UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAÍSO – CHILE

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON RAP

Memoria de titulación presentada por

Carla Daniela Valenzuela Henríquez

Como requisito parcial para optar al título de

Ingeniero Civil

Profesor Guía

Carlos Wahr D.

RESUMEN

Se presentan resultados y el posterior análisis de ensayos de laboratorio para caracterizar el desempeño de mezclas asfálticas que contienen diferentes porcentaje de asfalto reciclado o RAP según sus siglas en inglés “Recycled Asphalt Pavements”.

Se analizarán de tres mezcla asfálticas, una con 8% de RAP Grueso (tamaño máximo nominal del agregado ¾”), otra con 12% de RAP Grueso y 6 % RAP fino (tamaño máximo nominal del agregado 3/8”) y una muestra control (100% asfalto virgen).

Para evaluar el desempeño en laboratorio de las mezclas asfálticas mencionadas, se confeccionaran probetas que serán sometidas a los siguientes ensayos:

- Módulo Dinámico según norma AASHTO T342-11
- Flow Number o Número de Flujo según norma AASHTO TP79-15
- Rueda de Hamburgo según norma AASHTO T324-14

Todos los ensayos serán realizados en el Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras (LEMCO) de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM).

Para verificar si existe una diferencia significativa en el comportamiento de las mezclas asfálticas analizadas con y sin RAP se realizará el análisis ANOVA a los resultados de los ensayos de Fatiga, Rueda de Hamburgo, Flow Number y Módulo Dinámico.

La mezcla sin RAP presentó los mayores valores de rigidez, resultado no esperado y contrario a las expectativas, ya que se espera que el RAP aporte mayor rigidez a la mezcla.

En el caso del ensayo Flow Number la mezcla con mayor porcentaje de RAP presentó el mejor desempeño en ahuellamiento, situación que no se observó en el ensayo Rueda de Hamburgo, posiblemente al daño por humedad que pueden haber sufrido las probetas.

ABSTRACT

In this work, the analysis realized to asphaltic mixtures with different percentages of recycled asphalt or RAP (Recycled Asphalt Pavements) is presented, specifically three asphaltic mixtures, one of them without RAP and two mixtures with different dosages of RAP, the first one with 8% of thick RAP (size nominal maximum of the aggregate ¾) and the second with 12% of thick RAP and 6% thin RAP (size nominal maximum of the aggregate 3/8).

For evaluate the performance in the laboratory of the asphaltic mixture, the next tests will be performed:

- Dynamic modulus according AASHTO T342-11
- Flow number according AASHTO TP79-15
- Hamburg wheel according AASHTO T324-14

All the laboratories test are part of this report were conducted in the offices of Materials Laboratory Try and Control Works, LEMCO.

For verification if exist a significant difference in the behaviour of the asphaltic mixtures analysed with and without RAP, the results of the fatigue tests, Hamburg Wheel, Dynamic Modulus and Flow number will be subjected to ANOVA analysis and Tukey Test.

The mixture containing no RAP presented the higher value of stiffness, an unexpected result and contrary to the original expects, since the RAP is expected to provide stiffness to the mixture

In the case of the Flow Number test the mixture with higher percentage of RAP presented a better rutting performance, this it was not observed in the Hamburg wheel test, possibly due to the humidity damage that could have suffered the specimen.

GLOSARIO

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes)

ANOVA: Analysis of variance (Análisis de varianza)

ASTM: American Society for Testing Materials.

BBR: Bending Beam Rheometer (Reómetro de Viga en Flexión).

DSR: Dynamic Shear Rheometer (Reómetro de Corte Dinámico).

Dmm: Densidad máxima suelta

E*: Módulo Complejo.

$|E^*|$: Módulo Dinámico.

FN: Flow Number.

G: Densidad Compactada.

G*: Módulo Complejo de Corte.

gr: Gramos.

HPDR: Horno de Película Delgada Rotatorio.

kPa: Kilo Pascal.

LEMCO: Laboratorio de Ensayo de Materiales y Control de Obras.

LVDT: Transformador diferencial de variación lineal.

min: Minutos.

mm: Milímetros.

MD: Módulo Dinámico.

NCHRP: National Cooperative Highway Research Program.

Pa s: Pascal-segundo.

PAV: Preassure Aging Vassel (Envejecimiento en Cámara de Presión).

PG: Grado de desempeño.

RAP: Reclaimed Asphalt Pavement.

RH: Rueda de Hamburgo.

S(t): Módulo de rigidez (creep Stiffness).

SUPERPAVE: Superior performance pavements.

VA: Vacíos de aire.

δ: Ángulo de fase.

α (T): Factor de desplazamiento.

ϵ_6: Nivel de deformación asociada a un millón de repeticiones de carga que causan la reducción de la rigidez en un 50%.

N_{500}: Cantidad de ciclos de carga que causan la falla para un nivel de deformación de 500 [µstrain].

µstrain: Micro Strain [mm/mm * 10^{-6}].

CONTENIDO

Resumen ii
Abstract iii
Glosario iv
Indice de Tablas viii
Indice de Figuras x
1. INtroducción 1
1.1. Objetivos Generales del estudio 1
1.2. Objetivos Específicos del estudio 1
1.3. Alcances del estudio 2
1.4. Metodología de trabajo 2
1.5. Estructuración de la memoria 3
2. Revisión bibliográfica 4
2.1. RAP 4
2.2. RAP en el diseño de mezclas asfálticas 4
2.3. Desempeño Mezclas Asfálticas 7
2.2.1 Agrietamiento por fatiga 7
2.2.2 Ahuellamiento 8
2.2.3 Agrietamiento térmico 12
3. materiales y Preparación de probetas 13
3.1. RAP 13
3.2. Betún Asfáltico 15
3.1.1 Clasificación por grado de desempeño 16
3.3. Áridos 18
3.4. Cálculo de material 21
3.5. Acondicionamiento de los materiales 22
3.6. Mezclado 22
3.7. Acondicionamiento de la mezcla asfáltica 23
3.8. Compactación de la mezcla asfáltica 23
3.9. Corte de las probetas de mezcla asfáltica 24
3.10. Medición y verificación de la densidad 26
4. CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS ASFáLTICAS CON RAP 27
4.1. Módulo Dinámico 27
4.1.1 Base Teórica 27

4.1.2 Ensayo 28
4.1.3 Resultados 31
4.1.4 Análisis de Resultados 35
4.2. Flow Number o Número de Flujo 39
4.2.1. Ensayo 40
4.2.2. Resultados 42
4.2.3. Análisis Resultados 44
4.3. rueda de hamburgo 48
4.3.1. Ensayo 48
4.3.2. Resultados 51
4.3.3. Análisis de Resultados 56
5. Análisis Estadístico 63
5.1. Ensayo Flow Number 64
5.2. Ensayo Rueda de Hamburgo 65
5.3. Ensayo Fatiga 67
6. Conclusiones y recomendaciones 68
Referencias 70

INDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Mezclas Asfálticas analizadas 1
Tabla 2-1: Exigencias propiedades RAP 4
Tabla 2-2: Grado de desempeño asfalto virgen 5
Tabla 2-3: Propiedades del agregado 10
Tabla 2-4: Ventajas y desventajas RH y FN 12
Tabla 3-1: Mezclas asfálticas analizadas 13
Tabla 3-2: Granulometría RAP 13
Tabla 3-3: % de agregados aportados por el RAP 14
Tabla 3-4: Granulometría ajustada 14
Tabla 3-5: Cantidad de asfalto virgen 15
Tabla 3-6: DSR Asfalto original 16
Tabla 3-7: DSR Asfalto con envejecimiento primario, Asfalto original 16
Tabla 3-8: BBR Asfalto original 16
Tabla 3-9: DSR Asfalto envejecimiento secundario, asfalto original 17
Tabla 3-10: Clasificación Superpave 17
Tabla 3-11: Granulometría Mezcla 1 18
Tabla 3-12: Granulometría Mezcla 2 19
Tabla 3-13: Granulometría Mezcla 3 20
Tabla 3-14: Densidad maxima suelta 21
Tabla 3-15: Dimensiones probetas 21
Tabla 3-16: % Vacíos de aire 22
Tabla 3-17: Parámetros Compactador Giratorio 24
Tabla 4-1: Probetas Módulo Dinámico 28
Tabla 4-2: Número de ciclos para ensayo módulo dinámico[22] 29
Tabla 4-3: Tiempos de equilibrios recomendados[22] 30
Tabla 4-4: Niveles de esfuerzos típicos[22] 30
Tabla 4-5: Máximo rango aceptable 36
Tabla 4-6: Repetitividad ensayo Módulo Dinámico 36
Tabla 4-7: Precisión ensayo Módulo Dinámico 37
Tabla 4-8: Probetas Ensayo Flow Number 41
Tabla 4-9: Parámetros ensayo FN 41
Tabla 4-10: Resultados Ensayo Flow Number 43
Tabla 4-11: Precisión para un operador en el ensayo Flow Number sin confinamiento[28] 45

Tabla 4-12: Precisión ensayo Flow Number 45
Tabla 4-13: Criterio FN AASHTO TP79-15 46
Tabla 4-14: Criterio rechazo ensayo Rueda de Hamburgo 51
Tabla 4-15: %Va probetas RH 52
Tabla 4-16: Valores ahuellamiento Mezcla 1 53
Tabla 4-17: Valores ahuellamiento Mezcla 2 54
Tabla 4-18: Valores ahuellamiento Mezcla 3 54
Tabla 4-19: Resumen resultados RH 56
Tabla 4-20: Precisión ensayo Rueda de Hamburgo 56
Tabla 4-21: Precisión deformación Rueda de Hamburgo 57
Tabla 4-22: Precisión Criterio Alemán Rueda de Hamburgo 58
Tabla 4-23: Precisión pendiente Creep Rueda de Hamburgo 59
Tabla 4-24: Precisión pendiente Strip Rueda de Hamburgo 60
Tabla 4-25: Precisión punto de stripping Rueda de Hamburgo 61
Tabla 4-26: Comparación ranking FN y RH 62
Tabla 5-1: Tabla ANOVA 63
Table 5-2 : ANOVA Ensayo Flow Number 64
Tabla 5-3: Datos Tukey ensayo Flow Number 64
Tabla 5-4: Test Tukey ensayo Flow Number 64
Tabla 5-5: ANOVA Ensayo Rueda de Hamburgo 10.000 pasadas 65
Tabla 5-6: Datos Test Tukey ensayo Rueda de Hamburgo 10.000 pasadas 65
Tabla 5-7: Test Tukey ensayo Rueda de Hamburgo 10.000 pasadas 65
Tabla 5-8: ANOVA Ensayo Rueda de Hamburgo 20.000 pasadas 66
Tabla 5-9: Datos Test Tukey ensayo Rueda de Hamburgo 20.000 pasadas 66
Tabla 5-10: Test Tukey ensayo Rueda de Hamburgo 20.000 pasadas 66
Tabla 5-11: Análisis Curvas Fatiga 67
Tabla 5-12: Resumen Análisis Estadístico 67

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Deterioro piel de cocodrilo 7
Figura 2-2: Ahuellamiento por falla subrasante 8
Figura 2-3: Ahuellamiento por falla mezcla asfáltica 9
Figura 2-4: Agrietamiento térmico 12
Figura 3-1: Granulometría Mezcla 1 18
Figura 3-2: Granulometría Mezcla 2 19
Figura 3-3: Granulometría Mezcla 3 20
Figura 3-4: Esquema funcionamiento Compactador Giratorio 23
Figura 3-5: Testiguera 24
Figura 3-6: Esquema molde Rueda de Hamburgo, AASHTO T324-14 25
Figura 3-7: Molde máquina Rueda de Hamburgo 25
Figura 3-8: Probetas Rueda de Hamburgo 26
Figura 4-1: Ángulo de fase 27
Figura 4-2: Topes metálicos probeta 29
Figura 4-3: Probeta tipo para ensayo módulo dinámico 30
Figura 4-4: Gráfico resultados MD Mezcla 1 31
Figura 4-5: Gráfico resultados MD Mezcla 2 32
Figura 4-6: Gráfico resultados MD Mezcla 3 32
Figura 4-7: Curvas Maestras 21°C 34
Figura 4-8: Curvas Isócronas 34
Figura 4-9: Gráfico barras Módulo Dinámico (3 probetas) 35
Figura 4-10: Gráfico barras Módulo Dinámico (2 probetas) 37
Figura 4-11: Comparación MD y Fatiga 38
Figura 4-12: Software ensayo Flow Number 39
Figura 4-13: Gráfico tipo en ensayo Número de Flujo 40
Figura 4-14: Probeta ensayo Flow Number 42
Figura 4-15: Gráfico Flow Number 44
Figura 4-16: Variabilidad FN 45
Figura 4-17: Comparación parámetros FN 46
Figura 4-18: Comparación MD y FN 47
Figura 4-19: Equipo Rueda de Hamburgo 49
Figura 4-20: Curva deformación vs N° de ciclos, Ensayo Rueda de Hamburgo[30] 50
Figura 4-21: Especímenes RH 51

Figura 4-22: Ahuellamiento promedio Mezcla 1 52
Figura 4-23: Ahuellamiento promedio Mezcla 2 53
Figura 4-24: Ahuellamiento promedio Mezcla 3 54
Figura 4-25: Mezcla 1 ensayada Rueda de Hamburgo 55
Figura 4-26: Mezcla 2 ensayada Rueda de Hamburgo 55
Figura 4-27: Mezcla 3 ensayada Rueda de Hamburgo 55

1. INTRODUCCIÓN

En Chile cerca de 50.000 [km], es decir, un 60% de caminos que conforman la red vial nacional aún no están pavimentos. Si sumamos a esta cifra el deterioro progresivo que de forma natural sufren los pavimentos, se está exigiendo una gran cantidad de áridos y de asfalto nuevo, provocando un impacto ambiental negativo, lo que conlleva nuevos desafíos, tales como, construir obras más amigables con el medio ambiente y a costos competitivos[1].

Una alternativa para disminuir el impacto es el uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en mezclas asfálticas en caliente.

El RAP se define como el pavimento asfáltico que ha sido removido después de haber cumplido su etapa de servicio y que posteriormente es desagregado y seleccionado, pudiendo ser reutilizado en una nueva mezcla asfáltica, reduciendo la utilización de nuevos materiales, ahorrando dinero y recursos naturales[2]

1.1. OBJETIVOS GENERALES DEL ESTUDIO

El presente trabajo realizado en las dependencias del laboratorio LEMCO, tiene por objetivo evaluar el desempeño en laboratorio de mezclas asfálticas con porcentajes variables de RAP.

Se trabaja con una mezcla asfáltica de control (sin RAP), mezcla con 8% y 18% de RAP, detalladas en la Tabla 1-1:

Tabla 1-1: Mezclas Asfálticas analizadas

Mezcla	**Asfalto mezcla %**	**RAP** Grueso ¾" %	Fino ½" %
1	5	-----	----
2	5	8	----
3	5	12	6

Las mezclas en estudio serán sometidas a los ensayos de:

- Módulo Dinámico (AASHTO T342-11)
- Flow Number (AASHTO TP79-15)
- Rueda de Hamburgo (AASHTO T324-14)

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL ESTUDIO

- Elaborar mezclas asfálticas y confeccionar probetas para los distintos ensayos.
- Utilizar el equipo de ensaye universal Cooper HYD25-11 y el software correspondiente al ensayo Flow Number y Módulo Dinámico.
- Utilizar el equipo SBG LW2x320x260 y software correspondiente al ensayo Rueda de Hamburgo.
- Llevar a cabo los ensayos de Módulo Dinámico, Flow Number y Rueda de Hamburgo.
- Realizar curvas maestras e isócronas de los resultados del ensayo de Módulo Dinámico.

- Realizar análisis estadístico de los resultados obtenidos de los ensayos de Flow Number, Rueda de Hamburgo y Fatiga.

1.3. ALCANCES DEL ESTUDIO

En el presente estudio se dan a conocer los resultados y análisis de los ensayos de Módulo Dinámico, Flow Number y Rueda de Hamburgo a los que fueron sometidos tres mezclas asfálticas en caliente, de las cuales se fabricaron y compactaron probetas con bitumen tradicional CA 24, granulometría IV-A-12 y con distintos porcentajes de RAP: 0-8 y 18%.

Las probetas se ensayan siguiendo los procedimientos de cada norma que se señalan a continuación:

- Módulo Dinámico según norma AASHTO T342-11
- Flow Number o Número de Flujo según norma AASHTO TP79-15
- Rueda de Hamburgo según norma AASHTO T324-14

Para llevar a cabo los ensayos de Módulo Dinámico y Flow Number se utiliza el equipo de ensaye universal Cooper HYD25-11, mientras que para el ensayo de Rueda de Hamburgo se utiliza el equipo SBG LW2x320x260 de la marca BPS Wenninsen.

1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología utilizada para este estudio fue la siguiente:

- Investigación bibliográfica:
  - Revisión y lectura acerca del RAP.
  - Revisión y lectura de normas asociadas a los ensayos que se realizarán.
  - Recopilación y lectura de memorias relacionadas con el tema en estudio.
- Ensayos de laboratorio: La fabricación de probetas y los ensayos fueron realizados en las dependencia de la casa central del laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María, excepto el ensayo Rueda de Hamburgo realizada en Sede San Joaquín de la Universidad.
  La secuencia de trabajo se puede resumir en los siguientes pasos:
  - Preparación de probetas en laboratorio.
  - Corroborar cumplimiento de las propiedades volumétricas.
  - Realización de ensayos.
- Análisis e interpretación de resultados: Utilización de la herramienta ANOVA para análisis estadístico.
- Conclusiones generales.

1.5. ESTRUCTURACIÓN DE LA MEMORIA

Esta memoria está compuesta por los siguientes capítulos:

Capítulo 1: Introducción

Capítulo 2: Revisión bibliográfica, donde se encuentra generalidades sobre mezclas asfálticas y sus principales deterioros, enfocados principalmente al ahuellamiento.

Además se entrega información sobre asfalto reciclado (RAP).

Capítulo 3: Se presenta la caracterización del ligante asfáltico y las etapas del proceso de preparación de probetas.

Capítulo 4: Se describen los ensayos y se presentan los resultados.

Capítulo 5: Se presenta el análisis ANOVA realizado a los resultados de los ensayos.

Capítulo 6: Conclusiones finales de la memoria.

Referencias

Anexos

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta revisión bibliográfica se aborda en primer lugar el pavimento asfáltico reciclado (RAP), para después revisar los principales deterioros que afectan a los pavimentos y los ensayos que se realizan para estudiarlos.

2.1. RAP

Se denomina RAP por sus siglas en inglés “Reclaimed Asphalt Pavement” o pavimento asfaltico reciclado a materiales procedentes de las capas estructurales de pavimentos asfalticos que son removidos y/o reprocesados, el cual se utiliza para construir nuevas mezclas asfálticas.

El RAP se obtiene mediante alguno de los siguientes procesos:

- Fresado: Extraer el nivel superior del pavimento.
- Remoción del espesor completo del pavimento, en donde además se extraen las capas granulares bajo el asfalto.
- Trozos de demolición de pavimentos asfalticos.
- Excesos de producción.

Los pavimentos de asfalto reciclado son construidos usando una combinación de RAP y material virgen. Su uso es una alternativa a las mezclas asfálticas caliente, y que posee las siguientes ventajas[3]:

1. Reutilización de material.
2. Disminución del volumen de botaderos.
3. Reducción de costos de pavimentación.
4. Ahorro en importación y extracción de materia prima (asfaltos y áridos).
5. Conservación de suministros de material virgen.
6. Disminución en los tiempos de intervención en el camino.
7. Disminución en las importaciones de los productos asociados a la obra.
8. Cuidado al medio ambiente.

2.2. RAP EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

El uso de RAP en nuevas mezclas asfálticas entrega beneficios económicos y ambientales, es por esto que el Manual MS2[4] en su séptima edición incorpora un capítulo dedicado a este material y su uso como parte de nuevas mezclas asfálticas en caliente.

Entre las recomendaciones de dicho manual se señala que la cantidad de RAP que se usará en la mezcla dictará las propiedades que deben ser conocidas con anterioridad, en la Tabla 2-1 se resumen estos requerimientos.

Tabla 2-1: Exigencias propiedades RAP

Cantidad de RAP	Propiedades
Bajos niveles	% de asfalto en el RAP Granulometría del RAP
Altos niveles	% de asfalto en el RAP Granulometría del RAP Propiedades físicas del asfalto del RAP (Temperaturas críticas)

También recomienda seguir las indicaciones de la Tabla 2-2 al momento de escoger el PG adecuado del asfalto virgen, ya que combinado con el asfalto envejecido del RAP provocará algunos efectos en el PG del ligante resultante.

Tabla 2-2: Grado de desempeño asfalto virgen

Porcentaje de RAP	Grado del asfalto virgen
<15%	No hay cambio en el PG.
15-25%	El PG aumenta un grado, tanto en la T° máxima como mínima.
≥25%	Se deben usar los gráficos y fórmulas de mezcla para determinar cuánto RAP usar o el PG del asfalto virgen.*

*Sección 11.4 del manual MS2 7°Edición

Al utilizar un mayor porcentaje de RAP como se vio en la Tabla 2-1 se debe conocer el grado de desempeño del asalto del RAP para poder utilizar este dato en las fórmulas de mezcla que se menciona en la Tabla 2-2, y que se resumen a continuación.

Existen dos tipos de métodos de acuerdo a la información que se disponga:

- Método A: Se conoce el porcentaje de RAP que se utilizará, el grado de desempeño final que se desea del ligante de la mezcla y las propiedades del ligante del RAP.
  Con estos datos se calcula el grado de desempeño (PG) del asfalto virgen utilizando la siguiente fórmula para temperatura alta, intermedia y baja de forma separada:

$$T_{virgen} = \frac{T_{mezcla} - (\%RAP \; x \; T_{RAP})}{(1 - \%RAP)}$$ **Ecuación 1**

  Dónde:
  T_{virgen} : Temperatura crítica (alta, intermedia y baja) del asfalto virgen.
  $T_{mez\,cla}$: Temperatura crítica deseada (alta, intermedia y baja) del asfalto de la mezcla.
  $\%RAP$: Porcentaje de RAP expresado como decimal.
  T_{RAP} : Temperatura crítica (alta, intermedia y baja) del asfalto recuperado del RAP.

- Método B: Se conoce el grado de desempeño (PG) del asfalto virgen, del asfalto resultante de la mezcla y las propiedades del asfalto recuperado del RAP.
  Con estos datos se puede determinar la cantidad apropiada de RAP que se debe utilizar, utilizando la siguiente fórmula para temperatura alta, intermedia y baja de forma separada:

$$\% \, RAP = \frac{T_{mezcla} - T_{virgen}}{T_{RAP} - T_{virgen}}$$ **Ecuación 2**

Finalmente se procede a realizar la mezcla con las siguientes diferencias al proceso normal (mezclas asfálticas sin RAP):

- Al momento de calentar el RAP hay que considerar que contiene asfalto por lo que no puede ser calentado de la misma manera que los agregados vírgenes para no dañar sus propiedades. Se recomienda calentar el RAP a 110°C sin sobrepasar las 2 horas.

- Para compensar la introducción de un material de menor temperatura a la mezcla, los agregados vírgenes deben ser calentados a una temperatura más alta que la de mezclado por un cierto periodo de tiempo, un criterio es aumentar 0,5°C por cada porcentaje de RAP usado.

- Se debe considerar que los agregados aportados por el RAP contiene además ligante, por lo que se debe reducir la cantidad de asfalto virgen.

- Se puede necesitar un cambio en el PG del asfalto virgen.

El proyecto NCHRP 9-12 "Incorporación de pavimento asfáltico reciclado en el sistema Superpave"[5] analiza la siguiente pregunta: En las mezclas asfálticas con RAP ¿hasta qué punto el ligante reciclado se mezcla con el nuevo? Y responde considerando tres casos:

- "Black rock": El asfalto del RAP no se mezcla con el asfalto virgen, por lo que no contribuye al desempeño de la mezcla.
- Mezcla completa entre el asfalto del RAP y el asfalto virgen.
- Mezcla parcial

Es importante resolver esta duda ya que si se asume que ocurre una mezcla completa cuando en realidad el RAP actúa como "black rock" entonces resultará una mezcla menos rígida a lo esperado, y al contrario, si se asume que actúa como "black rock" cuando en realidad ocurre mezcla, se tendrá una mezcla más rígida de lo esperado.

El estudio se realizó con dos contenidos de RAP, 10 y 40% y los resultados fueron:

- No hay diferencia significativa entre los tres casos de mezcla cuando se utiliza bajo porcentaje de RAP en la mezcla.
- Con altos contenidos de RAP la diferencia es notoria cuando el RAP actúa como "black rock", la mezcla presenta menor rigidez y mayores deformaciones.
- Finalmente concluye que el RAP no actúa como "black rock" pero que tampoco es razonable sugerir que ocurre una mezcla completa, por lo que la opción es una mezcla parcial.

2.3. DESEMPEÑO MEZCLAS ASFÁLTICAS

Los deterioros que afectan el desempeño de pavimentos de mezclas asfálticas son:

1. Agrietamiento por fatiga.
2. Ahuellamiento.
3. Agrietamiento térmico.

2.2.1 Agrietamiento por fatiga

La fatiga es el deterioro que se produce en un material a consecuencia de cargas repetitivas con una magnitud inferior a la resistencia que puede soportar el material y generalmente ocurre en etapas tardías de la vida de servicio del pavimento, ya que el asfalto se encuentra más rígido[6].

Este deterioro es también denominado “piel de cocodrilo”, debido al patrón de grietas que genera, como se aprecia en la Figura 2-1.

Figura 2-1: Deterioro piel de cocodrilo

El mecanismo típico de esta falla son grietas provocadas por cargas que generan flexión en la capa asfáltica y que comienzan al fondo de ésta propagándose hacia la superficie. Es decir que cuando las grietas son visibles, la carpeta está agrietada en todo su espesor.

Los ensayos de fatiga para mezclas asfálticas consisten en someter a una probeta a solicitaciones repetitivas e idénticas para determinar el número de ciclos de carga que puede soportar, algunos de los métodos de ensayo que se utilizan[7]:

- Ensayos flexión simple.
- Ensayos flexión con apoyos.
- Ensayos axiales directos.
- Ensayos diametrales.
- Ensayos triaxiales.
- Ensayos de pistas.

2.2.2 Ahuellamiento

Deterioro típico de pavimentos flexibles, corresponde a una deformación permanente vertical que se refleja como una depresión en la huella del neumático.

Es provocado por la acumulación de pequeñas deformaciones inelásticas, es decir deformaciones que no son recuperables luego de que la carga se haya removido.

Cuando una carga es aplicada sobre la superficie del pavimento, las capas se deformarán dependiendo de su módulo y espesor viéndose favorecido cuando está expuesto ya sea por separado o en forma combinada a altas temperaturas, tránsito pesado y bajas velocidades de carga. Cuando la carga es removida, no toda la deformación desaparece, permanece una deformación residual, por lo que cargas repetitivas provocarán que ésta se acumule, aumentando la deformación permanente y el ahuellamiento.

El mecanismo que ocurre se puede dividir en 2 tipos[8]:

1. Deformaciones verticales inelásticas en una dimensión

Puede deberse al resultado de la densificación adicional de las capas del pavimento, o de la consolidación de los materiales no ligados y suelos, lo que puede ser consecuencia de una compactación inadecuada de las capas, las cuales seguirán compactándose una vez que el pavimento sea abierto al tránsito.

El perfil transversal del pavimento presenta una depresión cerca del centro de la trayectoria de los neumáticos, sin acumulación del material asfaltico a ambos lados de esta depresión, como se observa en la Figura 2-2. Este tipo de deformación usualmente resulta en un nivel de ahuellamiento bajo a moderado.

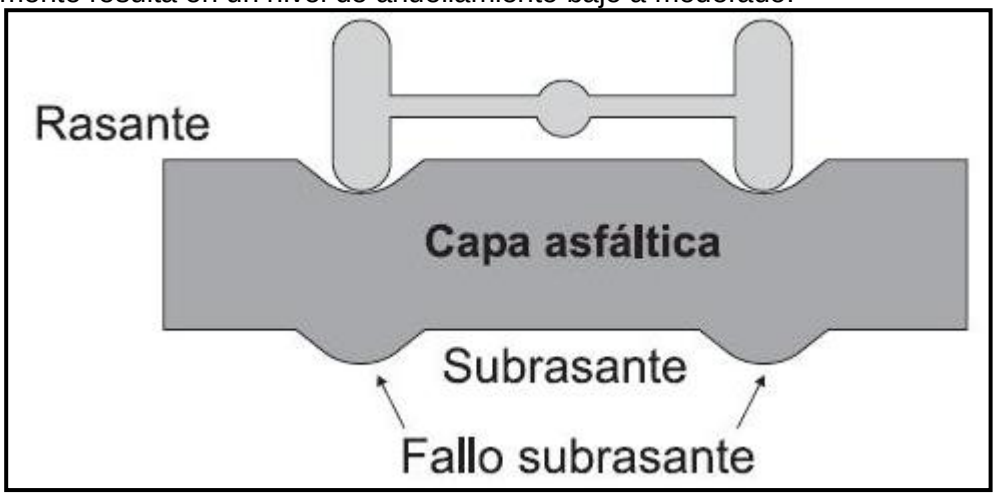


Figura 2-2: Ahuellamiento por falla subrasante

2. Deformaciones inelásticas en dos dimensiones

Son consecuencias de los esfuerzos de corte que se originan en la capa asfáltica como en las capas subyacentes y se caracteriza porque no produce cambios volumétricos.

El perfil transversal del pavimento se caracteriza por una depresión en el centro de la trayectoria de los neumáticos y por acumulación de material asfaltico a ambos lados de esta depresión, como se aprecia en la Figura 2-3 y genera un nivel de ahuellamiento alto o severo.

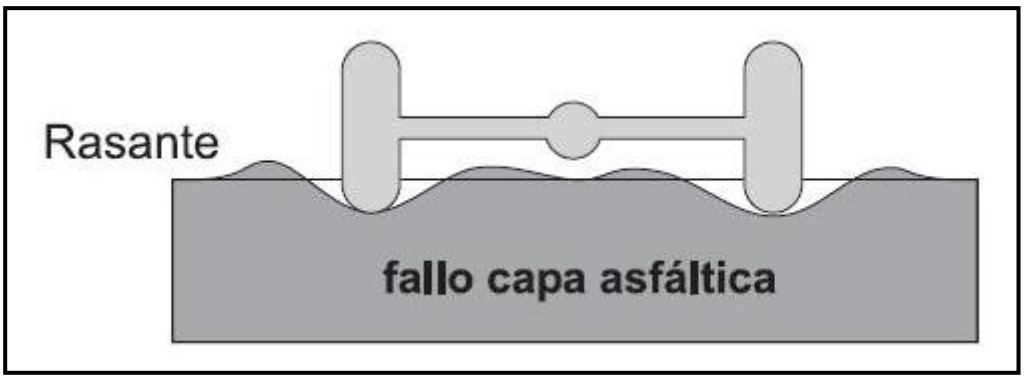


Figura 2-3: Ahuellamiento por falla mezcla asfáltica

A continuación se mencionan los factores que contribuyen al desarrollo de deformaciones permanentes en mezclas asfálticas[9]

1.- Propiedades volumétricas

- Porcentaje de vacíos: Un bajo porcentaje de vacíos provoca exudación de la mezcla asfáltica y posterior ahuellamieto, ya que la carga del tránsito hará que el mástico se mueva hacia las zonas de vacíos, pero al tener pocos vacíos el escape de éste se hará hacia la superficie. Mientras que un alto porcentaje de vacíos provocará que la mezcla se compacte mientras este en servicio y será en mayor grado en la circulación del neumático pudiendo generar problemas de seguridad y confort.

- Vacíos del agregado mineral (VAM): Un bajo VAM puede indicar que en terreno el asfalto no tendrá suficiente espacio, por lo tanto podría ahuellarse y exudar. Alto porcentaje de VAM hace que se requiera un mayor contenido de asfalto, este exceso podría provocar un debilitamiento del esqueleto granular.

- Porcentaje de ligante: Exceso de ligante actúa como efecto lubricador sobre el agregado, reduciendo el contacto entre ellos y disminuyendo la fricción interna de la mezcla.

2.- Granulometría

Para que una mezcla sea resistente al ahuellamiento debe existir contacto entre las partículas gruesas de agregado, es por esto que los agregados de menor tamaño deben ocupar el espacio que dejan los agregados gruesos sin interferir en el contacto entre ellos.

Exceso de áridos de tamaño medio puede provocar inestabilidad en un principio, luego las partículas de reordenan permitiendo el contacto entre las partículas gruesas.

El polvo mineral o filler también cumple un rol importante, ya que al mezclarse con el ligante (mástico) rellena los vacíos del agregado mineral, además cumple funciones de impermeabilización.

La Tabla 2-3 resume como afectan algunas propiedades del agregado a la resistencia al ahuellamiento:

Tabla 2-3: Propiedades del agregado

Propiedades	Efecto sobre la resistencia al ahuellamiento.
Angularidad del agregado grueso y fino	Una mayor angularidad mejora la resistencia al ahuellamiento al tener una mejor resistencia al corte.
Partículas planas y alargadas	Tienden a quebrarse provocando cambios en la granulometría original y sus propiedades. Crean planos preferenciales de deslizamiento y reducen la trabazón.
Contenido de arcilla	Se debe controlar el contenido ya que hace a la mezcla propensa a sufrir daños por humedad.

3.- Agua

La presencia de agua genera perdida de resistencia y durabilidad de las mezclas asfálticas ya que favorece el desprendimiento del ligante del agregado, lo cual se ve incrementado por las altas temperaturas y la acción del tránsito.

2.2.2.1 Ensayos

El 1994 nace el método Superpave (Superior Perfomance Asphalt Pavements), el cual fue desarrollado como un sistema de diseño para mezclas asfálticas, que incorpora los requerimientos de tráfico, clima y estructura del pavimento de cada proyecto.

El método no incluye un ensayo como el ensayo de estabilidad y flujo del método de Marshall, que ayude a determinar si la mezcla es apropiada o no para las condiciones específicas del proyecto, es decir un ensayo que sea capaz de relacionar el material con su desempeño en terreno.

De esta forma nació la necesidad de un ensayo simple para evaluar el probable comportamiento de las mezclas asfálticas en terreno.

En 1996, la Administración Federal de Carreteras (FHWA) dispuso fondos para encontrar los ensayos que apoyen el método de diseño Superpave.

El proyecto se continuó en 1999 con el nombre de Proyecto NCHRP 9-19 “Gestión de Modelos de comportamiento y apoyo a Superpave”[10]. El objetivo de este proyecto fue encontrar los ensayos simples de comportamiento (Simple Perfomance Test, SPT), que se definen como ensayos que de manera precisa y confiable midan una característica o parámetro de la mezcla asfáltica y que tengan una excelente correlación con los valores medidos de una falla del pavimento (deformación permanente y agrietamiento), manteniéndose en una gran diversidad de rangos de tráfico y condiciones climáticos. Es decir que los resultados de los ensayos deben permitir determinar la habilidad de la mezcla para resistir agrietamientos y asentamientos permanentes bajo condiciones específicas.

El equipo de investigación del proyecto estableció tres ensayos:

- Módulo Dinámico
- Tiempo de Flujo (Flow Time)
- Número de Flujo (Flow Number)

El ensayo Flow Number, es una forma de medir las deformaciones permanentes al aplicar a la probeta miles de repeticiones. Ensayo que se encuentra detallado en el Capítulo 4, sección 4.2.

El ensayo de Módulo Dinámico fue reconocido para ser parte de los SPT porque con sus resultados se puede analizar tanto el ahuellamiento y el agrietamiento por fatiga, además tiene la ventaja que E* es considerado el principal input para caracterizar las mezclas en el diseño empírico mecanicista de pavimentos. Este ensayo se encuentra detallado en el Capítulo 4, sección 4.1.

<u>Ensayo de ruedas cargadas</u>

Los ensayos de Rueda de Cargada simulan el efecto a escala en laboratorio del tránsito sobre el pavimento.

Existen distintos dispositivos de ruedas cargadas, entre las cuales:

- Rueda Cargada de Hamburgo (HWT: Hamburg Wheel Tracking Test)
- Evaluador de pavimentos de la Universidad de Nottingram
- Rueda Cargada de Georgia (GLWT)

En esta memoria se trabajó con el ensayo de rueda de Hamburgo, ensayo originario de la ciudad de Hamburgo, Alemania creado por la empresa Helmut-Wind Incorporated el año 1970.

El ensayo mide el efecto del ahuellamiento y la susceptibilidad a la humedad cuando de forma axial pasa sobre la probeta una rueda de acero cargada, usualmente la prueba se realiza sumergida en agua.

Más detalles del ensayo se encuentran en el capítulo 4, sección 4.3.

La Tabla 2-4 tiene como objetivo visualizar ventajas y desventajas de los dos ensayos utilizados en este estudio para medir deformación permanente en laboratorio, Rueda de Hamburgo y Flow Number:

Tabla 2-4: Ventajas y desventajas RH y FN

Ensayo	Ventajas	Desventajas
Rueda de Hamburgo	Simple y práctico. Puede realizarse con muestras de laboratorio y de terreno. Mide ahuellamiento y daño por humedad. Entrega correlaciones razonables con el desempeño en terreno.	El ensayo se realiza solo a 50°C, es necesario conocer la respuesta a otras temperaturas, por ejemplo la de terreno. Insuficiente para caracterizar la resistencia al corte de las mezclas. No entrega propiedades de la mezcla para el diseño estructural.
Flow Number o Número de Flujo	Tiempo razonable de ensayo (< 3 horas), lo que lo potencia a ser un ensayo de rutina diario. Entrega múltiple parámetros (FN, Índice FN, e (F), t (F)).	Todavía necesita validación con datos de terreno. La fabricación de probetas es laboriosa y larga.

2.2.3 Agrietamiento térmico

Se caracteriza por la aparición de fisuras transversal al camino, y se originan debido a la contracción de la carpeta a causa de las bajas temperaturas, lo que genera esfuerzos dentro de la capa que al exceder la resistencia a la tracción generarán las grietas, como se observa en la Figura 2-4:

Figura 2-4: Agrietamiento térmico

3. MATERIALES Y PREPARACIÓN DE PROBETAS

En este estudio se incluye la caracterización de tres mezclas asfálticas en caliente, todas con granulometría IV-A-12 y betún CA-24, en dos de ellas se le agregó RAP, según lo especificado en la Tabla 3-1:

Tabla 3-1: Mezclas asfálticas analizadas

Mezcla	Contenido de Asfalto Virgen%	Contenido de Asfalto %	RAP Grueso ¾" %	RAP Fino ½" %
1	5	5	---	---
2	4,75	5	8	---
3	4,25	5	12	6

La tres mezclas asfálticas se fabrican con áridos aportados por la empresa Constructora Asfalcura S.A, la que también proporciona el diseño de éstas, utilizando el método Marshall, sección 8.302.47 del Manual de Carreteras[11].

Los materiales que se utilizaron para la elaboración de las tres mezclas asfálticas se describen en esta sección.

3.1. RAP

La granulometría y porcentaje de asfalto del material reciclado entregado por la empresa, se presenta en la Tabla 3-2:

Tabla 3-2: Granulometría RAP

TAMIZ	RAP Fracción	
mm	Fina	Gruesa
25	100	100
20	100	100
12,5	100	82
10	100	65
5	87	23
2,5	53	13
0,63	18	3
0,315	11	2
0,16	6	2
0,08	4	2
% asfalto	6,50%	3,17%

Conocido el porcentaje de asfalto que aporta el RAP y el porcentaje de éste que será utilizado en cada mezcla, se realizan los cálculos siguientes para obtener la cantidad de asfalto virgen que se utilizará, de esta forma corroborar que se cumpla con el 5% de asfalto en la mezcla.

Se debe tener en cuenta que el RAP aporta con agregados y asfalto, por lo que el aporte de agregados provenientes del RAP se calcula:

$$\%\ RAP\ agregados = \%\ RAP\ mezcla\ x\ (1 - \frac{P_{b,RAP}}{100})$$ **Ecuación 3**

Dónde:

$\%\ RAP\ agregados$= Porcentaje de agregados que provienen del RAP

$\%\ RAP\ mezcla$= Cantidad de RAP usado en la mezcla, en porcentaje

$P_{b,RAP}$= % de asfalto que contiene el RAP

Los resultados se encuentran en la Tabla 3.1

Tabla 3-3: % de agregados aportados por el RAP

Mezclas	% de agregados que aporta el RAP	
	Fino	Grueso
Mezcla 2	---	7,75
Mezcla 3	5,61	11,62

Con este resultado se deben ajustar los porcentajes de los agregados vírgenes para que la mezcla tenga la granulometría que exige el diseño, utilizando la siguiente fórmula:

$$\%\ Agr.v = \%Agr_{virgen,n} + \frac{\%Agr_{virgen,n}}{\sum_{i=1}^{n} Agr_{virgen,i}} x(\%\ RAP\ mezcla - \%RAP\ agregados)$$ **Ecuación 4**

Dónde:

$\%\ Agr.v$= Cantidad de agregados vírgenes, en porcentaje

$\%Agr_{virgen,n}$= Porcentaje de agregado virgen n (grueso, fino, polvo roca)

$\%\ RAP\ agregados$= Porcentaje de agregados que provienen del RAP

$\%\ RAP\ mezcla$= Cantidad de RAP usado en la mezcla, en porcentaje

Los resultados para la mezcla 2 y 3 se resumen en la Tabla 3-4 y como se aprecia al utilizar un bajo porcentaje de RAP en este estudio, la diferencia entre el % de diseño y el % ajustado de agregados es mínima.

Tabla 3-4: Granulometría ajustada

Material	% ajustado		% diseño	
	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 2	Mezcla 3
Grava ¾”	16,04	16,15	16,00	16,00
Grava ½”	22,06	16,15	22,00	16,00
Polvo Roca	54,15	50,47	54,00	50,00

Finalmente para obtener la cantidad de asfalto virgen que se utilizará para lograr el 5% de diseño se debe restar el asfalto que aportará el RAP:

$$Asf.v = Peso\ Total\ \ agregado\ x\ Pb - P_{b,RAP}\ x\ \%RAP\ x\ Peso\ Total\ agregado$$ **Ecuación 5**

Dónde:

$Asf.v$= Cantidad de asfalto virgen usado en la mezcla, en peso

$RAP\ agregados$= Cantidad de agregados que provienen del RAP, en peso

$RAP\ mezcla$= Cantidad de RAP usado en la mezcla, en peso

Pb= Contenido de asfalto deseado de la mezcla (5%), en porcentaje

Tabla 3-5: Cantidad de asfalto virgen

Mezcla	% Asfalto virgen
Mezcla 2	4,75
Mezcla 3	4,25

3.2. BETÚN ASFÁLTICO

El ligante utilizado para la preparación de las probetas corresponde a un ligante asfáltico tradicional CA 24, asfalto especificado en función de su viscosidad a 60°C.

Existe otra forma de clasificar los ligantes que es a través de su grado de desempeño (PG). Éste identifica el rango de temperatura máxima y mínima en el que el ligante asfáltico presenta un desempeño aceptable frente a las solicitaciones del tráfico. Y se logra sometiendo a los betunes asfálticos a distintos ensayos reológicos, a diferentes temperaturas y a diferentes niveles de envejecimiento para predecir el real impacto en el desempeño del pavimento.

Una de las ventajas de esta clasificación, es que se simulan las tres etapas críticas de la vida del asfalto:

- Etapa 1: Asfalto original, donde se representa la primera etapa de transporte, almacenamiento y manejo.
- Etapa 2: Representa el asfalto durante la producción, mezcla y construcción y se simula sometiendo al asfalto al horno rotatorio de película delgada (HPDR).
- Etapa 3: Simula cuando el asfalto envejece desde que es colocado en la carpeta asfáltica, hasta el final de su vida de diseño, esto se logra sometiendo al asfalto a la cámara de envejecimiento a presión (PAV).

Otra ventaja de este sistema es que permite medir las propiedades físicas de los cementos asfálticos que pueden ser relacionadas con los parámetros de desempeño en terreno:

- Ahuellamiento: Este deterioro está asociado a altas temperaturas y bajas velocidades de carga.
- Fatiga: Deterioro asociado a temperaturas intermedias.
- Agrietamiento térmico: Deterioro asociado a temperaturas bajas y velocidades de carga rápidas.

En la memoria de Pedro González se encuentra la clasificación PG del ligante CA-24, resultados que se entregan a continuación:

3.1.1 Clasificación por grado de desempeño

La clasificación por grado de desempeño se realiza bajo la norma ASTM D6373-15[12].

La clasificación para altas temperaturas se obtuvo en base a los criterios de falla $\frac{G^*}{\sin\delta}$ en betunes en estado original y con envejecimiento primario, considerando el caso más conservador.

1. Asfalto Original

Tabla 3-6: DSR Asfalto original

Parámetro $\frac{G^*}{\sin\delta}$ ≥ 1 [KPa]							
Temperatura de Ensayo [°C]						Temperatura de Falla [°C]	Temperatura Promedio
58	**64**	**70**	**76**	**82**	**88**		
3,49	1,66	0,83				68,4	
3,66	1,71	0,84				68,5	68,5

2. Asfalto con envejecimiento primario, mediante HPDR

Tabla 3-7: DSR Asfalto con envejecimiento primario, Asfalto original

Parámetro $\frac{G^*}{\sin\delta}$ ≥ 2,2 [KPa]							
Temperatura de Ensayo [°C]						Temperatura de Falla [°C]	Temperatura Promedio
58	**64**	**70**	**76**	**82**	**88**		
7,81	3,58	1,70				67,9	
7,60	3,51	1,69				67,8	67,9

Para la clasificación del grado de desempeño para temperaturas bajas se utiliza el ensayo detallado en la norma ASTM D6648-08[13] realizado con el equipo BBR y los resultados son los siguientes:

Tabla 3-8: BBR Asfalto original

N° Análisis	T [°C]	S [MPa]	Valor m	Criterio Rigidez	Criterio Valor m
1	-6,0	80,175	0,374	CUMPLE	CUMPLE
2	-6,0	82,720	0,371	CUMPLE	CUMPLE
3	-12,0	134,740	0,380	CUMPLE	CUMPLE
4	-12,0	142,028	0,368	CUMPLE	CUMPLE
5	-18,0	249,022	0,293	CUMPLE	FALLA
6	-18,0	238,126	0,298	CUMPLE	FALLA

Para la clasificación de temperaturas intermedias se utilizó el criterio $G^* \sin\delta$ para betunes con envejecimiento secundario en PAV en el equipo DSR:

Tabla 3-9: DSR Asfalto envejecimiento secundario, asfalto original

Parámetro $G^* \sin\delta$ ≤5000 [KPa]							
Temperatura de Ensayo [°C]						**Temperatura de Falla [°C]**	**Temperatura Promedio**
31	**28**	**25**	**22**	**19**	**16**		
1440	2210	3330	4940	7150		21,9	
1330	2040	3070	4550	6540		21,2	21,6

La temperatura intermedia mostrada en la tabla anterior, debe ser menor que la temperatura esperada del pavimento, calculada de la siguiente forma:

$$Temperatura\ Intermedia\ °C = \frac{XX - YY}{2} + 4$$ **Ecuación 6**

Donde

XX: Temperatura máxima °C, según las clasificación por grado de desempeño PG

YY: Temperatura mínima °C, según las clasificación por grado de desempeño PG

Finalmente la clasificación por grado de desempeño para el ligante virgen se resume en la Tabla 3-10:

Tabla 3-10: Clasificación Superpave

Asfalto	**Clasificación Superpave**				**Temperatura Intermedia**	
	ASTM D6373-15		Exacta			
	PG-XX	PG-YY	PG-XX	PG-YY	Exacta	Esperada
Original	64	-22	68	-27	21,6	25,0

3.3. ÁRIDOS

Los áridos utilizados para las tres mezclas asfálticas provienen de la misma fuente, y son proporcionados por la empresa constructora Asfalcura S.A.

- Granulometría

Las mezclas asfálticas en este estudio poseen una granulometría semi-densa, cumpliendo con la banda granulométrica IV-A-12 que se encuentra definida en la Tabla 5.408.201.F del Manual de Carreteras[14].

La granulometría de cada mezcla se detalla a continuación:

- Mezcla 1

Tabla 3-11: Granulometría Mezcla 1

Tamiz		Grava ¾"	Grava ½"	P. Roca	Mezcla	Banda IV-A-12	
mm	ASTM						
25	1"	100	100	100	100	100	100
20	3/4"	100	100	100	100	100	100
12,5	1/2"	36	100	100	88	80	95
10	3/8"	1	77	100	76	70	85
5	#4	1	5	90	53	43	58
2,5	#8		1	60	34	28	42
0,63	#30			30	17	13	24
0,315	#50			22	13	8	17
0,16	#100			16	9	6	12
0,08	#200			11	6	4	8

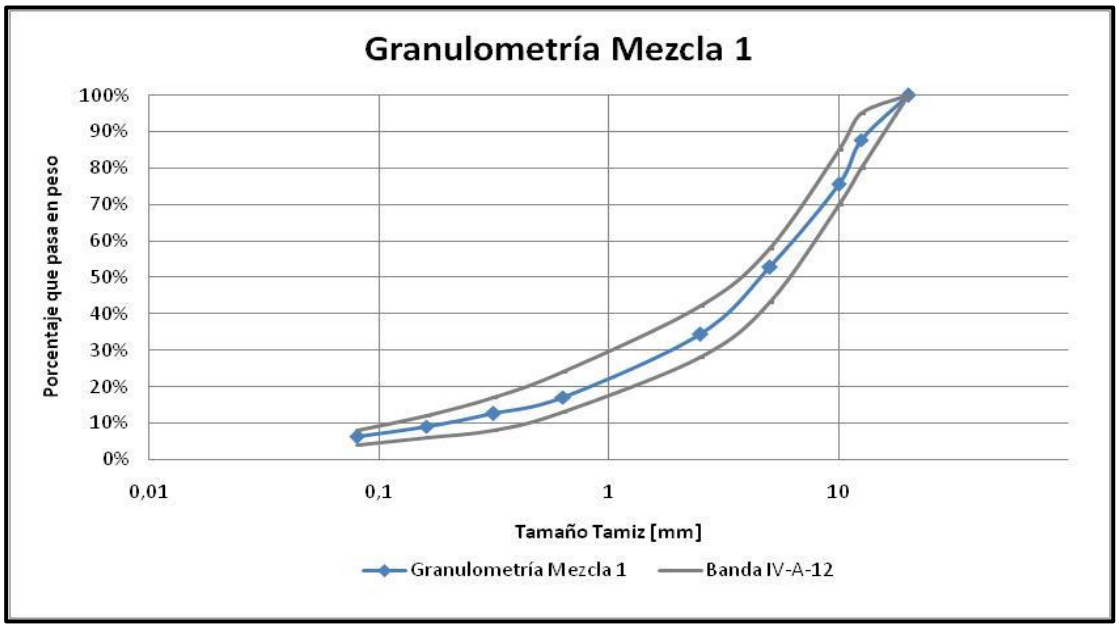


Figura 3-1: Granulometría Mezcla 1

- Mezcla 2

Tabla 3-12: Granulometría Mezcla 2

Tamiz		Grava	Grava	P. Roca	RAP	Mezcla	Banda	
mm	ASTM	¾”	½”		Grueso		IV-A-12	
25	1”	100	100	100	100	100	100	100
20	3/4”	100	100	100	100	100	100	100
12,5	1/2”	36	100	100	82	88	80	95
10	3/8”	1	77	100	65	76	70	85
5	#4	1	5	90	23	52	43	58
2,5	#8		1	60	13	34	28	42
0,63	#30			30	3	16	13	24
0,315	#50			22	2	12	8	17
0,16	#100			16	2	9	6	12
0,08	#200			11	2	6	4	8

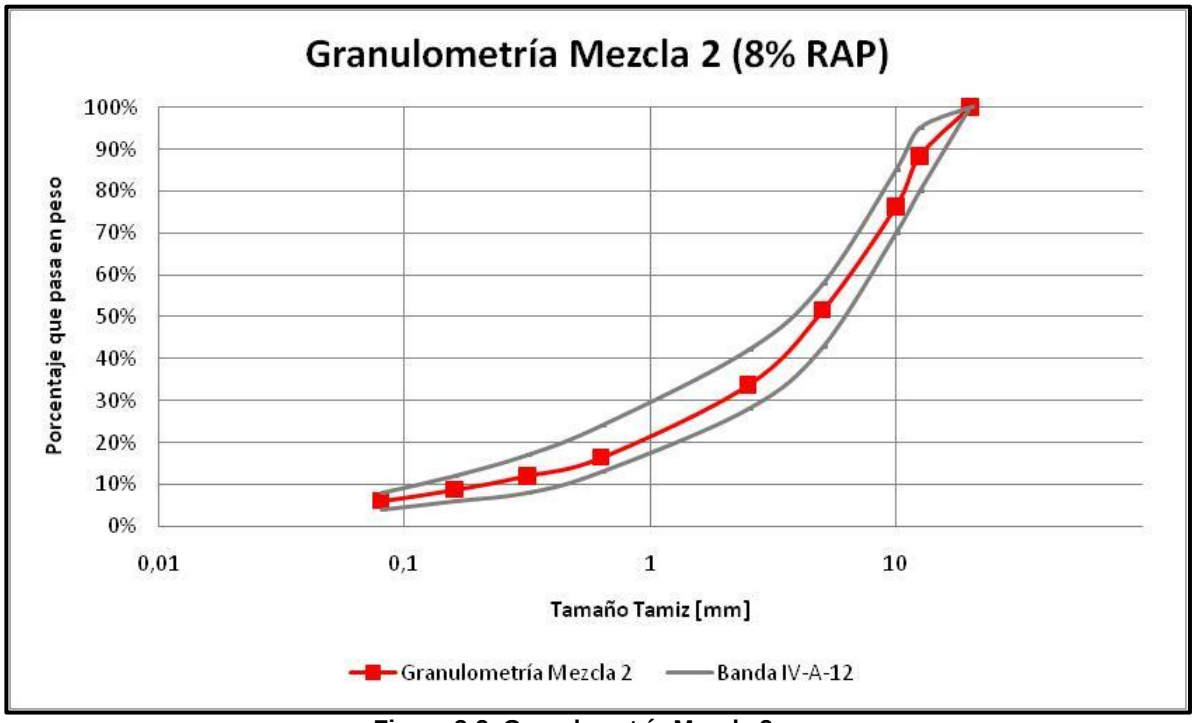


Figura 3-2: Granulometría Mezcla 2

- Mezcla 3

Tabla 3-13: Granulometría Mezcla 3

Tamiz		Grava	Grava	P.	RAP	RAP	Mezcla	Banda	
mm	ASTM	¾”	½”	Roca	Grueso	Fino		IV-A-12	
25	1”	100	100	100	100	100	100	100	100
20	3/4”	100	100	100	100	100	100	100	100
12,5	1/2”	36	100	100	82	100	88	80	95
10	3/8”	1	77	100	65	100	76	70	85
5	#4	1	5	90	23	87	54	43	58
2,5	#8		1	60	13	53	35	28	42
0,63	#30			30	3	18	16	13	24
0,315	#50			22	2	11	12	8	17
0,16	#100			16	2	6	9	6	12
0,08	#200			11	2	4	6	4	8

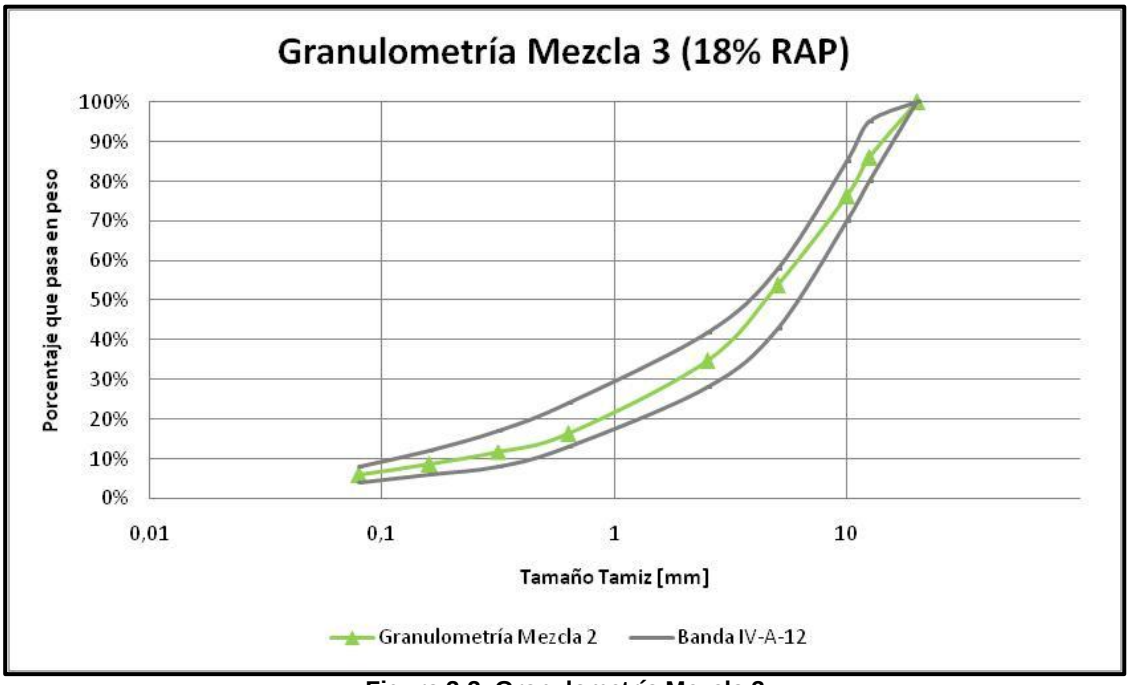


Figura 3-3: Granulometría Mezcla 3

3.4. CÁLCULO DE MATERIAL

En primer lugar para calcular la cantidad de material que se ocupará de áridos y ligante, según las proporciones indicadas en el diseño, se necesita conocer:

- Densidad máxima suelta, densidad que se obtuvo según Manual de Carreteras 8.302.38[15] con los resultados que se presentan en la Tabla 3-14.

Tabla 3-14: Densidad maxima suelta

	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Dmm [kg/m3]	2517,7	2518,6	2527,7

- Dimensiones de las probetas que se ensayarán

Tabla 3-15: Dimensiones probetas

Ensayo	Dimensiones [mm]	Imagen
Módulo Dinámico y Flow Number	Diámetro: 150 Altura: 170	
Rueda de Hamburgo	Diámetro: 150 Altura: 62	

- Porcentaje de vacíos de aire: En la Tabla 3-16 se muestran los porcentajes y el rango aceptable según la norma de cada ensayo:

Tabla 3-16: % Vacíos de aire

Ensayo	% Vacíos de Aire
Módulo Dinámico	7 ± 0,5
Flow Number	7 ± 0,5
Rueda de Hamburgo	7 ± 1,0

3.5. ACONDICIONAMIENTO DE LOS MATERIALES

Una vez calculado las cantidades exacta de material a utilizar, se deben acondicionar. El acondicionamiento consiste en llevar a los materiales a la temperatura ideal de mezclado (155 ± 5°C). Los áridos son secados por al menos 12 horas y el ligante aproximadamente 2 horas o hasta que alcance la temperatura indicada.

Para el caso de la mezcla 2 y 3, el RAP también fue acondicionado, en este caso a 130°C toda una noche.

3.6. MEZCLADO

Una vez terminado el proceso de acondicionamiento, se deben unir todos los materiales que componen la mezcla asfáltica. En primer lugar se retiran los áridos del horno y se mezclan con el RAP, en el caso que corresponda. Se debe formar un espacio en el centro de la mezcla de áridos para colocar la cantidad de ligante que indique el diseño.

Todo el proceso de mezcla se hizo en forma manual y en el mínimo tiempo necesario de manera de evitar a perdida de temperatura y procurando que todas las partículas de áridos estén cubiertas por el betún.

Tras la revisión del manual MS 2 7° Edición “Asphalt Mix Design Methods”, explicado en el capítulo 2, se encontraron diferencias en el procedimiento mencionado en el manual y el realizado en esta memoria, que son necesario mencionar ya que podría afectar los resultados obtenidos.

A continuación se enumeran estas diferencias:

1.- El tiempo y la temperatura de acondicionamiento que tuvo el RAP: El manual recomienda 110°C por 2 horas. En este trabajo, el RAP tuvo un acondicionamiento de 12 horas a 130°C, por lo que el asfalto pudo haber cambiado sus propiedades.

2.- El manual recomienda aumentar la temperatura de los áridos vírgenes por un periodo de tiempo para compensar la menor temperatura del RAP al momento de la mezcla.

La áridos de la mezcla con 8% de RAP debieron haber sido calentados a 159°C y los con 18% de RAP a 164°C, como no se realizó de esta manera, se puede inferir que la temperatura de mezclado (155°C) no fue alcanzada.

3.7. ACONDICIONAMIENTO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

El fin de esta etapa es reproducir el proceso de envejecimiento a corto plazo que sufre la mezcla asfáltica en el proceso de fabricación, transporte y colocación en terreno.

Para lograrlo se siguió el procedimiento de la norma AASHTO R30[16]:

- Esparcir la mezcla en una bandeja de modo que quede de un espesor delgado.
- Colocar la mezcla en un horno por 4 [h] ± 5 [min] a una temperatura de 135 ± 3°C.
- Revolver la mezcla cada 60 ± 5 [min] para mantener las condiciones homogéneas en toda la mezcla.

3.8. COMPACTACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

La temperatura de compactación es de 145 ± 10°C, como la mezcla viene del acondicionamiento a 135°C, media hora antes del término del acondicionamiento se aumenta la temperatura para lograr la temperatura de compactación, también se deben calentar los moldes y herramientas que se utilizarán en el proceso.

Para los ensayos de Rueda de Hamburgo, Flow Number y Módulo Dinámico la compactación se realiza en el compactador giratorio.

- Compactador giratorio

El mecanismo de compactación consiste en aplicar una carga de compresión sobre la muestra a compactar, mientras se hace girar el molde con un ángulo interno y con una velocidad de gira de 30 revoluciones por minuto.

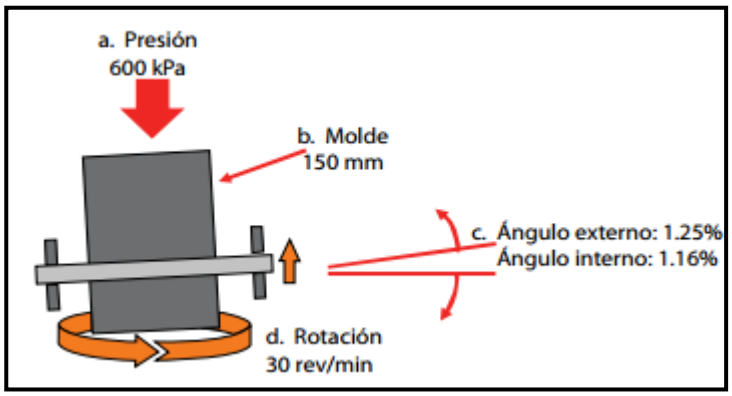


Figura 3-4: Esquema funcionamiento Compactador Giratorio[17]

Figura 3-5: Compactador Giratorio, LEMCO

Una ventaja del uso de este equipo es que se puede compactar fijando el número de giros o la altura final de la probeta, en este caso se fijó la altura de la probeta.

El equipo utilizado es de la marca Troxler, modelo 5850, el cual debe ser calibrado cada vez que es encendido, luego de esto se debe programar con los parámetros mostrados en la Tabla 3-17:

Tabla 3-17: Parámetros Compactador Giratorio

Presión	Ángulo interno	Altura de la probeta	
		Rueda de Hamburgo	Módulo Dinámico y Flow Number
600 [kPa]	1,16°	60 [mm]	170 [mm]

Cuando se alcanza la altura deseada, se deja reposar la mezcla dentro del molde (15 minutos aproximadamente) para luego ser desmoldado con el extractor de especímenes. Posteriormente, se debe dejar enfriar las probetas de un día para otro, para realizar los ensayos.

3.9. CORTE DE LAS PROBETAS DE MEZCLA ASFÁLTICA

Esta etapa difiere para cada ensayo:

- Módulo Dinámico y Flow Number

Se necesitan probetas de 100 [mm] de diámetro y 150 [mm] de largo, para esto primero se utiliza una testiguera enfriada con agua para la disminución del diámetro y luego una cortadora para obtener la altura indicada.

Figura 3-5: Testiguera

- Rueda de Hamburgo

La manera en que las probetas deben ser cortadas está dispuesta en la norma del ensayo AASHTO T324-14[18] y se muestra en la Figura 3-6:

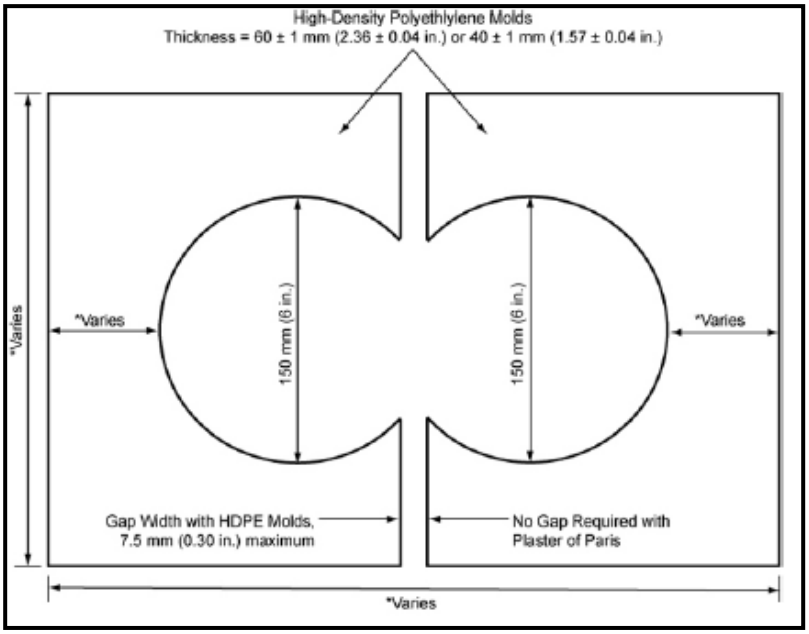


Figura 3-6: Esquema molde Rueda de Hamburgo, AASHTO T324-14

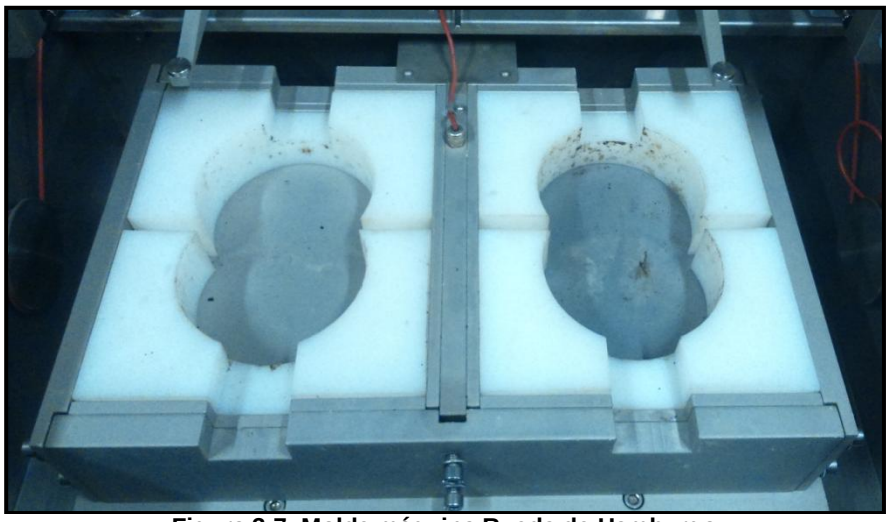


Figura 3-7: Molde máquina Rueda de Hamburgo

Como se observa en los moldes para el ensayo se necesitan 2 cilindros cortados de tal forma que juntos queden como en la Figura 3-7.

Estos cilindros deben formar además una superficie plana y larga para que la rueda pase por encima.

Figura 3-8: Probetas Rueda de Hamburgo

El corte descrito anteriormente se realiza cuando las probetas están completamente frías y para cortarlas se utiliza una mesa de corte con una sierra e incorporando agua a modo de refrigeración.

3.10. MEDICIÓN Y VERIFICACIÓN DE LA DENSIDAD

Esta etapa tiene como objetivo controlar que todas las probetas que serán ensayadas cumplan con los valores de diseño, es especial con el porcentaje de vacíos.

Para esto se debe calcular la densidad compactada de cada probeta de acuerdo al Manual de Carretera 8.302.38[15] con la siguiente fórmula:

$$G = \frac{A}{\frac{B-C}{\rho_w}} \times 1000\ [\frac{kg}{m^3}]$$ **Ecuación 7**

Dónde:

A: Masa de la probeta en aire [g].

B: Masa de la probeta en aire con superficie seca [g].

C: Masa de la probeta en agua [g].

ρ_w: Densidad del agua 1$[\frac{g}{cm^3}]$

Luego el porcentaje de vacíos se obtiene:

$$\%Va = \left(1 - \frac{G}{Dmm}\right) \times 100$$ **Ecuación 8**

Dónde:

Dmm: Densidad máxima suelta de la mezcla asfáltica.

El detalle de las características de cada probeta ensayada se encuentra en el Anexo A.

4. CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON RAP

La evaluación del efecto del RAP en las mezclas asfálticas se hará en función del módulo dinámico y los ensayos Flow Number y Rueda de Hamburgo.

4.1. MÓDULO DINÁMICO

El módulo dinámico es una propiedad del material que se utiliza en los procedimientos de diseño y análisis de pavimentos flexibles, siendo un importante parámetro en la guía de diseño empírica mecanicista. Además fue escogido como uno de los tres ensayos para complementar el diseño volumétrico Superpave.

4.1.1 Base Teórica

Para materiales visco elásticos lineales como las mezclas asfálticas, la relación esfuerzo - deformación bajo una carga sinusoidal continua, es definida como el módulo complejo (E*), y se define como la razón entre la amplitud del esfuerzo sinusoidal en un tiempo y frecuencia angular dada, y la amplitud de la deformación en el mismo tiempo y frecuencia[19].

$$E^* = \frac{\delta}{\epsilon} = \frac{\delta_o e^{i\omega t}}{\epsilon_o e^{i(\omega t - \varphi)}} = \frac{\delta_o \sin(\omega t)}{\epsilon_o \sin(\omega t - \varphi)}$$

Ecuación 9

Dónde:

δ_o = esfuerzo máximo

ϵ_o = deformación unitaria maxima

φ = ángulo de fase (grados)

ω = velocidad angular

t = tiempo en segundos

Del módulo complejo se pueden obtener dos propiedades del material:

- Ángulo de fase

El ángulo de fase está relacionado con el tiempo de retraso entre la compresión y la deformación, tal como se muestran en la Figura 4-1.

Es un indicador de lo viscoso o elástico del material, ya que un material elástico puro tendrá un ángulo de fase de cero grados (δ=0°), mientras que para un material viscoso puro será de noventa grados (δ=90°).

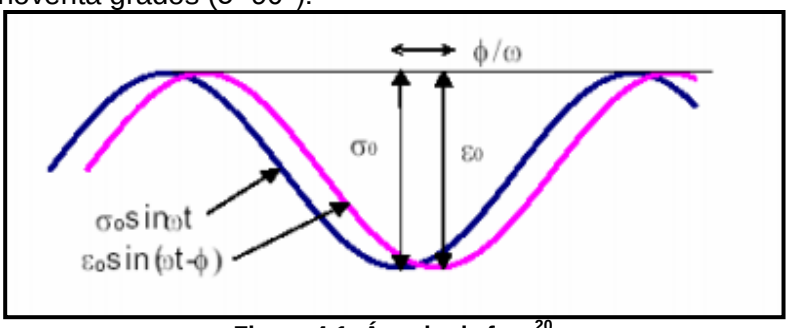


Figura 4-1: Ángulo de fase[20]

- Módulo Dinámico

Como se mencionó, una de las características del comportamiento visco elástico es la respuesta retardada, la deformación máxima alcanzada se dará en un instante posterior de cuando la carga se haya aplicado y más bien se encuentre en el instante de la descarga. Para ello, se define el módulo dinámico |E*|, que representa un comportamiento más realista en el diseño.

El módulo dinámico es el valor absoluto del módulo complejo y se define como la rigidez efectiva que estará asociada al daño por deflexión que se producirá en la mezcla asfáltica.[21]

Ecuación 10

$$|E^*| = \sqrt{(\frac{\sigma_o}{\epsilon_o} cos\varphi)^2 + (\frac{\sigma_o}{\epsilon_o} sen\varphi)^2} = \frac{\sigma_o}{\epsilon_o}$$

4.1.2 Ensayo

El módulo dinámico se evaluó de acuerdo a la norma AASHTO T342-11 “Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)”[22], en donde los especímenes son cargados con una onda tipo haversiana de compresión axial en un amplio rango de temperatura y frecuencia bajo carga controlada. Durante el ensayo se miden las deformaciones axiales recuperables que junto al esfuerzo aplicado a la probeta se usan para calcular el módulo dinámico y el ángulo de fase.

Las probetas que se utilizan son cilíndricas con dimensiones de 150[mm] de largo y 100 [mm] de diámetro, las cuales pasan por los procesos de mezclado, envejecimiento a corto plazo, compactación y cortes detallado en el Capítulo 3.

Se escogen tres probetas por mezcla, las que deben cumplir con un porcentaje de vacío de 7% y que no difiera más de 0,5% del porcentaje objetivo.

Características de las probetas se presentan en la Tabla 4-1:

Tabla 4-1: Probetas Módulo Dinámico

Mezcla	Probeta	G [kg/m3]	%Va
1	1	2291,0	7,5
	2	2316,6	6,5
	4	2307,8	6,8
2 (8%RAP)	1	2328,7	7,5
	3	2342,3	7,0
	4	2339,2	7,1
3 (18% RAP)	1	2350,9	7
	3	2357,6	6,7
	4	2364,2	6,5

Dónde:

G = Densidad real de mezclas asfálticas compactadas, densidad en que se considera el volumen del macizo de la probeta, más el volumen de los poros accesibles e inaccesibles[23].

Va = vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada, consiste en los pequeños espacios de aire entre las partículas de agregado[23].

Es importante destacar que al ser un ensayo no destructivo, se utilizan las mismas probetas luego para el ensayo de Número de Flujo o Flow Number (ensayo destructivo).

El ensayo se realiza en el equipo servo hidráulico CRT-HYD 25-II, el cual posee una cabina térmica que permite un rango de temperatura de -15°C a 60°C y es capaz de aplicar carga entre 50 a 200 [MPa] con frecuencias entre 0 a 70 [Hz]

Las probetas se deben instrumentar con LVDTs para medir las deformaciones axiales, para esto se utiliza el equipo CRT-SPTLV, el cual pega 4 topes metálicos con pegamento epóxico utilizando aire comprimido. Estos topes se pegan en dos ubicaciones separadas a 180°, sobre ellos se colocan 4 soportes plásticos para sujetar los LVDTs, como se muestra en la Figura 4-2:

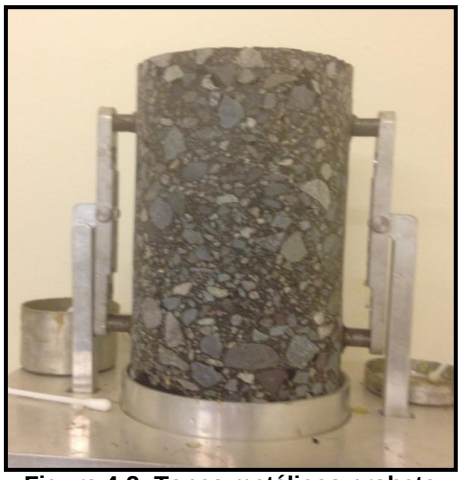


Figura 4-2: Topes metálicos probeta

Las pruebas se llevan a cabo a una temperatura de -10, 4, 21, 37 y 54°C y a frecuencia de carga de 0.1, 0.5, 1, 5, 10 y 25 [Hz]. Cada espécimen debe ser ensayado para cada una de las 30 combinaciones de temperatura y frecuencia, partiendo de la temperatura más baja y aumentando hasta la más alta. Las pruebas a cada temperatura deben comenzar con la mayor frecuencia de carga y proceder a la más baja. La cantidad de ciclos que son cargadas las probetas se presentan en la Tabla 4-2:

Tabla 4-2: Número de ciclos para ensayo módulo dinámico[22]

Frecuencia [Hz]	N° de ciclos
25	200
10	200
5	100
1	20
0,5	15
0,1	15

Para lograr la temperatura de ensayo, las probetas deben colocarse en una cámara ambiental y permitir que lleguen a la temperatura deseada con una tolerancia de ±0,3°C. En la Tabla 4-3 se presentan los tiempos mínimos de espera para alcanzar las temperaturas recomendados por la norma:

Tabla 4-3: Tiempos de equilibrios recomendados[22]

Temperatura Probeta °C	Tiempo desde una temperatura ambiente (25°C), h	Tiempo desde un ensayo anterior, h
-10	Toda la noche	Toda la noche
4	Toda la noche	Toda la noche o 4 horas
21	1	3
37	2	2
54	3	1

Las probetas deben quedar armadas como se muestra en la Figura 4-3. Las láminas de teflón que están entre la probeta y los discos de acero tienen como función reducir la fricción.

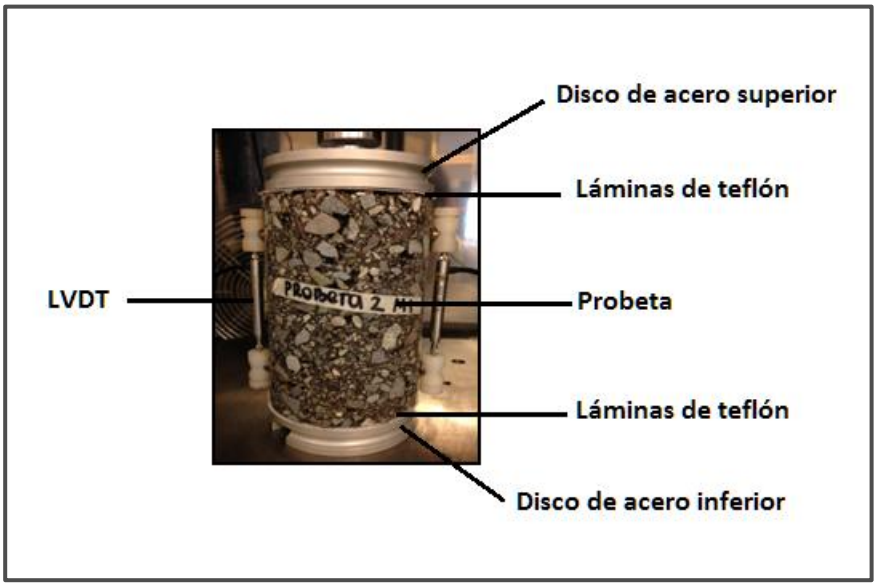


Figura 4-3: Probeta tipo para ensayo módulo dinámico

Al iniciar el ensayo se aplica una carga de contacto a las probetas igual al 5% de la carga dinámica que se aplicará. La carga dinámica que se le aplica a la muestra depende de la rigidez del espécimen y la norma entrega una tabla con recomendaciones de carga:

Tabla 4-4: Niveles de esfuerzos típicos[22]

Temperatura °C	Rango, kPa
-10	1400-2800
4	700-1400
21	350-700
37	140-250
54	35-70

Como condición, la carga dinámica debe ser ajustada de manera que las deformaciones axiales estén dentro del rango 50-150 [µstrain], ya que a esta deformación las probetas se comportan como un material visco elástico lineal.

4.1.3 Resultados

Los gráficos con los resultados del ensayo de Módulo Dinámico de las tres mezclas se presentan a continuación.

Más detalle de los resultados se encuentra en el Anexo B.

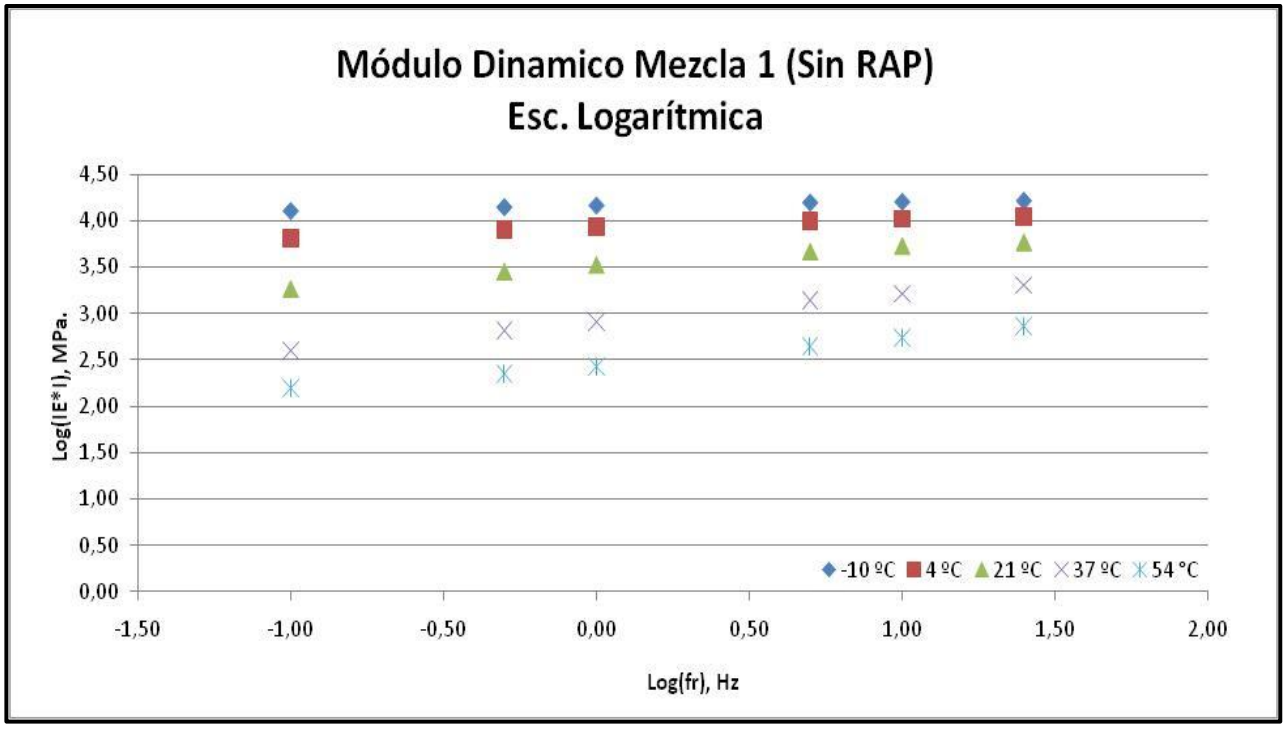


Figura 4-4: Gráfico resultados MD Mezcla 1

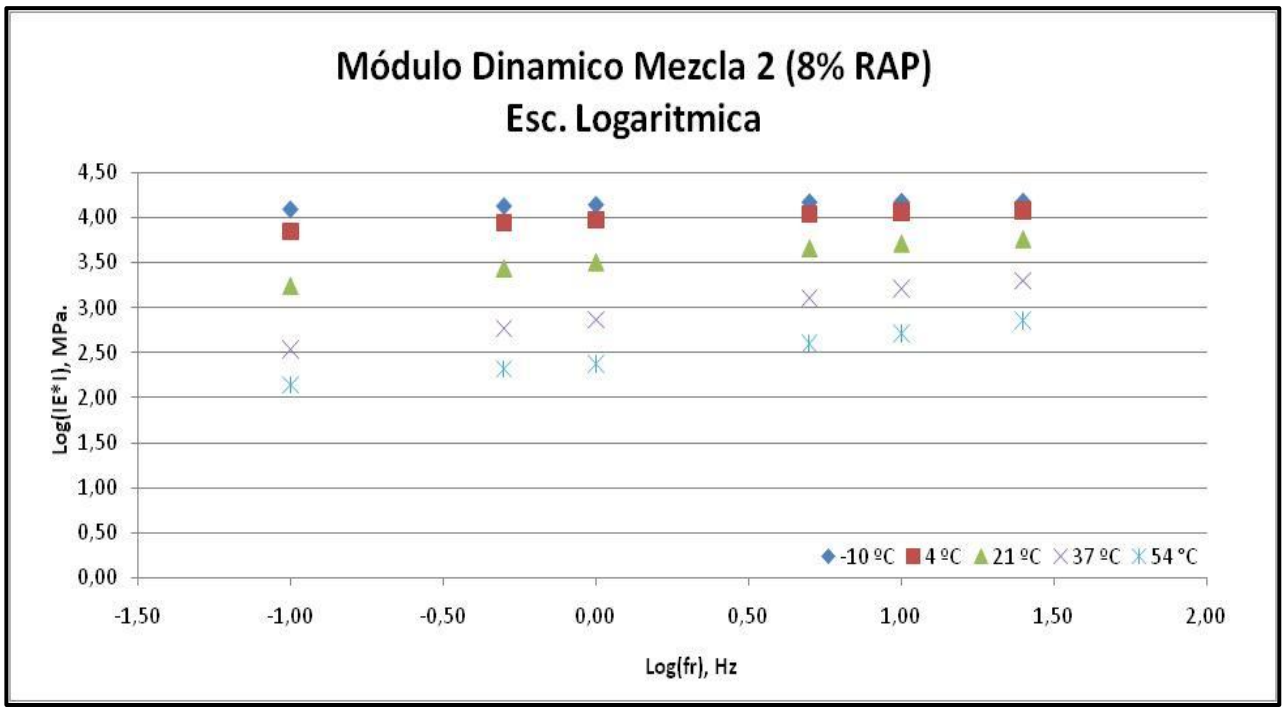


Figura 4-5: Gráfico resultados MD Mezcla 2

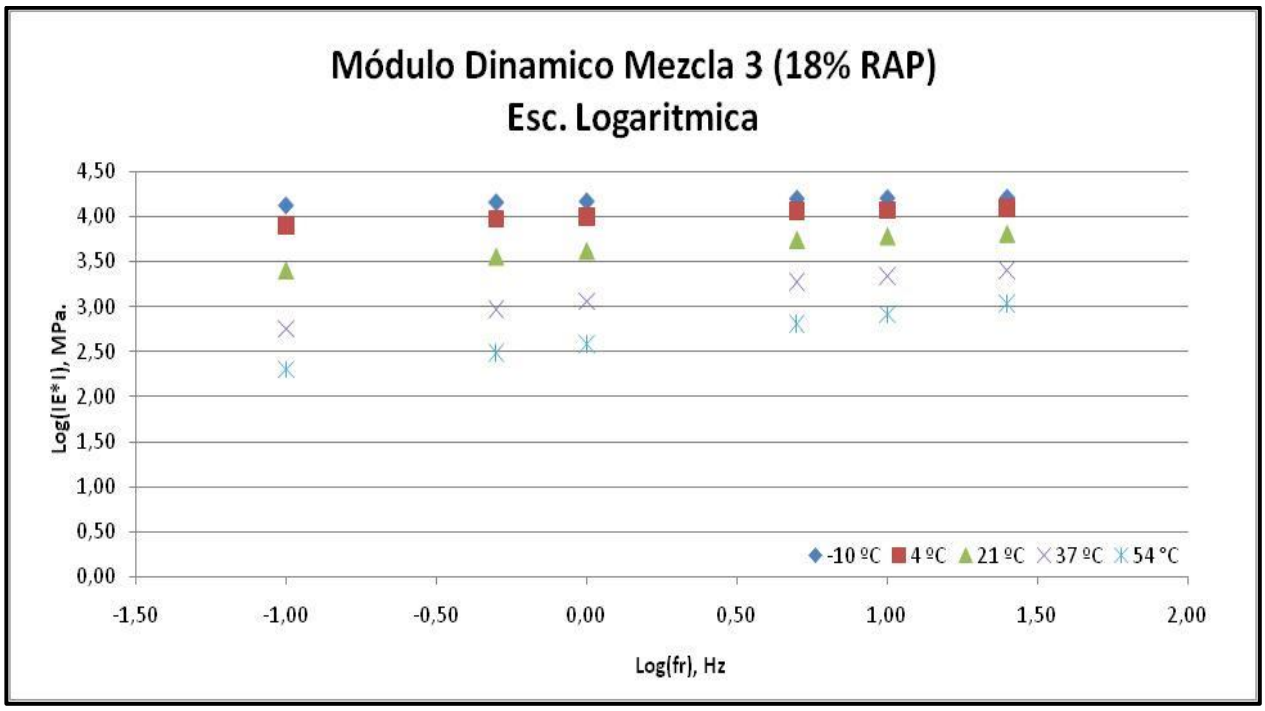


Figura 4-6: Gráfico resultados MD Mezcla 3

- *Curva Maestra*

El concepto de curva maestra se desarrolló para contabilizar los efectos de la temperatura y la frecuencia de carga en el módulo de la mezcla.

Se generan utilizando el principio de superposición de tiempo-temperatura, esto quiere decir que el comportamiento de la mezcla a elevadas temperaturas es el mismo que a frecuencias de cargas bajas y viceversa. Esta propiedad permite que los datos de prueba obtenidos de laboratorio a diferentes temperaturas y frecuencias sean desplazados horizontalmente en relación a una temperatura de referencia (21°C) o a una frecuencia, alineando así las diversas curvas para formar una curva maestra única[24]. Para alinear las curvas se utiliza el factor de desplazamiento α(T) que es distinto para cada temperatura, y se determina mediante ajuste, ya sea gráficamente o mediante cálculos. Como se utiliza 21°C de temperatura de referencia, el factor de desplazamiento es α (T)=1.

La curva maestra puede ser representada a través del ajuste de los valores obtenidos de módulo dinámico a la ecuación sigmoidal descrita por García et. Al (2007)[25], por medio de una optimización no lineal de mínimos cuadrados.

La ecuación se define de la siguiente manera:

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma(\log(fr) - \log(\alpha(T))}}$$ **Ecuación 11**

Dónde:

|E*|: Módulo Dinámico

fr: Frecuencia real

α(T): Factor de desplazamiento

β, α, γ, δ: Parámetros

El término $\log(fr) - \log(\alpha(T))$, es llamado frecuencia reducida (f_T):

$$f_T = \frac{f_r}{\alpha(T)} \;\; o \;\; \log(f_T) = \log(f_r) - \log(\alpha(T))$$ **Ecuación 12**

En la Figura 4-7 se presenta el gráfico de las curvas maestras de las tres mezclas en estudio, de esta forma poder compararlas a una temperatura de referencia de 21°C.

Los cálculos para obtener las curvas maestras se encuentran en detalle en el Anexo C.

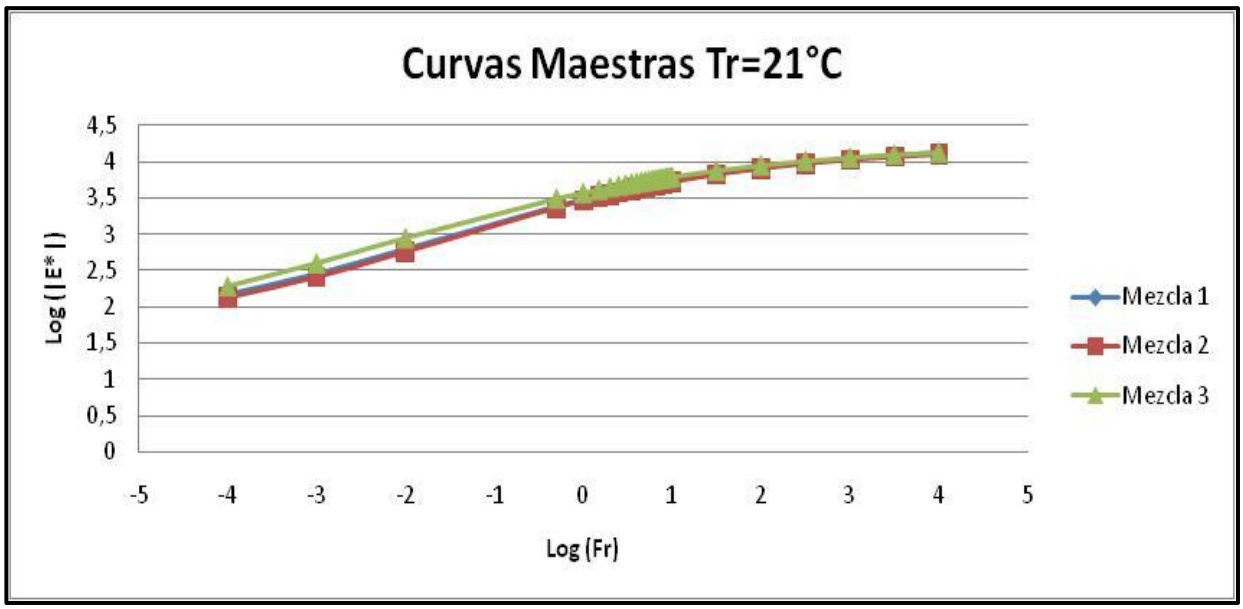


Figura 4-7: Curvas Maestras 21°C

- *Curva Isócrona*

Otra forma de interpretar los resultados es utilizando las curvas isócronas, donde se representa el módulo dinámico, como función de la temperatura pero a una frecuencia constante, se seleccionó una frecuencia de 10 [Hz], por cuanto este valor representa condiciones predominantes de los pavimentos de carreteras.

En la Figura 4-8 se muestran las curvas isócronas de las tres mezclas en estudio:

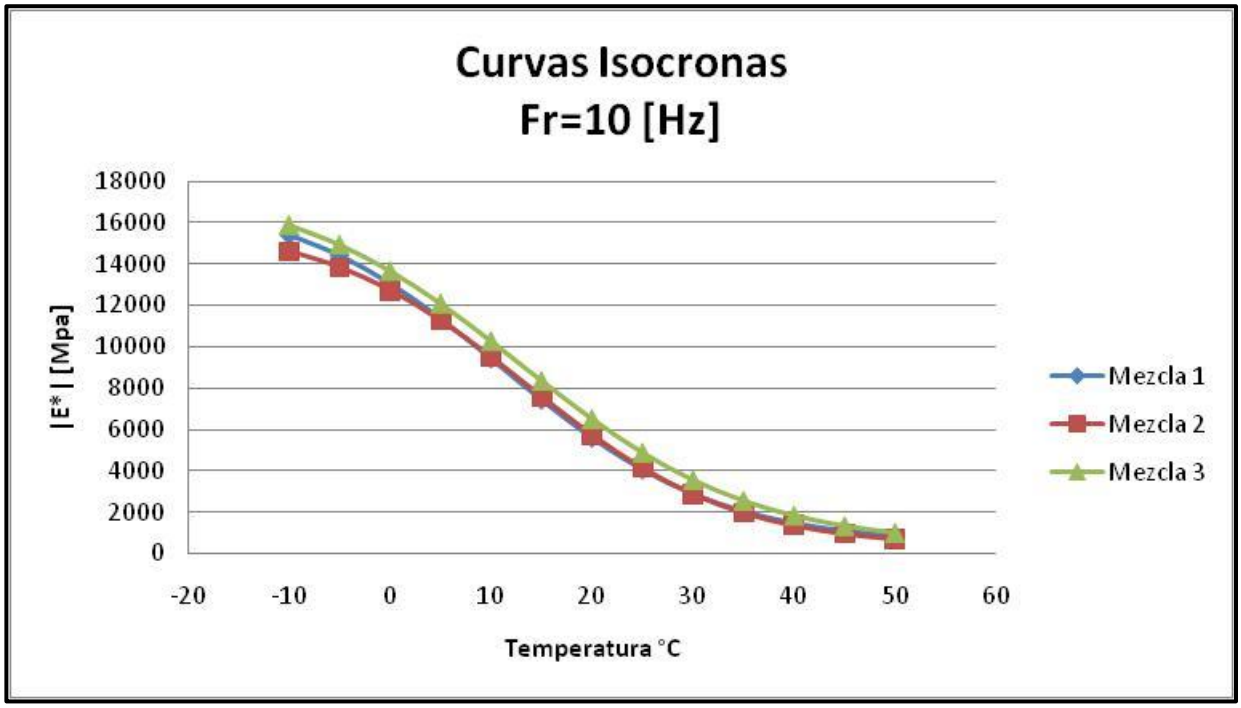


Figura 4-8: Curvas Isócronas

4.1.4 Análisis de Resultados

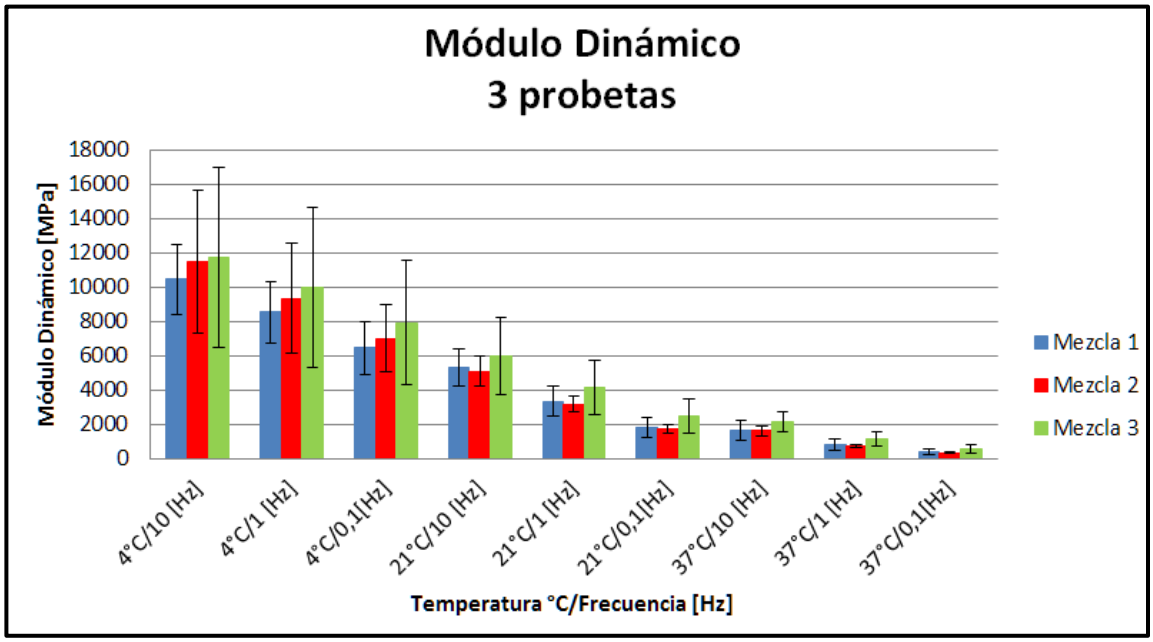


Figura 4-9: Gráfico barras Módulo Dinámico (3 probetas)

La norma que se ocupó no especifica la precisión con la que se debe trabajar, y debido a la diferencia que se observa entre las probetas ensayadas de una misma mezcla, Figura 4-9 (en el Anexo B se encuentra el detalle) se analizó la repetitividad del ensayo con las fórmulas obtenidas del proyecto NCHRP 9-19[10], específicamente en el Reporte 702, donde se llega finalmente a una relación entre el coeficiente de variación con el módulo dinámico y el tamaño máximo nominal del agregado:

$$s_r\% = \left[29{,}8e^{(0{,}014\ x\ TMN)}\right] x |E^*|^{-[0{,}189e^{(0{,}012\ x\ TMN)}]}$$ **Ecuación 13**

Dónde:

$s_r\%$: Repetitividad coeficiente de variación para |E*|, porcentaje

TMN: Tamaño máximo nominal del agregado

|E*|: Promedio del módulo dinámico, [MPa]

Para asegurar la validez de los resultados del ensayo, el rango (diferencia entre el máximo y mínimo resultado) de los resultados debe compararse con un máximo rango aceptable, que depende del número de ensayos. El rango máximo se obtiene multiplicando la desviación estándar o el coeficiente de variación por el factor adecuado de la segunda columna de la Tabla 4-5, este método es presentado en la norma ASTM C670-10[26].

Tabla 4-5: Máximo rango aceptable

Número de ensayos	Multiplicador para el máximo rango aceptable
2	2,8
3	3,3
4	3,6
5	3,9
6	4,0
7	4,2
8	4,3
9	4,4
10	4,5

Por lo que los resultados obtenidos en el mismo laboratorio, por el mismo operador usando el mismo equipo en un periodo corto de tiempo, deberían ser considerados correctos, excepto que el rango exceda los entregados en la Tabla 4-6:

Tabla 4-6: Repetitividad ensayo Módulo Dinámico

TMN [mm]	Promedio |E*| [MPa]	Módulo Dinámico					
		s_r%	Rango aceptable para n probetas, % del promedio				
			n=2	n=3	n=4	n=5	n=6
9,5	≥137 a <200	15	43	51	55	60	61
	≥200 a <500	13	36	42	46	50	51
	≥500 a <1000	11	31	36	39	43	44
	≥1000 a <2000	9	26	31	34	37	38
	≥2000 a <5000	8	22	26	28	31	31
	≥5000 a <10000	7	19	22	24	26	27
	≥10000 a <16400	6	16	19	21	23	23
12,5	≥137 a <200	17	47	55	60	65	67
	≥200 a <500	14	39	46	50	54	55
	≥500 a <1000	12	33	39	42	46	47
	≥1000 a <2000	10	28	33	36	39	40
	≥2000 a <5000	8	23	28	30	33	33
	≥5000 a <10000	7	20	23	25	28	28
	≥10000 a <16400	6	17	20	22	24	24
19	≥137 a <200	20	56	66	72	78	80
	≥200 a <500	16	46	54	59	64	65
	≥500 a <1000	14	38	45	49	53	55
	≥1000 a <2000	12	32	38	42	45	46
	≥2000 a <5000	9	27	31	34	37	38
	≥5000 a <10000	8	22	26	28	31	32
	≥10000 a <16400	7	19	22	24	26	27

El porcentaje de ensayos que no cumplen con la precisión, como se observa en la Tabla 4-7, es extremadamente alta al considerar 3 probetas, por lo que para tener resultados confiables se considera el resultado sólo con 2 probetas:

Tabla 4-7: Precisión ensayo Módulo Dinámico

Mezcla	% Ensayos que no cumplen con precisión	
	Tres Probetas	Dos Probetas
1	97	53
2	47	0
3	100	0

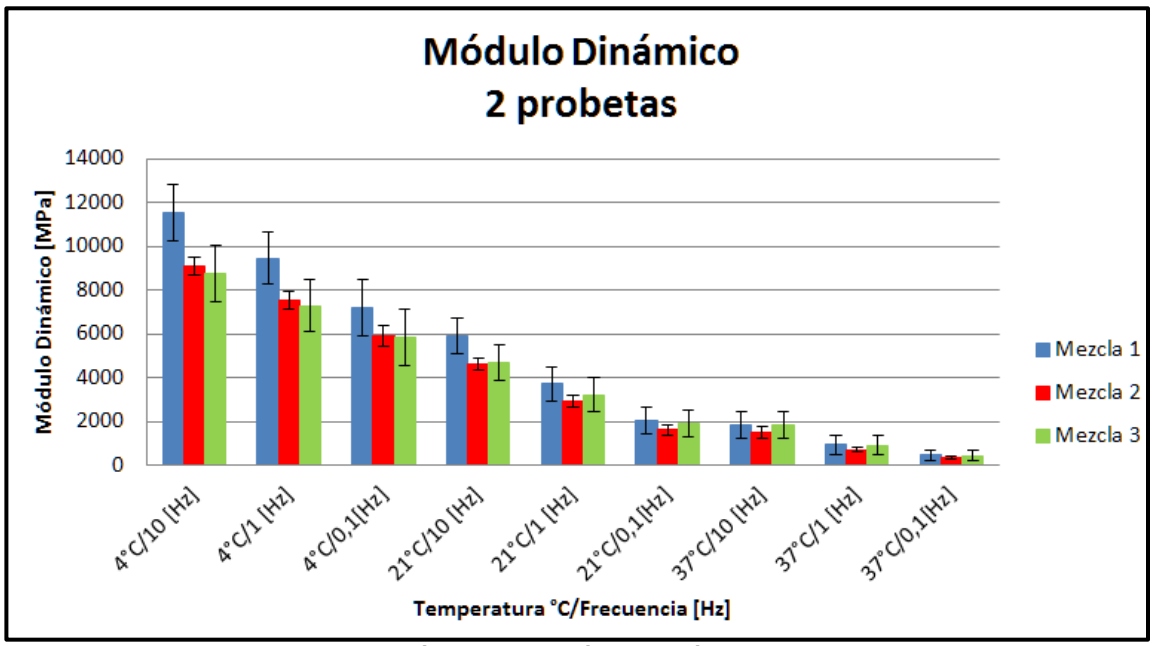


Figura 4-10: Gráfico barras Módulo Dinámico (2 probetas)

Detalles de la precisión de cada ensayo se encuentran en el Anexo C.

Considerando como válido los resultados del ensayo de Módulo Dinámico obtenido con el promedio de 2 probetas, la mezcla 1 (sin RAP) es la mezcla que presenta los valores más altos de módulo, siendo un resultado no esperado, ya que al incorporar RAP se esperaría que aporte mayor rigidez a la mezcla.

El resultado se podría explicar por los procedimientos seguidos en la etapa de mezclado, al combinar el RAP con una menor temperatura (130°C) con los agregados vírgenes de la mezcla 2 y 3, disminuyendo la temperatura de la mezcla, por lo que el ligante virgen de la mezcla 2 y 3 estuvo expuesto a menor temperatura que el ligante utilizado en la mezcla 1, provocando un mayor envejecimiento de éste dando como resultados mayores módulos dinámicos.

Parte de este proyecto fue realizada por los alumnos Nicolás Montalva y Marcelo Ávila que realizaron el ensayo de Fatiga a las mezclas (resultados que se encuentran en el Anexo G). Considerando estos resultados, es posible relacionar la rigidez en flexión obtenida en el ensayo de fatiga con el módulo dinámico en condiciones similares, es decir se compara a 21°C y 10 [Hz].

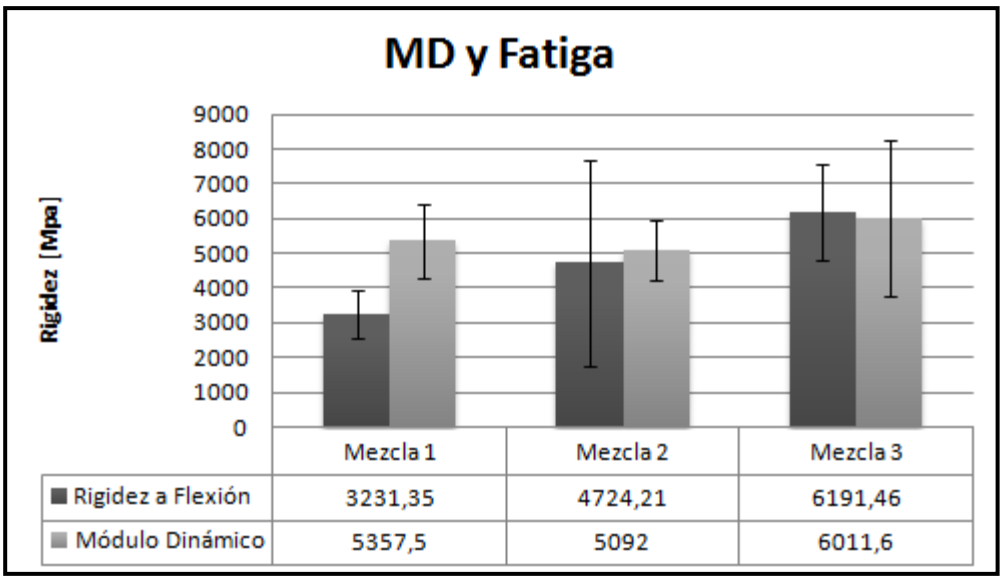


Figura 4-11: Comparación MD y Fatiga

Como se observa en la Figura 4-11, la Mezcla 1 es la que presenta mayor diferencia en los valores de rigidez, sin embargo no es correcto sacar conclusiones debido a la gran variabilidad que presentan ambos ensayos.

4.2. FLOW NUMBER O NÚMERO DE FLUJO

El ensayo Flow Number o Número de Flujo (FN) fue recomendado por NCHRP 9-19[10] como uno de los ensayos (junto con el módulo dinámico y Flow time) para evaluar el ahuellamiento de mezclas asfálticas en caliente en laboratorio. Entre una de las razones por la que fue escogido entre 24 ensayos, fue por la buena correlación que se obtuvo con ahuellamiento en terreno.

El ensayo consiste en aplicar una carga tipo Haversine de compresión, con ciclos de 1 segundo de duración, compuesto por un pulso de 0,1 segundo.

Se realiza en el equipo de ensaye universal Cooper HYD25-II y con el software de la misma compañía, que durante el ensayo va midiendo la deformación vertical acumulada que presenta la probeta en función del tiempo o del número de ciclos, como se muestra en la Figura 4-10:

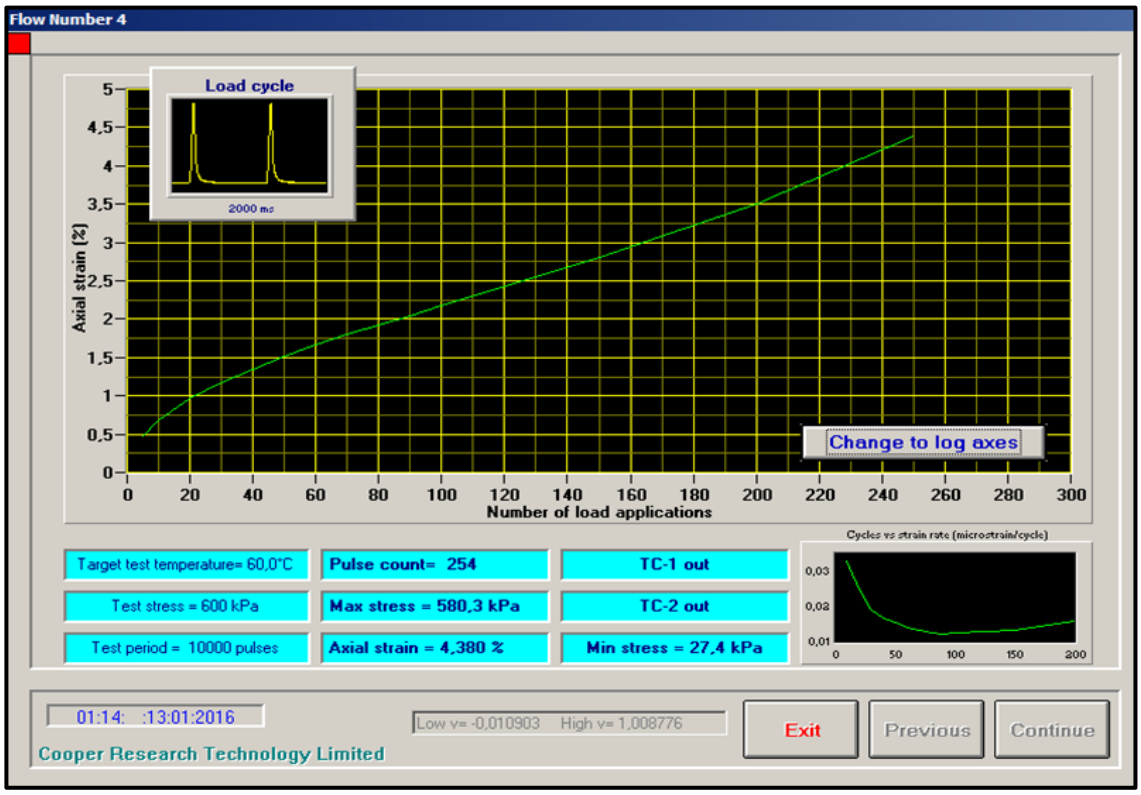


Figura 4-12: Software ensayo Flow Number

En la Figura 4-11 se presenta un gráfico tipo de deformación acumulada versus el número de ciclos, en donde se distinguen 3 zonas:

- Zona Primaria: La tasa de deformación disminuye con los ciclos de carga.
- Zona Secundaria: La tasa de deformación permanece constante.
- Zona Terciaria: La tasa de deformación aumenta con los ciclos de carga.

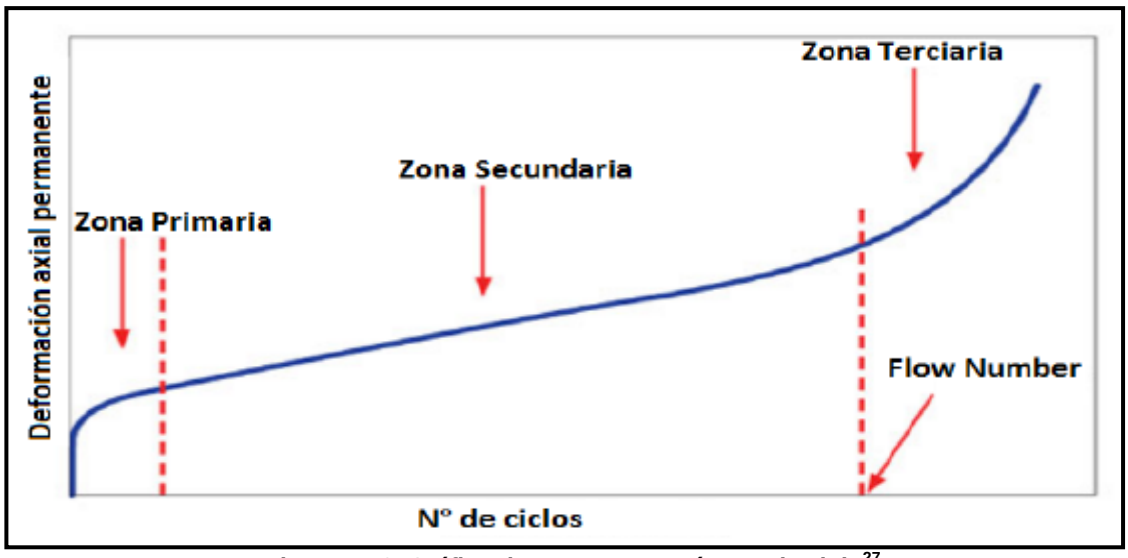


Figura 4-13: Gráfico tipo en ensayo Número de Flujo[27]

Se denomina falla por deformación permanente al punto donde comienza la zona terciaria.

A niveles de esfuerzos bajos, el material exhibirá principalmente la zona primaria y secundaria, mientras que la zona terciaria puede nunca aparecer dentro de un tiempo razonable.

De este ensayo se obtiene como resultados los siguientes valores:

1.- Flow Number o Número de Flujo: Corresponde al número de ciclos en el cual la probeta entra a la zona terciaria, es el mínimo valor de la pendiente de la curva.

2.- Deformación permanente acumulada en el punto de Flow Number, se mide en micrones ($\varepsilon_p(F)$).

3.- t (F): Tiempo en el cual llega a la zona terciaria, se mide en minutos.

Adicionalmente a los 3 valores mencionados, se puede calcular otro valor llamado Índice Flow Number, el cual se define como la razón entre $\varepsilon_p(F)$ y FN en la zona terciaria. Teóricamente, mientras más bajo sea el índice se relacionará con una mezcla más estable y resistente a la deformación permanente y viceversa[27].

4.2.1. Ensayo

El ensayo fue realizado bajo la norma AASHTO TP79-15[28]. Los especímenes que se utilizaron fueron los mismos ensayados para Módulo Dinámico, ya que como se mencionó anteriormente es un ensayo no destructivo.

Se utilizaron 4 probetas cilíndricas de 100 [mm] de diámetro por 150 [mm] de largo con un porcentaje de vacío de 7,0 ± 0,5%.

Tabla 4-8: Probetas Ensayo Flow Number

Mezcla	Probeta	G [kg/m3]	%Va
1	1	2291,0	7,5
	2	2316,6	6,5
	3	2312,4	6,6
	4	2307,8	6,8
2 (8%RAP)	1	2328,7	7,5
	2	2344,9	6,9
	3	2342,3	7,0
	4	2339,2	7,1
3 (18% RAP)	1	2350,9	7,0
	2	2371,2	6,2
	3	2357,6	6,7
	4	2364,2	6,5

Los parámetros usados son los recomendados por la norma, en el Anexo X2 “Evaluation of rutting resistance using the Flow Number Test” y que se muestran en la Tabla 4-9:

Tabla 4-9: Parámetros ensayo FN

Parámetro	Valor
Temperatura del ensayo	Temperatura PG
Esfuerzo axial	600 [kPa]
Esfuerzo de contacto (5% esfuerzo axial)	30 [kPa]
Esfuerzo de confinamiento	0 [kPa] (sin confinamiento)

El procedimiento se puede describir en los siguientes pasos:

1.- Colocar la probeta, placas de carga y los látex doble (elementos para reducir la fricción) en la cámara ambiental a la temperatura del ensayo, por lo menos 1 hora.

2.- Cuando se alcance la temperatura de ensayo armar cada probeta en el siguiente orden desde abajo hacia arriba: placa de carga de fondo, látex doble, probeta, látex doble y placa de carga superior.

Figura 4-14: Probeta ensayo Flow Number

3.- Dejar que nuevamente alcance la temperatura de ensayo.

4.- Ensayar con los parámetros de la Tabla 4-6.

El ensayo finaliza cuando se llegan a los 10.000 ciclos (aproximadamente 3 horas) o hasta que se llegue a una deformación axial del 5%, cualquiera que ocurra primero.

4.2.2. Resultados

Para identificar el número de flujo se utilizó el modelo Francken propuesto en la norma AASHTO TP79-15[28], en el apéndice X1 "Model used for identifying the Flow Number". Este modelo ajusta la curva de deformación permanente versus ciclos de carga a la siguiente ecuación:

Ecuación 14

$$\varepsilon_p = An^B + C(e^{Dn} - 1)$$

Dónde:

ε_p= Deformación axial permanente

n = N° de ciclos

A, B, C y D = Coeficientes de ajuste

Los coeficientes de ajuste se determinan a través de optimización y luego de encontrados se calcula la primera y segunda derivada del modelo Francken:

Primera derivada

Ecuación 15

$$\frac{d\varepsilon_p}{dn} = ABn^{B-1} + CDe^{Dn}$$

Segunda derivada

$$\frac{d^2\varepsilon_p}{dn^2} = AB(B-1)n^{B-2} + CD^2e^{Dn}$$

Ecuación 16

El número de flujo o Flow Number (FN) es el ciclo donde la segunda derivada cambia de signo negativo a positivo.

En el Anexo D se encuentran los resultados del ensayo y el detalle del cálculo del número de flujo.

Los resultados del ensayo de Flow Number se muestran en la Tabla 4-10.

Tabla 4-10: Resultados Ensayo Flow Number

Mezcla	Probeta	FN	t(F)	εp(F)	Índice FN
1	1	30	0,5	13459	566,0
	2	50	0,83	24942	498,8
	3	150	2,5	27984	200,5
	4	60	1	30081	415,7
Promedio		72,5	1,7	24997,0	438,2
2	1	90	1,5	23016	255,7
	2	50	0,8	25073	501,5
	3	150	2,5	30464	203,1
	4	100	1,7	25411	254,1
Promedio		100,0	1,7	26982,7	319,6
3	1	150	2,5	14490	96,6
	2	200	3,3	25974	129,9
	3	200	3,3	20066	100,3
	4	450	7,5	23177	51,5
Promedio		283,3	4,7	23072,3	93,9

Se presentan los resultados de manera gráfica en la Figura 4-13:

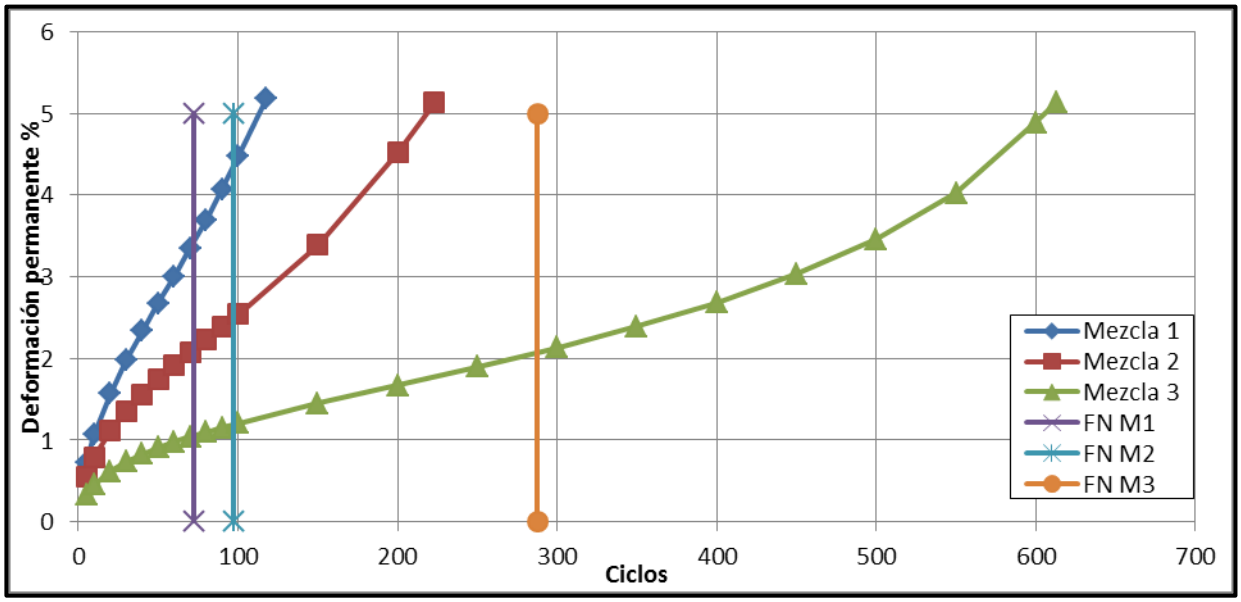


Figura 4-15: Gráfico Flow Number

4.2.3. Análisis Resultados

- Precisión

La norma utilizada si incluye criterios de repetitividad, siguiendo la misma lógica para evaluar la repetitividad que en el caso del módulo dinámico. El reporte de la NCHRP 702 determinó que el coeficiente de variación para el ensayo de Flow Number depende del tamaño máximo nominal del agregado (NMAS), según la siguiente fórmula:

$$s_r\% = 37{,}0 \times \ln(TMN) - 50{,}4$$

Ecuación 17

Dónde:

$s_r\%$: Coeficiente de variación [%]

TMN: Tamaño máximo nominal del agregado [mm].

Por lo que los resultados obtenidos en el mismo laboratorio, por el mismo operador usando el mismo equipo en un periodo corto de tiempo, deberían ser considerados correctos, excepto que el rango exceda los entregados en la Tabla 4-11:

Tabla 4-11: Precisión para un operador en el ensayo Flow Number sin confinamiento[28]

NMAS [mm]	s_r [%]	Rango aceptable para n probetas [%]				
		n = 2	n = 3	n = 4	n = 5	n = 6
9,5	32,9	92	109	118	128	132
12,5	43,1	121	142	155	168	172
19	58,5	164	193	211	228	234
25	68,7	192	227	247	268	275

En este estudio todos los resultados de los ensayos no superan el rango máximo como se ve en la Tabla 4-12, es decir son considerados válidos.

Tabla 4-12: Precisión ensayo Flow Number

Flow Number	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Promedio	Rango	Rango máx. (211)
Mezcla 1	30	50	150	60	72,5	165,52	Cumple
Mezcla 2	90	50	150	100	97,5	102,56	Cumple
Mezcla 3	150	200	200	450	250	120,00	Cumple

La variabilidad entre las probetas se observa de manera gráfica en la Figura 4-15:

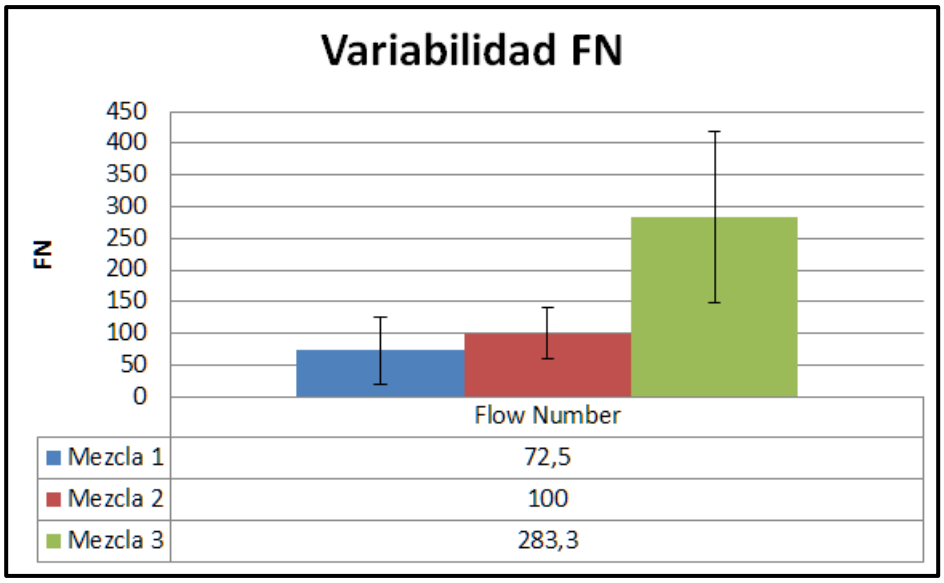


Figura 4-16: Variabilidad FN

- Parámetros

Una ventaja que presenta este ensayo es la variedad de parámetros que se pueden obtener, en la Figura 4-16 se comparan los resultados del ensayo Flow Number expresado en estos distintos parámetros. La comparación sugiere que el parámetro εp(F) no marca una tendencia, por lo que no diferenciará de manera efectiva las mezclas. Lo que se ve de manera más claro en los parámetros FN y en el índice FN, mostrando tendencias opuestas, entre mayor es el ciclo de FN más bajo es el índice FN.

Mientras más bajo (más alto) sea el índice FN (ciclo de FN) mayor será la resistencia a la deformación permanente de las mezclas, por lo que el ranking de mayor a menor resistencia queda: Mezcla 3 → Mezcla 2 → Mezcla 1.

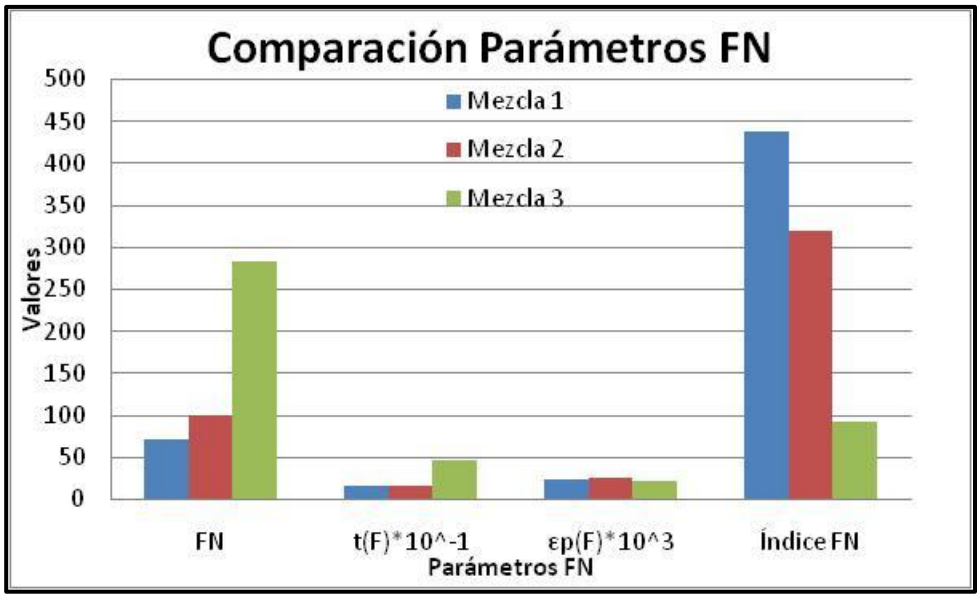


Figura 4-17: Comparación parámetros FN

- Criterio

La norma propone un criterio según el promedio mínimo de Flow Number para su uso dependiendo del nivel de tráfico medido en ejes equivalentes:

Tabla 4-13: Criterio FN AASHTO TP79-15

Nivel de Tráfico (millones ESALs)	Promedio mínimo FN para HMA
<3	--
3 a <10	50
10 a <30	190
≥ 30	740

Las mezcla 1 (sin RAP) y 2 (8% RAP) cumple para un nivel de tráfico entre 3 a 10 millones de ejes equivalentes, mientras que la mezcla 3 (18% RAP) al tener un mejor promedio cumple para un nivel de tráfico entre 10 a 30 millones de ejes equivalentes.

- Relación Módulo Dinámico y Flow Number

Finalmente, se analizó la frecuencia para la cual la correlación entre el Módulo Dinámico y Flow Number es máxima, se escogen los resultados del Módulo Dinámico a temperaturas altas, ya que el ahuellamiento se ve favorecido con esta condición.

La Figura 4-18 presenta estas relaciones:

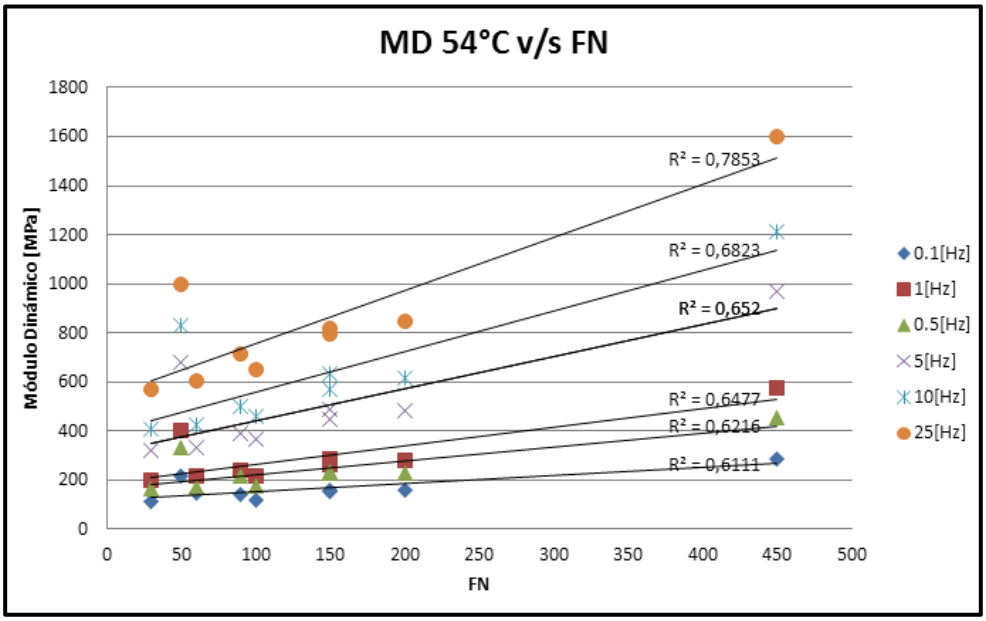


Figura 4-18: Comparación MD y FN

La combinación 54°C y 25 [Hz] presenta la mejor correlación con R^2=79%.

En general se observa que el R^2 disminuye a medida que disminuye la frecuencia a la que se realizó el Módulo Dinámico.

4.3. RUEDA DE HAMBURGO

Ensayo de laboratorio que mide los efectos del ahuellamiento y la susceptibilidad a la humedad en probetas de mezclas asfálticas.

4.3.1. Ensayo

Los procedimientos que se siguieron en este estudio se basan en la norma AASHTO T324-14[29].

El ensayo consiste en medir las deformaciones causadas al pasar axialmente por una probeta una rueda de acero de 47mm de ancho, cargada con 705N, provocando una presión de contacto de 217psi. La prueba usualmente es realizada sumergida en agua, con una temperatura controlada de 50°C. La velocidad con la que la rueda circula es de 0,305m/s. El ensayo se termina cuando se llega a 20.000 pasadas o a un nivel máximo de deformaciones es de 20mm.

El equipo en el cual se hará el ensayo debe tener las siguientes características según la norma:

1.- Capaz de mover un rueda de acero de 203,2[mm] de diámetro y de 47 [mm] de ancho sobre la probeta que se va a ensayar. Y la carga sobre la rueda debe ser 705 ± 4,5 [n].

2.- El aparato debe ser capaz de mover la rueda de forma que ésta varíe su posición de forma sinusoidal, con una frecuencia de 52 ± 2 pasadas por minuto. Y la máxima velocidad de la rueda, alcanzada en el punto medio del espécimen es aproximadamente 0,305 [m/s].

3.- Debe tener un estanque para el baño de agua capaz de controlar la temperatura con una precisión de ±1°C en un rango entre 25 y 70°C.

4.- Debe contar con un sistema de medición de la profundidad de ahuellamiento, Para esto se utilizan transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT), los cuales deben medir en un rango mínimo entre 0 y 20 [mm]. El sistema de medición debe medir la profundidad del ahuellamiento, sin detener la rueda, como mínimo cada 400 pasadas.

5.- Debe contar con un contador de pasadas de la rueda: un solenoide sin contacto, que cuenta cada pasada de la rueda por encima de la muestra. La información de este contador se debe acoplar a la medida de la profundidad de la rodadura, permitiendo expresar la profundidad del surco dejado en función de las pasadas de la rueda.

6.- Debe tener un sistema de montaje para probetas cilíndricas con un diámetro de 150 [mm], que consiste en dos moldes de polietileno de alta densidad (HDPE) colocados sobre una bandeja de acero inoxidable que se encuentra montada de forma rígida a la máquina. Tal como se muestra en la Figura 4-16:

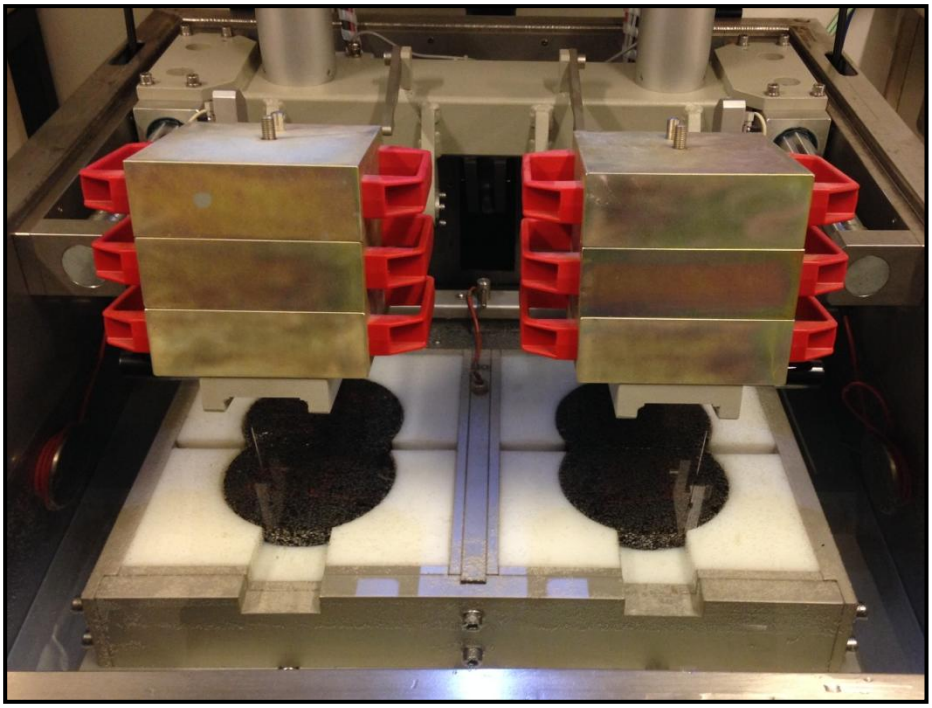


Figura 4-19: Equipo Rueda de Hamburgo

Se utilizó el equipo SBG LW2x320x260 de la marca BPS Wenninsen[30] que se encuentra en la sede San Joaquín de la Universidad Federico Santa María, el cual posee todas las características antes mencionadas. Para la adquisición y análisis de datos se utiliza el software SBT Versión 3.1[31].

La norma exige probetas de 150 [mm] de diámetro con una altura que sea a lo menos el doble del tamaño máximo nominal del agregado, generalmente entre 38 a 100 [mm]. Y recomienda un porcentaje de vacíos de 7,0 ± 1,0%.

Se define como un ensayo 4 probetas de 150 [mm] de diámetro agrupadas en pares, compactadas en el compactador giratorio, de similar material y que se ensayen de forma simultánea. Los resultados por lo tanto serán entregados como el promedio de los pares de probetas.

El ensayo comienza colocando los moldes de HDPE en la bandeja de acero dentro de la máquina para luego colocar las probetas cuidando que la unión entre ambas probetas quede en el centro de la bandeja. El sistema tiene que ser apretado lo suficiente para que las probetas queden fijas, quedando armadas como se muestra en la Figura 4-15.

Antes de comenzar el ensayo se llena el estanque con agua a 50°C y se dejan acondicionar por 30 minutos. Pasado el tiempo de acondicionamiento se bajan las ruedas y el ensayo comienza.

El ensayo dura aproximadamente 6 horas y termina cuando se cumplen los 20.000 ciclos.

Al finalizar se abren las válvulas para vaciar el estanque, se levantan las ruedas y se pueden retirar las probetas.

Es importante luego limpiar la máquina y girar las ruedas después de cada ensayo.

El comportamiento típico del ensayo Ruedo de Hamburgo se presenta en la Figura 4-17:

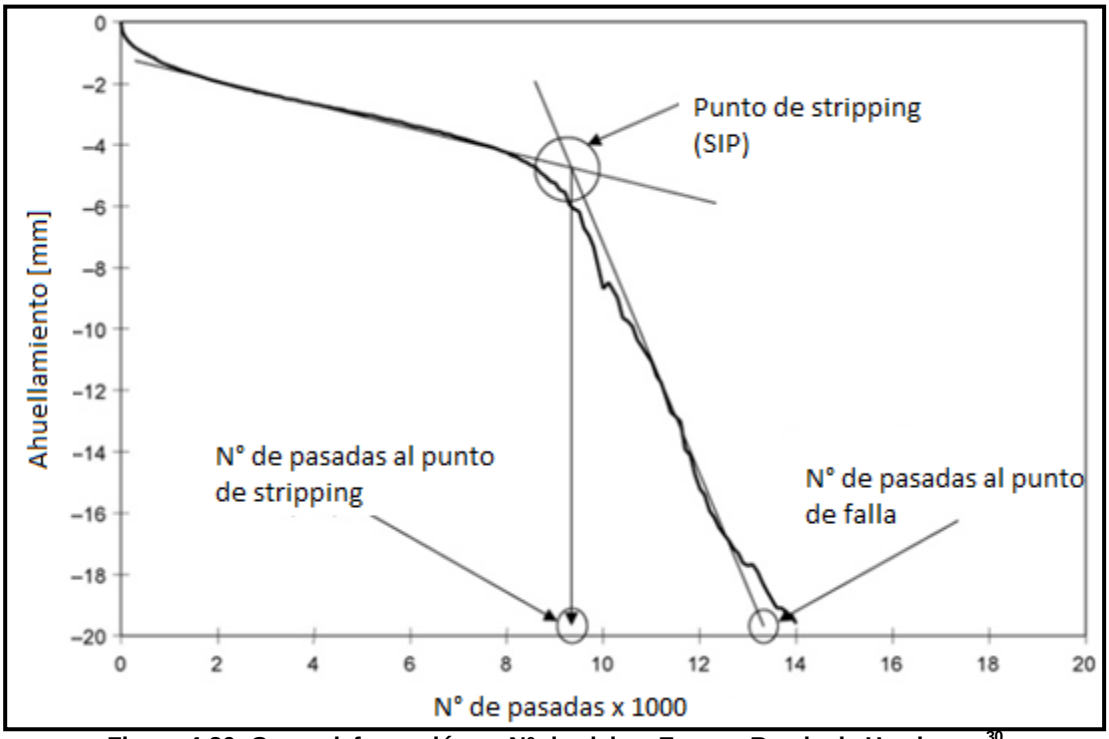


Figura 4-20: Curva deformación vs N° de ciclos, Ensayo Rueda de Hamburgo[30]

Como se ve en el gráfico, existe un punto (N° de ciclos) en el que se produce un cambio en la curvatura, denominado Punto de Stripping (SIP), y se aproxima como el punto de intersección entre las rectas. Para calcularlo se deben obtener los siguientes valores:

- Pendiente e intercepto de la primera parte del gráfico (pendiente luego de la consolidación dada por la deformación plástica de la mezcla asfáltica).
- Pendiente e intercepto de la segunda parte del gráfico (pendiente producto de la deformación del material granular sin aporte del ligante).

$$Punto\ de\ Stripping\ (SIP) = \frac{Intercepto\ (2°\ porción) - Intercepto\ (1°\ porción)}{Pendiente\ (1°\ porción) - Pendiente\ (2°\ porción)}$$

4.3.2. Resultados

- Criterios:

Para este ensayo se escogieron dos criterios que contemplan una profundidad de ahuellamiento máximo para un número de pasadas:

1.- Estado de Texas en Estados Unidos donde fija un ahuellamiento de 12,5 [mm] para un número de pasadas que depende de la clasificación del ligante. El criterio se muestra en la Tabla 4-14:

Tabla 4-14: Criterio rechazo ensayo Rueda de Hamburgo

Clasificación Ligante	Criterio (n° de pasadas)
PG 76-YY	15.000
PG 70-YY	10.000
PG 64-YY	10.000

2.- Criterio alemán que fija el ahuellamiento en 4 [mm] a las 20.000 pasadas.

- Resultados:

Los resultados se presentan en los gráficos siguientes como espécimen 1 y 2. Cada espécimen está compuesto por dos probetas, como se muestra en la Figura 4-19:

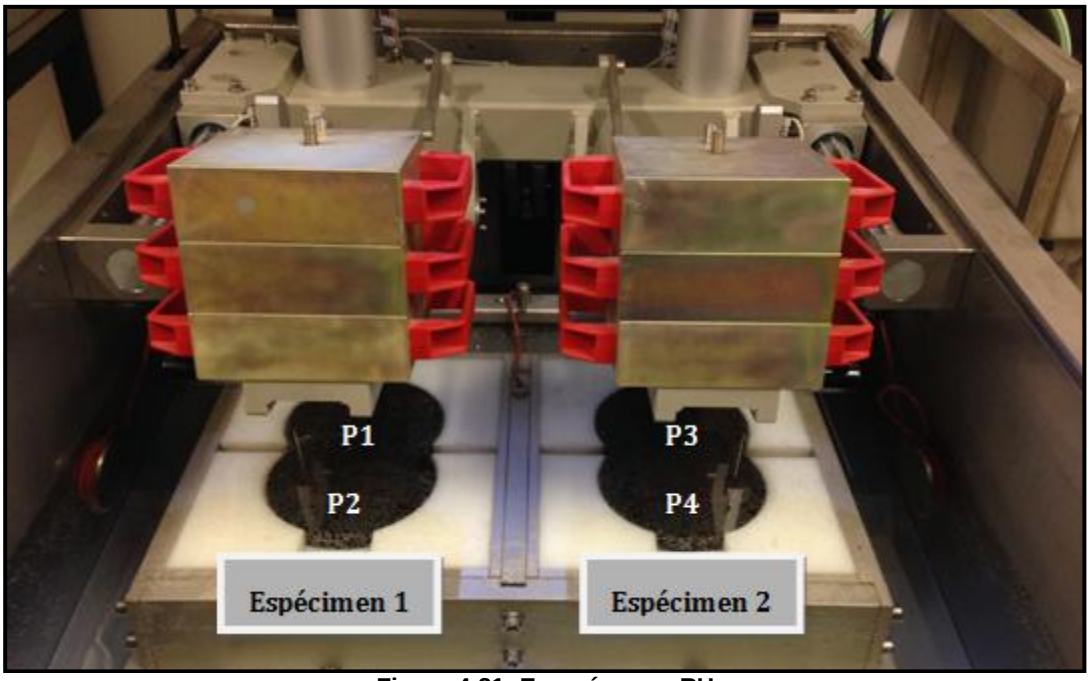


Figura 4-21: Especímenes RH

Las características de cada probeta se encuentran en la Tabla 4-15:

Tabla 4-15: %Va probetas RH

Mezcla	Espécimen	Probetas	%Va
1	1	1	6,1
		2	7,1
	2	3	7,5
		4	6,9
2	1	1	7,7
		2	7,3
	2	3	7,5
		4	7,0
3	1	1	6,3
		2	7,5
	2	3	7,6
		4	7,9

En los gráficos de la Figuras 4-20, 4-21 y 4-22 se representan los ciclos (ida y vuelta de la rueda) versus la deformación que provoca en [mm] de los dos especímenes ensayados por mezcla y su promedio.

- **Mezcla 1**

En la Figura 4-20 se observa que a partir de los 2000 ciclos comienza una leve diferencia en las deformaciones de los especímenes ensayados, haciéndose notoria al final del ensayo, pero como se verá más adelante cumple con la variabilidad exigida.

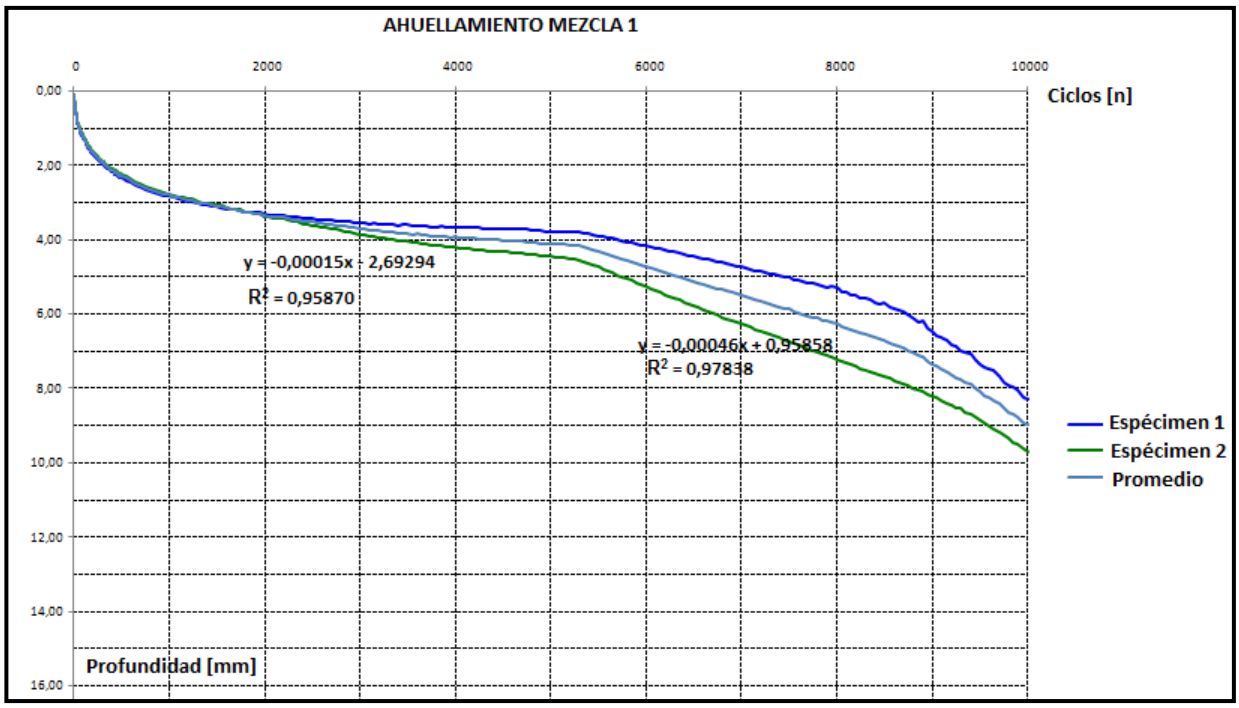


Figura 4-22: Ahuellamiento promedio Mezcla 1

De la curva promedio se realizan dos regresiones lineales para calcular las pendientes de cada parte de la curva y el punto de stripping. Resultados que se muestran en la Tabla 4-16.

Tabla 4-16: Valores ahuellamiento Mezcla 1

Pendiente		Punto de Stripping [pasadas]	Deformación según N° pasadas	
1° Parte Curva [pasadas/mm]	2° Parte Curva [pasadas/mm]		10.000 [mm]	20.000 [mm]
6666.67	2173.91	11779	4.115	9,0

- **Mezcla 2**

En la Figura 4-23 se observa que a medida que aumenta el número de pasadas aumenta la diferencia en el ahuellamiento entre los especímenes, siendo el espécimen 2 el que presenta mayores deformaciones.

El "salto" que se observa cerca de los 8000 ciclos se puede explicar debido al deterioro que sufrieron las probetas afectando el paso de la rueda al desprenderse material.

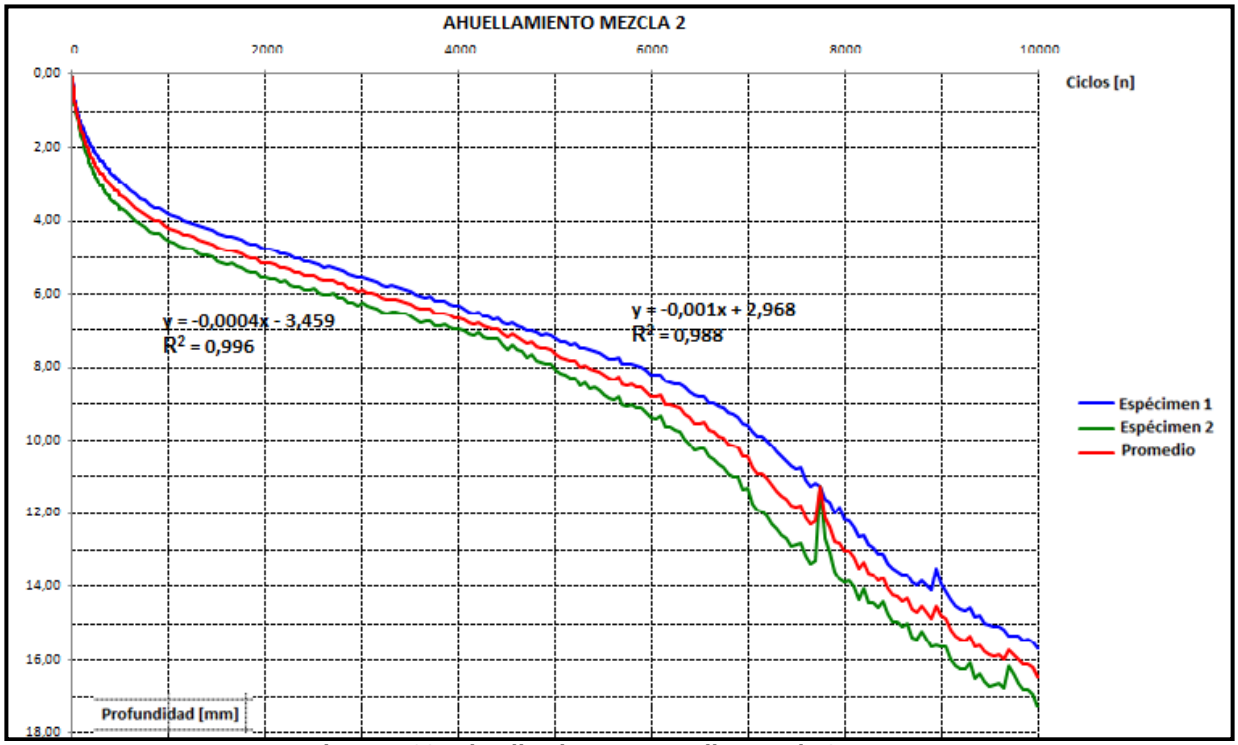


Figura 4-23: Ahuellamiento promedio Mezcla 2

De igual forma se realizaron dos regresiones lineales de la curva promedio para calcular las pendientes de cada parte de la curva y el punto de stripping, resultados que se muestran en la Tabla 4-17.

Tabla 4-17: Valores ahuellamiento Mezcla 2

Pendiente		Punto de Stripping [pasadas]	Deformación según n° pasadas	
1° Parte Curva [pasadas/mm]	2° Parte Curva [pasadas/mm]		10.000 [mm]	20.000 [mm]
2500	1000	11277	7.645	16,5

- **Mezcla 3**

En la Figura 4-24 se observa que la diferencia entre los especímenes va disminuyendo a medida que aumentan los ciclos.

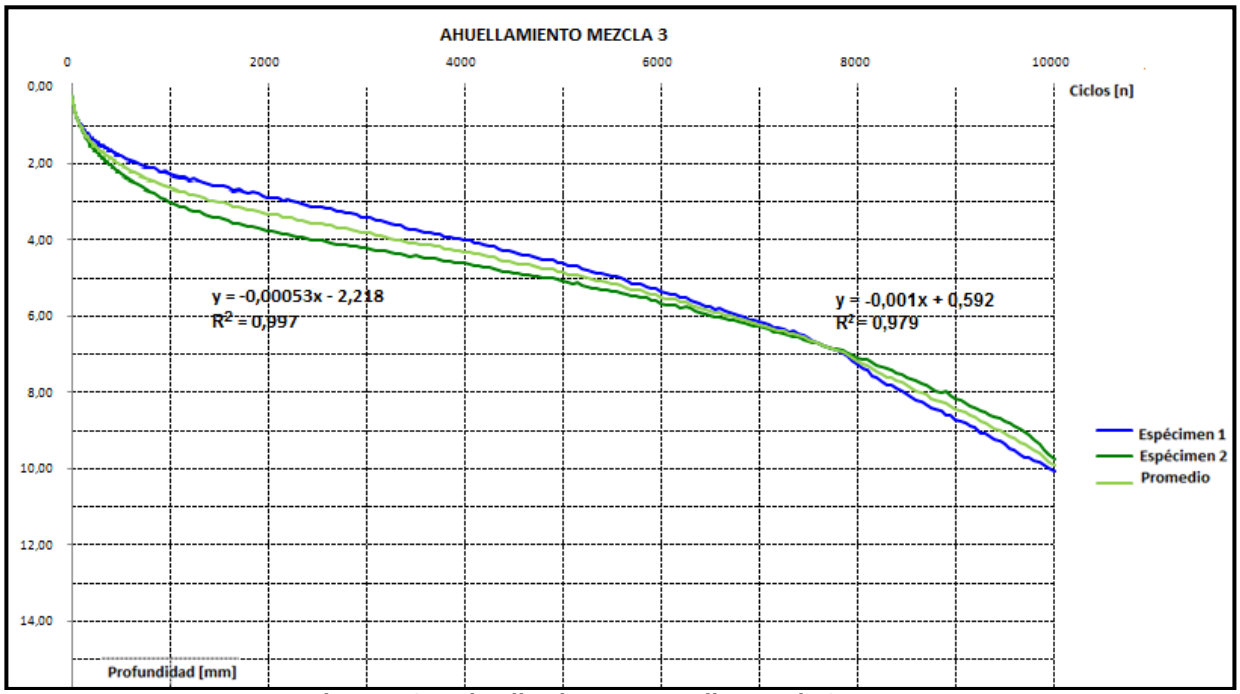


Figura 4-24: Ahuellamiento promedio Mezcla 3

Los resultados de las regresiones lineales de la curva promedio se presentan en la Tabla 4-18.

Tabla 4-18: Valores ahuellamiento Mezcla 3

Pendiente		Punto de Stripping [pasadas]	Deformación según n° pasadas	
1° Parte Curva [pasadas/mm]	2° Parte Curva [pasadas/mm]		10.000 [mm]	20.000 [mm]
1886.79	1010.10	12220.91	4.845	9,9

Para poder visualizar el grado de deterioro sufrido por las probetas, se adjuntan una serie de imágenes una vez finalizado el ensayo:

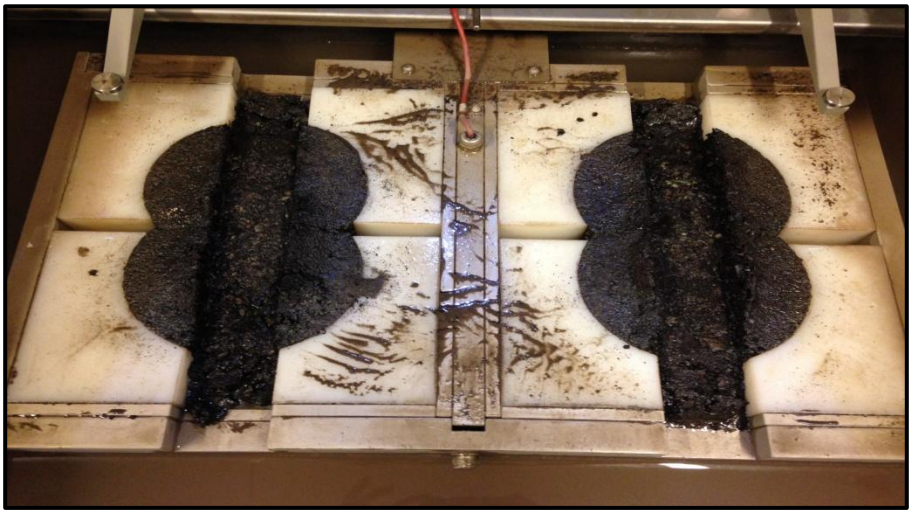


Figura 4-25: Mezcla 1 ensayada Rueda de Hamburgo

Figura 4-26: Mezcla 2 ensayada Rueda de Hamburgo

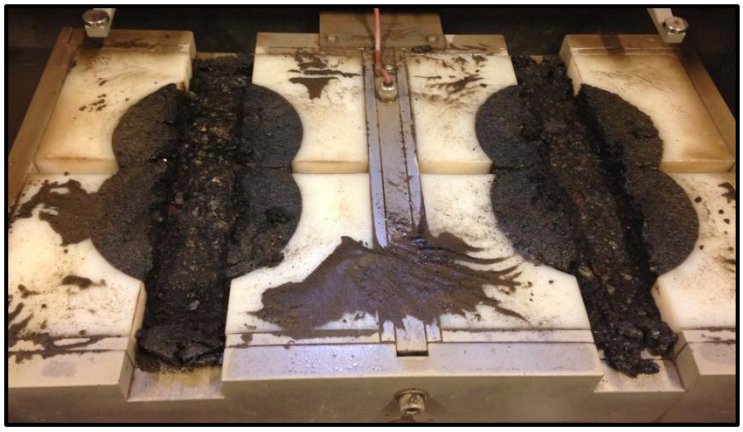


Figura 4-27: Mezcla 3 ensayada Rueda de Hamburgo

4.3.3. Análisis de Resultados

La Tabla 4-19 muestra un resumen de los resultados juntos con los criterios:

Tabla 4-19: Resumen resultados RH

Mezcla	Deformación [mm]			Criterios	
	2.000 pasadas	10.000 pasadas	20.000 pasadas	Texas	Alemán
1	2,8	4,1	9,0	Aceptado	Rechazado
2	4,2	7,6	16,5	Aceptado	Rechazado
3	2,6	4,8	9,9	Aceptado	Rechazado

Se debe tener en cuenta la variabilidad asociado a los procesos de fabricación de las probetas y en la realización del ensayo propiamente tal, por ejemplo puede afectar la rugosidad de la superficie de las probetas en donde se desplaza la rueda, ya que podría provocar ruidos en la medición. También se puede originar variabilidad en el análisis que se hace de los datos al no existir un procedimiento normado para ello, para el ajuste de las rectas y determinación del punto de stripping, por ejemplo.

El año 2014 la NCHRP realizó un proyecto llamado "Final Report Precision Estimates of T324"[32], reconociendo la falta de criterios de precisión en la norma.

En este estudio participaron 28 laboratorios de EEUU, donde finalmente se logró fijar precisiones de propiedades y resultados del ensayo de Rueda de Hamburgo, como se detalla en la Tabla 4-20:

Tabla 4-20: Precisión ensayo Rueda de Hamburgo

Propiedades	Un Operador	
	Coeficiente de Variación [%]	Rango aceptable de dos resultados [% del promedio]
Deformación [mm]	14,2	40,2
Número de pasadas hasta un ahuellamiento umbral	16,6	47,0
N° de pasadas al punto de inflexión	23,9	67,6
Pendiente Creep (1° parte curva)	16,6	47,0
Pendiente Strip (2° parte curva)	17,7	50,0

En las tablas siguientes se resumen los resultados de precisión de cada espécimen por mezcla:

- Deformación:

Tabla 4-21: Precisión deformación Rueda de Hamburgo

Mezcla 1		
Ensayo	N° Pasadas	Def [mm]
Espécimen 1	20.000	8,28
Espécimen 2	20.000	9,7
Promedio [mm]		8,99
Rango Aceptable (% del promedio)		40,2
Rango Aceptable		3,61
Def. máx.		12,60
Def. min		5,38
Decisión		**Se acepta**
Mezcla 2		
Ensayo	N° Pasadas	Def [mm]
Espécimen 1	20.000	15,67
Espécimen 2	20.000	17,27
Promedio [mm]		16,47
Rango Aceptable (% del promedio)		40,2
Rango Aceptable		6,62
Def. máx.		23,09
Def. min		9,85
Decisión		**Se acepta**
Mezcla 3		
Ensayo	N° Pasadas	Def [mm]
Espécimen 1	20.000	10,07
Espécimen 2	20.000	9,76
Promedio [mm]		9,92
Rango Aceptable (% del promedio)		40,2
Rango Aceptable		3,99
Def. máx.		13,90
Def. min		5,93
Decisión		**Se acepta**

- N° de ciclos a los que se alcanza los 4 mm (Criterio Alemán)

Tabla 4-22: Precisión Criterio Alemán Rueda de Hamburgo

Mezcla 1		
Ensayo	Def [mm]	N° Pasadas
Espécimen 1	4	11400
Espécimen 2	4	6700
Promedio [mm]		9050
Rango Aceptable (% del promedio)		47
Rango Aceptable		4253,50
Pasada máx.		13303,50
Pasada min.		4796,50
Decisión		**Se acepta**
Mezcla 2		
Ensayo	Def [mm]	N° Pasadas
Espécimen 1	4	2300
Espécimen 2	4	1300
Promedio [mm]		1800
Rango Aceptable (% del promedio)		47
Rango Aceptable		846,00
Pasada máx.		2646,00
Pasada min.		954,00
Decisión		**Se acepta**
Mezcla 3		
Ensayo	Def [mm]	N° Pasadas
Espécimen 1	4	8000
Espécimen 2	4	5000
Promedio [mm]		6500
Rango Aceptable (% del promedio)		47
Rango Aceptable		3055,00
Pasada máx.		9555,00
Pasada min.		3445,00
Decisión		**Se acepta**

- Pendiente primera parte de la curva (Creep slope)

Tabla 4-23: Precisión pendiente Creep Rueda de Hamburgo

Mezcla 1	
Ensayo	Pendiente
Espécimen 1	11111,1
Espécimen 2	5000
Promedio [mm]	8055,55
Rango Aceptable (% del promedio)	47
Rango Aceptable	3786,11
Pasada máx.	11841,66
Pasada min.	4269,44
Decisión	**Se acepta**
Mezcla 2	
Ensayo	Pendiente
Espécimen 1	2500
Espécimen 2	2500
Promedio [mm]	2500
Rango Aceptable (% del promedio)	47
Rango Aceptable	1175,00
Pasada máx.	3675,00
Pasada min.	1325,00
Decisión	**Se acepta**
Mezcla 3	
Ensayo	Pendiente
Espécimen 1	1666,7
Espécimen 2	2000
Promedio [mm]	1833,35
Rango Aceptable (% del promedio)	47
Rango Aceptable	861,67
Pasada máx.	2695,02
Pasada min.	971,68
Decisión	**Se acepta**

- Pendiente segunda parte de la curva (Strip Slope)

Tabla 4-24: Precisión pendiente Strip Rueda de Hamburgo

Mezcla 1	
Ensayo	Pendiente
Espécimen 1	2000
Espécimen 2	2000
Promedio [mm]	2000
Rango Aceptable (% del promedio)	50
Rango Aceptable	1000,00
Pasada máx.	3000,00
Pasada min.	1000,00
Decisión	**Se acepta**
Mezcla 2	
Ensayo	Pendiente
Espécimen 1	1000
Espécimen 2	1000
Promedio [mm]	1000
Rango Aceptable (% del promedio)	50
Rango Aceptable	500,00
Pasada máx.	1500,00
Pasada min.	500,00
Decisión	**Se acepta**
Mezcla 3	
Ensayo	Pendiente
Espécimen 1	833.3
Espécimen 2	1111,11
Promedio [mm]	1111,11
Rango Aceptable (% del promedio)	50
Rango Aceptable	555,56
Pasada máx.	1666,67
Pasada min.	555,56
Decisión	**Se acepta**

- Punto de Stripping

Tabla 4-25: Precisión punto de stripping Rueda de Hamburgo

Mezcla 1	
Ensayo	N° Pasadas
Espécimen 1	9817,6
Espécimen 2	11764,7
Promedio [mm]	10791,15
Rango Aceptable (% del promedio)	67,6
Rango Aceptable	7294,82
Pasada máx.	18085,97
Pasada min.	3496,33
Decisión	**Se acepta**
Mezcla 2	
Ensayo	N° Pasadas
Espécimen 1	11794,3
Espécimen 2	10730,3
Promedio [mm]	11262,3
Rango Aceptable (% del promedio)	67,6
Rango Aceptable	7613,31
Pasada máx.	18875,61
Pasada min.	3648,99
Decisión	**Se acepta**
Mezcla 3	
Ensayo	N° Pasadas
Espécimen 1	12017
Espécimen 2	13344
Promedio [mm]	12680,5
Rango Aceptable (% del promedio)	67,6
Rango Aceptable	8572,02
Pasada máx.	21252,52
Pasada min.	4108,48
Decisión	**Se acepta**

Como se observa ningún ensayo es descartado, ya que cumplen con los rangos máximos y mínimos.

- Relación Flow Number y Rueda de Hamburgo

Es posible también ordenar las mezclas según su resultado en el ensayo Rueda de Hamburgo y compararla con los resultados del ensayo Flow Number, como se muestra en la Tabla 4-26:

Tabla 4-26: Comparación ranking FN y RH

Mezcla	Ranking FN	Ranking RH (20.000 pasadas)	Ranking RH (10.000 pasadas)
1	3	1	1
2	2	3	3
3	1	2	2

La diferencia que se observa en el desempeño de la mezclas entre ambos ensayos puede ser atribuida a la diferencia en la forma de carga entre ambos ensayos y al daño por humedad que se sufre en el ensayo Rueda de Hamburgo, daño que podría haberse visto acrecentado al exponer a las Mezclas 2 y 3 a menores temperaturas de mezclado, debido a la incorporación del RAP, lo que puede no haber permitido un buen recubrimiento de los agregados lo que podría provocar mayores daños por humedad.

5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Este análisis pretende comprobar si la diferencia entre los resultados de cada mezcla para cada uno de los ensayos es significativa, en otras palabras si es posible considerar las tres mezclas analizadas similares o no.

ANOVA es una de las herramientas estadísticas más utilizadas, de manera simple, compara la variación entre las diferentes mezclas (MS_{mezcla}) con la varianza dentro de cada mezcla ($\mathrm{MS_D}$), entonces si $\mathrm{MS_{mezcla}}$ es significativamente mayor que $\mathrm{MS_D}$ se concluye que las medias asociadas a las diferentes mezclas son distintas, es decir las mezclas influyen significativamente sobre la variable dependiente.

Se basa en la hipótesis de que todos los datos provengan de las misma población (una misma mezcla), a través de una prueba de hipótesis F, valor que se debe comparar con un valor tabulado de F, el cual indica el valor máximo que puede tomar F calculado si la hipótesis nula (Ho, media de todas las mezclas son iguales) fuera verdadera, con un nivel de significancia dado. En el caso que la hipótesis nula sea rechazada, se concluye que en al menos una mezcla el promedio de los resultados es distinto a las demás. Los cálculos para el análisis explicado se muestran en la Tabla 5-1:

Tabla 5-1: Tabla ANOVA

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Varianza	F calculado
Entre mezclas	k-1	$SS_m = \sum_{k=1}^{k} n_k (\overline{X_k} - \overline{\overline{X}})^2$	$MS_{mezcla} = \frac{SS_m}{k-1}$	$F = \frac{MS_{mezcla}}{MS_D}$
Dentro de la mezcla	N-k	$SS_D = \sum_{k=1}^{k} \sum_{j=1}^{nk} (X_{kj} - \overline{X_k})^2$	$MS_D = \frac{SS_D}{N-k}$	
Total	N-1	$SS_T = \sum_{k=1}^{k} \sum_{j=1}^{nk} (X_{kj} - \overline{\overline{X}})^2$	$\frac{SS_T}{N-1}$	

Para aclarar que mezcla será la distinta se realiza la prueba de Tukey, en donde se deben calcular todas las diferencias entre los promedios de las mezclas y un umbral llamado Diferencias Honestamente Significativa (HSD), las diferencias que se encuentren por encima de este umbral se considerarán estadísticamente distintas.

Ecuación 18

$$HSD = q_{\alpha,V1,V2} \times \sqrt{\frac{MSe}{n°}}$$

Dónde:

$q_{\alpha,n,m}$ = Valor que se obtiene de la Tabla de Tukey, dependiendo del número de grupos (n) y los grados de libertad dentro de los grupos (m).Con α=0,05. (Anexo F)

MSe = Cuadrado del error medio dentro de cada grupo.

$$MSe = \frac{Suma\ de\ cuadrados\ dentro\ del\ grupo}{Grados\ de\ libertad\ dentro\ del\ grupo}$$ **Ecuación 19**

$n°$= tamaño de muestra de cada grupo.

5.1. ENSAYO FLOW NUMBER

El análisis ANOVA de los datos obtenidos en el ensayo Flow Number se presentan en la Tabla 5-2:

Table 5-2 : ANOVA Ensayo Flow Number

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre mezcla	110600	2	55300	6,60	0,02	4,26
Dentro de las mezclas	75425	9	8380,56			
Total	186025	11				

Se cumple que el valor crítico para F es menor que F calculado (6,60), por lo que se rechaza la hipótesis nula, es decir que en al menos una mezcla el promedio de los resultados del ensayo es diferente a las otras mezclas, con un 95% de confiabilidad.

Luego, para aclarar que mezclas son estadísticamente distintas se realiza la prueba de Tukey, con los siguientes datos:

Tabla 5-3: Datos Tukey ensayo Flow Number

HSD	q(0,05;3;9)	MSe	n°
180,80	3,95	8380,56	4

En la Tabla 5-4 se muestran las diferencias entre los promedios de cada mezcla:

Tabla 5-4: Test Tukey ensayo Flow Number

	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Mezcla 1	----	25	215
Mezcla 2		----	**190**
Mezcla 3			----

Finalmente se concluye que la mezcla asfáltica 3 (18% RAP) tiene un comportamiento en el ensayo de Número de Flujo distinto a la mezcla 1 (Sin RAP) y a la mezcla 2 (8%RAP).

5.2. ENSAYO RUEDA DE HAMBURGO

El análisis ANOVA de los datos obtenidos del ensayo Rueda de Hamburgo se presentan desde la Tabla 5-5 hasta la Tabla 5-10:

- 10.000 pasadas

Tabla 5-5: ANOVA Ensayo Rueda de Hamburgo 10.000 pasadas

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre mezcla	13,889	2	6,944	29,205	0,0107	9,552
Dentro de las mezclas	0,713	3	0,237			
Total	14,602	5				

Como F calculado es mayor a F crítico existe al menos una mezcla estadísticamente diferente, por lo que se realiza el Test Tukey con los datos de la Tabla 5-16:

Tabla 5-6: Datos Test Tukey ensayo Rueda de Hamburgo 10.000 pasadas

HSD	q(0,05;3;3)	MSe	n°
2,037	5,91	0,2377	2

En la Tabla 5-7 se muestran las diferencias entre los promedios de cada mezcla:

Tabla 5-7: Test Tukey ensayo Rueda de Hamburgo 10.000 pasadas

	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Mezcla 1	----	***3,53***	0,73
Mezcla 2		----	***2,8***
Mezcla 3			----

Finalmente se concluye que la mezcla asfáltica 2(8% RAP) tiene un comportamiento en el ensayo de Rueda de Hamburgo a las 10.000 pasadas distinto a la mezcla 1 (Sin RAP) y a la mezcla 3 (18%RAP). Mientras que entre las mezcla 1 y 3 no se observan diferencias estadísticas.

- 20.000 pasadas

Tabla 5-8: ANOVA Ensayo Rueda de Hamburgo 20.000 pasadas

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre mezcla	66,516	2	33,258	42,706	0,006	9,552
Dentro de las mezclas	2,336	3	0,778			
Total	68,852	5				

Como F calculado es mayor a F crítico existe al menos una mezcla estadísticamente diferente, por lo que se realiza el Test Tukey con los datos de la Tabla 5-9:

Tabla 5-9: Datos Test Tukey ensayo Rueda de Hamburgo 20.000 pasadas

HSD	q(0,05;3;3)	MSe	n°
3,689	5,91	0,778	2

En la Tabla 5-10 se muestran las diferencias entre los promedios de cada mezcla:

Tabla 5-10: Test Tukey ensayo Rueda de Hamburgo 20.000 pasadas

	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Mezcla 1	----	***7,48***	0,925
Mezcla 2		----	***6,56***
Mezcla 3			----

Finalmente se concluye que la mezcla asfáltica 2(8% RAP) tiene un comportamiento en el ensayo de Rueda de Hamburgo a las 20.000 pasadas distinto a la mezcla 1 (Sin RAP) y a la mezcla 3 (18%RAP). Mientras que en las mezcla 1 y 3 no se observan diferencias estadísticas.

Para la evaluación de los resultados del ensayo de Fatiga se utiliza el procedimiento introducido por Neter et al [33] y Motulsky[34]. Básicamente este procedimiento consiste en un análisis de varianza usando el estadístico F* para comparar dos líneas de regresión. La aplicación detallada de este procedimiento se presenta a continuación:

1.- Hipótesis; Ho: dos líneas de regresión son iguales. Ha: dos líneas de regresión son diferentes.

2.- Se ajusta el modelo sin restricción, para obtener la suma de los errores al cuadrado SSE (F) = SSE1 + SSE2, donde SSE1 es la suma de los errores al cuadrado para la línea de regresión 1 y SSE 2 la suma de los errores al cuadrado para la línea de regresión 2; siendo el número de grados de libertad total: df (F) = df1 + df2.

3.- Se ajusta el modelo reducido o restringido (se combinan ambos set de datos en uno solo) bajo la hipótesis Ho que las dos líneas son iguales y se obtiene la suma de los errores al cuadrado SSE(R), y los grados de libertad del modelo reducido df(R).

4.- Se calcula el estadístico F* por medio de la siguiente ecuación:

$$F^* = \frac{SSE(R) - SSE(F)}{df(R) - df(F)} \div \frac{SSE(F)}{df(F)}$$ **Ecuación 20**

5.- Se determina el valor de p por medio de la función interna de EXCEL de distribución de probabilidades para los sets de datos (DISTR.F): valor p = DISTR.F (F*, dfa,dfb). Donde dfa = df(R)-df(F) y dfb = df(F).

6.- Si el valor de p ≤ α (normalmente igual a 0,05), Ho debe ser rechazada y se concluye que las dos líneas de regresión son diferentes. En caso contrario, si p ≥ α, las dos líneas son iguales. [35]

5.3. ENSAYO FATIGA

Con los resultados del ensayo Fatiga obtenidos por los memoristas Nicolás Montalva y Marcelo Ávila que se encuentran en el Anexo G y siguiendo el procedimiento anterior, se analiza las curvas de fatiga de la mezcla 1 (sin RAP) y mezcla 3 (18% RAP). El análisis arroja los resultados mostrados en la Tabla 5-11:

Tabla 5-11: Análisis Curvas Fatiga

Modelo combinado		Modelo separado		F*	Valor p	Decisión
df(R)	SSE(R)	df(F)	SSE(F)			
7	0,124	6	0,113	0,543	4,890E-01	Son Iguales

Finalmente, no existe diferencia estadísticamente significativa entre las curvas de fatiga de las mezclas 1 y 3.

El resumen de los resultados del análisis estadístico se encuentra en la Tabla 5-12:

Tabla 5-12: Resumen Análisis Estadístico

Ensayo	Resultado ANOVA	Resultado Test Tukey
Flow Number	Al menos una mezcla es distinta.	Mezcla 3
Rueda de Hamburgo 10.000 pasadas	Al menos una mezcla es distinta.	Mezcla 2
Rueda de Hamburgo 20.000 pasadas	Al menos una mezcla es distinta.	Mezcla 2
Fatiga	Son Iguales (M1 y M3)	

Del análisis se puede apreciar que existen diferencias significativas entre las mezclas en los ensayos que se utilizaron para medir el desempeño en ahuellamiento. Estas diferencias no se pueden atribuir sólo a la presencia de RAP, habría que identificar y analizar otros factores que pudiesen contribuir.
Mientras que para el ensayo de Fatiga, las dos mezclas (1 y 3) pueden considerarse idénticas para un valor de significancia de 0,05.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A tres mezclas asfálticas con distintas porcentajes de RAP se les evaluó el Módulo Dinámico y se les caracterizó en el desempeño en ahuellamiento a través del ensayo Rueda de Hamburgo y Flow Number.

- Módulo Dinámico

Las tres mezclas asfálticas fueron caracterizadas según el Módulo Dinámico siguiendo la norma AASHTO T342-11.

Para el análisis de los resultados se confeccionaron Curvas Maestras e Isócronas, lo que nos permite ver el claro efecto de la temperatura y frecuencia de carga en las propiedades de la mezcla, presentado un resultado no esperado.

El RAP al ser un material con mayor envejecimiento se espera que su presencia aporte mayor rigidez a la mezcla, lo que no se observó en los resultados, ya que la Mezcla 1 (sin RAP) presentó los valores más alto de módulo en todo el rango de temperaturas y frecuencias, una posible explicación podría ser la diferencia de temperatura a la que estuvieron expuestas las mezclas en el momento de su mezclado, ya que al agregar RAP a una temperatura menor (135°C) hizo bajar la temperatura en la mezcla 2 y 3, mientras que la mezcla 1 estuvo expuesta a una temperatura mayor, pudiendo envejecer el ligante.

La variabilidad entre probetas ensayadas fue elevada, esto se podría explicar por el proceso de fabricación de probetas, ya que no se comprobó una vez mezclados los áridos y el RAP, según el diseño entregado, que efectivamente lo cumpliera, volviendo a tamizar.

- Ahuellamiento

El ensayo Flow Number da un resultado lógico, la mezcla con mayor porcentaje de RAP (Mezcla 3) presenta el mejor desempeño en ahuellamiento y se diferencia de las otras mezclas (comprobado en el análisis ANOVA).

Con respecto al ensayo de Rueda de Hamburgo, la norma (AASHTO T324-11) no define estándares de precisión y variabilidad, sin embargo la variabilidad existente entre los resultados de una misma mezcla igualmente fue comprobada y cumple lo establecido. Sin embargo los resultados no fueron como se esperaba, ya que la mezcla 2 (8% RAP) presenta las mayores deformaciones.

Al comparar los resultados del ensayo Flow Number y Rueda de Hamburgo se observa que no ordenan a las mezclas de la misma forma con respecto a su desempeño en ahuellamiento, esta discrepancia puede ser atribuida principalmente al daño por humedad que se sufre en el ensayo Rueda de Hamburgo, daño que podría haberse visto acrecentado debido al exponer a las Mezclas 2 y 3 a menores temperaturas de mezclado, como se explicó anteriormente, lo que puede no haber permitido un buen recubrimiento de los agregados lo que podría provocar mayores daños por humedad.

Se observa que los resultados de Módulo Dinámico a 54°C y a frecuencias altas tienen mejor correlación con los resultados del Flow Number.

- Fatiga

Se comparó la rigidez en flexión con los resultados del módulo dinámico en condiciones similares (21°C y 10 [Hz]), la mayor diferencia entre los resultados la tuvo

la Mezcla 1, pero no sería correcto sacar conclusiones debido a la gran variabilidad que presentan ambos ensayos.

En general, se puede mencionar que no considerando zonas extremas (bajas temperaturas -10°C) y de acuerdo a los procedimientos seguidos en esta memoria, el comportamiento de las mezclas analizadas, con y sin RAP, es similar.

Se propone para tener una idea más clara de los resultados realizar un estudio completo al RAP, extrayendo y recuperando el asfalto del RAP para su posterior caracterización, de esta manera poder analizar qué efectos tendría al combinarse con el asfalto virgen. Además incluir el análisis de los áridos utilizados.

Por último también sería recomendable estudios de la mezclas a bajas temperaturas, los cuales no se hicieron en este estudio por falta de recursos y tiempo.

REFERENCIAS

1 Ediciones especiales, Los renovados énfasis de la industria de pavimentos en

2 McDaniel, Rebecca, Anderson Michael, Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the superpave mix design method, Technician´s Manual, Rep N°452, NCHRP 2001.

3 Zúñiga Rosa, “Mezclas asfálticas en caliente con RAP”, Laboratorio Nacional de Vialidad, Marzo 2016.

4 Asphalt Institute, Capítulo 11 “Recycled Asphalt Materials in the mix design process”, Manual Serie No.02 (MS-2) “Asphalt Mix Design Methods”, Séptimaedición, 2014.

5 National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Project 9-12: “Incorporation of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave System”.

6 Di Benedetto, De la Roche C., “State of the art on stiffness modulus and fatigue of bituminous mixture”, Report RILEM N°17 Bituminous binders and mixes: State of art and interlaboratory test on mechanical behavior and mixes design, London, 2015.

7 Tangella, S. C., Craus, J., Deacon, J. A., and Monismith, C. L. (1990). "Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures." Technical Memorandum No. TM-UCB-A-003A-89-3M, prepared for SHRP Project A-003A. SHRP-A/IR-90-011. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.

8 Martínez Ignacio; “Caracterización de mezclas asfálticas para el uso de recapados asfalticos mediante el ensayo de Rueda de Carga de Hamburgo”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles, 2014.

9 Morea, F. “Deformaciones permanents en mezclas asfálticas”, Repositorio institucional de la Universidad Nacional de la Plata, 2011.

10 National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Project 9-19: “Superpave support and performance models managemts”.

11 Manual de Carreteras Volumen N°8. “Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control”, sección 8.302.47. Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas de Chile.

12 “Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder”, ASTM D6373-15.

13 “Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer”, ASTM D6648-08.

14 Manual de Carreteras Volumen N°5. “Especificaciones Técnicas Generales de Construcción”. Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas de Chile.

15 Manual de Carreteras Volumen N°8. “Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control”. Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas de Chile.

16 “Standard practice for mixture conditioning of hot mix asphalt”, AASHTO R30

17 Jiménez M, “Consideraciones generales sobre la compactación de especímenes de mezcla asfáltica en caliente (MAC) en el Compactador Giratorio Superpave”, Laboratorio de ensayos dinámicos para pavimentos, LANAMME UCR, 2012.

18 American Association of State Highway and Transportation Officials.“Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA)”, AASHTO T324-14, EEUU, 2015.

19 Leiva Fabricio, “Estudio del módulo dinámico complejo de mezclas asfálticas. Desarrollo de curvas maestras, primera parte”, Universidad de Costa Rica, Laboratorio nacional de materiales y modelos estructurales (LANAMME).

20 “Valorización de la rigidez de las mezclas asfálticas. Ensayo módulo de rigidez por tracción indirecta”, LEMaC Centro de investigación Vial UTN-FRLP, Laboratorio Vial UTN FRM.

21 Alcántara Hugo, “Capitulo 9: Comportamiento de mezclas asfálticas”, Universidad privada Antenor Orrego.

22 American Association of State Highway and Transportation Officials, “Standard Method of test for determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixture” AASHTO T342-11, EE.UU, 2011.

23 García P.,Delgado H., Gómez J., Romero S.,Alarcón H., “Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas”, Instituto mexicano del transporte, 2004.

24 Toro M., “Caracterización del Módulo Dinámico de mezclas asfálticas chilenas y caracterización de la rigidez a bajas temperaturas de betunes con BBR”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles, 2013.

25 Garcia G, Thompson M.,“HMA Dynamic modulus predictive models – a review”.Research Report FHWA-ICT-07-005, Illinois Center for Transportation, EE.UU, 2007.

26 ASTM C670-10 “Standard Practice for Preparing Precision and Bias Statements for test Methods for Construction Materials”, United States, 2013.

27 Walubita L, Zhang J, Xiadihu, “Exploring the Flow Number Index as a means to characterise the HMA permanent deformation response under FN testing”, Journal of the south african institution of civil engineering, Octubre 2013.

28 American Association of State Highway and Transportation Officials,“Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixture Perfomance Tester (AMPT)”, AASHTO TP79-15, EE.UU, 2015.

29 American Association of State Highway and Transportation Officials. “Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA)”, AASHTO T324-14, EEUU, 2015.

30 Operating Instructions “Wheel tracking device SBG-LW-2x320x260”, BPS Wenninsen, UK.

31 Operating instructions “Measurement data capture, analysis and documentation software SBT starting from versión 3.1 for the Wheel Tracking Device SBG”, BPS Wennigsen, UK.

32 National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Project 10-87: “Precision estimates of AASHTO T 324, “Hamburg Wheeltrack testing of compacted hot mix asphalt (hma)”, Junio 2014.

33 . Neter, J., and W. Waserman. Applied Linear Statistical Models, Regression, Analysis of Variance, and Experimental Design. Homewood, Illinois, 1974.

34Motulsky, H., and A. Christopoulos.Fitting Models to Biological Data Using Linear and Nonlinear Regression, A Practical Guide to Curve Fitting. GraphPad Software Inc., San Diego, CA, 2003.

35 García G., Cáceres M., Delgadillo R., Wahr C., “Utilización de un pavimento asfáltico recuperado (RAP) como base granular”, CILA 2015.

ANEXOS
ANEXO A: CARACTERÍSTICAS PROBETAS

- **MEZCLA 1**

Probetas	%Va	Ensayos	
		Módulo Dinámico	Flow Number
1	7,5	X	X
2	6,5	X	X
3	6,6		X
4	6,8	X	X

- X se refiere a que la probeta fue utilizado para el ensayo.

Ensayo	Dimensiones	Probetas	Va%
Rueda de Hamburgo	Diámetro: 150 [mm] Altura: 62 [mm]	1	7,13
		2	6,09
		3	7,51
		4	6,91

- **MEZCLA 2**

Probetas	%Va	Ensayos	
		Módulo Dinámico	Flow Number
1	7,5	X	X
2	6,9		X
3	7,0	X	X
4	7,1	X	X

- X se refiere a que la probeta fue utilizado para el ensayo.

Ensayo	Dimensiones	Probetas	Va%
Módulo Dinámico Flow Number	Diámetro: 100 [mm] Altura: 150 [mm]	1	7,54
		2	6,90
		3	7,00
		4	7,12
Rueda de Hamburgo	Diámetro: 150 [mm] Altura: 62 [mm]	1	7,26
		2	7,65
		3	6,99
		4	7,48

- **MEZCLA 3**

Probetas	%Va	Ensayos	
		Módulo Dinámico	Flow Number
1	7,0	X	X
2	6,2		X
3	6,7	X	X
4	76,5	X	X

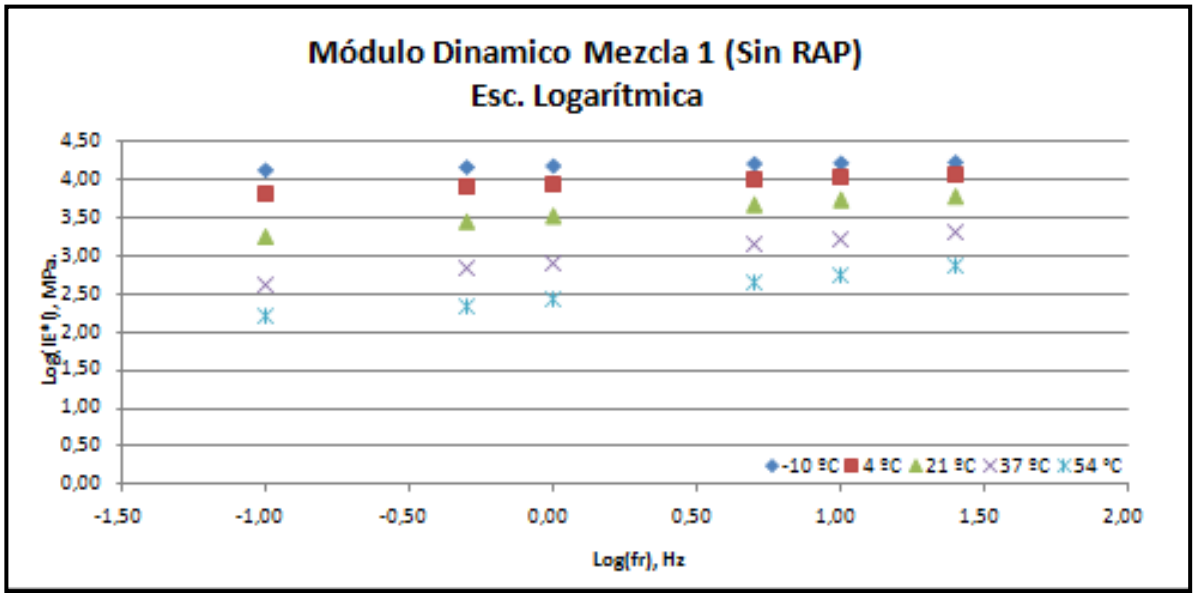
- X se refiere a que la probeta fue utilizado para el ensayo.

Ensayo	Dimensiones	Probetas	Va%
Módulo Dinámico Flow Number	Diámetro: 100 [mm] Altura: 150 [mm]	1	6,99
		2	6,19
		3	6,72
		4	6,46
Rueda de Hamburgo	Diámetro: 150 [mm] Altura: 62 [mm]	1	7,49
		2	6,34
		3	7,88
		4	7,55

ANEXO B: DATOS ENSAYO MÓDULO DINÁMICO

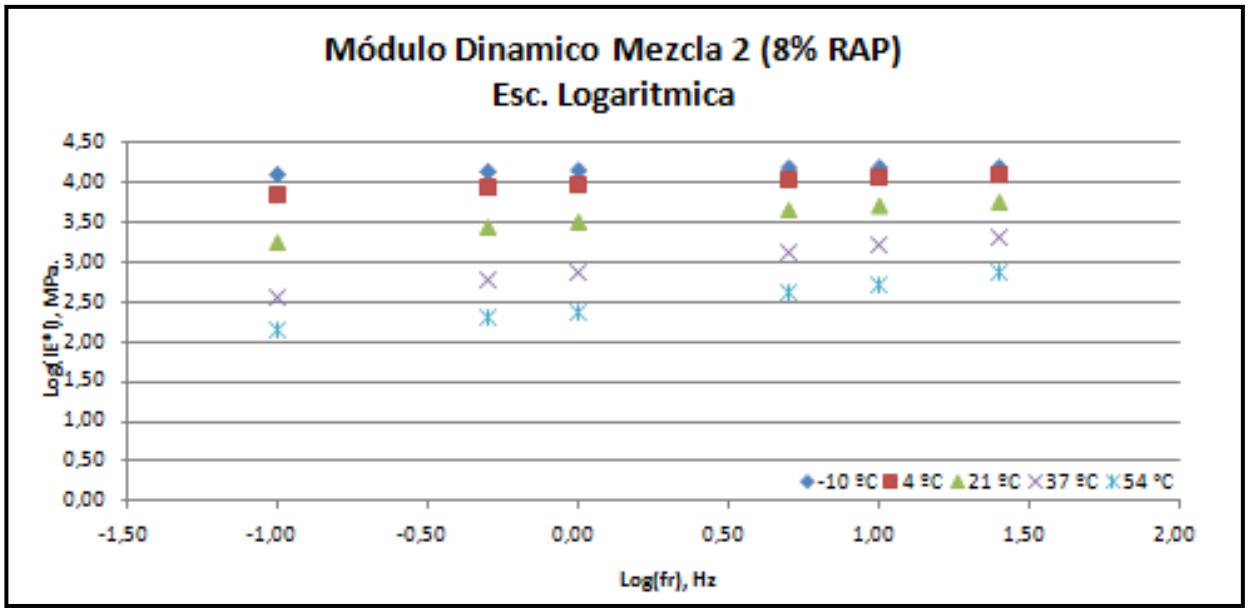
1. - MEZCLA 1 (SIN RAP)

		Módulo Dinámico IE*I [Mpa]				
					Promedio	
Temperatura °C	Frecuencia Hz	Probeta 4	Probeta 2	Probeta 1	3 Probetas	2 Probetas (4 y 2)
-10	25,0	17376,0	18383,7	13783,2	16514,3	17879,8
-10	10,0	17005,4	17900,0	13511,3	16138,9	17452,7
-10	5,0	16699,2	17539,6	13221,1	15819,9	17119,4
-10	1,0	15541,7	16459,3	12128,9	14710,0	16000,5
-10	0,5	14896,8	15690,5	11820,0	14135,8	15293,6
-10	0,1	13525,8	14645,6	10404,9	12858,8	14085,7
4	25,0	11273,8	13270,0	8844,2	11129,3	12271,9
4	10,0	10635,9	12454,4	8331,3	10473,9	11545,1
4	5,0	10155,8	11859,3	7955,5	9990,2	11007,5
4	1,0	8643,2	10309,1	6746,0	8566,1	9476,1
4	0,5	7989,9	9687,1	6203,7	7960,2	8838,5
4	0,1	6307,7	8108,2	4976,3	6464,1	7208,0
21	25,0	5899,1	6992,2	4757,1	5882,8	6445,6
21	10,0	5313,2	6463,3	4296,1	5357,5	5888,2
21	5,0	4555,7	5728,3	3687,9	4657,3	5142,0
21	1,0	3173,9	4283,6	2565,8	3341,1	3728,7
21	0,5	2623,3	3670,0	2154,5	2815,9	3146,6
21	0,1	1606,8	2491,8	1354,5	1817,7	2049,3
37	25,0	1833,1	2629,1	1634,6	2032,3	2231,1
37	10,0	1391,4	2284,9	1260,5	1645,6	1838,1
37	5,0	1129,3	1964,6	1071,6	1388,5	1547,0
37	1,0	628,2	1219,1	616,7	821,3	923,7
37	0,5	502,9	981,7	509,2	664,6	742,3
37	0,1	290,7	603,1	312,7	402,2	446,9
54	25,0	605,8	994,0	571,8	723,9	799,9
54	10,0	425,1	831,6	408,1	555,0	628,4
54	5,0	333,6	679,5	323,1	445,4	506,5
54	1,0	216,6	400,1	198,8	271,8	308,4
54	0,5	173,3	331,0	164,0	222,7	252,1
54	0,1	146,0	214,4	115,1	158,5	180,2


Módulo Dinamico Mezcla 1 (Sin RAP)
Esc. Logarítmica
4,50
4,00
3,50
3,00
2,50
2,00
1,50
1,00
0,50
0,00
Log(|E*|), MPa
-1,50
-1,00
-0,50
0,00
0,50
1,00
1,50
2,00
Log(fr), Hz
-10 ºC
4 ºC
21 ºC
37 ºC
54 ºC

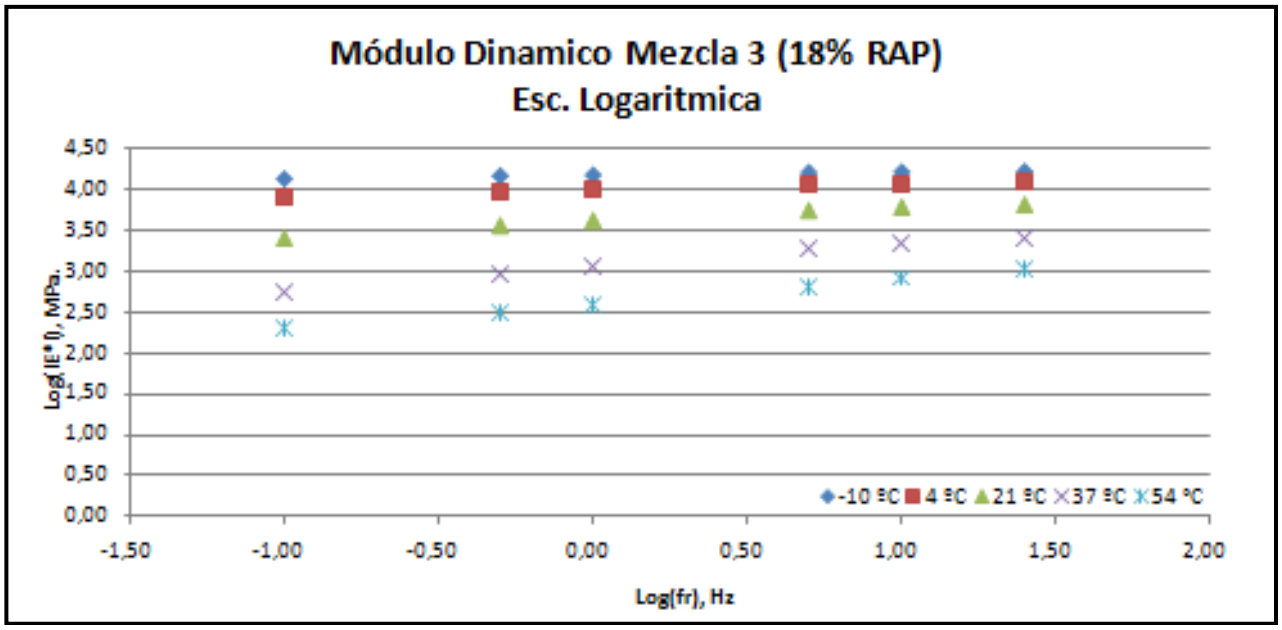
2. - MEZCLA 2 (8% RAP)

		Módulo Dinámico IE*I [Mpa]				
					Promedio	
Temperatura °C	**Frecuencia** Hz	**Probeta 4**	**Probeta 3**	**Probeta 1**	**3 Probetas**	**2 Probetas (4 y 3)**
-10	25,0	12732,7	12735,2	19663,2	15043,7	12733,9
-10	10,0	12494,4	12858,6	19656,5	15003,2	12676,5
-10	5,0	12238,7	12606,7	19576,7	14807,4	12422,7
-10	1,0	11460,4	11903,9	18197,8	13854,0	11682,1
-10	0,5	11156,9	11520,2	17603,3	13426,8	11338,5
-10	0,1	10179,5	10742,8	16133,9	12352,1	10461,1
4	25,0	9172,1	9496,3	17378,5	12015,6	9334,2
4	10,0	8787,6	9368,6	16295,0	11483,7	9078,1
4	5,0	8416,3	8979,3	15170,4	10855,3	8697,8
4	1,0	7250,7	7804,6	13054,3	9369,9	7527,6
4	0,5	6784,0	7378,6	11948,0	8703,5	7081,3
4	0,1	5553,9	6266,5	9274,0	7031,5	5910,2
21	25,0	4938,4	5261,8	6838,1	5679,4	5100,1
21	10,0	4421,4	4794,1	6060,6	5092,0	4607,7
21	5,0	3877,7	4388,1	5243,0	4502,9	4132,9
21	1,0	2746,2	3111,1	3650,2	3169,1	2928,6
21	0,5	2320,2	2670,6	3133,3	2708,1	2495,4
21	0,1	1453,3	1767,2	1956,7	1725,8	1610,3
37	25,0	1688,6	2018,4	2243,0	1983,4	1853,5
37	10,0	1324,5	1673,8	1836,5	1611,6	1499,1
37	5,0	1041,1	1351,2	1454,5	1282,3	1196,1
37	1,0	614,8	775,7	821,3	737,3	695,3
37	0,5	477,3	622,3	662,6	587,4	549,8
37	0,1	299,4	371,2	368,5	346,4	335,3
54	25,0	652,0	795,8	714,7	720,8	723,9
54	10,0	461,8	569,0	503,1	511,3	515,4
54	5,0	366,0	447,3	392,9	402,0	406,6
54	1,0	216,2	263,6	240,1	240,0	239,9
54	0,5	178,1	229,7	214,4	207,4	203,9
54	0,1	120,6	155,3	142,0	139,3	137,9


Módulo Dinamico Mezcla 2 (8% RAP)
Esc. Logaritmica
4,50
4,00
3,50
3,00
2,50
2,00
1,50
1,00
0,50
0,00
Log(|E*|), MPa.
-1,50
-1,00
-0,50
0,00
0,50
1,00
1,50
2,00
Log(fr), Hz
-10 ºC
4 ºC
21 ºC
37 ºC
54 ºC

3. - MEZCLA 3 (18% RAP)

		Módulo Dinámico IE*I [Mpa]				
					Promedio	
Temperatura °C	Frecuencia Hz	Probeta 1	Probeta 3	Probeta 4	3 Probetas	2 Probetas (1 y 3)
-10	25,0	12943,4	11554,6	24774,6	16424,2	12249,0
-10	10,0	12768,3	11516,6	24430,3	16238,4	12142,5
-10	5,0	12651,6	11399,4	23955,6	16002,2	12025,5
-10	1,0	11818,4	10689,8	22378,5	14962,2	11254,1
-10	0,5	11399,1	10497,6	21996,3	14631,0	10948,4
-10	0,1	10640,3	9634,7	20184,2	13486,4	10137,5
4	25,0	9805,6	8163,1	18873,9	12280,9	8984,4
4	10,0	9549,4	7930,5	17734,8	11738,2	8740,0
4	5,0	8938,5	7690,9	17728,0	11452,4	8314,7
4	1,0	7895,8	6698,9	15369,1	9987,9	7297,4
4	0,5	7353,7	6448,3	14482,0	9428,0	6901,0
4	0,1	6160,8	5518,5	12142,9	7940,7	5839,7
21	25,0	5104,8	5219,5	8947,1	6423,8	5162,1
21	10,0	4700,1	4736,8	8598,0	6011,6	4718,5
21	5,0	4309,1	4362,9	7752,9	5474,9	4336,0
21	1,0	3176,6	3241,3	5953,1	4123,7	3209,0
21	0,5	2751,3	2849,5	5104,4	3568,4	2800,4
21	0,1	1934,9	1907,2	3641,8	2494,6	1921,0
37	25,0	2182,4	2165,8	3322,3	2556,8	2174,1
37	10,0	1857,3	1813,8	2850,5	2173,9	1835,5
37	5,0	1582,5	1519,5	2567,0	1889,7	1551,0
37	1,0	952,8	881,9	1593,7	1142,8	917,3
37	0,5	764,3	693,2	1308,3	921,9	728,7
37	0,1	479,0	405,4	815,3	566,6	442,2
54	25,0	816,0	850,4	1597,4	1087,9	833,2
54	10,0	634,9	618,8	1212,8	822,2	626,9
54	5,0	487,0	481,2	970,3	646,2	484,1
54	1,0	284,3	278,5	577,1	379,9	281,4
54	0,5	231,7	229,3	454,9	305,3	230,5
54	0,1	156,1	158,6	287,1	200,6	157,4


Módulo Dinamico Mezcla 3 (18% RAP)
Esc. Logaritmica
4,50
4,00
3,50
3,00
2,50
2,00
1,50
1,00
0,50
0,00
Log(|E*|), MPa.
-1,50
-1,00
-0,50
0,00
0,50
1,00
1,50
2,00
Log(fr), Hz
-10 ºC
4 ºC
21 ºC
37 ºC
54 ºC

ANEXO C: PRECISIÓN MÓDULO DINÁMICO

- Mezcla 1:

Temp.	Frec.	Probeta 4	Probeta 2	Probeta 1	Precisión tres probetas			Precisión dos probetas (4-2)		
°C	Hz	|E*| [Mpa]	|E*| [Mpa]	|E*| [Mpa]	Rango	Rango máx.	Precisión	Rango	Rango máx.	Precisión
-10	25,0	17376,0	18383,7	13783,2	27,9	22	No Cumple	5,6	19	Ok
-10	10,0	17005,4	17900,0	13511,3	27,2	22	No Cumple	5,1	19	Ok
-10	5,0	16699,2	17539,6	13221,1	27,3	22	No Cumple	4,9	19	Ok
-10	1,0	15541,7	16459,3	12128,9	29,4	22	No Cumple	5,7	19	Ok
-10	0,5	14896,8	15690,5	11820,0	27,4	22	No Cumple	5,2	19	Ok
-10	0,1	13525,8	14645,6	10404,9	33,0	22	No Cumple	7,9	19	Ok
4	25,0	11273,8	13270,0	8844,2	39,8	22	No Cumple	16,3	19	Ok
4	10,0	10635,9	12454,4	8331,3	39,4	22	No Cumple	15,8	19	Ok
4	5,0	10155,8	11859,3	7955,5	39,1	26	No Cumple	15,5	19	Ok
4	1,0	8643,2	10309,1	6746,0	41,6	26	No Cumple	17,6	22	Ok
4	0,5	7989,9	9687,1	6203,7	43,8	26	No Cumple	19,2	22	Ok
4	0,1	6307,7	8108,2	4976,3	48,5	26	No Cumple	25,0	22	No Cumple
21	25,0	5899,1	6992,2	4757,1	38,0	26	No Cumple	17,0	22	Ok
21	10,0	5313,2	6463,3	4296,1	40,5	26	No Cumple	19,5	22	Ok
21	5,0	4555,7	5728,3	3687,9	43,8	31	No Cumple	22,8	22	No Cumple
21	1,0	3173,9	4283,6	2565,8	51,4	31	No Cumple	29,8	27	No Cumple
21	0,5	2623,3	3670,0	2154,5	53,8	31	No Cumple	33,3	27	No Cumple
21	0,1	1606,8	2491,8	1354,5	62,6	38	No Cumple	43,2	27	No Cumple
37	25,0	1833,1	2629,1	1634,6	48,9	31	No Cumple	35,7	27	No Cumple
37	10,0	1391,4	2284,9	1260,5	62,2	38	No Cumple	48,6	32	No Cumple
37	5,0	1129,3	1964,6	1071,6	64,3	38	No Cumple	54,0	32	No Cumple
37	1,0	628,2	1219,1	616,7	73,3	45	No Cumple	64,0	38	No Cumple
37	0,5	502,9	981,7	509,2	72,1	45	No Cumple	64,5	38	No Cumple
37	0,1	290,7	603,1	312,7	77,7	54	No Cumple	69,9	46	No Cumple
54	25,0	605,8	994,0	571,8	58,3	45	No Cumple	48,5	38	No Cumple
54	10,0	425,1	831,6	408,1	76,3	45	No Cumple	64,7	38	No Cumple
54	5,0	333,6	679,5	323,1	80,0	54	No Cumple	68,3	38	No Cumple
54	1,0	216,6	400,1	198,8	74,1	54	No Cumple	59,5	46	No Cumple
54	0,5	173,3	331,0	164,0	75,0	54	No Cumple	62,5	46	No Cumple
54	0,1	146,0	214,4	115,1	62,7	66	Ok	37,9	56	Ok

- Mezcla 2

Temp.	Frec.	Probeta 4	Probeta 3	Probeta 1	Precisión tres probetas			Precisión dos probetas (4-3)		
°C	Hz	|E*| [Mpa]	|E*| [Mpa]	|E*| [Mpa]	Rango	Rango máx.	Precisión	Rango	Rango máx.	Precisión
-10	25,0	12732,7	12735,2	19663,2	46,1	22	No Cumple	0,0	19	Ok
-10	10,0	12494,4	12858,6	19656,5	47,7	22	No Cumple	2,9	19	Ok
-10	5,0	12238,7	12606,7	19576,7	49,6	22	No Cumple	3,0	19	Ok
-10	1,0	11460,4	11903,9	18197,8	48,6	22	No Cumple	3,8	19	Ok
-10	0,5	11156,9	11520,2	17603,3	48,0	22	No Cumple	3,2	19	Ok
-10	0,1	10179,5	10742,8	16133,9	48,2	22	No Cumple	5,4	19	Ok
4	25,0	9172,1	9496,3	17378,5	68,3	22	No Cumple	3,5	22	Ok
4	10,0	8787,6	9368,6	16295,0	65,4	22	No Cumple	6,4	22	Ok
4	5,0	8416,3	8979,3	15170,4	62,2	22	No Cumple	6,5	22	Ok
4	1,0	7250,7	7804,6	13054,3	61,9	26	No Cumple	7,4	22	Ok
4	0,5	6784,0	7378,6	11948,0	59,3	26	No Cumple	8,4	22	Ok
4	0,1	5553,9	6266,5	9274,0	52,9	26	No Cumple	12,1	22	Ok
21	25,0	4938,4	5261,8	6838,1	33,4	26	No Cumple	6,3	22	Ok
21	10,0	4421,4	4794,1	6060,6	32,2	26	No Cumple	8,1	27	Ok
21	5,0	3877,7	4388,1	5243,0	30,3	31	Ok	12,3	27	Ok
21	1,0	2746,2	3111,1	3650,2	28,5	31	Ok	12,5	27	Ok
21	0,5	2320,2	2670,6	3133,3	30,0	31	Ok	14,0	27	Ok
21	0,1	1453,3	1767,2	1956,7	29,2	38	Ok	19,5	32	Ok
37	25,0	1688,6	2018,4	2243,0	28,0	38	Ok	17,8	32	Ok
37	10,0	1324,5	1673,8	1836,5	31,8	38	Ok	23,3	32	Ok
37	5,0	1041,1	1351,2	1454,5	32,2	38	Ok	25,9	32	Ok
37	1,0	614,8	775,7	821,3	28,0	45	Ok	23,1	38	Ok
37	0,5	477,3	622,3	662,6	31,5	45	Ok	26,4	38	Ok
37	0,1	299,4	371,2	368,5	20,7	54	Ok	21,4	46	Ok
54	25,0	652,0	795,8	714,7	19,9	45	Ok	19,9	38	Ok
54	10,0	461,8	569,0	503,1	21,0	45	Ok	20,8	38	Ok
54	5,0	366,0	447,3	392,9	20,2	54	Ok	20,0	46	Ok
54	1,0	216,2	263,6	240,1	19,7	54	Ok	19,7	46	Ok
54	0,5	178,1	229,7	214,4	24,8	54	Ok	25,3	46	Ok
54	0,1	120,6	155,3	142,0	25,0	66	Ok	25,2	56	Ok

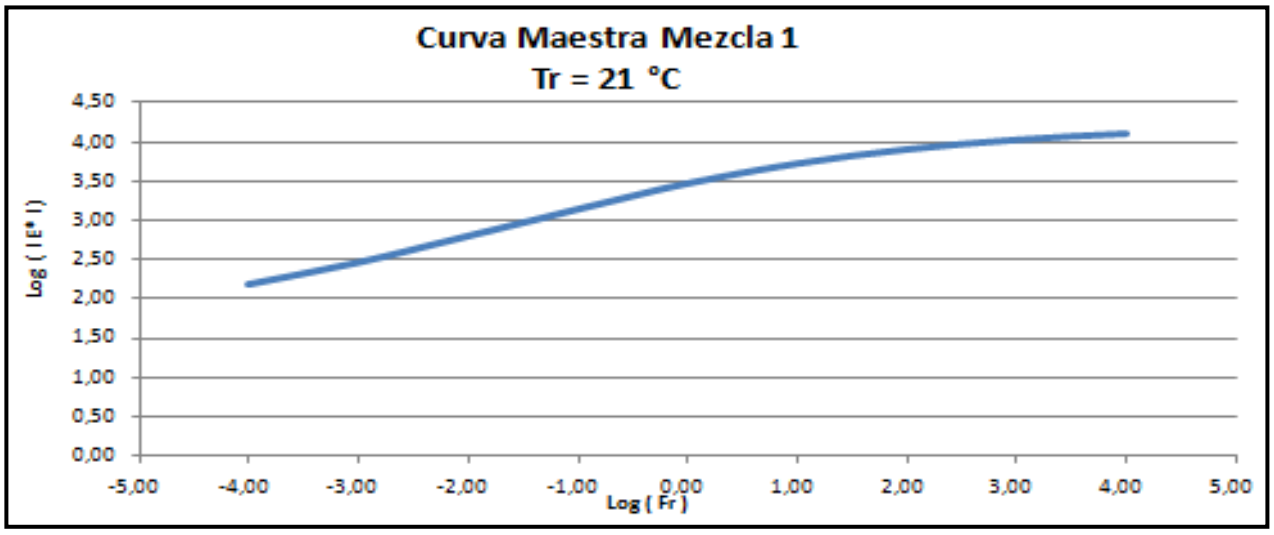
- Mezcla 3

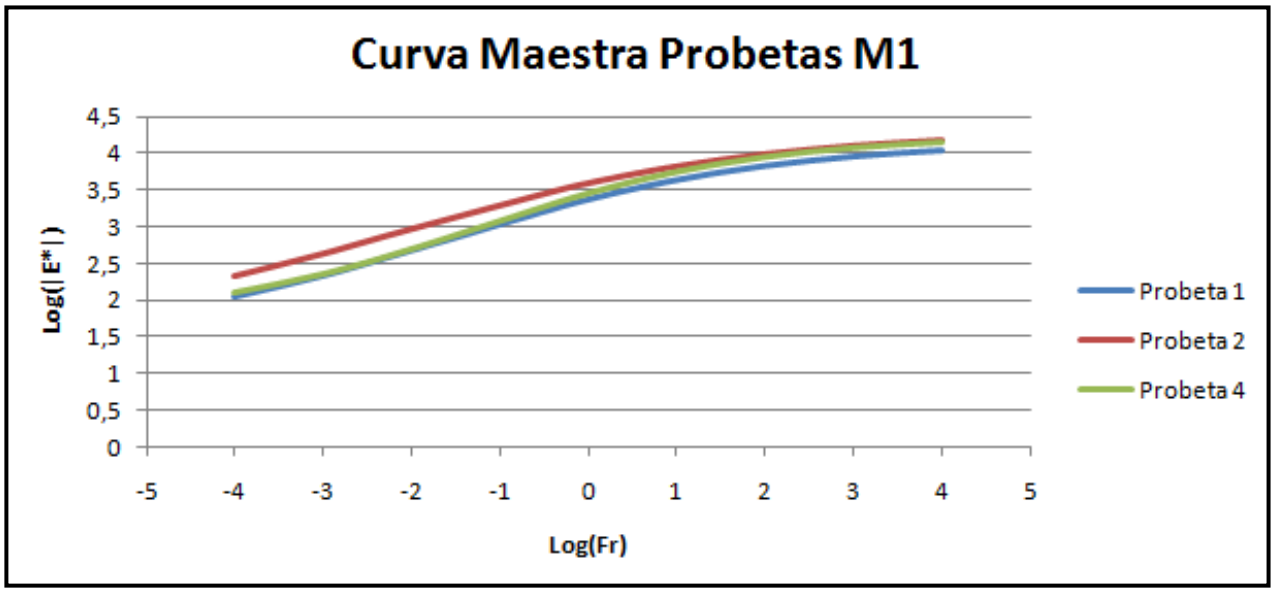
Temp.	Frec.	Probeta 1	Probeta 3	Probeta 4	Precisión tres probetas			Precisión dos probetas (4-3)		
°C	Hz	|E*| [Mpa]	|E*| [Mpa]	|E*| [Mpa]	Rango	Rango máx.	Precisión	Rango	Rango máx.	Precisión
-10	25,0	12943,4	11554,6	24774,6	80,5	22	No Cumple	11,3	18	Ok
-10	10,0	12768,3	11516,6	24430,3	79,5	22	No Cumple	10,3	19	Ok
-10	5,0	12651,6	11399,4	23955,6	78,5	22	No Cumple	10,4	19	Ok
-10	1,0	11818,4	10689,8	22378,5	78,1	22	No Cumple	10,0	19	Ok
-10	0,5	11399,1	10497,6	21996,3	78,6	22	No Cumple	8,2	19	Ok
-10	0,1	10640,3	9634,7	20184,2	78,2	22	No Cumple	9,9	19	Ok
4	25,0	9805,6	8163,1	18873,9	87,2	22	No Cumple	18,3	22	Ok
4	10,0	9549,4	7930,5	17734,8	83,5	22	No Cumple	18,5	22	Ok
4	5,0	8938,5	7690,9	17728,0	87,6	22	No Cumple	15,0	22	Ok
4	1,0	7895,8	6698,9	15369,1	86,8	26	No Cumple	16,4	22	Ok
4	0,5	7353,7	6448,3	14482,0	85,2	26	No Cumple	13,1	22	Ok
4	0,1	6160,8	5518,5	12142,9	83,4	26	No Cumple	11,0	22	Ok
21	25,0	5104,8	5219,5	8947,1	59,8	26	No Cumple	2,2	22	Ok
21	10,0	4700,1	4736,8	8598,0	64,8	26	No Cumple	0,8	27	Ok
21	5,0	4309,1	4362,9	7752,9	62,9	26	No Cumple	1,2	27	Ok
21	1,0	3176,6	3241,3	5953,1	67,3	31	No Cumple	2,0	27	Ok
21	0,5	2751,3	2849,5	5104,4	65,9	31	No Cumple	3,5	27	Ok
21	0,1	1934,9	1907,2	3641,8	69,5	31	No Cumple	1,4	32	Ok
37	25,0	2182,4	2165,8	3322,3	45,2	31	No Cumple	0,8	27	Ok
37	10,0	1857,3	1813,8	2850,5	47,7	31	No Cumple	2,4	32	Ok
37	5,0	1582,5	1519,5	2567,0	55,4	38	No Cumple	4,1	32	Ok
37	1,0	952,8	881,9	1593,7	62,3	38	No Cumple	7,7	38	Ok
37	0,5	764,3	693,2	1308,3	66,7	45	No Cumple	9,8	38	Ok
37	0,1	479,0	405,4	815,3	72,3	45	No Cumple	16,7	46	Ok
54	25,0	816,0	850,4	1597,4	71,8	38	No Cumple	4,1	38	Ok
54	10,0	634,9	618,8	1212,8	72,2	45	No Cumple	2,6	38	Ok
54	5,0	487,0	481,2	970,3	75,7	45	No Cumple	1,2	46	Ok
54	1,0	284,3	278,5	577,1	78,6	54	No Cumple	2,1	46	Ok
54	0,5	231,7	229,3	454,9	73,9	54	No Cumple	1,0	46	Ok
54	0,1	156,1	158,6	287,1	65,3	54	No Cumple	1,6	56	Ok

ANEXO D: CURVAS MAESTRAS

1.- MEZCLA 1 (SIN RAP)

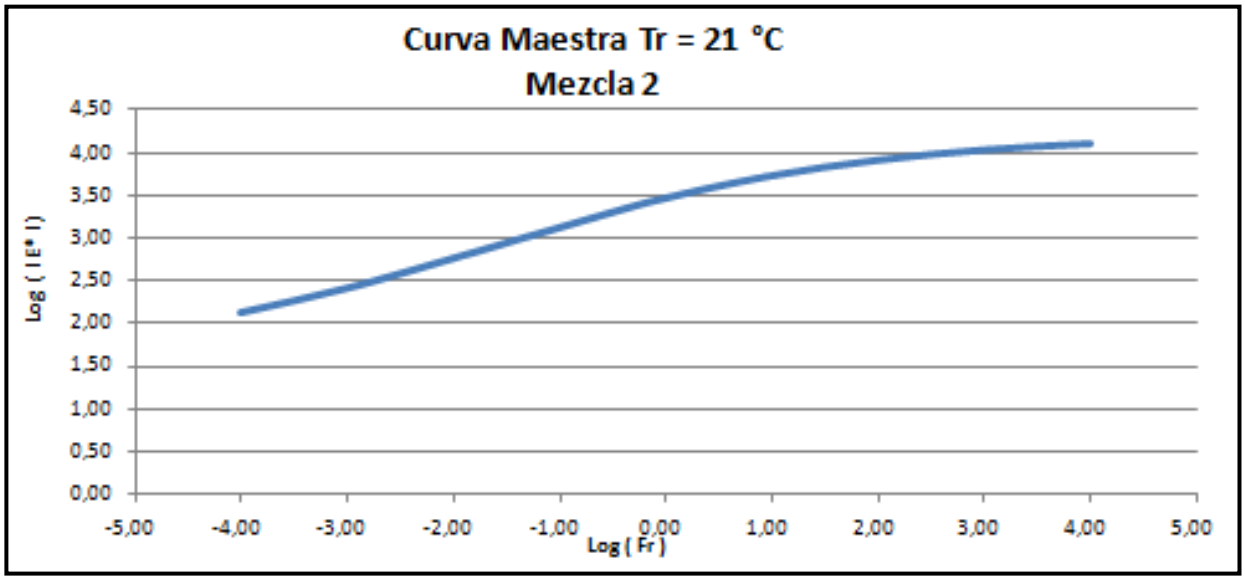
Parámetros	Valor		Factor de desplazamiento	Valor
Alfa	2,65		**a[-10]**	68659,2
Beta	-0,91		**a[4]**	155,46
Gamma	0,54		**a[21]**	1
Delta	1,58		**a[37]**	0,019
			a[54]	0,001

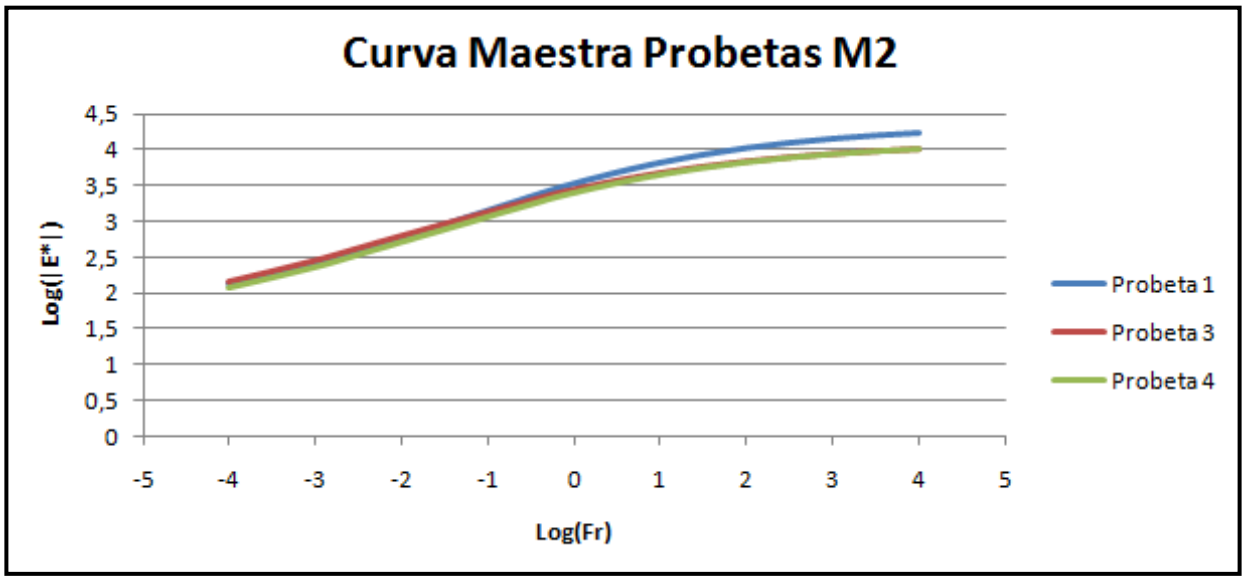




2. - MEZCLA 2 (8% RAP)

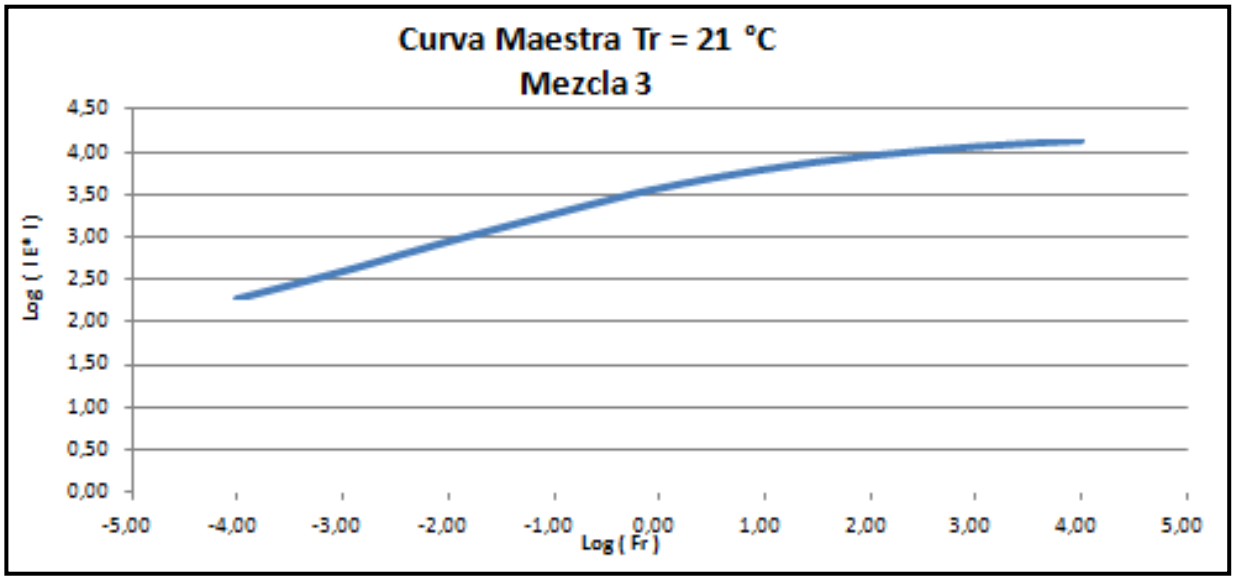
Parámetros	Valor		Factor de desplazamiento	Valor
Alfa	2,62		**a[-10]**	68659,2
Beta	-0,94		**a[4]**	336,86
Gamma	0,57		**a[21]**	1
Delta	1,58		**a[37]**	0,018
			a[54]	0,001

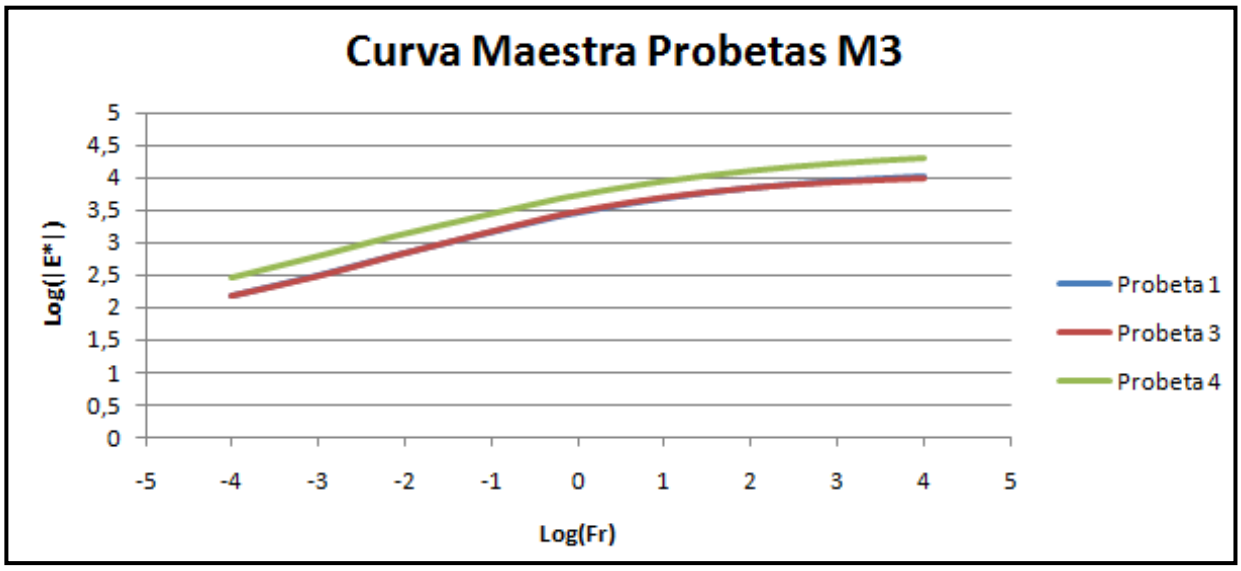




3. - MEZCLA 3 (18% RAP)

Parámetros	Valor		Factor de desplazamiento	Valor
Alfa	2,80		**a[-10]**	68659,71
Beta	-1,15		**a[4]**	218,34
Gamma	0,50		**a[21]**	1
Delta	1,44		**a[37]**	0,018
			a[54]	0,001





ANEXO E: DATOS ENSAYO FLOW NUMBER

1. - MEZCLA 1

- Probeta 1

Pulse No	Axustrain	Def. estimada	Error Cuadrado	Primera derivada	Segunda derivada
5	4030	4096,47	4417,97	475,38	-33,52
10	6105	6197,88	8626,51	383,79	-9,64
20	9779	9775,69	10,98	346,86	-0,03
30	**13459**	**13313,16**	**21268,07**	**366,85**	**3,76**
40	17435	17222,13	45314,95	420,18	6,92
50	21945	21826,39	14069,07	506,58	10,47
60	27306	27485,76	32313,70	632,74	14,95
70	34127	34651,76	275376,05	810,25	20,83
80	43583	43917,25	111725,73	1055,94	28,70
90	58599	56075,09	6370118,12	1393,27	39,30
93	58599	60437,42	3379802,88	1516,88	43,16

Parámetro	Valor
A	1582,55
B	0,52
C	2684,80
D	0,03

- Probeta 2

Pulse No	Axustrain	Def. estimada	Error Cuadrado	Primera derivada	Segunda derivada
5	4719	4914,95	38396,26	467,44	-48,21
10	6792	6842,09	2508,85	327,96	-16,59
20	9641	9558,94	6733,17	232,41	-5,64
30	11750	11657,90	8482,25	191,76	-2,95
40	13479	13450,33	821,79	168,58	-1,82
50	15125	15056,38	4708,62	153,62	-1,22
60	16594	16538,12	3122,23	143,34	-0,86
70	17958	17933,15	617,63	136,08	-0,61
80	19292	19266,75	637,63	130,94	-0,43
90	20469	20557,35	7805,80	127,41	-0,28
100	21745	21819,26	5515,14	125,16	-0,17
150	**27984**	**28063,30**	**6289,27**	**128,17**	**0,27**
200	34964	34976,77	162,95	151,97	0,70
250	43802	43680,89	14667,79	201,24	1,31
283	51073	51131,93	3472,53	253,49	1,89

Parámetro	Valor
A	33,37
B	1,06
C	-9310,54
D	-0,07

- Probeta 3

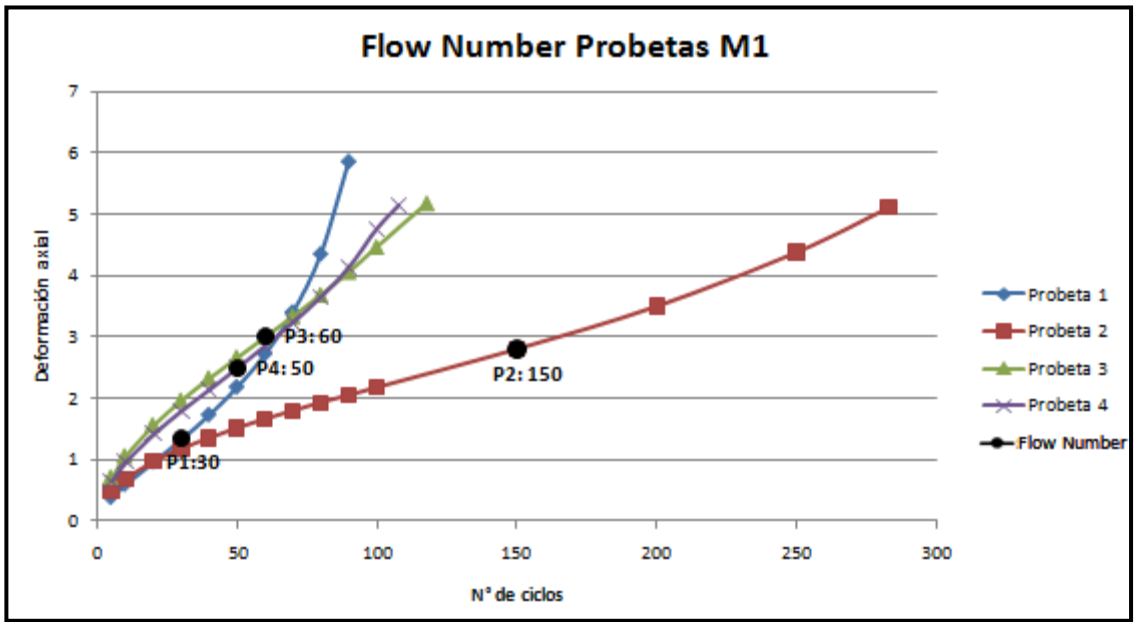
Pulse No	Axustrain	Def. estimada	Error Cuadrado	Primera derivada	Segunda derivada
5	7181	7331,85	22756,69	779,84	-69,87
10	10653	10633,26	389,48	576,13	-24,35
20	15682	15572,35	12023,71	437,15	-7,99
30	19733	19632,60	10079,41	381,81	-3,75
40	23350	23299,83	2516,81	354,78	-1,85
50	26733	26775,80	1831,50	342,28	-0,73
60	**30081**	**30176,57**	**9133,30**	**339,20**	**0,08**
70	33475	33583,70	11816,04	343,31	0,73
80	36962	37063,40	10281,53	353,62	1,32
90	40687	40675,49	132,47	369,77	1,91
100	44764	44478,45	81539,77	391,82	2,51
118	51894	52000,14	11265,40	447,54	3,72

Parámetro	Valor
A	3096,10
B	0,51
C	3350,02
D	0,01

- Probeta 4

Pulse No	Axustrain	Def. estimada	Error Cuadrado	Primera derivada	Segunda derivada
5	6538	6664,25	15940,27	698,58	-62,59
10	9627	9625,54	2,14	518,12	-21,20
20	14194	14105,85	7771,05	401,18	-6,28
30	18000	17886,42	12900,97	361,52	-2,24
40	21429	21427,41	2,54	350,00	-0,23
50	**24942**	**24941,13**	**0,76**	**355,09**	**1,19**
60	28555	28572,28	298,63	373,20	2,42
70	32356	32446,01	8102,65	403,62	3,67
80	36493	36687,92	37995,04	447,04	5,04
90	41301	41435,60	18115,88	505,12	6,62
100	47541	46847,51	480930,85	580,38	8,49
108	51416	51780,28	132697,83	655,17	10,26

Parámetro	Valor
A	2850,94
B	0,50
C	2525,26
D	0,02



2. MEZCLA 2

- Probeta 1

Pulse No	Axustrain	Def. estimada	Error Cuadrado	Primera derivada	Segunda derivada
5	5526	5775,57	62287,60	523,96	-56,32
10	7896	7918,88	523,35	362,26	-19,06
20	11000	10899,24	10153,41	253,56	-6,33
30	13302	13183,98	13928,22	208,44	-3,22
40	15219	15133,05	7387,57	183,52	-1,92
50	16943	16885,86	3264,41	168,21	-1,21
60	18526	18515,85	103,03	158,53	-0,76
70	20057	20069,14	147,28	152,66	-0,43
80	21542	21578,65	1342,96	149,67	-0,17
90	**23016**	**23070,41**	**2960,57**	**149,06**	**0,05**
100	24500	24566,86	4469,73	150,58	0,25
150	32734	32849,86	13423,57	190,11	1,39
200	44990	44789,52	40193,43	303,82	3,37
223	52693	52791,01	9605,21	397,67	4,87

Parámetro	Valor
A	2781,58
B	0,45
C	787,96
D	0,01

- Probeta 2

Pulse No	Axustrain	Def. estimada	Error Cuadrado	Primera derivada	Segunda derivada
5	7370	7319,51	2549,30	833,03	-90,77
10	10557	10687,65	17068,24	559,43	-33,29
20	15047	15182,95	18481,43	377,22	-9,36
30	18646	18623,70	497,44	321,59	-2,83
40	21906	21752,25	23638,46	308,59	-0,12
50	**25073**	**24858,02**	**46218,54**	**314,74**	**1,20**
60	28240	28078,65	26035,11	330,50	1,88
70	31469	31484,30	234,08	351,19	2,22
80	34964	35110,35	21419,54	374,27	2,37
90	38719	38972,65	64336,19	398,25	2,41
100	42953	43075,44	14990,61	422,25	2,38
123	53589	53401,82	35036,66	474,90	2,18

Parámetro	Valor
A	4101,37
B	0,77
C	185617,38
D	-0,01

- Probeta 3

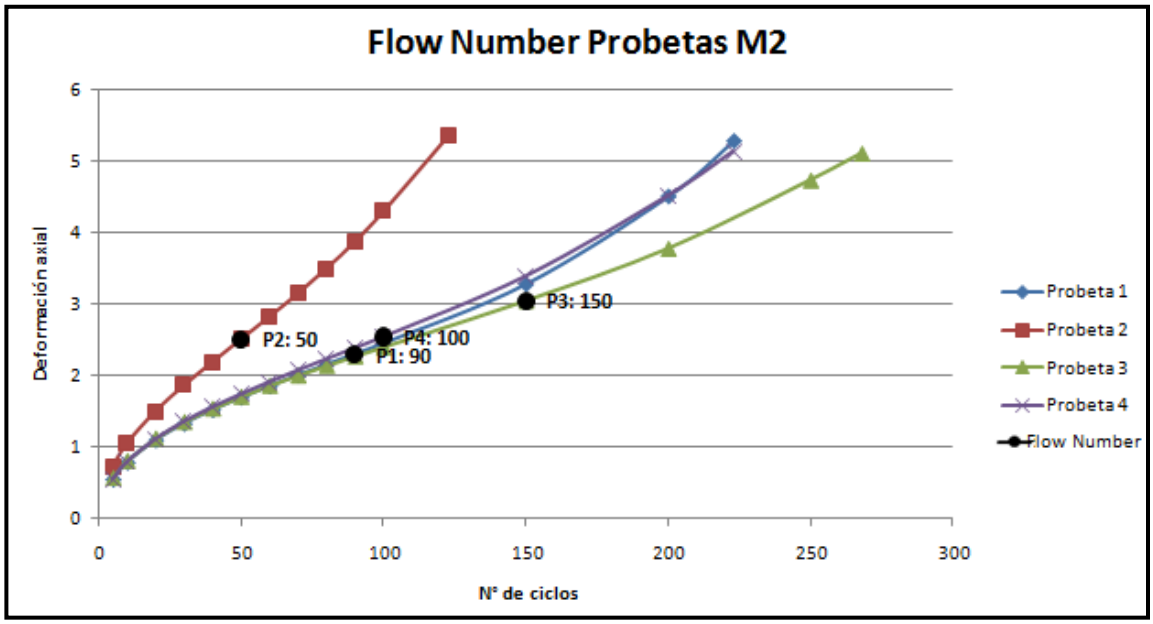
Pulse No	Axustrain	Def. estimada	Error Cuadrado	Primera derivada	Segunda derivada
5	5641	5913,05	74009,40	529,85	-57,63
10	8026	8075,01	2401,59	364,50	-19,48
20	11172	11062,71	11944,44	253,15	-6,51
30	13495	13334,76	25675,76	206,36	-3,38
40	15349	15255,20	8797,93	179,86	-2,08
50	17005	16962,89	1773,49	162,81	-1,39
60	18563	18529,00	1155,90	151,11	-0,98
70	20000	19996,38	13,11	142,84	-0,69
80	21365	21393,70	823,72	136,97	-0,49
90	22677	22741,78	4196,13	132,91	-0,33
100	23969	24056,73	7697,07	130,30	-0,20
150	**30464**	**30545,48**	**6639,21**	**133,29**	**0,29**
200	37745	37775,98	959,68	160,12	0,80
250	47318	47055,14	69094,74	217,13	1,53
268	51062	51230,35	28340,91	247,86	1,89

Parámetro	Valor
A	2873,19
B	0,44
C	1102,27
D	0,01

- Probeta 4

Pulse No	Axustrain	Def. estimada	Error Cuadrado	Primera derivada	Segunda derivada
5	5547	5787,58	57878,38	533,59	-56,16
10	7943	7980,07	1374,10	372,20	-19,03
20	11156	11060,54	9113,16	263,62	-6,32
30	13573	13446,40	16027,51	218,60	-3,21
40	15609	15497,55	12420,77	193,77	-1,91
50	17422	17353,12	4743,78	178,50	-1,21
60	19109	19085,87	535,14	168,78	-0,77
70	20734	20740,84	46,77	162,73	-0,46
80	22312	22349,45	1402,54	159,39	-0,22
90	23854	23935,71	6676,52	158,19	-0,02
100	**25411**	**25519,42**	**11755,16**	**158,84**	**0,15**
150	33880	33979,82	9964,86	186,22	0,96
200	45151	44890,30	67963,90	259,26	2,05
223	51323	51454,94	17409,17	314,33	2,77

Parámetro	Valor
A	2752,52
B	0,45
C	1580,84
D	0,01



3.- **MEZCLA 3**

- Probeta 1

Pulse No	Axustrain	Def. estimada	Error Cuadrado	Primera derivada	Segunda derivada
5	3268	2901,47	134344,32	363,34	-34,17
10	4561	4406,30	23931,70	254,14	-14,43
20	6202	6426,44	50371,52	163,39	-5,86
30	7353	7819,41	217540,84	119,35	-3,32
40	8277	8869,45	350996,80	92,60	-2,15
50	9085	9700,37	378682,65	74,69	-1,49
60	9781	10380,70	359638,37	62,08	-1,07
70	10425	10953,43	279234,79	52,95	-0,78
80	11006	11447,75	195140,27	46,26	-0,57
90	11555	11884,57	108619,60	41,36	-0,42
100	12078	12279,50	40600,91	37,82	-0,30
150	**14490**	**13967,30**	**273214,48**	**32,30**	**0,02**
200	16734	15675,11	1121244,92	37,05	0,15
250	18966	17743,44	1494652,08	46,14	0,21
300	21326	20321,00	1010023,53	57,16	0,23
350	23950	23471,72	228754,29	68,93	0,24
400	26848	27216,51	135798,63	80,85	0,24
450	30358	31552,77	1427472,72	92,55	0,23
500	34591	36464,54	3510147,67	103,84	0,22
550	40261	41928,24	2779689,30	114,61	0,21
600	48902	47916,09	972023,60	124,80	0,20
613	51372	49555,12	3301049,32	127,35	0,19

Parámetro	Valor
A	1500,00
B	0,80
C	334529,94
D	-0,002

- Probeta 2

Pulse No	Axustrain	Def. estimada	Error Cuadrado	Primera derivada	Segunda derivada
5	5078	5404,13	106358,83	440,67	-51,92
10	7099	7171,76	5294,44	293,27	-17,17
20	9625	9528,54	9303,64	195,90	-5,66
30	11411	11262,16	22153,10	155,24	-2,94
40	12807	12689,28	13857,46	132,00	-1,84
50	14026	13928,11	9582,98	116,71	-1,27
60	15083	15037,92	2032,19	105,82	-0,93
70	16109	16053,46	3084,21	97,66	-0,71
80	17000	16997,23	7,67	91,35	-0,56
90	17844	17884,85	1668,56	86,36	-0,44
100	18646	18727,78	6688,07	82,37	-0,36
150	22365	22527,41	26378,51	71,70	-0,10
200	**25974**	**26054,95**	**6552,79**	**70,72**	**0,06**
250	29745	29727,66	300,70	77,54	0,22
300	34089	33961,84	16169,84	93,61	0,44
350	39323	39304,85	329,51	122,74	0,75
400	46464	46563,53	9906,93	171,66	1,24
427,5	51844	51798,08	2108,80	210,76	1,62

Parámetro	Valor
A	2803,71
B	0,41
C	372,68
D	0,01

- Probeta 3

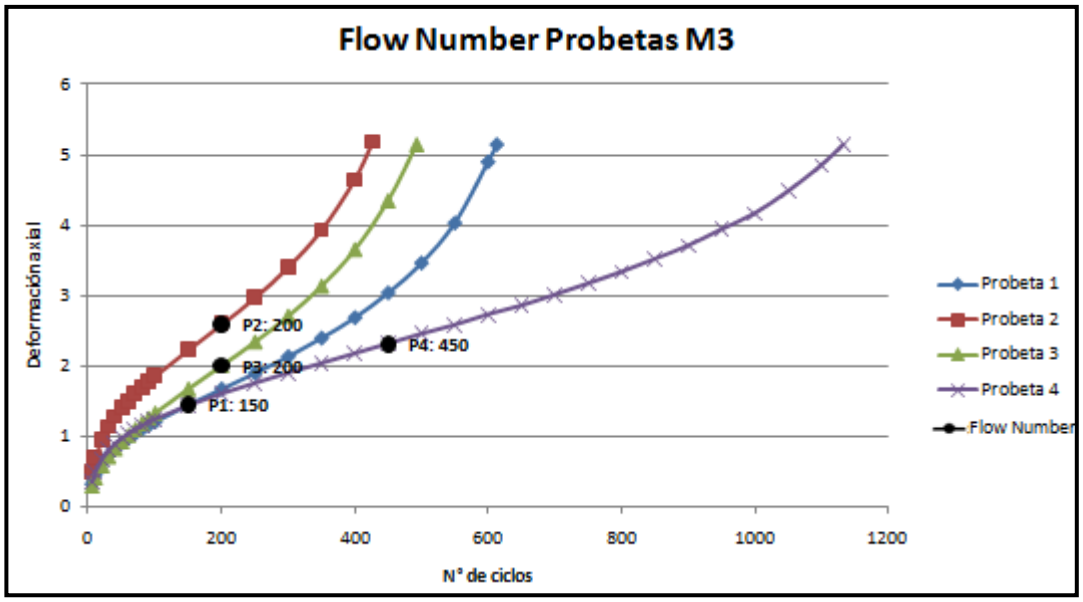
Pulse No	Axustrain	Def. estimada	Error Cuadrado	Primera derivada	Segunda derivada
5	2905	2843,16	3824,36	288,03	-28,18
10	4111	4041,58	4819,60	205,51	-9,96
20	5825	5755,40	4844,61	147,30	-3,50
30	7110	7087,27	516,69	121,70	-1,89
40	8232	8223,33	75,14	106,63	-1,21
50	9218	9235,97	322,74	96,50	-0,85
60	10130	10162,50	1056,12	89,17	-0,63
70	10979	11025,29	2142,37	83,63	-0,49
80	11782	11839,06	3255,85	79,30	-0,38
90	12552	12614,21	3870,35	75,86	-0,31
100	13307	13358,46	2648,40	73,09	-0,25
150	16763	16790,86	775,98	65,65	-0,07
200	**20066**	**20031,11**	**1217,05**	**64,85**	**0,04**
250	23432	23358,78	5360,69	69,09	0,14
300	27118	27028,69	7976,52	78,69	0,25
350	31392	31340,79	2622,69	95,10	0,41
400	36603	36692,83	8069,22	120,81	0,63
450	43546	43640,46	8923,07	159,71	0,94
493	51557	51488,62	4675,63	208,04	1,32

Parámetro	Valor
A	1256,53
B	0,50
C	573,12
D	0,01

- Probeta 4

Pulse No	Axustrain	Def. estimada	Error Cuadrado	Primera derivada	Segunda derivada
5	3510	3995,57	235781,20	300,21	-37,35
10	4984	5185,29	40516,32	195,19	-12,10
20	6813	6733,85	6264,94	127,17	-3,92
30	8042	7849,95	36881,59	99,13	-2,02
40	8984	8755,18	52359,59	83,16	-1,27
50	9766	9530,97	55239,01	72,64	-0,88
60	10417	10217,67	39732,07	65,08	-0,65
70	11005	10838,62	27683,48	59,35	-0,50
80	11531	11408,69	14959,73	54,83	-0,40
90	12021	11938,05	6881,15	51,16	-0,33
100	12469	12433,97	1226,99	48,11	-0,28
150	14391	14565,00	30274,43	38,26	-0,14
200	16089	16332,17	59130,69	32,89	-0,08
250	17573	17888,27	99394,51	29,60	-0,05
300	19026	19311,71	81627,36	27,49	-0,03
350	20396	20650,68	64860,20	26,18	-0,02
400	21786	21938,95	23393,72	25,44	-0,01
450	**23177**	**23202,84**	**667,86**	**25,19**	**0,00**
500	24568	24464,83	10644,64	25,36	0,01
550	25823	25745,64	5984,99	25,94	0,02
600	27318	27065,66	63675,43	26,93	0,02
650	28568	28445,96	14892,68	28,36	0,03
700	30120	29909,16	44454,51	30,25	0,04
750	31708	31480,17	51905,83	32,68	0,05
800	33339	33187,05	23089,96	35,70	0,07
850	35177	35061,76	13280,84	39,41	0,08
900	37068	37141,13	5347,43	43,91	0,10
950	39365	39467,84	10576,75	49,33	0,12
1000	41630	42091,65	213117,27	55,82	0,14
1050	44771	45070,68	89807,40	63,57	0,17
1100	48469	48473,08	16,64	72,79	0,20
1133	51370	50988,88	145250,93	79,81	0,22

Parámetro	Valor
A	2182,80
B	0,37
C	500,57
D	0,003


Flow Number Probetas M3
Deformación axial
N° de ciclos
0
1
2
3
4
5
6
0
200
400
600
800
1000
1200
P1: 150
P2: 200
P3: 200
P4: 450
Probeta 1
Probeta 2
Probeta 3
Probeta 4
Flow Number

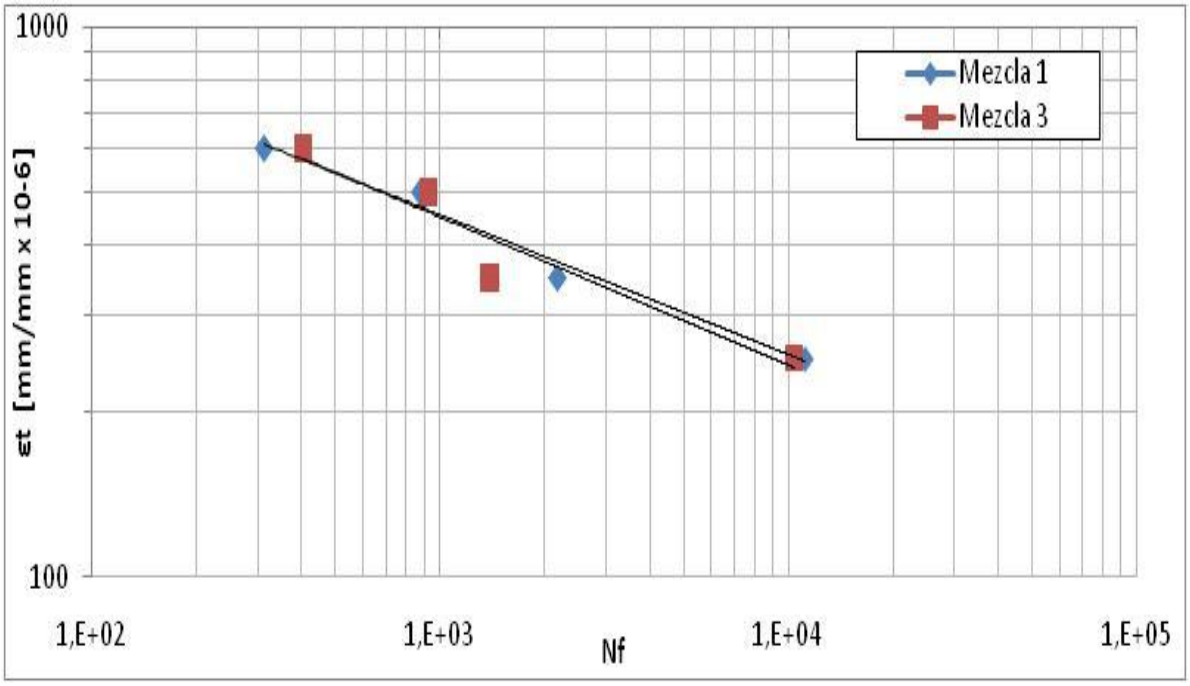
ANEXO F: TEST TUKEY

$\alpha = 0.05$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
							n							
m														
2	6.08	8.33	9.80	10.88	11.73	12.43	13.03	13.54	13.99	14.40	14.76	15.09	15.39	15.67
3	4.50	5.91	6.82	7.50	8.04	8.48	8.85	9.18	9.46	9.72	9.95	10.15	10.35	10.52
4	3.93	5.04	5.76	6.29	6.71	7.05	7.35	7.60	7.83	8.03	8.21	8.37	8.52	8.66
5	3.64	4.60	5.22	5.67	6.03	6.33	6.58	6.80	6.99	7.17	7.32	7.47	7.60	7.72
6	3.46	4.34	4.90	5.30	5.63	5.90	6.12	6.32	6.49	6.65	6.79	6.92	7.03	7.14
7	3.34	4.16	4.68	5.06	5.36	5.61	5.82	6.00	6.16	6.30	6.43	6.55	6.66	6.76
8	3.26	4.04	4.53	4.89	5.17	5.40	5.60	5.77	5.92	6.05	6.18	6.29	6.39	6.48
9	3.20	3.95	4.41	4.76	5.02	5.24	5.43	5.59	5.74	5.87	5.98	6.09	6.19	6.28
10	3.15	3.88	4.33	4.65	4.91	5.12	5.30	5.46	5.60	5.72	5.83	5.93	6.03	6.11
11	3.11	3.82	4.26	4.57	4.82	5.03	5.20	5.35	5.49	5.61	5.71	5.81	5.90	5.98
12	3.08	3.77	4.20	4.51	4.75	4.95	5.12	5.27	5.39	5.51	5.61	5.71	5.80	5.88
13	3.06	3.73	4.15	4.45	4.69	4.88	5.05	5.19	5.32	5.43	5.53	5.63	5.71	5.79
14	3.03	3.70	4.11	4.41	4.64	4.83	4.99	5.13	5.25	5.36	5.46	5.55	5.64	5.71
15	3.01	3.67	4.08	4.37	4.59	4.78	4.94	5.08	5.20	5.31	5.40	5.49	5.57	5.65
16	3.00	3.65	4.05	4.33	4.56	4.74	4.90	5.03	5.15	5.26	5.35	5.44	5.52	5.59
17	2.98	3.63	4.02	4.30	4.52	4.70	4.86	4.99	5.11	5.21	5.31	5.39	5.47	5.54
18	2.97	3.61	4.00	4.28	4.49	4.67	4.82	4.96	5.07	5.17	5.27	5.35	5.43	5.50
19	2.96	3.59	3.98	4.25	4.47	4.65	4.79	4.92	5.04	5.14	5.23	5.31	5.39	5.46
20	2.95	3.58	3.96	4.23	4.45	4.62	4.77	4.90	5.01	5.11	5.20	5.28	5.36	5.43
21	2.94	3.56	3.94	4.21	4.42	4.60	4.74	4.87	4.98	5.08	5.17	5.25	5.33	5.40
22	2.93	3.55	3.93	4.20	4.41	4.58	4.72	4.85	4.96	5.06	5.14	5.23	5.30	5.37
23	2.93	3.54	3.91	4.18	4.39	4.56	4.70	4.83	4.94	5.03	5.12	5.20	5.27	5.34
24	2.92	3.53	3.90	4.17	4.37	4.54	4.68	4.81	4.92	5.01	5.10	5.18	5.25	5.32
25	2.91	3.52	3.89	4.15	4.36	4.53	4.67	4.79	4.90	4.99	5.08	5.16	5.23	5.30
26	2.91	3.51	3.88	4.14	4.35	4.51	4.65	4.77	4.88	4.98	5.06	5.14	5.21	5.28
27	2.90	3.51	3.87	4.13	4.33	4.50	4.64	4.76	4.86	4.96	5.04	5.12	5.19	5.26
28	2.90	3.50	3.86	4.12	4.32	4.49	4.62	4.74	4.85	4.94	5.03	5.11	5.18	5.24
29	2.89	3.49	3.85	4.11	4.31	4.47	4.61	4.73	4.84	4.93	5.01	5.09	5.16	5.23
30	2.89	3.49	3.85	4.10	4.30	4.46	4.60	4.72	4.82	4.92	5.00	5.08	5.15	5.21
31	2.88	3.48	3.84	4.09	4.29	4.45	4.59	4.71	4.81	4.90	4.99	5.06	5.13	5.20
32	2.88	3.48	3.83	4.09	4.28	4.45	4.58	4.70	4.80	4.89	4.98	5.05	5.12	5.18
33	2.88	3.47	3.83	4.08	4.28	4.44	4.57	4.69	4.79	4.88	4.97	5.04	5.11	5.17
34	2.87	3.47	3.82	4.07	4.27	4.43	4.56	4.68	4.78	4.87	4.96	5.03	5.10	5.16
35	2.87	3.46	3.81	4.07	4.26	4.42	4.56	4.67	4.77	4.86	4.95	5.02	5.09	5.15
36	2.87	3.46	3.81	4.06	4.25	4.41	4.55	4.66	4.76	4.85	4.94	5.01	5.08	5.14
37	2.87	3.45	3.80	4.05	4.25	4.41	4.54	4.66	4.76	4.85	4.93	5.00	5.07	5.13
38	2.86	3.45	3.80	4.05	4.24	4.40	4.53	4.65	4.75	4.84	4.92	4.99	5.06	5.12
39	2.86	3.45	3.79	4.04	4.24	4.39	4.53	4.64	4.74	4.83	4.91	4.98	5.05	5.11
40	2.86	3.44	3.79	4.04	4.23	4.39	4.52	4.63	4.73	4.82	4.90	4.98	5.04	5.11
41	2.86	3.44	3.79	4.03	4.23	4.38	4.51	4.63	4.73	4.82	4.90	4.97	5.04	5.10
42	2.85	3.44	3.78	4.03	4.22	4.38	4.51	4.62	4.72	4.81	4.89	4.96	5.03	5.09
43	2.85	3.43	3.78	4.03	4.22	4.37	4.50	4.62	4.72	4.80	4.88	4.96	5.02	5.08
44	2.85	3.43	3.78	4.02	4.21	4.37	4.50	4.61	4.71	4.80	4.88	4.95	5.02	5.08
45	2.85	3.43	3.77	4.02	4.21	4.36	4.49	4.61	4.70	4.79	4.87	4.94	5.01	5.07
46	2.85	3.42	3.77	4.01	4.20	4.36	4.49	4.60	4.70	4.79	4.87	4.94	5.00	5.06
47	2.85	3.42	3.77	4.01	4.20	4.36	4.48	4.60	4.69	4.78	4.86	4.93	5.00	5.06
48	2.84	3.42	3.76	4.01	4.20	4.35	4.48	4.59	4.69	4.78	4.86	4.93	4.99	5.05
49	2.84	3.42	3.76	4.00	4.19	4.35	4.48	4.59	4.69	4.77	4.85	4.92	4.99	5.05
50	2.84	3.42	3.76	4.00	4.19	4.34	4.47	4.58	4.68	4.77	4.85	4.92	4.98	5.04

ANEXO G: RESULTADOS ENSAYO FATIGA

Mezcla	Probeta	% Vacios	μs [mm/mm x 10^{-6}]	N° Ciclos	Promedio N° Ciclos	Si [MPa]
1	1	4,32	250	9816	11165	5143
	2	4,32		11690		
	3	4,13		11989		
	1	4,13	350	3345	2181	5778
	2	4,02		1073		
	3	4,02		2126		
	1	4,26	500	693	882	4216
	2	4,01		718		
	3	4,41		1235		
	1	4,11	600	363	313	4213
	2	4,11		394		
	3	4,01		183		
2	1	4,09	500	431	623	6244
	2	4,65		749		
	3	4,65		690		
3	1	5,21	250	12101	10416	8277
	2	4,02		15424		
	3	4,25		3724		
	1	4,87	350	1015	1393	7829
	2	4,87		1254		
	3	4,25		1911		
	1	4,37	500	1506	930	6830
	2	4,37		735		
	3	5,21		548		
	1	4,97	600	444	406	5836
	2	5,11		284		
	3	5,11		491		

- Curvas Fatiga Mezcla 1 y 3.



Mezcla	K1	K2	Correlación	N500
1	$4{,}76\ x\ 10^{13}$	4	0,98	882
2	--	--	--	623
3	$6{,}6\ x\ 10^{12}$	3,7	0,92	930

ANEXO H: DATOS ENSAYO FATIGA

- Mezcla 1

Resultados a	250 Microstrain

Nivel de Deformación [Me]	Nombre Probeta	Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga	Tensión a tracción [Pa]	Deformación por Tracción [m/m]	Rigidez a Flexión [Pa]	Angulo de Fase [°]	Energía Disipada [J/m3]	Energía Disipada Acum. [J/m3]
250	M1V3P1	50	701,19	0,0001311	1408593,00	0,00025810	5457553000	28,0997	0,54	14,43
		250	625,86	0,0001281	1257255,00	0,00025226	4983895000	30,6162	0,51	118,48
		500	584,76	0,0001278	1174702,00	0,00025171	4666977000	31,3594	0,48	241,92
		1000	547,64	0,0001270	1100128,00	0,00025006	4399511000	32,7963	0,47	476,63
		4000	445,12	0,0001266	894177,00	0,00024935	3586034000	34,5311	0,40	1765,50
		8500	362,35	0,0001272	727900,00	0,00025047	2906099000	35,0796	0,33	3386,60
		9816	340,03	0,0001275	683077,40	0,00025101	2721361000	35,2264	0,31	3807,12
	M1V3P2	50	695,52	0,0001304	1324891,00	0,00026159	5064750000	29,27	0,53	13,81
		250	606,38	0,0001250	1155097,00	0,00025084	4604997000	30,97	0,47	112,06
		1000	554,32	0,0001245	1055931,00	0,00024971	4228684000	32,54	0,45	456,08
		2500	498,39	0,0001251	949389,60	0,00025097	3782901000	33,12	0,41	1087,23
		5000	464,32	0,0001246	884489,90	0,00024990	3539312000	33,73	0,39	2082,27
		10000	404,48	0,0001243	770501,10	0,00024937	3089783000	35,24	0,35	3919,11
		11690	337,68	0,0001277	643252,50	0,00025615	2511259000	35,27	0,30	4477,47
	M1V4P1	50	670,10	0,0001227	1230469,00	0,00025075	4907116000	27,211	0,44	12,01
		250	605,71	0,0001228	1112236,00	0,00025101	4431029000	29,270	0,43	99,83
		1000	532,07	0,0001232	977020,10	0,00025173	3881288000	30,672	0,39	406,04
		2500	476,52	0,0001230	875013,80	0,00025133	3481523000	31,757	0,36	964,38
		5000	429,13	0,0001224	787992,60	0,00025016	3149974000	32,227	0,33	1826,18
		10000	364,55	0,0001223	669408,20	0,00024984	2679322000	32,915	0,29	3362,71
		11989	335,12	0,0001228	615363,90	0,00025092	2452425000	32,485	0,26	3903,05

Resultados a	350 Microstrain

Nivel de Deformación [Me]	Nombre Probeta	Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga	Tensión a tracción [Pa]	Deformación por Tracción [m/m]	Rigidez a Flexión [Pa]	Angulo de Fase [°]	Energía Disipada [J/m3]	Energía Disipada Acum. [J/m3]
350	M1V4P2	50	954,46	0,0001955	1887401,00	0,0003850	4901905000	30,061	1,14	28,64
		250	753,36	0,0001799	1489749,00	0,0003542	4206226000	32,379	0,89	218,62
		500	689,67	0,0001794	1363786,00	0,0003532	3860974000	33,413	0,83	431,78
		1000	617,77	0,0001791	1221622,00	0,0003527	3464053000	33,875	0,75	825,53
		2000	543,63	0,0001789	1075003,00	0,0003522	3051858000	35,024	0,68	1538,59
		3000	469,94	0,0001787	929278,10	0,0003518	2641492000	35,800	0,60	2182,43
		3345	437,23	0,0001795	864613,00	0,0003535	2445750000	35,386	0,56	2380,04
	M1V5P1	50	1135,34	0,0001833	2210552	0,0003610	6123041000	27,80	1,17	28,01
		100	1060,04	0,0001868	2063939	0,0003679	5610071000	29,16	1,16	85,03
		250	923,82	0,0001805	1798707	0,0003554	5060546000	30,68	1,02	245,31
		500	819,42	0,0001797	1595437	0,0003540	4507322000	32,16	0,94	490,19
		1000	596,20	0,0001802	1160823	0,0003548	3271913000	34,66	0,74	913,44
		1073	557,08	0,0001813	1084663	0,0003569	3038932000	34,56	0,69	965,58
	M1V5P2	50	1166,22	0,000176	2221532,00	0,0003522	6308396000	27,61	1,14	27,12
		250	993,33	0,000177	1892191,00	0,0003555	5322259000	31,06	1,09	251,37
		500	905,41	0,000176	1724714,00	0,0003531	4884887000	32,08	1,02	512,78
		1000	805,21	0,000175	1533852,00	0,0003516	4362937000	33,22	0,93	997,51
		2000	604,90	0,000175	1152282,00	0,0003512	3280567000	33,98	0,71	1831,33
		2126	582,92	0,000176	1110398,00	0,0003524	3150671000	34,00	0,69	1919,65

Resultados a	500 Microstrain

Nivel de Deformación [Me]	Nombre Probeta	Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga	Tensión a tracción [Pa]	Deformación por Tracción [m/m]	Rigidez a Flexión [Pa]	Angulo de Fase [°]	Energía Disipada [J/m3]	Energía Disipada Acum. [J/m3]
500	M1P2	50	1021,42	0,0002520	1739672,00	0,0005150	3377941000	25,64	1,22	52,98
		100	885,12	0,0002518	1507540,00	0,0005145	2930162000	26,28	1,08	111,28
		200	745,91	0,0002486	1270427,00	0,0005081	2500252000	26,96	0,92	210,86
		300	667,20	0,0002477	1136371,00	0,0005062	2244733000	27,29	0,83	298,15
		400	608,41	0,0002476	1036247,00	0,0005059	2048247000	27,48	0,76	377,59
		500	563,66	0,0002471	960030,40	0,0005049	1901374000	27,78	0,71	451,00
		600	524,26	0,0002462	892922,90	0,0005031	1774668000	27,96	0,66	519,54
		680	495,68	0,0002460	844249,20	0,0005028	1679143000	28,14	0,63	571,43
	M1V7P2	50	1149,14	0,0002647	2345688,00	0,0005213	4499418000	31,07	1,98	79,94
		100	982,71	0,0002615	2005966,00	0,0005150	3894797000	32,37	1,74	173,69
		200	827,79	0,0002590	1689726,00	0,0005100	3313328000	33,13	1,48	333,52
		500	625,38	0,0002545	1276556,00	0,0005012	2547252000	34,28	1,13	716,67
		700	558,67	0,0002555	1140393,00	0,0005032	2266227000	34,68	1,03	932,20
		718	553,62	0,0002555	1130087,00	0,0005031	2246201000	34,63	1,01	950,54
	M1P4	50	1394,79	0,0002613	2500643,00	0,0005242	4770097000	24,35	1,70	61,17
		100	1244,77	0,0002564	2231675,00	0,0005144	4338343000	25,40	1,55	143,17
		200	1105,14	0,0002545	1981342,00	0,0005106	3880472000	26,46	1,42	291,72
		500	902,53	0,0002507	1618105,00	0,0005031	3216307000	27,50	1,18	676,68
		800	788,10	0,0002500	1412945,00	0,0005016	2817096000	28,62	1,07	1014,10
		1200	677,67	0,0002503	1214954,00	0,0005022	2419175000	29,43	0,94	1416,25
		1235	663,65	0,0002492	1189824,00	0,0005001	2379352000	29,52	0,92	1449,12

Resultados a	600 Microstrain

Nivel de Deformación [Me]	Nombre Probeta	Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga	Tensión a tracción [Pa]	Deformación por Tracción [m/m]	Rigidez a Flexión [Pa]	Angulo de Fase [°]	Energía Disipada [J/m3]	Energía Disipada Acum. [J/m3]
600	M1V6P1	50	1248,97	0,0003124	2379158	0,0006267	3796097000	33,91	2,613	105,17
		100	1070,89	0,0003077	2039928	0,0006174	3304253000	35,16	2,278	229,43
		150	971,43	0,0003095	1850471	0,0006210	2979646000	35,72	2,108	338,80
		200	867,28	0,0003059	1652089	0,0006137	2692069000	36,05	1,875	438,48
		250	790,07	0,0003069	1505008	0,0006158	2443809000	36,32	1,725	528,40
		350	623,96	0,0003059	1188584	0,0006137	1936833000	36,28	1,356	682,11
		363	606,75	0,0003055	1155805	0,0006129	1885727000	36,26	1,316	699,43
	M1V6P2	50	1578	0,0003228	3169894	0,0006356	4986892000	32,71	3,420	124,33
		100	1317	0,0003172	2645012	0,0006246	4234996000	34,38	2,931	284,25
		200	1063	0,0003118	2134642	0,0006140	3476431000	35,72	2,404	550,87
		300	904	0,0003108	1816240	0,0006121	2967415000	36,72	2,088	775,02
		394	755	0,0003112	1516588	0,0006128	2474875000	38,03	1,799	958,20
	M1V7P1	50	1278,45	0,0003149	2435323	0,0006317	3854948000	32,37	2,588	113,40
		100	991,35	0,0003109	1888429	0,0006238	3027092000	34,16	2,078	232,00
		150	780,82	0,0003158	1487388	0,0006337	2347323000	36,01	1,741	327,80
		183	622,15	0,0003121	1185125	0,0006263	1892370000	37,28	1,412	379,55

- Mezcla 2

Resultados a	500 Microstrain

Nivel de Deformación [Me]	**Nombre Probeta**	**Ciclo de Carga**	**Carga Aplicada [N]**	**Deflexión de la Viga**	**Tensión a tracción [Pa]**	**Deformación por Tracción [m/m]**	**Rigidez a Flexión [Pa]**	**Angulo de Fase [°]**	**Energía Disipada [J/m3]**	**Energía Disipada Acum. [J/m3]**
500	M2P6	50	2583,93	0,0002530	5147177	0,0004888	10530620000	14,56	1,99	46,24
		100	2478,03	0,0002735	4936226	0,0005284	9341298000	16,36	2,31	156,83
		200	2138,94	0,0002719	4260759	0,0005254	8109825000	17,73	2,14	381,35
		300	1858,80	0,0002703	3702724	0,0005222	7090159000	18,80	1,96	586,78
		400	1552,30	0,0002739	3092172	0,0005292	5843394000	20,23	1,78	772,64
		431	1403,19	0,0002794	2795144	0,0005398	5178222000	20,92	1,69	826,37
	M2P7	50	1280,01	0,0002552	2364399	0,0005120	4618108000	31,81	2,00	81,92
		101	1139,68	0,0002546	2105196	0,0005108	4121001000	32,92	1,84	181,90
		250	930,85	0,0002530	1719446	0,0005077	3386766000	34,55	1,56	435,75
		500	740,77	0,0002507	1368328	0,0005029	2720790000	36,20	1,28	789,48
		700	643,16	0,0002502	1188033	0,0005021	2366348000	37,07	1,13	1028,93
		749	625,66	0,0002515	1155697	0,0005045	2290681000	37,38	1,11	1083,63
	M2P8	50	802,15	0,0002605	1768333,00	0,0004937	3581743000	33,46	1,51	68,27
		100	722,65	0,0002683	1593068,00	0,0005084	3133279000	34,79	1,45	144,36
		200	615,59	0,0002676	1357060,00	0,0005071	2676032000	35,71	1,26	279,15
		300	548,08	0,0002654	1208228,00	0,0005030	2402242000	36,44	1,13	398,74
		400	502,88	0,0002657	1108597,00	0,0005034	2202068000	36,93	1,05	508,47
		500	464,06	0,0002655	1023004,00	0,0005031	2033490000	37,35	0,98	610,28
		600	432,20	0,0002644	952786,40	0,0005010	1901634000	37,92	0,92	705,42
		690	407,08	0,0002651	897394,10	0,0005023	1786402000	38,24	0,88	786,55

- Mezcla 3

Resultados a	250 Microstrain

Nivel de Deformación [Me]	Nombre Probeta	Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga	Tensión a tracción [Pa]	Deformación por Tracción [m/m]	Rigidez a Flexión [Pa]	Angulo de Fase [°]	Energía Disipada [J/m3]	Energía Disipada Acum. [J/m3]
250	M3V2P2	50	1083,53	0,0001294	1889685	0,0002693	7016690000	20,95	0,57	13,02
		100	1002,77	0,0001247	1748841	0,0002595	6740217000	22,16	0,54	40,40
		350	915,14	0,0001217	1596012	0,0002531	6305000000	23,51	0,51	168,57
		1000	843,90	0,0001207	1471766	0,0002511	5861009000	24,92	0,49	491,61
		5000	678,24	0,0001200	1182857	0,0002498	4735956000	27,44	0,43	2316,70
		10000	556,55	0,0001204	970627	0,0002505	3875053000	28,55	0,37	4305,86
		12000	505,09	0,0001196	880877	0,0002488	3540719000	29,17	0,34	5008,92
		12101	504,52	0,0001208	879889	0,0002513	3501038000	29,23	0,34	5043,01
	M3V4P2	50	1175,08	0,0001302	2323676	0,0002564	9063414000	23,65	0,75	14,75
		100	1143,25	0,0001315	2260738	0,0002589	8731523000	25,20	0,78	53,00
		500	1003,03	0,0001271	1983450	0,0002502	7926524000	26,98	0,71	345,33
		1000	951,95	0,0001274	1882437	0,0002509	7503004000	27,38	0,68	692,29
		5000	780,19	0,0001271	1542790	0,0002503	6162778000	29,77	0,60	3227,71
		10000	675,87	0,0001270	1336506	0,0002500	5345339000	31,22	0,54	6129,20
		15000	584,57	0,0001267	1155964	0,0002496	4631720000	32,03	0,48	8724,32
		15424	575,39	0,0001276	1137802	0,0002513	4527389000	31,87	0,47	8926,47
	M3V10P1	50	1080	0,0001210	2130000	0,00024300	8750000000	21,10	0,584	11,4
		100	1100	0,0001340	2170000	0,00026900	8070000000	22,90	0,715	45
		500	941	0,0001260	1850000	0,00025200	7330000000	24,70	0,612	301
		1000	879	0,0001250	1730000	0,00025000	6900000000	26,20	0,599	605
		2000	764	0,0001250	1500000	0,00025100	5980000000	27,90	0,554	1190
		3500	586	0,0001250	1150000	0,00025100	4590000000	29,60	0,448	1940
		3720	559	0,0001260	1100000	0,00025200	4360000000	29,90	0,434	2040

Resultados a	350 Microstrain

Nivel de Deformación [Me]	Nombre Probeta	Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga	Tensión a tracción [Pa]	Deformación por Tracción [m/m]	Rigidez a Flexión [Pa]	Angulo de Fase [°]	Energía Disipada [J/m3]	Energía Disipada Acum. [J/m3]
350	M3V7P1	50	1573,424	0,00019072	3160772	0,0003756	8416140000	23,04	1,4593	28,48
		100	1422,914	0,00019165	2858419	0,0003774	7573946000	24,65	1,4136	100,70
		300	1128,461	0,00018337	2266909	0,0003611	6277898000	26,32	1,1401	348,65
		400	1048,866	0,00018271	2107013	0,0003598	5856087000	26,61	1,0668	458,02
		500	972,8202	0,00018091	1954249	0,0003562	5485636000	26,79	0,9857	560,24
		1000	741,7505	0,00017862	1490065	0,0003517	4236311000	27,87	0,7696	999,56
		1015	739,6818	0,00017968	1485909	0,0003538	4199531000	27,59	0,7650	1011,12
	M3V7P2	50	1356,812	0,00018832	2683044	0,0003708	7235143000	23,74	1,2586	29,08
		100	1195,648	0,00018871	2364347	0,0003716	6362301000	24,97	1,1650	89,10
		300	958,3862	0,00018164	1895171	0,0003577	5298440000	25,77	0,9260	291,00
		500	852,6488	0,00017875	1686080	0,0003520	4789943000	26,43	0,8299	466,74
		1000	715,5121	0,00018066	1414897	0,0003558	3977125000	27,68	0,7347	856,49
		1200	661,7123	0,00017997	1308510	0,0003544	3692173000	27,79	0,6792	995,25
		1254	647,3203	0,00018017	1280050	0,0003548	3607973000	27,57	0,6604	1031,03
	M3V10P2	50	1525,99	0,00018488	2906857	0,0003709	7836354000	25,97	1,4834	31,88
		100	1406,667	0,00018621	2679560	0,0003736	7172193000	27,61	1,4577	105,04
		300	1171,452	0,00017701	2231498	0,0003551	6283358000	28,63	1,1928	361,44
		500	1069,78	0,00017675	2037824	0,0003546	5746263000	29,08	1,1033	591,04
		1000	879,751	0,00017647	1675837	0,0003541	4733109000	29,72	0,9241	1092,57
		1500	776,3695	0,00017482	1478906	0,0003508	4216406000	29,89	0,8122	1522,38
		1911	722,6202	0,00017558	1376519	0,0003523	3907379000	29,84	0,7580	1844,41

Resultados a	500 Microstrain

Nivel de Deformación [Me]	Nombre Probeta	Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga	Tensión a tracción [Pa]	Deformación por Tracción [m/m]	Rigidez a Flexión [Pa]	Angulo de Fase [°]	Energía Disipada [J/m3]	Energía Disipada Acum. [J/m3]
500	M3V1P1	50	2072,67	0,0002640	3887488	0,0005297	7339595000	22,89	2,52	83,74
		100	1856,13	0,0002543	3481342	0,0005103	6822422000	24,13	2,28	204,75
		300	1559,84	0,0002539	2925616	0,0005093	5744019000	26,15	2,06	640,23
		500	1408,93	0,0002504	2642588	0,0005023	5260818000	27,15	1,90	1034,40
		1000	1179,11	0,0002501	2211533	0,0005018	4406883000	28,18	1,65	1924,50
		1500	985,67	0,0002507	1848722	0,0005030	3675349000	29,10	1,42	2691,13
		1506	982,99	0,0002515	1843690	0,0005046	3654127000	29,21	1,43	2699,67
	M3V1P2	50	2232,88	0,0002635	4253406	0,0005286	8046059000	21,03	2,53	71,39
		100	1962,43	0,0002606	3738237	0,0005230	7148305000	22,58	2,36	196,85
		250	1613,20	0,0002567	3072990	0,0005150	5967520000	24,34	2,05	526,82
		350	1458,24	0,0002544	2777802	0,0005103	5443164000	24,96	1,88	723,29
		500	1279,71	0,0002531	2437721	0,0005079	4799732000	25,78	1,69	991,23
		700	1098,34	0,0002519	2092230	0,0005054	4139817000	26,82	1,50	1310,39
		735	1070,63	0,0002533	2039451	0,0005083	4012473000	26,98	1,48	1362,63
	M3V2P1	50	1489,42	0,0002623	2734960	0,0005359	5103292000	27,88	2,15	75,76
		100	1297,30	0,0002532	2382182	0,0005175	4603644000	29,36	1,90	177,73
		250	1044,88	0,0002502	1918663	0,0005112	3753076000	31,30	1,60	440,92
		350	915,37	0,0002508	1680861	0,0005125	3279610000	31,95	1,43	592,15
		500	749,10	0,0002492	1375540	0,0005093	2700783000	32,79	1,19	787,37
		548	701,25	0,0002486	1287672	0,0005080	2534624000	33,09	1,12	842,86

Resultados a	600 Microstrain

Nivel de Deformación [Microstrain]	**Nombre Probeta**	**Ciclo de Carga**	**Carga Aplicada [N]**	**Deflexión de la Viga**	**Tensión a tracción [Pa]**	**Deformación por Tracción [m/m]**	**Rigidez a Flexión [Pa]**	**Angulo de Fase [°]**	**Energía Disipada [J/m3]**	**Energía Disipada Acum. [J/m3]**
600	M3V8P2	50	1727,782	0,0003289	3549293	0,0006355	5585464000	29,04	3,4396	137,53
		80	1539,956	0,000328	3163452	0,0006337	4992151000	29,99	3,1484	235,94
		100	1427,899	0,0003215	2933259	0,0006212	4721605000	30,29	2,8874	296,11
		160	1243,45	0,0003217	2554354	0,0006215	4109857000	30,92	2,5625	458,97
		200	1138,265	0,0003169	2338278	0,0006122	3819506000	31,56	2,3534	557,30
		300	974,4331	0,0003165	2001728	0,0006115	3273420000	31,77	2,0246	775,34
		400	861,352	0,0003136	1769431	0,0006059	2920360000	32,04	1,7868	964,68
		444	824,6799	0,0003156	1694097	0,0006098	2778188000	32,04	1,7217	1041,60
	M3V9P1	50	1920,866	0,0003291	3945936	0,0006358	6206544000	28,21	3,7261	141,89
		100	1601,641	0,0003228	3290169	0,0006236	5275927000	29,96	3,2187	316,84
		120	1525,606	0,0003218	3133974	0,0006218	5040520000	30,52	3,1085	380,04
		200	1260,654	0,0003231	2589696	0,0006242	4148903000	31,86	2,6803	612,57
		250	1095,577	0,0003258	2250588	0,0006294	3575698000	32,68	2,4031	738,87
		280	956,5167	0,0003265	1964923	0,0006307	3115231000	33,61	2,1550	807,09
		284	934,2389	0,0003279	1919159	0,0006336	3028961000	33,59	2,1137	815,63
	M3V9P2	50	1882,598	0,0003127	3586161	0,0006273	5716553000	27,85	3,3017	123,93
		100	1609,777	0,0003072	3066464	0,0006164	4975085000	29,64	2,9362	282,31
		200	1303,272	0,0003036	2482602	0,0006091	4075551000	29,75	2,3572	550,33
		350	1087,273	0,0003042	2071146	0,0006104	3393284000	31,14	2,0539	880,91
		400	1020,414	0,0003031	1943786	0,0006080	3196780000	31,42	1,9357	980,89
		491	914,4138	0,000304	1741867	0,0006100	2855390000	31,93	1,7657	1149,98