resistentes y durables, con altos índices de funcionalidad para los usuarios.

Para su aplicación en proyectos de infraestructura vial, las instituciones encargadas de la red vial nacional, pueden utilizar el modelo Witzak 1-37A para predecir el valor del módulo dinámico, determinando la regresión A-VTS a partir de resultados de DSR obtenidos de ligantes asfálticos acondicionados en RTFO, en ausencia de pruebas de laboratorio. Sin embargo, debe utilizarse con precaución dadas las discrepancias encontradas a bajas frecuencias y altas temperaturas.

En proyectos de diseño, aplicando metodología ME-PDG, las estimaciones del modelo Witzak 1-37A, pueden utilizarse en diseño nivel 1 para sustituir los resultados de laboratorio para E\*. Además, si la metodología ME-PDG se utiliza en su formato actual, se recomienda realizar la calibración a nivel nacional para el modelo Witzak 1-37A, previo a la implementación del software como herramienta de diseño principal, para lo cual, se requieren mediciones iniciales en laboratorio de módulos dinámicos de las mezclas asfálticas utilizadas en los proyectos locales, para establecer tendencias de comportamiento y posterior ajuste del modelo.

Dentro de las principales limitaciones de la presente investigación, se tiene que se estudió una única fuente de material, por lo que no fue posible evaluar la influencia que podrían tener las características propias de cada fuente de agregado., por lo cual es recomendado ampliar el estudio utilizando las principales fuentes de agregados del país, para verificar su potencial influencia en la predicción de resultados del modelo Witzak 1-37A.

En términos de la regresión A-VTS, se evidencia una deficiencia inherente en su determinación, al no considerar el efecto de la frecuencia de carga en la rigidez del ligante asfáltico. Por lo cual, métodos como el modelo de Witzak 1-40D o el modelo de Hirsch, en los cuales se considera la incidencia de la frecuencia de carga en el ligante asfáltico, presente mayor precisión en la predicción de módulos dinámicos.

La aplicabilidad de este estudio en campo tiene una importancia significativa, ya que a través de la definición de  $E^*$ , como parámetro de aceptación y/o pago, se estaría garantizando el adecuado desempeño de la carpeta asfáltica, en perspectiva a las prácticas actuales, que establecen la aceptación del material a través de parámetros físicos, como contenidos de vacíos en la mezcla asfáltica, que no son indicadores del probable desempeño del material. Sin embargo, la implementación de  $E^*$  en campo presenta cierta dificultad, debido a que su medición se encuentra vinculada a técnicas deflectométricas, preferentemente a través de deflectómetro de impacto, cuya presencia en el medio nacional es prácticamente nula. Por lo cual, en una etapa temprana de implementación, se podría optar a técnicas deflectométricas que requieran menos recursos, como viga Benkelman.

Finalmente, para futuros estudios debería ampliarse esta investigación para considerar con mayor detalle la influencia que puede tener el contenido de vacíos y contenido de ligante asfáltico en la mezcla asfáltica para el modelo evaluado, de manera tal que pueda estudiarse el efecto en los valores del módulo dinámico y posteriormente asociarlo con el desempeño de la mezcla asfáltica.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ARA Inc., Eres Division., Part 2 Design Inputs: Chapter 2 Material Characterization. Guide For Mechanistic-Empirical Pavement Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Final Document, NCHRP 1-37A, NCHRP 1-37A, 2004.
- [2] Asphalt Institute, MS-26: The Asphalt Binder Handbook, 1st Ed., The Asphalt Institute, 2011.
- [3] Asphalt Institute, MS-25: Asphalt Binder Testing, Technician's Manual for Specification Testing of Asphalt Binders, 3th Ed., The Asphalt Institute, 2012.
- [4] F.A. Naranjo Salazar & J.A. Rueda Zambrano, Implementacion de un ensayo para medir el modulo de rigidez complejo en mezclas asfálticas, Universidad Industrial de Santander, 2011.
- [5] Y. H. Huang, Pavement Analysis and Design, 1st Ed., Prentice Hall, 1993.
- [6] A.M. Moreno & J.B. Soares, «El módulo dinámico de la mezcla bituminosa: importancia, evaluación y estimación,» *ASFALTO*, vol. V, nº 16, 2015.
- [7] R.D. Barksdale, «Compressive Stress Pulse Times in Flexible Pavements for Use in Dynamic Testing.,» *Highway Research Record 345, HRB, National Research Council*, pp. 33-44, 1971.
- [8] S.A. Cross & Y. Jakatimath, Determination of Dynamic Modulus Master Curves for Oklahoma HMA Mixtures, Oklahoma Department of Transportation, 2007.
- [9] AASHTO T342, Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA), AASHTO, 2011.

- [10] F. Bonnaure, G. Gest, A. Gravois & P. Uge., «A New Method of Predicting the Stiffness of Asphalt Paving Mixtures,» *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 46, pp. 64-104, 1977.
- [11] AASHTO M323, Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design, AASHTO, 2017.
- [12] Asphalt Institute, MS-2: Asphalt Mix Design Methods, 7th Ed., The Asphalt Institute, 2014.
- [13] ASTM D3381, Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Binder for Use in Pavement Construction, ASTM International, 2018.
- [14] AASHTO M320, Performance-Graded Asphalt Binder, AASHTO, 2016.
- [15] AASHTO R35, Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Asphalt Mixtures, AASHTO, 2017.
- [16] AASHTO R62, Standard Practice for Developing Dynamic Modulus Master Curves for Asphalt Mixtures, AASHTO, 2017.
- [17] Asphalt Institute, MS-4: The Asphalt Handbook, 7th Ed., The Asphalt Institute, 2007.
- [18] Asphalt Institute, MS-1: Thickness Design, Asphalt Pavements for Highways and Streets., The Asphalt Institute, 2008.
- [19] D. Andrei, M.W. Witczak & W. Mirza, Appendix CC-4: Development of a Revised Predictive Model for the Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures. Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Final Document, NCHRP 1-37A, 1999.
- [20] Bari, J. and M.W. Witczak, «Development of a New Revised Version of the Witczak E\* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures.» *Journal of the Association of Asphalt*

*Paving Technologists from the Proceedings of the Technical Sessions*, vol. 77, pp. 381-423, 2006.

- [21] S.F. Brown, «Determination of Young's Modulus for Bituminous Materials in Pavement Design,» *Highway Research Record 431, HRB, National Research Council*, pp. 38-49, 1973.
- [22] G.W. Flinstch, A. Loulizi, S.D. Diefenderfer, K.A. Galal & B.K. Diefenderfer., Asphalt Materials Characterization in Support of Implementation of the Proposed Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide., Virginia Department of Transportation, 2007.
- [23] L.N. Mohammad, S. Saadeh, S. Obulareddy, and S. Cooper., «Characterization of Louisiana Asphalt Mixtures Using Simple Performance Tests,» *Proceedings of the 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, TRB*, 2007.
- [24] AASHTO T315, Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), AASHTO, 2019.
- [25] ASTM D4402 / D4402M, Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer, ASTM International, 2015.
- [26] H. Ceylan, K. Gopalakrishnan & S. Kim, Advanced approaches to hot-mix asphalt dynamic modulus prediction, Iowa State University, 2008.
- [27] F. Elizondo, A. Ulloa & G. Badilla, Prediccion de modulos resilientes en mezclas asfálticas mediante el modelo de Witczak, LANAMME-UCR, 2007.

---

**ANEXO A**

**RESULTADOS DE MODULO DINAMICO**

---

**Tabla A.1** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC A-75 – EP1

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	37,790.1	35,676.6	31,897.4	26,230.9	23,930.1	19,281.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1150	-0.2670	-0.1592	-0.2527	-0.3518	-0.3304
Magnitud deformación	1.9500	1.8941	1.7890	1.9754	2.3274	3.1052
Magnitud esfuerzo(kPa)	67.8405	58.1031	49.9085	41.9390	44.0569	44.3485
Error deformación	1.0001	0.9336	0.9934	0.8300	0.6046	0.5060
C.U. deformación	0.6685	0.8358	0.8912	0.8426	0.8050	0.7787
C.U. fase	1.7119	0.2175	0.0079	0.0058	0.1994	0.0342
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	17,213.2	14,678.2	12,414.7	9,810.4	7,596.8	5,611.5
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.2550	-0.3367	-0.4211	-0.4679	-0.4408	-0.4713
Magnitud deformación	4.6264	4.9775	5.2936	6.1413	7.8695	12.2808
Magnitud esfuerzo(kPa)	65.7555	58.1281	49.8378	41.8248	44.0446	44.3524
Error deformación	0.4010	0.3562	0.3175	0.2958	0.2400	0.2032
C.U. deformación	0.8005	0.8923	0.8624	0.8807	0.8744	0.8333
C.U. fase	-0.8232	0.0013	0.3422	0.1735	0.0752	0.1032
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	-	-	-	-	-	-
Angulo de fase (Arc-Tg)	-	-	-	-	-	-
Magnitud deformación	-	-	-	-	-	-
Magnitud esfuerzo(kPa)	-	-	-	-	-	-
Error deformación	-	-	-	-	-	-
C.U. deformación	-	-	-	-	-	-
C.U. fase	-	-	-	-	-	-
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	2,363.7	1,836.9	1,547.2	946.5	774.4	475.3
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.4076	-0.4127	-0.4158	-0.4053	-0.4008	-0.3609
Magnitud deformación	15.5468	19.7299	21.1881	27.1418	34.6393	50.6605
Magnitud esfuerzo(kPa)	66.2870	57.9442	49.7320	41.9736	44.1444	44.3434
Error deformación	0.1197	0.1052	0.0966	0.0840	0.0914	0.1230
C.U. deformación	0.7051	0.7227	0.7053	0.6419	0.5948	0.5371
C.U. fase	-0.0960	0.1104	0.0845	0.0850	0.0705	0.0435
<b>MAC A-75 (EP1)</b>	%Gmm: 95.6%		h: 151 mm.		Φ: 98 mm.	

**Tabla A.2** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC A-75 – EP2

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	37,308.1	35,351.6	30,578.4	27,478.9	22,691.1	18,532.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0181	-0.1146	-0.0365	-0.1455	-0.1782	-0.1989
Magnitud deformación	2.5269	2.2208	2.1281	2.0159	2.1804	2.4018
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.8848	58.7865	50.0952	42.2315	44.2032	44.4208
Error deformación	0.6261	0.5046	0.5388	0.5534	0.5343	0.4275
C.U. deformación	0.3230	0.3064	0.2096	0.2584	0.3124	0.2363
C.U. fase	0.1828	0.0737	0.0174	0.1452	0.0090	0.0695
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	18,331.2	15,078.2	13,134.7	10,003.4	7,571.8	5,302.5
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1618	-0.2017	-0.2284	-0.2959	-0.3088	-0.3495
Magnitud deformación	4.0379	3.7593	3.4336	3.7271	4.3643	5.8242
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.1804	58.5440	49.9734	42.0537	44.1832	44.3680
Error deformación	0.3132	0.2871	0.3167	0.2948	0.2298	0.1926
C.U. deformación	0.1211	0.1006	0.1195	0.1121	0.0495	0.0317
C.U. fase	0.5035	0.1255	0.0336	0.0896	0.1241	0.1045
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	6,737.1	5,494.3	4,535.9	2,808.5	2,225.5	1,443.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.2772	-0.3287	-0.3508	-0.3882	-0.4146	-0.4200
Magnitud deformación	8.6419	8.9879	8.9976	11.0167	13.6754	20.6889
Magnitud esfuerzo(kPa)	66.8635	58.3700	49.8094	41.9566	44.1098	44.3529
Error deformación	0.1436	0.1359	0.1410	0.1181	0.1267	0.1460
C.U. deformación	0.0231	0.0123	0.0019	0.0166	0.0236	0.0364
C.U. fase	-0.0213	0.0083	0.0484	0.0314	0.0067	0.0022
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	2,364.7	1,935.9	1,494.2	918.5	745.4	478.3
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3512	-0.3720	-0.3795	-0.3880	-0.3815	-0.3552
Magnitud deformación	18.1521	19.7434	20.1874	25.3916	31.4360	44.9389
Magnitud esfuerzo(kPa)	66.7532	58.2467	49.8138	41.9446	44.0820	44.3149
Error deformación	0.0756	0.0840	0.0846	0.0755	0.0783	0.1185
C.U. deformación	0.0348	0.0560	0.0449	0.0217	0.0121	0.0029
C.U. fase	-0.1219	0.0638	0.0467	0.0407	0.0388	0.0277
<b>MAC A-75 (EP2)</b>	<b>%Gmm: 95.4%</b>		<b>h: 152 mm.</b>		<b>Φ: 98 mm.</b>	

**Tabla A.3** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC A-75 – EP3

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	36,051.1	36,648.6	31,219.4	25,416.9	25,327.1	18,518.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0635	-0.0777	-0.1291	-0.1608	-0.1645	-0.3138
Magnitud deformación	1.3352	1.1521	1.1039	0.9728	1.1604	1.2134
Magnitud esfuerzo(kPa)	69.1644	58.9987	50.2879	42.6107	44.6920	44.4848
Error deformación	1.2113	1.0794	1.0824	1.2591	1.0208	0.8867
C.U. deformación	0.3820	0.4252	0.4084	0.4335	0.3703	0.1579
C.U. fase	0.1859	0.0180	0.1718	0.0801	0.0092	0.1243
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	16,739.2	14,159.2	12,620.7	9,192.4	7,980.8	5,341.5
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1917	-0.1798	-0.1628	-0.2688	-0.1203	-0.3100
Magnitud deformación	2.1417	1.9715	1.7723	2.0158	2.4234	3.2121
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.0840	58.2557	50.0373	42.3203	44.3750	44.5103
Error deformación	0.8500	0.7757	0.8875	0.6201	0.5042	0.4806
C.U. deformación	0.7215	0.7434	0.8528	0.6511	0.6485	0.7491
C.U. fase	-3.8807	0.0663	0.0557	0.1207	0.1230	0.0286
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	6,334.1	5,354.3	4,607.9	2,735.5	2,191.5	1,440.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3051	-0.3459	-0.3445	-0.4260	-0.4625	-0.4559
Magnitud deformación	5.1795	5.4183	5.4324	6.8295	8.8513	13.5805
Magnitud esfuerzo(kPa)	66.4092	57.9536	49.8566	41.9631	44.1500	44.3779
Error deformación	0.3286	0.2709	0.2876	0.2244	0.1661	0.1399
C.U. deformación	0.7655	0.7891	0.7885	0.7703	0.7392	0.7254
C.U. fase	-0.0663	0.1296	0.0567	0.1648	0.1797	0.1204
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	2,494.7	1,841.9	1,480.2	982.5	784.4	462.3
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3994	-0.4070	-0.3978	-0.3711	-0.3602	-0.3244
Magnitud deformación	21.7949	24.9811	25.9015	32.5918	40.1495	55.7147
Magnitud esfuerzo(kPa)	65.7938	57.7398	49.6994	42.1318	44.2323	44.3581
Error deformación	0.0738	0.0797	0.0756	0.0611	0.0521	0.0751
C.U. deformación	0.5113	0.5014	0.4846	0.4847	0.4653	0.4471
C.U. fase	-0.0266	0.0270	0.0159	0.0246	0.0319	0.0303
<b>MAC A-75 (EP3)</b>	<b>%Gmm: 96.2%</b>		<b>h: 151 mm.</b>		<b>Φ: 98 mm.</b>	

**Tabla A.4** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC A-75 – EP4

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	37,847.1	34,241.6	30,830.4	25,646.9	23,239.1	20,104.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0279	-0.0795	-0.1229	-0.1825	-0.1545	-0.1621
Magnitud deformación	2.5325	2.3260	1.9889	1.8922	2.1184	2.4411
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.5532	58.7602	50.1072	42.3521	44.3166	44.4251
Error deformación	0.6667	0.4872	0.5871	0.6065	0.5617	0.4548
C.U. deformación	0.3596	0.2456	0.2575	0.2106	0.2696	0.3202
C.U. fase	0.2073	0.0223	0.1373	0.0388	0.1081	0.0762
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	17,168.2	14,522.2	11,890.7	9,301.4	8,009.8	5,446.5
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1708	-0.2112	-0.2627	-0.3173	-0.3014	-0.3171
Magnitud deformación	3.8598	3.6210	3.4181	3.6887	4.3345	5.7765
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.2144	58.3514	49.8731	42.0600	44.1366	44.3584
Error deformación	0.3394	0.3270	0.3237	0.2905	0.2622	0.1777
C.U. deformación	0.1762	0.1565	0.2042	0.1104	0.0967	0.0539
C.U. fase	0.4145	0.0600	0.0640	0.1027	0.0754	0.0527
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	6,346.1	5,667.3	4,757.9	2,678.5	2,177.5	1,499.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.2788	-0.3197	-0.3528	-0.3859	-0.3917	-0.3975
Magnitud deformación	9.1540	9.5597	9.5403	11.6993	14.6133	21.6383
Magnitud esfuerzo(kPa)	66.1781	57.9424	49.7025	42.1793	44.3525	44.3847
Error deformación	0.1350	0.1225	0.1301	0.1029	0.0875	0.0970
C.U. deformación	0.0685	0.0255	0.0040	0.0328	0.0278	0.0344
C.U. fase	-0.2002	0.0406	0.0344	0.0124	0.0196	0.0061
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	2,441.7	1,917.9	1,639.2	890.5	779.4	479.3
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3481	-0.3698	-0.3709	-0.3584	-0.3508	-0.3210
Magnitud deformación	19.9287	21.8385	22.3758	28.3748	34.9005	48.6959
Magnitud esfuerzo(kPa)	66.2811	57.8483	49.6166	42.0186	44.1669	44.3205
Error deformación	0.0664	0.0771	0.0811	0.0536	0.0517	0.0787
C.U. deformación	0.0094	0.0301	0.0316	0.0183	0.0120	0.0169
C.U. fase	-0.0817	0.0811	0.0491	0.0415	0.0374	0.0241
<b>MAC A-75 (EP4)</b>	<b>%Gmm: 96.5%</b>		<b>h: 152 mm.</b>		<b>Φ: 98 mm.</b>	



**Tabla A.5** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC A-100 – EP1

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	37,163.3	33,338.9	30,980.6	25,938.1	23,739.3	19,241.2
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0210	-0.0708	-0.0594	-0.1414	-0.2021	-0.1954
Magnitud deformación	1.6291	1.4400	1.2509	1.2811	1.4852	1.5182
Magnitud esfuerzo(kPa)	67.0589	58.0898	50.0099	42.1974	44.1701	44.3929
Error deformación	0.9707	0.8286	0.8720	0.8709	0.7053	0.6937
C.U. deformación	0.0879	0.0334	0.0039	0.0365	0.1337	0.0614
C.U. fase	0.1008	0.0673	0.0933	0.0170	0.0807	0.0969
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	17,580.0	14,937.2	12,924.0	9,725.2	7,985.2	5,314.1
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.2310	-0.2102	-0.2156	-0.3453	-0.3792	-0.3960
Magnitud deformación	2.7275	2.6360	2.6422	2.8451	3.3865	4.7623
Magnitud esfuerzo(kPa)	67.0430	57.8258	50.0019	41.8952	43.9742	44.3566
Error deformación	0.4795	0.4278	0.4140	0.3728	0.3088	0.2695
C.U. deformación	0.0131	0.0039	0.0815	0.0570	0.1238	0.1368
C.U. fase	-0.2879	0.0719	0.0907	0.1018	0.0831	0.0992
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	7,075.9	5,805.3	4,851.9	3,626.8	2,716.2	1,810.7
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3473	-0.4025	-0.4315	-0.4927	-0.5113	-0.5175
Magnitud deformación	5.7622	6.5942	6.7929	9.0476	11.8620	19.2027
Magnitud esfuerzo(kPa)	65.5508	58.0633	49.9409	41.8612	44.0816	44.3713
Error deformación	0.2109	0.1743	0.1801	0.1839	0.1871	0.2313
C.U. deformación	0.0471	0.0088	0.0381	0.0891	0.0845	0.0976
C.U. fase	-0.2516	0.0971	0.0234	0.1089	0.0856	0.0435
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	2,998.4	2,270.1	1,811.2	1,154.6	981.8	701.0
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.4383	-0.4442	-0.4331	-0.3954	-0.3748	-0.3182
Magnitud deformación	20.5091	25.4142	27.5112	36.2594	44.8892	63.3599
Magnitud esfuerzo(kPa)	65.5957	57.6922	49.8275	41.8669	44.0712	44.4127
Error deformación	0.0850	0.0778	0.0804	0.0731	0.0816	0.1161
C.U. deformación	0.0331	0.0876	0.0998	0.1375	0.1521	0.1959
C.U. fase	-0.3105	0.4250	0.2127	0.1262	0.0997	0.0418
<b>MAC A-100 (EP1)</b>	<b>%Gmm: 95.2%</b>		<b>h: 152 mm.</b>		<b>Φ: 98 mm.</b>	

**Tabla A.6** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC A-100 – EP2

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	39,415.3	33,378.9	32,379.6	24,438.1	25,061.3	18,500.2
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0410	-0.0944	-0.1178	-0.1464	-0.0047	-0.1757
Magnitud deformación	4.2668	3.8492	3.4180	3.2036	3.7798	4.4337
Magnitud esfuerzo(kPa)	69.2403	58.9792	50.0795	42.3590	44.3562	44.4114
Error deformación	0.4116	0.3306	0.3732	0.3862	0.3170	0.2606
C.U. deformación	0.3041	0.3038	0.3347	0.3243	0.4014	0.3118
C.U. fase	0.1641	0.0385	0.0635	0.0223	0.1094	0.0260
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	18,382.0	14,686.2	13,564.0	9,811.2	7,512.2	5,383.1
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1913	-0.2211	-0.2312	-0.3235	-0.3288	-0.3883
Magnitud deformación	8.0372	7.6015	7.2105	8.0957	9.6051	13.1918
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.2825	58.3424	49.8855	41.9930	44.1110	44.3200
Error deformación	0.1621	0.1565	0.1588	0.1532	0.1388	0.1602
C.U. deformación	0.3107	0.2595	0.2610	0.2448	0.2399	0.2063
C.U. fase	-18.4020	0.0101	0.0276	0.0019	0.0071	0.0169
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	7,338.9	5,921.3	5,120.9	3,565.8	2,840.2	1,807.7
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3085	-0.3503	-0.3688	-0.4169	-0.4370	-0.4579
Magnitud deformación	16.3257	16.6391	16.4755	20.1264	24.8614	35.5790
Magnitud esfuerzo(kPa)	66.5963	58.2965	49.8821	41.8907	44.0841	44.3000
Error deformación	0.0871	0.1006	0.1060	0.1384	0.1681	0.2478
C.U. deformación	0.0199	0.0228	0.0055	0.0031	0.0318	0.0155
C.U. fase	-0.0724	0.0480	0.0622	0.0766	0.0699	0.0539
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	2,888.4	2,366.1	1,696.2	1,095.6	1,018.8	708.0
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3537	-0.3720	-0.3767	-0.3686	-0.3659	-0.3333
Magnitud deformación	31.5327	34.1002	34.6276	42.9375	52.5178	71.6740
Magnitud esfuerzo(kPa)	66.5142	58.0017	49.7984	41.9509	44.1198	44.2803
Error deformación	0.0774	0.0809	0.0826	0.0878	0.1052	0.1554
C.U. deformación	0.0827	0.1624	0.1836	0.1570	0.1201	0.1124
C.U. fase	-0.2787	0.1280	0.0875	0.0776	0.0588	0.0340
<b>MAC A-100 (EP2)</b>	<b>%Gmm: 95.7%</b>		<b>h: 153 mm.</b>		<b>Φ: 98 mm.</b>	

**Tabla A.7** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC A-100 – EP3

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	36,414.3	32,357.9	30,935.6	24,267.1	22,547.3	19,865.2
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0210	-0.0134	-0.1597	-0.1905	-0.1424	-0.1196
Magnitud deformación	1.6061	1.5259	1.3097	1.2592	1.4698	1.7070
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.4599	59.0066	50.2321	42.4144	44.6185	44.6108
Error deformación	0.8948	0.7574	0.9010	0.8465	0.7528	0.6216
C.U. deformación	0.0776	0.1347	0.2472	0.0239	0.0196	0.0333
C.U. fase	0.6189	0.0105	0.1276	0.0026	0.0208	0.0671
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	18,229.0	14,828.2	13,552.0	9,836.2	7,984.2	5,434.1
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1462	-0.2478	-0.3088	-0.3285	-0.3499	-0.3963
Magnitud deformación	2.6408	2.5435	2.4753	2.8042	3.5194	4.7337
Magnitud esfuerzo(kPa)	67.4360	58.2387	50.1747	42.2053	44.4041	44.4644
Error deformación	0.4404	0.4315	0.4195	0.3955	0.2590	0.2521
C.U. deformación	0.0859	0.0651	0.0429	0.1689	0.1398	0.1528
C.U. fase	11.9662	0.0874	0.1260	0.1234	0.0560	0.0391
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	7,211.9	5,691.3	4,627.9	3,804.8	2,811.2	1,874.7
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3266	-0.3818	-0.4161	-0.4575	-0.4757	-0.4679
Magnitud deformación	6.3233	6.9285	7.4057	9.7227	12.6255	20.1298
Magnitud esfuerzo(kPa)	65.2144	57.7450	49.8942	42.0454	44.3408	44.4146
Error deformación	0.1899	0.1655	0.1588	0.1271	0.1047	0.1366
C.U. deformación	0.1867	0.1235	0.0916	0.1158	0.0893	0.1249
C.U. fase	-0.1375	0.0923	0.0436	0.0912	0.0529	0.0363
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	2,983.4	2,329.1	1,736.2	1,082.6	985.8	723.0
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.4135	-0.4228	-0.4123	-0.3601	-0.3400	-0.2872
Magnitud deformación	24.3722	29.4600	30.7797	40.2599	49.3322	67.3143
Magnitud esfuerzo(kPa)	64.7743	57.4926	49.7020	42.0318	44.3084	44.4026
Error deformación	0.0666	0.0661	0.0712	0.0564	0.0557	0.0884
C.U. deformación	0.1634	0.1528	0.1614	0.1781	0.1955	0.2182
C.U. fase	-0.2269	0.2987	0.2197	0.0648	0.0477	0.0149
<b>MAC A-100 (EP3)</b>	<b>%Gmm: 96.6%</b>		<b>h: 152 mm.</b>		<b>Φ: 98 mm.</b>	

**Tabla A.8** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC A-100 – EP4

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	35,096.3	32,978.9	30,996.6	26,754.1	22,510.3	20,245.2
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0323	-0.1198	-0.1246	-0.1432	-0.1651	-0.1901
Magnitud deformación	4.1853	3.7877	3.3817	3.3176	3.8534	4.5781
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.6976	58.9465	50.2156	42.5499	44.6338	44.6086
Error deformación	0.3815	0.3407	0.3503	0.3491	0.3055	0.2412
C.U. deformación	0.3572	0.3020	0.3392	0.2913	0.2935	0.3207
C.U. fase	0.0211	0.0434	0.0219	0.0200	0.0256	0.0024
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	16,607.0	14,341.2	12,338.0	9,747.2	7,538.2	5,406.1
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1685	-0.2268	-0.2295	-0.3021	-0.3236	-0.3572
Magnitud deformación	7.6535	7.3268	7.0078	7.9152	9.5643	12.9936
Magnitud esfuerzo(kPa)	67.8470	58.2338	49.9307	41.9955	44.0750	44.3199
Error deformación	0.1773	0.1685	0.1758	0.1503	0.1267	0.1250
C.U. deformación	0.2455	0.2338	0.2133	0.2279	0.2057	0.1970
C.U. fase	0.4508	0.0105	0.0527	0.0063	0.0031	0.0025
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	7,209.9	6,059.3	5,024.9	3,427.8	2,726.2	1,875.7
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.2934	-0.3334	-0.3509	-0.3838	-0.4026	-0.4190
Magnitud deformación	15.7183	16.0859	16.0043	20.0713	24.8958	35.9633
Magnitud esfuerzo(kPa)	66.9812	58.0076	49.8809	41.9987	44.1969	44.2348
Error deformación	0.0920	0.0928	0.0963	0.0817	0.0876	0.1479
C.U. deformación	0.1158	0.0774	0.0573	0.0422	0.0283	0.0116
C.U. fase	-0.1986	0.0445	0.0169	0.0463	0.0394	0.0403
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	3,089.4	2,161.1	1,833.2	1,214.6	979.8	665.0
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3520	-0.3645	-0.3620	-0.3388	-0.3100	-0.2514
Magnitud deformación	33.0724	36.4037	37.2895	46.2397	47.4378	53.4753
Magnitud esfuerzo(kPa)	66.2008	57.7101	49.6912	42.0622	44.2532	44.3445
Error deformación	0.0648	0.0750	0.0808	0.0704	0.1458	0.2578
C.U. deformación	0.1202	0.1181	0.1222	0.1140	0.4022	0.7499
C.U. fase	-0.2429	0.0974	0.0597	0.0323	0.0103	0.0355
<b>MAC A-100 (EP4)</b>	<b>%Gmm: 96.2%</b>		<b>h: 153 mm.</b>		<b>Φ: 98 mm.</b>	

**Tabla A.9** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC B-75 – EP1

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	37,913.7	35,274.2	32,784.4	28,173.0	25,842.1	20,719.5
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0254	-0.0773	-0.0729	-0.1565	-0.1452	-0.2091
Magnitud deformación	3.4322	3.0430	2.8111	2.6210	2.9886	3.4919
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.3488	58.6509	49.9929	42.3897	44.3578	44.4158
Error deformación	0.4858	0.4095	0.3959	0.4192	0.3705	0.2967
C.U. deformación	0.1164	0.1039	0.1291	0.0659	0.1004	0.1684
C.U. fase	0.2663	0.0171	0.0103	0.0889	0.0301	0.0392
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	18,450.8	15,182.6	13,479.8	9,849.8	8,803.2	5,822.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1651	-0.2267	-0.2715	-0.3529	-0.4021	-0.4697
Magnitud deformación	5.9498	5.7453	5.2598	6.1418	7.5992	11.6045
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.1295	58.5024	49.8617	42.0700	44.0994	44.3618
Error deformación	0.2198	0.2079	0.2105	0.2157	0.1984	0.2235
C.U. deformación	0.1682	0.1243	0.1124	0.0963	0.1088	0.0938
C.U. fase	0.2621	0.0023	0.0614	0.0521	0.0264	0.0253
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	6,566.8	5,732.7	4,006.4	2,864.6	2,504.4	1,450.1
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3704	-0.4256	-0.4757	-0.5003	-0.5020	-0.4618
Magnitud deformación	14.6022	15.6155	16.5658	22.4902	29.3200	46.6444
Magnitud esfuerzo(kPa)	66.6854	58.2877	49.8035	41.9347	44.1077	44.3186
Error deformación	0.1123	0.1106	0.1005	0.1316	0.1548	0.1872
C.U. deformación	0.2503	0.2247	0.1640	0.2126	0.2065	0.2080
C.U. fase	-0.0891	0.0503	0.0090	0.0033	0.0081	0.0159
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	2,352.2	1,914.5	1,464.2	944.3	714.2	511.9
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.4400	-0.4588	-0.4503	-0.3976	-0.3704	-0.2990
Magnitud deformación	28.1815	33.7883	36.4759	49.6197	61.7408	86.6178
Magnitud esfuerzo(kPa)	66.2876	57.9307	49.7617	41.8921	44.0971	44.3415
Error deformación	0.0662	0.0696	0.0671	0.0573	0.0663	0.0954
C.U. deformación	0.2643	0.2483	0.2467	0.2488	0.2485	0.2451
C.U. fase	-0.1158	0.0647	0.0213	0.0019	0.0044	0.0000
<b>MAC B-75 (EP1)</b>	%Gmm: 95.3%		h: 151 mm.		Φ: 98 mm.	

**Tabla A.10** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC B-75 – EP2

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	37,519.7	35,802.2	33,447.4	29,406.0	26,630.1	21,575.5
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0262	-0.0491	-0.1273	-0.1747	-0.1618	-0.2072
Magnitud deformación	3.9447	3.3791	3.1359	3.1148	3.7187	3.9669
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.3495	58.6090	50.0066	42.2202	44.1750	44.4026
Error deformación	0.3874	0.3583	0.3486	0.3396	0.2848	0.2782
C.U. deformación	0.2695	0.2667	0.2854	0.2464	0.2530	0.2343
C.U. fase	0.0328	0.0518	0.0534	0.0156	0.2169	0.0060
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	18,402.8	14,459.6	12,853.8	10,314.8	8,712.2	5,627.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1508	-0.2250	-0.2740	-0.3430	-0.4085	-0.4714
Magnitud deformación	6.6350	6.2991	5.9628	6.7894	8.0740	12.0679
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.1025	58.2619	49.8046	41.9927	44.0368	44.2205
Error deformación	0.1920	0.1953	0.1813	0.2094	0.2097	0.2559
C.U. deformación	0.2231	0.2176	0.2296	0.2256	0.2421	0.2085
C.U. fase	0.5712	0.0058	0.0080	0.0436	0.0233	0.0012
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	6,646.8	5,764.7	4,071.4	2,724.6	2,347.4	1,377.1
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3401	-0.4077	-0.4414	-0.5029	-0.5163	-0.4866
Magnitud deformación	14.8556	16.2555	16.5623	22.5108	29.4333	48.2355
Magnitud esfuerzo(kPa)	65.3669	58.0964	49.7921	41.8465	44.0205	44.3185
Error deformación	0.1084	0.1063	0.1118	0.1529	0.1766	0.1996
C.U. deformación	0.2723	0.2388	0.2483	0.2415	0.2225	0.1657
C.U. fase	-0.0571	0.0223	0.0161	0.0235	0.0306	0.0184
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	2,358.2	2,022.5	1,393.2	981.3	746.2	487.9
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.4278	-0.4684	-0.4665	-0.4227	-0.4016	-0.3219
Magnitud deformación	29.0749	35.4064	38.5590	53.6175	68.6326	101.1902
Magnitud esfuerzo(kPa)	65.5882	57.9735	49.7776	41.7839	44.0262	44.3594
Error deformación	0.0616	0.0691	0.0671	0.0600	0.0661	0.1087
C.U. deformación	0.0958	0.0258	0.0214	0.0657	0.0872	0.1260
C.U. fase	-0.0666	0.1006	0.0576	0.0263	0.0264	0.0012
<b>MAC B-75 (EP2)</b>	%Gmm: 95.6%		h: 152 mm.		Φ: 98 mm.	

**Tabla A.11** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC B-75 – EP3

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	38,966.7	33,020.2	30,830.4	26,855.0	25,928.1	19,397.5
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0615	-0.0494	-0.0985	-0.1438	-0.1425	-0.2468
Magnitud deformación	3.5822	3.1377	2.7824	2.6012	2.9276	3.5195
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.5477	58.7428	50.0748	42.2578	44.2258	44.3834
Error deformación	0.4167	0.3581	0.3695	0.4195	0.3383	0.3020
C.U. deformación	0.1038	0.0920	0.0911	0.0044	0.0537	0.1040
C.U. fase	0.2239	0.0111	0.0285	0.0483	0.0431	0.0351
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	19,405.8	15,062.6	12,836.8	9,886.8	9,045.2	5,611.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1585	-0.2264	-0.2698	-0.3490	-0.3754	-0.4521
Magnitud deformación	6.1325	5.7789	5.5581	6.4082	7.8325	11.8113
Magnitud esfuerzo(kPa)	67.9688	58.3776	49.9667	42.0918	44.1302	44.3411
Error deformación	0.2079	0.1954	0.2011	0.1685	0.1564	0.1683
C.U. deformación	0.1183	0.0637	0.0760	0.0763	0.0914	0.0858
C.U. fase	0.1903	0.0199	0.0850	0.0277	0.0060	0.0077
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	6,143.8	5,839.7	4,183.4	2,928.6	2,589.4	1,442.1
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3725	-0.4220	-0.4587	-0.4749	-0.4732	-0.4259
Magnitud deformación	13.7721	15.4689	16.2857	23.2903	30.2647	48.1216
Magnitud esfuerzo(kPa)	66.4779	58.0644	49.7462	42.1028	44.2716	44.4189
Error deformación	0.0890	0.0932	0.0942	0.0689	0.0669	0.1036
C.U. deformación	0.2529	0.2535	0.2613	0.2639	0.2518	0.2501
C.U. fase	-0.1021	0.0728	0.0487	0.0234	0.0138	0.0046
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	2,206.2	1,954.5	1,497.2	931.3	674.2	518.9
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.4468	-0.4603	-0.4406	-0.3779	-0.3471	-0.2747
Magnitud deformación	31.5584	37.3675	40.2551	54.8070	67.5694	91.4817
Magnitud esfuerzo(kPa)	66.8772	57.8955	49.7588	42.2884	44.4095	44.5249
Error deformación	0.0579	0.0659	0.0639	0.0470	0.0454	0.0798
C.U. deformación	0.2773	0.2652	0.2713	0.2749	0.2746	0.2601
C.U. fase	-0.0392	0.0472	0.0262	0.0091	0.0050	0.0043
<b>MAC B-75 (EP3)</b>	%Gmm: 96.1%		h: 151 mm.		Φ: 98 mm.	

**Tabla A.12** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC B-75 – EP4

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	39,868.7	33,584.2	33,682.4	26,564.0	25,646.1	19,591.5
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0287	-0.1069	-0.1202	-0.1555	-0.1668	-0.2220
Magnitud deformación	3.8689	3.5604	3.2046	2.9851	3.3310	3.9833
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.0842	58.4785	50.0470	42.2012	44.1920	44.3715
Error deformación	0.3770	0.3254	0.3430	0.3654	0.3325	0.2711
C.U. deformación	0.3025	0.2787	0.3065	0.2872	0.2801	0.3045
C.U. fase	0.0583	0.0587	0.0556	0.0446	0.0203	0.0182
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	18,670.8	14,961.6	14,011.8	10,391.8	8,372.2	5,561.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1444	-0.2153	-0.2488	-0.3163	-0.3653	-0.4424
Magnitud deformación	6.6297	6.3242	5.9867	6.9201	8.2523	12.2885
Magnitud esfuerzo(kPa)	67.6562	58.3558	49.9862	42.3002	44.4108	44.5188
Error deformación	0.1868	0.1875	0.1901	0.1707	0.1584	0.1879
C.U. deformación	0.2118	0.2420	0.2446	0.2249	0.1913	0.1923
C.U. fase	0.8126	0.0041	0.0392	0.0435	0.0079	0.0021
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	6,855.8	5,524.7	3,907.4	2,983.6	2,555.4	1,529.1
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3478	-0.4196	-0.4436	-0.4842	-0.4859	-0.4433
Magnitud deformación	15.1392	16.7775	17.6146	24.7056	32.4342	52.6971
Magnitud esfuerzo(kPa)	150.3908	132.5303	113.4588	95.1543	100.0870	100.8142
Error deformación	0.0973	0.0931	0.0967	0.0827	0.0819	0.1099
C.U. deformación	0.2934	0.2895	0.2889	0.2694	0.2395	0.1444
C.U. fase	-0.0325	0.0249	0.0152	0.0332	0.0430	0.0272
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	2,210.2	1,959.5	1,452.2	915.3	685.2	486.9
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.4501	-0.4714	-0.4535	-0.3923	-0.3409	-0.2646
Magnitud deformación	25.1371	23.3219	25.1514	36.4429	44.5062	62.3114
Magnitud esfuerzo(kPa)	65.3012	57.6936	49.6974	42.0431	44.2006	44.3998
Error deformación	0.1363	0.1962	0.2006	0.1654	0.1646	0.1847
C.U. deformación	0.4184	1.1012	1.1712	1.1464	1.2188	1.2618
C.U. fase	-0.0786	0.1600	0.1082	0.0481	0.0677	0.0345
<b>MAC B-75 (EP4)</b>	<b>%Gmm: 95.9%</b>		<b>h: 152 mm.</b>		<b>Φ: 98 mm.</b>	



**Tabla A.13** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC B-100 – EP1

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	39,526.5	35,095.7	31,552.0	26,394.7	25,278.6	21,135.4
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0391	-0.0759	0.1045	-0.1653	-0.0875	-0.1197
Magnitud deformación	1.4406	1.3080	1.1064	1.0616	1.2284	1.3807
Magnitud esfuerzo(kPa)	69.0626	58.9697	50.2604	42.2829	44.4089	44.4773
Error deformación	1.0463	0.8933	1.0179	0.9770	0.8769	0.7433
C.U. deformación	0.0467	0.0347	0.3276	0.0618	0.0838	0.1818
C.U. fase	1.6391	0.0896	0.1161	0.0963	0.0180	0.0707
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	18,172.3	15,922.2	12,324.1	10,020.0	8,732.2	6,670.6
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0860	-0.2042	-0.2282	-0.2723	-0.3637	-0.4131
Magnitud deformación	2.5799	2.6553	2.5866	2.7900	3.4578	5.1080
Magnitud esfuerzo(kPa)	67.5212	58.2104	49.9839	41.9053	44.0256	44.2892
Error deformación	0.4780	0.4143	0.4111	0.3760	0.3013	0.2588
C.U. deformación	0.1926	0.2402	0.3462	0.2864	0.2560	0.2953
C.U. fase	0.4935	0.0003	0.0876	0.0806	0.0747	0.0237
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	7,554.2	6,260.5	5,476.9	3,689.8	2,916.0	1,991.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3261	-0.4011	-0.4527	-0.5198	-0.5408	-0.5717
Magnitud deformación	7.2549	8.0222	8.4932	11.3593	15.1407	26.2559
Magnitud esfuerzo(kPa)	65.6872	58.2457	49.9141	41.9133	44.1498	44.4206
Error deformación	0.1810	0.1565	0.1571	0.2170	0.2481	0.3394
C.U. deformación	0.1720	0.1896	0.1851	0.2083	0.1904	0.1505
C.U. fase	-0.0328	0.0473	0.0341	0.0759	0.0391	0.0277
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	2,788.9	2,168.3	1,848.4	1,221.3	891.8	640.2
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.4179	-0.4648	-0.4776	-0.4808	-0.4743	-0.4139
Magnitud deformación	19.3574	22.5515	24.3344	34.3509	44.5541	69.3416
Magnitud esfuerzo(kPa)	65.6000	57.9191	49.8456	41.9528	44.1904	44.3921
Error deformación	0.0952	0.0874	0.0884	0.1142	0.1393	0.1829
C.U. deformación	0.1767	0.1880	0.1862	0.1716	0.1791	0.1692
C.U. fase	-0.0855	0.0896	0.0705	0.0463	0.0435	0.0274
<b>MAC B-100 (EP1)</b>	<b>%Gmm: 95.4%</b>		<b>h: 154 mm.</b>		<b>Φ: 98 mm.</b>	

**Tabla A.14** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC B-100 – EP2

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	38,802.5	35,945.7	32,599.0	25,994.7	25,485.6	19,682.4
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0485	-0.0917	-0.0661	-0.1158	-0.2066	-1.0311
Magnitud deformación	0.9883	0.5251	0.6461	0.5320	0.4931	0.7328
Magnitud esfuerzo(kPa)	66.9982	58.8867	49.8792	42.0661	44.1799	44.3936
Error deformación	1.7714	4.8153	1.8451	2.8638	3.2169	2.5894
C.U. deformación	0.3950	0.9872	0.3914	0.7463	0.7779	0.9102
C.U. fase	0.8037	0.0983	0.2383	0.2098	0.1390	3.2450
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	17,804.3	16,333.2	12,464.1	10,398.0	8,336.2	6,557.6
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0845	-0.1807	-0.3739	-0.1614	-0.2481	-0.3028
Magnitud deformación	1.1380	0.9498	1.0101	1.0896	1.1125	1.5916
Magnitud esfuerzo(kPa)	66.5925	58.4381	49.9900	41.8961	43.9689	44.3316
Error deformación	1.5283	2.3189	1.4667	1.6926	1.7638	1.0805
C.U. deformación	0.6907	0.9835	0.7521	0.8804	0.9121	0.8390
C.U. fase	0.7668	0.3613	0.7193	0.0954	0.0549	0.0133
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	7,817.2	6,488.5	5,211.9	3,928.8	2,773.0	2,101.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.2648	-0.3548	-0.4621	-0.5277	-0.5467	-0.5929
Magnitud deformación	2.4557	3.3931	3.9644	5.2602	7.6839	15.8338
Magnitud esfuerzo(kPa)	66.0344	58.2364	49.9664	41.7519	43.9737	44.3497
Error deformación	0.5038	0.3677	0.2989	0.2926	0.2890	0.3297
C.U. deformación	0.2233	0.3629	0.3289	0.2773	0.2898	0.2940
C.U. fase	-0.2551	0.0904	0.2068	0.2062	0.1474	0.0959
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	2,874.9	2,192.3	1,942.4	1,197.3	875.8	614.2
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.4302	-0.4768	-0.4919	-0.5193	-0.5176	-0.4654
Magnitud deformación	14.8761	17.9648	19.7840	28.1084	37.0522	60.5557
Magnitud esfuerzo(kPa)	66.1543	58.1134	49.8346	41.8449	44.0344	44.3072
Error deformación	0.1245	0.1065	0.1152	0.1505	0.1819	0.2299
C.U. deformación	0.3253	0.4282	0.4546	0.4437	0.4432	0.4138
C.U. fase	-0.0005	0.0632	0.0076	0.0470	0.0425	0.0455
<b>MAC B-100 (EP2)</b>	<b>%Gmm: 96.7%</b>		<b>h: 153 mm.</b>		<b>Φ: 98 mm.</b>	

**Tabla A.15** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC B-100 – EP3

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	39,966.5	35,045.7	30,833.0	25,330.7	26,219.6	19,906.4
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0103	-0.1036	-0.1898	-0.1683	-0.2415	-0.2591
Magnitud deformación	1.4193	1.3759	1.0882	1.0436	1.1090	1.3121
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.7634	59.1676	50.3556	42.3069	44.6271	44.6004
Error deformación	1.0429	0.8332	1.0219	0.9716	0.9501	0.7410
C.U. deformación	0.1452	0.0397	0.2387	0.0565	0.0145	0.0093
C.U. fase	0.1486	0.0977	0.0473	0.0233	0.0950	0.1019
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	18,969.3	15,238.2	12,163.1	10,420.0	8,385.2	7,076.6
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1335	-0.2156	-0.2362	-0.2856	-0.3410	-0.3913
Magnitud deformación	3.0519	2.7312	2.6647	2.9363	3.7003	5.5231
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.3968	58.2700	50.0316	42.2934	44.3996	44.4663
Error deformación	0.3981	0.3793	0.4027	0.3605	0.2911	0.2213
C.U. deformación	0.2200	0.1792	0.2362	0.2557	0.2354	0.2612
C.U. fase	4.8741	0.0017	0.0396	0.0675	0.0223	0.0131
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	7,838.2	5,873.5	5,523.9	3,694.8	3,047.0	2,076.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3205	-0.3835	-0.4105	-0.5000	-0.5127	-0.5209
Magnitud deformación	9.1729	9.9960	10.3730	13.9781	18.4498	30.1779
Magnitud esfuerzo(kPa)	65.7930	57.9635	49.8283	42.0953	44.4942	44.4292
Error deformación	0.1461	0.1224	0.1261	0.1403	0.1559	0.2133
C.U. deformación	0.1647	0.1634	0.2014	0.1497	0.1488	0.1202
C.U. fase	-0.0213	0.0005	0.0467	0.0426	0.0334	0.0318
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	2,747.9	2,111.3	1,818.4	1,259.3	893.8	610.2
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.4221	-0.4578	-0.4570	-0.4373	-0.4167	-0.3572
Magnitud deformación	22.6327	26.9707	29.3203	40.9170	52.2878	78.0124
Magnitud esfuerzo(kPa)	65.7511	57.8879	49.7776	41.9636	44.2246	44.4191
Error deformación	0.0726	0.0714	0.0741	0.0625	0.0696	0.1118
C.U. deformación	0.0967	0.1177	0.1328	0.1247	0.1172	0.0980
C.U. fase	-0.0483	0.0796	0.0480	0.0443	0.0380	0.0329
<b>MAC B-100 (EP3)</b>	<b>%Gmm: 95.4%</b>		<b>h: 154 mm.</b>		<b>Φ: 98 mm.</b>	

**Tabla A.16** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC B-100 – EP4

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	37,958.5	36,737.7	32,225.0	24,707.7	25,726.6	21,819.4
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.2320	-0.0581	-0.0461	-0.1046	-0.0530	-0.4547
Magnitud deformación	0.9114	0.6576	0.7342	0.5215	0.5235	0.5500
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.8319	59.2427	50.3298	42.4474	44.6449	44.6206
Error deformación	2.3211	2.8694	1.9627	2.7626	3.1190	4.2857
C.U. deformación	0.7025	0.8497	0.6944	0.7065	0.7844	1.0431
C.U. fase	-2.1554	0.0943	0.0909	0.2270	0.1455	0.4668
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	17,263.3	16,331.2	12,953.1	9,702.0	8,615.2	6,485.6
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1220	-0.2216	0.0340	-0.1686	-0.4250	-0.4192
Magnitud deformación	1.2377	1.1653	1.0207	0.9557	1.2224	1.6501
Magnitud esfuerzo(kPa)	67.5625	58.3352	50.0507	42.2801	44.4553	44.4576
Error deformación	1.3674	1.1619	1.1361	1.8720	1.4043	0.8791
C.U. deformación	0.6583	0.5721	0.3857	0.8693	0.8717	0.7472
C.U. fase	4.2668	0.2229	0.3340	0.1642	0.1900	0.1155
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	-	-	-	-	-	-
Angulo de fase (Arc-Tg)	-	-	-	-	-	-
Magnitud deformación	-	-	-	-	-	-
Magnitud esfuerzo(kPa)	-	-	-	-	-	-
Error deformación	-	-	-	-	-	-
C.U. deformación	-	-	-	-	-	-
C.U. fase	-	-	-	-	-	-
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	2,653.9	2,272.3	1,736.4	1,247.3	864.8	627.2
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.4032	-0.4432	-0.4627	-0.4640	-0.4525	-0.4022
Magnitud deformación	18.7575	22.2751	24.0567	33.7980	43.8164	68.4997
Magnitud esfuerzo(kPa)	65.8142	57.7227	49.7078	42.0353	44.2994	44.3498
Error deformación	0.0847	0.0829	0.0835	0.0711	0.0846	0.1387
C.U. deformación	0.4383	0.4389	0.4358	0.4159	0.4073	0.3867
C.U. fase	-0.0083	0.0145	0.0466	0.0551	0.0542	0.0446
<b>MAC B-100 (EP4)</b>	<b>%Gmm: 95.8%</b>		<b>h: 153 mm.</b>		<b>Φ: 98 mm.</b>	

**Tabla A.17** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC C-75 – EP1

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	34,114.5	30,835.4	28,110.5	23,529.5	21,254.1	17,765.1
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.2223	-0.0932	-0.0791	-0.1571	-0.1885	-0.1920
Magnitud deformación	2.7615	2.4848	2.4971	2.3009	2.5900	2.8299
Magnitud esfuerzo(kPa)	69.3525	59.2253	50.2179	42.6346	44.6886	44.6139
Error deformación	1.4202	0.7991	0.6349	0.8593	0.8565	0.8669
C.U. deformación	0.9264	0.8598	0.7336	0.8459	0.9126	1.0071
C.U. fase	-5.6418	0.0343	0.2272	0.0182	0.0639	0.0269
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	16,608.0	14,422.1	11,860.7	8,283.9	7,642.8	4,793.4
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.2139	-0.2014	-0.2704	-0.3005	-0.3227	-0.3433
Magnitud deformación	9.1847	7.8506	7.2437	7.9772	9.5057	11.6561
Magnitud esfuerzo(kPa)	69.8779	58.2679	49.6967	42.1508	44.1328	44.2167
Error deformación	0.3143	0.2635	0.2912	0.2863	0.2435	0.2377
C.U. deformación	1.0327	0.9617	0.9364	0.9716	0.9665	1.0063
C.U. fase	0.1349	0.0898	0.0272	0.0590	0.0408	0.0446
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	6,482.6	5,244.0	4,003.9	3,217.1	2,643.1	1,467.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3074	-0.3205	-0.4290	-0.3897	-0.4219	-0.4291
Magnitud deformación	9.2664	8.0374	8.2676	9.9828	12.1014	17.9115
Magnitud esfuerzo(kPa)	69.3364	58.2230	49.6374	42.0982	44.0868	44.2012
Error deformación	0.2543	0.2478	0.1920	0.1839	0.1770	0.1817
C.U. deformación	0.9689	0.8983	0.7854	0.7938	0.7781	0.7082
C.U. fase	0.6934	0.0366	0.3609	0.0012	0.0300	0.0075
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	2,990.3	2,153.6	1,544.3	1,230.8	882.8	461.7
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3882	-0.3773	-0.4019	-0.4253	-0.4290	-0.4092
Magnitud deformación	13.8035	13.9886	14.3729	18.8795	23.3689	35.0813
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.8830	58.1031	49.5044	42.1160	43.9994	44.2622
Error deformación	0.1395	0.1324	0.1244	0.1107	0.1209	0.1668
C.U. deformación	0.7615	0.7343	0.7128	0.6810	0.6661	0.6274
C.U. fase	-6.7893	0.1111	0.1207	0.1087	0.0849	0.0628
<b>MAC C-75 (EP1)</b>	<b>%Gmm: 95.3%</b>		<b>h: 148 mm.</b>		<b>Φ: 98 mm.</b>	

**Tabla A.18** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC C-75 – EP2

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	34,516.5	29,191.4	26,756.5	23,388.5	22,067.1	18,848.1
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0297	-0.1189	-0.0821	-0.1172	-0.1060	-0.1582
Magnitud deformación	2.3178	1.9844	1.7541	1.7527	1.9144	1.9782
Magnitud esfuerzo(kPa)	70.7400	58.4559	49.3792	42.4035	44.2941	44.2093
Error deformación	0.6063	0.5637	0.6828	0.6122	0.5560	0.5328
C.U. deformación	0.3543	0.3480	0.3604	0.1937	0.2867	0.3461
C.U. fase	0.0310	0.1576	0.1754	0.0360	0.1243	0.1065
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	16,176.0	14,463.1	11,510.7	8,163.9	7,372.8	4,771.4
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1053	-0.0754	-0.1437	-0.1794	-0.3280	-0.1886
Magnitud deformación	3.8011	3.2616	2.9592	3.2001	3.1599	4.2470
Magnitud esfuerzo(kPa)	70.7209	58.0765	49.5726	42.2104	44.1344	44.1766
Error deformación	0.2903	0.3498	0.3712	0.3273	0.3422	0.2883
C.U. deformación	0.3720	0.2788	0.2889	0.3089	0.3927	0.4921
C.U. fase	0.2323	0.1272	0.1012	0.1209	0.0085	0.1226
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	6,877.6	5,482.0	3,867.9	3,318.1	2,789.1	1,460.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1432	-0.2416	-0.2057	-0.2958	-0.3119	-0.3514
Magnitud deformación	7.0964	6.6862	6.7199	7.5598	9.0707	12.4808
Magnitud esfuerzo(kPa)	69.9349	58.3340	49.5400	42.1861	43.9196	44.1921
Error deformación	0.1676	0.1709	0.1632	0.1503	0.1388	0.1447
C.U. deformación	0.3061	0.3015	0.3787	0.3796	0.3957	0.3965
C.U. fase	0.1703	0.0792	0.1845	0.0453	0.0373	0.0046
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	3,042.3	2,113.6	1,454.3	1,246.8	903.8	435.7
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.2706	-0.3073	-0.3299	-0.3494	-0.3587	-0.3478
Magnitud deformación	13.9295	13.2555	13.2407	16.7144	20.0518	27.9221
Magnitud esfuerzo(kPa)	69.7554	58.1400	49.4399	42.2521	43.9882	44.1474
Error deformación	0.0924	0.1078	0.1065	0.0853	0.0894	0.1147
C.U. deformación	0.4231	0.4072	0.4183	0.4280	0.4072	0.3792
C.U. fase	0.1642	0.0268	0.0163	0.0047	0.0119	0.0149
<b>MAC C-75 (EP2)</b>	<b>%Gmm: 95.8%</b>		<b>h: 153 mm.</b>		<b>Φ: 98 mm.</b>	

**Tabla A.19** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC C-75 – EP3

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	34,882.5	31,395.4	27,988.5	23,279.5	21,462.1	17,834.1
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1223	-0.1721	-0.0146	-0.2039	-0.2255	-0.1994
Magnitud deformación	2.5055	2.2290	2.1731	2.3033	2.4818	2.9183
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.2462	59.1239	50.1128	42.5490	44.6150	44.5225
Error deformación	1.1776	1.4375	1.1141	0.9989	0.8409	0.6754
C.U. deformación	0.9335	1.0735	0.9902	0.9628	0.9240	0.8540
C.U. fase	1.6661	0.2374	0.1569	0.0625	0.0632	0.0182
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	15,987.0	13,828.1	11,469.7	8,299.9	7,174.8	4,997.4
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.2041	-0.1800	-0.1623	-0.2748	-0.3061	-0.3270
Magnitud deformación	7.2664	6.1057	5.6942	6.6863	7.8569	9.9236
Magnitud esfuerzo(kPa)	70.0731	58.2384	49.6597	42.1618	44.1247	44.2215
Error deformación	0.3989	0.3732	0.4039	0.3377	0.2850	0.2368
C.U. deformación	1.0106	0.9825	0.9720	0.9913	0.9636	0.9861
C.U. fase	0.1124	0.1123	0.1438	0.0955	0.0512	0.0320
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	6,363.6	5,509.0	4,233.9	3,348.1	2,812.1	1,517.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3294	-0.3290	-0.4161	-0.3965	-0.4150	-0.4114
Magnitud deformación	8.3243	7.9883	8.0786	10.0979	12.5150	18.4418
Magnitud esfuerzo(kPa)	69.0199	58.0806	49.5116	42.2109	44.1034	44.2840
Error deformación	0.2386	0.2100	0.2108	0.1716	0.1401	0.1369
C.U. deformación	0.8569	0.8105	0.8377	0.7758	0.7671	0.7085
C.U. fase	1.9337	0.0648	0.2409	0.0702	0.0576	0.0229
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	3,062.3	2,141.6	1,514.3	1,236.8	916.8	464.7
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3831	-0.3833	-0.3996	-0.3903	-0.3884	-0.3615
Magnitud deformación	16.0094	16.3785	16.8801	21.9991	27.0035	39.1625
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.5955	58.0154	49.4635	42.1418	43.9143	44.2741
Error deformación	0.1239	0.1145	0.1023	0.0786	0.0789	0.1094
C.U. deformación	0.7341	0.7213	0.7191	0.6887	0.6725	0.6391
C.U. fase	45.9329	0.0921	0.0981	0.0577	0.0476	0.0417
<b>MAC C-75 (EP3)</b>	<b>%Gmm: 96.4%</b>		<b>h: 148 mm.</b>		<b>Φ: 98 mm.</b>	

**Tabla A.20** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC C-75 – EP4

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	34,699.5	29,159.4	28,751.5	23,372.5	21,613.1	16,763.1
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0342	-0.0981	-0.1256	-0.0638	-0.0922	-0.1428
Magnitud deformación	2.2258	1.8836	1.7319	1.6146	1.7495	2.0574
Magnitud esfuerzo(kPa)	70.8746	58.4306	49.5841	42.5454	44.3284	44.1866
Error deformación	0.5772	0.5918	0.6242	0.6781	0.6377	0.5395
C.U. deformación	0.3558	0.3390	0.3249	0.3892	0.3380	0.3169
C.U. fase	0.0421	0.0552	0.1113	0.1460	0.1579	0.0461
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	17,567.0	14,294.1	12,168.7	8,242.9	7,320.8	4,512.4
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0768	-0.1052	-0.1285	-0.1797	-0.1552	-0.2252
Magnitud deformación	3.7967	3.2528	2.7189	3.1245	3.4870	4.2105
Magnitud esfuerzo(kPa)	71.2387	58.1549	49.5579	42.4133	44.2434	44.3008
Error deformación	0.3190	0.3339	0.3823	0.3302	0.3127	0.2671
C.U. deformación	0.3437	0.3414	0.2403	0.3056	0.3856	0.4215
C.U. fase	0.0916	0.0814	0.0461	0.1252	0.1197	0.0790
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	6,824.6	5,273.0	3,749.9	3,226.1	2,477.1	1,439.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1513	-0.2087	-0.1830	-0.2793	-0.2875	-0.3136
Magnitud deformación	7.1259	6.8436	6.5342	7.5306	9.0877	12.5702
Magnitud esfuerzo(kPa)	69.2011	58.0492	49.4604	42.2290	44.0739	44.2551
Error deformación	0.1649	0.1654	0.1752	0.1446	0.1259	0.1158
C.U. deformación	0.2657	0.3029	0.4012	0.3603	0.3799	0.4086
C.U. fase	0.1659	0.0856	0.1086	0.0281	0.0447	0.0313
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	2,971.3	2,221.6	1,564.3	1,250.8	895.8	436.7
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.2725	-0.3047	-0.3298	-0.3445	-0.3410	-0.3347
Magnitud deformación	14.1521	13.4294	13.4614	16.9759	20.3048	28.3841
Magnitud esfuerzo(kPa)	69.4664	57.9458	49.4203	42.2466	44.0065	44.1712
Error deformación	0.0994	0.1029	0.1069	0.0747	0.0682	0.0784
C.U. deformación	0.4257	0.3962	0.3816	0.3964	0.4051	0.3920
C.U. fase	0.2148	0.0243	0.0175	0.0174	0.0153	0.0163
<b>MAC C-75 (EP4)</b>	<b>%Gmm: 96.0%</b>		<b>h: 153 mm.</b>		<b>Φ: 98 mm.</b>	



**Tabla A.21** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC C-100 – EP1

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	34,546.5	32,313.5	28,905.5	24,395.7	20,669.9	18,201.7
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0247	-0.0449	-0.1551	-0.1579	-0.0591	-0.2102
Magnitud deformación	4.6134	3.7986	3.6319	3.3966	3.9180	4.4949
Magnitud esfuerzo(kPa)	70.1530	60.1895	50.7324	42.9156	45.2276	45.2492
Error deformación	0.6974	0.6681	0.6223	0.6778	0.5412	0.5342
C.U. deformación	1.1278	1.0845	1.0345	1.0773	1.0366	1.1192
C.U. fase	0.6993	0.1397	0.0463	0.0425	0.1676	0.0124
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	16,496.5	14,487.9	12,681.4	9,331.2	7,620.2	5,319.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1608	-0.2445	-0.3050	-0.3318	-0.3508	-0.3981
Magnitud deformación	5.7388	5.6203	4.9368	6.0310	7.2009	10.4440
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.1586	58.0423	49.9078	41.9451	44.0998	44.3937
Error deformación	0.2081	0.1960	0.2154	0.1917	0.1681	0.1783
C.U. deformación	0.2083	0.2289	0.0814	0.2339	0.2185	0.2485
C.U. fase	1.5222	0.0220	0.0077	0.0492	0.0450	0.0414
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	7,077.3	5,621.6	4,940.5	3,516.7	2,717.6	1,776.5
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3243	-0.3675	-0.3947	-0.4360	-0.4519	-0.4535
Magnitud deformación	12.1913	12.3644	12.3458	15.7346	19.9020	29.4526
Magnitud esfuerzo(kPa)	67.9883	58.5950	50.1902	42.2600	44.5660	44.5268
Error deformación	0.1173	0.1220	0.1215	0.1479	0.1624	0.2163
C.U. deformación	0.3410	0.3289	0.3508	0.4281	0.4265	0.4456
C.U. fase	-0.0892	0.1162	0.1069	0.0610	0.0362	0.0038
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	2,813.5	2,207.7	1,839.3	1,205.3	1,018.3	712.0
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3619	-0.3839	-0.3806	-0.3795	-0.3753	-0.3397
Magnitud deformación	23.6808	26.1867	27.0476	34.8117	43.3825	62.3415
Magnitud esfuerzo(kPa)	66.6255	57.8123	49.7485	41.9595	44.1744	44.3863
Error deformación	0.0773	0.0804	0.0847	0.0841	0.1009	0.1375
C.U. deformación	0.1698	0.2069	0.2265	0.2799	0.2980	0.3375
C.U. fase	-0.1382	0.0619	0.0429	0.0377	0.0254	0.0086
<b>MAC C-100 (EP1)</b>	<b>%Gmm: 96.1%</b>		<b>h: 154 mm.</b>		<b>Φ: 98 mm.</b>	

**Tabla A.22** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC C-100 – EP2

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	35,984.5	32,904.5	28,093.5	23,273.7	21,915.9	19,361.7
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1021	-0.0813	0.0686	-0.1725	-0.1714	-0.2306
Magnitud deformación	2.4223	2.1868	1.8768	1.9275	2.3027	2.4976
Magnitud esfuerzo(kPa)	66.2623	58.9222	49.9269	42.5360	44.4372	44.4405
Error deformación	0.7719	0.5272	0.8410	0.6496	0.5074	0.4855
C.U. deformación	0.2928	0.2275	0.6835	0.2495	0.1577	0.2590
C.U. fase	1.3416	0.1486	0.1757	0.1232	0.0040	0.0081
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	16,971.5	15,127.9	13,445.4	9,275.2	7,753.2	5,414.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1626	-0.2240	-0.2727	-0.3567	-0.3820	-0.4187
Magnitud deformación	4.4447	4.3250	4.2656	4.5098	5.7884	8.3292
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.8778	58.3357	49.8284	42.0813	44.1089	44.3094
Error deformación	0.2777	0.2551	0.2621	0.2446	0.2008	0.1936
C.U. deformación	0.0847	0.0507	0.0051	0.0494	0.0161	0.0833
C.U. fase	0.3159	0.1049	0.0602	0.0616	0.0601	0.0287
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	7,458.3	5,306.6	4,758.5	3,707.7	2,862.6	1,846.5
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3595	-0.3943	-0.4163	-0.4709	-0.4970	-0.4907
Magnitud deformación	12.0763	12.5875	12.6484	16.6673	20.8544	32.1821
Magnitud esfuerzo(kPa)	67.3528	58.1744	49.8414	41.9460	44.1615	44.2993
Error deformación	0.1184	0.1236	0.1272	0.1747	0.2087	0.2755
C.U. deformación	0.1645	0.1471	0.1504	0.2035	0.2339	0.2683
C.U. fase	-0.0898	0.0614	0.0398	0.0120	0.0103	0.0254
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	2,650.5	2,205.7	1,899.3	1,264.3	1,078.3	667.0
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3874	-0.3970	-0.3940	-0.3799	-0.3710	-0.3270
Magnitud deformación	27.6449	30.1174	31.2720	40.2218	49.1619	68.5218
Magnitud esfuerzo(kPa)	67.1507	57.8564	49.6693	42.0763	44.2141	44.3241
Error deformación	0.0809	0.0823	0.0861	0.0855	0.1047	0.1479
C.U. deformación	0.2003	0.1816	0.1899	0.2359	0.2424	0.2664
C.U. fase	-0.0472	0.0291	0.0263	0.0075	0.0039	0.0004
<b>MAC C-100 (EP2)</b>	<b>%Gmm: 95.8%</b>		<b>h: 153 mm.</b>		<b>Φ: 98 mm.</b>	

**Tabla A.23** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC C-100 – EP3

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	32,363.5	33,110.5	27,198.5	25,773.7	19,407.9	17,915.7
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0588	-0.0975	-0.1557	-0.1513	-0.1874	-0.2174
Magnitud deformación	3.2777	2.9053	2.4767	2.6514	2.9719	3.5941
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.7594	58.7797	50.2382	42.3040	44.3991	44.4987
Error deformación	0.4787	0.3838	0.4434	0.4167	0.3540	0.3004
C.U. deformación	0.1150	0.2350	0.1191	0.0773	0.1257	0.1934
C.U. fase	0.3355	0.0452	0.0090	0.0164	0.0166	0.0817
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	16,812.5	15,260.9	12,332.4	9,075.2	7,618.2	5,596.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1791	-0.2352	-0.2843	-0.3179	-0.3516	-0.3737
Magnitud deformación	5.6663	5.4010	5.1126	5.9477	7.2236	10.2816
Magnitud esfuerzo(kPa)	67.7043	57.9271	49.9231	41.9764	44.1378	44.3877
Error deformación	0.2202	0.2000	0.2088	0.1913	0.1596	0.1396
C.U. deformación	0.0566	0.0532	0.0112	0.1378	0.1059	0.1493
C.U. fase	-0.4131	0.0742	0.0518	0.0822	0.0334	0.0313
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	6,956.3	5,474.6	5,020.5	3,656.7	2,632.6	1,661.5
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3031	-0.3491	-0.3709	-0.4041	-0.4148	-0.4110
Magnitud deformación	11.3606	11.9877	12.0575	15.8402	19.7975	29.9391
Magnitud esfuerzo(kPa)	66.5649	57.9155	49.8784	41.9255	44.1733	44.3747
Error deformación	0.1093	0.1083	0.1120	0.0872	0.0881	0.1331
C.U. deformación	0.1644	0.2122	0.2246	0.3094	0.3216	0.3605
C.U. fase	-0.2258	0.1492	0.0783	0.1157	0.0539	0.0250
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	2,810.5	2,200.7	1,813.3	1,141.3	1,069.3	731.0
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3565	-0.3768	-0.3796	-0.3564	-0.3453	-0.3097
Magnitud deformación	26.0491	28.7287	30.1269	39.0128	48.2417	67.3874
Magnitud esfuerzo(kPa)	67.2113	57.6505	49.6994	42.1997	44.3427	44.4094
Error deformación	0.0710	0.0742	0.0762	0.0605	0.0614	0.0936
C.U. deformación	0.1327	0.1860	0.2114	0.2779	0.2952	0.3365
C.U. fase	-0.2137	0.0977	0.0566	0.0383	0.0332	0.0126
<b>MAC C-100 (EP3)</b>	<b>%Gmm: 95.8%</b>		<b>h: 154 mm.</b>		<b>Φ: 98 mm.</b>	

**Tabla A.24** – Resultados de módulo dinámico (AASHTO T342) – MAC C-100 – EP4

<b>TEMPERATURA: 4.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	33,060.5	31,278.5	30,218.5	25,006.7	21,902.9	17,996.7
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.0544	-0.0636	-0.1307	-0.1802	-0.2438	-0.1636
Magnitud deformación	2.4809	2.1566	2.0043	1.8989	2.1477	2.4422
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.3391	58.9047	49.9191	42.5263	44.3926	44.4528
Error deformación	0.6728	0.5440	0.5791	0.5989	0.5281	0.4974
C.U. deformación	0.1727	0.2590	0.2510	0.2723	0.1858	0.2972
C.U. fase	0.1749	0.0634	0.0098	0.1018	0.0407	0.0040
<b>TEMPERATURA: 21.1°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	17,270.5	14,785.9	13,000.4	9,478.2	7,322.2	5,328.8
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.1881	-0.2465	-0.3337	-0.3480	-0.3724	-0.3924
Magnitud deformación	4.5413	4.3094	4.2458	4.7822	5.8521	8.4753
Magnitud esfuerzo(kPa)	68.4080	58.2331	49.8503	42.0957	44.0847	44.3275
Error deformación	0.2924	0.2694	0.2714	0.2395	0.1950	0.1676
C.U. deformación	0.1162	0.0938	0.0588	0.0802	0.1099	0.1153
C.U. fase	1.2786	0.0629	0.0703	0.0218	0.0804	0.0321
<b>TEMPERATURA: 37.8°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	6,984.3	5,664.6	5,036.5	3,448.7	2,728.6	1,850.5
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3249	-0.3712	-0.3882	-0.4189	-0.4349	-0.4292
Magnitud deformación	12.2443	12.9740	13.2205	17.5989	22.3653	34.0067
Magnitud esfuerzo(kPa)	67.6587	58.0221	49.7690	42.0729	44.1839	44.3347
Error deformación	0.1160	0.1051	0.1082	0.0923	0.0989	0.1493
C.U. deformación	0.1866	0.1671	0.1749	0.2337	0.2441	0.2716
C.U. fase	-0.2034	0.0534	0.0836	0.0468	0.0304	0.0125
<b>TEMPERATURA: 54.4°C</b>						
Frecuencia (Hz)	25.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.1
Modulo dinámico (MPa)	2,757.5	2,272.7	1,761.3	1,242.3	955.3	679.0
Angulo de fase (Arc-Tg)	-0.3826	-0.3950	-0.3868	-0.3539	-0.3372	-0.2918
Magnitud deformación	29.3082	32.1079	33.5233	43.1745	52.3095	70.7583
Magnitud esfuerzo(kPa)	67.4443	57.6722	49.6071	42.1711	44.2384	44.3680
Error deformación	0.0666	0.0729	0.0760	0.0594	0.0619	0.1065
C.U. deformación	0.1631	0.1490	0.1504	0.1974	0.1981	0.2229
C.U. fase	-0.0767	0.0362	0.0372	0.0252	0.0171	0.0106
<b>MAC C-100 (EP4)</b>	<b>%Gmm: 96.1%</b>		<b>h: 153 mm.</b>		<b>Φ: 98 mm.</b>	