

**Universidad de Costa Rica**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Ingeniería Civil**

**Efecto en la resistencia al daño por humedad de la mezcla asfáltica en caliente al añadir cal y nanocal hidratada**

**Trabajo Final de Graduación**

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

**Mariam Vargas Barrantes**

Director de Proyecto de Graduación

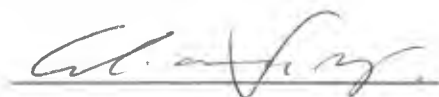
**Ing. Adriana Nordbeck Vargas, Ph.D.**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Costa Rica, Mayo, 2016.

## HOJA DE APROBACIÓN

---



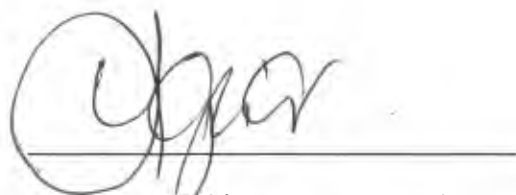
Ing. Adriana Vargas Nordbeck, Ph.D.

Director del Proyecto de Graduación



Ing. Fabricio Leiva Villacorta, Ph.D.

Asesor del Proyecto de Graduación



Ing. Jose Pablo Aguiar Moya, Ph.D.

Asesor del Proyecto de Graduación



Mariam Vargas Barrantes

Autor del Proyecto de Graduación

## DERECHOS DE AUTOR

---

**Fecha: 2016, mayo, 12**

La suscrita, Mariam Vargas Barrantes, cédula 1-1490-0183, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné B06566, manifiesta que es autora del Proyecto Final de Graduación **Efecto en la resistencia al daño por humedad de la mezcla asfáltica en caliente al añadir cal y nanocal hidratada**, bajo la Dirección del **Ph. D. Adriana Nordbeck Vargas**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

## **DEDICATORIA**

---

A mi familia:

Por el apoyo incondicional que siempre me han brindado,  
Por el ánimo cuando algo salía mal, y por la alegría con los triunfos.

A mi MADRE:

Por su dedicación y esfuerzo para formarme en lo que hoy soy.  
Por hacer del estudio el arma más poderosa que pueda tener.

## **AGRADECIMIENTOS**

---

Al Lanamme UCR y su personal en general por brindarme el equipo y material necesario para llevar a cabo esta investigación.

A Jose Sanabria por su paciencia y disposición a colaborar, enseñándome los aspectos técnicos que requería.

Al comité asesor por enriquecerme con su conocimiento en el tema y orientarme durante todo el proceso de investigación.

A mis amigos y compañeros de universidad, Andrey Arrieta y Miguel Zamora por el apoyo y la motivación brindada en momentos de crisis.

A mis amigas Daniela García y Viviana Varela, por cruzarse en mi camino y acompañarme a vivir las mejores experiencias que siempre recordaré.

## **ÍNDICE DE CONTENIDOS**

---

|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO 1. Introducción .....  | 13 |
| 1.1 Justificación.....  | 13 |
| 1.1.1 Descripción del problema .....                                  | 13 |
| 1.1.2 Importancia .....   | 15 |
| 1.1.3 Antecedentes .....  | 16 |
| 1.2 Objetivos.....  | 18 |
| 1.2.1 Objetivo general.....   | 18 |
| 1.2.2 Objetivos específicos.....                                      | 18 |
| 1.3 Delimitación del problema.....                                    | 19 |
| 1.3.1 Alcance.....  | 19 |
| 1.3.2 Limitaciones.....   | 20 |
| CAPÍTULO 2. Marco teórico.....  | 21 |
| 2.1 Daño por humedad .....  | 21 |
| 2.2 Cal Hidratada.....  | 24 |
| 2.3 Diseño Superpave .....  | 27 |
| 2.3.1 Compactador giratorio Superpave .....                           | 29 |
| 2.3.2 Requerimientos de diseño .....                                  | 30 |
| 2.3.3 Resistencia Retenida a la Tensión Diametral .....               | 33 |
| 2.4 Otros ensayo para determinar la susceptibilidad a la humedad..... | 35 |
| 2.4.1 Rueda de Hamburgo.....  | 35 |
| 2.4.2 Módulo Dinámico.....  | 36 |
| CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....  | 39 |
| 3.1 Diseño de mezcla .....  | 40 |
| 3.1.1 Características del agregado.....                               | 40 |
| 3.1.2 Características del ligante asfáltico.....                      | 41 |
| 3.1.3 Cal Hidratada .....   | 42 |
| 3.1.4 Nanocal Hidratada .....   | 43 |
| 3.1.5 Porcentaje óptimo de asfalto .....                              | 46 |
| 3.1.6 Cálculo de parámetros volumétricos .....                        | 47 |

|  |  |     |
|--|--|-----|
| 3.2  | Acondicionamiento de especímenes .....           | 51  |
| 3.3  | Resistencia Retenida a la Tensión Diametral..... | 53  |
| 3.4  | Rueda de Hamburgo .....                          | 55  |
| 3.5  | Módulo Dinámico .....                            | 58  |
| CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....                                  |  | 63  |
| 4.1  | Evaluación de las mezclas.....                   | 63  |
| 4.2  | Resistencia retenida a la tensión diametral..... | 65  |
| 4.3  | Rueda de Hamburgo .....                          | 68  |
| 4.4  | Módulo dinámico.....                             | 70  |
| 4.5  | Factor de fatiga .....                           | 80  |
| 4.6  | Comparación de ensayos .....                     | 81  |
| CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....  |  | 84  |
| CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES .....  |  | 86  |
| CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA.....  |  | 87  |
| CAPÍTULO 8. ANEXOS .....   |  | 90  |
| Anexo A: Parámetros volumétricos para el diseño de mezclas.....          |  | 90  |
| Anexo B: Resultados complementarios del ensayo de rrttd .....            |  | 97  |
| Anexo C: Resultados complementarios del ensayo de rueda de hamburgo..... |  | 103 |
| Anexo D: Resultados complementarios del ensayo de módulo dinámico .....  |  | 106 |

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

---

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Requerimientos de Superpave para la granulometría de los agregados .....  | 28 |
| Figura 2. Clasificación de la graduación del agregado fino y grueso. ....           | 28 |
| Figura 3. SGC y molde empleado para la compactación de la mezcla. ....              | 29 |
| Figura 4. Diagrama de los componentes de una HMA compactada.....                    | 32 |
| Figura 5. Configuración de carga y ruptura del ensayo de RRTD.....                  | 33 |
| Figura 6. Parámetros de la curva de Hamburgo .....                                  | 35 |
| Figura 7. Módulo dinámico complejo .....  | 36 |
| Figura 8. Representación gráfica del ángulo de fase .....                           | 37 |
| Figura 9. Mezclas elaboradas durante el proyecto. ....                              | 39 |
| Figura 10. Distribución de partículas de una muestra de cal de tamaño regular ..... | 42 |
| Figura 11. Molino de sólidos Retsch ZM200. ....                                     | 44 |
| Figura 12. Analizador de partículas láser HORIBA LA 300.....                        | 44 |
| Figura 13. Distribución de partículas para la cal molida.....                       | 45 |
| Figura 14. Equipo de vacío .....  | 48 |
| Figura 15. Equipo de falla para el ensayo de RRTD. ....                             | 53 |
| Figura 16. Ensayo Rueda de Hamburgo.....  | 55 |
| Figura 17. Disposición de los especímenes para el ensayo RH. ....                   | 56 |
| Figura 18. Cámara del ensayo MD. ....   | 59 |
| Figura 19. Aspecto del software del equipo AMPT. ....                               | 59 |
| Figura 20. Esfuerzo a tensión para cada ciclo de acondicionamiento. ....            | 66 |
| Figura 21. RRTD para todas las mezclas y ciclos de acondicionamiento. ....          | 67 |
| Figura 22. PID para las mezclas ensayadas .....                                     | 69 |



|   |     |
|---|-----|
| Figura 23. E* medido para las mezclas de 9,5 mm .....                                     | 71  |
| Figura 24. E* medido para las mezclas de 12,5 mm .....                                    | 72  |
| Figura 25. RE promedio para cada temperatura de ensayo .....                              | 74  |
| Figura 26. Efecto de la incorporación de un AAD según TMN .....                           | 75  |
| Figura 27. Efecto de los ciclos de acondicionamiento según el TMN .....                   | 76  |
| Figura 28. Curvas maestras obtenidas para las mezclas de 9,5 mm .....                     | 77  |
| Figura 29. Curvas maestras obtenidas para las mezclas de 12,5 mm .....                    | 78  |
| Figura 30. Desfase entre el esfuerzo aplicado y la deformación de la mezcla .....         | 79  |
| Figura 31. Factor de fatiga a 20°C y 10 Hz. ....  | 80  |
| <br>  |     |
| Figura A 1. Gráficos de la volumetría para encontrar el contenido de asfalto óptimo ..... | 90  |
| Figura A 2. Gráficos de la volumetría para encontrar el contenido de asfalto óptimo ..... | 91  |
| Figura A 3. Gráficos de la volumetría para encontrar el contenido de asfalto óptimo ..... | 92  |
| Figura A 4. Gráficos de la volumetría para encontrar el contenido de asfalto óptimo ..... | 93  |
| Figura A 5. Gráficos de la volumetría para encontrar el contenido de asfalto óptimo ..... | 94  |
| Figura A 6. Gráficos de la volumetría para encontrar el contenido de asfalto óptimo ..... | 95  |
| Figura A 7. Requerimientos volumétricos para MEZCLA ASFÁLTICA tipo SUPERPAVE.....         | 96  |
| <br>  |     |
| Figura C 1. Puntos de inflexión al desnudamiento para las mezclas de 9,5 mm. ....         | 103 |
| Figura C 2. Puntos de inflexión al desnudamiento para las mezclas de 12,5 mm. ....        | 104 |

## **ÍNDICE DE CUADROS**

---

|   |     |
|---|-----|
| Cuadro 1. Valores mínimos especificados para el VMA .....                                 | 30  |
| Cuadro 2. Requerimientos de Superpave para el VFA .....                                   | 31  |
| Cuadro 3. Requerimientos estadísticos de calidad de los datos .....                       | 38  |
| Cuadro 4. Características del agregado empleado en las mezclas. ....                      | 40  |
| Cuadro 5. Granulometría empleada según tamaño nominal.....                                | 41  |
| Cuadro 6. Características del asfalto utilizado en las mezclas estudiadas .....           | 41  |
| Cuadro 7. Resultados del análisis químico realizado a la cal empleada .....               | 42  |
| Cuadro 8. Temperaturas y frecuencias de carga aplicadas en el ensayo. ....                | 58  |
| Cuadro 9. Temperaturas y frecuencias para la construcción de las curvas maestras .....    | 62  |
| Cuadro 10. Parámetros volumétricos obtenidos para el porcentaje de asfalto óptimo. ....   | 63  |
| Cuadro 11. Resultados de esfuerzo y RRTD para cada ciclo de acondicionamiento. ....       | 65  |
| Cuadro 12. Resumen de los resultados del ensayo de Rueda de Hamburgo.....                 | 68  |
| Cuadro 13. RE promedio.....   | 73  |
| Cuadro 14. ANOVA para los valores de RE.....  | 74  |
| Cuadro 15. Valores empleados para el cálculo del factor de fatiga. ....                   | 80  |
| Cuadro 16. Comparación del promedio de los resultados obtenidos en todos los ensayos. ... | 81  |
| Cuadro 17. Puntuación de las mezclas para cada ensayo realizado. ....                     | 82  |
| <br>  |     |
| Cuadro B 1. Resultados del ensayo de RRTD para la mezcla de 9,5 mm control.....           | 97  |
| Cuadro B 2. Resultados del ensayo de RRTD para la mezcla de 12,5 mm control. ....         | 98  |
| Cuadro B 3. Resultados del ensayo de RRTD para la mezcla de 9,5 mm con cal.....           | 99  |
| Cuadro B 4. Resultados del ensayo de RRTD para la mezcla de 12,5 mm con cal.....          | 100 |

|  |     |
|--|-----|
| Cuadro B 5. Resultados del ensayo de RRTD para la mezcla de 9,5 mm con nanocal. ....                       | 101 |
| Cuadro B 6. Resultados del ensayo de RRTD para la mezcla de 12,5 mm con nanocal.....                       | 102 |
| Cuadro C 1. Parámetros para el cálculo del punto de inflexión de desnudamiento .....                       | 105 |
| Cuadro D 1. Valores promedio de módulo dinámico y ángulo de fase medidos para las mezclas de control. .... | 106 |
| Cuadro D 2. Valores promedio de módulo dinámico y ángulo de fase medidos para las mezclas con cal.....     | 107 |
| Cuadro D 3. Valores promedio de módulo dinámico y ángulo de fase medidos para las mezclas con nanocal..... | 108 |
| Cuadro D 4. Valores de frecuencias y módulos para las mezclas sin ciclos de acondicionamiento. ....        | 111 |
| Cuadro D 5. Valores de frecuencias y módulos para las mezclas con 1 ciclo de acondicionamiento. ....       | 112 |
| Cuadro D 6. Valores de frecuencias y módulos para las mezclas con 3 ciclos de acondicionamiento. ....      | 113 |
| Cuadro D 7. Valores de frecuencias y módulos para las mezclas con 6 ciclos de acondicionamiento. ....      | 114 |

Vargas Barrantes, Mariam.

Efecto en la resistencia al daño por humedad de la mezcla asfáltica en caliente al añadir cal y nanocal hidratada.

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José, C.R.:

M. Vargas B., 2016

XI, 57, [25]; ils. col. – 24 refs.

## **RESUMEN**

La humedad es uno de los agentes que acelera y propicia el deterioro de los pavimentos. Costa Rica, al ser un país tropical con altos índices de precipitación es sumamente susceptible ante esta problemática. Por lo tanto, con esta investigación se busca evaluar el efecto en la resistencia ante el daño por humedad de mezclas asfálticas en caliente con tamaños máximos nominales de 9,5 mm y 12,5 mm al añadir cal y nanocal.

Para determinar la susceptibilidad de las mezclas a la humedad y estudiar sus propiedades mecánicas, se llevaron a cabo tres ensayos: Tensión Diametral, Rueda de Hamburgo y Módulo Dinámico. Se analizaron los resultados obtenidos de manera individual para cada prueba y posteriormente se realizó una comparación entre los tres ensayos.

Al incorporar cal y nanocal a las mezclas se observó en general una reducción en los porcentajes de asfalto óptimo, especialmente en las mezclas con un tamaño máximo nominal de 12,5 mm. Estas mezclas fueron las que presentaron un mejor desempeño ante el daño por humedad en todos los ensayos. Es importante rescatar que esta reducción de ligante se traduce en una disminución en los costos de producción.

El incorporar este agente antidesnudante a las mezclas mejoran sus propiedades mecánicas volviéndose menos susceptibles a la deformación permanente y al desnudamiento. Sin embargo, las mezclas se vuelven más rígidas por lo que es necesario complementar los resultados de esta investigación con un análisis de fatiga para determinar la susceptibilidad de las mezclas al agrietamiento. M.V.B.

DAÑO POR HUMEDAD; CAL HIDRATADA; NANOCAL HIDRATADA; MEZCLA ASFÁLTICA.

Ing. Adriana Vargas Nordcbeck, Ph.D.  
Escuela de Ingeniería Civil.

# **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 JUSTIFICACIÓN**

### **1.1.1 Descripción del problema**

Actualmente es común la inconformidad de la población costarricense con el estado de las carreteras en el país por el mal servicio que brindan al usuario. Los numerosos deterioros sobre las vías afectan la velocidad de tránsito debido a las deformaciones, baches, diversos agrietamientos y demás daños que se presentan. Sin embargo, no solo el confort de los usuarios está en juego, según el nivel de deterioro pueden ocurrir accidentes al propiciarse problemas de manejo, atentando así contra la seguridad vial.

En términos generales, la red vial ha mantenido su condición casi sin variaciones importantes desde el año 2012, sin embargo, el análisis de la evaluación de la Red Vial Nacional muestra la misma tendencia que en el año 2012, con una lenta propensión al deterioro, condición que queda evidenciada en el tipo de deterioros que se han presentado y por el elevado monto de las inversiones necesarias para mantener la condición actual. (LanammeUCR, 2015).

Al mal estado de los pavimentos flexibles se le suma el constante aumento del volumen de tránsito, el costo económico que implica mantener o reparar las vías y la necesidad de **especificaciones concisas para fabricar la mezcla en Costa Rica. "Es fundamental conocer las propiedades de la mezcla para un adecuado diseño de pavimentos en función de las características de la carretera y su entorno" (Loría, 2013).**

Uno de los principales agentes que propician o aceleran estos deterioros en las vías es la presencia de humedad en la mezcla, lo cual se agrava en nuestro país a causa de las características climatológicas que presenta. Factores como la humedad relativa, la temperatura (aire y agua) y precipitación juegan un rol importante en el desempeño de los materiales. Costa Rica es un país tropical con altos niveles de precipitación donde el daño por humedad se vuelve especialmente importante. El agua genera problemas de adhesión entre el agregado y el ligante asfáltico lo que se traduce en futuros deterioros, en una disminución de la vida útil y del rendimiento de la capa. Aunque se han implementado técnicas para prevenir estos daños, teniendo resultados satisfactorios en el laboratorio, los resultados en campo no concuerdan con los obtenidos mediante ensayos. Esto deja claro que el daño por humedad es un fenómeno que no ha sido plenamente comprendido y se tienen grandes

lagunas del conocimiento en tres áreas: los factores que contribuyen al daño por humedad en el campo, los procedimientos y pruebas de laboratorio apropiadas y la efectividad de los tratamientos (Lu y Harvey, 2008).

La caracterización del daño por humedad es esencial para cuantificar la pérdida de funcionalidad de la mezcla asfáltica. Sin embargo, a pesar de que esta problemática ha sido ampliamente estudiada, resulta complejo encontrar una única metodología que cuantifique de manera integral el daño y logre predecir acertadamente el comportamiento de los materiales en el campo.

### **1.1.2 Importancia**

El costo de reparación y mantenimiento de vías es bastante elevado. En el periodo de noviembre del año 2010 hasta agosto del año 2012 se invirtió un total de ₡ 66 393 308 633,00 (LanammeUCR, 2013). Aun así, como se mencionó anteriormente, la red vial se mantiene sin mejoras evidentes en cuanto al estado de las carreteras. Esto deja en evidencia que se deben investigar nuevos métodos que respondan satisfactoriamente a la problemática que aqueja la realidad costarricense.

Existe una tendencia a modificar ligantes asfálticos para aumentar la durabilidad y la vida útil de los pavimentos. Sin embargo lo ideal es adecuar estas técnicas a nuestra realidad nacional buscando alternativas que sean más eficientes, más económicas y principalmente que sean específicas para las condiciones de este país donde se utilicen materiales nacionales. Poder utilizar materiales que se produzcan en el país y de ser posible mejorarlos con diversas técnicas, es una opción que podría ayudar a abaratar costos. Por ejemplo, en una investigación realizada por La Asociación Nacional de Cal de Estados Unidos (National Lime Association) se menciona que los pavimentos tratados con cal reducen su costo de producción en \$ 20 por tonelada de mezcla asfáltica y además su vida útil se incrementa hasta en un 38% demostrando que el uso de este producto es sumamente rentable (Dallas, N. et al, 2006).

Por lo tanto es vital estudiar e investigar técnicas que combatan este mal para lograr beneficios económicos para el país y permitir al usuario de las carreteras gozar de confort y seguridad vial.

### **1.1.3 Antecedentes**

El daño por humedad ha sido una preocupación importante para los expertos en el tema desde hace muchos años. Los intentos por desarrollar pruebas de laboratorio que distinguen mezclas susceptibles a la humedad se remontan a los años 1920. Una de las primeras pruebas que se introdujo para identificar el potencial ante el daño por humedad, fue el ensayo de inmersión-compresión a finales de los años 1940, la cual se convirtió posteriormente en norma ASTM a mediados de la década de 1950. Este ensayo mide la pérdida de resistencia a la compresión que se produce por la acción del agua sobre las mezclas asfálticas compactadas.

Posteriores investigaciones en las décadas de 1960 pusieron en evidencia, el significativo efecto del clima y el tráfico en el deterioro de las mezclas y su desempeño ante la presencia de humedad. Esto dio lugar a que varios investigadores llegaran a desarrollar la prueba de laboratorio que actualmente tiene la más amplia aceptación en la industria de la pavimentación, el ensayo de Lottman modificado, bajo la norma AASHTO T283 y ASTM D4867.

Los ensayos de rueda cargada aplicados a mezclas asfálticas compactadas sumergidas bajo el agua se hicieron populares para la determinación del daño por humedad en la década de 1990. El dispositivo de Rueda de Hamburgo y el Analizador de Pavimento Asfáltico (APA) se encuentran entre las pruebas de este tipo. Fue también durante este período que el sistema de acondicionamiento ambiental (ECS, por sus siglas en inglés) se introdujo a la industria en la realización del Programa de Investigación Estratégica de Carreteras (SHRP) en 1993.

Una de las técnicas que se ha venido implementando es el uso cal hidratada como aditivo en la mezcla asfáltica en caliente. Esto con el fin de mejorar las propiedades de la mezcla gracias a la reacción que ocurre entre la cal y el ligante asfáltico. Así mismo se ha estudiado la influencia del tamaño de las partículas de cal en las propiedades de la mezcla, entre ellas la susceptibilidad al daño por humedad.

Cheng, Shen y Xiao (2011) realizaron estudios con partículas de cal con tamaños de 100 nanómetros y menos, mezclándolas con el ligante asfáltico para fabricar mezcla asfáltica tibia (WMA, por sus siglas en inglés). Estos estudios se realizan bajo la teoría de que las nanopartículas de cal hidratada tienen efecto en las propiedades reológicas del ligante. La



eficacia de la cal hidrata es función del contenido y del método usado para mezclarla, sin embargo el tamaño de la partícula es muy importante también. Al reducir el tamaño de la cal se puede aumentar su área de superficie específica y con esto aumentar la interacción entre las partículas de cal y el ligante para con ello mejorar las propiedades reológicas del asfalto y al mismo tiempo el desempeño del pavimento.

En una investigación realizada por la Asociación Europea de la Cal (EuLA, por sus siglas en inglés) mencionan que la cal hidratada se ha utilizado durante muchas décadas en los EE.UU. donde se agrega actualmente a 50 millones de toneladas aproximadamente de mezcla asfáltica por año. En algunas regiones, la adición de la cal es obligatoria. En los EE.UU., los investigadores y las autoridades relacionadas con el transporte han llegado a la conclusión de que la cal amplía la vida del pavimento hasta en un 38%. En Europa, la cal hidratada también se ha utilizado durante muchos años. Recientes investigaciones han establecido que la cal da lugar a múltiples ventajas para las mezclas asfálticas: calientes, templadas y frías, **así como para el reciclaje "in-situ" frío. La adición de cal hidratada previene los deterioros prematuros y aumenta la vida del pavimento.** (EuLA, 2011).

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo general**

- Evaluar el efecto de la adición de cal y nanopartículas de cal hidratada en mezclas asfálticas en caliente con tamaños nominales de 9,5 mm y 12,5 mm.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Evaluar el desempeño ante el daño por humedad de las mezclas asfálticas en caliente de tamaño nominal de 9,5mm y 12,5 mm que contengan cal hidratada de tamaño regular y nano partículas de cal.
- Estudiar el efecto de la adición de cal hidratada de tamaño regular y nano partículas de cal en las características mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente.
- Comparar los resultados obtenidos en los ensayos aplicados así como las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

### **1.3 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA**

#### **1.3.1 Alcance**

El presente trabajo se enfocó en el análisis del desempeño ante el daño por humedad de mezclas de tamaños nominales de 9,5 mm y 12,5 mm dado que estos son los tamaños más usados en Costa Rica. Cada una de las mezclas fue analizada bajo tres condiciones: una mezcla de control (sin aditivos) y mezclas que contienen un porcentaje de 1% de cal y nanopartículas de cal. Se utilizó una sola fuente de agregado proveniente del tajo Procamar en Barranca, Puntarenas y cal de producción nacional. También se utilizó una sola fuente de ligante asfáltico, distribuida por RECOPE y la cual corresponde a un asfalto PG 70-22 de acuerdo a la clasificación de grado por desempeño.

El diseño de mezcla se basó en la metodología SUPERPAVE que pese a no ser el diseño más trabajado en la actualidad en Costa Rica, está permitido en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR-2010). Se sabe que este método simula mejor la compactación en campo y es más adecuado para diseñar mezclas de alto desempeño. Además la intención de las industrias últimamente ha sido migrar hacia este método.

Se debe recalcar que el diseño de la mezcla de control fue definido previamente como parte de un proyecto de investigación del LanammeUCR. Para las mezclas que contienen cal y nanopartículas de cal, dicho diseño fue verificado para asegurar que se cumplan las especificaciones vigentes en el país en cuanto a parámetros volumétricos. Es decir, la selección de materiales y la estructura del agregado fueron realizadas por la Unidad de Materiales y Pavimentos (UMP) del Lanamme, UCR por lo que solamente se calculó el porcentaje de asfalto óptimo para cada mezcla y los respectivos ensayos de desempeño ante el daño por humedad.

Para el estudio de las mezclas asfálticas únicamente se realizaron tres ensayos para su respectiva caracterización y descripción del comportamiento ante el daño por humedad: Resistencia Retenida a la Tensión Diametral (AASHTO T 283), Rueda de Hamburgo (AASHTO T 324) y Módulo Dinámico (AASHTO TP 79) bajo diferentes niveles de acondicionamiento.

### **1.3.2 Limitaciones**

- Se utilizó una sola fuente de agregado para la elaboración de los especímenes por lo que no se conoce la susceptibilidad del proceso ante variaciones en este factor.
- La cal hidratada que se le adicionó a las mezclas asfálticas es producida a nivel nacional de manera artesanal sin un control de calidad adecuado durante el proceso de producción. Por lo tanto, no presenta la calidad ideal para cumplir con las especificaciones requeridas.
- La fabricación de la nanocal se limitó a la efectividad del equipo disponible en el laboratorio para moler la cal de tamaño regular.
- No se analizó el efecto de la cal y nanocal hidratada en las propiedades del ligante, solamente a nivel de la mezcla asfáltica por lo que no se sabe si esta sería una mejor manera de incorporar este producto a la mezcla o si los resultados podrían variar.

## **CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 DAÑO POR HUMEDAD**

Por largo tiempo se ha considerado a la humedad como un factor que contribuye en gran medida a la degradación prematura de los pavimentos asfálticos. Es de esperarse que en Costa Rica, por ser un país con altos índices de precipitación, este hecho sea una de las problemáticas a tomar en consideración.

El agua puede ingresar a la estructura del pavimento por infiltración desde la superficie, lo cual sería debido a la permeabilidad de la carpeta asfáltica, o bien podría ingresar por fenómenos como ascenso capilar o por difusión de vapor. Una vez que se tiene presencia de humedad, existe la probabilidad de que ocurran ciertos mecanismos de falla que desencadenan en deterioros del pavimento debido principalmente al desprendimiento del agregado. En un estudio realizado por Aguiar y otros (2014) se detallan estos mecanismos de falla de la siguiente manera:

- Separación: Ocurre cuando una película delgada de agua se interpone entre el asfalto y el agregado provocando el desprendimiento del ligante. En este caso no se tiene ruptura de la película del ligante que envuelve el agregado, simplemente se da una separación por falta de adherencia entre ambos materiales.

Por su parte, la adherencia es una característica que se puede ver afectada por propiedades de los agregados como textura, porosidad, por la energía superficial, por la orientación molecular y hasta por reacciones químicas generadas entre el agregado y el ligante. Agregados ácidos con mezclas básicas pueden generar mayores problemas. Cambios en la acidez (PH) afectan los enlaces químicos perjudicando el ángulo de contacto o la humectabilidad (habilidad de un líquido para mantener contacto con una superficie sólida) dando como resultado pérdida de adherencia.

- Desplazamiento: En este mecanismo, el agua llega a la superficie del agregado a causa de discontinuidades en la película del asfalto, las cuales se deben a recubrimientos inadecuados o a rupturas en el ligante por pérdida de resistencia a la cohesión.

- Emulsificación espontánea: En una emulsión típica existen gotas de asfalto en suspensión en una fase acuosa continua pero cuando el proceso inverso ocurre, es decir, las gotas de agua se dispersan en la película de ligante asfáltico, se conoce como una emulsión invertida. Esto podría ocurrir si se utilizó una emulsión en la mezcla. También puede ocurrir si emulsionantes tales como arcillas están presentes. El resultado final de una pérdida de cohesión es una pérdida de la fuerza y la rigidez de la mezcla asfáltica.
- Presión de poro: Un alto contenido de vacíos en las mezclas asfálticas favorece la circulación de agua entre los poros interconectados o bien, puede existir agua atrapada en el interior de los poros no permeables. El problema se debe a la presión de poro que incrementa conforme se repiten las aplicaciones de carga, esta presión puede llegar a generar microgrietas en la película del ligante.
- Socavación hidráulica: Cuando la superficie del pavimento se encuentra saturada, los vehículos al pasar generan altas presiones en la parte delantera de las llantas y succión en la parte trasera. Cuando una carga pasa sobre un punto dado de un pavimento de manera repetida, se da una reversión de esfuerzos de compresión a tensión.

Los mecanismos mencionados anteriormente pueden ocurrir de manera individual o simultánea, dando inicio a deterioros en el pavimento, ya sea a nivel estructural o funcional, como por ejemplo el desnudamiento y los desprendimientos superficiales.

El desnudamiento es un deterioro que se caracteriza por la pérdida de unión entre los agregados y el cemento asfáltico que normalmente inicia en la parte inferior de la capa de mezcla asfáltica y progresa hacia arriba. Es muy común en pavimentos con sistemas de drenaje inadecuados, con excesos de vacíos de aire o bajos contenidos de ligante. Es uno de los deterioros más difíciles de identificar debido a que las manifestaciones superficiales pueden adoptar numerosas formas: roderas, escalonamiento, corrugaciones, desprendimientos o agrietamiento. Por lo tanto, la única manera precisa de determinar si se trata de este fenómeno es la apertura de la estructura del pavimento y mirar el material extraído de la sección transversal.

Cuando el desnudamiento comienza en la superficie y progresa hacia el interior de la capa se conoce como desprendimiento y está relacionado con la carencia de cohesión en el asfalto,

con la pérdida de finos y con ligantes rígidos o envejecidos. Este deterioro genera una desintegración progresiva de la carpeta de mezcla asfáltica que puede ocasionar problemas de seguridad. Si el material desprendido deja una depresión en la superficie del pavimento lo suficientemente profunda como para que el agua se estanque podría causar hidropneumático. Además, los residuos sueltos en la carretera pueden generar problemas adicionales que deberían ser tratados en función de la tasa de progresión del problema ya que reduce la resistencia al deslizamiento.

Así mismo, deterioros de origen estructural como la deformación permanente o el agrietamiento por fatiga se pueden agravar por el efecto de la humedad en el interior de la estructura del pavimento dando como resultado una pérdida de resistencia y de durabilidad de la estructura.

Existen diversas metodologías para evaluar el daño por humedad, una manera de cuantificarlo es mediante la relación de un parámetro de desempeño derivado del análisis de especímenes secos (muestras de control) y acondicionados. El objetivo del proceso de acondicionamiento es simular, en un periodo corto de tiempo, el daño generado por la humedad en la mezcla asfáltica. La razón de un parámetro que se obtiene después de ensayar especímenes secos contra otros acondicionados se llama razón de daño por humedad (MRD, por sus siglas en inglés).

$$MRD = \frac{f(P^a)}{f(P^s)} \quad (1)$$

Dónde:

$P^s$ : Propiedad de la mezcla medida en seco.

$P^a$ : Propiedad de la mezcla medida luego de someter el espécimen a ciclos de acondicionamiento.

## **2.2 CAL HIDRATADA**

La cal hidratada, también conocida como hidróxido de calcio, es un producto que se obtiene de la piedra caliza cuando se calcina a temperaturas que rondan los 900°C. De este proceso de calcinación se obtiene cal viva la cual posteriormente se debe hidratar. Esta hidratación provoca la desintegración rápida de las piedras y produce una fuerte emisión de calor. El polvo que se consigue de esta reacción es lo que se conoce como cal apagada o cal hidratada (hidróxido de calcio).

Es muy difícil encontrar en la naturaleza calés químicamente puros. Normalmente están acompañadas de otros materiales como el carbonato de magnesio, arcilla, hierro, azufre, álcalis, etc. Esto da origen a una clasificación según el estado de pureza de la misma, y la proporción de los materiales que la conforman. Generalmente la cal es de color blanco en diferentes grados de intensidad, dependiendo de su pureza química.

Según Aguiar y otros (2014) por sus propiedades ha sido utilizada como aditivo en la mezcla asfáltica debido a que mejora la adherencia, reduce el endurecimiento por envejecimiento y aumenta la rigidez inicial de las mezclas, mejora el agrietamiento por fatiga. Cuando se añade cal a la mezcla en caliente, esta reacciona con los agregados, fortaleciendo el vínculo entre el ligante y el agregado. Al mismo tiempo que trata el agregado, la cal reacciona también con el propio asfalto. La cal reacciona con las moléculas altamente polares para inhibir la formación de jabones solubles en agua que promueven el desnudamiento. Cuando estas moléculas reaccionan con la cal, forman sales insolubles que ya no atraen el agua. Además, la dispersión de las pequeñas partículas de cal hidratada dentro la mezcla hace que esta sea más rígida y más resistente, lo que reduce la probabilidad de que la unión entre el cemento asfáltico y el agregado se rompa mecánicamente, incluso si el agua no está presente.

El asfalto está formado por compuestos orgánicos de carga negativa por lo tanto es de esperar que exista una mejor adhesión con agregados básicos ( $\text{pH} > 7$ ) que con agregados ácidos, dado que los primeros presentan carga positiva. Los agregados con alto contenido de carbonato de calcio, como la cal, generan una carga positiva.

El desempeño de los materiales calizos y el grado de mejoría que puedan aportar a la mezcla asfáltica dependen en gran medida del origen del material así como de su proceso de



producción. Es importante considerar factores como la ubicación geográfica, la génesis y la composición mineralógica de las fuentes de extracción de los materiales calizos, así como el proceso de horneado, hidratación, molienda, granulometría, finura, y composición química de la cal (porcentajes de óxidos de calcio y óxidos de magnesio). Sin embargo, en Costa Rica existe un desconocimiento sobre los tipos de cal que se producen en las industrias nacionales, y por lo tanto se ignoran las propiedades químicas del producto final. La cal hidratada (CaOH) con la que se cuenta en el país tiene un porcentaje de pureza menor al estándar internacional, pues presenta un mayor contenido de material orgánico entre otras impurezas (Badilla et al. 2013).

Para que la cal pueda ser usada como aditivo se recomienda en la norma ASTM C 1097 que cumpla con la siguiente composición química:

- 90% mínimo de óxidos de calcio y magnesio
- 5% máximo de dióxido de carbono
- 5% máximo de hidróxido de calcio y Oxido de magnesio
- 2% máximo de humedad libre

Adicionalmente, la norma establece que la cal como aditivo no podrá tener más de un 3% de material retenido en la malla N° 30 y no más de 30% en la N° 200.

La cal hidratada se puede añadir a las mezclas asfálticas en una variedad de formas. Típicamente la cantidad de cal hidratada que se incorpora a la mezcla es de 1% por peso total de la mezcla, aunque en los casos en los que se prevé desnudamiento severo la cantidad puede aumentar. A continuación se describen los métodos más utilizados de incorporación establecidos por la Asociación Europea de Cal:

- Método seco: Es el más simple de implementar, se incorpora en su forma seca pura normalmente a la mezcla junto con los finos del agregado.
- Método de cal seca en agregado húmedo: Este es el método más utilizado, consiste en mezclar la cal seca con el agregado que ha sido humedecido hasta un 3% de su condición de superficie saturada seca. Esto se hace con el fin de asegurar una cobertura más completa del agregado que la que se consigue mediante el método seco. La cal que no se adhiere al agregado, se dispersa en la mezcla para proporcionar las mejoras mencionadas anteriormente. Este método requiere de cierto

tiempo de espera luego de la incorporación de la cal antes del mezclado para que se dé una adecuada reacción entre la cal y la superficie del agregado.

- Método de lechada: Se fabrica una mezcla de cal y agua que se aplica al agregado en un porcentaje medido. Igualmente se requiere de cierto tiempo para que la cal reaccione con las impurezas de la superficie del agregado tales como arcillas. Con este método se tiene una menor dispersión de la cal en el resto de la mezcla pues la mayor cantidad se adhiere al agregado.

Una alternativa estudiada a nivel mundial, es reducir las partículas de la cal hidratada a tamaños nanométricos mediante diferentes procesos. De esta forma se aumenta el área superficial de las partículas y se mejora la interacción entre el ligante y las partículas de nanocal (Diab et al., 2013). Lo anterior se hace con la finalidad de mejorar el aporte de la cal al desempeño de los pavimentos ante el daño por humedad.

### **2.3 DISEÑO SUPERPAVE**

En 1987, el SHRP (*Strategic Highway Research Program*) inició el desarrollo de un nuevo método para el diseño de pavimentos conocido como SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavement*). Esta avanzada metodología contempla varios aspectos donde incluye especificaciones para la selección de materiales, diseño de mezcla asfáltica y su análisis, además intenta predecir el desempeño de los pavimentos incluyendo equipos de ensayo, métodos de ensayo y criterios. En resumen, se puede decir que hay 4 pasos básicos para llevar a cabo este diseño:

- Selección de los materiales (agregado, ligantes, modificadores, etc.).
- Selección de la estructura del agregado de diseño.
- Selección del contenido de ligante asfáltico de diseño
- Evaluación de la sensibilidad a la humedad de la mezcla diseñada.

Superpave propone una nueva especificación para ligantes asfálticos con nuevos conjuntos de ensayos basándose en el desempeño al tomar en cuenta el clima y la temperatura prevista del pavimento. Las propiedades físicas requeridas se mantienen sin cambios pero se modifica la temperatura para la cual el ligante debe cumplir esas propiedades. Es importante mencionar que dichas propiedades físicas son medidas sobre ligantes que han sido envejecidos en el laboratorio para simular el endurecimiento por oxidación que ocurre en la realidad. Se sabe que parte de la oxidación del asfalto ocurre durante el proceso de producción, cuando es necesario calentar el cemento asfáltico para permitir el mezclado y posteriormente la compactación.

Por otro lado, el agregado mineral también juega un papel importante en el desempeño de la mezcla, por lo que Superpave refina los procedimientos ya existentes para caracterizarlo. Propiedades como angularidad, partículas alargadas y chatas y contenido de arcilla, son especificadas en esta metodología.

Al definir la angularidad del agregado se busca obtener un alto ángulo de fricción interna y así, una alta resistencia al corte lo que se traduce como una alta resistencia al ahuellamiento. Limitando la cantidad de partículas alargadas hay menos susceptibilidad a la fractura del material durante su manipulación construcción y bajo tránsito. Al controlar el contenido de arcilla se mejora la unión entre el asfalto y el agregado previniendo futuros problemas de

adherencia. También se considera otras propiedades relevantes como la tenacidad, durabilidad y la presencia de materiales deletéreos.

En cuanto a la granulometría, se desarrolla un diseño de estructura del agregado graficando el porcentaje pasando contra el tamaño de tamices, en milímetros elevado a la 0,45. Se traza una recta (graduación de máxima densidad) desde el pasante 100% hasta el origen. El tamaño máximo nominal de agregado se establece según la Figura 1 donde se muestran en las últimas dos columnas, los porcentajes pasando para las granulometrías en estudio.

| Malla   | Tamaño máximo nominal de los agregados - Porcentaje pasando |      |         |      |         |      |        |      |
|---------|---|------|---------|------|---------|------|--------|------|
|         | Designación de la granulometría                             |      |         |      |         |      |        |      |
|         | 25,0 mm   |      | 19,0 mm |      | 12,5 mm |      | 9,5 mm |      |
|         | Min.  | Máx. | Min.    | Máx. | Min.    | Máx. | Min.   | Máx. |
| 37,5 mm | 100   |      |         |      |         |      |        |      |
| 25,0 mm | 90  | 100  | 100     |      |         |      |        |      |
| 19,0 mm | *   | *    | 90      | 100  | 100     |      |        |      |
| 12,5 mm | *   | *    | *       | *    | 90      | 100  | 100    |      |
| 9,5 mm  | *   | *    | *       | *    | *       | *    | 90     | 100  |
| 4,75 mm | *   | *    | *       | *    | *       | *    | *      | *    |
| 2,36 mm | *   | *    | *       | *    | *       | *    | *      | *    |
| 600 µm  | *   | *    | *       | *    | *       | *    | *      | *    |
| 300 µm  | *   | *    | *       | *    | *       | *    | *      | *    |
| 75 µm   | 3   | 8    | 3       | 8    | 3       | 8    | 3      | 8    |

**Figura 1.** Requerimientos de Superpave para la granulometría de los agregados  
**Fuente:** CR-2010.

Según el porcentaje pasando en la malla N° 8, las granulometrías se clasifican como finas o gruesas según los valores que se muestra en la Figura 2.

| Tamaño máximo nominal de agregado | Malla control principal (PCM) para la malla de tamaño máximo nominal de la mezcla |         |         |        |
|-----------------------------------|---|---------|---------|--------|
|                                   | 25,0 mm   | 19,0 mm | 12,5 mm | 9,5 mm |
| PCM                               |   |         |         |        |
| Punto de Control (% Pasando)      | 40  | 47      | 39      | 47     |

**Figura 2.** Clasificación de la graduación del agregado fino y grueso.  
**Fuente:** CR-2010.

Mediante esta selección de la granulometría, se asegura que el agregado desarrollará un esqueleto granular fuerte, mejorando la resistencia a la deformación permanente y a la vez se garantiza la durabilidad de la mezcla pues se tiene un volumen de vacíos adecuado.

### 2.3.1 Compactador giratorio Superpave

Un aspecto clave en el sistema Superpave es la compactación en el laboratorio por medio del compactador giratorio Superpave (SGC, por sus siglas en inglés) donde la compactación se realiza por amasado y no por golpes, con el fin de simular las condiciones reales en campo. El SGC usa un molde con un diámetro interno de 150 mm y una altura nominal de 250 mm donde se coloca la mezcla suelta a la temperatura de compactación. Un plato de base se ajusta en el fondo del molde para lograr el confinamiento durante la compactación. El molde es ubicado en el compactador y centrado bajo un pistón que ejerce una presión de 600 kPa ( $\pm 18$  kPa). El molde se inclina hasta alcanzar un ángulo de giro de  $1,23^\circ$  ( $\pm 0,02^\circ$ ) y la compactación empieza, la cual se puede realizar ya sea por número de giros o por altura.



**Figura 3.** SGC y molde empleado para la compactación de la mezcla.

Con este método se puede estimar la gravedad específica del espécimen como un porcentaje de la gravedad máxima teórica, en todo momento durante el proceso de compactación, al ser la medición de la altura una de las de la funciones del SGC. Para consideraciones de diseño, se suele determinar este porcentaje, después de obtener la gravedad específica ( $G_{bs}$ ) de la pastilla compactada, mediante la siguiente ecuación:

$$\%G_{mm}N_x = \frac{G_{bs}}{G_{mm}} \frac{h_m}{h_x} 100 \quad (1)$$

Dónde:

$\%G_{mm}N_x$ : Porcentaje de la gravedad máxima teórica alcanzada a los "x" giros.

$G_{bs}$ : Gravedad específica del agregado.

$G_{mm}$ : Gravedad máxima teórica de la mezcla

$h_m$ : Máxima altura de compactación

$h_x$ : Altura medida a los "x" giros.

### 2.3.2 Requerimientos de diseño

Superpave establece valores específicos para parámetros como volumetría y proporción polvo asfalto como requerimientos para el diseño de mezclas asfálticas.

Entre los parámetros volumétricos establece:

- Vacíos de aire (VA): el contenido de vacíos de aire es una propiedad importante, pues utilizada como la base para la selección del contenido de asfalto. El contenido de VA de diseño debe ser igual a un 4%
- Vacíos del agregado mineral (VMA): Corresponde a la suma del volumen de los vacíos de aire y del ligante efectivo (asfalto no absorbido) en una muestra compactada. Representa el espacio intergranular ocupado por el asfalto y el aire, es decir, los vacíos entre las partículas del agregado. Para un porcentaje de diseño de VA de 4%, los valores mínimos especificados para el VMA son una función del tamaño máximo nominal del agregado, como se muestra en el Cuadro 1.

**Cuadro 1. Valores mínimos especificados para el VMA**

| <b>Tamaño máximo nominal (mm)</b> | <b>VMA mínimo (%)</b> |
|-----------------------------------|-----------------------|
| 9,5 mm                            | 15,0                  |
| 12,5 mm                           | 14,0                  |
| 19 mm                             | 13,0                  |
| 25 mm                             | 12,0                  |
| 37,5 mm                           | 11,0                  |

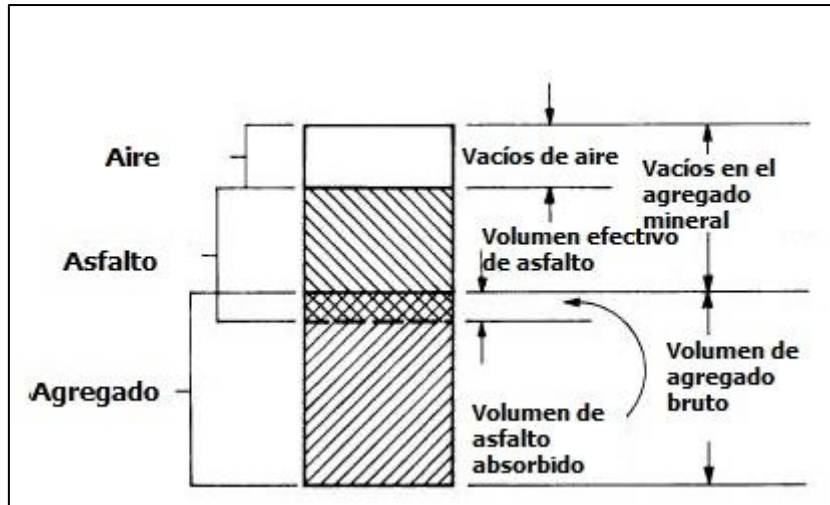
- Vacíos llenos con asfalto (VFA): Es el volumen del ligante asfáltico efectivo expresado como un porcentaje del VMA. El rango aceptable del VFA de diseño para 4% de vacíos de aire es una función del nivel de tránsito (Cuadro 2).

**Cuadro 2. Requerimientos de Superpave para el VFA**

| <b>Tránsito (ESALs)</b> | <b>VFA de diseño (%)</b> |
|-------------------------|--------------------------|
| < $3 \times 10^5$       | 70-80                    |
| < $1 \times 10^6$       | 65-78                    |
| < $3 \times 10^6$       | 65-78                    |
| < $1 \times 10^7$       | 65-75                    |
| < $3 \times 10^7$       | 65-75                    |
| < $1 \times 10^8$       | 65-75                    |
| < $3 \times 10^8$       | 65-75                    |

- Relación Polvo Asfalto (DP): Otro requerimiento de la mezcla es la proporción de polvo, la cual debe estar en un rango de 0,8 a 1,6 para todas las mezclas, según se establece en CR-2010. Se calcula como la relación entre el peso del agregado más fino que el tamiz 0,075 mm y el contenido de asfalto efectivo.

La Figura 4 contiene el diagrama de los componentes de una mezcla asfáltica compactada donde además de los parámetros volumétricos anteriormente explicados, se muestra el volumen de asfalto efectivo y el absorbido.



**Figura 4.** Diagrama de los componentes de una HMA compactada  
**Fuente:** Superpave, 1994.

Para la obtención de los parámetros mencionados anteriormente, es necesario determinar también características de la mezcla como su gravedad específica máxima teórica y la gravedad específica bruta de los especímenes compactados:

- Gravedad específica máxima teórica ( $G_{mm}$ ): Se define como la relación entre el peso de un volumen dado de mezcla asfáltica sin vacíos de aire y la masa de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura.
- Gravedad específica bruta ( $G_{bs}$ ): Es la relación entre el peso de un dado volumen de mezcla asfáltica compactada (incluyendo los vacíos de aire) y el peso de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura.

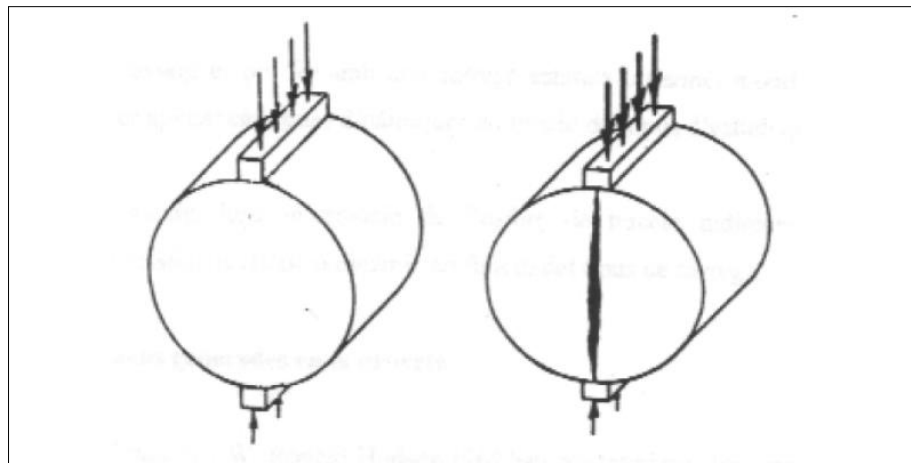


### 2.3.3 Resistencia Retenida a la Tensión Diametral

En el diseño de mezclas y el sistema de análisis Superpave se aplican ensayos de desempeño para garantizar que las mezclas alcancen valores mínimos aceptables para los tipos de deterioros considerados por los investigadores de SHRP. Uno de los ensayos aplicados es el de tensión indirecta mediante el cual se obtiene la resistencia retenida a la tensión diametral. Este parámetro es una razón entre los esfuerzos obtenidos en especímenes deteriorados por la humedad (acondicionados) y especímenes secos.

En la norma AASHTO T 238 se especifica el procedimiento para la elaboración de especímenes y su respectiva medición del cambio en la resistencia a la tensión diametral de mezclas asfálticas en caliente.

El espécimen es colocado de manera que la carga se aplica uniformemente a lo largo de dos líneas opuestas hasta alcanzar la ruptura, tal y como se ejemplifica en la Figura 5. Esta configuración de carga provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, y esta tracción es la que agota la pastilla y desencadena la rotura en el plano diametral.



**Figura 5.** Configuración de carga y ruptura del ensayo de RRTD

**Fuente:** Garrote E, 2006.

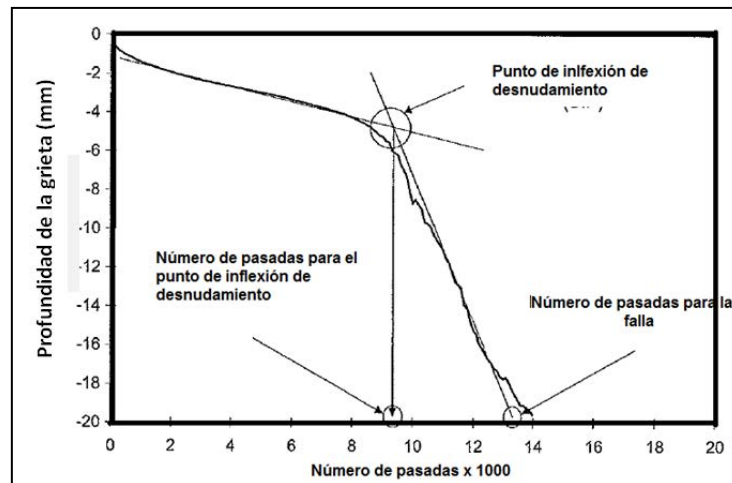
Estos resultados sirven para predecir la susceptibilidad al desnudamiento a largo plazo que puede presentar la mezcla. También se puede realizar el ensayo con mezclas modificadas o con aditivos distintos para comparar resultados. Por ejemplo, con la cal hidratada adicionada como sustituto de una fracción de los finos del agregado tal y como se hará en el presente trabajo.

Este es el procedimiento de ensayo más utilizado ya que es fácil y rápido de realizar y resulta muy económico. Sin embargo, se ha demostrado que los resultados que se obtienen de las mezclas ensayadas en el laboratorio, no predicen de manera satisfactoria el comportamiento en campo de las mismas mezclas (Garrote E, 2006). Esta es una desventaja considerable ya que la importancia de un ensayo radica en que se pueda conocer con exactitud y precisión el desempeño de la mezcla en campo mediante el análisis de los resultados obtenidos con la prueba.

## 2.4 OTROS ENSAYO PARA DETERMINAR LA SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD

### 2.4.1 Rueda de Hamburgo

Este ensayo, bajo la especificación AASHTO T324, evalúa el ahuellamiento y la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica en caliente mediante el uso de la rueda de Hamburgo. Se determina la susceptibilidad a la falla prematura de la mezcla debido al debilitamiento de la estructura del agregado, a la mala rigidez del asfalto o al daño por humedad. Se mide la profundidad de la huella (deformación permanente) y el número de pasadas necesarias para que ocurra la falla y se grafican estos datos. Un ejemplo de esta grafica se muestra en la Figura 6, de la cual se obtiene el número de ciclos necesarios para la falla y el punto de inflexión de desnudamiento.



**Figura 6.** Parámetros de la curva de Hamburgo

**Fuente:** Lanamme UCR, 2015.

De la gráfica anterior se puede obtener tanto la pendiente como el intercepto de la primera y segunda porción de estado constante de la curva para con este determinar el punto de inflexión de desnudamiento.

Este ensayo se puede realizar ya sea en bloques de mezcla asfáltica o también en muestras cilíndricas preparadas en el Compactador Giratorio de Superpave, compactadas en el laboratorio. Alternativamente, también se pueden ensayar muestras tomadas en el sitio, núcleos de diámetros grandes como 255 mm o 300 mm, o también en bloques cortados del pavimento.

### 2.4.2 Módulo Dinámico

Para materiales viscoelásticos lineales tales como las mezclas asfálticas, la relación esfuerzo deformación bajo carga sinusoidal continua, se define por el módulo complejo dinámico ( $E^*$ )

$$E^* = E' + iE'' \quad (2)$$

Dónde:

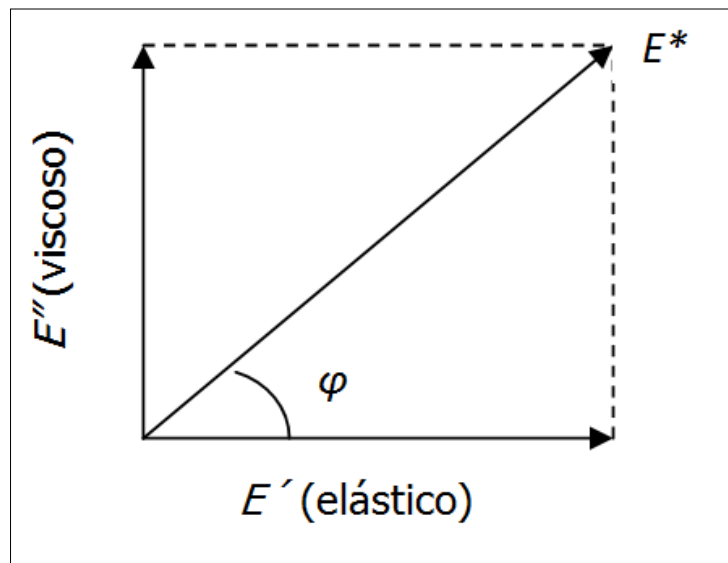
$E'$ : Parte elástica del módulo

$iE''$ : Parte compleja del módulo

Basándose en trigonometría básica (Figura 7), cada componente del módulo complejo se puede obtener según las ecuaciones siguientes:

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \varphi \quad (3)$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \varphi \quad (4)$$

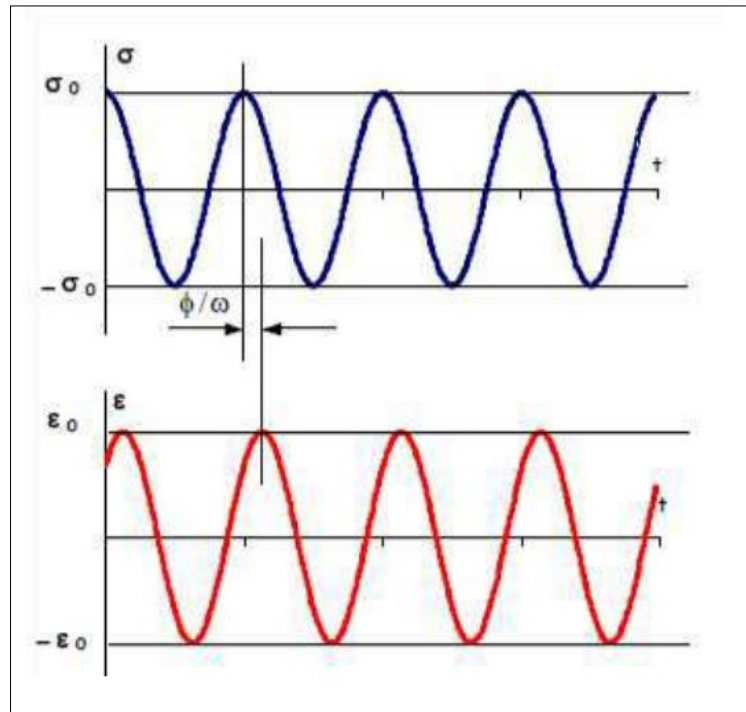


**Figura 7.** Módulo dinámico complejo

Matemáticamente el módulo dinámico se define como el valor absoluto del módulo complejo ( $|E^*|$ ):

$$|E^*| = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \varphi\right)^2 + \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \varphi\right)^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (5)$$

El ángulo de fase ( $\varphi$ ) es un indicador de las propiedades viscoelásticas de la mezcla, dado que representa el desfase que hay entre la aplicación de la carga y la respuesta del material. Este desfase se observa en la Figura 8 donde el esfuerzo aplicado está representado por la gráfica color azul y la respuesta del material, que en este caso es la deformación unitaria, se muestra en color rojo. Para materiales elásticos puros este ángulo toma un valor de cero grados mientras que para materiales completamente viscosos el ángulo de fase correspondiente es  $90^\circ$ .



**Figura 8.** Representación gráfica del ángulo de fase

**Fuente:** Laboratorio Vial UTN-FRM, 2015.

El método de ensayo utilizado para determinar el módulo dinámico en especímenes de HMA está descrito en la norma AASHTO TP 79 mediante el uso del equipo AMPT (Asphalt Mixture Performance Tester). En este procedimiento, el espécimen de mezcla asfáltica es sometido a una carga axial de compresión de tipo sinusoidal (haversiana) la cual se aplica a varias frecuencias. El ensayo se repite a diferentes temperaturas para un mismo espécimen. El esfuerzo aplicado y la deformación axial son medidos como función del tiempo y usados para calcular el módulo dinámico y el ángulo de fase de manera automática por medio del software de la AMPT.

Adicionalmente el sistema reporta datos estadísticos que deben estar dentro del límite establecido según el Cuadro 3 para que los resultados puedan ser aceptados, de lo contrario el ensayo debe ser repetido.

**Cuadro 3. Requerimientos estadísticos de calidad de los datos**

| <b>Requerimiento estadísticos</b> | <b>Límite</b> |
|-----------------------------------|---------------|
| Error estándar de carga           | Menor al 10%  |
| Error estándar de deformación     | Menor al 10%  |
| Uniformidad de la deformación     | Menor al 30%  |
| Uniformidad de fase               | Menor a 3°    |

**Fuente:** AASHTO TP 79, 2012.

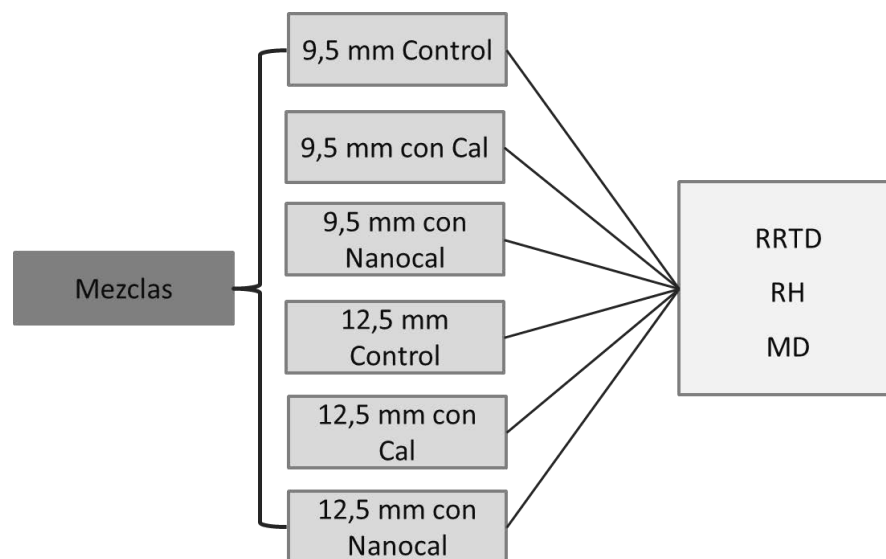
Una vez que se obtienen resultados satisfactorios dentro de los límites permitidos, se procede con la realización de las curvas maestras (AASHTO PP-61). Estas curvas muestran el módulo en función de la temperatura y la frecuencia de carga. Para esto, la frecuencia calculada a la temperatura de referencia, conocida como frecuencia reducida, equivale a la frecuencia de carga real a la temperatura de ensayo y se obtiene aplicando un factor de desplazamiento. Este factor de ajuste se basa en el principio de superposición tiempo-temperatura donde se busca obtener el mismo resultado para diferentes temperaturas pero para diferentes tiempos de cargas. Las curvas maestras se construyen a una temperatura de referencia que por lo general es 20°C y se utilizan para conocer el  $|E^*|$  a cualquier combinación de temperatura del pavimento y para cualquier velocidad de tránsito. La utilidad de estas curvas maestras recae en que pueden ser empleadas para evaluar la mezcla y caracterizar el módulo dinámico para un diseño de pavimento empírico-mecanicista.

Determinar el cambio en el módulo de la mezcla como resultado del daño por humedad tiene utilidad para fines de predicción de rendimiento, ya que la degradación de módulo juega un papel importante en el daño del pavimento y debe ser incluido en los cálculos que predicen el rendimiento a largo plazo de pavimento flexible. Además, es importante recalcar que el módulo dinámico es uno de los parámetros de entrada para el diseño mecanicista-empírico.

### CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

Para la elaboración de esta investigación, se trabajó con tres tipos de mezclas distintas, la primera es utilizada como control pues se usa solamente agregado y asfalto para su fabricación sin incluir ningún tipo de modificación. Los resultados obtenidos de los especímenes fabricados con esta mezcla sirvieron como parámetros de comparación para los resultados de las otras dos mezclas. La segunda mezcla consiste en adicionar al agregado, un 1% de cal de tamaño regular durante el proceso de mezclado. Finalmente la tercer mezcla se trabaja incorporando esta misma cantidad de cal luego de ser sometida a un por un proceso de molienda por la malla N° 200 para así disminuir el tamaño de sus partículas obteniendo como resultado nanocal.

Para cada una de las tres mezclas mencionadas anteriormente, se trabajan dos granulometrías distintas: 9,5 mm y 12,5 mm de tamaño nominal. Por lo tanto, se cuenta con un total de seis mezclas distintas con las cuales se fabricaron los especímenes necesarios para la elaboración de los ensayos de Resistencia Retenida a la Tensión Diametral (RRTD), Módulo Dinámico (MD) y Rueda de Hamburgo (RH). En la Figura 9 se esquematiza la configuración anterior.



**Figura 9.** Mezclas elaboradas durante el proyecto.

## 2.5 DISEÑO DE MEZCLA

El diseño de mezcla Superpave, como se ha mencionado anteriormente, comprende varios pasos donde se incluye tanto la selección de materiales como la estructura del agregado de diseño. Para la elaboración de este proyecto, estos dos pasos fueron previamente realizados por la Unidad de Materiales y Pavimentos del Lanamme UCR. Por lo tanto, únicamente se procedió a realizar el cálculo del porcentaje óptimo de asfalto para cada mezcla partiendo de la granulometría ya establecida. En los siguientes apartados se detallan las características de los materiales empleados (agregado, asfalto y cal hidratada) y se explica el procedimiento para obtener el porcentaje óptimo de asfalto mediante el cálculo de cada uno de los parámetros volumétricos.

### 2.5.1 Características del agregado

El agregado utilizado proviene del tajo Procamar en Barranca, Puntarenas. La información de este material, relevante para el diseño de mezcla, fue obtenida del informe I-1158-13 elaborado por el Lanname UCR y se resume en el Cuadro 4 y el Cuadro 5.

**Cuadro 4. Características del agregado empleado en las mezclas.**

| Parámetro  | Resultado |         | Especificación<br>CR-2010 |
|--|-----------|---------|---------------------------|
|  | 9,5 mm    | 12,5 mm |                           |
| Gbs de los agregados combinados                                | 2,592     | 2,570   | -                         |
| Abrasión (%)   |           | 19,8    | 35 máx.                   |
| Sanidad (%)  |           | 1,14    | 12 máx.                   |
| índice de durabilidad  |           | 80,7    | 35 mín.                   |
| Partículas con caras planas y alargadas,<br>proporción 1:3 (%) |           | 0,39    | 10 máx.                   |
| Equivalente de arena (%)                                       |           | 74      | 45 mín.                   |



**Cuadro 5. Granulometría empleada según tamaño nominal**

| Malla         | Porcentaje Pasando |         | Especificación CR-2010 |         |
|---------------|--------------------|---------|------------------------|---------|
|               | 9,5 mm             | 12,5 mm | 9,5 mm                 | 12,5 mm |
| <b>3/4"</b>   | 100                | 100     | 100                    | 100     |
| <b>1/2"</b>   | 100                | 95,4    | 100                    | 90-100  |
| <b>3/8"</b>   | 95,0               | 78,3    | 90-100                 | -       |
| <b>N° 4</b>   | 60,0               | 43,3    | -                      | -       |
| <b>N° 8</b>   | 40,0               | 28,9    | 47                     | 39      |
| <b>N° 16</b>  | 25,0               | 20,0    | -                      | -       |
| <b>N° 30</b>  | 17,0               | 14,8    | -                      | -       |
| <b>N° 50</b>  | 10,0               | 10,9    | -                      | -       |
| <b>N° 100</b> | 7,0                | 8,0     | -                      | -       |
| <b>N° 200</b> | 5,0                | 5,8     | 3-8                    | 3-8     |

### 2.5.2 Características del ligante asfáltico

Se utilizó una sola fuente de ligante asfáltico, ya que es el único tipo de asfalto que distribuye la Refinadora Costarricense de Petróleo S.A. (RECOPE). Este ligante se clasifica como PG 70-22 según su grado por desempeño y como un AC-30 según su viscosidad. Los datos necesarios requeridos en el diseño de mezcla fueron obtenidos del informe I-0642-14 elaborado por el Lanamme UCR donde se da una caracterización completa para este material. El Cuadro 6 resume las propiedades relevantes para este trabajo.

**Cuadro 6. Características del asfalto utilizado en las mezclas estudiadas**

| Propiedad                        | Resultado |
|----------------------------------|-----------|
| Temperatura de mezclado (°C)     | 154-159   |
| Temperatura de compactación (°C) | 145-149   |
| Gb                               | 1,022     |
| Clasificación por Viscosidad     | AC-30     |
| Clasificación por penetración    | 50-60     |
| Clasificación por desempeño      | PG 70-22  |

### 2.5.3 Cal Hidratada

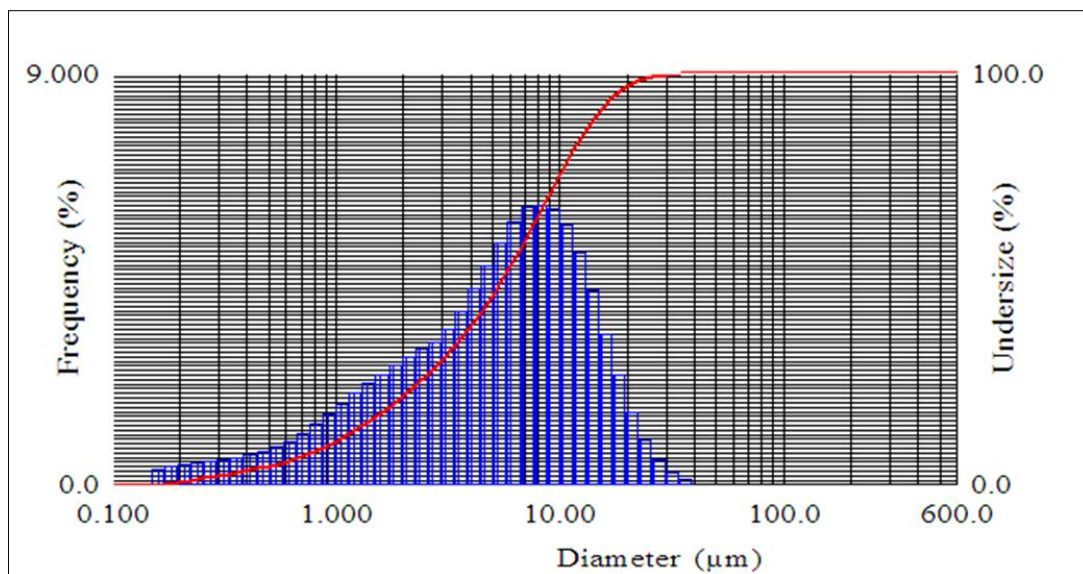
La cal empleada es un material de producción nacional a la cual se le realizó un análisis por parte del laboratorio de servicios analíticos de la escuela de química de la UCR, obteniendo los resultados mostrados en el Cuadro 7. Al comparar dichos valores con lo establecido por la norma ASTM C 1097 se observa que la cal nacional no cumple con la calidad requerida.

**Cuadro 7. Resultados del análisis químico realizado a la cal empleada**

| Componentes                             | Valor | Especificación ASTM C 1097 |
|---|-------|----------------------------|
| Contenido de óxido de calcio y magnesio | 73%   | 90% mín.                   |
| Pérdida de CO <sub>2</sub>              | 10%   | 5% máx.                    |

**Fuente:** Laboratorio de servicios analíticos UCR, 2014.

Para efectos de este trabajo, se realizó una medición de la cal hidratada, determinándose que las partículas tienen un tamaño promedio de 6,9  $\mu\text{m}$ . La distribución de las partículas para la muestra de cal hidratada medida se observa en la Figura 10.



**Figura 10.** Distribución de partículas de una muestra de cal de tamaño regular

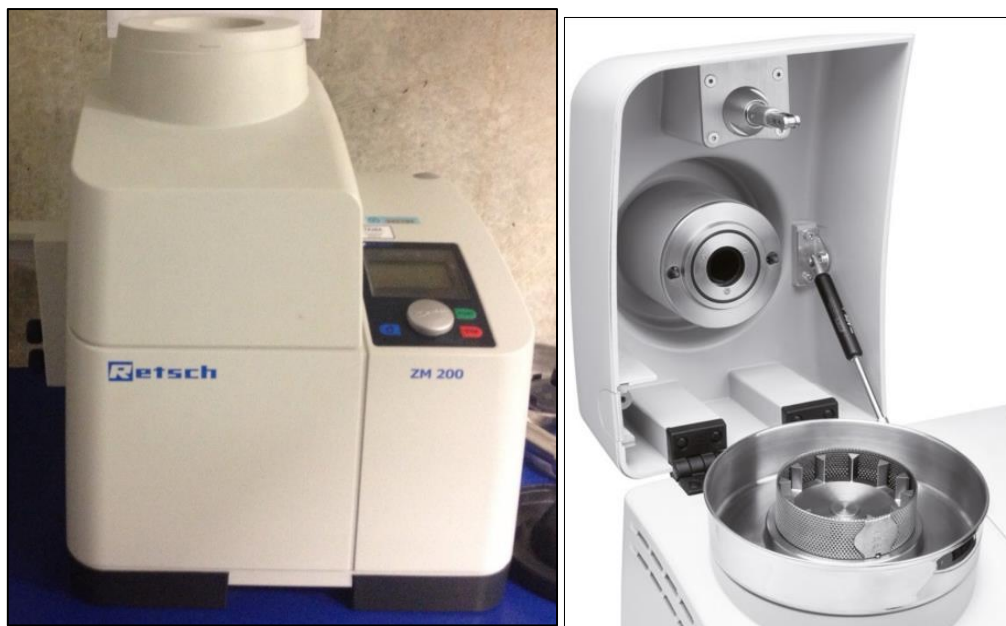
La cal de tamaño regular fue incorporada a las mezclas mediante el método de cal seca en agregado húmedo. Del peso total del agregado, se sustituyó un 1% con cal, la cual se adicionó siguiendo los pasos que se mencionan a continuación:

- Se adicionó la cal de tamaño regular al agregado seco.
- Se mezcló el agregado y la cal para homogenizar el material y asegurar una adecuada distribución de las partículas de cal.
- Se adicionó un 3% de agua por peso del agregado y se homogenizó nuevamente la mezcla.
- Finalmente se llevó al horno durante aproximadamente 16 horas a una temperatura de 110 °C para evaporar el agua.

#### **2.5.4 Nanocal Hidratada**

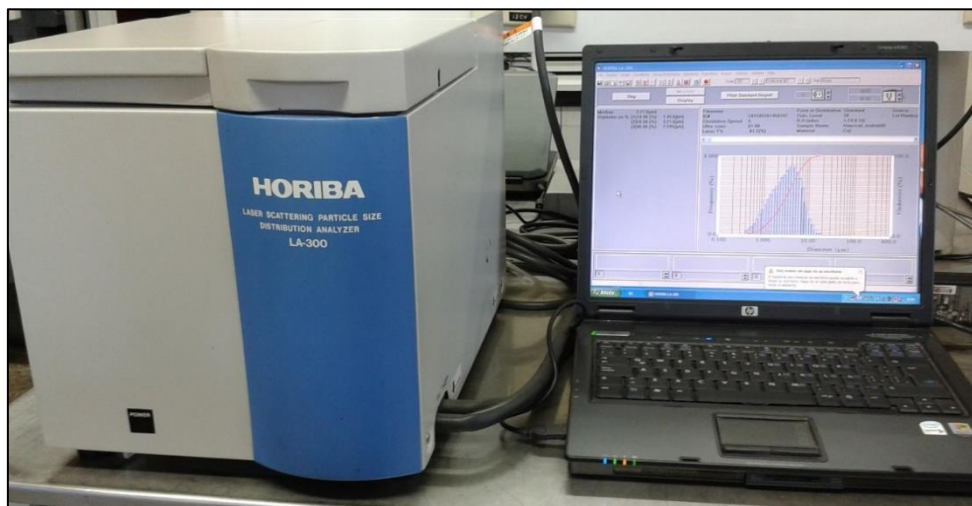
Como parte del proceso para mejorar la adhesión entre el asfalto y el agregado, se busca disminuir el tamaño de las partículas de la cal regular para con esto obtener una mayor área específica. Este proceso de molienda de la cal se llevó a cabo en el Lanamme UCR en el Molino de sólidos Retsch ZM200 que se muestra en la Figura 11. Este equipo funciona de manera centrifuga y se le pueden adaptar mallas de diferentes tamaños dependiendo del nivel de finura que se quiera obtener y del tipo de material.

Para poder moler la cal, primero se debe calentar a una temperatura de 110 °C durante 24 horas para eliminar la humedad que pueda existir en la muestra. Posteriormente, una vez que la cal sale del horno y alcanza la temperatura ambiente, se introduce mediante un embudo al molino para ser triturada al pasar por la malla N° 200 (**75 μm**) en el interior del equipo a una velocidad de 18000 rpm. El proceso de trituración se repite entre 2 o 3 veces para lograr homogeneidad en el tamaño de las partículas de la muestra de cal.



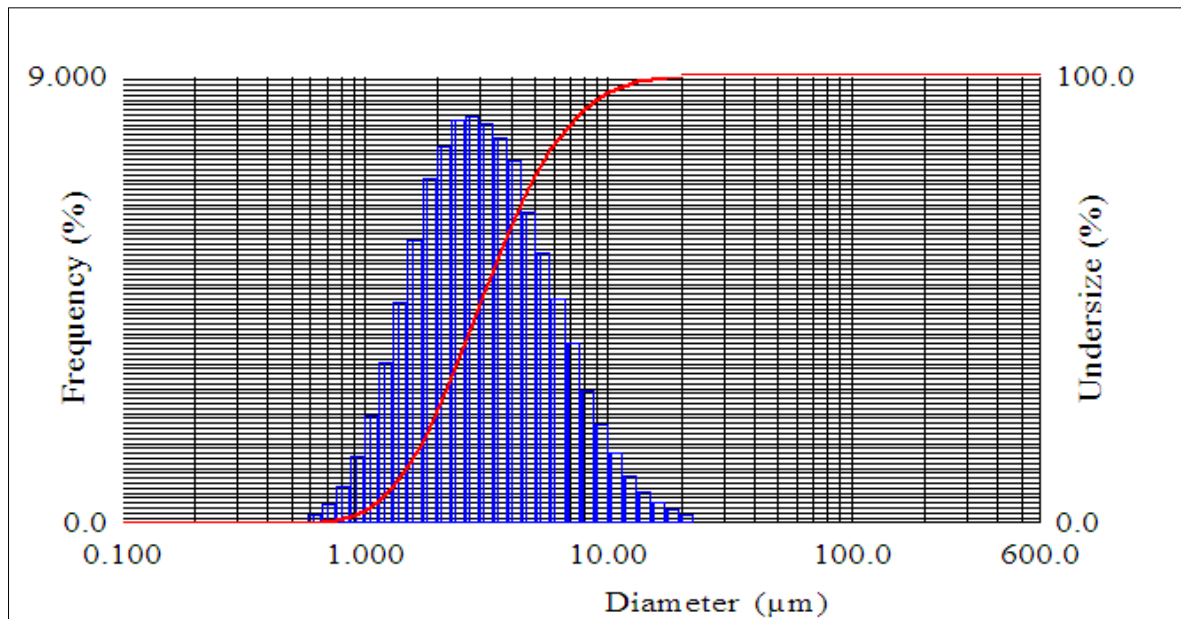
**Figura 11.** Molino de sólidos Retsch ZM200.

Inmediatamente después de ser molida, la muestra es pasada por el analizador de partículas láser HORIBA LA 300 que se muestra en la Figura 12. En este equipo, mediante escaneo láser, se mide el tamaño de partículas de la muestra utilizando isopropanol en lugar de agua para evitar que la cal recupere su tamaño original ya que es un material muy higroscópico, es decir, tiene una alta capacidad de absorber humedad del medio circundante.



**Figura 12.** Analizador de partículas láser HORIBA LA 300.

Al final del proceso de trituración se logra disminuir el tamaño promedio de partículas de cal hasta 3,6  $\mu\text{m}$  aproximadamente, lo cual representa una reducción de casi el 50% del tamaño original. En la Figura 13 se observa la distribución de las nanopartículas, la cual es bastante uniforme.



**Figura 13.** Distribución de partículas para la cal molida.

En este caso, para evitar el contacto de la nanocal con el agua, se incorporó a la mezcla mediante el método seco, simplemente asegurando mediante mezclado una adecuada distribución de las partículas de nanocal en el agregado seco. Igual que con la cal de tamaño regular, del peso total del agregado, se sustituyó un 1% con nanocal.

### **2.5.5 Porcentaje óptimo de asfalto**

Para cada una de las granulometrías anteriores y para cada una de las 3 mezclas evaluadas (control, cal y nanocal), se prueba con porcentajes de asfalto que varían entre el 5,5% y el 7,0%. Para esto, primero se calcula un porcentaje inicial, y después se mezcla a ese contenido, +/- 0.5%, y +1.0%

Con cada uno de estos porcentajes se fabrican dos especímenes de aproximadamente 4600 g cada uno y se compactan en el SGC hasta completar los 100 giros. Mediante el software del SGC se reporta la altura inicial y final del espécimen durante el proceso de compactación. Posteriormente, a cada una de las muestras se les calcula los parámetros volumétricos respectivos para poder graficar el porcentaje de asfalto por peso total de la mezcla (PTM) contra el VA, VMA, VFA, DP y finalmente contra el porcentaje de  $G_{mm} @ N_{ini}$  y  $G_{mm} @ N_{max}$  (8 y 100 giros de compactación, respectivamente) para cada una de las mezclas. Con las gráficas anteriores es posible determinar el porcentaje óptimo de asfalto que le permite a la mezcla tener un 4% de vacíos y al mismo tiempo presentar parámetros volumétricos dentro de los valores permitidos. Una vez que se cuenta con el porcentaje óptimo de ligante, se repite el procedimiento solamente para este porcentaje con el fin de verificar que efectivamente se cumpla con los valores especificados para el diseño y obtener el  $G_{mm}$ .

### 2.5.6 Cálculo de parámetros volumétricos

Para poder calcular los parámetros volumétricos es necesario obtener primero los pesos secos de los especímenes ya compactados, posteriormente se deben saturar en agua a una temperatura de 25°C por 4 minutos para luego obtener el peso de la muestra sumergida y finalmente el peso en condición de superficie saturada seca. Así mismo, es necesario conocer el valor de la gravedad máxima teórica de la mezcla suelta. A continuación se detalla el cálculo de dichos parámetros los cuales son necesarios para llevar a cabo el diseño de mezcla.

- Densidad máxima teórica ( $G_{mm}$ ): Una muestra de mezcla asfáltica suelta, previamente secada en el horno y pesada, se coloca en un frasco de vacío tarado (Figura 14). Se agrega suficiente agua al frasco a una temperatura de 25° C, hasta llevar la muestra a un estado sumergido. Se le aplica vacío gradualmente para reducir la presión residual en el frasco de vacío a 4.0 kPa (30.0 mm de Hg) o menor y se sostiene por un período de 15.0 ± 2 min. Al final del período de aplicación del vacío este se retira gradualmente. El volumen de la muestra de mezcla asfáltica es obtenido sumergiendo el frasco de vacío con la muestra en un baño de agua y pesándolo.

$$G_{mm} = \frac{W_{m+c} - W_c}{W_{m+c} - W_c + W_{c\ sum} - W_{c+m\ sum}} \quad (6)$$

Donde:

$W_{m+c}$ : Peso del contenedor más la muestra

$W_c$ : Peso del contenedor

$W_{c\ sum}$ : Peso del contenedor sumergido

$W_{m+c\ sum}$ : Peso del contenedor más la muestra sumergidos



**Figura 14.** Equipo de vacío

- Volumen de los especímenes: El volumen de los especímenes se obtiene de manera experimental mediante la diferencia entre el peso de la pastilla en condición de superficie saturada seca y el peso sumergido

$$V = W_{SSS} - W_{sum} \quad (7)$$

Donde:

$W_{SSS}$ : Peso de la pastilla en condición de superficie saturada seca

$W_{sum}$ : Peso de la pastilla sumergida.

- Gravedad específica bruta (Gbs): Los valores necesarios para el cálculo de la gravedad específica bruta de la mezcla compactada se obtienen mediante la relación del peso seco del espécimen con su volumen

$$Gbs = \frac{W_{SECO}}{W_{SSS} - W_{sum}} \quad (8)$$

- Vacíos de aire (VA): Una vez se tienen los valores de Gbs y Gmm es posible obtener el porcentaje de vacíos de cada espécimen según la siguiente ecuación

$$VA (\%) = \frac{Gmm - Gbs}{Gmm} * 100 \quad (9)$$



- Gravedad específica del agregado combinado ( $G_{bs\_comb}$ ):

$$G_{bs\_comb} = \frac{P_1 + P_2 + P_3 \dots P_n}{\frac{P_1}{G_{bs1}} + \frac{P_2}{G_{bs2}} + \frac{P_3}{G_{bs3}} \dots \frac{P_n}{G_{bsn}}} \quad (10)$$

Donde:

$P_i$ : Porcentaje de peso de cada uno de los componentes del agregado en la mezcla.

$G_{bs_i}$ : Gravedad específica bruta de cada uno de los componentes de la mezcla

- Porcentaje de asfalto por peso total de la mezcla (PTM):

$$\%Asf\ PTM = \frac{100 * \%Asf\ PTA}{100 + \%Asf\ PTA} \quad (11)$$

Donde:

$\%Asf\ PTA$ : Porcentaje de asfalto por peso total de agregado.

- Vacíos en el agregado mineral (VMA):

$$VMA = 100 - G_{bs} \frac{100 - Asf\ PTM}{G_{bs\_comb}} \quad (12)$$

- Vacíos llenos de asfalto (VFA):

$$VFA = \frac{VMA - VA}{VMA} * 100 \quad (13)$$

- Gravedad efectiva del agregado ( $G_{se}$ ):

$$G_{se} = \frac{100 - \%Asf\ PTM}{\frac{100}{G_{mm}} - \frac{\%Asf\ PTM}{G_{b\ Asf}}} \quad (14)$$

Donde la gravedad específica del asfalto ( $G_{b\ Asf}$ ) debe ser la correspondiente a 25°C

- Porcentaje de asfalto absorbido (Pba):

$$P_{ba}(\%) = G_{b\ Asf} \frac{G_{se} - G_{bs\_comb}}{G_{se} * G_{bs\_comb}} * 100 \quad (15)$$

- Porcentaje de asfalto efectivo (Pbe):

$$P_{be}(\%) = \%Asf\ PTM - \frac{P_{ba}}{100} * (100 - \%Asf\ PTM) \quad (16)$$

- Relación polvo asfalto (DP):

$$DP = \frac{P_{0,075}}{P_{be}} \quad (17)$$

Donde:

$P_{0,075}$ : Porcentaje respecto al peso total del agregado que pasa el tamiz 0,075 mm.

- Porcentaje de Gmm (N8):

$$G_{mm}N_8 = \frac{G_{bs}}{G_{mm}} \frac{h_{100}}{h_8} 100 \quad (18)$$

- Porcentaje de Gmm (N100):

$$G_{mm}N_{100} = \frac{G_{bs}}{G_{mm}} 100 \quad (19)$$

Una vez que todos estos valores anteriores cumplen con los rangos permitidos entonces se tiene el porcentaje óptimo de asfalto. Con este porcentaje se fabrican los especímenes para los tres ensayos que evaluarán el desempeño ante el daño por humedad de las mezclas: RRTD, MD y RH. Los especímenes por ser ensayados deben tener un 7% de vacíos de aire.

## **2.6 ACONDICIONAMIENTO DE ESPECÍMENES**

Con el fin de acelerar el deterioro de las mezclas, simulando así el daño por humedad, los especímenes que fueron sometidos a los ensayos de RRTD y MD, debieron pasar por ciclos de congelamiento y descongelamiento. Un solo ciclo conlleva congelar el espécimen por 16 horas a una temperatura de -18 °C seguido de 24 horas en un baño con agua a 60°C. Los especímenes se agrupan en grupos de tres, de manera que cada trío contenga porcentajes de vacíos similares entre sí y son seleccionados para ser sometidos a 1, 3 y 6 ciclos de acondicionamiento. Por cada mezcla se conserva un trío de especímenes para ser ensayados en condición seca, es decir, sin pasar por el proceso de acondicionamiento. De esta manera, se pueden tener parámetros de referencia para comparar el daño que ocurre en las mezclas debido a la humedad y a la vez, la mejoría que pueden existir debido a la adición de cal o nanocal.

Antes de ser sometidos a congelamiento y empezar los ciclos de acondicionamiento, los especímenes deben ser saturados entre un 70% y 80% para representar una condición crítica. La saturación se realiza colocando la pastilla en un contenedor de vacío como el de la Figura 14, el cual se llena con agua hasta que el espécimen esté cubierto al menos unos 25 mm sobre su superficie. Se debe aplicar vacío a una presión aproximada de 200 mbar durante 15 s (estos valores pueden variar para cada espécimen). Posteriormente se debe tomar el peso sumergido y el peso en condición de superficie saturada seca de la pastilla para determinar el grado de saturación. Este porcentaje se determina comparando el volumen de agua absorbido con el porcentaje de vacíos de aire mediante la siguiente ecuación:

$$S = \frac{V_{agua}}{V_{vacíos}} 100 \quad (20)$$

Donde:

$S$ : Grado de saturación de la pastilla

$V_{agua}$ : Volumen de agua absorbido

$V_{vacíos}$ : Volumen de vacíos de aire

Los volúmenes anteriores se pueden obtener de las siguientes ecuaciones:

$$V_{agua} = W^*_{sss} - W_{seco} \quad (21)$$

$$V_{vacíos} = (W_{sss} - W_{sum}) \frac{VA}{100} \quad (22)$$

Donde:

$W^*_{sss}$ : Peso de la pastilla en condición de superficie saturada seca luego de la saturación.

$W_{sss}$ : Peso de la pastilla en condición de superficie saturada seca antes de la saturación.

$W_{seco}$ : Peso de la pastilla seca antes del proceso de saturación.

$W_{sum}$ : Peso sumergido de la pastilla antes de la saturación

$VA$ : Porcentaje de vacíos de aire de la pastilla compactada antes de la saturación.

Si la saturación es menor al 70% se debe repetir el proceso aumentando la presión de vacío o el tiempo. En caso contrario, si la saturación se pasa del 80% el espécimen debe ser descartado y se debe fabricar una nueva pastilla.

Es importante destacar que para el ensayo de Rueda Hamburgo los especímenes no deben pasar por un proceso de acondicionamiento previo ya que el ensayo por sí solo simula el daño por humedad. Al estar los especímenes sumergidos en agua a una temperatura entre los 49 °C y 50 °C durante la falla, la mezcla sufre el deterioro suficiente.

## **2.7 RESISTENCIA RETENIDA A LA TENSIÓN DIAMETRAL**

Para llevar a cabo este ensayo se deben fabricar 12 especímenes cilíndricos (3 por cada estado de acondicionamiento) de 150 mm de diámetro con una altura de 95 mm. Luego de pasar por los ciclos de acondicionamiento, se procede con la falla de las pastillas para lo cual debe existir un periodo de 2 horas donde las pastillas se sumergen en agua a una temperatura de 25°C para verificar que el ensayo se realice a una temperatura controlada y en igualdad de condiciones para todas las muestras. Lo anterior debido a que la respuesta del material es altamente dependiente de la temperatura, por lo tanto, esta es una variable a considerar.

La falla se realiza en el equipo de la Figura 15 a una velocidad de 50,8 mm/min según lo establece la norma.



**Figura 15.** Equipo de falla para el ensayo de RRTD.

Del ensayo se toma la carga máxima aplicada en Newtons con la cual se determina el esfuerzo a tensión y con este, el porcentaje de resistencia retenida a la tensión diametral. La resistencia a la tensión se determina mediante la siguiente ecuación:

$$S_1 = \frac{2000P}{\pi tD} \quad (23)$$

Donde:

$S_1$ : Resistencia a la tensión diametral [kPa]

P: Carga Máxima [N]

t: Espesor del espécimen [mm]

D: Diámetro del espécimen [mm]

El efecto al daño por humedad se determina comparando las resistencias del grupo seco con las acondicionadas. Este efecto se puede expresar numéricamente mediante la razón entre ambas resistencias mediante el cálculo del índice:

$$TSR = \frac{S_2}{S_1} \quad (24)$$

Donde:

TSR: Índice de resistencia a la tensión diametral

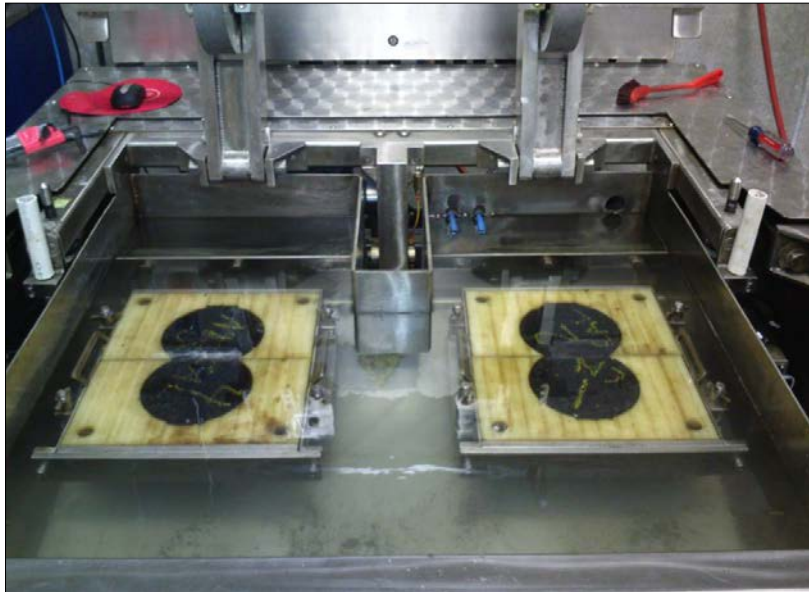
$S_1$ : Resistencia promedio a la tensión del subgrupo seco [kPa]

$S_2$ : Resistencia promedio a la tensión del subgrupo acondicionado [kPa].

## **2.8 RUEDA DE HAMBURGO**

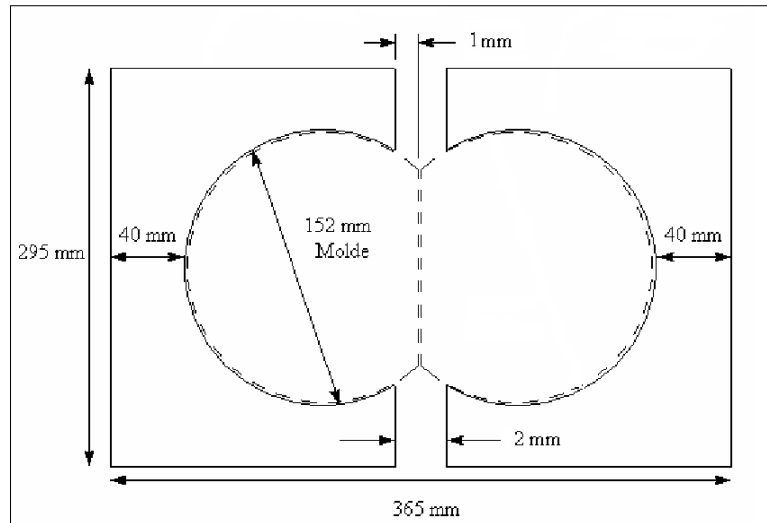
El equipo empleado en este ensayo consiste en una máquina eléctrica como la que se muestra en la Figura 16, la cual es capaz de mover las llantas de acero de 203,2 mm de diámetro y 47,0 mm de ancho sobre los especímenes de ensayo. La carga de cada llanta es aproximadamente 70 Kg y oscila sobre el espécimen con la posición variando sinusoidalmente a lo largo del tiempo.

En este dispositivo se sumerge el espécimen en agua con temperatura controlada a 50 °C. El baño posee un sistema mecánico de recirculación para estabilizar la temperatura dentro del tanque y el espécimen. Una vez que esta temperatura es alcanzada, el equipo demora 30 min en iniciar la prueba para estabilizar y homogenizar condiciones.



**Figura 16.** Ensayo Rueda de Hamburgo.

Los especímenes de 150 mm de diámetro y 62 mm de alto, se deben cortar de tal manera que la configuración de la Figura 17 se obtenga, es decir, cortar una cuerda en la que la distancia entre los dos especímenes no sea mayor a 2 mm al ser colocados en los moldes.



**Figura 17.** Disposición de los especímenes para el ensayo RH.

**Fuente:** Lanamme UCR, 2015.

El ensayo se realiza en 5 pasos, donde la llanta va cambiando de velocidad cada cierta cantidad de pasadas:

- Paso 1: 1000 pasadas a 20 pasadas por minuto.
- Paso 2: 9000 pasadas a 50 pasadas por minuto.
- Paso 3: 10000 pasadas a 50 pasadas por minuto.
- Paso 4: 10000 pasadas a 50 pasadas por minuto.
- Paso 5: 10000 pasadas a 50 pasadas por minuto.

Mediante un sensor LVDT se mide la deformación en 11 puntos distintos a lo largo de la muestra. Esta deformación se va registrando junto con el número de pasadas de la rueda. El ensayo se detiene cuando se alcanza una deformación máxima de 20 mm o en su defecto, cuando se alcanzan las 40000 pasadas (20000 ciclos) en caso de no alcanzar la deformación de falla.



Al graficar el número de pasadas contra la deformación, se obtiene el gráfico de la Figura 6, con el cuál se calcula el punto de inflexión de desnudamiento, el cual representa el punto donde la mezcla no resiste más deformación e inicia el desnudamiento por acción del agua (daño por humedad). Este punto se calcula mediante la siguiente ecuación con todos los parámetros expresados en pasadas:

$$PID = \frac{b_2 - b_1}{m_1 - m_2} \quad (25)$$

Donde:

*PID*: Punto de inflexión de desnudamiento.

*m*<sub>1</sub>: Pendiente de la primera porción de la curva.

*b*<sub>1</sub>: Intercepto de la primera porción de la curva.

*m*<sub>2</sub>: Pendiente de la segunda porción de la curva.

*b*<sub>2</sub>: Intercepto de la segunda porción de la curva.

## 2.9 MÓDULO DINÁMICO

Para llevar a cabo este ensayo, se deben compactar 12 especímenes por mezcla (3 por cada estado de acondicionamiento) en el SGC según la norma AASHTO PP-60. Las pastillas deben tener una altura de 170 mm y un diámetro de 150 mm, a las cuales se les extrae un núcleo de 100 mm de diámetro y 150 mm de altura. A estos núcleos se les debe realizar un pulido en sus caras transversales para posteriormente aplicarles el ensayo en el equipo AMPT.

Como se mencionó en el capítulo anterior, el ensayo se debe aplicar a diferentes temperaturas para diferentes frecuencias de carga, de acuerdo a la configuración que se muestra en el Cuadro 8 para el tipo de asfalto utilizado. Se debe iniciar el ensayo con la temperatura más baja y la frecuencia más alta y se van aplicando las demás frecuencias de manera descendente antes de incrementar la temperatura de ensayo.

**Cuadro 8. Temperaturas y frecuencias de carga aplicadas en el ensayo.**

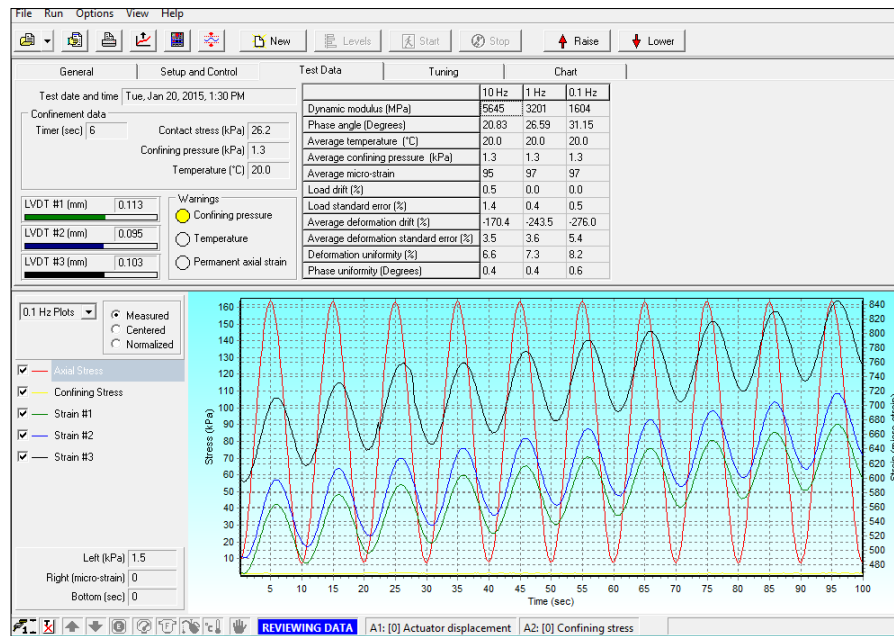
| PG 70-22         |                          |
|------------------|--------------------------|
| Temperatura (°C) | Frecuencia de carga (Hz) |
| 4                | 10                       |
|                  | 1                        |
|                  | 0,1                      |
| 20               | 10                       |
|                  | 1                        |
|                  | 0,1                      |
| 40               | 10                       |
|                  | 1                        |
|                  | 0,1                      |
|                  | 0,01                     |

Los especímenes son montados en la cámara que se muestra en la Figura 18 donde son sometidos a una carga axial de compresión de tipo sinusoidal (haversiana).



**Figura 18.** Cámara del ensayo MD.

La duración del ensayo varía dependiendo de las frecuencias que estén siendo aplicadas. La deformación es medida por medio de sensores LVDT y el esfuerzo aplicado y la deformación axial son medidos como función del tiempo y usados para calcular el módulo dinámico y el ángulo de fase de manera automática por medio del software de la AMPT (Figura 19).



**Figura 19.** Aspecto del software del equipo AMPT.

Una vez que se cuenta con estos resultados y se verifica que cumplan con los rangos establecidos en el Cuadro 3, se debe preparar un cuadro resumen de los datos para cada temperatura y frecuencia, donde aparezcan los promedios del ángulo de fase y el módulo dinámico. Los valores se introducen en una hoja de cálculo de Excel y se resuelven las ecuaciones necesarias para obtener las curvas maestras basándose en el procedimiento que se detalla en la norma AASHTO PP-61.

La forma general de la curva maestra de módulo dinámico es una versión modificada de la curva maestra definida por la ecuación incluida en la Guía de diseño mecanicista-empírico de pavimentos:

$$\log|E^*| = \delta + \frac{(Max - \delta)}{1 + e^{\beta + \gamma \log f_r}} \quad (26)$$

Donde:

$|E^*|$ : Módulo Dinámico, psi

$\delta, \beta, \gamma$ : Parámetros de ajuste

$Max$ : Límite máximo del módulo, psi

$f_r$ : Frecuencia reducida, Hz

La frecuencia reducida es calcula usando la ecuación 27:

$$\log f_r = \log f + \frac{\Delta E_a}{19,14714} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \quad (27)$$

Donde:

$f_r$ : Frecuencia reducida a la temperatura de referencia, Hz

$f$ : Frecuencia de carga a la temperatura de ensayo, Hz

$\Delta E_a$ : Energía de activación (parámetro de ajuste)

$T$ : Temperatura de ensayo, °K

$T_r$ : Temperatura de referencia, 293,15 °K (20°C)

La forma final de la ecuación de la curva de maestra se obtiene de sustituir la ecuación 27 en la ecuación 26:

$$\log|E^*| = \delta + \frac{(Max - \delta)}{1 + e^{\beta + \gamma \left\{ \log f + \frac{\Delta E_a}{19,14714} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right\}}} \quad (28)$$

Los factores de desplazamiento "shift factor" para cada temperatura, son dados por la ecuación 29:

$$\log[a(T)] = \frac{\Delta E_a}{19,14714} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \quad (29)$$

Donde:

$a(T)$ : Factor de desplazamiento para la temperatura  $T$

$\Delta E_a$ : Energía de activación (parámetro de ajuste)

$T$ : Temperatura de ensayo, °K

$T_r$ : Temperatura de referencia, 293,15 °K (20°C)

El límite máximo para el módulo es estimado de los parámetros volumétricos de la mezcla usando la ecuación 30:

$$\log|E^*|_{m\acute{a}x} = P_c \left[ 4\,200\,000 \left( 1 - \frac{VMA}{100} \right) + 435\,000 \left( \frac{VFA * VMA}{10\,000} \right) + \frac{1 - P_c}{\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{4\,200\,000} + \frac{VMA}{435\,000 VFA}} \right] \quad (30)$$

Donde:

$$P_c = \frac{\left( 20 + \frac{435\,000(VFA)}{VMA} \right)^{0,58}}{650 + \left( \frac{435\,000(VFA)}{VMA} \right)^{0,58}} \quad (31)$$

$|E^*|_{m\acute{a}x}$ : Límite máximo para el módulo, psi

$VMA$ : Porcentaje de vacíos en el agregado mineral

$VFA$ : Porcentaje de vacíos llenos de asfalto

Los parámetros de ajuste son obtenidos mediante una optimización numérica que puede ser resuelta por la función "Solver" del programa Excel. Se calcula la suma de los errores cuadrados entre el logaritmo de los promedios de los módulos calculados para cada combinación de temperatura-frecuencia y los valores predichos por la ecuación 28. El "Solver" es usado para minimizar la suma de los errores cuadrados por medio de la variación de los parámetros de ajuste de la ecuación 28. Los valores iniciales estimados para estos parámetros son:  $\delta=0,5$   $\beta=-1$ ,  $\gamma=-0,5$  y  $\Delta E_a=200\,000$ .

Se debe realizar una bondad de ajuste estadística calculando la desviación estándar del logaritmo del promedio de los módulos medidos ( $S_y$ ) y el error estándar estimado ( $S_e$ ) de la ecuación 32

$$S_e = \left[ \frac{1}{6} \sum_1^{10} (\log|\hat{E}^*|_i - \log|E^*|_i)^2 \right]^{0,5} \quad (32)$$

Donde:

$S_e$  = Error estándar estimado.

$\log|\hat{E}^*|_i$  = Valor calculado con la ecuación 28 después de la optimización numérica.

$\log|E^*|_i$  = Logaritmo del promedio de los módulos medidos.

Con los resultados anteriores se puede calcular la varianza de la siguiente manera

$$R^2 = 1 - \frac{8S_e^2}{S_y^2} \quad (33)$$

Donde:

$R^2$ : Varianza

$S_e$ : Error estándar estimado de la ecuación

$S_y$ : Desviación estándar del logaritmo del promedio de los módulos

La razón de  $S_e$  entre  $S_y$  debe ser menor que 0,05 mientras que la varianza debe ser mayor que 0,99.

Finalmente, una vez que se cuenta con los valores de los parámetros de ajuste y con el límite máximo del módulo, mediante la ecuación 28 se obtiene la curva maestra para la configuración de temperaturas y frecuencias que se muestra en el Cuadro 9.

**Cuadro 9. Temperaturas y frecuencias para la construcción de las curvas maestras**

|           | <b>Temperatura</b>          | <b>Frecuencias (Hz)</b> |
|-----------|-----------------------------|-------------------------|
| <b>°C</b> | -10, 4.4, 21.1, 37.8 y 54.4 | 25, 10, 5, 1, 0.5 y 0.1 |
| <b>°K</b> | 14, 40, 70, 100 y 130       |                         |

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 EVALUACIÓN DE LAS MEZCLAS

En la selección del porcentaje de asfalto óptimo para la mezcla, se busca primordialmente obtener un 4% de vacíos de aire en los especímenes compactados. Sin embargo no se debe dejar de lado que los demás parámetros volumétricos se encuentren entre los rangos permitidos. Para este caso, luego de realizar la verificación de la selección del porcentaje óptimo de ligante, se obtienen los resultados que se muestran en el Cuadro 10, donde se comparan con los requerimientos que establece el Manual de especificación generales para la construcción de carreteras, caminos puentes y CR-2010 (Anexo A, Figura A7), basados en la metodología Superpave.

**Cuadro 10. Parámetros volumétricos obtenidos para el porcentaje de asfalto óptimo.**

| Parámetros                    | Control |      | Cal  |      | Nanocal |      | Especificación CR-2010 |      |
|-------------------------------|---------|------|------|------|---------|------|------------------------|------|
|                               | 9,5     | 12,5 | 9,5  | 12,5 | 9,5     | 12,5 | 9,5                    | 12,5 |
| <b>PTM (%)</b>                | 6,5     | 7,0  | 6,7  | 6,0  | 6,4     | 5,6  | -                      | -    |
| <b>VMA (%)</b>                | 15,5    | 15,8 | 16,3 | 14   | 15,3    | 13   | >15%                   | >14% |
| <b>VFA (%)</b>                | 73,7    | 74,5 | 74,4 | 71,2 | 72,9    | 68,4 | 65-75                  |      |
| <b>DP</b>                     | 1,0     | 1,1  | 0,9  | 1,3  | 1,0     | 1,5  | 0,8-1,6                |      |
| <b>%G<sub>mm</sub> (N8)</b>   | 86      | 86   | 86   | 85   | 86      | 85   | < 89                   |      |
| <b>%G<sub>mm</sub> (N100)</b> | 96      | 96   | 96   | 96   | 96      | 96   | < 96                   |      |

En general las mezclas de 12,5 mm presentan menores valores de VMA, lo cual evidencia que hay un mejor acomodo entre las partículas del agregado para esta graduación. Dado que se busca mantener constante el porcentaje de vacíos de aire en un 4% para diseño y debido a que el espacio intergranular es menor en las mezclas de 12,5 mm, se da una disminución en los valores de VFA pues se requiere menor asfalto efectivo para llenar los espacios que no son ocupados por aire en el agregado.

En cuanto a los porcentajes de asfalto para las mezclas de 9,5 mm no hay una gran variación al igual que en sus valores de VMA, mientras que para las mezclas de 12,5 mm este porcentaje disminuye con la adición de cal en un 14,3% y se reduce en un 20% con la incorporación de la nanocal. Esta reducción en los porcentajes de asfalto podría traducirse en un ahorro en los costos de producción de estas mezclas. Por otro lado, estas mezclas podrían

presentar problemas de durabilidad si no se tiene una cantidad suficiente de asfalto recubriendo el agregado.

Al comparar los valores obtenidos con los establecidos por las especificaciones, se da un cumplimiento en general para todos los parámetros volumétricos en ambas granulometrías. La única excepción se da para la mezcla de 12,5 mm con nanocal donde el valor de VMA corresponde a un 13%, menor al 14% mínimo establecido. Para poder cumplir con la especificación sería necesario modificar la estructura del agregado, lo que haría que las mezclas estudiadas no sean comparables. Por lo tanto se decidió mantener la mezcla resultante, evaluar su desempeño y determinar si el no cumplimiento del parámetro VMA tiene un impacto negativo.

En el Anexo A se muestran las gráficas elaboradas para la obtención del porcentaje óptimo de asfalto para cada una de las mezclas trabajadas.



### 3.2 RESISTENCIA RETENIDA A LA TENSIÓN DIAMETRAL

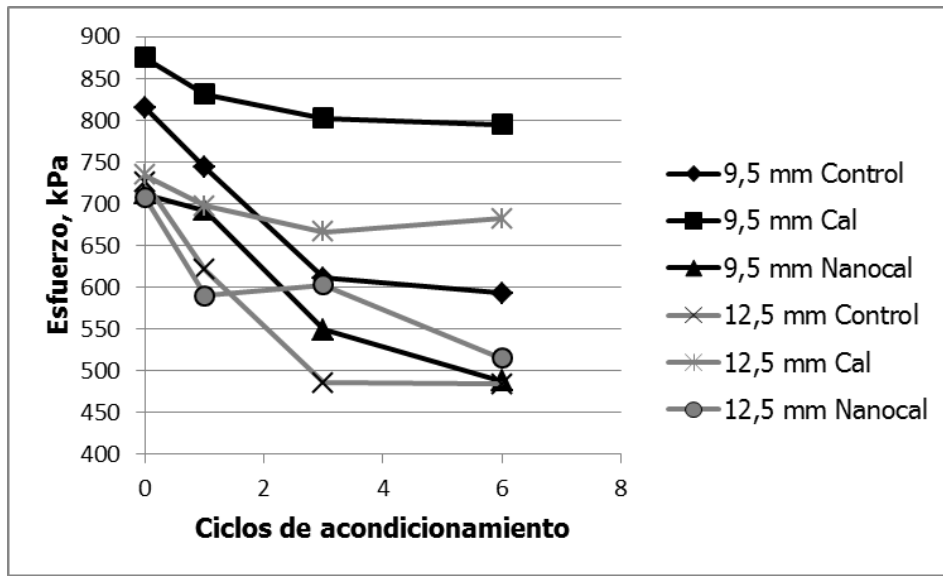
En este ensayo, los valores de esfuerzos a tensión que se obtienen no se relacionan de manera directa con el comportamiento de la mezcla ante el daño por humedad. Para determinar el efecto de la humedad en las mezclas se calculó la resistencia retenida a la tensión diametral (RRTD). Este parámetro al ser una razón que relaciona los esfuerzos a tensión de los especímenes acondicionados entre los secos, permite visualizar el deterioro que ocurre en las mezclas debido a la aplicación de ciclos de acondicionamiento. Razones cercanas a la unidad, es decir valores altos de RRTD, se relacionan con mejores resistencias ante el daño por humedad.

En el Cuadro 11 se resumen los resultados obtenidos para este ensayo, tanto los esfuerzos como las RRTD para cada ciclo de acondicionamiento.

**Cuadro 11. Resultados de esfuerzo y RRTD para cada ciclo de acondicionamiento.**

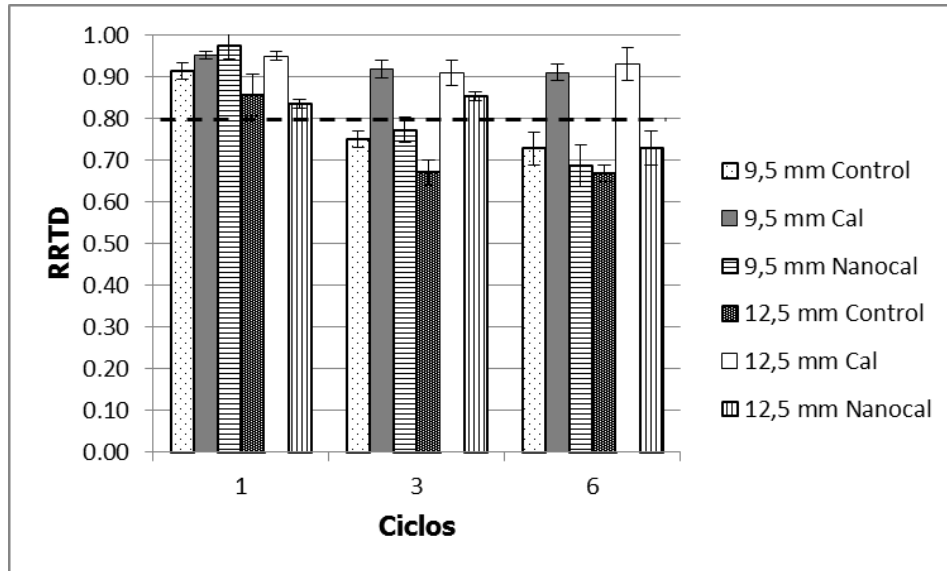
| Parámetro                       | Ciclos | 9,5 mm  |      |         | 12,5 mm |      |         |
|---------------------------------|--------|---------|------|---------|---------|------|---------|
|                                 |        | Control | Cal  | Nanocal | Control | Cal  | Nanocal |
| <b>Esfuerzo a tensión (kPa)</b> | 0      | 815     | 875  | 712     | 726     | 734  | 708     |
|                                 | 1      | 743     | 831  | 692     | 621     | 697  | 590     |
|                                 | 3      | 611     | 802  | 549     | 486     | 666  | 603     |
|                                 | 6      | 593     | 795  | 488     | 484     | 682  | 515     |
| <b>RRTD (%)</b>                 | 1      | 0.91    | 0.95 | 0.97    | 0.86    | 0.95 | 0.83    |
|                                 | 3      | 0.75    | 0.92 | 0.77    | 0.67    | 0.91 | 0.85    |
|                                 | 6      | 0.73    | 0.91 | 0.69    | 0.67    | 0.93 | 0.73    |

Como es de esperarse, según se aprecia en la Figura 20, los esfuerzos a tensión en todas las mezclas disminuyen conforme se aumentan los ciclos de acondicionamiento. Esta reducción deja en evidencia la susceptibilidad de las mezclas ante el efecto de la humedad, sin embargo estos valores no se pueden asociar directamente con un buen o mal desempeño de las mezclas ante la humedad.



**Figura 20.** Esfuerzo a tensión para cada ciclo de acondicionamiento.

Según se establece en el CR-2010, las mezclas bajo diseño Superpave deben tener como mínimo una RRTD de 0,8 (CR-2010, pág 233). Este valor límite se resalta mediante la línea horizontal punteada en la Figura 21. Si se sigue el procedimiento estándar que establece la norma y se aplica un solo ciclo de acondicionamiento a las mezclas, todas superan el criterio mínimo. Si se aumenta a 3 ciclos, únicamente las mezclas a las que se les incorporó un agente antidesnudante se encuentran sobre la razón de 0,80 a excepción de la mezcla de 9,5 mm con nanocal que se ubica ligeramente bajo la línea punteada.



**Figura 21.** RRTD para todas las mezclas y ciclos de acondicionamiento.

Se puede decir que las mezclas sobresalientes son las que contienen cal, al ser las que menor daño sufren debido a la humedad. Para el caso más estricto de 6 ciclos de acondicionamiento solamente las mezclas con cal mantienen casi invariable su valor de RRTD.

### 3.3 RUEDA DE HAMBURGO

Luego de someter los especímenes de cada mezcla al ensayo de RH, se obtienen los resultados que se muestran en el Cuadro 12. De cada corrida del ensayo se tomó el número de pasadas necesarias para que las pastillas alcanzaran la deformación de 20 mm (criterio de falla). Además, se calculó el punto de inflexión al desnudamiento (PID) y se reportó la deformación registrada para cada PID.

**Cuadro 12. Resumen de los resultados del ensayo de Rueda de Hamburgo**

|                | <b>Mezcla</b> | <b>Nº pasadas</b> | <b>PID</b> | <b>Ahuellamiento (mm)</b> | <b>Pendiente de deformación</b> |
|----------------|---------------|-------------------|------------|---------------------------|---------------------------------|
| <b>9,5 mm</b>  | Control       | 15 421            | 9 968      | 8,8                       | -0,0005                         |
|                | Cal           | 30 239            | 23 125     | 7,8                       | -0,0002                         |
|                | Nanocal       | 26 596            | 19 631     | 8,6                       | -0,0002                         |
| <b>12,5 mm</b> | Control       | 39 772            | 24 849     | 7,7                       | -0,0004                         |
|                | Cal           | 40 000            | -          | -                         | -0,0001                         |
|                | Nanocal       | 32 488            | 28 121     | 15,0                      | -0,0002                         |

Al graficar la deformación de cada espécimen contra el número de pasadas para cada mezcla, se obtienen las gráficas que se muestran en la Figura C 1 y la Figura C 2 del Anexo C. De cada gráfico se obtuvo el intercepto y la pendiente de cada tramo recto de las curvas (Cuadro C 1) para poder calcular los puntos de inflexión de desnudamiento (PID) requeridos.

La pendiente del primer tramo recto de cada curva corresponde a la pendiente de deformación, lo cual permite visualizar el potencial de ahuellamiento. Como se puede observar en el Cuadro 12, las mezclas de 9,5 mm Control y 12,5 mm Nanocal son las que presentan las mayores pendientes para este tramo concluyendo en mayores ahuellamientos de 8,8 mm y 15,0 mm respectivamente.

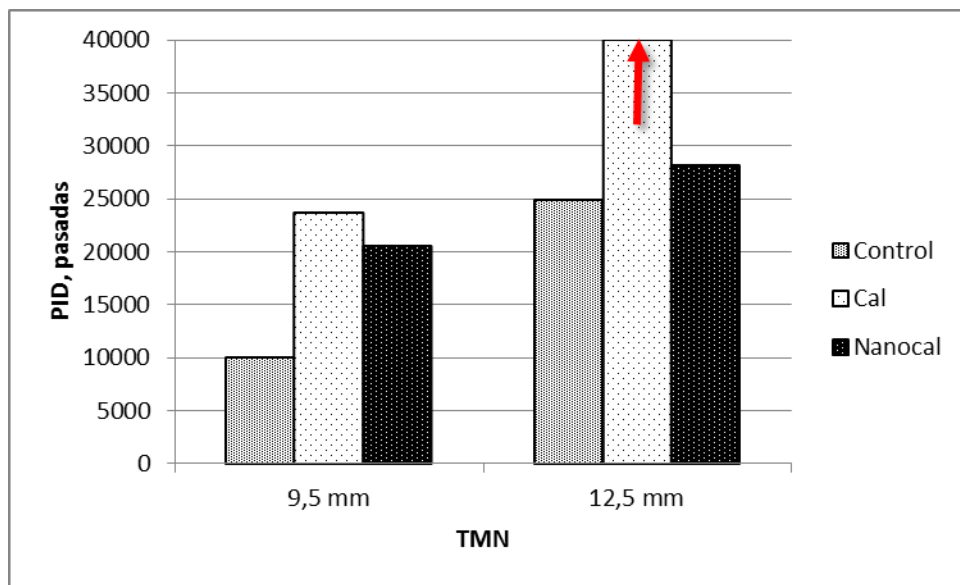
Por otro lado, la pendiente de la recta del segundo tramo de las gráficas indica la pendiente de desnudamiento. Posterior al PID las mezclas han llegado a su máxima tolerancia de ahuellamiento y se empieza a dar desprendimiento del material que compone las mezclas.

Por lo tanto, se buscan mezclas que se ahuelen poco y que presenten un PID alto, lo cual indicaría que soportan una mayor cantidad de pasadas antes de que inicie el desnudamiento de la mezcla. El caso de la mezcla de 12,5 mm con Cal representa un caso ideal donde la

mezcla no llegó a presentar un PID luego de las 40 000 pasadas para las cuales se programó el ensayo, alcanzando una deformación de únicamente 9,0 mm.

En general las mezclas con un TMN de 12,5 mm requieren de mayor número de pasadas para poder alcanzar la deformación de 20 mm y al mismo tiempo presentan PID más elevados. Las mezclas de este tamaño presentan líneas más suavizadas en las gráficas, teniendo una tendencia a no presentar PID, como es el caso de la mezcla de 12,5 mm con cal. Contrario a esto, las mezclas de 9,5 mm presentan curvas con PID bastante marcados.

En la Figura 22 se muestra con mayor claridad las diferencias entre los PID. Se evidencia que al igual que en el ensayo de RRTD, la cal resulta ser más efectiva para mejorar las propiedades de la mezcla asfáltica ante el daño por humedad. Además, con los resultados de este ensayo se observa que en general las mezclas de 12,5 mm son más resistentes.



**Figura 22.** PID para las mezclas ensayadas

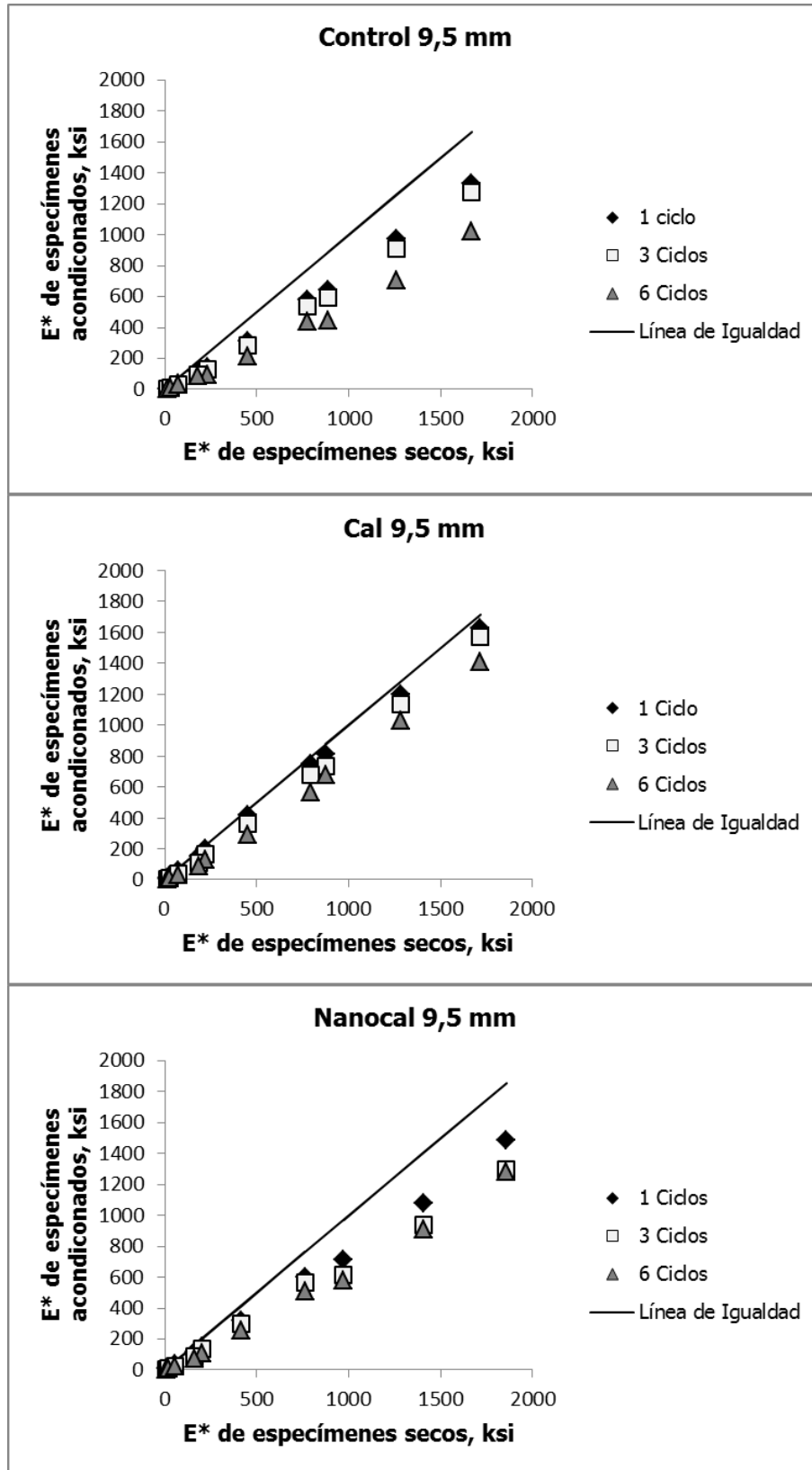
Es probable que las mezclas con un TMN de 9,5 mm presenten mayores problemas de adherencia ante la presencia de agua y sean mezclas menos resistentes. Por lo tanto, con la acción del tráfico se puedan llegar a presentar deterioros como desnudamiento y deformaciones permanentes.

### **3.4 MÓDULO DINÁMICO**

Con los valores de módulo dinámico obtenidos en este ensayo, para cada una de las mezclas por separado, se calculó un promedio para cada frecuencia de carga aplicada, según los ciclos de acondicionamiento. Estos resultados se encuentran tabulados en el Cuadro D 1, Cuadro D 2 y Cuadro D 3 del Anexo D. Al graficar los promedios de los especímenes acondicionados contra los de especímenes secos se obtienen las gráficas de la Figura 23 y la Figura 24. Estas gráficas muestran una línea de igualdad, la cual representa una condición ideal donde los valores de los  $E^*$  obtenidos en condición seca son iguales a los  $E^*$  obtenidos de especímenes acondicionados, es decir que los valores que se ubiquen sobre esta línea no habrán experimentado un deterioro ante la aplicación de ciclos de acondicionamiento. Por lo tanto, los valores que se aproximan más a esta línea indican una mayor resistencia ante el daño por humedad. Como se puede ver en estas dos figuras, en general existe una tendencia a disminuir los valores de  $E^*$  para todas las mezclas conforme se incrementan los ciclos de acondicionamiento, es decir, que efectivamente hay una susceptibilidad a la humedad.

Para las mezclas con un tamaño máximo nominal de 9,5 mm, según se observa en la Figura 23, se evidencia que el adicionar un agente antidesnudante incrementa los valores de módulo para todos los ciclos de acondicionamiento. Al comparar las mezclas de control con las de cal y nanocal, las primeras muestran puntos más alejados de la línea de igualdad, lo que indica una mayor afectación. El efecto de la humedad es más pronunciado (los valores se alejan de la línea de igualdad) conforme aumenta el número de ciclos de acondicionamiento, sin embargo, se observa que en general el mayor deterioro ocurre luego de aplicar el primer ciclo.

Por otro lado, para las mezclas con un tamaño máximo nominal de 12,5 mm que se muestran en la Figura 24, la incorporación de cal y nanocal no provoca un efecto tan evidente para los casos con un ciclo de acondicionamiento. Sin embargo, conforme se aumenta el deterioro al incrementar los ciclos, los valores para la mezcla de control tienden a disminuir por lo que se alejan de la línea de igualdad y es en estos casos cuando la cal y la nanocal ayudan a incrementar los valores de  $E^*$ . Nuevamente en este caso las mezclas con cal parecen ser las que presentan el mejor comportamiento.



**Figura 23.** E\* medido para las mezclas de 9,5 mm

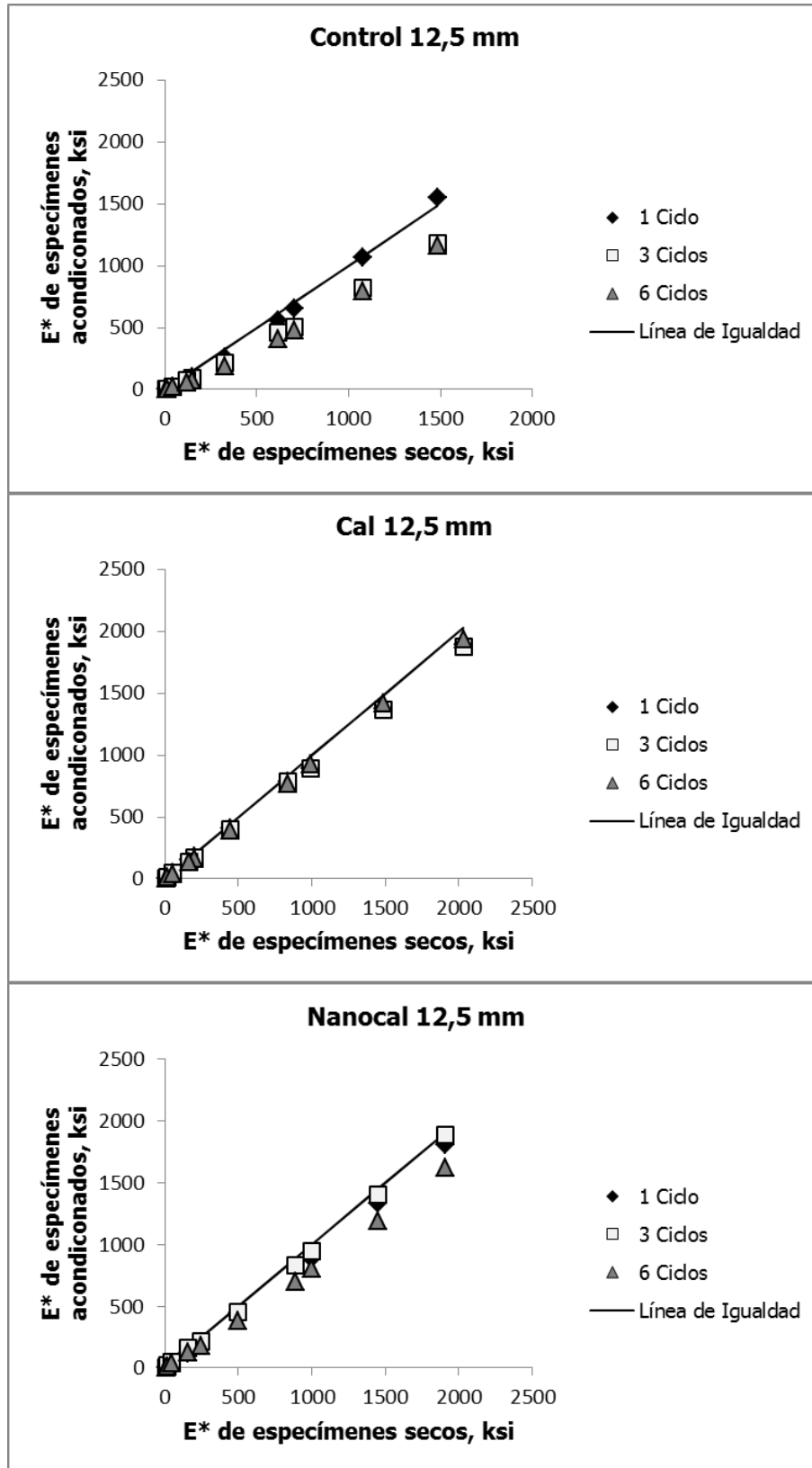


Figura 24. E\* medido para las mezclas de 12,5 mm



Para una mejor visualización de los resultados se calculó un promedio de las razones de los valores de módulo dinámico (RE) de los especímenes acondicionados entre los secos. Estos promedios consideran todas las frecuencias de carga aplicada y temperaturas durante el ensayo haciendo diferenciación entre mezclas y ciclos de acondicionamiento. Las mezclas que presentan razones cercanas a la unidad son las que han sufrido un menor deterioro en su valor de  $E^*$ .

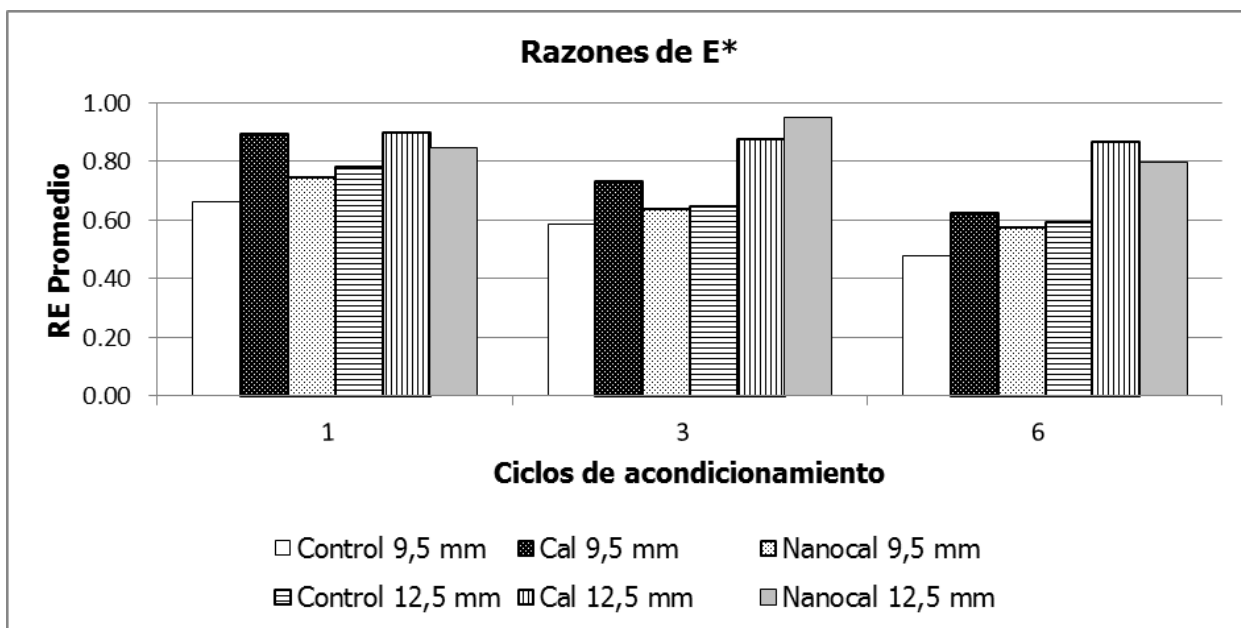
En el Cuadro 13 se muestran las RE promedio para cada una de las mezclas y ciclos de acondicionamiento. Dichos valores se grafican en la Figura 25.

**Cuadro 13. RE promedio.**

| Ciclos   | 9,5 mm  |      |         | 12,5 mm |      |         |
|----------|---------|------|---------|---------|------|---------|
|          | Control | Cal  | Nanocal | Control | Cal  | Nanocal |
| <b>1</b> | 0,66    | 0,90 | 0,75    | 0,79    | 0,90 | 0,85    |
| <b>3</b> | 0,59    | 0,74 | 0,64    | 0,65    | 0,88 | 0,95    |
| <b>6</b> | 0,48    | 0,63 | 0,58    | 0,59    | 0,87 | 0,80    |

Según se vio anteriormente en la Figura 23 y la Figura 24, las mezclas con la incorporación de un agente antidesnudante se mantenían más cerca de la línea de igualdad indicando una menor caída del módulo conforme se incrementa el daño por humedad. Complementariamente en la Figura 25, para las dos granulometrías, se puede observar que estas mezclas con cal y nanocal también presentan mayores valores de RE al compararlas con las mezclas de control. Es importante notar que las mezclas de 12,5 mm con cal y con nanocal son las que presentan las razones más cercanas a la unidad aun cuando se incrementan los ciclos de acondicionamiento.

Si se toma la razón de 0,80 como valor de aceptación, las mezclas de 9,5 mm incumplen casi que en su mayoría, sin importar la incorporación de un agente antidesnudante, con la excepción de la mezcla con cal para un ciclo de acondicionamiento. Sin embargo, los resultados de esta mezcla decaen muy por debajo de este valor al aumentar los ciclos. Desde esta perspectiva, las mezclas de 12,5 mm con cal y nanocal se mantienen cumpliendo incluso para los 6 ciclos de acondicionamiento.



**Figura 25.** RE promedio para cada temperatura de ensayo

Para determinar si las diferencias entre los resultados obtenidos son significativas, se realizó un análisis estadístico de la varianza de las medias (ANOVA) el cual se resume en el

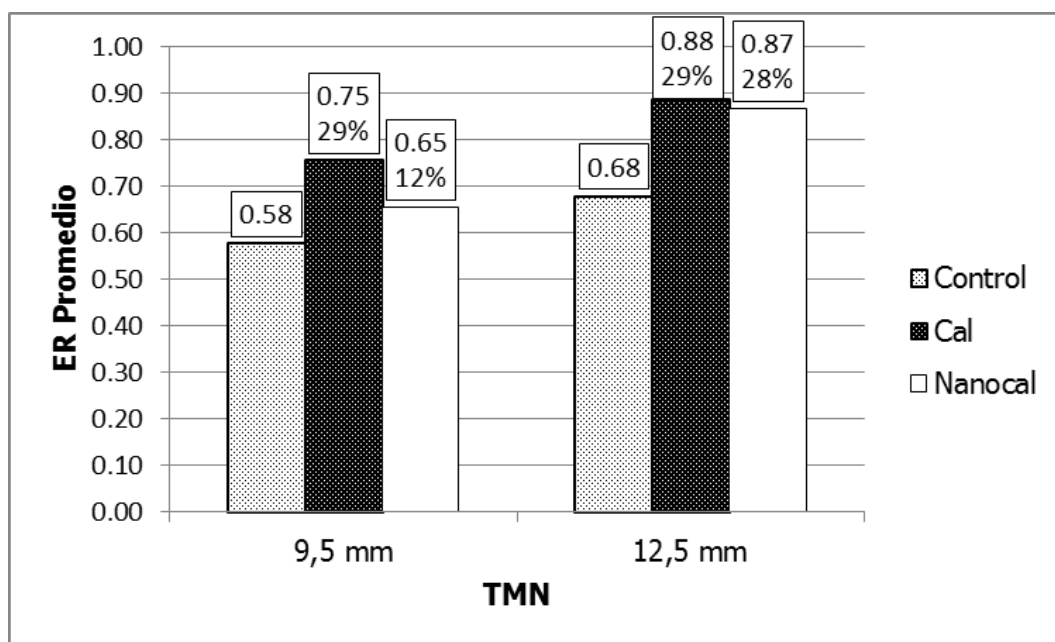
Cuadro **14**. Con esto se busca comprobar si los factores como el tamaño del agregado, la incorporación de un agente antidesnudante (AAD) o los ciclos de acondicionamiento influyen verdaderamente en los resultados de este ensayo.

**Cuadro 14. ANOVA para los valores de RE**

| Fuente                | Suma de Cuadrados | Estadístico F | Valor P | Contribución % | Significativo |
|-----------------------|-------------------|---------------|---------|----------------|---------------|
| <b>TMN</b>            | 1,04              | 89,57         | 0,00    | 20             | Si            |
| <b>CICLOS</b>         | 0,67              | 29,05         | 0,00    | 13             | Si            |
| <b>AAD</b>            | 1,24              | 53,55         | 0,00    | 23             | Si            |
| <b>TMN*CICLOS</b>     | 0,14              | 6,19          | 0,00    | 3              | Si            |
| <b>TMN*AAD</b>        | 0,11              | 4,71          | 0,01    | 2              | Si            |
| <b>CICLOS*AAD</b>     | 0,08              | 1,64          | 0,17    | 1              | No            |
| <b>TMN*CICLOS*AAD</b> | 0,15              | 3,2           | 0,02    | 3              | Si            |
| <b>Error</b>          | 1,88              |               |         |                |               |
| <b>Total</b>          | 5,32              |               |         |                |               |

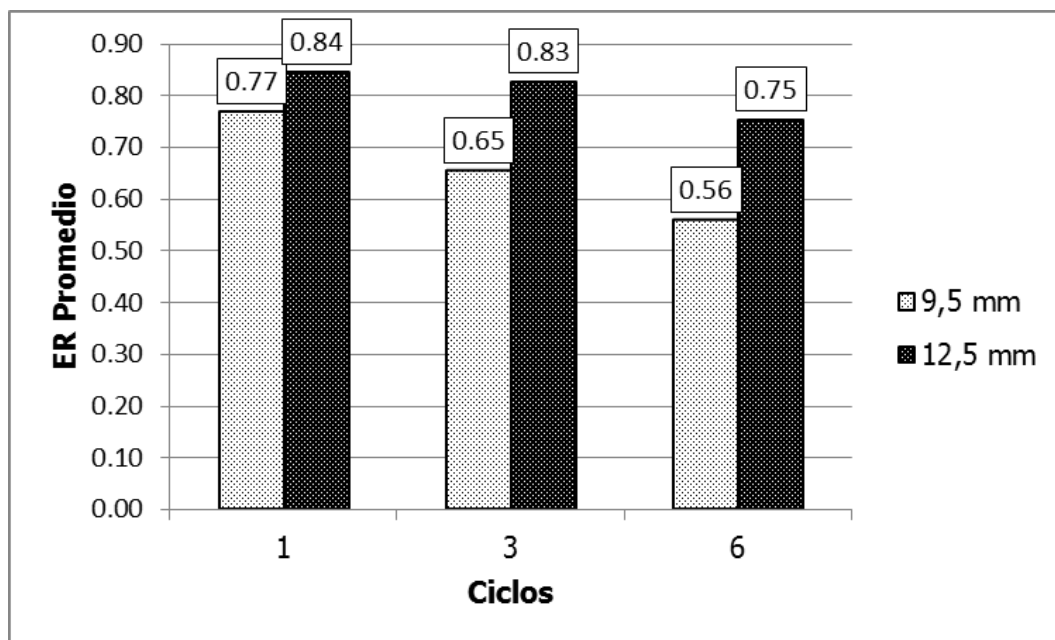
Según el ANOVA aplicado, para un nivel de significancia de 0,05 y tomando todos los resultados del ensayo, los tres factores principales tienen un efecto significativo en los valores de RE. Además, la interacción entre todos estos factores genera también cambios significativos, a excepción de la interacción entre los ciclos de acondicionamiento y la incorporación de un AAD.

En la Figura 26 se puede observar como efectivamente la incorporación de un AAD mejora los valores promedio de las RE. Los casos más sobresalientes son las mezclas de 9,5 mm con cal y las de 12,5 mm con cal y nanocal donde el porcentaje de mejora es cercano al 30%. Esto permite inferir que la cal produce efectos en ambas granulometrías mientras que la nanocal tiene un mayor efecto en las mezclas con un TMN de 12,5 mm.



**Figura 26.** Efecto de la incorporación de un AAD según TMN

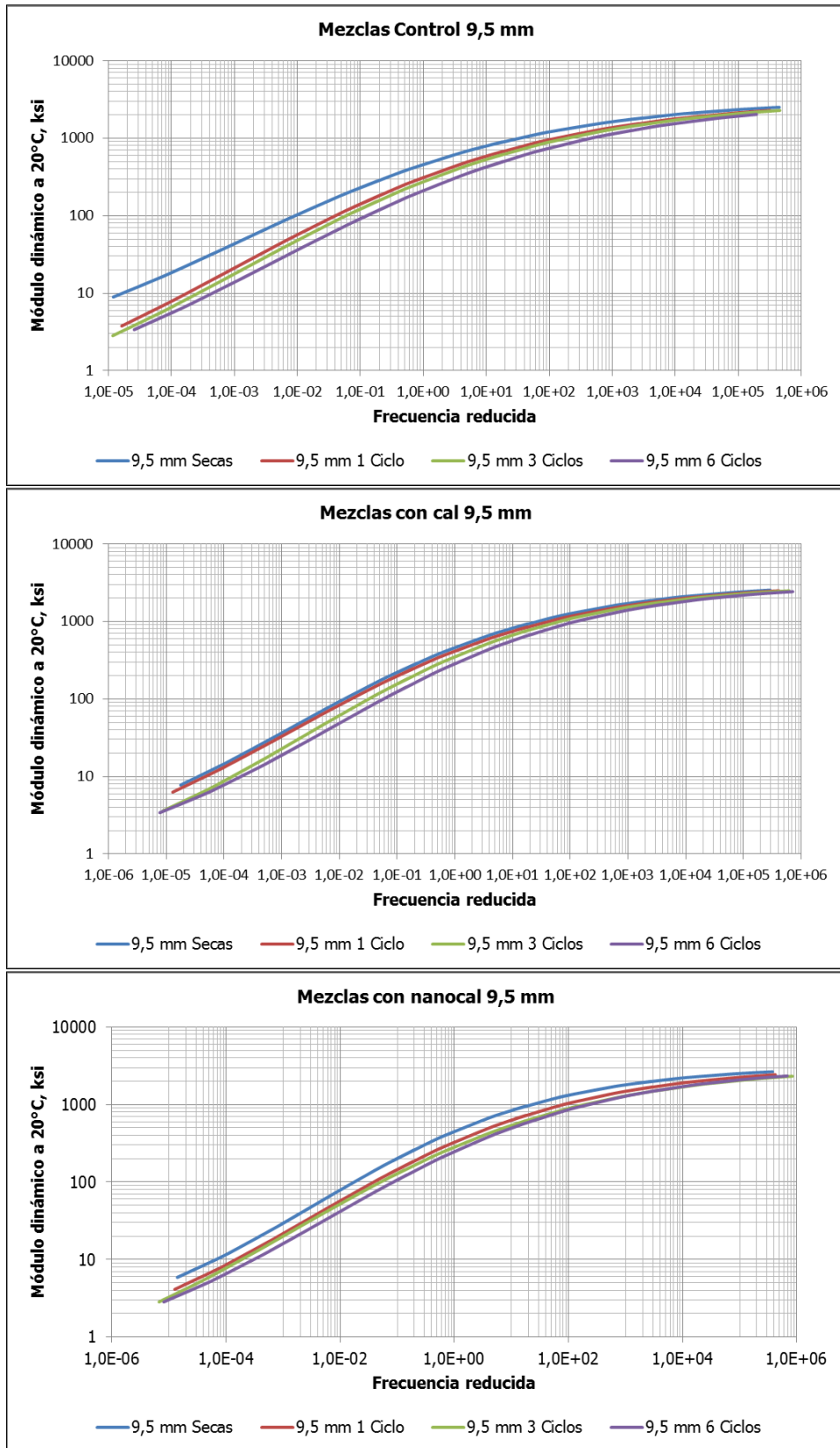
En la Figura 27 se observa el efecto de la interacción entre el TMN y los ciclos. Para las mezclas con un TMN de 9,5 mm la disminución de las razones decae de manera significativa con el incremento de los ciclos de acondicionamiento mientras que para las mezclas de 12,5 disminuye muy poco tal y como se vio en la Figura 24.



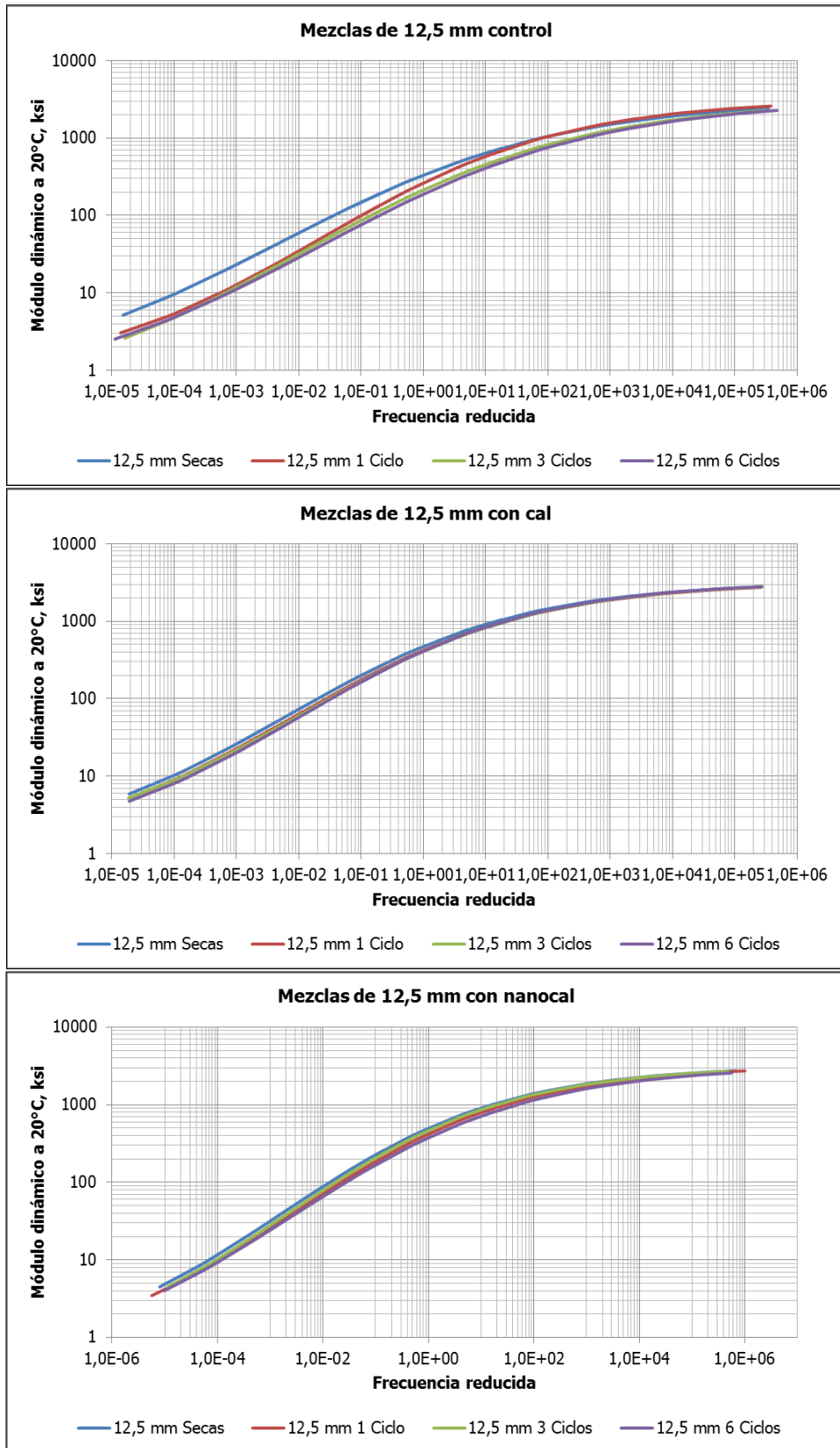
**Figura 27.** Efecto de los ciclos de acondicionamiento según el TMN

La finalidad de este ensayo es obtener las curvas maestras que pueden ser empleadas para evaluar la mezcla y caracterizar el módulo dinámico para un diseño de pavimento empírico-mecanicista. Mediante el procesamiento de los datos obtenidos en este ensayo, según se explicó en la sección 3.5 del capítulo 3, se fabricaron las curvas maestras que se muestran en la Figura 28 y la Figura 29. Las curvas fueron confeccionadas para cada ciclo de acondicionamiento, incluyendo la condición seca y se agruparon en las gráficas según el tipo de mezcla. Los resultados procesados de  $E^*$  calculados a la temperatura de referencia de 20°C a partir de las frecuencias reducidas que fueron empleadas para la fabricación de dichas curvas, se encuentran tabulados en el Cuadro D 4, el Cuadro D 5, el Cuadro D 6 y el Cuadro D 7 del Anexo D.

De las curvas maestras se puede observar que en general, el módulo dinámico disminuye al aplicar ciclos de acondicionamiento, y que dicha reducción es más pronunciada para valores bajos de frecuencia reducida (asociados a temperaturas altas y frecuencias bajas). Esto sugiere que las mezclas son más susceptibles al daño por humedad bajo estas condiciones.



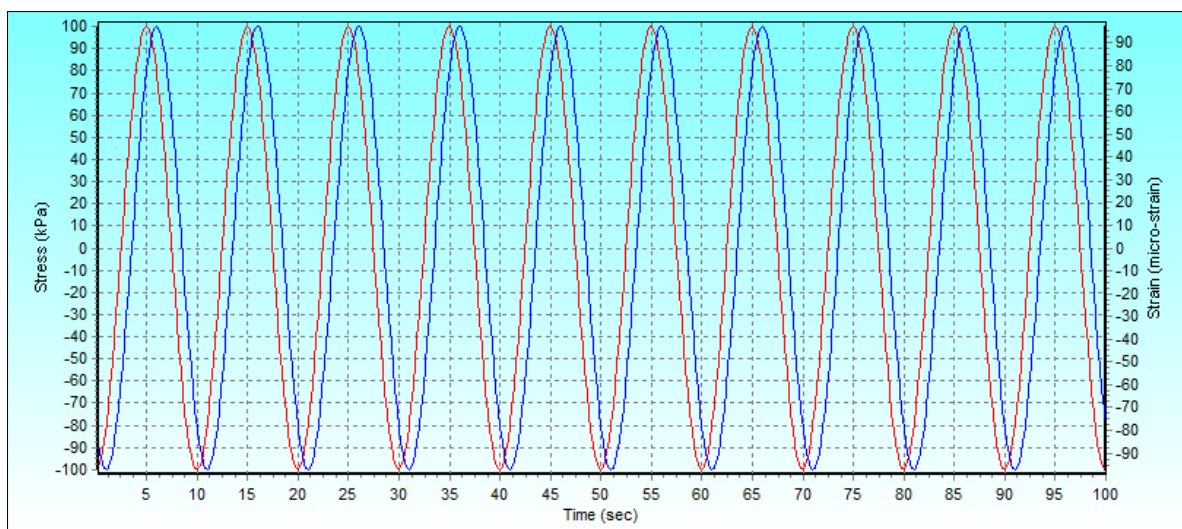
**Figura 28.** Curvas maestras obtenidas para las mezclas de 9,5 mm



**Figura 29.** Curvas maestras obtenidas para las mezclas de 12,5 mm

Con el ensayo de MD se evidencia el comportamiento viscoelástico del material al observar las gráficas de esfuerzo-deformación que arroja el software del equipo AMPT durante la realización del ensayo. Un ejemplo de estas gráficas se observa en la Figura 30, donde las líneas rojas representan el esfuerzo sinusoidal aplicado y las azules la deformación. Se puede observar un desfase entre ambas gráficas, lo que demuestra que la respuesta del material ante la carga aplicada no es inmediata.

Los resultados completos de los ángulos de fase promedio medidos en este ensayo para cada mezcla, están tabulados en los Cuadros D1, D2 y D3 del Anexo D.



**Figura 30.** Desfase entre el esfuerzo aplicado y la deformación de la mezcla

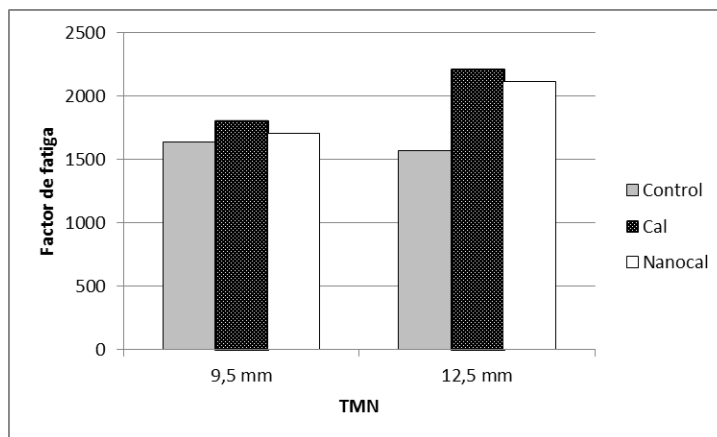
### 3.5 FACTOR DE FATIGA

Mediante el ángulo de fase y el módulo dinámico en MPa es posible evaluar la resistencia al agrietamiento por fatiga en las mezclas (Vargas, Aguiar, Leiva y Loría, 2015) mediante el uso del factor de fatiga  $E^* \sin \phi$ . Ambos valores son medidos a una frecuencia de 10 Hz y a una temperatura de 20°C para simular las condiciones de operación que propician este tipo de falla. Los valores empleados para el cálculo del factor de fatiga se muestran en el Cuadro 15.

**Cuadro 15.** Valores empleados para el cálculo del factor de fatiga.

| Mezcla  | TMN     | Parámetros |                | Factor de fatiga |
|---------|---------|------------|----------------|------------------|
|         |         | E* (Mpa)   | Ángulo de fase |                  |
| Control | 9,5 mm  | 4009       | 24             | 1633             |
|         | 12,5 mm | 3515       | 27             | 1570             |
| Cal     | 9,5 mm  | 4792       | 22             | 1807             |
|         | 12,5 mm | 5473       | 24             | 2212             |
| Nanocal | 9,5 mm  | 4211       | 24             | 1701             |
|         | 12,5 mm | 5571       | 22             | 2109             |

Los valores menores de  $E^* \sin \phi$  indican un mejor desempeño por lo que las mezclas de control para ambos TMN parecieran ser más resistentes al agrietamiento. Este resultado es esperado ya que los incrementos en los valores de  $E^*$  analizados anteriormente para las mezclas que contienen cal y nanocal, indican un incremento en la rigidez. Las mezclas de 12,5mm con cal y nanocal, aunque son más resistentes ante el daño por humedad, al ser más rígidas podrían ser más susceptibles al agrietamiento por fatiga., tal y como se ve en la Figura 31. El contenido de asfalto también es influyente ya que las mezclas de 9,5 mm tienen más asfalto que las mezclas de 12,5 mm por lo que presentar mayor flexibilidad.



**Figura 31.** Factor de fatiga a 20°C y 10 Hz.



### 3.6 COMPARACIÓN DE ENSAYOS

Con cada uno de los ensayos realizados se obtienen parámetros mecánicos y de desempeño distintos que permiten caracterizar las mezclas en cuanto a resistencia al daño por humedad propiamente. Hoy en día no se ha logrado desarrollar un solo ensayo que reúna todos los parámetros necesarios para poder predecir de manera adecuada el comportamiento de las mezclas en campo. Por lo tanto es necesaria la realización de varias pruebas para obtener diseños eficientes de mezcla asfáltica.

Para poder comparar los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos, se optó por calcular valores promedios de los parámetros relevantes de cada ensayo. El Cuadro 16 resume los estos valores con los cuales se puntúa cada una de las mezclas con un número del 1 al 6, donde el 6 corresponde al puntaje más alto y el 1 al menor. En los ensayos de tensión diametral y módulo dinámico, se asignaron los puntos según tuvieran los mayores valores de RRTD y RE. Para el caso del ensayo de Rueda de Hamburgo se tomó en cuenta tanto la pendiente de ahuellamiento como el PID, donde se buscaban pendientes bajas con PID altos.

**Cuadro 16.** Comparación del promedio de los resultados obtenidos en todos los ensayos.

| Ensayo                   | Parámetro                | Mezclas       |         |             |              |          |              |
|--------------------------|--------------------------|---------------|---------|-------------|--------------|----------|--------------|
|                          |                          | 9,5 Control   | 9,5 Cal | 9,5 Nanocal | 12,5 Control | 12,5 Cal | 12,5 Nanocal |
| <b>Tensión Diametral</b> | RRTD                     | 0,80          | 0,92    | 0,81        | 0,73         | 0,93     | 0,80         |
|                          | <b>Rueda de Hamburgo</b> | Ahuellamiento | -0,0005 | -0,0002     | -0,0002      | -0,0004  | -0,0001      |
| PID                      |                          | 9968          | 23125   | 19631       | 24849        | -        | 28121        |
| <b>Módulo Dinámico</b>   | RE                       | 0,58          | 0,75    | 0,65        | 0,68         | 0,88     | 0,87         |

Las calificaciones obtenidas se muestran en el Cuadro 17, donde se puede ver que las dos mayores puntuaciones fueron para las mezclas que contienen cal y nanocal con 12,5 mm, seguidas de la mezcla de 9,5 mm con cal. Es evidente que el mejor agente antidesnudante es la cal. Por otro lado, las mezclas que contienen nanocal prácticamente duplican el puntaje de las mezclas de control, si tomamos en cuenta que estas mezclas requieren de menor porcentaje de asfalto, podrían considerarse como una alternativa económica que igualmente mejora la resistencia de las mezclas ante el daño por humedad.

**Cuadro 17.** Puntuación de las mezclas para cada ensayo realizado.

| Ensayo                   | Parámetro     | Mezclas        |            |                |                 |             |                 |
|--------------------------|---------------|----------------|------------|----------------|-----------------|-------------|-----------------|
|                          |               | 9,5<br>Control | 9,5<br>Cal | 9,5<br>Nanocal | 12,5<br>Control | 12,5<br>Cal | 12,5<br>Nanocal |
| <b>Tensión Diametral</b> | RRTD          | 2              | 5          | 4              | 1               | 6           | 3               |
| <b>Rueda de Hamburgo</b> | Ahuellamiento | 1              | 4          | 3              | 2               | 6           | 5               |
|                          | PID           | 1              | 3          | 2              | 4               | 6           | 5               |
| <b>Módulo Dinámico</b>   | RE            | 1              | 4          | 2              | 3               | 6           | 5               |
| <b>Total de puntos</b>   |               | <b>5</b>       | <b>16</b>  | <b>11</b>      | <b>10</b>       | <b>24</b>   | <b>18</b>       |

Comparando las puntuaciones por ensayo, los puntajes asignados en MD y RH son bastantes similares entre sí, mientras que los puntajes de RRTD difieren de los primeros. Parece ser que MD y RH son ensayos más adecuados para predecir el comportamiento de una mezcla ante el daño por humedad que el ensayo de RRTD.

Cada uno de estos procedimientos posee ventajas y desventajas que facilitan o entorpecen la ejecución de la prueba y el procesamiento de la información. A continuación se detallan dichos aspectos para cada uno de los tres ensayos ejecutados:

**Resistencia Retenida a la Tensión Diametral:** Actualmente es el ensayo de mayor aplicación por ser sencillo, rápido de ejecutar y conlleva especímenes de fácil elaboración. Sin embargo, el estado de esfuerzos que se genera durante el ensayo es complicado y no es una representación realista del estado de esfuerzos que se genera para la estructura completa del pavimento. Durante la aplicación de la carga, la distribución de esfuerzos que se genera en el centro del espécimen no es uniforme. El esfuerzo a tensión horizontal en el centro del espécimen es un tercio del esfuerzo vertical de compresión en el mismo punto. Por lo tanto, si la resistencia a compresión del material es 3 veces menor que la resistencia a tensión el espécimen puede fallar por compresión (Huang B, Shu X, and Tang Y, 2005).

**Rueda de Hamburgo:** Desde el punto de vista estructural, la resistencia a las deformaciones permanentes es una de las propiedades mecánicas más importantes. Los ensayos de rueda cargada, a pesar de estar normalizados, tienen la desventaja que existen muchos diseños de equipos diferentes y que por lo tanto no es factible comparar la magnitud del ahuellamiento entre ellos. Sus resultados permiten para un equipo determinado establecer una clasificación de las mezclas respecto al comportamiento a la deformación permanente. Una vez **calibrados pueden operar bajo el tipo "pasa"- "no pasa"**. Por lo tanto,

cabe resaltar que la desventaja más importante al presente es que no permite predecir el ahuellamiento que se va a predecir en una determinada capa de mezcla asfáltica a lo largo del tiempo. Una de sus ventajas es que permite evaluar dos muestras simultáneamente mediante dos ruedas paralelas que funcionan de manera sincronizada pero de manera independiente una de la otra. Además, este ensayo al realizarse con los especímenes sumergidos en agua a una temperatura especificada, simula y acelera el deterioro de los especímenes sin necesidad de aplicar ciclos de acondicionamiento lo cual permite obtener resultados de una manera pronta.

**Módulo Dinámico:** La ventaja de este ensayo es que se puede aplicar a diferentes temperaturas y frecuencias de carga y dado que las mezclas asfálticas son materiales viscoelásticos que dependen de estas condiciones, los resultados podrían considerarse bastante realistas. Este ensayo ha sido extensamente usado debido a que se aplica un estado uniforme de tensiones sobre la probeta y además no es destructivo. Sin embargo, el equipo es un poco más complejo que el utilizado en RRTD y en RH y el posterior procesamiento de los resultados es mucho más complejo. En cuanto a la fabricación de especímenes es un poco más complicado obtenerlos ya que tienen que extraerse los núcleos de las pastillas compactadas y posteriormente pulir las caras.

## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES**

Este trabajo evaluó la resistencia al daño por humedad para mezclas asfálticas en caliente que incorporan cal y nanocal. Las siguientes conclusiones fueron encontradas:

Al incorporar cal a las mezclas, se disminuyen los porcentajes de asfalto óptimo requeridos y la reducción es todavía mayor al incorporar nanocal. Por lo tanto, se puede inferir que este agente antidesnudante permite abaratar costos en la fabricación de la mezclas al utilizar menos asfalto, manteniendo un nivel de resistencia al daño por humedad igual o mayor al de las mezclas de control.

Las mezclas de 12,5 mm con cal y nanocal presentan los mejores resultados en todos los parámetros evaluados en los tres ensayos. Estas mezclas demostraron ser la mejor alternativa de resistencia ante el daño por humedad, liderando la mezcla de 12,5 mm con cal. Estas mezclas no solo presentan mejores resistencias retenidas sino que además presentaron un incremento en los valores de módulo lo que resulta en mezclas más rígidas. Con la realización del ensayo de Rueda de Hamburgo se demuestra que estas mezclas más rígidas presentan un potencial al ahuellamiento menor y que al mismo tiempo son más resistentes al desnudamiento. Sin embargo, un incremento en la rigidez podría representar una mayor susceptibilidad al agrietamiento según se determinó con el cálculo de los factores de fatiga.

Los resultados de los ensayos realizados a las mezclas en estudio, coinciden en que efectivamente los especímenes presentan un mayor deterioro luego de ser sometidos a los ciclos de acondicionamiento. Esto ocurre en general para todas las mezclas sin importar si contienen o no cal o nanocal demostrando la susceptibilidad del material a la humedad. Lo que cambia, es el nivel de deterioro según sea una mezcla con agente antidesnudante o de control y al mismo tiempo el tamaño del agregado es un factor a considerar.

Los ensayos de Módulo Dinámico y Rueda de Hamburgo coinciden en su clasificación de mejores y peores mezclas, mientras que el ensayo de Tensión Diametral difiere un poco más. Lo anterior permite inferir que este ensayo no es el más adecuado para evaluar el daño por humedad en mezclas asfálticas en caliente, sin embargo es el más utilizado actualmente en el país.

La cal es una alternativa que ofrece tanto beneficios ecológicos, como económicos para mejorar el desempeño de las mezclas, en especial para las zonas con altos contenidos de humedad natural, creando un material duradero y resistente. Con la aplicación de los cambios necesarios en la producción de cal nacional, debería ser considerada como una alternativa rentable para la aplicación en las vías nacionales.

## **CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES**

Es necesario conocer más a fondo las propiedades de la cal nacional con el fin de evaluar la calidad de la materia prima. La implementación de un adecuado control de calidad en el proceso de producción podría dar como resultado una mejor calidad química del producto. Así mismo, permitiría la aplicación de cambios que sean rentables y maximicen la producción. También se puede ampliar el estudio de rocas calizas provenientes de otras fuentes del país con la finalidad de analizar el efecto que tiene el origen geológico de la cal sobre las propiedades físicas y químicas.

Según se vio en algunos de los resultados, al incrementar el deterioro en las mezclas el efecto de la cal y la nanocal se hace más evidente, por lo tanto se puede incrementar la cantidad de ciclos de acondicionamiento para determinar hasta qué punto este material deja de ser efectivo.

Este trabajo podría ser repetido empleando otras fuentes de agregados con el fin de determinar la influencia del mismo en las mezclas. La procedencia del agregado puede variar sus características químicas dependiendo de su proceso de formación y composición influyendo en aspectos como la afinidad con el tipo de asfalto empleado en Costa Rica. Así mismo, se pueden implementar otros métodos de incorporación de cal a la mezcla e innovar procedimientos para su molienda donde se logre reducir aún más el tamaño de las partículas. El contenido de cal y nanocal también puede ser un factor que altere las propiedades de las mezclas y mejore su desempeño ante la humedad por lo que se recomienda probar la modificación de este porcentaje. Por otro lado, la cal funciona bien como aditivo tanto sola como en conjunto con otros polímeros, por lo que se podrían modificar las mezclas adicionando otros componentes además de la cal para evaluar la efectividad de la combinación.

Finalmente se recomienda realizar un análisis económico para determinar la disminución de los costos en la fabricación de la mezcla debido a la reducción del porcentaje de asfalto al incorporar cal y nanocal.

## **CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA**

AASHTO Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. **“Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage.”** Designación AASHTO: T283-07. Washington, D.C., 31st edition, 2011a.

AASHTO Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. **“Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA).”** Designación AASHTO: T324-11. AASHTO, Washington, D.C., 31st edition, 2011b.

AASHTO Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. **“Standard Method of Test for** Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT).” Designación AASHTO: TP 79-12. AASHTO, Washington, D.C., 31st edition, 2011b.

Aguiar, J. Leiva, F. Salazar, J. Baldi, A. Villegas, E. Loría, L. (2014) Estudio físico-químico de adhesión asfalto-agregado. San José, Costa Rica.

Angelone, S. Martinez, F. Santamaría, E. Gavilán, E. y Cauhapé, M. (2006) Deformación Permanente de Mezclas Asfálticas. Universidad Nacional de Rosario. Argentina.

**ASTM International Standards.** **“Standard** Specification for Hydrated Lime for use in Asphalt cement or Bituminous Paving Mixtures,” Designación ASTM: C1097-13. ASTM International, West Conshohocken, PA 19428-2959, 2014.

Badilla Vargas, G., Ávila Esquivel, T., Salazar Delgado, J., Loría Salazar, L. G., & Navas Carro, A. (2013). Caracterización Físico-Química de Materiales de Origen Calizo para su Uso en Estructuras de Pavimentos de Costa Rica. Resumen, LannammeUCR, PITRA, San Pedro.

- Caro, S. Masad, E. Bhasin, A. y Little, D. (2008) Moisture susceptibility of asphalt mixture, Part 2: characterisation and modelling. International Journal of Pavement Engineering Vol 9, N° 2.
- Cheng, J. Shen, J. Xiao, F. (2011). Moisture Susceptibility of Warm-Mix Asphalt Mixtures Containing Nanosized Hydrated Lime. Journal of Materials in Civil Engineering Vol 23, N° 11.
- Dallas, N. Jon, A. y Peter E. (2006). The Benefits of Hydrated lime in hot mix asphalt. Arlington, Virginia, Estados Unidos: National Lime Association.
- Diab, A. You, Z. y Wang, H. (2013). Rheological Evaluation of Foamed WMA Modified with Nano Hydrated Lime. Recuperado de:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042813024440>.
- EuLA. (2011) Cal Hidratada: Un aditivo probado para la durabilidad de los pavimentos asfálticos. Madrid, España: European Lime Association.
- Garrote, V. (2006) Efecto de la temperatura en la tenacidad de diferentes mezclas bituminosas. Universidad politécnica de Catalunya. Barcelona, España.
- LanammeUCR. (2013). Informe de ensayo N° I-1158-13. San José, Costa Rica. 2013.
- LanammeUCR. (2014). CILA 2013: Estado del arte en caracterización de asfalto y mezcla asfáltica [Archivo de video]. Recuperado de  
<http://www.youtube.com/watch?v=75RFx0i1LS4>.
- LanammeUCR. (2014). Informe de ensayo N° I-0642-14. San José, Costa Rica. 2014.
- Leiva, F. Vargas, A. Jiménez, M. Daño por humedad en mezclas asfálticas. Unidad de Materiales y Pavimentos. San José, Costa Rica. 2014.
- Ministerio de Obras Públicas y Transporte. Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR 2010). Costa Rica.



Moreira, L. (2002). Modificación de ligantes asfálticos: aspectos generales. Extraído el 13 de julio de 2014 de <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/autores/moreira/2002-moreira-02.pdf>

Transportation Research Board of the National Academies (2003, Febrero). Moisture sensitivity Asphalt Pavements. En: Seminario Nacional. San Diego, California.

LanammeUCR. (2013). Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica, Años 2012-2013 (Primera Edición ed.). Montes de Oca, San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

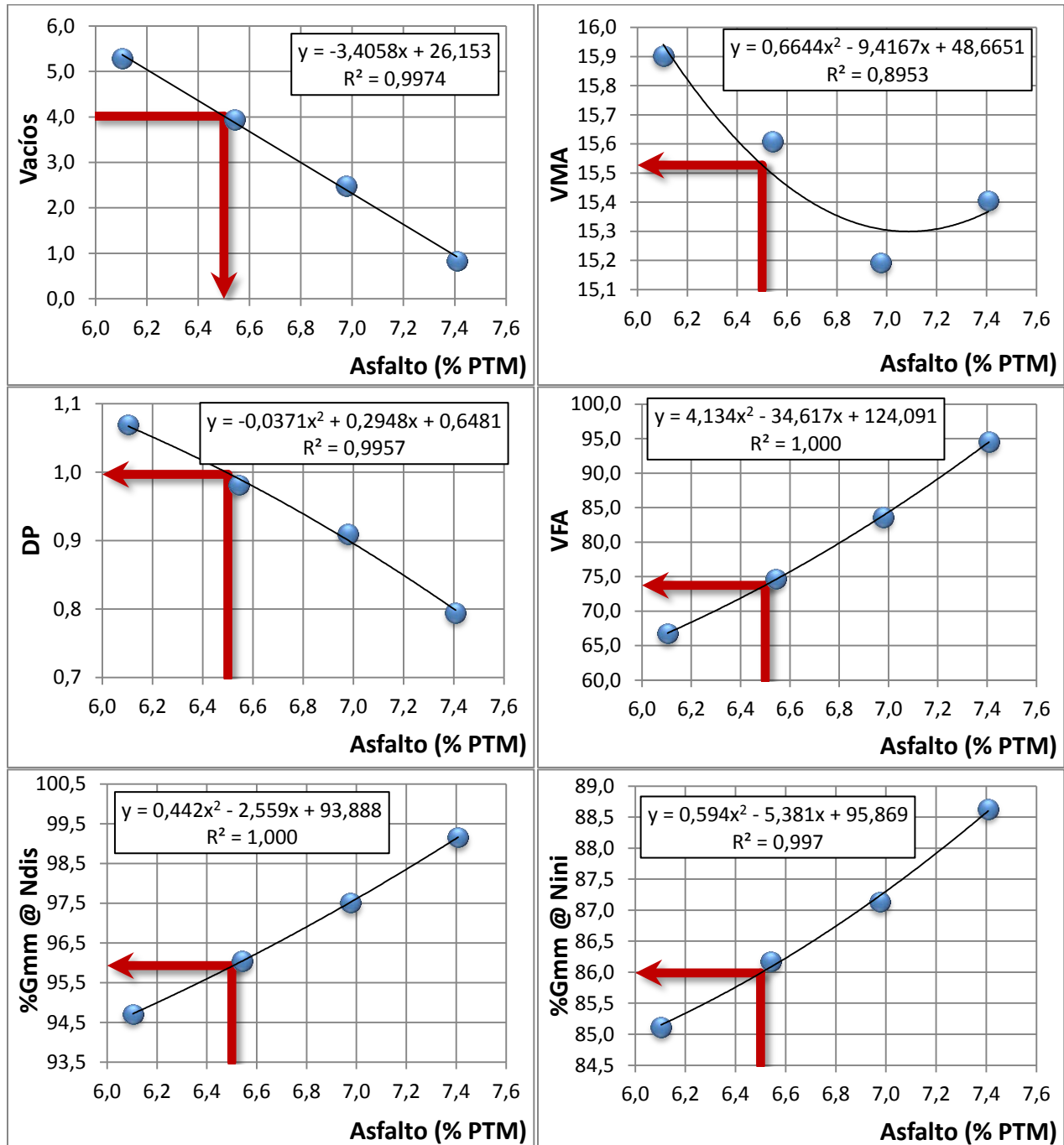
LanammeUCR. (2015). Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica, Años 2014-2015 (Primera Edición ed.). Montes de Oca, San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

Vargas, A. Aguiar, J. Leiva, F. Loría, L. (2015) Desempeño de mezclas asfálticas de granulometrías densas con el uso de asfaltos modificados. San José, Costa Rica.

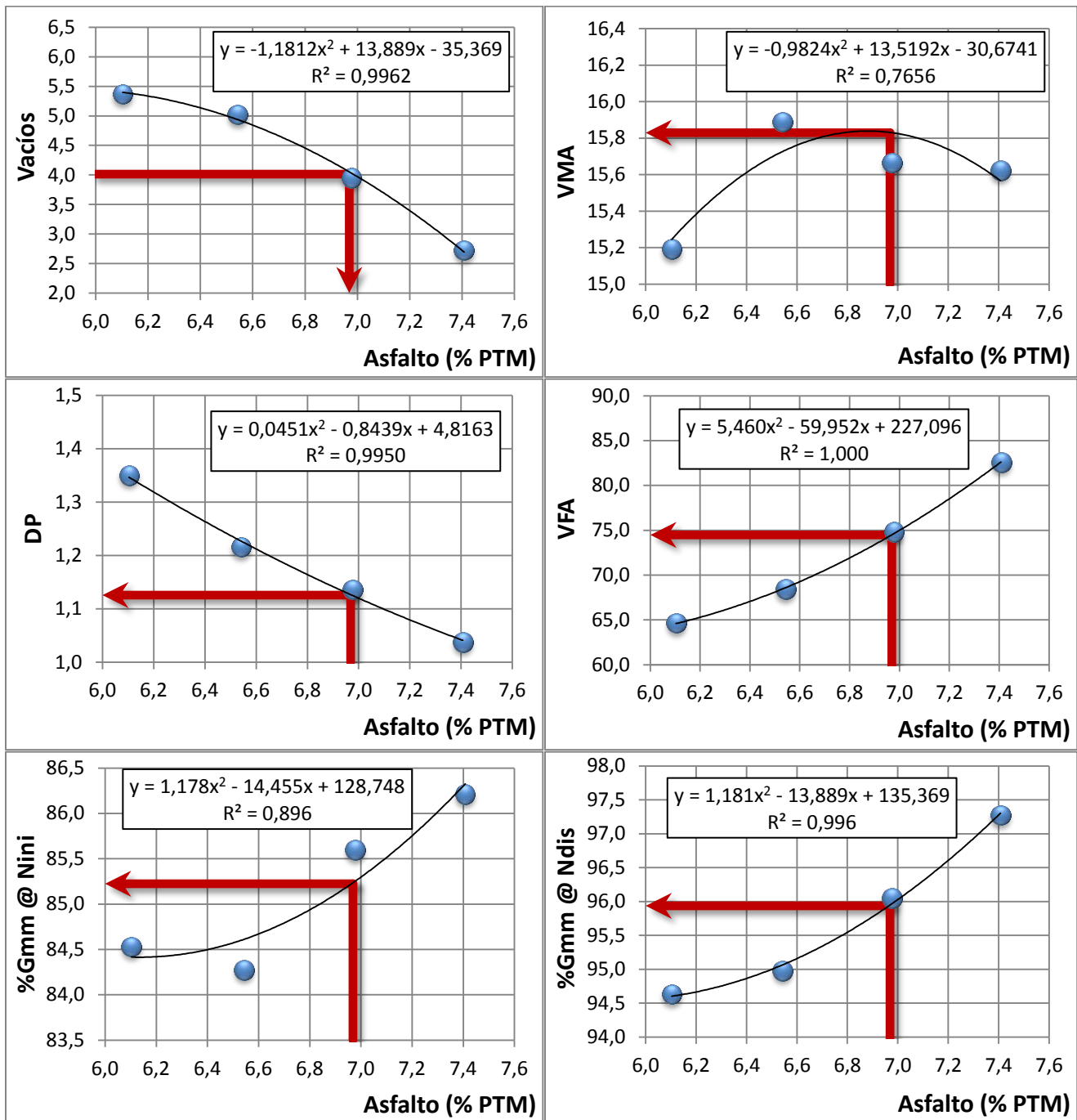
Vargas, A. Aguiar, J. Leiva, F. Loría, L. (2015). Evaluating Moisture susceptibility of asphalt concrete mixtures through simple performance test. En Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No.22575. San José, Costa Rica.

# CAPÍTULO 8. ANEXOS

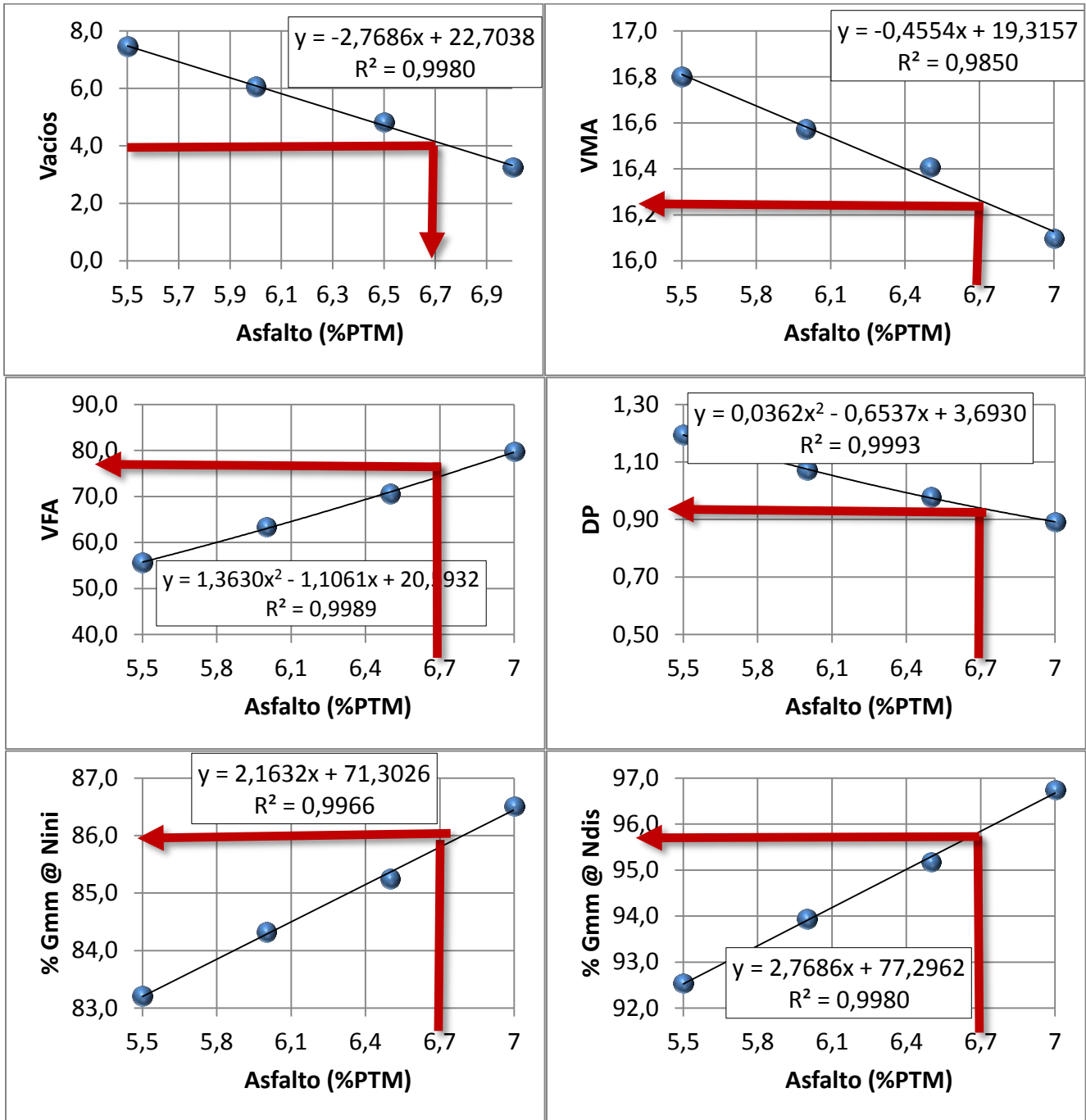
## ANEXO A: PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS



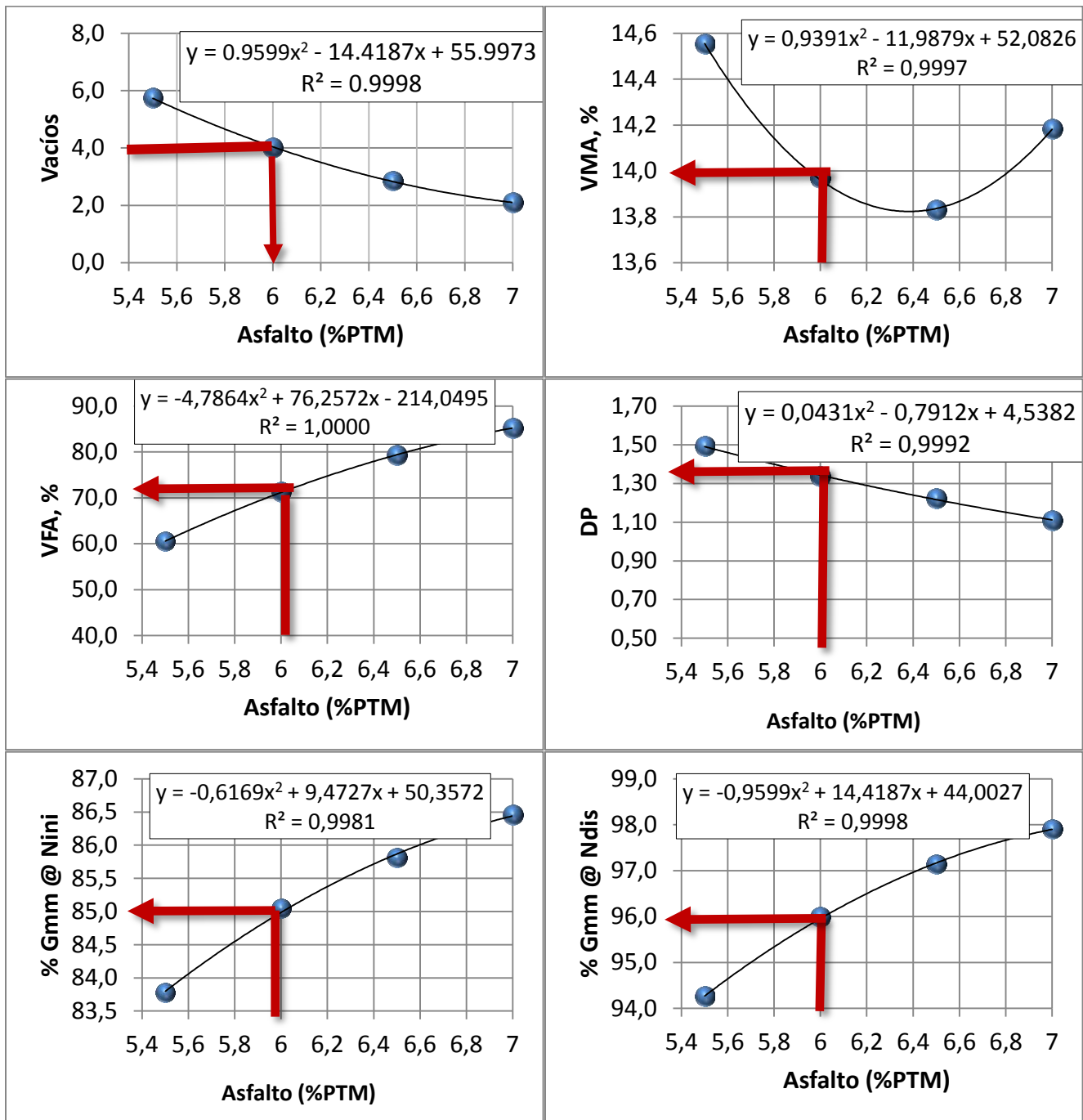
**Figura A 1.** Gráficos de la volumetría para encontrar el contenido de asfalto óptimo para la mezcla de 9,5 mm de control.



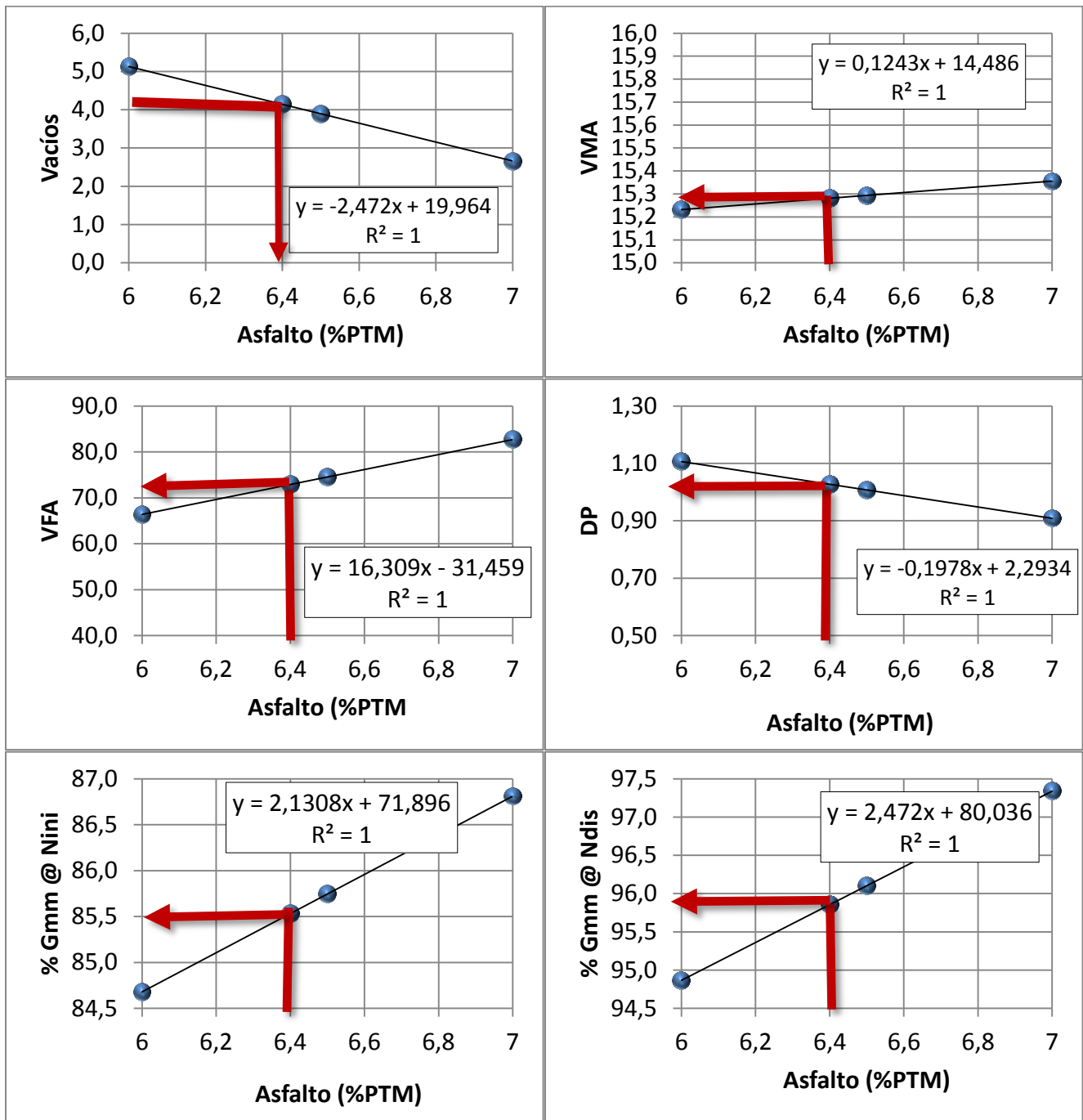
**Figura A 2.** Gráficos de la volumetría para encontrar el contenido de asfalto óptimo para la mezcla de 12,5 mm de control.



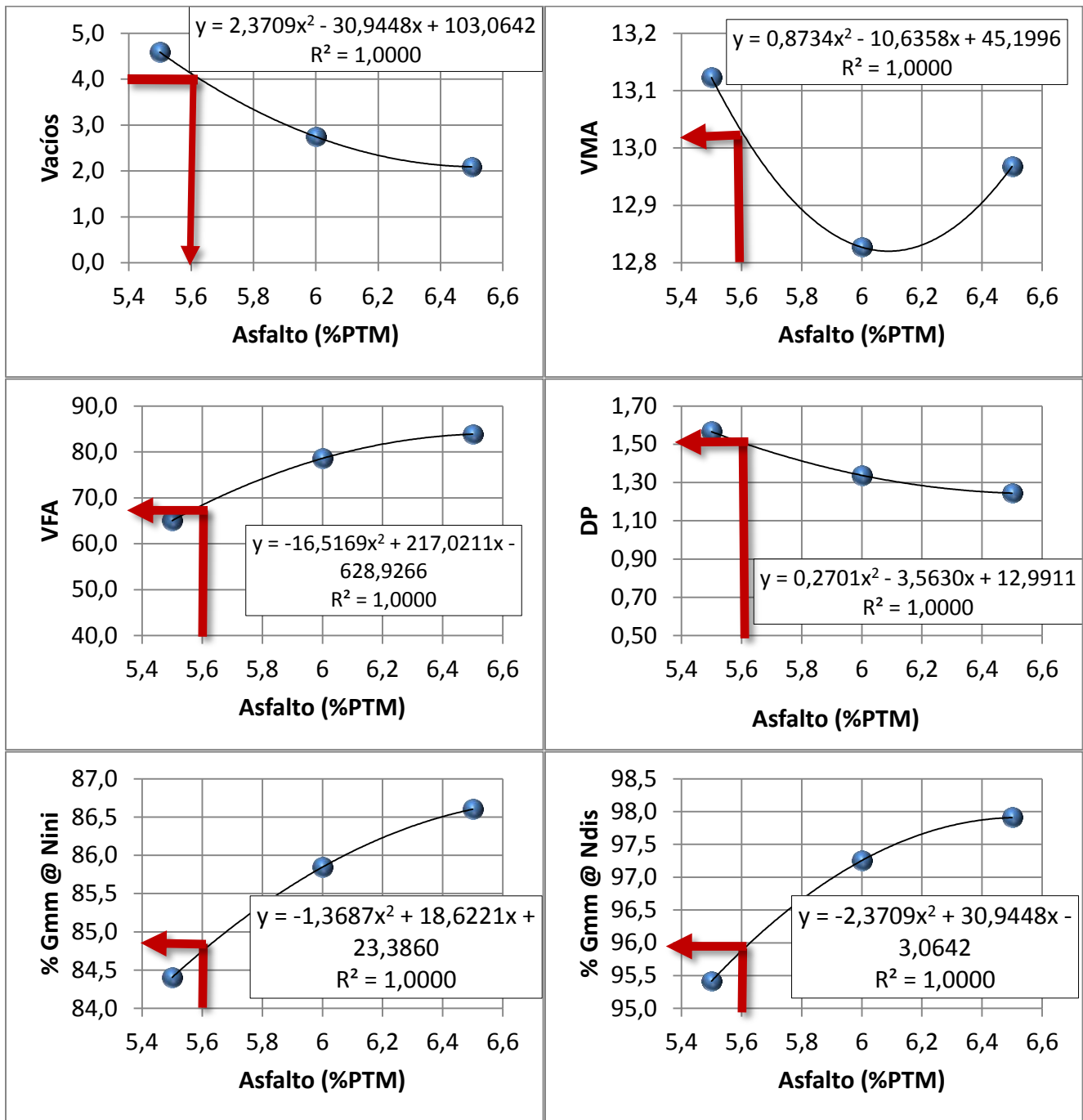
**Figura A 3.** Gráficos de la volumetría para encontrar el contenido de asfalto óptimo para la mezcla de 9,5 mm con cal.



**Figura A 4.** Gráficos de la volumetría para encontrar el contenido de asfalto óptimo para la mezcla de 12,5 mm con cal.



**Figura A 5.** Gráficos de la volumetría para encontrar el contenido de asfalto óptimo para la mezcla de 9,5 mm con nanocal.



**Figura A 6.** Gráficos de la volumetría para encontrar el contenido de asfalto óptimo para la mezcla de 12,5 mm con nanocal.

Requerimientos de Diseño para Mezclas Asfálticas en Caliente Tipo SUPERPAVE. (AASHTO MP2)

| ESAL de Diseño (Millones) | Nivel de Compactación                          |                    | Valor Mínimo de Vacíos en el Agregado |         |         | Vacíos Llenos con Asfalto (VFA) % (a) (e) | Razón Polvo - Asfalto (1) | Porcentaje de Resistencia Retenida a la Tensión (%), AASHTO T 283 (2) |
|---------------------------|--|--------------------|---------------------------------------|---------|---------|---|---------------------------|---|
|                           | Giratoria                                      |                    | Mineral (VMA) % (4)                   |         |         |   |                           |   |
|                           | (% Densidad Máxima Teórica, Gmm), AASHTO PP 28 | N <sub>espec</sub> | N <sub>min</sub>                      | 25,0 mm | 19,0 mm |   |                           |   |
| < 0,3                     | 6<br>(≤ 91,5%)                                 | 50<br>(≤ 96%)      | 75<br>(≤ 98%)                         |         |         | 70 - 80                                   |                           |   |
| 0,3 a < 3                 | 7<br>(≤ 90,5%)                                 | 75<br>(≤ 96%)      | 115<br>(≤ 98%)                        |         |         | 65 - 78                                   |                           |   |
| 3 a < 30                  | 8<br>(≤ 89%)                                   | 100<br>(≤ 96%)     | 160<br>(≤ 98%)                        | 12,0    | 13,0    | 14,0                                      | 15,0                      | 0,8 - 1,6   |
| ≥ 30                      | 9<br>(≤ 89%)                                   | 125<br>(≤ 96%)     | 205<br>(≤ 98%)                        |         |         | 65 - 75                                   |                           | 80  |

- (1) Incluir aditivos mejoradores de adherencia no líquidos, finos provenientes de la coque de finos, y otra materia mineral añadida a la mezcla asfáltica. La razón polvo-asfalto deberá calcularse con base en el asfalto efectivo (calculado por peso total de la mezcla).
- (2) Los especímenes deberán ser preparados de acuerdo con AASHTO T 283.
- (3) El tamaño máximo nominal de agregado corresponde a un tamiz superior al primer tamiz que retiene más del 10 por ciento del peso total de agregado.
- (4) Cuando el material mineral o cal hidratada es añadida a la mezcla, dichos valores deben ser incluidos en el cálculo del VMA.
- (5) Para mezclas con 9,5 mm de tamaño nominal máximo de agregado con ≥ 3 millones de ESALs, el VFA deberá estar en el rango entre 73 a 76 %.
- (6) Para mezclas con 9,5 mm de tamaño nominal máximo de agregado con < 3 millones de ESALs, el VFA ≥ 67 %.

**Figura A 7.** Requerimientos volumétricos para MEZCLA ASFÁLTICA tipo SUPERPAVE

**Fuente:** Manual de especificaciones CR-2010



## **ANEXO B: RESULTADOS COMPLEMENTARIOS DEL ENSAYO DE RRTD**

**Cuadro B 1.** Resultados del ensayo de RRTD para la mezcla de 9,5 mm control.

| No. Espécimen     | Porcentaje de vacíos (%) | Tipo de acondicionamiento | Promedio Diámetro (mm) | Promedio Altura (mm) | Saturación (%) | Carga máxima (N) | Esfuerzo a tensión (kPa) | RRTD (%) |
|-------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|----------------|------------------|--------------------------|----------|
| 4                 | 7.8                      | Seco                      | 149.85                 | 94.78                | -              | 18047            | 809                      | -        |
| 5                 | 7.4                      |                           | 149.76                 | 94.52                | -              | 17933            | 807                      |          |
| 6                 | 7.3                      |                           | 149.78                 | 94.59                | -              | 18473            | 830                      |          |
| <b>Promedios</b>  | <b>7.5</b>               | -                         | <b>149.80</b>          | <b>94.63</b>         | -              | <b>18151</b>     | <b>815</b>               |          |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.3</b>               | -                         | <b>0.05</b>            | <b>0.13</b>          | -              | <b>285</b>       | <b>13</b>                |          |
| 16                | 7.5                      | 1 ciclo                   | 150.10                 | 94.91                | 74.6           | 17012            | 760                      | 91.2     |
| 17                | 7.4                      |                           | 150.06                 | 94.92                | 75.9           | 16424            | 734                      |          |
| 18                | 7.6                      |                           | 149.94                 | 94.82                | 74.3           | 16433            | 736                      |          |
| <b>Promedios</b>  | <b>7.5</b>               | -                         | <b>150.03</b>          | <b>94.88</b>         | <b>74.9</b>    | <b>16623</b>     | <b>743</b>               |          |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.1</b>               | -                         | <b>0.09</b>            | <b>0.06</b>          | <b>0.9</b>     | <b>337</b>       | <b>15</b>                |          |
| 13                | 7.9                      | 3 ciclos                  | 149.89                 | 94.65                | 80.5           | 13410            | 602                      | 75.0     |
| 14                | 8.0                      |                           | 149.97                 | 94.66                | 75.9           | 13528            | 607                      |          |
| 15                | 7.6                      |                           | 149.99                 | 94.65                | 72.7           | 13946            | 625                      |          |
| <b>Promedios</b>  | <b>7.8</b>               | -                         | <b>149.95</b>          | <b>94.65</b>         | <b>76.4</b>    | <b>13628</b>     | <b>611</b>               |          |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.2</b>               | -                         | <b>0.06</b>            | <b>0.01</b>          | <b>3.9</b>     | <b>282</b>       | <b>12</b>                |          |
| 19                | 7.3                      | 6 ciclos                  | 149.84                 | 94.88                | 73.5           | 12781            | 572                      | 72.7     |
| 20                | 7.1                      |                           | 150.01                 | 94.77                | 72.9           | 12911            | 578                      |          |
| 21                | 7.1                      |                           | 150.01                 | 94.77                | 71.3           | 14011            | 627                      |          |
| <b>Promedios</b>  | <b>7.2</b>               | -                         | <b>149.95</b>          | <b>94.81</b>         | <b>72.6</b>    | <b>13234</b>     | <b>593</b>               |          |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.1</b>               | -                         | <b>0.10</b>            | <b>0.06</b>          | <b>1.1</b>     | <b>676</b>       | <b>30</b>                |          |

**Cuadro B 2.** Resultados del ensayo de RRTD para la mezcla de 12,5 mm control.

| No. Espécimen     | Porcentaje de vacíos (%) | Tipo de acondicionamiento | Promedio Diámetro (mm) | Promedio Altura (mm) | Saturación (%) | Carga máxima (N) | Esfuerzo a tensión (kPa) | RRTD (%) |
|-------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|----------------|------------------|--------------------------|----------|
| 7                 | 6.4                      | Seco                      | 149.73                 | 94.46                | -              | 16367            | 737                      | -        |
| 9                 | 6.5                      |                           | 149.82                 | 94.55                | -              | 15717            | 706                      |          |
| 10                | 6.5                      |                           | 149.73                 | 94.49                | -              | 16313            | 734                      |          |
| <b>Promedios</b>  | <b>6.4</b>               |                           | -                      | <b>149.76</b>        | <b>94.50</b>   | -                | <b>16132</b>             |          |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.0</b>               | -                         | <b>0.05</b>            | <b>0.04</b>          | -              | <b>361</b>       | <b>17</b>                |          |
| 4                 | 7.3                      | 1 ciclo                   | 149.83                 | 94.61                | 76.0           | 12917            | 580                      | 85.5     |
| 6                 | 7.0                      |                           | 149.84                 | 94.56                | 71.9           | 14291            | 642                      |          |
| 8                 | 7.0                      |                           | 150.37                 | 94.64                | 74.2           | 14309            | 640                      |          |
| <b>Promedios</b>  | <b>7.1</b>               |                           | -                      | <b>150.01</b>        | <b>94.60</b>   | <b>74.0</b>      | <b>13839</b>             |          |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.2</b>               | -                         | <b>0.31</b>            | <b>0.04</b>          | <b>2.1</b>     | <b>799</b>       | <b>35</b>                |          |
| 13                | 7.0                      | 3 ciclos                  | 149.99                 | 94.74                | 73.9           | 10536            | 472                      | 67.0     |
| 14                | 6.9                      |                           | 149.93                 | 94.69                | 75.2           | 10662            | 478                      |          |
| 15                | 6.8                      |                           | 149.80                 | 94.63                | 78.3           | 11313            | 508                      |          |
| <b>Promedios</b>  | <b>6.9</b>               |                           | -                      | <b>149.91</b>        | <b>94.69</b>   | <b>75.8</b>      | <b>10837</b>             |          |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.1</b>               | -                         | <b>0.10</b>            | <b>0.05</b>          | <b>2.3</b>     | <b>417</b>       | <b>19</b>                |          |
| 16                | 6.8                      | 6 ciclos                  | 149.81                 | 94.65                | 72.3           | 11002            | 494                      | 66.7     |
| 17                | 6.6                      |                           | 149.82                 | 94.67                | 73.0           | 11017            | 495                      |          |
| 18                | 6.7                      |                           | 149.89                 | 94.65                | 71.3           | 10325            | 463                      |          |
| <b>Promedios</b>  | <b>6.7</b>               |                           | -                      | <b>149.84</b>        | <b>94.65</b>   | <b>72.2</b>      | <b>10781</b>             |          |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.1</b>               | -                         | <b>0.04</b>            | <b>0.01</b>          | <b>0.9</b>     | <b>395</b>       | <b>18</b>                |          |

**Cuadro B 3.** Resultados del ensayo de RRTD para la mezcla de 9,5 mm con cal.

| No. Espécimen     | Porcentaje de vacíos (%) | Tipo de acondicionamiento | Promedio Diámetro (mm) | Promedio Altura (mm) | Saturación (%) | Carga máxima (N) | Esfuerzo a tensión (kPa) | RRTD (%)    |
|-------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|----------------|------------------|--------------------------|-------------|
| 4                 | 7.2                      | Seco                      | 149.66                 | 94.73                | -              | 19959            | 896                      | -           |
| 6                 | 7.2                      |                           | 149.71                 | 94.67                | -              | 19848            | 892                      |             |
| 11                | 7.3                      |                           | 149.95                 | 94.72                | -              | 18647            | 836                      |             |
| <b>Promedios</b>  | <b>7.2</b>               |                           | <b>-</b>               | <b>149.77</b>        | <b>94.70</b>   | <b>-</b>         | <b>19485</b>             |             |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.1</b>               | <b>-</b>                  | <b>0.15</b>            | <b>0.03</b>          | <b>-</b>       | <b>728</b>       | <b>34</b>                |             |
| 5                 | 7.6                      | 1 ciclo                   | 149.78                 | 94.65                | 75.4           | 18384            | 826                      | <b>95.0</b> |
| 10                | 6.9                      |                           | 150.11                 | 94.67                | 75.0           | 18671            | 836                      |             |
| 12                | 6.8                      |                           | 150.21                 | 95.19                | 75.0           | 18678            | 832                      |             |
| <b>Promedios</b>  | <b>7.1</b>               |                           | <b>-</b>               | <b>150.03</b>        | <b>94.84</b>   | <b>75.1</b>      | <b>18578</b>             |             |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.4</b>               | <b>-</b>                  | <b>0.23</b>            | <b>0.31</b>          | <b>0.2</b>     | <b>168</b>       | <b>5</b>                 |             |
| 13                | 7.1                      | 3 ciclos                  | 149.71                 | 94.62                | 74.8           | 17814            | 801                      | <b>91.7</b> |
| 14                | 7.3                      |                           | 149.59                 | 94.94                | 76.8           | 18210            | 816                      |             |
| 15                | 6.9                      |                           | 149.80                 | 94.74                | 71.8           | 17600            | 790                      |             |
| <b>Promedios</b>  | <b>7.1</b>               |                           | <b>-</b>               | <b>149.70</b>        | <b>94.76</b>   | <b>74.5</b>      | <b>17875</b>             |             |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.2</b>               | <b>-</b>                  | <b>0.11</b>            | <b>0.16</b>          | <b>2.5</b>     | <b>309</b>       | <b>13</b>                |             |
| 16                | 7.4                      | 6 ciclos                  | 149.51                 | 94.77                | 75.0           | 18012            | 809                      | <b>90.9</b> |
| 17                | 7.4                      |                           | 149.72                 | 94.61                | 78.8           | 17785            | 799                      |             |
| 18                | 6.9                      |                           | 150.56                 | 94.76                | 72.3           | 17393            | 776                      |             |
| <b>Promedios</b>  | <b>7.2</b>               |                           | <b>-</b>               | <b>149.93</b>        | <b>94.71</b>   | <b>75.4</b>      | <b>17730</b>             |             |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.3</b>               | <b>-</b>                  | <b>0.56</b>            | <b>0.09</b>          | <b>3.3</b>     | <b>313</b>       | <b>17</b>                |             |

**Cuadro B 4.** Resultados del ensayo de RRTD para la mezcla de 12,5 mm con cal.

| No. Espécimen     | Porcentaje de vacíos (%) | Tipo de acondicionamiento | Promedio Diámetro (mm) | Promedio Altura (mm) | Saturación (%) | Carga máxima (N) | Esfuerzo a tensión (kPa) | RRTD (%) |
|-------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|----------------|------------------|--------------------------|----------|
| 6                 | 6.9                      | Seco                      | 150.43                 | 94.62                | -              | 16542            | 740                      | -        |
| 7                 | 6.9                      |                           | 150.27                 | 94.76                | -              | 16254            | 727                      |          |
| 16                | 6.8                      |                           | 150.42                 | 94.57                | -              | 16436            | 736                      |          |
| <b>Promedios</b>  | <b>6.9</b>               |                           | -                      | <b>150.37</b>        | <b>94.65</b>   | -                | <b>16411</b>             |          |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.1</b>               | -                         | <b>0.09</b>            | <b>0.10</b>          | -              | <b>146</b>       | <b>7</b>                 |          |
| 4                 | 7.2                      | 1 ciclo                   | 150.55                 | 94.92                | 74.8           | 15677            | 698                      | 94.9     |
| 9                 | 6.8                      |                           | 150.42                 | 94.80                | 74.5           | 15363            | 686                      |          |
| 10                | 6.6                      |                           | 149.98                 | 94.77                | 75.7           | 15754            | 706                      |          |
| <b>Promedios</b>  | <b>6.9</b>               |                           | -                      | <b>150.32</b>        | <b>94.83</b>   | <b>75.0</b>      | <b>15598</b>             |          |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.3</b>               | -                         | <b>0.30</b>            | <b>0.08</b>          | <b>0.6</b>     | <b>207</b>       | <b>10</b>                |          |
| 13                | 6.8                      | 3 ciclos                  | 150.35                 | 95.14                | 77.5           | 15037            | 669                      | 90.7     |
| 14                | 7.2                      |                           | 150.13                 | 95.31                | 77.0           | 15488            | 689                      |          |
| 15                | 6.9                      |                           | 150.15                 | 94.86                | 77.3           | 14279            | 638                      |          |
| <b>Promedios</b>  | <b>6.9</b>               |                           | -                      | <b>150.21</b>        | <b>95.10</b>   | <b>77.3</b>      | <b>14935</b>             |          |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.2</b>               | -                         | <b>0.12</b>            | <b>0.23</b>          | <b>0.3</b>     | <b>611</b>       | <b>26</b>                |          |
| 5                 | 7.3                      | 6 ciclos                  | 150.37                 | 94.81                | 74.8           | 14634            | 654                      | 92.9     |
| 17                | 6.5                      |                           | 149.69                 | 94.75                | 76.8           | 15773            | 708                      |          |
| 18                | 6.9                      |                           | 149.69                 | 94.75                | 77.4           | 15237            | 684                      |          |
| <b>Promedios</b>  | <b>6.9</b>               |                           | -                      | <b>149.91</b>        | <b>94.77</b>   | <b>76.3</b>      | <b>15215</b>             |          |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.4</b>               | -                         | <b>0.39</b>            | <b>0.03</b>          | <b>1.4</b>     | <b>570</b>       | <b>27</b>                |          |

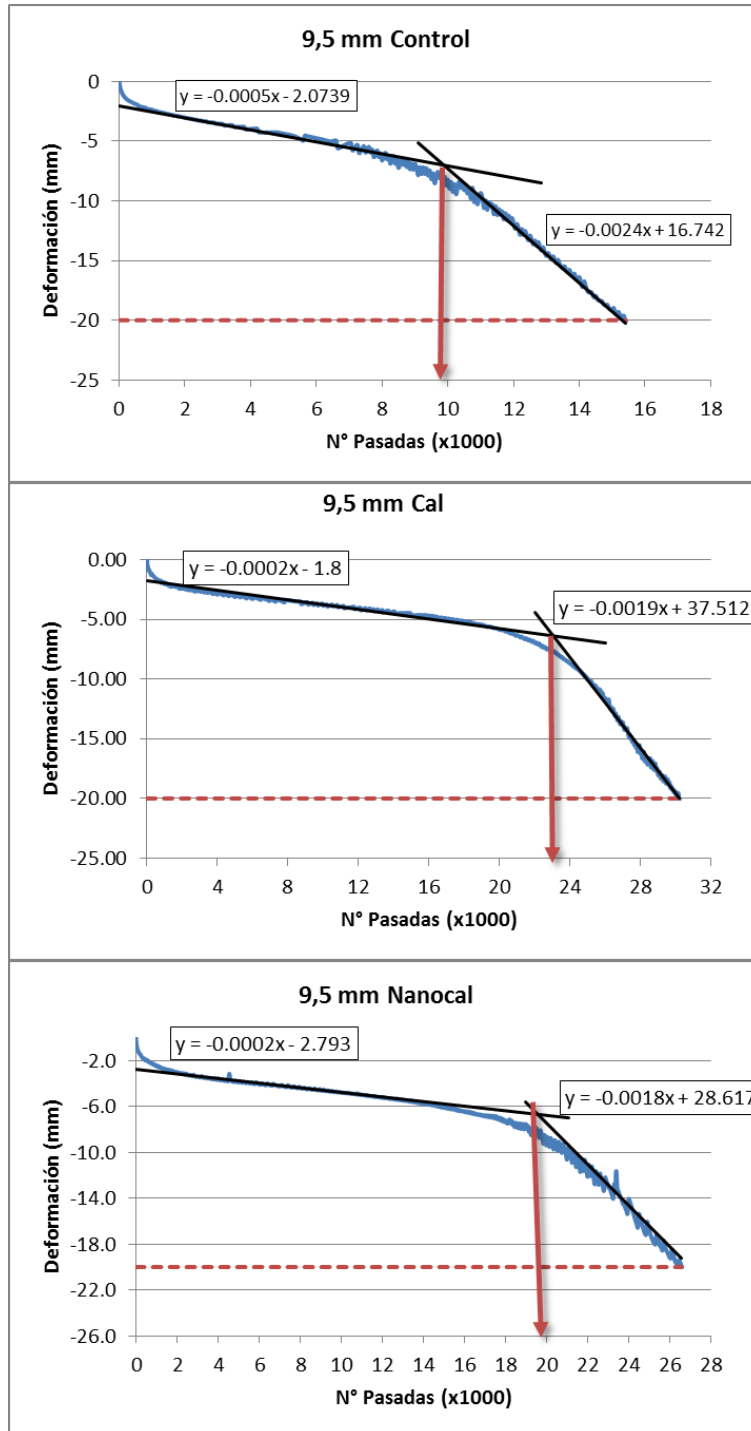
**Cuadro B 5.** Resultados del ensayo de RRTD para la mezcla de 9,5 mm con nanocal.

| No. Espécimen     | Porcentaje de vacíos (%) | Tipo de acondicionamiento | Promedio Diámetro (mm) | Promedio Altura (mm) | Saturación (%) | Carga máxima (N) | Esfuerzo a tensión (kPa) | RRTD (%) |
|-------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|----------------|------------------|--------------------------|----------|
| 4                 | 7.1                      | Seco                      | 149.92                 | 94.82                | -              | 15987            | 716                      | -        |
| 5                 | 7.0                      |                           | 149.85                 | 94.89                | -              | 16128            | 722                      |          |
| 6                 | 7.1                      |                           | 149.97                 | 94.94                | -              | 15581            | 697                      |          |
| <b>Promedios</b>  | <b>7.1</b>               |                           | -                      | <b>149.91</b>        | <b>94.88</b>   | -                | <b>15899</b>             |          |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.1</b>               | -                         | <b>0.06</b>            | <b>0.06</b>          | -              | <b>284</b>       | <b>13</b>                |          |
| 1                 | 7.3                      | 1 ciclos                  | 149.85                 | 94.72                | 76.5           | 15703            | 704                      | 97.2     |
| 2                 | 7.1                      |                           | 149.85                 | 94.78                | 75.8           | 15625            | 700                      |          |
| 3                 | 6.9                      |                           | 149.70                 | 94.79                | 76.8           | 14941            | 670                      |          |
| <b>Promedios</b>  | <b>7.1</b>               |                           | -                      | <b>149.80</b>        | <b>94.76</b>   | <b>76.4</b>      | <b>15423</b>             |          |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.2</b>               | -                         | <b>0.09</b>            | <b>0.04</b>          | <b>0.5</b>     | <b>419</b>       | <b>19</b>                |          |
| 7                 | 6.5                      | 3 ciclo                   | 150.14                 | 94.88                | 77.8           | 12885            | 576                      | 77.1     |
| 8                 | 7.1                      |                           | 149.77                 | 94.89                | 72.8           | 11923            | 534                      |          |
| 9                 | 7.3                      |                           | 149.79                 | 94.93                | 75.4           | 11993            | 537                      |          |
| <b>Promedios</b>  | <b>7.0</b>               |                           | -                      | <b>149.90</b>        | <b>94.90</b>   | <b>75.3</b>      | <b>12267</b>             |          |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.4</b>               | -                         | <b>0.21</b>            | <b>0.03</b>          | <b>2.5</b>     | <b>536</b>       | <b>23</b>                |          |
| 10                | 6.9                      | 6 ciclos                  | 149.75                 | 95.00                | 79.8           | 10943            | 490                      | 68.6     |
| 11                | 7.3                      |                           | 149.81                 | 94.88                | 73.2           | 11594            | 519                      |          |
| 12                | 7.4                      |                           | 149.87                 | 94.95                | 73.1           | 10170            | 455                      |          |
| <b>Promedios</b>  | <b>7.2</b>               |                           | -                      | <b>149.81</b>        | <b>94.94</b>   | <b>75.4</b>      | <b>10902</b>             |          |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.3</b>               | -                         | <b>0.06</b>            | <b>0.06</b>          | <b>3.8</b>     | <b>713</b>       | <b>32</b>                |          |

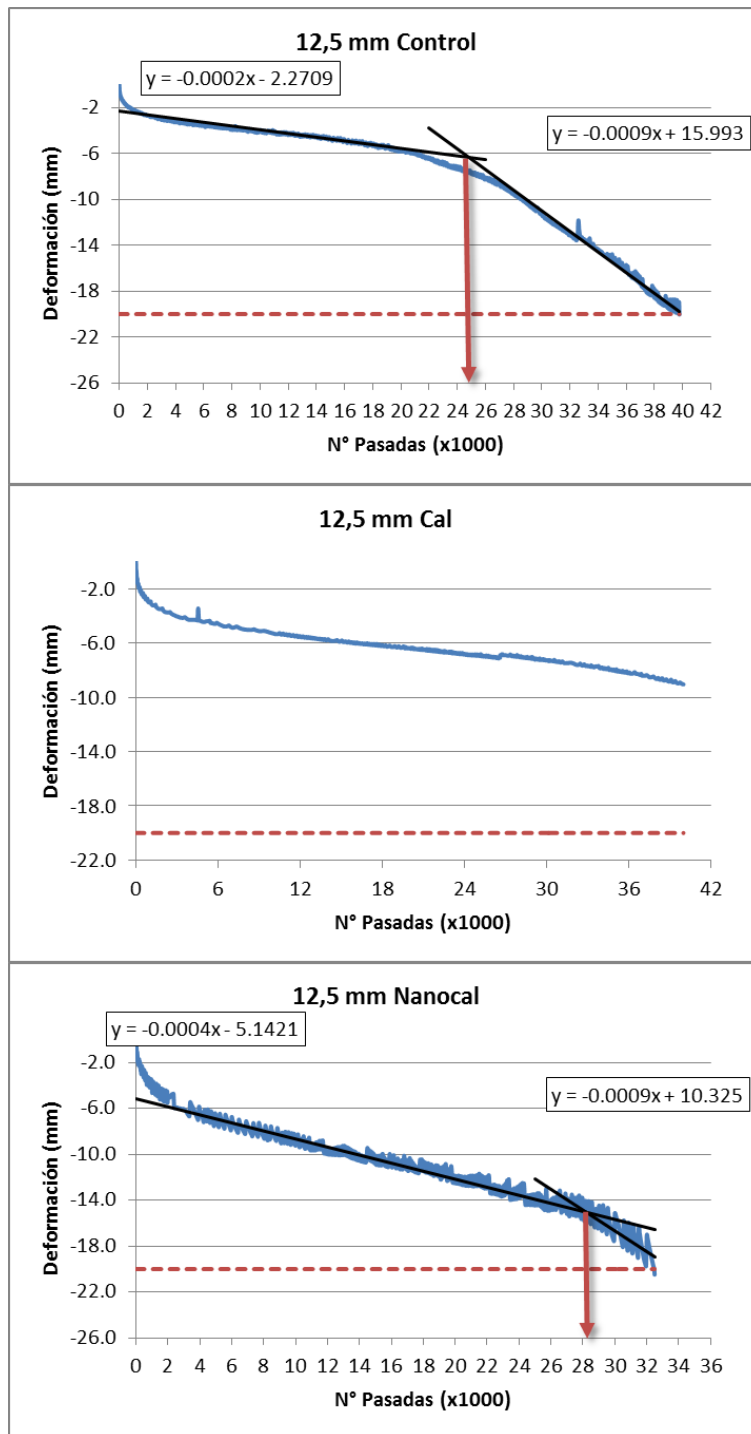
**Cuadro B 6.** Resultados del ensayo de RRTD para la mezcla de 12,5 mm con nanocal.

| No. Espécimen     | Porcentaje de vacíos (%) | Tipo de acondicionamiento | Promedio Diámetro (mm) | Promedio Altura (mm) | Saturación (%) | Carga máxima (N) | Esfuerzo a tensión (kPa) | RRTD (%)    |
|-------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|----------------|------------------|--------------------------|-------------|
| 7                 | 6.8                      | Seco                      | 149.42                 | 94.85                | -              | 16701            | 750                      | -           |
| 8                 | 6.8                      |                           | 149.48                 | 94.79                | -              | 15115            | 679                      |             |
| 12                | 6.8                      |                           | 149.78                 | 95.18                | -              | 15547            | 694                      |             |
| <b>Promedios</b>  | <b>6.8</b>               |                           | -                      | <b>149.56</b>        | <b>94.94</b>   | -                | <b>15788</b>             |             |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.1</b>               | -                         | <b>0.19</b>            | <b>0.21</b>          | -              | <b>820</b>       | <b>37</b>                |             |
| 3                 | 6.9                      | 1 ciclo                   | 149.90                 | 94.82                | 79.7           | 12999            | 582                      | <b>83.4</b> |
| 5                 | 7.2                      |                           | 149.84                 | 94.73                | 71.7           | 13280            | 596                      |             |
| 10                | 7.1                      |                           | 149.93                 | 94.82                | 76.4           | 13240            | 593                      |             |
| <b>Promedios</b>  | <b>7.1</b>               |                           | -                      | <b>149.89</b>        | <b>94.79</b>   | <b>75.9</b>      | <b>13173</b>             |             |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.2</b>               | -                         | <b>0.05</b>            | <b>0.06</b>          | <b>4.0</b>     | <b>152</b>       | <b>7</b>                 |             |
| 2                 | 7.6                      | 3 ciclos                  | 149.95                 | 95.27                | 71.6           | 13347            | 595                      | <b>85.2</b> |
| 4                 | 7.4                      |                           | 149.81                 | 94.75                | 74.4           | 13554            | 608                      |             |
| 11                | 7.4                      |                           | 150.30                 | 94.88                | 74.8           | 13572            | 606                      |             |
| <b>Promedios</b>  | <b>7.4</b>               |                           | -                      | <b>150.02</b>        | <b>94.97</b>   | <b>73.6</b>      | <b>13491</b>             |             |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.1</b>               | -                         | <b>0.25</b>            | <b>0.27</b>          | <b>1.7</b>     | <b>125</b>       | <b>7</b>                 |             |
| 1                 | 7.2                      | 6 ciclos                  | 149.99                 | 94.77                | 75.4           | 11290            | 506                      | <b>72.8</b> |
| 6                 | 7.4                      |                           | 149.88                 | 94.85                | 87.6           | 11095            | 497                      |             |
| 9                 | 7.4                      |                           | 149.82                 | 95.06                | 76.4           | 12160            | 544                      |             |
| <b>Promedios</b>  | <b>7.3</b>               |                           | -                      | <b>149.90</b>        | <b>94.89</b>   | <b>79.8</b>      | <b>11515</b>             |             |
| <b>Desv. Est.</b> | <b>0.1</b>               | -                         | <b>0.09</b>            | <b>0.15</b>          | <b>6.8</b>     | <b>567</b>       | <b>25</b>                |             |

## **ANEXO C: RESULTADOS COMPLEMENTARIOS DEL ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO**



**Figura C 1.** Puntos de inflexión al desnudamiento para las mezclas de 9,5 mm.



**Figura C 2.** Puntos de inflexión al desnudamiento para las mezclas de 12,5 mm.



**Cuadro C 1.** Parámetros para el cálculo del punto de inflexión de desnudamiento

|                | <b>Mezcla</b> | <b>m1</b> | <b>b1</b> | <b>m2</b> | <b>b2</b> | <b>PID</b> |
|----------------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| <b>9,5 mm</b>  | Control       | -0.0005   | -2.0739   | -0.0024   | 16.866    | 9968       |
|                | Cal           | -0.0002   | -2.2683   | -0.0019   | 37.912    | 23635      |
|                | Nanocal       | -0.0003   | -2.2413   | -0.0018   | 28.617    | 20572      |
| <b>12,5 mm</b> | Control       | -0.0002   | -2.2709   | -0.0009   | 15.993    | 24849      |
|                | Cal           | -         | -         | -         | -         | -          |
|                | Nanocal       | -0.0004   | -5.1421   | -0.0009   | 10.3247   | 28121      |

## **ANEXO D: RESULTADOS COMPLEMENTARIOS DEL ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO**

**Cuadro D 1.** Valores promedio de módulo dinámico y ángulo de fase medidos para las mezclas de control.

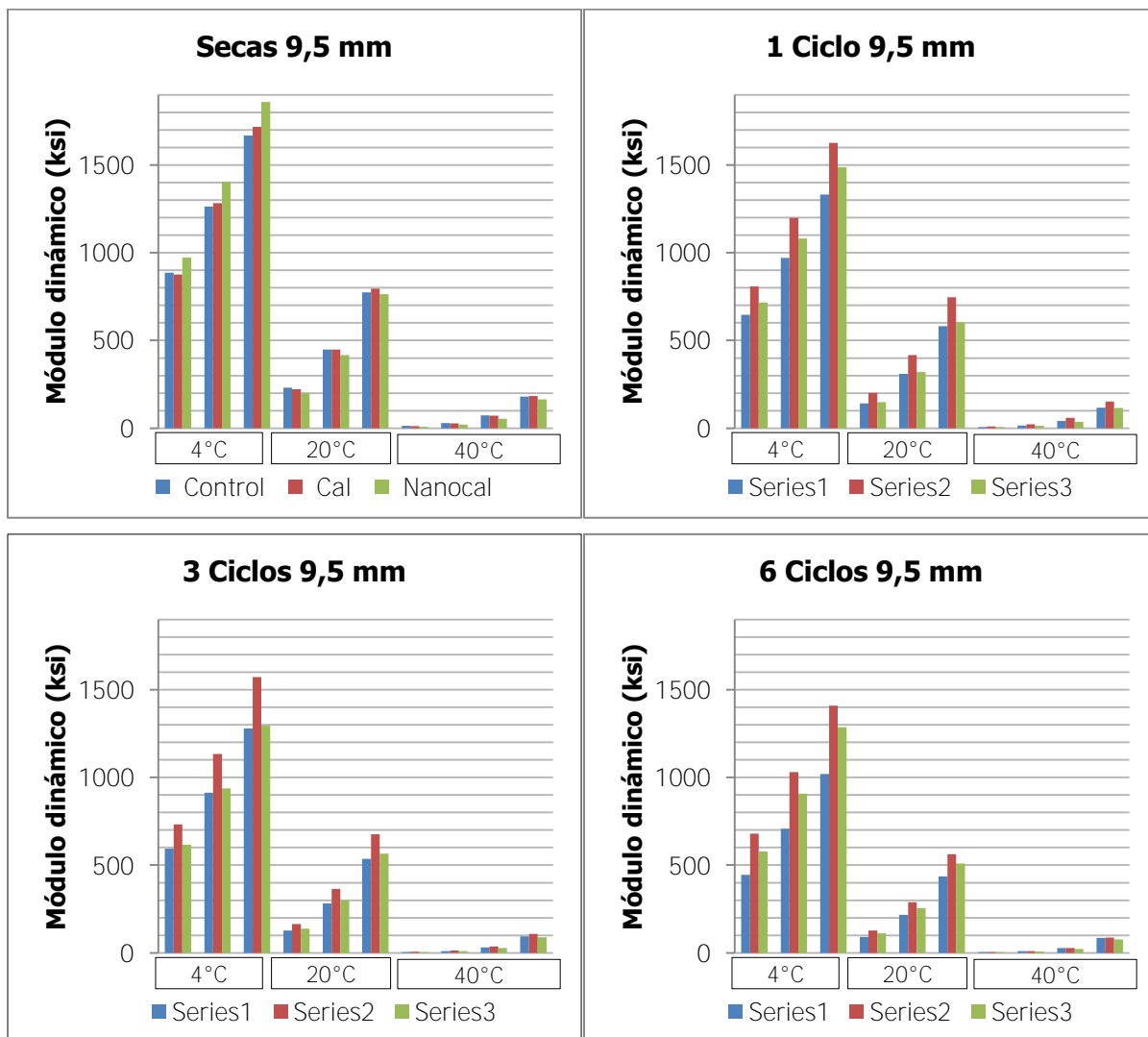
| <b>Mezclas de Control</b>     |            |                 |                         |                 |                         |                 |                         |                 |                         |
|-------------------------------|------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|
| Temperatura                   | Frecuencia | Secos           |                         | 1 Ciclo         |                         | 3 Ciclos        |                         | 6 Ciclos        |                         |
|                               |            | Módulo Promedio | Ángulo de fase Promedio | Módulo Promedio | Ángulo de fase Promedio | Módulo Promedio | Ángulo de fase Promedio | Módulo Promedio | Ángulo de fase Promedio |
| C°                            | Hz         | ksi             | Grados                  | ksi             | Grados                  | ksi             | Grados                  | ksi             | Grados                  |
| <b>Mezclas de 9,5 mm TMN</b>  |            |                 |                         |                 |                         |                 |                         |                 |                         |
| 4.0                           | 0.1        | 594             | 20                      | 645             | 20                      | 594             | 20                      | 445             | 22                      |
| 4.0                           | 1.0        | 913             | 16                      | 970             | 15                      | 913             | 16                      | 707             | 17                      |
| 4.0                           | 10.0       | 1278            | 12                      | 1331            | 12                      | 1278            | 12                      | 1019            | 14                      |
| 20.0                          | 0.1        | 127             | 34                      | 142             | 35                      | 127             | 34                      | 91              | 34                      |
| 20.0                          | 1.0        | 281             | 29                      | 310             | 30                      | 281             | 29                      | 216             | 31                      |
| 20.0                          | 10.0       | 536             | 24                      | 581             | 23                      | 536             | 24                      | 436             | 25                      |
| 40.0                          | 0.01       | 5               | 27                      | 6               | 28                      | 5               | 27                      | 5               | 24                      |
| 40.0                          | 0.1        | 11              | 33                      | 15              | 33                      | 11              | 33                      | 11              | 32                      |
| 40.0                          | 1.0        | 31              | 37                      | 41              | 37                      | 31              | 37                      | 28              | 36                      |
| 40.0                          | 10.0       | 94              | 37                      | 117             | 38                      | 94              | 37                      | 86              | 36                      |
| <b>Mezclas de 12,5 mm TMN</b> |            |                 |                         |                 |                         |                 |                         |                 |                         |
| 4.0                           | 0.1        | 707             | 20                      | 653             | 24                      | 504             | 24                      | 479             | 24                      |
| 4.0                           | 1.0        | 1076            | 15                      | 1064            | 17                      | 818             | 18                      | 793             | 18                      |
| 4.0                           | 10.0       | 1483            | 11                      | 1554            | 11                      | 1183            | 13                      | 1168            | 14                      |
| 20.0                          | 0.1        | 150             | 33                      | 103             | 37                      | 88              | 37                      | 78              | 36                      |
| 20.0                          | 1.0        | 326             | 29                      | 262             | 34                      | 217             | 33                      | 192             | 34                      |
| 20.0                          | 10.0       | 617             | 23                      | 560             | 27                      | 457             | 27                      | 405             | 28                      |
| 40.0                          | 0.01       | 8               | 23                      | 5               | 23                      | 4               | 20                      | 4               | 33                      |
| 40.0                          | 0.1        | 16              | 30                      | 8               | 32                      | 8               | 31                      | 7               | 32                      |
| 40.0                          | 1.0        | 43              | 35                      | 23              | 39                      | 21              | 38                      | 18              | 39                      |
| 40.0                          | 10.0       | 121             | 36                      | 77              | 41                      | 72              | 39                      | 58              | 40                      |

**Cuadro D 2.** Valores promedio de módulo dinámico y ángulo de fase medidos para las mezclas con cal.

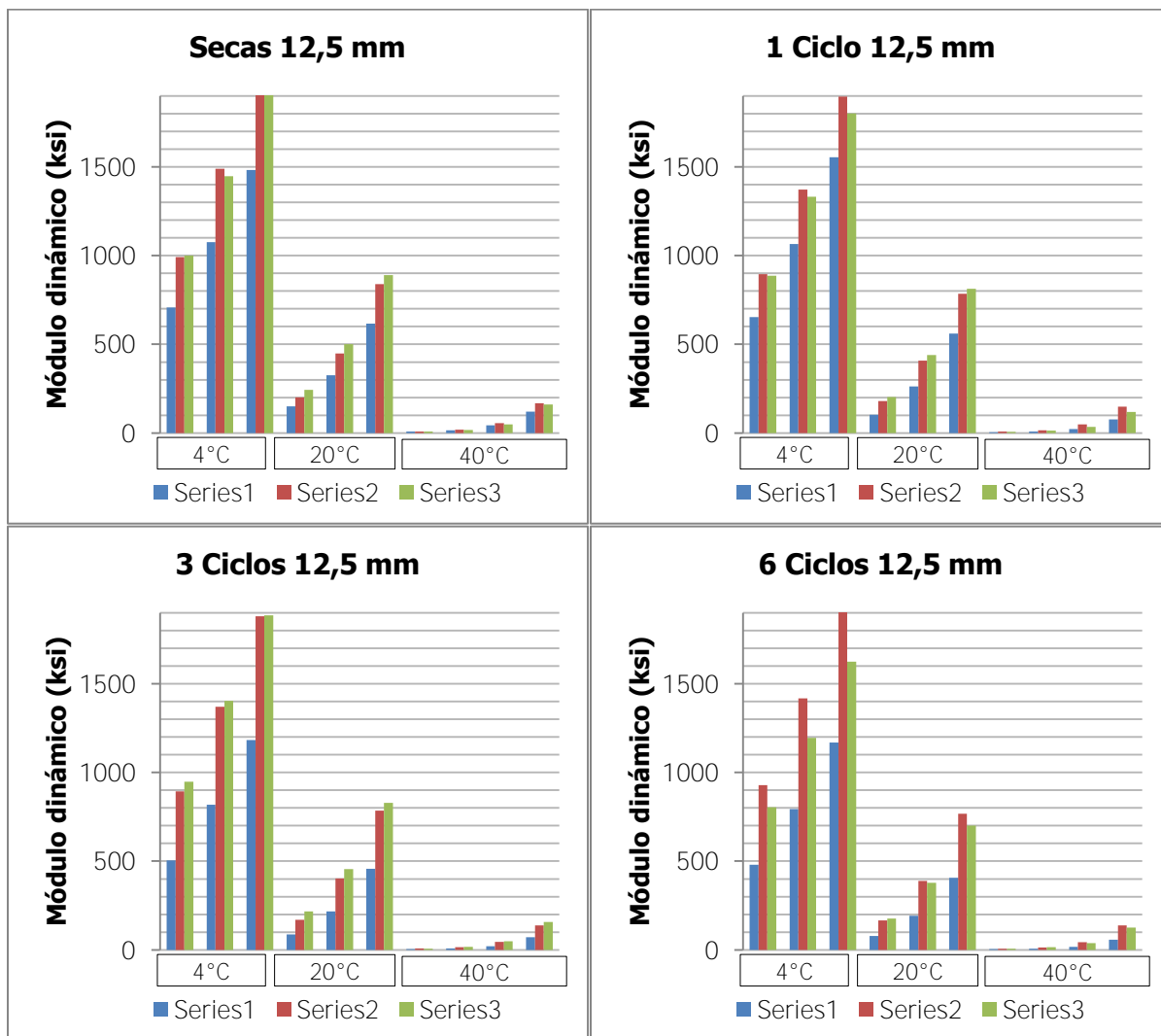
| <b>Mezclas con cal</b>        |            |                 |                         |                 |                         |                 |                         |                 |                         |
|-------------------------------|------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|
| Temperatura                   | Frecuencia | Secos           |                         | 1 Ciclo         |                         | 3 Ciclos        |                         | 6 Ciclos        |                         |
|                               |            | Módulo Promedio | Ángulo de fase Promedio | Módulo Promedio | Ángulo de fase Promedio | Módulo Promedio | Ángulo de fase Promedio | Módulo Promedio | Ángulo de fase Promedio |
| Cº                            | Hz         | ksi             | Grados                  | ksi             | Grados                  | ksi             | Grados                  | ksi             | Grados                  |
| <b>Mezclas de 9,5 mm TMN</b>  |            |                 |                         |                 |                         |                 |                         |                 |                         |
| 4.0                           | 0.1        | 876             | 18                      | 808             | 19                      | 733             | 20                      | 679             | 20                      |
| 4.0                           | 1.0        | 1282            | 13                      | 1198            | 14                      | 1134            | 15                      | 1031            | 15                      |
| 4.0                           | 10.0       | 1716            | 10                      | 1625            | 11                      | 1572            | 11                      | 1409            | 11                      |
| 20.0                          | 0.1        | 222             | 31                      | 201             | 33                      | 164             | 34                      | 128             | 35                      |
| 20.0                          | 1.0        | 448             | 27                      | 416             | 27                      | 364             | 29                      | 289             | 31                      |
| 20.0                          | 10.0       | 795             | 21                      | 746             | 21                      | 676             | 22                      | 563             | 24                      |
| 40.0                          | 0.01       | 12              | 26                      | 10              | 26                      | 6               | 25                      | 6               | 23                      |
| 40.0                          | 0.1        | 27              | 32                      | 23              | 32                      | 13              | 32                      | 11              | 31                      |
| 40.0                          | 1.0        | 71              | 35                      | 59              | 36                      | 37              | 37                      | 28              | 37                      |
| 40.0                          | 10.0       | 184             | 35                      | 152             | 36                      | 108             | 39                      | 86              | 38                      |
| <b>Mezclas de 12,5 mm TMN</b> |            |                 |                         |                 |                         |                 |                         |                 |                         |
| 4.0                           | 0.1        | 991             | 19                      | 895             | 21                      | 894             | 21                      | 929             | 21                      |
| 4.0                           | 1.0        | 1488            | 14                      | 1372            | 15                      | 1370            | 15                      | 1418            | 15                      |
| 4.0                           | 10.0       | 2031            | 11                      | 1896            | 11                      | 1879            | 11                      | 1938            | 11                      |
| 20.0                          | 0.1        | 202             | 33                      | 179             | 35                      | 170             | 35                      | 165             | 35                      |
| 20.0                          | 1.0        | 447             | 29                      | 408             | 30                      | 403             | 31                      | 388             | 31                      |
| 20.0                          | 10.0       | 839             | 23                      | 784             | 24                      | 784             | 24                      | 768             | 25                      |
| 40.0                          | 0.01       | 9               | 23                      | 8               | 24                      | 8               | 23                      | 7               | 24                      |
| 40.0                          | 0.1        | 19              | 31                      | 16              | 32                      | 16              | 30                      | 14              | 32                      |
| 40.0                          | 1.0        | 56              | 36                      | 48              | 37                      | 44              | 36                      | 43              | 37                      |
| 40.0                          | 10.0       | 167             | 38                      | 149             | 38                      | 139             | 37                      | 138             | 37                      |

**Cuadro D 3.** Valores promedio de módulo dinámico y ángulo de fase medidos para las mezclas con nanocal.

| <b>Mezclas con nanocal</b>    |            |                 |                         |                 |                         |                 |                         |                 |                         |
|-------------------------------|------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|
| Temperatura                   | Frecuencia | Secos           |                         | 1 Ciclo         |                         | 3 Ciclos        |                         | 6 Ciclos        |                         |
|                               |            | Módulo Promedio | Ángulo de fase Promedio | Módulo Promedio | Ángulo de fase Promedio | Módulo Promedio | Ángulo de fase Promedio | Módulo Promedio | Ángulo de fase Promedio |
| Cº                            | Hz         | ksi             | Grados                  | ksi             | Grados                  | ksi             | Grados                  | ksi             | Grados                  |
| <b>Mezclas de 9,5 mm TMN</b>  |            |                 |                         |                 |                         |                 |                         |                 |                         |
| 4.0                           | 0.1        | 973             | 18                      | 716             | 20                      | 616             | 20                      | 578             | 22                      |
| 4.0                           | 1.0        | 1406            | 13                      | 1082            | 15                      | 936             | 15                      | 908             | 17                      |
| 4.0                           | 10.0       | 1859            | 10                      | 1487            | 11                      | 1295            | 12                      | 1286            | 13                      |
| 20.0                          | 0.1        | 202             | 33                      | 148             | 35                      | 137             | 34                      | 112             | 34                      |
| 20.0                          | 1.0        | 417             | 29                      | 320             | 30                      | 299             | 30                      | 255             | 31                      |
| 20.0                          | 10.0       | 763             | 23                      | 604             | 24                      | 566             | 24                      | 509             | 26                      |
| 40.0                          | 0.01       | 9               | 27                      | 7               | 28                      | 5               | 27                      | 5               | 26                      |
| 40.0                          | 0.1        | 21              | 32                      | 14              | 34                      | 11              | 34                      | 9               | 32                      |
| 40.0                          | 1.0        | 55              | 36                      | 37              | 38                      | 27              | 39                      | 23              | 38                      |
| 40.0                          | 10.0       | 164             | 35                      | 116             | 37                      | 89              | 38                      | 76              | 38                      |
| <b>Mezclas de 12,5 mm TMN</b> |            |                 |                         |                 |                         |                 |                         |                 |                         |
| 4.0                           | 0.1        | 1000            | 18                      | 887             | 20                      | 948             | 19                      | 804             | 19                      |
| 4.0                           | 1.0        | 1447            | 13                      | 1332            | 15                      | 1404            | 15                      | 1194            | 15                      |
| 4.0                           | 10.0       | 1908            | 10                      | 1802            | 11                      | 1885            | 11                      | 1624            | 11                      |
| 20.0                          | 0.1        | 243             | 33                      | 203             | 35                      | 217             | 33                      | 177             | 34                      |
| 20.0                          | 1.0        | 501             | 28                      | 440             | 29                      | 455             | 29                      | 378             | 29                      |
| 20.0                          | 10.0       | 890             | 21                      | 813             | 22                      | 828             | 22                      | 701             | 23                      |
| 40.0                          | 0.01       | 8               | 25                      | 6               | 22                      | 7               | 28                      | 7               | 27                      |
| 40.0                          | 0.1        | 18              | 33                      | 13              | 34                      | 18              | 34                      | 15              | 33                      |
| 40.0                          | 1.0        | 49              | 38                      | 35              | 39                      | 49              | 38                      | 38              | 38                      |
| 40.0                          | 10.0       | 160             | 37                      | 118             | 39                      | 158             | 37                      | 126             | 38                      |



**Figura D 1.** Resultados de los MD medidos para las mezclas de 9,5 mm.



**Figura D 2.** Resultados de los MD medidos para las mezclas de 12,5 mm.

**Cuadro D 4.** Valores de frecuencias y módulos para las mezclas sin ciclos de acondicionamiento.

| Mezclas secas de 9.5 mm |        |                     |        |                     |        | Mezclas secas de 12.5 mm |        |                     |        |                     |        |
|-------------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|--------------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|
| Control                 |        | Cal                 |        | Nanocal             |        | Control                  |        | Cal                 |        | Nanocal             |        |
| Frecuencia reducida     | E* ksi | Frecuencia reducida | E* ksi | Frecuencia reducida | E* ksi | Frecuencia reducida      | E* ksi | Frecuencia reducida | E* ksi | Frecuencia reducida | E* ksi |
| 4.5E+05                 | 2507.7 | 2.9E+05             | 2537.4 | 3.8E+05             | 2651.8 | 3.5E+05                  | 2420.1 | 2.7E+05             | 2784.8 | 6.9E+05             | 2744.7 |
| 1.8E+05                 | 2408.5 | 1.2E+05             | 2436.9 | 1.5E+05             | 2560.4 | 1.4E+05                  | 2309.7 | 1.1E+05             | 2695.2 | 2.8E+05             | 2664.5 |
| 9.0E+04                 | 2325.7 | 5.8E+04             | 2352.3 | 7.5E+04             | 2481.9 | 7.0E+04                  | 2217.3 | 5.4E+04             | 2617.0 | 1.4E+05             | 2595.4 |
| 1.8E+04                 | 2107.1 | 1.2E+04             | 2126.4 | 1.5E+04             | 2266.3 | 1.4E+04                  | 1973.3 | 1.1E+04             | 2397.0 | 2.8E+04             | 2403.8 |
| 9.0E+03                 | 2001.9 | 5.8E+03             | 2016.6 | 7.5E+03             | 2158.5 | 7.0E+03                  | 1856.2 | 5.4E+03             | 2284.5 | 1.4E+04             | 2307.0 |
| 1.8E+03                 | 1734.5 | 1.2E+03             | 1735.4 | 1.5E+03             | 1874.6 | 1.4E+03                  | 1561.5 | 1.1E+03             | 1982.0 | 2.8E+03             | 2048.0 |
| 3.1E+03                 | 1827.5 | 2.5E+03             | 1872.5 | 2.8E+03             | 1991.3 | 2.7E+03                  | 1687.6 | 2.4E+03             | 2138.8 | 3.8E+03             | 2103.5 |
| 1.2E+03                 | 1668.1 | 1.0E+03             | 1706.5 | 1.1E+03             | 1819.8 | 1.1E+03                  | 1514.3 | 9.6E+02             | 1957.4 | 1.5E+03             | 1940.6 |
| 6.2E+02                 | 1542.7 | 5.0E+02             | 1575.1 | 5.7E+02             | 1682.0 | 5.4E+02                  | 1379.4 | 4.8E+02             | 1809.3 | 7.6E+02             | 1808.4 |
| 1.2E+02                 | 1243.6 | 1.0E+02             | 1259.3 | 1.1E+02             | 1344.0 | 1.1E+02                  | 1064.3 | 9.6E+01             | 1439.6 | 1.5E+02             | 1478.4 |
| 6.2E+01                 | 1114.9 | 5.0E+01             | 1122.9 | 5.7E+01             | 1195.6 | 5.4E+01                  | 932.7  | 4.8E+01             | 1275.2 | 7.6E+01             | 1330.5 |
| 1.2E+01                 | 829.1  | 1.0E+01             | 820.2  | 1.1E+01             | 863.0  | 1.1E+01                  | 651.4  | 9.6E+00             | 904.3  | 1.5E+01             | 990.0  |
| 1.8E+01                 | 894.4  | 1.8E+01             | 931.4  | 1.8E+01             | 958.2  | 1.8E+01                  | 736.9  | 1.8E+01             | 1049.7 | 1.8E+01             | 1022.1 |
| 7.2E+00                 | 740.8  | 7.3E+00             | 766.1  | 7.3E+00             | 778.0  | 7.3E+00                  | 588.7  | 7.4E+00             | 845.8  | 7.1E+00             | 837.6  |
| 3.6E+00                 | 633.3  | 3.7E+00             | 650.3  | 3.6E+00             | 652.4  | 3.6E+00                  | 488.4  | 3.7E+00             | 703.3  | 3.6E+00             | 707.4  |
| 7.2E-01                 | 419.1  | 7.3E-01             | 420.6  | 7.3E-01             | 406.6  | 7.3E-01                  | 299.2  | 7.4E-01             | 426.0  | 7.1E-01             | 448.0  |
| 3.6E-01                 | 343.6  | 3.7E-01             | 340.3  | 3.6E-01             | 322.8  | 3.6E-01                  | 236.8  | 3.7E-01             | 332.8  | 3.6E-01             | 357.7  |
| 7.2E-02                 | 207.0  | 7.3E-02             | 197.6  | 7.3E-02             | 178.3  | 7.3E-02                  | 131.2  | 7.4E-02             | 176.0  | 7.1E-02             | 199.3  |
| 1.8E-01                 | 279.7  | 2.3E-01             | 292.1  | 2.0E-01             | 261.6  | 2.1E-01                  | 194.4  | 2.4E-01             | 281.9  | 1.5E-01             | 262.6  |
| 7.3E-02                 | 208.1  | 9.1E-02             | 213.6  | 8.0E-02             | 185.4  | 8.4E-02                  | 138.3  | 9.5E-02             | 195.5  | 5.9E-02             | 185.3  |
| 3.7E-02                 | 164.4  | 4.6E-02             | 166.3  | 4.0E-02             | 140.8  | 4.2E-02                  | 105.7  | 4.7E-02             | 145.9  | 3.0E-02             | 140.1  |
| 7.3E-03                 | 92.2   | 9.1E-03             | 89.4   | 8.0E-03             | 71.8   | 8.4E-03                  | 55.2   | 9.5E-03             | 71.4   | 5.9E-03             | 70.2   |
| 3.7E-03                 | 71.2   | 4.6E-03             | 67.7   | 4.0E-03             | 53.3   | 4.2E-03                  | 41.6   | 4.7E-03             | 52.1   | 3.0E-03             | 51.6   |
| 7.3E-04                 | 38.7   | 9.1E-04             | 35.1   | 8.0E-04             | 26.7   | 8.4E-04                  | 21.6   | 9.5E-04             | 25.5   | 5.9E-04             | 25.1   |
| 3.0E-03                 | 65.8   | 4.4E-03             | 66.9   | 3.5E-03             | 50.3   | 3.8E-03                  | 39.9   | 4.7E-03             | 52.2   | 2.0E-03             | 43.3   |
| 1.2E-03                 | 46.5   | 1.8E-03             | 46.0   | 1.4E-03             | 33.9   | 1.5E-03                  | 27.4   | 1.9E-03             | 34.6   | 8.0E-04             | 28.7   |
| 6.0E-04                 | 35.7   | 8.9E-04             | 34.7   | 7.0E-04             | 25.3   | 7.5E-04                  | 20.8   | 9.5E-04             | 25.5   | 4.0E-04             | 21.1   |
| 1.2E-04                 | 19.6   | 1.8E-04             | 18.2   | 1.4E-04             | 13.2   | 1.5E-04                  | 11.2   | 1.9E-04             | 13.1   | 8.0E-05             | 10.6   |
| 6.0E-05                 | 15.3   | 8.9E-05             | 13.9   | 7.0E-05             | 10.2   | 7.5E-05                  | 8.7    | 9.5E-05             | 10.1   | 4.0E-05             | 8.1    |
| 1.2E-05                 | 8.9    | 1.8E-05             | 7.8    | 1.4E-05             | 5.9    | 1.5E-05                  | 5.2    | 1.9E-05             | 5.9    | 8.0E-06             | 4.5    |

**Cuadro D 5.** Valores de frecuencias y módulos para las mezclas con 1 ciclo de acondicionamiento.

| Mezclas de 9.5 mm con 1 ciclo de acondicionamiento |        |                     |        |                     |        | Mezclas de 12.5 mm con 1 ciclo de acondicionamiento |        |                     |        |                     |        |
|--|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|---|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|
| Control  |        | Cal                 |        | Nanocal             |        | Control   |        | Cal                 |        | Nanocal             |        |
| Frecuencia reducida                                | E* ksi | Frecuencia reducida | E* ksi | Frecuencia reducida | E* ksi | Frecuencia reducida                                 | E* ksi | Frecuencia reducida | E* ksi | Frecuencia reducida | E* ksi |
| 3.2E+05  | 2280.8 | 4.1E+05             | 2489.2 | 4.2E+05             | 2430.3 | 3.8E+05   | 2588.2 | 2.6E+05             | 2741.6 | 1.0E+06             | 2734.0 |
| 1.3E+05  | 2162.0 | 1.6E+05             | 2387.2 | 1.7E+05             | 2320.8 | 1.5E+05   | 2477.3 | 1.0E+05             | 2644.8 | 4.0E+05             | 2649.4 |
| 6.5E+04  | 2064.7 | 8.2E+04             | 2301.9 | 8.4E+04             | 2229.4 | 7.7E+04   | 2382.1 | 5.1E+04             | 2560.8 | 2.0E+05             | 2576.8 |
| 1.3E+04  | 1815.7 | 1.6E+04             | 2076.3 | 1.7E+04             | 1988.4 | 1.5E+04   | 2121.8 | 1.0E+04             | 2326.4 | 4.0E+04             | 2376.9 |
| 6.5E+03  | 1699.7 | 8.2E+03             | 1967.5 | 8.4E+03             | 1872.8 | 7.7E+03   | 1993.0 | 5.1E+03             | 2207.8 | 2.0E+04             | 2276.6 |
| 1.3E+03  | 1415.8 | 1.6E+03             | 1691.2 | 1.7E+03             | 1581.7 | 1.5E+03   | 1660.1 | 1.0E+03             | 1892.8 | 4.0E+03             | 2010.2 |
| 2.6E+03  | 1542.8 | 3.0E+03             | 1795.0 | 3.0E+03             | 1688.3 | 2.9E+03   | 1793.7 | 2.3E+03             | 2060.9 | 4.6E+03             | 2033.9 |
| 1.0E+03  | 1378.2 | 1.2E+03             | 1630.8 | 1.2E+03             | 1516.3 | 1.1E+03   | 1595.2 | 9.4E+02             | 1873.4 | 1.8E+03             | 1864.7 |
| 5.2E+02  | 1252.2 | 5.9E+02             | 1501.8 | 6.0E+02             | 1382.5 | 5.7E+02   | 1439.1 | 4.7E+02             | 1721.8 | 9.1E+02             | 1728.6 |
| 1.0E+02  | 963.7  | 1.2E+02             | 1195.1 | 1.2E+02             | 1069.7 | 1.1E+02   | 1072.7 | 9.4E+01             | 1349.1 | 1.8E+02             | 1393.8 |
| 5.2E+01  | 845.0  | 5.9E+01             | 1064.0 | 6.0E+01             | 938.9  | 5.7E+01   | 920.5  | 4.7E+01             | 1186.1 | 9.1E+01             | 1246.2 |
| 1.0E+01  | 593.5  | 1.2E+01             | 775.4  | 1.2E+01             | 658.4  | 1.1E+01   | 602.5  | 9.4E+00             | 825.2  | 1.8E+01             | 912.1  |
| 1.8E+01  | 675.8  | 1.8E+01             | 849.0  | 1.8E+01             | 726.6  | 1.8E+01   | 688.0  | 1.8E+01             | 971.9  | 1.8E+01             | 904.4  |
| 7.3E+00  | 543.0  | 7.2E+00             | 694.6  | 7.2E+00             | 580.2  | 7.3E+00   | 525.5  | 7.4E+00             | 775.2  | 7.0E+00             | 729.7  |
| 3.7E+00  | 453.1  | 3.6E+00             | 587.5  | 3.6E+00             | 481.1  | 3.6E+00   | 419.3  | 3.7E+00             | 639.5  | 3.5E+00             | 608.9  |
| 7.3E-01  | 282.0  | 7.2E-01             | 377.5  | 7.2E-01             | 294.2  | 7.3E-01   | 231.5  | 7.4E-01             | 380.4  | 7.0E-01             | 375.1  |
| 3.7E-01  | 224.7  | 3.6E-01             | 305.0  | 3.6E-01             | 232.4  | 3.6E-01   | 174.5  | 3.7E-01             | 295.0  | 3.5E-01             | 296.3  |
| 7.3E-02  | 126.1  | 7.2E-02             | 176.8  | 7.2E-02             | 127.9  | 7.3E-02   | 86.3   | 7.4E-02             | 153.8  | 7.0E-02             | 161.5  |
| 2.2E-01  | 187.7  | 1.9E-01             | 247.8  | 1.9E-01             | 184.2  | 2.0E-01   | 135.0  | 2.4E-01             | 251.3  | 1.2E-01             | 201.0  |
| 8.7E-02  | 134.5  | 7.7E-02             | 180.4  | 7.6E-02             | 130.2  | 8.0E-02   | 90.0   | 9.7E-02             | 173.1  | 4.9E-02             | 139.7  |
| 4.3E-02  | 103.1  | 3.8E-02             | 140.1  | 3.8E-02             | 99.0   | 4.0E-02   | 65.6   | 4.9E-02             | 128.6  | 2.5E-02             | 104.7  |
| 8.7E-03  | 53.6   | 7.7E-03             | 75.2   | 7.6E-03             | 50.9   | 8.0E-03   | 31.4   | 9.7E-03             | 62.5   | 4.9E-03             | 51.9   |
| 4.3E-03  | 40.0   | 3.8E-03             | 56.9   | 3.8E-03             | 37.9   | 4.0E-03   | 23.0   | 4.9E-03             | 45.6   | 2.5E-03             | 38.1   |
| 8.7E-04  | 19.9   | 7.7E-04             | 29.6   | 7.6E-04             | 19.2   | 8.0E-04   | 11.6   | 9.7E-04             | 22.3   | 4.9E-04             | 18.7   |
| 4.0E-03  | 38.8   | 3.2E-03             | 53.1   | 3.2E-03             | 35.1   | 3.5E-03   | 21.6   | 5.0E-03             | 46.1   | 1.4E-03             | 29.9   |
| 1.6E-03  | 26.1   | 1.3E-03             | 36.5   | 1.3E-03             | 23.8   | 1.4E-03   | 14.5   | 2.0E-03             | 30.6   | 5.7E-04             | 20.0   |
| 8.1E-04  | 19.3   | 6.5E-04             | 27.6   | 6.3E-04             | 17.8   | 6.9E-04   | 10.9   | 1.0E-03             | 22.5   | 2.8E-04             | 14.8   |
| 1.6E-04  | 9.6    | 1.3E-04             | 14.5   | 1.3E-04             | 9.4    | 1.4E-04   | 6.0    | 2.0E-04             | 11.6   | 5.7E-05             | 7.7    |
| 8.1E-05  | 7.2    | 6.5E-05             | 11.2   | 6.3E-05             | 7.2    | 6.9E-05   | 4.8    | 1.0E-04             | 9.0    | 2.8E-05             | 6.0    |
| 1.6E-05  | 3.8    | 1.3E-05             | 6.3    | 1.3E-05             | 4.1    | 1.4E-05   | 3.1    | 2.0E-05             | 5.3    | 5.7E-06             | 3.5    |



**Cuadro D 6.** Valores de frecuencias y módulos para las mezclas con 3 ciclos de acondicionamiento.

| Mezclas de 9.5 mm con 3 ciclo de acondicionamiento |        |                     |        |                     |        | Mezclas de 12.5 mm con 3 ciclo de acondicionamiento |        |                     |        |                     |        |
|--|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|---|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|
| Control  |        | Cal                 |        | Nanocal             |        | Control   |        | Cal                 |        | Nanocal             |        |
| Frecuencia reducida                                | E* ksi | Frecuencia reducida | E* ksi | Frecuencia reducida | E* ksi | Frecuencia reducida                                 | E* ksi | Frecuencia reducida | E* ksi | Frecuencia reducida | E* ksi |
| 4.6E+05  | 2283.4 | 6.2E+05             | 2487.6 | 8.4E+05             | 2321.7 | 3.2E+05   | 2263.0 | 2.8E+05             | 2789.0 | 4.7E+05             | 2700.6 |
| 1.8E+05  | 2163.0 | 2.5E+05             | 2388.5 | 3.4E+05             | 2211.6 | 1.3E+05   | 2133.4 | 1.1E+05             | 2690.9 | 1.9E+05             | 2612.5 |
| 9.2E+04  | 2064.6 | 1.2E+05             | 2305.1 | 1.7E+05             | 2121.1 | 6.5E+04   | 2026.5 | 5.6E+04             | 2605.5 | 9.4E+04             | 2536.9 |
| 1.8E+04  | 1813.1 | 2.5E+04             | 2082.6 | 3.4E+04             | 1887.5 | 1.3E+04   | 1751.2 | 1.1E+04             | 2366.8 | 1.9E+04             | 2328.6 |
| 9.2E+03  | 1696.2 | 1.2E+04             | 1974.5 | 1.7E+04             | 1777.7 | 6.5E+03   | 1622.7 | 5.6E+03             | 2245.7 | 9.4E+03             | 2224.1 |
| 1.8E+03  | 1410.6 | 2.5E+03             | 1697.4 | 3.4E+03             | 1505.7 | 1.3E+03   | 1310.1 | 1.1E+03             | 1923.4 | 1.9E+03             | 1947.4 |
| 3.1E+03  | 1505.9 | 3.6E+03             | 1764.9 | 4.2E+03             | 1544.6 | 2.6E+03   | 1448.7 | 2.4E+03             | 2087.1 | 3.2E+03             | 2041.0 |
| 1.2E+03  | 1340.0 | 1.4E+03             | 1597.5 | 1.7E+03             | 1383.6 | 1.1E+03   | 1268.4 | 9.8E+02             | 1894.4 | 1.3E+03             | 1871.6 |
| 6.2E+02  | 1213.5 | 7.2E+02             | 1465.9 | 8.4E+02             | 1260.2 | 5.3E+02   | 1131.9 | 4.9E+02             | 1738.6 | 6.3E+02             | 1734.9 |
| 1.2E+02  | 926.1  | 1.4E+02             | 1153.3 | 1.7E+02             | 976.6  | 1.1E+02   | 827.2  | 9.8E+01             | 1356.1 | 1.3E+02             | 1397.4 |
| 6.2E+01  | 808.9  | 7.2E+01             | 1020.1 | 8.4E+01             | 859.4  | 5.3E+01   | 706.1  | 4.9E+01             | 1189.3 | 6.3E+01             | 1248.2 |
| 1.2E+01  | 562.8  | 1.4E+01             | 729.0  | 1.7E+01             | 609.9  | 1.1E+01   | 461.4  | 9.8E+00             | 821.6  | 1.3E+01             | 910.0  |
| 1.8E+01  | 615.4  | 1.8E+01             | 765.2  | 1.8E+01             | 617.8  | 1.8E+01   | 538.9  | 1.8E+01             | 960.9  | 1.8E+01             | 982.6  |
| 7.2E+00  | 489.4  | 7.2E+00             | 614.2  | 7.1E+00             | 493.5  | 7.3E+00   | 414.2  | 7.3E+00             | 761.9  | 7.2E+00             | 799.6  |
| 3.6E+00  | 405.0  | 3.6E+00             | 511.2  | 3.5E+00             | 410.1  | 3.7E+00   | 333.4  | 3.7E+00             | 625.5  | 3.6E+00             | 671.3  |
| 7.2E-01  | 247.4  | 7.2E-01             | 314.8  | 7.1E-01             | 253.3  | 7.3E-01   | 190.1  | 7.3E-01             | 367.8  | 7.2E-01             | 418.9  |
| 3.6E-01  | 195.6  | 3.6E-01             | 249.2  | 3.5E-01             | 201.5  | 3.7E-01   | 145.9  | 3.7E-01             | 283.9  | 3.6E-01             | 332.2  |
| 7.2E-02  | 107.9  | 7.2E-02             | 137.3  | 7.1E-02             | 113.0  | 7.3E-02   | 75.6   | 7.3E-02             | 146.7  | 7.2E-02             | 182.1  |
| 1.8E-01  | 152.9  | 1.6E-01             | 184.9  | 1.3E-01             | 143.3  | 2.2E-01   | 118.4  | 2.3E-01             | 237.5  | 1.8E-01             | 258.4  |
| 7.3E-02  | 108.1  | 6.2E-02             | 130.2  | 5.4E-02             | 101.8  | 8.6E-02   | 81.1   | 9.3E-02             | 162.6  | 7.2E-02             | 181.6  |
| 3.6E-02  | 82.2   | 3.1E-02             | 98.6   | 2.7E-02             | 77.7   | 4.3E-02   | 60.4   | 4.7E-02             | 120.4  | 3.6E-02             | 136.9  |
| 7.3E-03  | 42.0   | 6.2E-03             | 50.1   | 5.4E-03             | 40.4   | 8.6E-03   | 29.9   | 9.3E-03             | 58.4   | 7.2E-03             | 68.1   |
| 3.6E-03  | 31.2   | 3.1E-03             | 37.2   | 2.7E-03             | 30.2   | 4.3E-03   | 22.1   | 4.7E-03             | 42.7   | 3.6E-03             | 49.8   |
| 7.3E-04  | 15.5   | 6.2E-04             | 18.6   | 5.4E-04             | 15.4   | 8.6E-04   | 11.1   | 9.3E-04             | 21.1   | 7.2E-04             | 24.0   |
| 2.9E-03  | 28.3   | 2.2E-03             | 32.0   | 1.7E-03             | 24.8   | 4.0E-03   | 21.4   | 4.6E-03             | 42.5   | 2.8E-03             | 44.9   |
| 1.2E-03  | 19.0   | 8.8E-04             | 21.5   | 6.7E-04             | 16.9   | 1.6E-03   | 14.4   | 1.9E-03             | 28.3   | 1.1E-03             | 29.6   |
| 5.8E-04  | 14.0   | 4.4E-04             | 16.0   | 3.4E-04             | 12.6   | 8.0E-04   | 10.8   | 9.3E-04             | 21.0   | 5.7E-04             | 21.7   |
| 1.2E-04  | 7.1    | 8.8E-05             | 8.3    | 6.7E-05             | 6.6    | 1.6E-04   | 5.7    | 1.9E-04             | 11.1   | 1.1E-04             | 10.8   |
| 5.8E-05  | 5.3    | 4.4E-05             | 6.4    | 3.4E-05             | 5.1    | 8.0E-05   | 4.4    | 9.3E-05             | 8.7    | 5.7E-05             | 8.1    |
| 1.2E-05  | 2.8    | 8.8E-06             | 3.6    | 6.7E-06             | 2.8    | 1.6E-05   | 2.6    | 1.9E-05             | 5.2    | 1.1E-05             | 4.5    |

**Cuadro D 7.** Valores de frecuencias y módulos para las mezclas con 6 ciclos de acondicionamiento.

| Mezclas de 9.5 mm con 6 ciclo de acondicionamiento |        |                     |        |                     |        | Mezclas de 12.5 mm con 6 ciclo de acondicionamiento |        |                     |        |                     |        |
|--|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|---|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|
| Control  |        | Cal                 |        | Nanocal             |        | Control   |        | Cal                 |        | Nanocal             |        |
| Frecuencia reducida                                | E* ksi | Frecuencia reducida | E* ksi | Frecuencia reducida | E* ksi | Frecuencia reducida                                 | E* ksi | Frecuencia reducida | E* ksi | Frecuencia reducida | E* ksi |
| 2.0E+05  | 2027.3 | 7.2E+05             | 2426.3 | 6.8E+05             | 2344.4 | 4.8E+05   | 2275.7 | 2.7E+05             | 2797.1 | 5.6E+05             | 2570.8 |
| 7.8E+04  | 1888.7 | 2.9E+05             | 2320.9 | 2.7E+05             | 2227.8 | 1.9E+05   | 2145.6 | 1.1E+05             | 2701.7 | 2.2E+05             | 2471.1 |
| 3.9E+04  | 1777.5 | 1.4E+05             | 2232.6 | 1.4E+05             | 2131.4 | 9.6E+04   | 2038.3 | 5.4E+04             | 2618.3 | 1.1E+05             | 2386.8 |
| 7.8E+03  | 1502.7 | 2.9E+04             | 1998.4 | 2.7E+04             | 1881.3 | 1.9E+04   | 1761.6 | 1.1E+04             | 2383.4 | 2.2E+04             | 2160.7 |
| 3.9E+03  | 1379.5 | 1.4E+04             | 1885.5 | 1.4E+04             | 1763.3 | 9.6E+03   | 1632.5 | 5.4E+03             | 2263.4 | 1.1E+04             | 2050.2 |
| 7.8E+02  | 1091.4 | 2.9E+03             | 1599.4 | 2.7E+03             | 1471.2 | 1.9E+03   | 1318.2 | 1.1E+03             | 1941.9 | 2.2E+03             | 1765.8 |
| 2.1E+03  | 1263.3 | 3.9E+03             | 1655.3 | 3.8E+03             | 1532.6 | 3.2E+03   | 1418.3 | 2.4E+03             | 2108.2 | 3.4E+03             | 1845.0 |
| 8.2E+02  | 1099.5 | 1.6E+03             | 1483.6 | 1.5E+03             | 1360.7 | 1.3E+03   | 1236.7 | 9.6E+02             | 1915.8 | 1.4E+03             | 1673.0 |
| 4.1E+02  | 978.0  | 7.8E+02             | 1350.1 | 7.6E+02             | 1229.3 | 6.4E+02   | 1100.0 | 4.8E+02             | 1759.4 | 6.9E+02             | 1537.3 |
| 8.2E+01  | 713.1  | 1.6E+02             | 1039.2 | 1.5E+02             | 930.2  | 1.3E+02   | 797.2  | 9.6E+01             | 1373.1 | 1.4E+02             | 1213.0 |
| 4.1E+01  | 610.0  | 7.8E+01             | 909.7  | 7.6E+01             | 808.3  | 6.4E+01   | 678.0  | 4.8E+01             | 1203.7 | 6.9E+01             | 1074.1 |
| 8.2E+00  | 403.6  | 1.6E+01             | 633.5  | 1.5E+01             | 554.2  | 1.3E+01   | 439.6  | 9.6E+00             | 829.0  | 1.4E+01             | 769.0  |
| 1.9E+01  | 502.1  | 1.8E+01             | 655.1  | 1.8E+01             | 577.9  | 1.8E+01   | 485.8  | 1.8E+01             | 974.3  | 1.8E+01             | 816.9  |
| 7.4E+00  | 392.5  | 7.1E+00             | 516.9  | 7.1E+00             | 452.7  | 7.2E+00   | 369.7  | 7.4E+00             | 770.9  | 7.2E+00             | 657.2  |
| 3.7E+00  | 320.8  | 3.6E+00             | 424.7  | 3.6E+00             | 370.2  | 3.6E+00   | 295.5  | 3.7E+00             | 631.3  | 3.6E+00             | 547.7  |
| 7.4E-01  | 190.9  | 7.1E-01             | 254.5  | 7.1E-01             | 220.0  | 7.2E-01   | 166.5  | 7.4E-01             | 367.7  | 7.2E-01             | 337.9  |
| 3.7E-01  | 149.6  | 3.6E-01             | 199.5  | 3.6E-01             | 172.0  | 3.6E-01   | 127.4  | 3.7E-01             | 282.2  | 3.6E-01             | 267.6  |
| 7.4E-02  | 81.6   | 7.1E-02             | 108.4  | 7.1E-02             | 93.2   | 7.2E-02   | 66.2   | 7.4E-02             | 143.5  | 7.2E-02             | 147.5  |
| 2.8E-01  | 134.8  | 1.5E-01             | 143.0  | 1.5E-01             | 124.2  | 1.8E-01   | 96.0   | 2.4E-01             | 236.3  | 1.6E-01             | 202.2  |
| 1.1E-01  | 95.5   | 5.8E-02             | 100.0  | 6.0E-02             | 86.8   | 7.1E-02   | 65.7   | 9.5E-02             | 160.3  | 6.6E-02             | 142.5  |
| 5.6E-02  | 72.8   | 2.9E-02             | 75.6   | 3.0E-02             | 65.6   | 3.5E-02   | 49.1   | 4.7E-02             | 117.8  | 3.3E-02             | 107.9  |
| 1.1E-02  | 37.8   | 5.8E-03             | 38.8   | 6.0E-03             | 33.6   | 7.1E-03   | 24.8   | 9.5E-03             | 56.0   | 6.6E-03             | 54.8   |
| 5.6E-03  | 28.3   | 2.9E-03             | 29.1   | 3.0E-03             | 25.1   | 3.5E-03   | 18.6   | 4.7E-03             | 40.6   | 3.3E-03             | 40.6   |
| 1.1E-03  | 14.5   | 5.8E-04             | 15.1   | 6.0E-04             | 13.0   | 7.1E-04   | 9.8    | 9.5E-04             | 19.7   | 6.6E-04             | 20.3   |
| 6.4E-03  | 30.0   | 1.9E-03             | 24.6   | 2.0E-03             | 21.4   | 2.8E-03   | 16.9   | 4.7E-03             | 40.6   | 2.4E-03             | 35.6   |
| 2.6E-03  | 20.5   | 7.7E-04             | 16.9   | 8.1E-04             | 14.7   | 1.1E-03   | 11.7   | 1.9E-03             | 26.7   | 9.7E-04             | 24.0   |
| 1.3E-03  | 15.4   | 3.9E-04             | 12.9   | 4.1E-04             | 11.1   | 5.6E-04   | 8.9    | 9.5E-04             | 19.7   | 4.9E-04             | 17.8   |
| 2.6E-04  | 8.0    | 7.7E-05             | 7.1    | 8.1E-05             | 6.1    | 1.1E-04   | 5.0    | 1.9E-04             | 10.2   | 9.7E-05             | 9.2    |
| 1.3E-04  | 6.1    | 3.9E-05             | 5.6    | 4.1E-05             | 4.7    | 5.6E-05   | 4.0    | 9.5E-05             | 7.9    | 4.9E-05             | 7.1    |
| 2.6E-05  | 3.4    | 7.7E-06             | 3.4    | 8.1E-06             | 2.8    | 1.1E-05   | 2.5    | 1.9E-05             | 4.8    | 9.7E-06             | 4.0    |