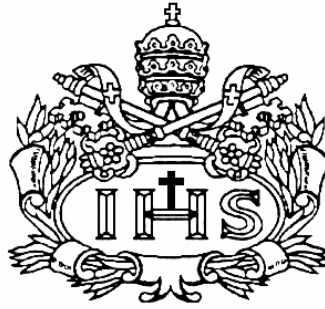


**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODULO RESILIENTE Y ENSAYOS
DE DEFORMACIÓN PERMANENTE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS DEL
TIPO (MDC2) EN BRIQUETAS COMPACTADAS CON MARTILLO
MARSHALL Y COMPACTADOR GIRATORIO**



JUAN MANUEL DÁVILA M.

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ, D.C.
2005.**

1. INTRODUCCIÓN	8
2. ANTECEDENTES Y MARCO CONCEPTUAL	11
2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO	11
2.2. MARCO CONCEPTUAL BASADO EN LOS ANTECEDENTES	12
2.2.1. MODULO RESILIENTE	12
2.2.1.1. INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES QUE COMPONEN LA MEZCLA EN EL MR.	12
2.2.1.2. INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES Y COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES QUE COMPONEN LA MEZCLA EN EL MR.	18
2.2.1.3. INFLUENCIA DEL TIPO DE ENSAYO EN EL COMPORTAMIENTO DE LA MEZCLA EN EL MR.....	21
2.2.2. DEFORMACIÓN PERMANENTE	23
2.2.2.1. INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES QUE COMPONEN LA MEZCLA EN LA DEFORMACIÓN PERMANENTE.	23
2.2.2.2. INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES Y COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES QUE COMPONEN LA MEZCLA EN LA DEFORMACIÓN PERMANENTE.....	27
2.2.2.3. INFLUENCIA DEL TIPO DE ENSAYO EN EL COMPORTAMIENTO DE LA MEZCLA EN EL MR.....	28
3. METODOS EMPLEADOS PARA LA DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS	31
3.1. PROCEDIMIENTO PARA LA DOSIFICACIÓN Y ELABORACIÓN DE BRIQUETAS	31
3.1.1. PREPARACION DE LAS BRIQUETAS	32
3.1.2. metodos de densificacion	35
3.1.2.1. MARTILLO MARSHALL.....	35
3.1.2.2. compactador giratorio	36
3.1.2.2.1. Historia del compactador giratorio.....	36
3.1.2.2.2. COMPACTACIÓN GIRATORIA	36
3.1.3. METODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE CONTENIDOS OPTIMOS DE ASFALTO:.....	40
3.1.3.1. método mARSHALL	40
3.2. PRINCIPIOS GENERALES DE DISEÑO POR METODO MARSHALL	48
3.3. principios generales. METODO SHRP- SUPERPAVE Nivel 1 (Diseño Volumétrico)	55
3.4. OTROS METODOS de diseño	57
4. CONCEPTOS GENERALES DE LA CARATERIZACION DE MEZCAS ASFALTICAS	59
4.1. PROPIEDADES GENERALES DE LOS MATERIALES	59
4.1.1. PROPIEDADES DEL AGREGADO	59
4.1.2. PROPIEDADES DEL LIGANTE	61

4.2. Propiedades volumétricas de las mezclas	63
4.3. CARACTERIZACION DINAMICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICA.....	66
4.3.1. MODULO RESILIENTE	66
4.3.1.1. DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS PARA OBTENCIÓN DEL MODULO	69
4.3.1.2. Modo de uso del software.....	72
4.3.1.3. DESCRIPCIÓN del formato de resultados.....	90
4.3.2. DEFORMACIÓN PERMANENTE	91
4.3.2.1. DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE	96
4.3.2.2. MODO DE USO DEL SOFTWARE.....	100
4.3.2.3. DESCRIPCIÓN del formato de resultados.....	108
4.3.3. N.a.t. (nottingham asphalt tester).....	110
5. DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ESTUDIO.....	114
5.1. RECOPIACIÓN de la INFORMACIÓN:.....	114
5.2. MATERIALES:	114
5.2.1. AGREGADOS CONCRESCOL.....	114
5.2.2. ASFALTO CONCRESCOL	116
5.3. Primer ensayo marshall:	117
5.4. COMPACTACIÓN BRIQUETAS MARTILLO MARSHALL y COMPACTADOR	
GIRATORIO:	118
5.4.1. procedimiento para la ELABORACIÓN de briquetas	118
5.5. ENSAYOS DE TENSIÓN INDIRECTA Y DEFORMACION PERMANENTE:	
120	
6. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS:.....	122
6.1. ANÁLISIS de resultados de peso ESPECÍFICO (Bulk).....	123
6.1.1. DESCRIPCIÓN de los resultados obtenidos	123
6.1.1.1. martillo marshall 75 golpes	123
6.1.1.2. compactador giratorio 115 – 140 –160 giros.....	123
6.1.2. influencia del método de compactación en la DENSIDAD Bulk.....	124
6.2. ANÁLISIS de resultados de ensayos de TENSIÓN indirecta.....	125
6.2.1. DESCRIPCIÓN de los resultados obtenidos	125
6.2.1.1. MARTILLO MARSHALL 75 GOLPES	125
6.2.1.1.1. MR - Densidad Bulk	126
6.2.1.1.2. MR – Estabilidad.....	128
6.2.1.1.3. MR – Flujo.....	130
6.2.1.2. compactador giratorio 115 giros	132
6.2.1.2.1. MR – Densidad Bulk 115 giros.....	134
6.2.1.2.2. MR - Estabilidad 115 giros	136
6.2.1.2.3. MR – Flujo 115 giros	138
6.2.1.3. compactador giratorio 140 giros	140
6.2.1.3.1. MR – Densidad Bulk 140 giros.....	142

6.2.1.3.2.	MR – Estabilidad 140 giros	144
6.2.1.3.3.	MR – Flujo 140 giros	145
6.2.1.4.	compactador giratorio 160 giros	147
6.2.1.4.1.	MR – Densidad Bulk 160 giros.....	148
6.2.1.4.2.	MR – Estabilidad 160 giros	150
6.2.1.4.3.	MR – Flujo 160 giros	152
6.2.2.	ANÁLISIS comparativo de ensayo.....	154
6.2.2.1.	según método de compactación	154
6.2.2.2.	según frecuencia de ensayo	156
6.2.2.3.	según temperatura de ensayo	157
6.2.2.4.	según densidad bulk, estabilidad y flujo	157
6.3.	ANÁLISIS de resultados de ensayos de DEFORMACIÓN permanente ...	158
6.3.1.	DESCRIPCIÓN de los resultados obtenidos	158
6.3.1.1.	martillo marshall 75 golpes	158
6.3.1.2.	análisis DEFORMACIÓN permanente – densidad bulk.....	160
6.3.1.3.	ANÁLISIS DEFORMACIÓN permanente – estabilidad.....	161
6.3.1.4.	ANÁLISIS DEFORMACIÓN permanente – Flujo	162
6.3.2.	ANÁLISIS DEFORMACIÓN permanente – Modulos resilientes	163
7.	CONCLUSIONES	165
8.	RECOMENDACIONES.....	169
9.	BIBLIOGRAFÍA	170
10.	Anexos.....	172

INDICE DE TABLAS:

Tabla 1: Variación módulos por contenido de asfalto, temperatura y tipo de método empleado.	13
Tabla 2: Variación módulos por tipo de agregado, temperatura y tipo de método empleado.....	15
Tabla 3: Variación módulos por contenido de vacíos, temperatura y tipo de método empleado..	17
Tabla 4: Variación módulos por el nivel de esfuerzo, temperatura y tipo de método empleado. .	19
Tabla 5: Variación módulos por la frecuencia de carga, temperatura y tipo de método empleado.	20
Tabla 6: Variación deformación permanente por contenido de vacíos y contenido de asfalto.	26
Tabla 7: Temperaturas optimas asfaltos Colombianos.....	34
Tabla 8: Numero de golpes por cara.....	34
Tabla 9: Causas y efectos que producen las bajas estabilidades en una mezcla.	48
Tabla 10: Causas y efectos de una baja resistencia a la fatiga.	49
Tabla 11: Causas y efectos de una baja resistencia al deslizamiento.	49
Tabla 12: Causas y efectos de una baja resistencia al deslizamiento.	50
Tabla 13: Causas y efectos de una baja durabilidad de las mezclas asfálticas.....	51
Tabla 14: Causas y efectos de una baja durabilidad de las mezclas asfálticas.....	51
Tabla 15: Ventajas y desventajas del método Marshall.	55
Tabla 16: tiempos de carga.....	77
Tabla 17: deformación horizontal objetivo	78
Tabla 18:Tabla resumen factores que afectan la resistencia a la deformación permanente	92
Tabla 19: Especificaciones Generales Cámara de Temperatura Controlada.....	113
Tabla 20: características físicas agregados CONCRESCOL S.A	115
Tabla 21: formula de trabajo de CONCRESCOL S.A	115
Tabla 22: características físicas del asfalto CONCRESCOL S.A	116
Tabla 23: Resultados ensayo Marshall Concrecol.	117
Tabla 24: Resultado ensayo Marshall Laboratorio P.U.J.	117
Tabla 25: Especificaciones compactador giratorio.....	119

INDICE DE FIGURAS:

Figura 1: Variación módulos por contenido de asfalto, temperatura y tipo de método empleado.	13
Figura 2: Variación módulos por tipo de agregado, temperatura y tipo de método empleado.	15
Figura 3: Variación módulos por contenido de vacíos, temperatura y tipo de método empleado.	17
Figura 4: Variación módulos por el nivel de esfuerzo, temperatura y tipo de método empleado.	18
Figura 5: Variación módulos por la frecuencia de carga, temperatura y tipo de método empleado.	20
Figura 6: Comparación de la deformación permanente en especímenes de la misma mezcla sujetos a diferentes condiciones con agua.	30
Figura 7 : Equipo empleado método Marshall	33
Figura 8: Prensa giratoria de Texas	37
Figura 9: Compactador Giratorio LCDP (Francés)	38
Figura 10: Compactador Giratorio SuperPave	39
Figura 11: Mordaza y Medidor de flujo	42
Figura 12: Prensa de carga	43
Figura 13: Diagrama de componentes de una mezcla compactada.....	47
Figura 14: Curva de estabilidad.....	52
Figura 15: Curva de Flujo.....	53
Figura 16: Curva de porcentaje de vacíos.....	53
Figura 17: Estabilidad Marshall	54
Figura 18: Llenante Vs. Porcentaje de la máxima densidad teórica.....	61
Figura 19: Comportamiento visco - elástico del asfalto	62
Figura 20: Dependencia tiempo temperatura del cemento asfáltico.....	63
Figura 21: Porcentaje de vacíos Vs. Comportamiento de la mezcla	64
Figura 22: Dispositivo de prueba diametral para la determinación de modulo de resiliencia	68
Figura 23: Métodos de ensayo para modulo dinámico.....	69
Figura 24: Equipo NAT	70
Figura 25: Ventana 1	72
Figura 26: Ventana 2.....	73
Figura 27: Ventana 3.....	73
Figura 28: Ventana 4.....	74
Figura 29: Ventana 5.....	74
Figura 30: Ventana 6.....	75
Figura 31: Ventana 7.....	76
Figura 32: Ventana 8.....	77
Figura 33: Ventana 9.....	78
Figura 34: Ventana 10.....	79
Figura 35: Ventana 11.....	80
Figura 36: Ventana 12.....	80

Figura 37: Ventana 13.....	81
Figura 38: Ventana 14A	82
Figura 39: Ventana 14B	83
Figura 40: Ventana 15.....	84
Figura 41: Ventana 16.....	85
Figura 42: Ventana 17.....	86
Figura 43: Ventana 18.....	87
Figura 44: Ventana 19.....	88
Figura 45: Ventana 20.....	88
Figura 46: rotación de la briquea.....	89
Figura 47: Formato ensayo de Tensión indirecta	90
Figura 48: Ahullamiento por deficiencias en la capa asfaltica	93
Figura 49: Ahullamiento por deficiencias en las capas inferiores	95
Figura 50: Curva de Creep de la mezcla.....	98
Figura 51: Muestra en el equipo de Prueba (NAT).....	99
Figura 52: Ventana 1	100
Figura 53: Ventana 2.....	101
Figura 54: Ventana 3.....	101
Figura 55: Ventana 4.....	102
Figura 56: Ventana 5.....	102
Figura 57: Ventana 6.....	103
Figura 58: Ventana 7.....	104
Figura 59: Ventana 8A	105
Figura 60: Ventana 8B	105
Figura 61: Ventana 9.....	106
Figura 62: Ventana 10.....	106
Figura 63: Ventana 11	107
Figura 64: Ventana 1.....	107
Figura 65: Ventana de impresión.	108
Figura 66: Formato ensayo de deformación permanente.....	109
Figura 67: Equipo NAT.....	110
Figura 68: Marco de Carga.....	111
Figura 69: Bastidor, LVDT y Servovalvula.....	111
Figura 70: Curva granulométrica formula de trabajo CONCRESCOL S.A	116
Figura 71: Esquema mezclas analizadas.....	118
Figura72: Esquema general ensayos de tensión indirecta.....	121
Figura 73: Esquema general ensayos de deformación permanente.	122
Figura 74: Densidad Bulk 75 golpes.....	123
Figura 75: Densidad Bulk 115-140-160 giros	124
Figura 76: Módulos resilientes 15°-25°-35° - 75 golpes.	125
Figura 77: Módulos resilientes 15° - Densidad Bulk - 75 golpes.	126
Figura 78: Módulos resilientes 25° - Densidad Bulk - 75 golpes.	127
Figura 79: Módulos resilientes 35° - Densidad Bulk - 75 golpes.	127
Figura 80: Módulos resilientes 15° - Estabilidad - 75 golpes.....	128
Figura 81: Modulo resiliente 25° - Estabilidad –75 golpes.....	129

Figura 82: Modulo resiliente 35° - Estabilidad –75 golpes.....	129
Figura 83: Modulo resiliente 15° - Flujo –75 golpes	130
Figura 84: Modulo resiliente 25° - Flujo –75 golpes	131
Figura 85: Modulo resiliente 35° - Flujo –75 golpes	131
Figura 86: Modulo resiliente 115 giros – 15°-25°-30°	132
Figura 87: Modulo resiliente 115 giros 15° - Densidad Bulk.....	134
Figura 88: Modulo resiliente 115 giros 25° - Densidad Bulk.....	134
Figura 89: Modulo resiliente 115 giros 30° - Densidad Bulk.....	135
Figura 90: Modulo resiliente 115 giros 15° - Estabilidad.....	136
Figura 91: Modulo resiliente 115 giros 25° - Estabilidad.....	136
Figura 92: Modulo resiliente 115 giros 30° - Estabilidad.....	137
Figura 93: Modulo resiliente 115 giros 15° - Flujo	138
Figura 94: Modulo resiliente 115 giros 25° - Flujo	138
Figura 95: Modulo resiliente 115 giros 30° - Flujo	139
Figura 96: Modulo resiliente 140 giros 15°-25°-30°	140
Figura 97: Modulo resiliente 140 giros 15° - Densidad Bulk.....	142
Figura 98: Modulo resiliente 140 giros 25° - Densidad Bulk.....	142
Figura 99: Modulo resiliente 140 giros 30° - Densidad Bulk.....	143
Figura 100: Modulo resiliente 140 giros 25° - Estabilidad.....	144
Figura 101: Modulo resiliente 140 giros 30° - Estabilidad.....	144
Figura 102: Modulo resiliente 140 giros 30° - Estabilidad.....	145
Figura 103: Modulo resiliente 140 giros 15° - Flujo	145
Figura 104: Modulo resiliente 140 giros 25° - Flujo	146
Figura 105: Modulo resiliente 140 giros 30° - Flujo	146
Figura 106: Modulo resiliente 160giros 15°-25°-30°	147
Figura 107: Modulo resiliente 160giros 15° - Densidad Bulk.....	148
Figura 108: Modulo resiliente 160giros 25° - Densidad Bulk.....	149
Figura 109: Modulo resiliente 160giros 30° - Densidad Bulk.....	149
Figura 110: Modulo resiliente 160giros 15° - Estabilidad.....	150
Figura 111: Modulo resiliente 160giros 25° - Estabilidad.....	151
Figura 112: Modulo resiliente 160giros 30° - Estabilidad.....	151
Figura 113: Modulo resiliente 160giros 15° - Flujo	152
Figura 114: Modulo resiliente 160giros 25° - Flujo	153
Figura 115: Modulo resiliente 160giros 30° - Flujo	153
Figura 116: Deformación permanente 75 golpes	158
Figura 117: Deformación permanente 3600 Pulsos - Densidad Bulk 75 golpes.....	160
Figura 118: Deformación permanente 3600 pulsos – Estabilidad – 75 golpes.....	161
Figura 119: Deformación permanente 3600 pulsos – Flujo – 75 golpes	162
Figura 120: Deformación permanente 3600 pulsos – Modulo resiliente 15°	163
Figura 121: Deformación permanente 3600 pulsos – Modulo resiliente 25°	163
Figura 122: Deformación permanente 3600 pulsos – Modulo resiliente 35°	164

1. INTRODUCCIÓN

El principal objetivo en el diseño de una mezcla asfáltica es la determinación de la proporción óptima de agregado y asfalto que garantice un mejor performance del pavimento y una manejabilidad adecuada para su colocación. Los métodos de diseño utilizados para la determinación del contenido de asfalto óptimo incluye una serie de procesos que los diferencia entre si y que pueden llegar a influir en el resultado final; adicionalmente, algunos de los métodos empleados en la actualidad solamente entregan información que permite establecer el porcentaje óptimo de ligante en términos volumétricos y considerando ensayos que de repente no resultan tan representativos o cae sobre ellos algunas discusiones, tal es el caso del ensayo de estabilidad y flujo del método Marshall. Por tal motivo se plantea verificar a través de la estimación de módulos y ensayos RLA si el porcentaje de asfalto óptimo realmente lo es y si aspectos como el método de compactación, las temperaturas y frecuencias de ensayo inciden o determinan cual puede ser el mejor valor para adoptar para el diseño de mezclas según el caso. Los métodos de compactación, que implica este diseño, fácilmente se pueden dividir en dos compactaciones por impacto y por amasado buscando reproducir teóricamente el comportamiento y las condiciones encontradas en campo. En los últimos años se ha demostrado que el comportamiento a largo plazo de una capa asfáltica en servicio, puede reproducirse en el laboratorio mediante la implementación de pruebas dinámicas como ensayos de tensión indirecta y de deformación permanente entre otros. La influencia del método de compactación en las características dinámicas de la mezcla no ha sido estudiada en su totalidad para el caso Colombiano, por lo cual se hace necesario complementar el tema para asfaltos y materiales producidos en el país.

El presente documento pretende determinar el comportamiento dinámico de las mezclas del tipo MDC-2, al evaluar el modulo resiliente y el resultado del ensayo de

deformaciones permanente en distintas condiciones de compactación, frecuencia y temperatura. Finalmente se pretende comparar el porcentaje de asfalto óptimo obtenido a través del método Marshall, con el porcentaje que muestre el mejor comportamiento de modulo resiliente y deformación permanente para diferentes condiciones de compactación.

En la Pontificia Universidad Javeriana trabajos de grado como, “ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE MODULOS RESILIENTES Y DEFORMACIONES PERMANENTES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS CON MARTILLO MARSHALL Y CON COMPACTADOR GIRATORIO” realizado por Jesús Ernesto Guzmán y Juan Carlos Rodríguez y “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE COMPACTACIÓN MARSHALL Y SHRP DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON MIRAS A IMPLEMENTAR EL MÉTODO DE DISEÑO VOLUMÉTRICO DE SUPERPAVE”, realizado por Saúl Cortes Medina y John Núñez Gómez, manejaron aspectos de fabricación, desarrollo de las briquetas, manejo deformaciones permanentes y módulos resilientes para porcentajes de asfalto diseñados por Método Marshall y Método volumétrico SHRP – Superpave nivel 1, estos trabajos de grado manejaron diseños de mezclas y ensayos para porcentajes óptimos de asfalto, desarrollando una base sólida para continuar, con la consecución de un numero confiable de datos, para así tener una base estadística confiable y poder predecir el comportamiento de las mezclas; dependiendo de factores como método de compactación, temperaturas, duración de carga y frecuencias.

Considerando lo anterior y para el alcance de los objetivos, se comenzó por el análisis de los trabajos de grado anteriormente mencionados, se prosiguió con la obtención de una fuente de materiales la cual pudiera asegurar homogeneidad y constancia en proveer de asfalto y agregados el proyecto. Posteriormente se elaboraron total de 57 briquetas, variando el método de compactación y el contenido de asfalto, a las cuales se les realizaron ensayo de estabilidad, flujo, tensión

indirecta y deformación permanente variando frecuencia y temperatura en dichos ensayos. Una vez se tenían los resultados se continuo con la etapa de análisis comparativo y conclusiones.

2. ANTECEDENTES Y MARCO CONCEPTUAL

2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

Los factores que afectan el comportamiento de las mezclas asfálticas han sido estudiados ampliamente a nivel mundial, entre las investigaciones mas importantes se encuentran: a nivel europeo investigadores como Almudaiheem y Al-Sagir realizaron estudios de la variación del modulo resiliente mediante pruebas diametrales con variaciones de frecuencia y contenido de asfalto, Corté en Francia realizo estudios sobre la incidencia del tipo de asfalto sobre el modulo resiliente y las deformaciones plásticas. En EEUU quizás el estudio mas completo y documentado es el realizado por Monismith et al. (1994) (complemento del estudio realizado previamente por Elliot et al. y Quintus et al. en 1991 en texas), quien por medio del Strategic Highway Research Program (SHRP) elaboraron un proyecto denominado A-003A, el cual incluye el desarrollo de un serie de pruebas aceleradas relacionadas con el comportamiento de mezclas asfálticas y métodos para el análisis de las interacciones asfalto-agregado que afectan significativamente el comportamiento del pavimento. Incluido dentro del alcance del proyecto A-003A se encuentra el desarrollo de reportes sobre deformaciones permanentes (roderas, SHRP A-415), fatiga (SHRP A-404) y módulos de resiliencia (rigidez, SHRP A-388). En cada uno de estos reportes, se establecen los factores que afectan la respuesta a dichos mecanismos, presentándose además una descripción de los ensayos utilizados para estudiar el comportamiento de las mezclas asfálticas bajo distintas condiciones de prueba.

Antecedentes de la incidencia de factores como tipo de mezcla, método de compactación, tipo de agregado, temperatura, frecuencia de carga, porcentaje y tipo

de asfalto, entre otros, obtenidos tanto en los trabajos de grado, anteriormente mencionados, como en las experiencias internacionales se exponen a continuación:

2.2. MARCO CONCEPTUAL BASADO EN LOS ANTECEDENTES.

2.2.1. MODULO RESILIENTE

Existen diversos factores que afectan el módulo de resiliencia del concreto asfáltico. A continuación se muestra un resumen de estos factores:

2.2.1.1. INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES QUE COMPONEN LA MEZCLA EN EL MR.

- **Contenido de asfalto:** Mediante pruebas diametrales de módulos los investigadores Almudaiheem y Al-Sugair en 1991 analizaron el efecto del contenido de asfalto sobre el módulo de resiliencia. “encontraron que los valores de MR decrecen con un incremento en el contenido de asfalto”. Monismith en 1994 utilizó dos contenidos diferentes de asfalto; el primero con el contenido óptimo de asfalto determinado con el procedimiento estándar de Hveem. El segundo contenido de asfalto fue fijado 0.6% mayor, correspondiendo, aproximadamente, al contenido de asfalto óptimo que se obtiene utilizando el método Marshall. “Considerando nuevamente los dos métodos (axial y diametral) y tres temperaturas de prueba (0°C, 20°C y 40°C)” la Tabla 1 muestra los resultados obtenidos:

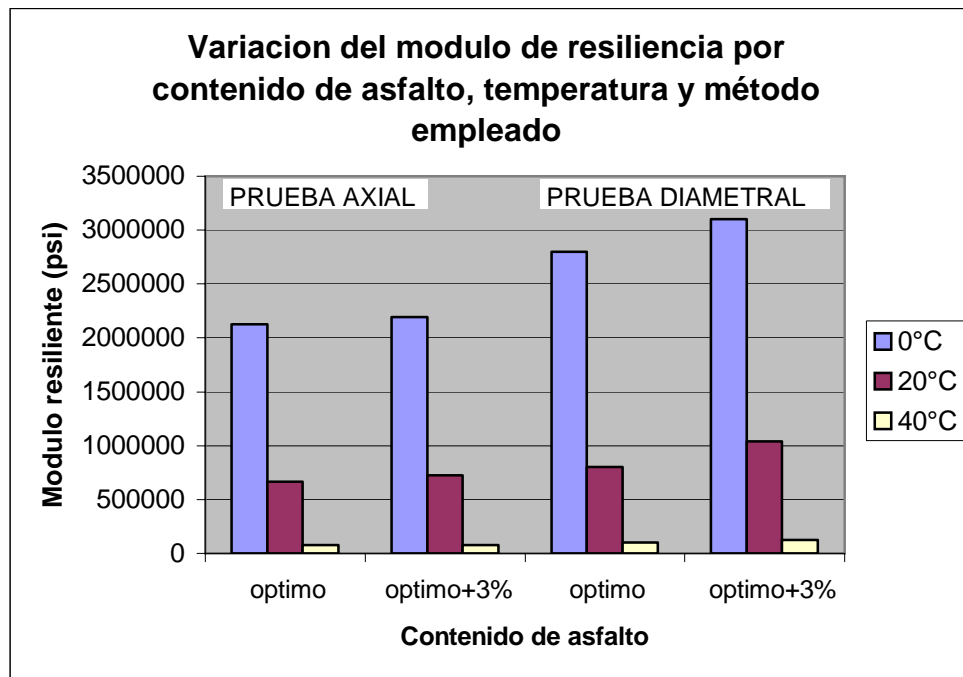


Figura 1: Variación módulos por contenido de asfalto, temperatura y tipo de método empleado.

Método de prueba	Contenido de asfalto	Módulo de resiliencia promedio, psi		
		0°C	20°C	40°C
Axial	Optimo	2,130,000	663,000	78,100
	Alto	2,190,000	722,000	77,200
Diametral	Optimo	3,100,000	1,040,000	123,000
	Alto	2,800,000	804,000	101,000

Tabla 1: Variación módulos por contenido de asfalto, temperatura y tipo de método empleado.

Fuente: Mecánica de materiales para Pavimentos

En la Figura 1 se observa de manera general, mayores módulos para ensayos diametrales, al igual que un aumentan del MR para contenidos de asfalto mayores al oprimo obtenido por el método Hveen. Y nuevamente se denota una disminución del MR con respecto al incremento de las temperaturas de prueba.

- **¹Tipo de agregado:** En 1991 los investigadores del grupo Elliott condujeron un estudio en el cual seis mezclas diferentes de concreto asfáltico fueron ensayadas con el fin de identificar claramente los efectos sobre las propiedades de las mezclas con variaciones de la granulometría de los agregados. Se utilizaron cinco granulometrías diferentes para cada mezcla “(mezcla de trabajo, fina, granular, granular-fina y fina-granular).”

Los análisis de la información obtenida reveló, una mayor influencia en las granulometrías fina-granular y granular-fina sobre las propiedades de las mezclas pero que “ninguna de las variaciones tiene un efecto significativo sobre el módulo de resiliencia.” Los análisis de toda la información indicaron efectos significativos atribuibles al tipo de agregado y tipo de mezcla, pero ningún efecto causado por la granulometría. En general, dentro del rango utilizado en este estudio, la variación de la granulometría parece tener un pequeño efecto sobre el módulo de resiliencia de la mezcla; Guzmán y Rodríguez (2004) presentan en su investigación que para granulometrías mas finas se presentan valores de módulos mayores a los obtenidos en con granulometrías mas gruesas lo cual “representa un mayor desempeño” a bajas temperaturas y en sollicitaciones de trafico mayores. Monismith en 1994 analizó dos diferentes tipos de agregados para la obtención de los valores de MR. Tabla 2 muestra los resultados obtenidos:

¹ Garnica, P., Gómez J. A., Sesma J. A., “Mecánica de materiales para Pavimentos” Ciudad de México, México, (2002)

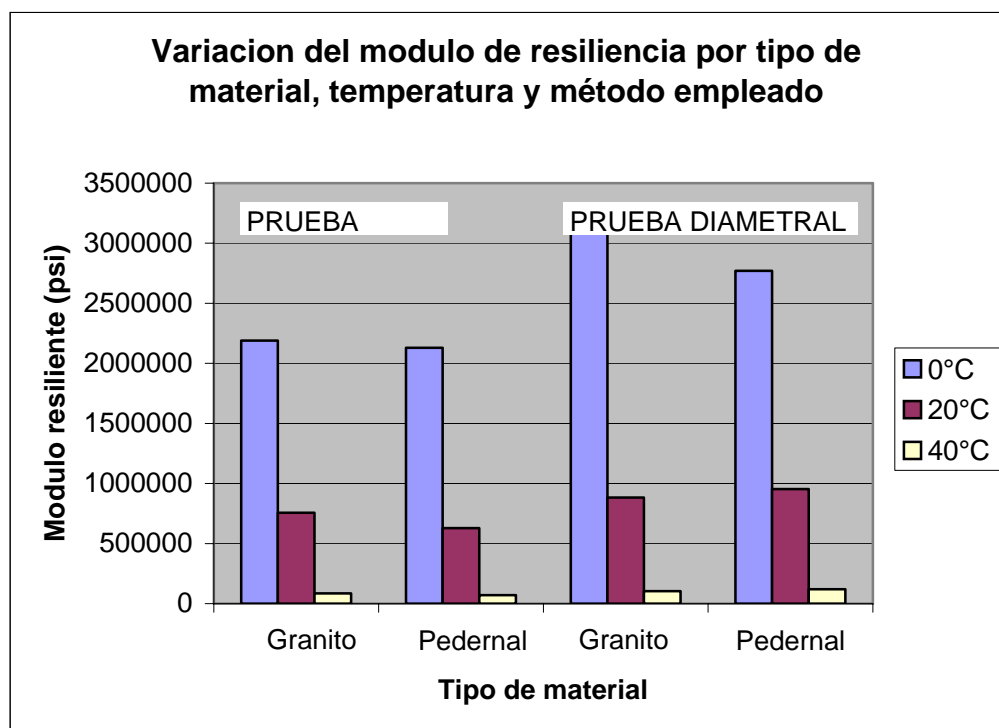


Figura 2: Variación módulos por tipo de agregado, temperatura y tipo de método empleado.

Método de prueba	Tipo de agregado	Módulo de resiliencia promedio, psi		
		0°C	20°C	40°C
Axial	Granito	2,190,000	757,000	85,300
	Pedernal	2,130,000	628,000	70,000
Diametral	Granito	3,130,000	883,000	104,000
	Pedernal	2,770,000	964,000	120,000

Tabla 2: Variación módulos por tipo de agregado, temperatura y tipo de método empleado.

Fuente: Mecánica de materiales para Pavimentos

En la Figura 2 se observa de manera general, que el granito presenta valores mayores de MR con relación a los obtenidos para el pedernal (grava fina). Nuevamente se obtiene una disminución del MR con respecto al incremento en las temperaturas de prueba. Igualmente se observan mayores módulos en los ensayos diametrales en donde debido a este se observan mayores diferencias según el tipo de agregado nuevamente se verifica la alta incidencia que tiene la temperatura de ensayo.

La investigación conducida por Abdulshafi en 1999, consistió de “10 mezclas de concreto asfáltico, con 5 diferentes granulometrías para dos tipos de agregados: grava natural (redondeada) y caliza triturada (angular). Las 5 granulometrías (tamaño máximo del agregado nominal, 2.5 cm) fueron: fina, media, granular, modificada (tipo 2) y de límite superior”, con este estudio se pretendía observar el comportamiento de diferentes tipos de agregados utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas. Los resultados indicaron que “las granulometrías granulares lograron los valores más bajos de MR para ambos tipos de agregados”. La graduación en el límite superior de la curva granulométrica logró valores altos para ambos tipos de agregados. Para la granulometría media, los valores altos de MR para las mezclas con gravas se consideraron anormales, porque esta fue la única granulometría de las cinco para la cual existió una gran disparidad entre las mezclas de caliza y gravas naturales. Los valores de MR para mezclas con agregados grandes son considerablemente mayores que los esperados en mezclas asfálticas convencionales.

- **Contenido de vacíos:** Monismith en 1994 estudió la influencia del contenido de vacíos en el comportamiento de la mezcla, empleando dos energías diferentes de compactación para generar contenidos de vacíos del 4 y 8%. La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos:

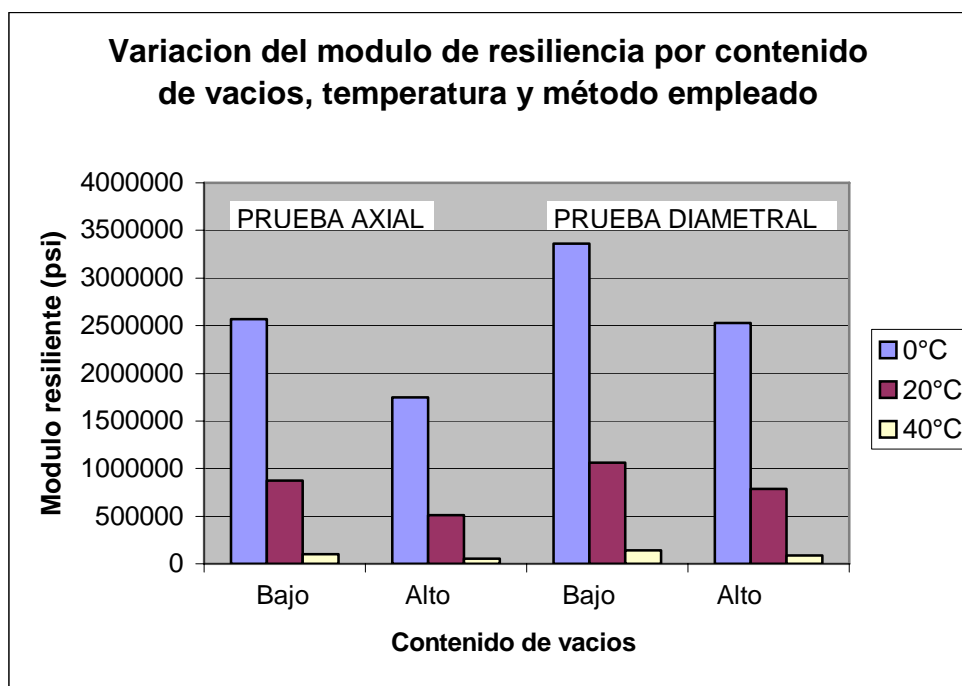


Figura 3: Variación módulos por contenido de vacíos, temperatura y tipo de método empleado.

Método de prueba	Contenido de vacíos	Módulo de resiliencia promedio, psi		
		0°C	20°C	40°C
Axial	Bajo	2,570,000	876,000	102,000
	Alto	1,750,000	509,000	52,900
Diametral	Bajo	3,360,000	1,060,000	138,000
	Alto	2,530,000	786,000	85,700

Tabla 3: Variación módulos por contenido de vacíos, temperatura y tipo de método empleado.

Fuente: Mecánica de materiales para Pavimentos

En la Figura 3 se observa, “una disminución considerable en los valores de MR con respecto al aumento en el contenido de vacíos de la mezcla analizada”. Nuevamente se tiene una disminución del MR con respecto al incremento en las temperaturas de prueba.

2.2.1.2. INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES Y COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES QUE COMPONEN LA MEZCLA EN EL MR.

- ²**Nivel de esfuerzos:** El investigador francés Monismith, en el reporte denominado SHRP-A-388 en 1994, referente a la determinación de módulos de resiliencia, analizó el efecto sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas con variaciones en el nivel de esfuerzos. “Para esto utilizaron dos métodos de prueba (axial y diametral), dos niveles de esfuerzos (altos y bajo) y tres temperaturas de prueba (0°C, 20°C y 40°C)”. La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos en relación con el comportamiento del módulo de resiliencia:

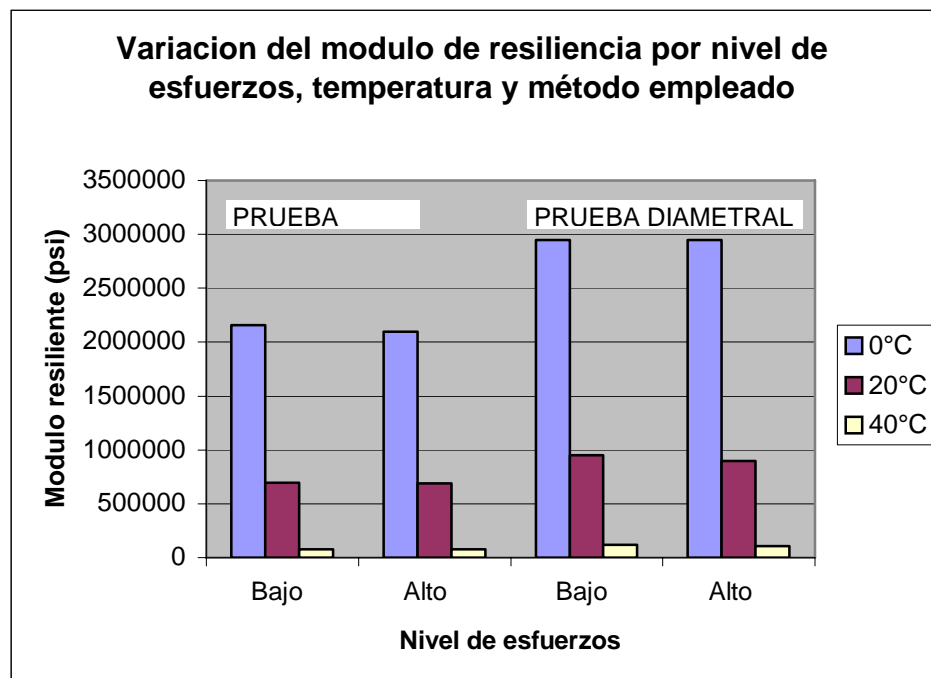


Figura 4: Variación módulos por el nivel de esfuerzo, temperatura y tipo de método empleado.

² Garnica, P., Gómez J. A., Sesma J. A., “Mecánica de materiales para Pavimentos” Ciudad de México, México, (2002)

Método de prueba	Nivel de esfuerzos	Módulo de resiliencia promedio, psi		
		0°C	20°C	40°C
Axial	Bajo	2,160,000	698,000	78,600
	Alto	2,160,000	687,000	76,700
Diametral	Bajo	2,950,000	948,000	118,000
	Alto	2,950,000	900,000	106,000

Tabla 4: Variación módulos por el nivel de esfuerzo, temperatura y tipo de método empleado.

Fuente: Mecánica de materiales para Pavimentos

En la Figura 4 se observa que el nivel de esfuerzo muestra muy poca influencia sobre el módulo de resiliencia, existiendo sólo ligeras variaciones de este valor con el incremento de la temperatura. Por otra parte, dichos incrementos en la temperatura “reflejan una disminución notoria en los valores de MR”. Por ultimo se puede concluir que las pruebas diametrales “arrojan valores mayores de MR con respecto a los obtenidos mediante pruebas axiales”.

- ³**Frecuencia de carga:** El análisis del efecto sobre el modulo resiliente, de la magnitud y la frecuencia de carga realizado por Almudaiheem y Al-Sugair en 1991 fue realizado mediante pruebas diametrales; encontraron que los valores de MR son mayores para niveles de carga más bajos. Este aspecto fue ratificado para pruebas de tensión indirecta (diametrales) realizado por Guzmán y Núñez (2004) en la javeriana, donde se encontró que al realizar el ensayo a menores frecuencias “simulando bajas velocidades” la respuesta de las mezclas es mas alta traduciéndose en un modulo mas bajo. Monismith en 1994 concluye, en su estudio del efecto de la variación de la frecuencia de carga sobre las mezclas asfálticas, que igual que en el caso del análisis de los niveles de esfuerzos, la Figura 5 muestra que existe poca “influencia de la frecuencia de carga sobre el módulo de resiliencia”, la diferencia principal en

³ Ibid. p. 1. y Larrarte Guzman J., – Rodríguez Estevez., Juan, “Análisis comparativo de resultados de ensayos de modulo resiliente y deformación permanente de mezclas asfálticas compactadas con martillo Marshall y con compactador giratorio.” (2004)

este caso es que los valores de MR tienen un ligero incremento en función del aumento en las frecuencias de carga. Nuevamente, se observa valores de MR menores con el incremento en la temperatura de prueba y muestran un aumento con la utilización de las pruebas diametrales comparadas con los valores obtenidos mediante pruebas axiales. Tabla 5 muestra los resultados obtenidos por Monismith:

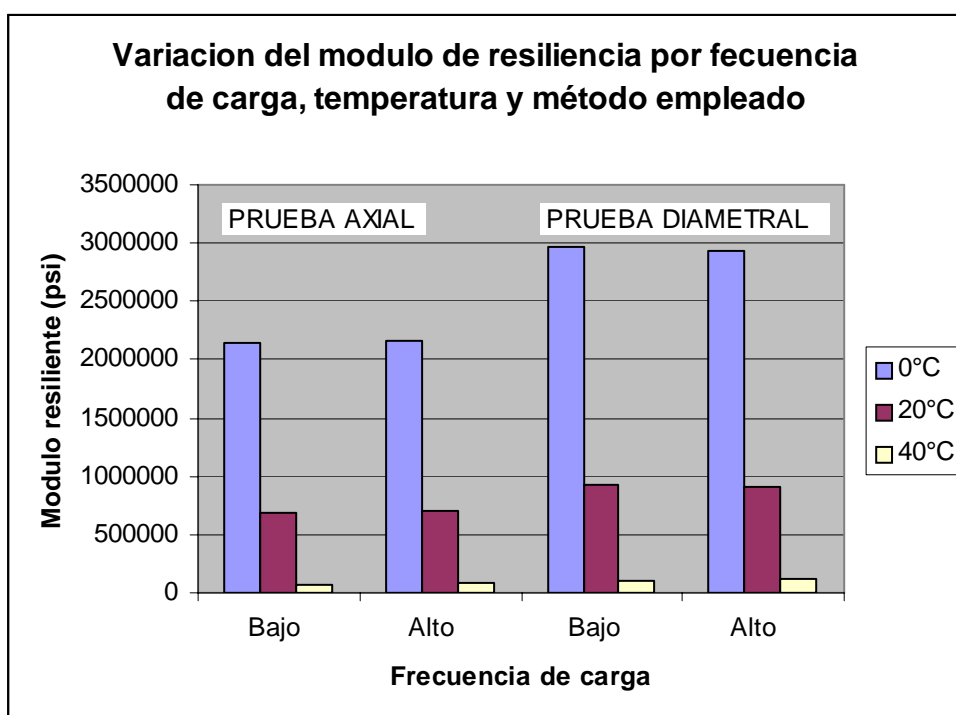


Figura 5: Variación módulos por la frecuencia de carga, temperatura y tipo de método empleado.

Método de prueba	Frecuencia de carga	Módulo de resiliencia promedio, psi		
		0°C	20°C	40°C
Axial	Baja	2,150,000	679,000	75,800
	Alta	2,170,000	706,000	79,500
Diametral	Baja	2,930,000	916,000	117,000
	Alta	2,970,000	931,000	107,000

Tabla 5: Variación módulos por la frecuencia de carga, temperatura y tipo de método empleado.

Fuente: Mecánica de materiales para Pavimentos

2.2.1.3. INFLUENCIA DEL TIPO DE ENSAYO EN EL COMPORTAMIENTO DE LA MEZCLA EN EL MR.

- **Procedimientos de prueba:** Wahhab y Khan (1991) realizaron una evaluación de los procedimientos de diseño de mezclas Marshall y Hveem. La evaluación incluyó tres tareas interconectadas. La primera fue la colección del material y el diseño de las mezclas utilizando el método de diseño Marshall (ASTM D1159) y el método de Hveem (ASTM D1560 y ASTM D1561). La segunda tarea consistió en las pruebas de laboratorio (módulos de resiliencia, ruptura por tensión, fluencia estática) y evaluación de las mismas. Y la tercera tarea involucró el análisis de la información, así como la elaboración de conclusiones y recomendaciones. Los resultados obtenidos indican que los valores de módulo de resiliencia para contenidos óptimos de asfalto obtenidos mediante Hveem son consistentemente mayores que los valores de MR obtenidos con las pruebas Marshall. Esto probablemente debido a la incidencia que tiene el método de compactación de las briquetas de uno y otro ensayo que coincide con lo que los resultados desarrollados en la P.U.J. en donde los módulos con obtenidos óptimos eran mayores sobre briquetas elaboradas con compactador giratorio (amasado) frente a los elaborados con martillo Marshall El módulo mayor para las mezclas obtenidas mediante el método Marshall puede ser considerado favorable porque las mezclas pueden ser menos susceptibles a los agrietamientos y a las deformaciones permanentes.
- ⁴**Tipos de prueba:** En el proyecto A-003A, conducido por Tayebali en 1995 realizó una comparación entre los métodos de prueba para la obtención del modulo resiliente en mezclas asfálticas (axiales y diametrales). Los resultados de este estudio indicaron que “ambos tipos de pruebas son

⁴ Ibid. P. 3.

sensibles a la mezcla y a las variables involucradas en dichas pruebas (tipo de asfalto, tipo de agregado, contenido de vacíos, temperatura, etc.)”. también se concluyó que la utilización de pruebas diametrales, se obtienen valores promedio de MR mayores aproximadamente entre un 35 y 45% comparados con los valores obtenidos mediante las pruebas axiales.

- ⁵**Temperatura:** Cochran y Furber en 1989 concluyeron que el valor del modulo de resiliencia depende de manera significativa de la temperatura a la cual se ensayan los especímenes de mezclas asfálticas. Guzmán y Rodríguez (2004) ratificaron que con un decremento en la temperatura se genera un crecimiento notable en los valores de MR.

Boudreau en 1992 realizó un estudio paramétrico con el fin de observar, el efecto de la temperatura y la duración de la carga en las mezclas asfálticas. Utilizaron dos mezclas asfálticas en caliente compactadas con dos niveles diferentes de contenido de vacíos (4 y 10%), obtenidos mediante la utilización de diferentes métodos de compactación. “Empleando ensayos diametrales de carga repetida, se consideró una duración de carga de 0.1 a 0.4 segundos; un nivel de esfuerzos inducido de 10 a 50% de la resistencia a la tensión; tres temperaturas de prueba (41, 77 y 104°F) y tres frecuencias de carga (0.33, 0.5 y 1 Hz)”.

Es evidente un decremento en los valores de MR decrecen con el incremento en la temperatura y duración de la carga. Mohammad y Paul (1993) muestran en su estudio realizado mediante pruebas de tensión indirecta sobre mezclas asfálticas, el efecto de la temperatura sobre el módulo de resiliencia. Encontraron que los valores de MR disminuyen a medida que se incrementa la temperatura, independientemente del valor que se considere para dichas temperaturas de prueba.

⁵ Ibid. P. 3.

Monismith en 1994 observó el gran efecto que tiene la temperatura de prueba sobre los valores de MR. Esa conclusión se ha demostrado en los puntos anteriores. "Los valores de MR disminuyen con un incremento en la temperatura de prueba. Al aumentar la temperatura de 0 a 20°C, se tiene un decremento del 60 al 70% en los valores de MR y alrededor del 90% de disminución de los valores de MR cuando se varía la temperatura de prueba de 20 a 40°C".

2.2.2. DEFORMACIÓN PERMANENTE

⁶Factores que afectan las deformaciones permanentes en las mezclas asfálticas en caliente:

2.2.2.1. INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES QUE COMPONEN LA MEZCLA EN LA DEFORMACIÓN PERMANENTE.

- **Tipo de asfalto:** El centro de investigación francés Corté et al. En 1992 realizó una serie de pruebas en la pista circular del Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Con el fin de determinar el efecto del tipo de asfalto utilizaron tres materiales asfálticos "(un asfalto convencional grado 50/70, un asfalto modificado con polímeros SBS y un asfalto multigrado Shell) y una capa muy delgada de asfalto sobre material de modulo alto (asfalto duro de grado 10/20)." Fue evidente un aumento en la resistencia de la mezcla a la generación de deformaciones permanentes, con la utilización de asfaltos modificados con polímeros, multigrados y duros. "Mientras que no existe una diferencia entre los asfaltos modificados con polímeros y los multigrados en ciclos de carga bajos, mas allá de este punto, los asfaltos modificados exhiben un rápido crecimiento en las roderas."

⁶ Garnica, P., Gómez J. A., Sesma J. A., "Mecánica de materiales para Pavimentos" Ciudad de México, México, (2002).

- **Tipo de agregado:** Elliott et al. (1991 utilizaron información de pruebas de fluencia para examinar los efectos de la vida relativa en términos del desarrollo de las roderas. “Para llevar a cabo comparaciones se tomó como base una mezcla de trabajo que consiste en material que pasa la malla No. 4 y se retiene en la No. 10. La mezcla esta compuesta de 18% de agregado granular, 37% de arena granular y 47% de arena fina. Estos porcentajes se utilizaron también para las demás variaciones de granulometrías (fina, granular, fina-granular y granular-fina).”

Los resultados obtenidos muestran que las granulometrías finas y granulares experimentan profundidades de roderas de 7 a 10% mayores a las obtenidas para la mezcla de trabajo, mientras que las variaciones de granulometrías fina-granular y viceversa, experimentan profundidades de roderas de 13 a 19% mayores.

Harvey y Monismith (1993) en un estudio similar consideraron dos tipos de agregados: “granulometría con bajo contenido de finos (2.5%) y granulometría con contenido normal de finos (5.5%).” La granulometría con contenido normal de finos tiene un tamaño máximo de agregados de 1 pulg. Y la granulometría con bajo contenido de finos posee las mismas proporciones con variación en un 3% en el contenido de finos.

La reducción en el contenido de finos en un 3% resulto en un cambio sorprendente en la resistencia a la formación de deformaciones permanentes. Para el contenido bajo de finos se obtuvo una diferencia del 131% con respecto a la otra granulometría. Monismith et al. (1994) encontró que “la variación de un agregado con granulometría abierta a uno con granulometría continua, incrementa la resistencia de las mezclas asfálticas.”

- **Forma, textura y tamaño de las partículas:** Monismith et al. (1994) señalaron que un cambio en la forma, tamaño y textura superficial de los agregados, genera a su vez una variación en la resistencia a las roderas. Así pues, el cambio de una forma redondeada a una angular, incrementa la resistencia de los pavimentos a la generación de roderas. Lo mismo sucede cuando se presenta un cambio de una textura suave a una rugosa, y cuando se incrementa el tamaño máximo de los agregados.
- **Contenido de asfalto:** El estudio de Monismith de 1994 desarrollaron una serie de pruebas con el fin de analizar el efecto del contenido de asfalto sobre la deformación permanente. “Los contenidos de asfalto fueron 4.5, 4.9, 5.5 y 6.0%, además de utilizar contenidos de vacíos agrupados en tres categorías, de 2.5 a 3.5%, 4.5 a 5.5% y 6.5 a 7.5%, Se obtuvo información de 18 mezclas bajo carga con altura constante. Los especímenes fueron nominalmente de 15 cm de diámetro y 5 cm de altura”. Al tener un amplio rango se puede predecir el comportamiento de las mezclas.

Los ensayos se realizaron a 50°C. Se aplicaron cargas compuestas todo el tiempo: “el patrón de cargas fue 400 ciclos de 14 kPa, 600 ciclos de 28 kPa, 800 ciclos de 42 kPa y 1000 ciclos de 56 kPa de esfuerzos cortantes”. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.

Contenido de asfalto (%)	Contenido de vacíos (%)	DEFORMACIÓN CORTANTE INELÁSTICA (%)				
		Block 1 400 ciclos	Block 2 600 ciclos	Block 3 800 ciclos	Block 4 1000 ciclos	Todos 2800 ciclos
4.5	2.5-3.5	0.273	0.372	0.804	0.699	2.148
		0.004	0.703	0.378	1.478	2.555
4.9	2.5-3.5	0.508	0.734	0.762	0.750	2.754
		0.142	1.132	1.032	0.808	3.114
5.5	2.5-3.5	0.018	0.080	0.397	0.573	1.069
6.0	2.5-3.5	1.073	1.290	1.061	1.202	4.624
4.5	4.5-5.5	0.021	0.625	1.276	0.913	2.834
		0.156	1.484	1.019	0.960	3.619
4.9	4.5-5.5	0.125	0.415	0.978	1.044	2.563
		0.393	1.835	1.755	1.983	5.967
5.5	4.5-5.5	1.426	1.942	1.782	-	-
6.0	4.5-5.5	1.474	1.326	1.264	1.289	5.352
4.5	6.5-7.5	0.173	2.144	2.493	1.862	6.672
4.9	6.5-7.5	0.430	0.639	0.962	1.287	3.317
		0.060	0.212	0.855	1.069	2.195
5.5	6.5-7.5	0.029	0.923	1.254	1.383	3.589
		0.586	2.684	2.873	-	-
6.0	6.5-7.5	1.089	2.760	3.196	-	-

Tabla 6: Variación deformación permanente por contenido de vacíos y contenido de asfalto.

Fuente: Mecánica de materiales para Pavimentos

La Tabla 6 indica que para porcentajes de asfalto altos las mezclas tienden a mayores deformaciones inelásticas, y a que para contenidos de vacíos mayores se producen, también, mayores deformaciones permanentes.

- Contenido de vacíos en la mezcla:** Monismith et al. (1994) observaron que un incremento en el contenido de vacíos de la mezcla, provoca un decremento en la resistencia de la mezcla a la generación de roderas, ratificando lo expuesto en el punto anterior. “Este punto se pudo analizar al realizar diversas pruebas de compresión axial en fluencia.” como es de esperarse, “las mezclas con bajo contenido de vacíos se comportaron mejor que las mezclas de altos contenidos.”
- Contenido de vacíos en el agregado mineral:** Un incremento en el contenido de vacíos en el agregado mineral, provoca un decremento en la resistencia de la mezcla a la generación de roderas. Observación realizada por Monismith en 1994. Kandhal y Mallick (2001), utilizando distintos tipos de agregados (calizas, granitos y gravas), observaron que este factor esta

íntimamente relacionada con el espesor de la capa asfáltica. “Un incremento en los vacíos y en el espesor” se ve reflejado en un incremento de las deformaciones plásticas para mezclas de granito y caliza., mientras que causa un decremento en dichas deformaciones, de mezclas con gravas. Sin embargo en este momento, el efecto de los vacíos sobre las roderas no está claramente entendido y estudiado, por lo que se requieren mayor investigación y estudios en dicha materia para comprender completamente dicho efecto.

2.2.2.2. INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES Y COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES QUE COMPONEN LA MEZCLA EN LA DEFORMACIÓN PERMANENTE.

- **Nivel de esfuerzos:** Monismith en 1994 desarrollo reportes sobre deformaciones permanentes (roderas, SHRP A-415), se analizó el efecto del estado de esfuerzos sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas en lo referente a las deformaciones permanentes. Se encontró, al igual que en el caso del modulo resiliente, que no existe una gran influencia de parte del nivel de esfuerzos las deformaciones permanentes. El estudio se desarrollo bajo distintas condiciones de prueba, se utilizaron dos niveles de esfuerzos (bajo y alto) para la realización de dichos estudios. Igualmente se puede concluir que “un incremento en la presión de contacto de las llantas, produce un decremento en la resistencia de las mezclas asfálticas a la presencia de roderas”.
- **Número de repeticiones de carga:** Monismith (1994) observó un decremento importante en la resistencia del pavimento a la generación de deformaciones permanentes con un incremento en el número de repeticiones de las cargas. Lo que se traduce en que si se “incrementa el número de repeticiones, el pavimento esta mas propenso a sufrir este tipo de deterioros.”

2.2.2.3. INFLUENCIA DEL TIPO DE ENSAYO EN EL COMPORTAMIENTO DE LA MEZCLA EN EL MR.

- ⁷**Método de compactación:** Como parte del programa A-003A, Sousa et al. (1991) investigaron los procedimientos de compactación por amasado, giratorio y de rodillo. El compactador giratorio muestra “un excesivo énfasis en el ligante asfáltico y describe inexactamente el rol de la interacción asfalto-agregado en el comportamiento de pavimentos construidos apropiadamente”. Limitaciones como formas y dimensiones de los especímenes producidos por el compactador giratorio no permiten investigaciones más profundas en esta materia. En conclusión Entre los métodos investigados, el método de amasado parece duplicar mejor las mezclas compactadas en campo, sin embargo con las limitaciones anteriormente mencionadas.

Lo anterior fue corroborado por von Quintus et al. (1991) como parte del programa NCHRPP 9-6 donde se analizaron varios métodos de compactación. Los investigadores de dicho proyecto notaron que el compactador de rodillo proporcionaba resultados comparables a los obtenidos utilizando el compactador giratorio.

En un estudio de Button et al. (1992) se prepararon especímenes en el laboratorio usando tres métodos de compactación diferentes, incluyendo el giratorio de Texas, el rodillo de Exxon y el martillo de base rotatoria Marshall. Aunque los investigadores concluyeron que el compactador giratorio de Texas reproduce más seguido especímenes similares a los encontrados en campo, los resultados deben ser cuidadosamente estudiados debido a una diferencia significativa en los contenidos de vacíos de los especímenes compactados en el laboratorio.

⁷ Ibid. P. 4.

“Harvey (1992) concluyó que los métodos de compactación giratorios, de rodillo y de amasado producen especímenes que son significativamente diferentes con respecto a la resistencia para resultados de pruebas repetitivas de deformación cortante permanente, con resultados promedio que difieren por más de un orden o magnitud entre cada método para asfaltos convencionales”. Esto indica que la selección de un método de compactación en laboratorio tendrá al menos tanto efecto sobre el comportamiento de la mezcla como el tipo de agregado, tipo de ligante, contenido de finos o contenido de vacíos. Guzmán y Rodríguez (2004) agregan en su trabajo que la variación de las deformaciones permanentes está ligada en mayor proporción con la granulometría y no con el tipo de compactación de las mezclas.

Monismith et al. (1994) señalaron que el método de compactación, ya sea en campo o en laboratorio, puede influenciar la estructura del sistema y por lo tanto, la propensión a las deformaciones permanentes.

- **Temperatura:** Monismith et al. (1994) concluyó como era de esperarse que un aumento en la temperatura conduce a un decrecimiento en la resistencia a la formación de rederas en las mezclas asfálticas.
- **Agua:** El agua puede incrementar la propensión de una mezcla a la deformación permanente. “Cuando existe una modificación de la estructura de pavimento de estado seco a húmedo, se presenta una disminución de la resistencia de la mezcla, cuando ésta es sensible al agua”. Es posible sujetar especímenes a un proceso de acondicionamiento con agua como el desarrollado en Oregon State University en el proyecto A-003A (Terrel et al. 1993). Los resultados de pruebas de cortante simple desarrollado en mezclas antes y después del acondicionamiento con agua se muestra en la Figura 6

Si la mezcla esta sujeta a una saturación constante, esta es significativamente más propensa a la formación de roderas.

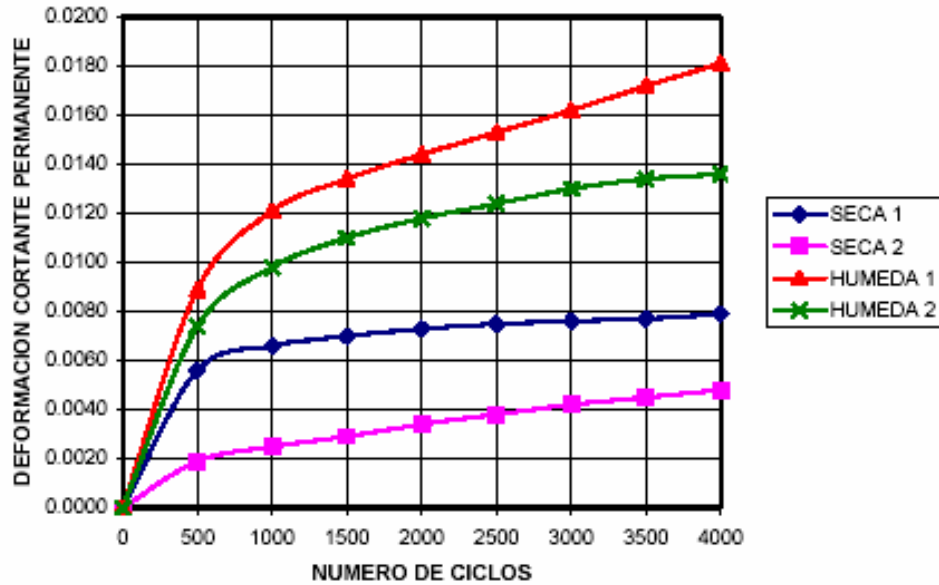


Figura 6: Comparación de la deformación permanente en especímenes de la misma mezcla sujetos a diferentes condiciones con agua.
Fuente: Mecánica de materiales para Pavimentos.

3. METODOS EMPLEADOS PARA LA DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS

3.1. PROCEDIMIENTO PARA LA DOSIFICACIÓN Y ELABORACIÓN DE BRIQUETAS.

Sabiendo que:⁸ “Los conceptos básicos del método de diseño Marshall” para la dosificación de mezclas asfálticas en caliente “fueron formulados inicialmente por Bruce Marshall”, Ingeniero encargado del control de calidad de las mezclas asfálticas del Departamento de carreteras del Estado de Mississippi, la formulación inicial fue mejorada y completada más tarde por el cuerpo de Ingenieros de los EE. UU. a través de extensas investigaciones y estudios de correlación, “añadiendo ciertas características de procedimiento del ensayo y desarrollando criterios de diseño para las mezclas”.

El ensayo Marshall solo es aplicable para mezclas en caliente, utilizando agregados cuyo tamaño máximo sea inferior o igual a 25 mm. El objetivo principal del método es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación “de agregados de composición y granulometría determinadas”, utilizando un número determinado de probetas diferentes dosificaciones de agregado - asfalto.

El método Marshall comienza con la preparación de las briquetas, para lo cual se requiere cumplir con las siguientes condiciones previas:

- “Que los materiales cuyo uso se propone cumplan las condiciones fijadas por las especificaciones.

⁸Arenas Lozano, Diego L. En, “Teoría de los Pavimentos, Parte 1.”, Cali.

- Que las mezclas de agregados satisfagan las normas fijadas por las especificaciones en cuanto a la granulometría.
- Que se dispongan de suficiente volumen de agregados secos y divididos por grupos según su tamaño.
- Que se determine el peso específico aparente de todos los agregados empleados en la mezcla y el peso específico del asfalto, con el objeto de utilizarlos en el análisis de vacíos y la determinación de la densidad de la mezcla.”

3.1.1. PREPARACION DE LAS BRIQUETAS

⁹“Equipo empleado en la preparación de las briquetas (método Marshall) (Figura 7):

- Briquetas cilíndricas normalizadas de 2.5” (6.35 cm) de altura y 4” (10.16 cm) de diámetro.
- Martillo de compactación Marshall con una zapata circular de 3 y 7/8” de diámetro, peso de 10 lb y altura de caída de 18”.
- Collares.
- Sujeta moldes.
- Pedestal con guía para pistón.
- Extractor de muestras.
- Recipientes, horno, balanza, termómetro, baño de María, etc.”

⁹ Sánchez Sabogal, Fernando. En “Curso de laboratorio de pavimentos” (Cali), 1983.



Figura 7 : Equipo empleado método Marshall
Fuente: www.elvec.com.mx/asfalto01.html

Para la determinación de contenido óptimo de asfalto se deben realizar una cantidad de briquetas que, muestre de forma definida un valor óptimo en las curvas en las que se presentan los resultados. Los ensayos se realizan sobre la base de un incremento de 0.5% de asfalto y deben emplearse por lo menos 2 contenidos de asfalto por encima y por debajo del valor optimo. Para obtener resultados adecuados se deben preparar 3 briquetas por cada porcentaje de asfalto. Para elaborar cada biqueta se utiliza 1200 gramos de material pétreo y por lo general se debe tener como mínimo 22 kg. de agregado y 4 litros de asfalto para la totalidad del ensayo.

Una vez se cumple con los ítems anteriores se procede a la preparación de la mezcla. El asfalto debe ser calentado hasta obtener una viscosidad entre 85+10 segundos Saybolt Furol y 140+15 segundos Saybolt Furol y los agregados

deben estar a una temperatura de 27°C por encima de la temperatura del asfalto. Tabla 7 muestra temperaturas optimas para asfaltos Colombianos.

ESPECIFICACIONES ASTM	ASFALTO PROVENIENTE DE REFINERIA:		
	CARTAGENA	B/BERMEJA	APIAY
Temperatura de diseño método Buce Marshall °C	145-140	147-152	143-148
Temperatura de compactacion método Buce Marshall °C	135-151	137-142	134-138

Tabla 7: Temperaturas optimas asfaltos Colombianos

Fuente: Teoría de los pavimentos

Al alcanzar las temperaturas deseadas se procede a hacer el mezclado, el cual, se debe realizar el tiempo suficiente para toda la porción de los agregados quede “empapado” por el asfalto de manera uniforme, sin descuidar la temperatura de mezclado. Posteriormente se vacía la mezcla en el molde de compactación el cual, junto con el martillo, soportes, collares y herramientas, han sido previamente calentados para no afectar la temperatura de compactación.

La densificación de la mezcla esta determinada por el transito esperado (Tabla 8).

TRANSITO	EJES EQUIVALENTES A 8,2 T	Numero de golpes por cara
LIVIANO	manor o igual a 10E4	35
MEDIANO	10E4-10E6	50
PESADO	mayor a 10E6	75

Tabla 8: Numero de golpes por cara

Fuente: Teoría de los pavimentos

3.1.2. METODOS DE DENSIFICACION

3.1.2.1. MARTILLO MARSHALL

Este martillo es mediante el cual el método de Bruce Marshall, descrito anteriormente, logra la densificación de la mezcla, a continuación se describe sus principales características:

El Martillo Marshall de compactación consiste en un dispositivo de acero formado por una base plana circular de 98.4 mm ($3\frac{7}{8}$ "") de diámetro y un pisón de 4,54 kg (10Lb) de peso total, montado en forma que proporcione una altura de caída de 457.2 mm (18"). El martillo de compactación puede estar equipado con el protector de dedos.¹⁰ Además, debe tener un pedestal de compactación, el cual, consiste en una pieza prismática de madera de base cuadrada de 200.3 mm de lado y 457.2 mm de altura (8" x 8" x 18") y provista en su cara superior de una platina cuadrada de acero de 304.8 mm de lado x 25.4 mm de espesor (12" x 12" x 1"), firmemente sujeta en la misma. La madera será roble u otra clase cuya densidad seca sea de 670 a 770 kg/m³ (42 a 48 lb/pie³). EL conjunto se fijara firmemente a una base de concreto, debiendo quedar la platina de acero en posición horizontal.¹¹

El martillo deberá tener un soporte para el molde, consistente en un dispositivo con resorte de tensión diseñado para centrar rígidamente el molde completo en su posición durante el proceso de compactación.

¹⁰ Resistencia de Mezclas Bituminosas Empleando el Aparato Marshall. I.N.V.E – 748-2 (c).

¹¹ Resistencia de Mezclas Bituminosas Empleando el Aparato Marshall. I.N.V.E – 748-2 (d).

Existen dos clases de martillos uno de funcionamiento manual y otro mecánico, el mecánico debe calibrarse para ofrecer resultados similares con los encontrados en el manual.

3.1.2.2. COMPACTADOR GIRATORIO

3.1.2.2.1. Historia del compactador giratorio

A través de la evolución de las mezclas asfálticas, se han desarrollado diferentes tipos de dispositivos de laboratorio para compactación. ¹²“En general, los aciertos de éstos es que fabrican especímenes para caracterización volumétrica y física.

Dependiendo del sistema, los especímenes pueden tener forma cilíndrica, trapezoidal, o rectangular y la compactación lograrse a base de impactos, amasado o vibración.” Los martillos convencionales de compactación presentan una densificación de la mezcla por impacto, lo cual no reproduce la compactación que usualmente se hace en campo. Los compactadores giratorios aplican un esfuerzo de amasado, similar al realizado en campo para producir especímenes cilíndricos. Los compactadores giratorios han presentado una evolución como consecuencia de varios experimentos resultando en gran variedad de métodos.

3.1.2.2.2. COMPACTACIÓN GIRATORIA

En 1939 el Texas Highway Department inició una investigación sobre el diseño y control de mezclas asfálticas. Previamente los métodos de prueba y error se utilizaban confiando en cómo se veía y se sentía la mezcla bajo carga. Se establecieron criterios para métodos realizados en laboratorio; en el primero, el método debía ser igualmente adaptable para el control de la mezcla tanto en

¹²Garnica, P., Gómez J. A., Delgado A. H., “Algunos Aspectos de la Densificación de Mezclas Asfálticas con el Compactador Giratorio” Ciudad de México, México, (2003).

campo como en el diseño. En segundo lugar, el método debía producir esencialmente la misma densidad o proporción de vacíos, como se obtendría en el pavimento terminado.

Desde que la vida del pavimento tuvo que tomarse en cuenta y comprendiendo que la densidad se incrementa a un máximo con el tiempo y tránsito vehicular, la densidad deseada que se obtiene con cualquier procedimiento de moldeado, necesita aproximarse a la del pavimento después de un tiempo en carretera. Dado que el agregado deberá resquebrajarse, bajo métodos de compactación de campo, entonces el tercer requerimiento del método de moldeo fue el de aproximar lo más posible a la degradación del agregado obtenida, bajo las condiciones de operación.

La compactación giratoria se ha empleado en diseños de mezclas asfálticas desde 1930, “cuando se desarrolló un procedimiento por el Texas Highway Department (Department of Transportation, actualmente); en cuanto al desarrollo del concepto giratorio, éste es atribuible a Philippi, Raines y Love” (Figura 8).



Figura 8: Prensa giratoria de Texas

Fuente: Algunos Aspectos de la Densificación de Mezclas Asfálticas con el Compactador Giratorio

Posteriormente, durante la segunda guerra mundial fue desarrollado el compactador por amasado del cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos; basados en lo realizado en Texas y en respuesta a la experiencia que la densificación con martillo Marshall no simulaba la densidad producida por las

ruedas de los aviones. “Al final de los años 50’s durante una visita de intercambio de tecnología, la idea del compactador giratorio fue introducida a Francia, al grado que durante los 60’s y principios de los 70’s el desarrollo del protocolo del compactador giratorio francés quedó establecido, generándose extensos estudios para investigar el mecanismo giratorio” incluían la forma de las curvas de densificación giratoria y efectos de la graduación del agregado, aun como contenidos de relleno mineral y propiedades del asfalto sobre la posición e inclinación de la curva.

El compactador giratorio LCPC nació como fruto de ese intercambio tecnológico y las posteriores investigaciones realizadas, “aplica un ángulo fijo de un grado (1°) y una presión vertical constante (600kPa) que es mantenida en el espécimen; los giros se aplican a una proporción constante de seis giros por minuto a través del proceso de compactación” (Figura 9).



Figura 9: Compactador Giratorio LCDP (Francés)

Fuente: Algunos Aspectos de la Densificación de Mezclas Asfálticas con el Compactador Giratorio

En el sistema francés, “el número de giros con el compactador depende del espesor de la capa de pavimento. Si éste se incrementa, la mezcla se vuelve fácil de compactar en la carretera y el número de giros aumenta.” Para cualquier

estructura de agregado significará que el contenido de asfalto puede decrecer y la mezcla ser más difícil de compactar. El incremento en la dificultad de la compactación se compensa por el aumento del espesor, el cual reduce el esfuerzo de compactación requerido para obtener la densidad.

Compactador giratorio Superpave fue desarrollado después de una decisión del Congreso de los Estados Unidos autorizando en 1987 el Strategic Highway Research Program (SHRP). Este esfuerzo fue conducido de 1987 a 1993. Inicialmente el SHRP se enfocó a investigación de cementos asfálticos. En 1990 SHRP incluyó un área mezclas asfálticas, diseñada sobre el trabajo del National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) sobre el Asphalt-Aggregate Mixture Analysis System (AAMAS) y el trabajo del LCPC en Francia. El AAMAS se condujo bajo el proyecto 9-06 del NCHRP y los investigadores principales fueron Harold L. Von Quintus y Brent Rauhut. La mayoría de las pruebas de mezclas durante el SHRP por el Asphalt Institute se enfocaron a modificar el compactador giratorio de 6 pulg. de Texas. “Diversas investigaciones del FHWA sobre este dispositivo mostraron un ángulo de molde de 1.23° y no de un grado como originalmente se deseaba.”



Figura 10: Compactador Giratorio SuperPave
Fuente: www.elvec.com.mx/asfalto01.html

Los investigadores encargados del SHRP especificaron finalmente para el compactador giratorio SHRP, lo siguiente:

- Presión de consolidación vertical 600 kPa
- Ángulo de giro 1.25 °
- Velocidad de giro 30 rpm (variable)

El compactador giratorio continua siendo “el aparato más apropiado” para la evaluación de las características de compactación de las mezclas asfálticas, teniendo en cuenta que “la compactación giratoria simula mejor la compactación en el campo”. Es importante notar que las características de compactación están disponibles para predecir las características del pavimento no sólo en el momento de la construcción, sino también a través de la vida del asfalto.

Ventajas de la compactación por amasado:

1. Simula con más realidad condiciones de clima y carga.
2. Capaz de compactar mezclas con grandes agregados.
3. Capacidad de identificar problemas de compactación.
4. Facilidad para verificar y llevar a cabo control de calidad.

3.1.3. METODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE CONTENIDOS

OPTIMOS DE ASFALTO:

3.1.3.1. MÉTODO MARSHALL

- **Determinación del peso específico “Bulk”**

El peso específico “Bulk” de una probeta compactada, es la relación entre su peso en el aire y su volumen incluyendo los vacíos permeables.

Si la probeta tiene una textura superficial tersa e impermeable, su peso específico "Bulk" se determina sencillamente mediante la expresión:

$$G_{sb} = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w}$$

Siendo:

W_a = Peso de la Probeta Seca en el Aire.

W_w =

Peso de la Probeta en el Agua.

W_{ss} =

Peso en el aire de la probeta saturada y superficialmente seca.

Si la textura superficial de la probeta es abierta y permeable su volumen se determina por la diferencia entre su peso en el aire y su peso en el agua estando parafinado, su peso específico "Bulk" esta dado por la expresión:

$$G_{sb} = \frac{W_a}{W_{ap} - W_{wp} - \frac{W_{ap} - W_a}{G_p}}$$

Siendo:

W_a = Peso de la Probeta Seca en el Aire sin parafina.

W_{ap} = Peso en el aire de la Probeta parafinada.

W_{wp} = Peso en el agua de la probeta parafinada.

G_p = Peso específico de la parafina.

- **Ensayo de estabilidad y flujo**

La briqueta compactada es llevada a un baño de agua de 60+1°C durante un lapso de 30 a 40 minutos. Posteriormente se seca la briqueta, se coloca en la mordaza inferior de la prueba y se centra, estas mordazas

han sido limpiadas y engrasadas previamente. (Figura 11), luego se ajusta el anillo superior y se centra en la prensa de carga (Figura 12), se coloca el deformímetro (medidor de flujo), (Figura 11) y se aplica carga a la muestra a una velocidad de 2 pulgadas / minuto hasta que ocurra la falla.

El número de libras correspondiente a esta lectura se anota como “ESTABILIDAD MARSHALL” y la lectura en el dial del deformímetro en el momento de falla se anota como “FLUJO”.



Figura 11: Mordaza y Medidor de flujo

Fuente: www.elvec.com.mx/asfalto01.html

El procedimiento completo, desde que se saca la muestra del baño de agua hasta que falla en la maquina no debe tardar mas de 30 segundos.



Figura 12: Prensa de carga
Fuente: www.elvec.com.mx/asfalto01.html

- **Análisis de densidad y vacíos.**

Para la realización del análisis de densidad y vacíos se requieren conocer previamente el peso específico de los agregados y del asfalto.

Si se tienen varios agregados se calcula el peso específico promedio del total de los agregados mediante la expresión:

$$G_{agr} = \frac{100}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \frac{P3}{G3} + \dots +}$$

Siendo:

P1,P2,P3..... = Porcentaje de peso de cada una de las fracciones de material.

G1,G2, G3..... = Peso específico de los materiales a los que corresponden las fracciones anteriormente mencionadas.

Peso específico máximo teórico (G_h): El peso específico máximo teórico corresponde al que se obtendría si teóricamente, si se pudiera comprimir la muestra de tal manera que dicha muestra careciera de vacíos. Y esta dado por la expresión:

$$G_h = \frac{100}{\frac{\% \text{ Agregado}}{G_{agr}} + \frac{\% \text{ asfalto}}{G_{asf}}}$$

Siendo:

G_{asf} = Peso específico del cemento asfáltico.

G_{agr} = Peso específico promedio de los agregados.

Máximo peso específico (G_{mm}): El peso específico máximo de una mezcla asfáltica sin vacíos con aire (no compactada), se determina por medio del método desarrollado por James Rice y su valor es necesario para conocer el porcentaje de asfalto absorbido por los agregados y el volumen real de los vacíos con aire que tendrá cuando se encuentre compactada.

El procedimiento comienza desmenuzando la mezcla sin partir las partículas, de tal manera que la porción de agregado fino no tenga mas de ¼". Se permite que la muestra alcance la temperatura ambiente y se toma su peso en el aire como (A).

Se añade agua a 25°C tal que alcance a cubrir la muestra de ensayo. Se remueven las burbujas de aire atrapado, exponiendo el contenido del frasco a vacío parcial durante 15±2 minutos. Se llena hasta la altura de calibración del frasco y se toma el peso como (E).

El frasco debe estar calibrado para determinar el peso del agua a 25°C. El peso del agua mas el del frasco se llama (D)

Una vez se tienen estos pesos el peso específico máximo se calcula mediante la expresión:

$$G_{mm} = \frac{A}{A - (E - D)}$$

Porcentaje de absorción de asfalto: Es el porcentaje de absorción de asfalto por peso del agregado seco. Esta dado por la expresión:

$$Aa = \frac{G_{mm} - Gh}{G_{mm} * G_{mt} * \% agregados} * 10000$$

Porcentaje en volumen que ocupa el agregado con respecto al total: esta dado por la expresión:

$$V_{agr} = \frac{\% agregados * G_{sb}}{G_{agre}}$$

Porcentaje en volumen que ocupa los vacíos con aire respecto al total: esta dado por la expresión:

$$V_v = 1 - \frac{G_{sb}}{G_{mm}}$$

Volumen de asfalto efectivo con respecto al total: esta dado por la expresión:

$$V_{ae} = 100 - (V_{agr} + V_v)$$

Vacíos del agregado mineral: El espacio intergranular ocupado por el asfalto y el aire en una mezcla compactada se denomina **vacíos del agregado mineral, VAM**. La suma del volumen de aire y el volumen de asfalto efectivo, expresada como porcentaje del volumen total, es el VAM. Definida por:

$$VAM = 100 - V_{agr}$$

Contenido de asfalto absorbido: Es la concentración de peso del ligante asfáltico absorbido por el agregado. Normalmente se lo expresa como porcentaje del peso del agregado. Se define así:

$$P_{ba} = 100 \left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \right) G_b$$

Donde:

G_b = Gravedad específica del ligante.

P_{ba} = porcentaje de ligante absorbido por masa de agregado.

G_{se} = Densidad específica efectiva

G_{sb} = Peso específico bulk.

Contenido de asfalto efectivo: Es la concentración de peso del ligante asfáltico absorbido. Se obtiene mediante la siguiente formula:

$$P_{be} = P_b - \left(\frac{P_{ba}}{100} \right) P_s$$

Donde:

P_b = Porcentaje en peso de la mezcla total del ligante asfáltico en la mezcla.

Ps = Porcentaje contenido de agregado en la mezcla respecto al peso de la mezcla total.

Pba= Porcentaje del asfalto absorbido.

El contenido de asfalto efectivo es el contenido total de asfalto menos el porcentaje absorbido (Basado en la masa total de la mezcla).

El volumen de asfalto absorbido no es usualmente considerado como parte del VAM. No se muestra en el diagrama el porcentaje de **vacíos llenos con asfalto o VFA**. Esta propiedad es el porcentaje de los VAM que contienen asfalto. Si bien se puede calcular dividiendo al volumen de asfalto por el volumen de los VAM, normalmente se usa la siguiente fórmula:

$$VFA = ((VAM - Volumen.de.aire) / VAM) \times 100$$

Para una mejor comprensión, se presenta a continuación un diagrama de los componentes de una mezcla asfáltica compactada. (Figura 13)

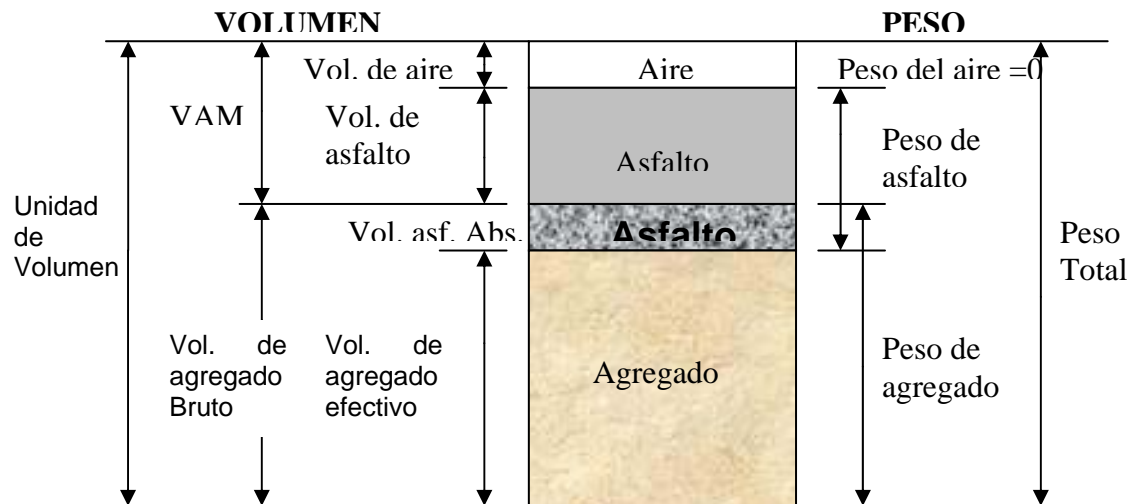


Figura 13: Diagrama de componentes de una mezcla compactada.

Fuente Análisis: comparativo de resultados de módulos resilientes y deformaciones permanentes de mezclas asfálticas compactadas con martillo Marshall y con compactador giratorio

3.2. PRINCIPIOS GENERALES DE DISEÑO POR METODO MARSHALL

El objetivo fundamental dentro del diseño de las mezclas asfálticas comprende la obtención de un porcentaje óptimo de asfalto, que cumpla con los respectivos requisitos de diseño y así mismo sea viable económicamente su elaboración.

^{13crf} Cualquier diseño de una mezcla asfáltica requiere cumplir con las siguientes propiedades:

- **Suficiente estabilidad:** las solicitaciones a las que se encuentra sometida una mezcla asfáltica son muy variables. Estas inducen una serie de esfuerzos de compresión, tensión o cortante. La mezcla asfáltica debe soportar, sin deformarse apreciablemente dichas solicitaciones.

CAUSAS	EFFECTOS
Exeso de asfalto en la mezcla	Exudación y ahuellamiento
Exeso de arena en la mezcla	Consistencia blanda durante la compactación y por algún tiempo de servicio. Dificultad durante la compactación
Agregado de partículas redondeadas, escasas o ninguna cara fracturada	Ahuellamiento y exudación

Tabla 9: Causas y efectos que producen las bajas estabilidades en una mezcla.
Fuente: Teoría de los pavimentos

- **Resistencia a las deformaciones plásticas:** las diversas solicitaciones a las que se encuentra sometida una mezcla asfáltica en servicio puede provocar deformaciones que no se recuperan con el tiempo. La mezcla asfáltica puede deformarse plásticamente debido a una falla de las capas inferiores de la estructura o por mala

13. ¹³ Arenas Lozano, Diego L. En, "Teoría de los Pavimentos, Parte 1.", Cali.

dosificación de la mezcla, esto conlleva a la aparición de roderas o ahuellamiento tanto en el sentido transversal como longitudinal, especialmente en los carriles de mayor circulación y puntos de estacionamiento o espera.

- **Resistencia a la fatiga:** Las mezclas asfálticas por lo general presentan una buena estabilidad a la acción de las cargas del tránsito aisladas. Con el tiempo y por la acción repetida de dichas cargas el material acumula dichos y puede fallar por fatiga.

CAUSAS	EFFECTOS
Bajo contenido de asfalto	Agrietamiento por fatiga
Alto contenido de vacíos durante el diseño de la mezcla	Emvejecimiento prematuro del asfalto y posterior agrietamiento por fatiga
Deficiente compactación en campo	Emvejecimiento del asfalto y posterior agrietamiento por fatiga

Tabla 10: Causas y efectos de una baja resistencia a la fatiga.

Fuente: Teoría de los pavimentos

- **Resistencia al deslizamiento:** La mezcla una vez colocada y compactada debe satisfacer los requerimientos de seguridad de toda capa de rodadura, proporcionando en todo momento una superficie segura para el usuario, a través de la vida de servicio de la estructura.

CAUSAS	EFFECTOS
Agregado con tendencia a pulimentarse	Baja resistencia al deslizamiento
Exeso de liganta	Exudación y baja resistencia al deslizamiento
Agregado de textura lisa o mal gradado	Pavimento pulimentable, ocurrencia potencial de hidroplaneo

Tabla 11: Causas y efectos de una baja resistencia al deslizamiento.

Fuente: Teoría de los pavimentos

- **Mayor o menor grado de flexibilidad:** La mezcla asfáltica debe tener las propiedades de acomodarse a los movimientos que se produzcan en las capas de subyacentes.
- **Alto grado de impermeabilidad:** Las mezclas asfálticas que se colocan en la parte superior de una estructura de pavimento debe ser altamente impermeable para prevenir el paso de agua y el envejecimiento prematuro de la mezcla.

CAUSAS	EFFECTOS
Bajo contenido de asfalto	La película delgada de ligante será la causa de envejecimiento prematuro y disgregación
Alto contenido de vacíos durante el diseño de la mezcla	El agua y el oxígeno penetran en el pavimento y causan oxidación y desintegración
Deficiente compactación en campo	Alto contenido de vacíos, permitiendo la infiltración del agua y disminución de la estabilidad

Tabla 12: Causas y efectos de una baja resistencia al deslizamiento.
Fuente: Teoría de los pavimentos

- **Alta durabilidad:** Las mezclas asfálticas durante su vida en servicio en una estructura de pavimento, se verá afectada, además de las cargas de tránsito, por la acción de rayos ultravioleta, aceites y carburantes. La durabilidad aumenta, incrementando el contenido de asfalto, utilizando granulometrías densas y logrando altos grados de compactación en terreno.

CAUSAS	EFECTOS
Bajo contenido de asfalto	Disgregacion y resequedad
Alto contenido de vacíos durante el diseño de la mezcla o por falta de compactacion in situ	Envejecimiento prematuro de la película de ligante, seguido por agrietamiento y por disgregacion
Deficiente compactacion en campo	Denudacion del agregado y tendencia a la desgregacion.

Tabla 13: Causas y efectos de una baja durabilidad de las mezclas asfálticas.
Fuente: Teoría de los pavimentos

- **Trabajabilidad:** La trabajabilidad se define como la facilidad con que el asfalto y los agregados son mezclados y que una vez elaborada la mezcla pueda ser extendida y compactada.

CAUSAS	EFECTOS
Sobre tamaños	Superficie rugosa y mezcla difícil de compactar
Exceso de agregado grueso	Mezcla difícil de compactar
Baja temperatura de mezclado	Mal cubrimiento de las partículas, poca durabilidad, superficie rugosa y dificultad en la compactacion
Alto contenido de arena	Desplazamiento de las mezclas durante la compactacion
Bajo contenido de llenante mineral o filler	Mezcla blanda y baja permeabilidad
alto contenido de filler	Mezcla seca y de difícil manejo, baja durabilidad

Tabla 14: Causas y efectos de una baja durabilidad de las mezclas asfálticas.
Fuente: Teoría de los pavimentos

- **Economía:** Mas que una propiedad es un criterio que debe ser considerado en toda decisión de ingeniería.

El método Marshall, como cualquier método de diseño, busca cumplir con los requerimientos anteriormente formulados, basado en materiales competentes y

un porcentaje óptimo de asfalto el cual se establece mediante la utilización de las siguientes curvas:

- Estabilidad vs. Porcentaje de Cemento Asfáltico.(Figura 14)
- Densidad vs. Porcentaje de Cemento Asfáltico.
- Flujo vs. Porcentaje de Cemento Asfáltico. (Figura 15)
- Porcentaje de Vacíos con Aire en la Mezcla Total vs. Porcentaje de Cemento Asfáltico. (Figura 16)
- Porcentaje de Vacíos en los Agregados Minerales vs. Porcentaje de Cemento Asfáltico.

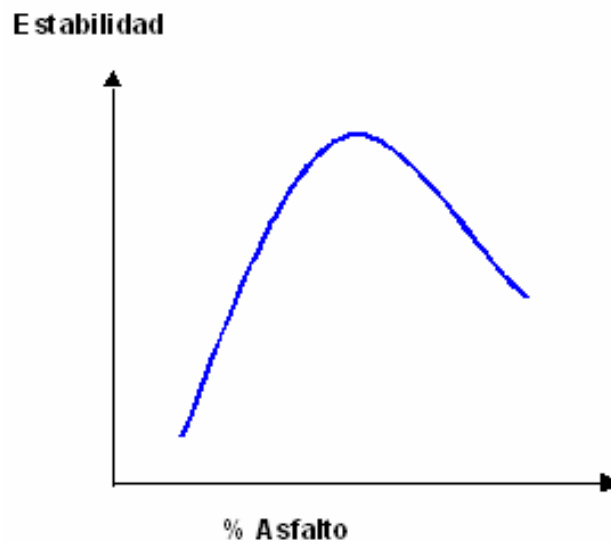


Figura 14: Curva de estabilidad.

Fuente: Curso de laboratorio de pavimentos

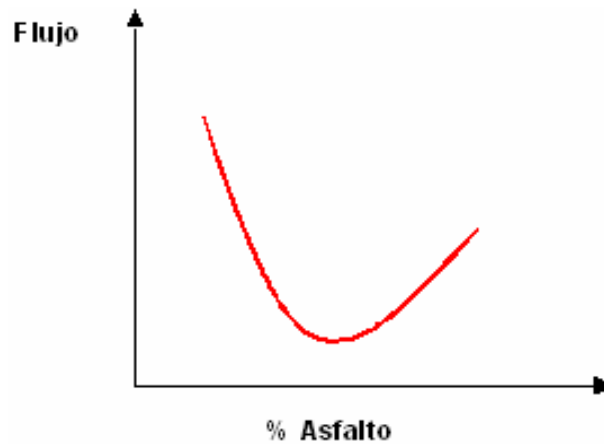


Figura 15: Curva de Flujo.
Fuente: Curso de laboratorio de pavimentos

La curva de peso unitario de la mezcla total es similar a la curva de estabilidad, excepto que el máximo peso unitario ocurre normalmente para un contenido de asfalto un poco más alto que la máxima estabilidad.

El porcentaje de vacíos se reduce al aumentar el contenido de asfalto, hasta llegar al mínimo contenido de vacíos.

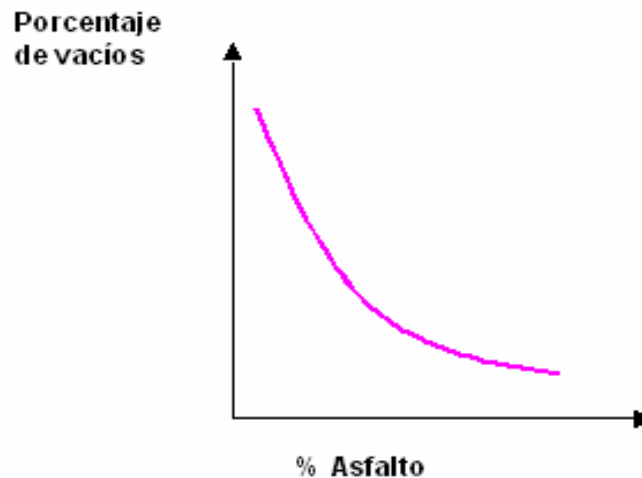


Figura 16: Curva de porcentaje de vacíos.
Fuente: Curso de laboratorio de pavimentos

Una vez se tienen graficadas las curvas se realiza el siguiente procedimiento para la consecución del porcentaje óptimo de asfalto:

- En la curva de estabilidad, se selecciona el porcentaje de cemento asfáltico correspondiente a la máxima estabilidad.
- En la curva de densidad, se selecciona el porcentaje de cemento asfáltico correspondiente al máximo valor de densidad.
- En la curva de vacíos, se selecciona el porcentaje de cemento asfáltico correspondiente al punto medio de las especificaciones aplicables, en cuanto al contenido de vacíos totales en la mezcla, este valor es generalmente de 4% (promedio entre 3% y 5%)
- Se promedian aritméticamente los tres valores anteriores y este valor será el contenido óptimo de asfalto siempre y cuando este cumpla con las especificaciones que se estén aplicando.

¹⁴“Una de las virtudes del método Marshall es la importancia que asigna a las propiedades densidad vs. relación de vacíos del material asfáltico. Este análisis garantiza que las importantes proporciones volumétricas de los componentes de la mezcla están dentro de rangos adecuados para asegurar la durabilidad del pavimento.”

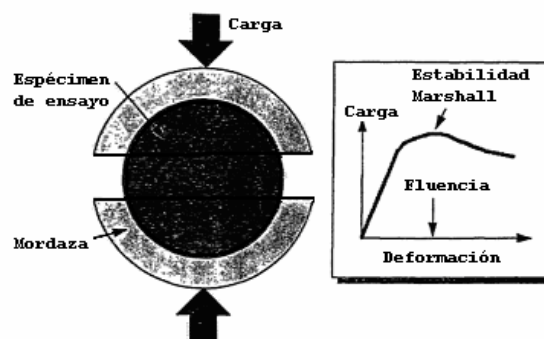


Figura 17: Estabilidad Marshall
Fuente: Teoría de los pavimentos

¹⁴ Cortés M., Cortez – Núñez G., John En, “Análisis comparativo de los métodos de compactación Marshall y SHRP de mezclas asfálticas con miras a implementar el método de diseño volumétrico de Superpave.” (2003).

<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
Hay una atención a los vacíos con aire, resistencia y durabilidad.	La compactación es por impacto.
Los equipos para este método no son costosos.	No considera esfuerzos de corte.
Comprende un fácil uso en el proceso de control.	La carga es perpendicular al eje de compactación.

Tabla 15: Ventajas y desventajas del método Marshall.

Fuente: Análisis comparativo de los métodos de compactación Marshall y SHRP de mezclas asfálticas con miras a implementar el método de diseño volumétrico de Superpave

3.3. PRINCIPIOS GENERALES. METODO SHRP- SUPERPAVE NIVEL 1 (DISEÑO VOLUMÉTRICO)¹⁵

El programa de investigación SHRP (Programa Estratégico de Investigación de Carreteras) fue desarrollado en los Estados Unidos entre 1987 y 1993. Este programa dio como resultado el sistema Superpave (Superior Performance Pavements), que incluye nuevas especificaciones para asfalto y agregado, un nuevo método de diseño de mezclas asfálticas en caliente y un modelo de predicción del comportamiento de pavimentos asfálticos.

El nivel 1 de las especificaciones SHRP para mezclas asfálticas está basado en propiedades empíricas de los agregados y de las mezclas. En dichas propiedades se utilizan para:

- Asegurar un buen nivel de comportamiento para pavimentos de bajo volumen de tránsito.
- Para proveer una selección preliminar de mezclas que será diseñada con el nivel 2 o el nivel 3.

¹⁵ Antecedentes del Diseño y Análisis de Mezclas Asfálticas de SUPERPAVE. Asphalt Institute. Agosto de 1996.

Los pavimentos con bajo volumen de tránsito, expresado éste en términos de ejes simples equivalentes a 8,2 Ton para diseño, posiblemente no requieren el uso del procedimiento basado en la medida de las propiedades del comportamiento en servicio. Por lo tanto, este diseño está basado en criterios relacionados con propiedades empíricas, a su vez con el comportamiento en servicio y diseño volumétrico.

A su vez, los criterios relacionados con el comportamiento en servicio para este diseño son: granulometría, angularidad de los agregados gruesos y finos, contenido de arcilla, forma de las partículas, etc. Las propiedades empíricas de las mezclas incluyen: vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral y vacíos rellenos con asfalto.

El nivel 1 de diseño de mezclas provee controles para la deformación permanente, fatiga y fractura a baja temperatura por diferentes métodos. El principal modo de falla referido a este nivel es la deformación permanente. Evaluando la densidad al final de la compactación, se trata de evitar un exceso de contenido de ligante asfáltico que podría causar deformación plástica prematura de la mezcla. El esqueleto granular que forman los agregados y que mejora la resistencia a la deformación permanente, tiene también influencia en la pendiente de la curva de densificación. La estructura granular se controla mediante una adecuada granulometría y especificando una densidad máxima al principio de la compactación junto con la densidad a la compactación de diseño.

La deformación permanente se controla mediante las propiedades de los agregados y las propiedades empíricas de las mezclas. Por ejemplo, la angularidad del agregado grueso está definida como aquellas partículas más grandes que 4.75mm con una cara triturada. El porcentaje de caras trituradas requerido está especificado de acuerdo con el nivel de tránsito y la profundidad

desde la superficie. Las capas de desgaste superficial requerirán un mayor número de caras trituradas que las capas de base.

3.4. OTROS METODOS DE DISEÑO

Aunque el Diseño de Mezclas Marshall intenta determinar una base apropiada con desarrollos comprobados, la prueba usada no mide las propiedades de ingeniería fundamentales de importancia a la actuación de la mezcla; a saber, la textura elástica y viscosa, la resistencia a la falla por fatiga, y la resistencia a la deformación permanente. Por lo anterior, existe la necesidad de un diseño de mezclas dirigido a estas propiedades.

- MÉTODO DE LA UNIVERSIDAD DE NOTTINGHAM¹⁶

Cooper propuso un método para el diseño de mezclas continuamente-graduadas (bases y rodaduras) que determina la mejor gradación y porcentajes adecuados para las propiedades mecánicas óptimas a un nivel dado de consolidación. El método se resume en el diagrama de flujo. Se nota que el Método es similar al Método Marshall en lo que involucra:

- La consideración de agregado granular
- La preparación de los especímenes de la prueba con las proporciones variantes de materiales constitutivos
- La determinación de proporciones volumétricas ensayando las propiedades mecánicas
- La selección de la mezcla óptima

El método propuesto difiere, sin embargo, en los detalles cubiertos por algunos de estos puntos. En particular, las variables de la mezcla incluyen gradación del

¹⁶ BITUMINOUS PAVEMENTS. Material, Design and Evaluation. G-15. 15th-17th APRIL, 1996.

agregado y esfuerzo de compactación, así como el contenido de asfalto, mientras la prueba de propiedad mecánica se preocupa por la textura de la mezcla y la resistencia a la deformación permanente.

La compactación se da en tres niveles expresada en Porcentaje Refusal de Densidad (PRD), como sigue:

- NIVEL 1: Compactación Refusal (100 PRD)
- NIVEL 2: Intermedio (96 PRD)
- NIVEL 3: Bajo (93 PRD)

Este dispositivo compacta especímenes de diámetro de 150mm, a través de la compactación amasada y vibratoria y permite la compactación de mezclas con grava de grandes tamaños (40mm tamaño máximo del agregado).

Después de la compactación, el contenido de vacíos de aire y los vacíos en el agregado mineral (VMA) se verifica con base en el criterio. Después se realizan los ensayos de Modulo Dinámico y de resistencia a la Deformación Permanente y se verifica contra el criterio dispuesto para éstas pruebas. Esto permite la selección de la mezcla óptima que puede probarse entonces la resistencia a la fatiga y a la durabilidad recomendadas para la formulación final.

El diseño de mezclas es un problema complejo que involucra una consideración cuidadosa de los requisitos de la mezcla que, a su vez, exige compromisos en la selección final de los materiales de la mezcla. Los métodos de diseño de mezclas deben incluir las pruebas a los materiales que serán usados para cada proyecto de pavimentos. Éstos deben incluir pruebas para determinar las propiedades fundamentales usando ensayos representativos aplicados a especímenes y la viabilidad de mezclas alternativas debe evaluarse usando el criterio real

4. CONCEPTOS GENERALES DE LA CARACTERIZACION DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.

4.1. PROPIEDADES GENERALES DE LOS MATERIALES

4.1.1. PROPIEDADES DEL AGREGADO

Una amplia variedad de agregados minerales ha sido empleada para producir mezclas densas en caliente. “Algunos materiales son llamados agregados naturales (provenientes de lechos de ríos, canteras o mantos glaciares) y otros sintéticos (no provenientes de una fuente natural) que por lo general son subproductos industriales.”¹⁷ Independientemente de la fuente, métodos de procesamiento o mineralogía, se espera que el agregado provea un fuerte esqueleto pétreo para resistir las repetidas acciones de una carga.

Se tiene información de esfuerzos máximos resistidos por el agregado pétreo son de el orden de 600 kg/cm^2 a 2800 kg/cm^2 (*Rodríguez, en incidencia de los agregados en el comportamiento de las carpetas asfálticas*), lo que es despreciablemente inferior que el esfuerzo directo transmitido por una llanta de camión; sin embargo el asfalto posee un esfuerzo limite comparativamente despreciable. Lo cual pone en evidencia que la utilización de agregados de gran tamaño en la superficie de la carpeta tiende a disminuir esfuerzos, incrementando de esta manera el conjunto asfalto-agregado en relación directa al tamaño del agregado. La determinación del modulo de elasticidad de la mezcla se ve complicada por tal diferencia de comportamiento.

Ya que el asfalto posee un modulo de elasticidad despreciable resistencia a la compresión también despreciable y una adherencia que depende de la temperatura, se puede visualizar que una fuerza de compresión aplicada sobre una muestra producirá que la deformación resultante se concentre en el asfalto

¹⁷ León, Hugo. En “Tecnologías del Cemento Asfáltico”. Cali 2002.

que se encuentra entre las partículas dilas partículas de agregado no se encuentran en contacto directo unas con otras.

En palabras de Juan Rodríguez se puede concluir que¹⁸ “... la combinación de tamaños de partículas o agregados que produzcan un mínimo de vacíos, producirá una mezcla muy estable volumétricamente y que por consiguiente requerirá un mínimo de material ligante, ofreciendo deformaciones mínimas pero con problemas por cambios de temperatura”, “Cuando el volumen de vacíos de una mezcla llega a ser muy bajo la estabilidad se reduce; la falta de estabilidad causada por el bajo contenido de vacíos puede presentarse a la temperatura de compactación y puede que no sea evidente a temperatura e diseño en el laboratorio”¹⁹

Investigaciones de Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (Strategic Highway Research Program, SHRP) establecen que agregados de naturaleza rugosa dan mejores resistencias que los redondeados, “Aunque la pieza de agregado redondeado podría poseer la misma resistencia in terna de una pieza angular, las partículas angulares tienden a cerrarse mas apretadamente resultando una fuerte masa de material. Las partículas redondeadas en vez de trabarse, tienden a deslizarse una sobre otra.”²⁰

Otro factor de vital importancia en las mezclas asfálticas, es el de la resistencia al corte de los agregados. Cuando una masa de agregados es sometida a una carga, se puede generar dentro de la masa un plano de corte donde las partículas son cizalladas unas respecto a la otra lo cual resulta en una deformación permanente en la masa y por lo tanto en la mezcla.

¹⁸ Rodríguez, Juan. En “Incidencia de los agregados en el comportamiento de las carpetas asfálticas” San Salvador, 2001

¹⁹ Cajiao, H., “Curso de pavimentos para graduados – Importancia de la Compactación del Concreto asfáltico” Bogota, Colombia, (1968)

²⁰ ASFALT INSTITUTE, Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE

El contenido y calidad del llenante se ve reflejada en la compactación y compactación máxima de la mezcla. Existe una máxima densidad la cual se puede expresar en función de la relación de llenante-asfalto calculada con base en el volumen. Factor esencial la vida útil de la mezcla.

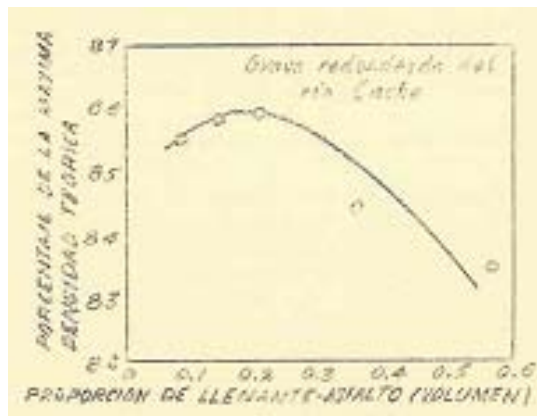


Figura 18: Llenante Vs. Porcentaje de la máxima densidad teórica
Fuente: Curso de pavimentos para graduados

4.1.2. PROPIEDADES DEL LIGANTE

“A través de los años los ingenieros de carreteras han tenido gran dificultad para definir satisfactoria mente las propiedades de una mezcla asfáltica debido al empleo de un cementante (asfalto) que varía de un estado fluido viscoso, a otro de características sólidas y frágiles, dependiendo a la temperatura en que se encuentre. Debido a esto las propiedades mecánicas de las carpetas asfálticas no han sido sujetas a un estricto análisis elástico con un grado razonable de confianza al que los ingenieros están acostumbrados a aplicar a los diferentes sistemas estructurales y en vista al comportamiento inelástico de las mismas, particularmente en temperaturas elevadas del medio ambiente, ha sido ha sido intentos de estimar su comportamiento utilizando modelos visco-elásticos”²¹ esto conduce a hacer aun mas complicado el diseño de una mezcla no solo por este

²¹ Rodríguez, Juan. En “Incidencia de los agregados en el comportamiento de las carpetas asfálticas” San Salvador, 2001

tipo de comportamiento si no también por la compleja variación que se tiene de parámetros obtenidos en laboratorio.

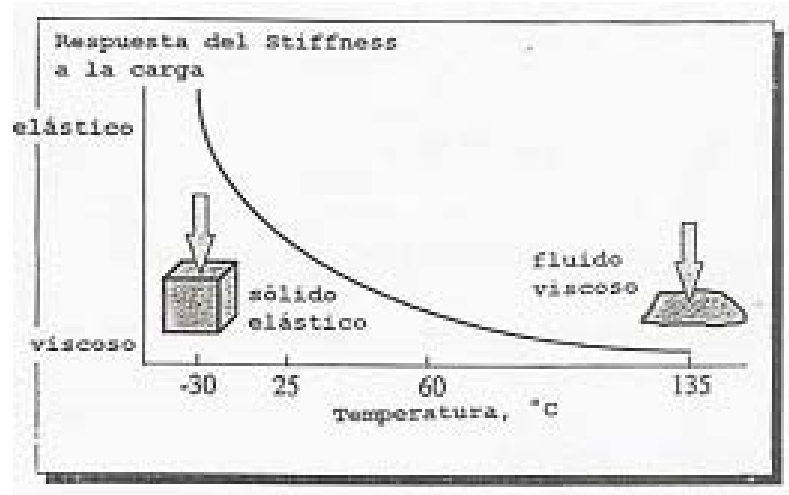


Figura 19: Comportamiento visco - elástico del asfalto
Fuente: ASFALT INSTITUTE

El ligante asfáltico se caracteriza por su susceptibilidad térmica, lo cual puede verse como una ventaja o desventaja. Esto es que sus principales propiedades dependen directamente de la temperatura y es por esto que casi todos los ensayos de caracterización de asfaltos y mezclas asfálticas deben especificar temperatura. El comportamiento del asfalto depende también del tiempo de aplicación de la carga. “para una misma carga y un mismo asfalto, diferentes tiempos de aplicación de la carga implican propiedades diferentes, es decir una baja velocidad de carga se puede simular con temperaturas elevadas y una alta velocidad de carga puede simularse con bajas temperaturas.”²²

²² ASFALT INSTITUTE, Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE

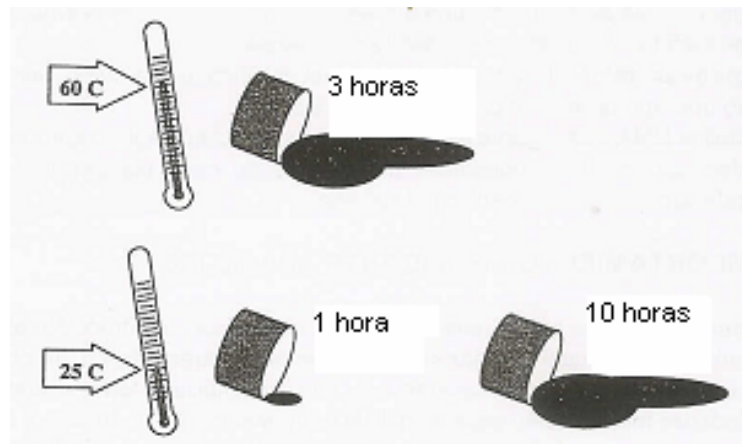


Figura 20: Dependencia tiempo temperatura del cemento asfáltico
Fuente: ASFALT INSTITUTE

CRF²³ Otra característica importante del cemento asfáltico, es que al estar compuesto de partículas orgánicas, reacciona con el oxígeno del medio ambiente. Dicha reacción se denomina oxidación y cambia a la estructura y composición de las moléculas de asfalto. Al reaccionar con el oxígeno, la estructura del asfalto se hace más dura y frágil y produce en la mezcla lo que se conoce como endurecimiento por oxidación o endurecimiento por envejecimiento. Dicha oxidación se produce más rápido a altas temperaturas. Es por eso que gran parte del envejecimiento ocurre durante el proceso de producción de la mezcla asfáltica, cuando es necesario calentar el cemento asfáltico para mezclar y compactar.”

4.2. PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LAS MEZCLAS

CFR²⁴ “Los Vacíos (VMA) en el agregado mineral, junto con los vacíos en la mezcla total (VTM), son considerados parámetros importantes para el diseño en la mezcla en caliente de asfalto.

²³ ASFALT INSTITUTE, Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE.
²⁴ Prithvi S. Kandhal, S. P., Chakraborty S. En “EVALUATION OF VOIDS IN THE MINERAL AGGREGATE FOR HMA PAVING MIXTURES” Auburn, (1996)

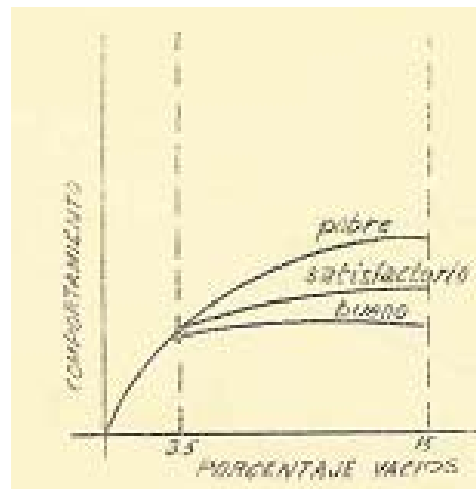


Figura 21: Porcentaje de vacíos Vs. Comportamiento de la mezcla

Fuente: Curso de pavimentos para graduados

Se cree que el requerimiento mínimo de agregado mineral es necesario para asegurar que la mezcla no sea deficiente para poder asegurar una mezcla durable y poder para prevenir ahuellamiento y/o agrietamiento.

Los recientes requerimientos del agregado mineral en gran parte están basados en los trabajos hechos entre 1950 y 1960. Sin embargo la literatura de los estudios no indicaron la existencia de ningún dato racional correlacionando la durabilidad mezcla de asfaltos caliente pavimentados con el valor mínimo de mineral agregado especificado para la mezcla del diseño. El concepto de vacíos en el mineral agregado (VMA) es considerado fundamental en el diseño de mezclas densas en caliente calientes (HMA). El termino VMA describe que la porción de espacio en un compacto HMA (pavimento) o espécimen que no este ocupado por el agregado. Procedimientos actuales de diseños incluyendo el SUPERPAVE son basadas en la necesidad de seleccionar y proporcionar que la variedad de materiales tenga ciertas proporciones volumétricas como en el VMA. El mínimo requerimiento para el VMA (se basa en le tamaño nominal del agregado) es usado para asegurar que la mezcla HMA no es deficiente en el cemento asfáltico (dado esto se asegura la durabilidad de la mezcla) y/o en los vacíos (VTM) para prevenir el sangrado o grietas longitudinales. Los

requerimientos mínimos para VMA han sido cuestionados por muchos investigadores por la falta de datos, correlacionando la mezcla y sus VMA con la mezcla HMA en términos de durabilidad.

Generalmente se esta de acuerdo con la gran permeabilidad, altos vacíos de aire y las delgadas capas de asfalto en la partículas agregadas son la primera causa de envejecimiento en la carpeta de asfalto que contribuye a la falta de durabilidad de las mezclas de HMA usualmente encontradas en el campo.

Sin embargo el concepto de promedio del espesor de la película para mezclas de asfalto densas no es fácilmente comprendido. Cuanta validación se le puede asignar al espesor de una película, simplemente calcula dividiendo el are total de la superficie del agregado (obtenido de su gradación) por el contenido asfáltico. En la mayoría no es cierto que todas las partículas en una mezcla tengan el mismo espesor de película en las capas de asfalto. Partículas agregadas deben tener capas mas gruesas comparadas con las partículas de agregado grueso y también para todos los propósitos prácticos, algunas partículas podrían ser incrustadas en el concreto asfáltico.”

²⁵ “Literatura reciente a encontrado Monismith et al. (1994) observaron que un incremento en el contenido de vacíos de la mezcla, provoca un decremento en la resistencia de la mezcla a la generación de roderas. Este punto se pudo analizar al realizar diversas pruebas de compresión axial en fluencia. Aunque las mezclas se comportaban diferente, de manera significativa, su módulo instantáneo no era muy diferente. Y como se esperaba, las mezclas con bajo contenido de vacíos se comportaron mejor que las mezclas de altos contenidos.” Posteriormente este investigador “observo que un incremento en el contenido de vacíos en el agregado mineral, provoca un decremento en la resistencia de la mezcla a la

²⁵ Garnica, P., Gómez J. A., Sesma J. A., “Mecánica de materiales para Pavimentos” Ciudad de México, México, (2002).

generación de roderas. Kandhal y Mallick (2001) observaron en su estudio el efecto de los vacíos en el agregado (VAM) mineral sobre el potencial de roderas en mezclas asfálticas. Utilizando el analizador de pavimentos asfálticos (APA) sobre mezclas que contienen distintos tipos de agregados (calizas, granitos y gravas), concluyeron que el efecto de este factor está asociado con el efecto del espesor de la capa asfáltica. Un incremento en los vacíos y en el espesor causa un incremento en las deformaciones permanentes para mezclas de granito y caliza., mientras que causa un decremento en las deformaciones de mezclas con gravas. En este momento, el efecto de los vacíos sobre las roderas no está claramente entendido, por lo que se requiere un estudio posterior para comprender completamente dicho efecto.”

4.3. CARACTERIZACION DINAMICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICA

4.3.1. MODULO RESILIENTE

La rigidez de las mezclas asfálticas es de primordial importancia al determinar qué tan bien se comporta un pavimento y es esencial para el análisis de la respuesta del pavimento a la carga vehicular. Aunque las pruebas de fatiga y de deformación permanente pueden ser utilizadas para medir la rigidez bajo condiciones similares a aquellas experimentadas por las mezclas de pavimentos en servicio, no hay garantía de que estas pruebas sean el mejor sistema para reproducir (correlacionando) módulo de resiliencia.

“Los valores del modulo resiliente pueden emplearse para evaluar la calidad relativa de los materiales, así como para generar datos de entrada para el diseño, la evaluación y el análisis de pavimentos. Así mismo, el resultado del modulo puede emplearse para estudiar efectos de temperatura, rata de carga y periodos de reposo entre otros factores que pueden ser tenidos en cuenta.

Puesto que el procedimiento para hallar el modulo es no destructivo, los ensayos pueden repetirse sobre un mismo espécimen para evaluar su condición en lo que respecta a la temperatura o humedad.

El modulo resiliente se refiere a los procedimientos para preparar y ensayar núcleos, fabricados en el laboratorio o recuperados de mezclas asfálticas colocadas en el terreno, mediante la aplicación del ensayo de tensión indirecta con carga repetida. El procedimiento aplica variaciones de temperatura, carga, frecuencia y duración de carga. La serie recomendada de pruebas, consiste en realizar el ensayo a 5, 25 y 40°C, a una o mas frecuencias de carga, por ejemplo, a 0.25, 0.5 y 1.0Hz para cada temperatura. Esta serie recomendada dará como resultado nueve valores de ensayos para una muestra que pueden emplearse para evaluar el comportamiento resiliente de toda la muestra (Curva maestra de la mezcla).

El ensayo de tensión indirecta con cargas repetida para determinar el modulo resiliente de mezclas asfálticas, se lleva a cabo aplicando cargas de compresión con un dispositivo. La carga se aplica verticalmente en un plano diametral de un espécimen cilíndrico de concreto asfáltico. La deformación horizontal resultante del espécimen se mide, y este resultado junto con una relación de Poisson supuesta se emplea para calcular un modulo resiliente. La relación de Poisson resiliente puede también calcularse empleando las deformaciones recuperables verticales y horizontales que se miden durante el ensayo. De la interpretación de los datos de deformación, resultan dos valores de módulos resilientes para ser usados. El modulo resiliente instantáneo, que se calcula empleando la deformación recuperable que ocurre instantáneamente durante la parte de descarga de un ciclo, y el modulo resiliente total, que se calcula empleando la deformación recuperable total, que incluye la recuperable instantánea como la

deformación recuperable dependiente del tiempo, que continúa durante la descarga y el resto del periodo de un ciclo.”²⁶

“Los ensayos que se utilizan para conocer el módulo de resiliencia son:

- Prueba de rigidez axial resiliente
- Prueba de rigidez diametral resiliente
- Prueba de rigidez dinámica a flexión
- Prueba de rigidez dinámica cortante

Los tipos de pruebas anteriores han demostrado ser sensibles a la modificación de la mezcla y sus variables de prueba tales como: tipo de asfalto, tipo de agregados, contenido de vacíos de la mezcla y temperatura, entre otros.

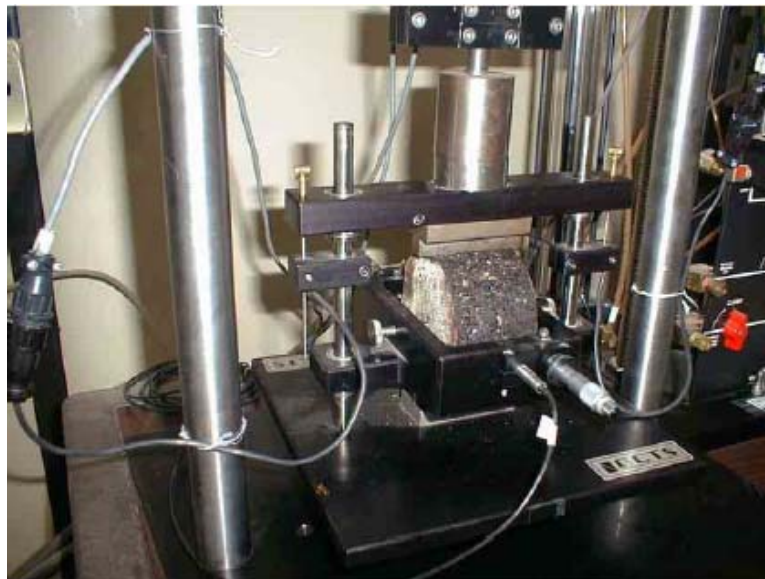


Figura 22: Dispositivo de prueba diametral para la determinación de modulo de resiliencia

Fuente: Mecánica de materiales para Pavimentos.

²⁶ Norma INVIAS I.N.V. E - 749

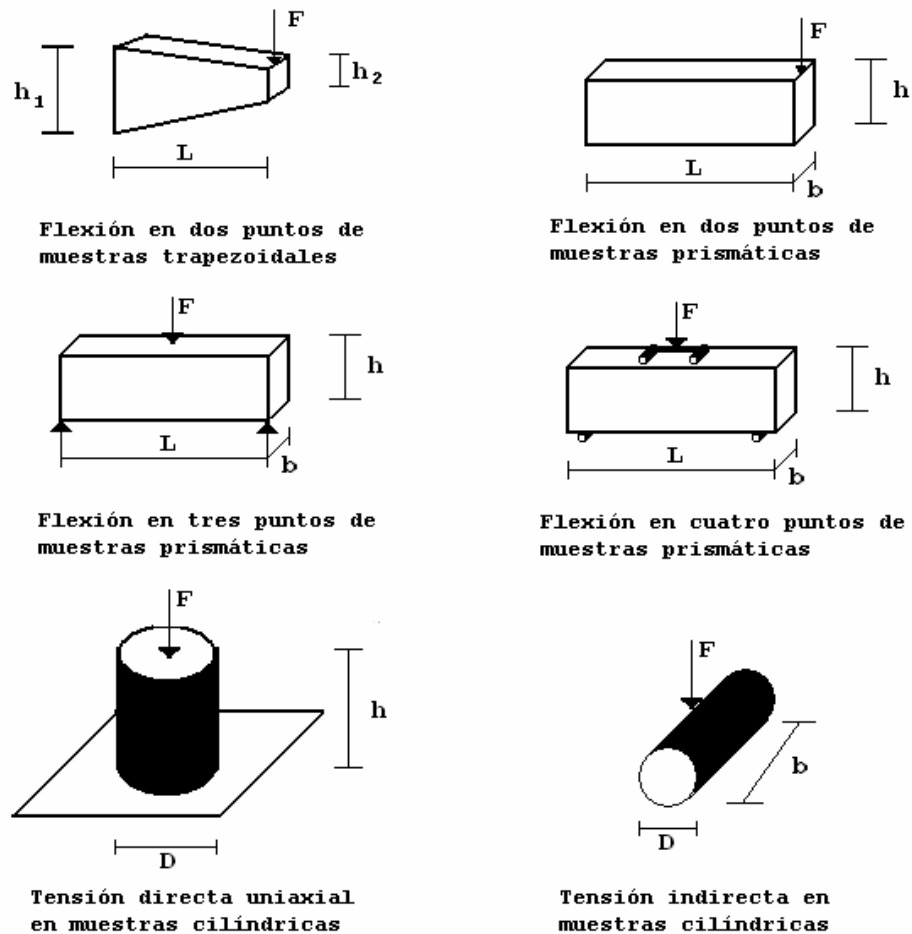


Figura 23: Métodos de ensayo para módulo dinámico
Fuente: European Standard, Stiffness of Bituminous Mixtures

4.3.1.1. DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS PARA OBTENCIÓN DEL MODULO²⁷

Para la obtención del módulo resiliente se realiza el ensayo de tensión directa, utilizando la norma I.N.V. E -749 del INVIAS. En esta se encuentra el procedimiento mostrado a continuación:

Se colocan los especímenes de ensayo en un gabinete de temperatura controlada y se llevan a la temperatura especificada para el ensayo. Estos

²⁷ Norma INVIAS I.N.V. E - 749

especímenes deben permanecer en el gabinete a la temperatura por lo menos durante 24 horas antes del ensayo. Se coloca el espécimen dentro del equipo NAT (Figura 24) en posición para que las franjas de carga sean paralelas y queden centradas respecto al plano diametral vertical.



Figura 24: Equipo NAT

Luego, se aplica una carga repetida con forma de onda adecuada al espécimen, sin impacto durante un periodo mínimo, suficiente para obtener una lectura de deformación uniforme. De acuerdo con la frecuencia y la temperatura de carga, una repetición mínima de carga de 50 a 200 es típica; sin embargo, el mínimo para una situación dada debe determinarse de tal manera que las deformaciones resilientes sean estables, tan pocas como 5 repeticiones de carga han sido encontradas suficientes para cargas tales como 22.3 y 111.2N.

La evaluación del modulo resiliente comúnmente incluirá ensayos a 3 temperaturas, por ejemplo 5 ± 1.8 , 25 ± 1.8 , 40 ± 1.8 °C, a una o mas frecuencias de carga, por ejemplo 0.33, 0.5 y 1.0Hz para cada temperatura. El intervalo

recomendado de carga es el que induzca del 10 al 50% de la resistencia a la tensión. A continuación, se controlan las deformaciones horizontales y si se miden, las verticales durante el ensayo. Si una deformación vertical acumulada mayor a 0.025mm ocurre durante el ensayo se reduce la carga aplicada, la temperatura de ensayo o ambas.

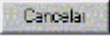
Cada determinación del modulo resiliente deberá completarse dentro de 4 minutos, a partir del momento en que los especímenes son removidos del equipo NAT. El tiempo límite de ensayo de 4 minutos es dejado de lado si la carga se efectúa dentro de un gabinete de control de temperatura, tal como lo hace el equipo NAT. Seguidamente, se ensaya cada espécimen para el modulo resiliente dos veces.

Después del primer ensayo se reemplaza la muestra en el NAT durante 10 minutos se continua el ensayo rotando el espécimen aproximadamente 90° y se repite el ensayo. Se recomiendan 3 especímenes para cada serie dada de ensayos con variables de temperatura, duración de carga y frecuencia de carga. Para reducir el daño permanente del espécimen, luego del ensayo, debe empezarse a la temperatura mas baja, la duración de carga y con la carga más pequeña. El ensayo subsiguiente sobre el mismo espécimen, deberá ser para condiciones que produzcan progresivamente módulos más bajos.


Para finalizar, se miden las deformaciones recuperables promedio horizontales y verticales durante al menos tres ciclos de carga, después de que la deformación repetida resiliente haya llegado a ser estable. Las medidas de deformación vertical pueden omitirse cuando la relación de Poisson no se vaya a determinar.

4.3.1.2. MODO DE USO DEL SOFTWARE²⁸

Inicio del Software

Se corre el programa ITSM, el cual en cada ventana suministra información sobre el paso que se debe realizar, a continuación se da brevemente la descripción de los cuadros de diálogo. Para salir del ensayo en cualquier punto se pulsa la tecla 

y/o , para pasar a la ventana siguiente  y para retroceder .

· Ventana 1: no ubique el marco de tensión indirecta bajo el bastidor hasta que se indique. 

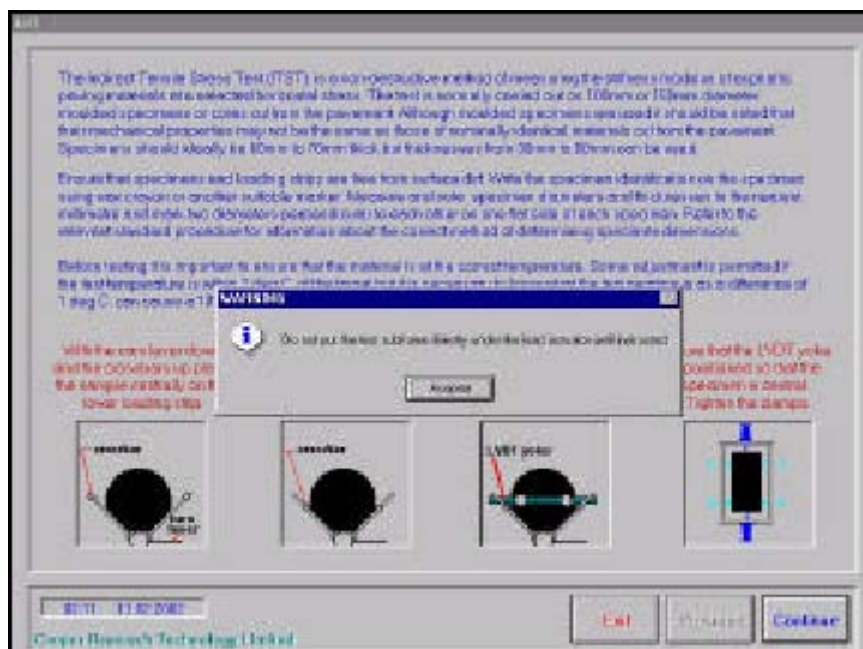


Figura 25: Ventana 1

· Ventana 2: quiere imprimir los resultados? 

²⁸ Tavera, A, “Manual de instalación, operación, mantenimiento y montaje de los ensayos para el equipo N.A.T.” Bogotá, Colombia, (2002)

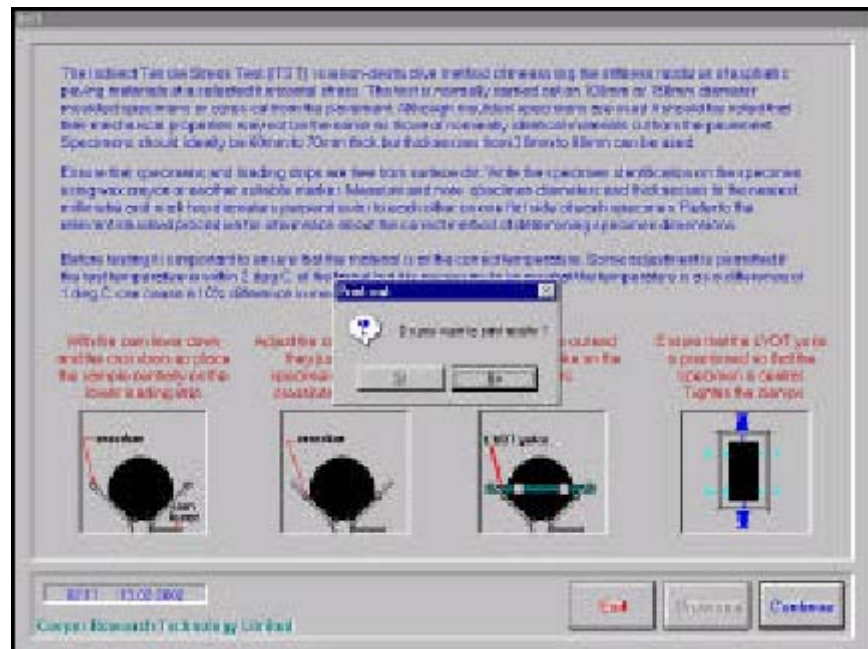


Figura 26: Ventana 2

· Ventana 3: seleccione el tipo de letra, estilo y tamaño que desea para su informe.

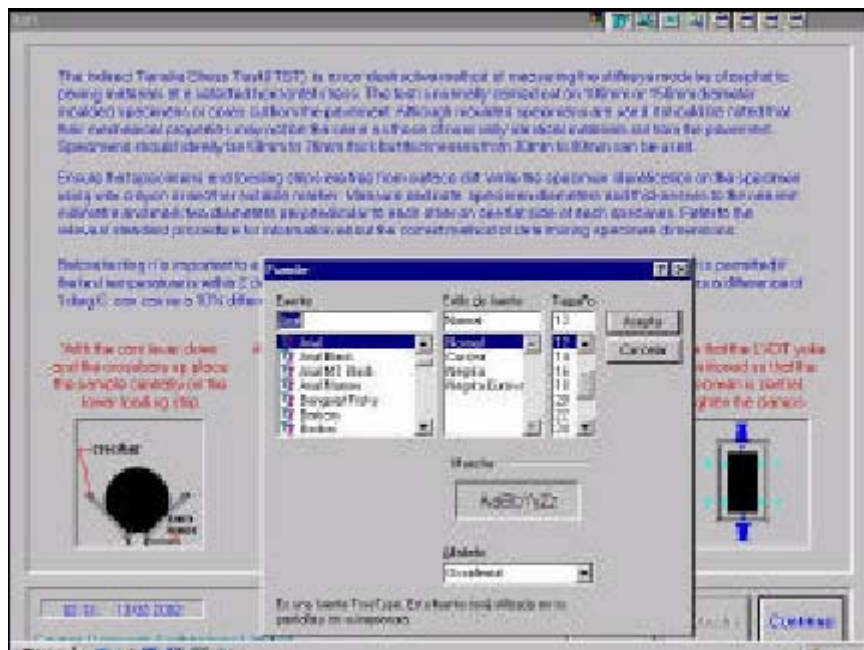


Figura 27: Ventana 3

- Ventana 4: quiere guardar los datos del ensayo en el disco duro?

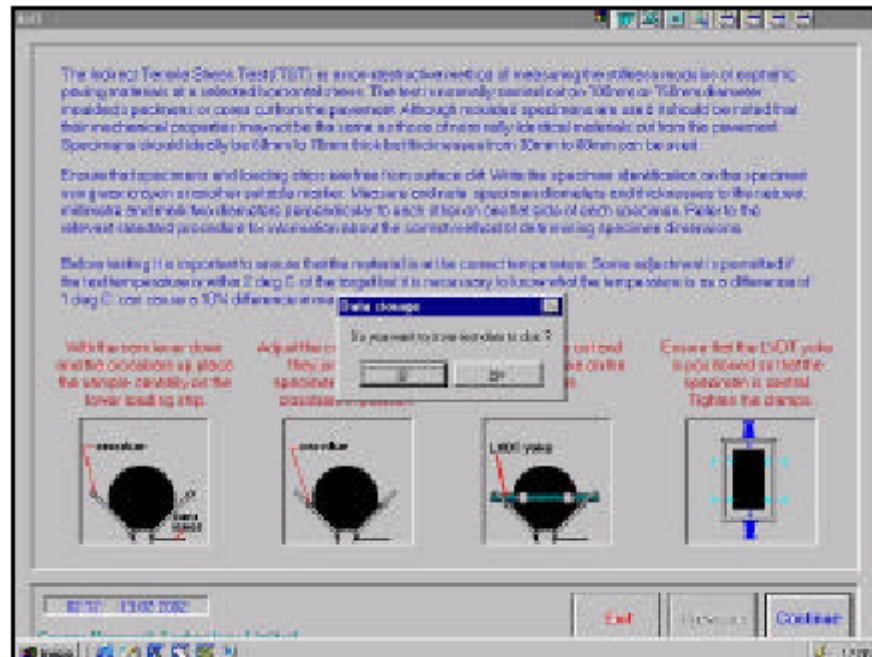


Figura 28: Ventana 4

- Ventana 5: proporcione la ubicación nombre del archivo.

Guardar

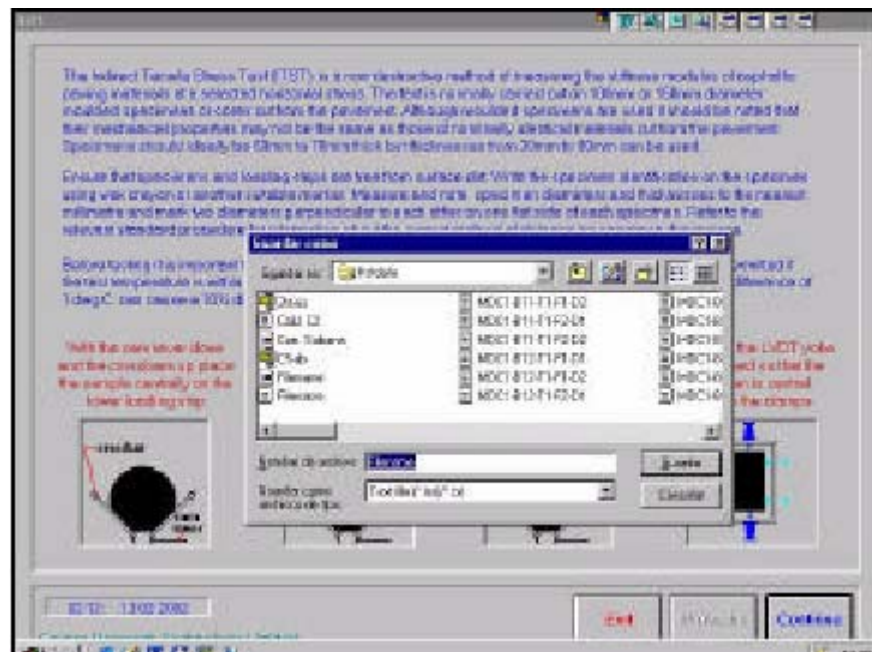


Figura 29: Ventana 5

Montaje de la muestra en el Marco de Tensión Indirecta

· Ventana 6: en esta ventana observamos cuatro pasos (A-D) para la correcta colocación de la muestra y del marco de deformación.

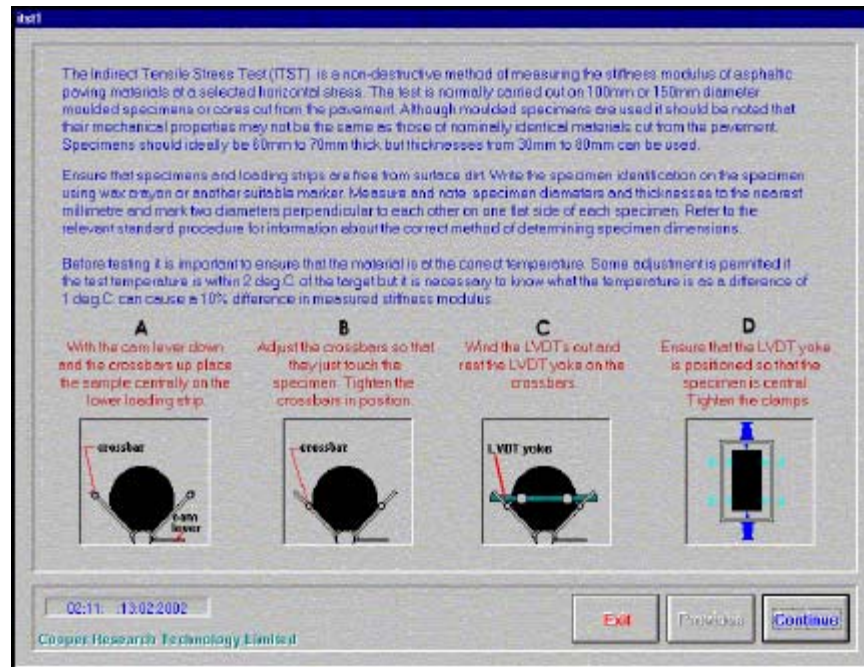
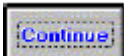



Figura 30: Ventana 6

A. Con las palancas de leva en posición horizontal y las barras transversales en la parte superior, se centra la muestra en la mordaza de carga inferior del marco de tensión indirecta.

B. Se acomodan las barras transversales para que toquen ligeramente la muestra, luego se fijan en esa posición apretando sus tuercas de ajuste.

C. Se apoya el marco de deformación en las barras transversales.

D. La muestra debe estar centrada correctamente dentro del marco de deformación, apriete los tornillos con el mismo torque para sujetar centradamente la muestra al marco de deformación y posicione los LVDTs tipo IT dentro de sus dispositivos de ajuste. 

- Ventana 7: se debe revisar nuevamente el cumplimiento del numeral 1.5; seleccione el nombre del operario; si es un usuario nuevo agréguelo a la lista. 

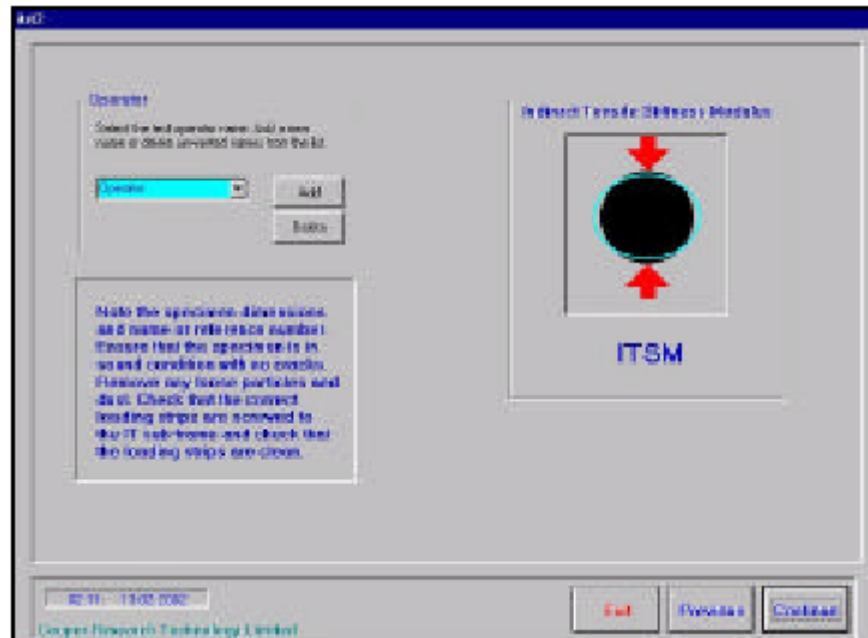



Figura 31: Ventana 7

- Ventana 8: escriba la identificación de la muestra, es conveniente rotular el primer y segundo diámetro. 

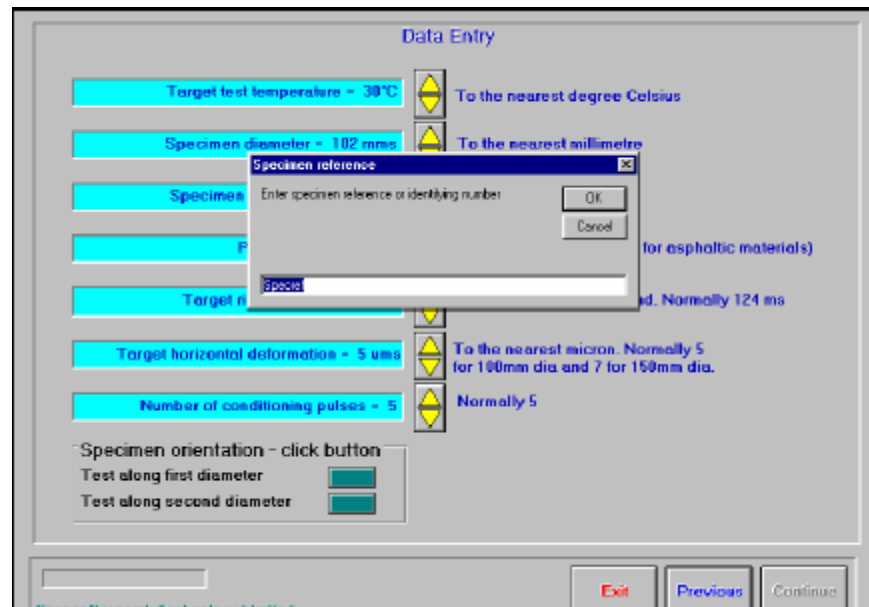



Figura 32: Ventana 8

· Ventana 9: se tienen los siete (7) datos de entrada de la prueba, que se pueden modificar con los botones  y se observan enumerados en la ventana 9 de la siguiente manera:

1. Temperatura objetivo de ensayo, aproximada a $1^{\circ}\text{C} = 20^{\circ}\text{C}$
2. Diámetro de la muestra medido en 1.3, aproximado a 1mm.
3. Altura de la muestra medida en 1.4 aproximada a 1mm.
4. Relación de Poisson's, se asume un valor de 0,35 ya que no se realizan mediciones de deformaciones verticales.
5. Tiempo de carga objetivo RT conforme a la siguiente tabla:

	Frecuencia (Hz)	RT (ms)
$RT = 312,5/f$	1,56	200
	2,50	125
	10,00	31


Tabla 16: tiempos de carga

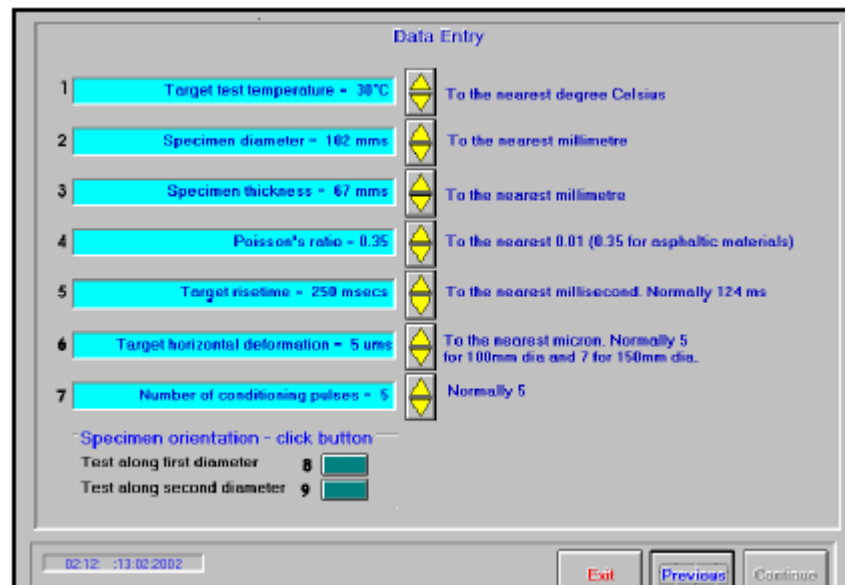
6. Deformación horizontal objetivo, de acuerdo a la siguiente Tabla.

ϕ muestra (mm)	Deformación (μm)
100 \pm 5	5 \pm 2
150 \pm 5	7 \pm 2

Tabla 17: deformación horizontal objetivo

- Número de pulsos de acondicionamiento: se recomienda utilizar 5 (cinco), pero este número depende de los resultados, como se explicará más adelante.

También se debe consignar si la prueba se está realizando a lo largo del primer (Ventana 9: 8) o segundo (Ventana 9: 9) diámetro, para ello se oprimirá el botón  correspondiente, entonces el letrero cambiará a color rojo, como se puede observar en la Ventana 10, en este caso tenemos un ensayo en el primer diámetro.



Data Entry

- Target test temperature = 30°C To the nearest degree Celsius
- Specimen diameter = 102 mms To the nearest millimetre
- Specimen thickness = 67 mms To the nearest millimetre
- Poisson's ratio = 0.35 To the nearest 0.01 (0.35 for asphaltic materials)
- Target risetime = 250 msecs To the nearest millisecond. Normally 124 ms
- Target horizontal deformation = 5 μm To the nearest micron. Normally 5 for 100mm dia and 7 for 150mm dia.
- Number of conditioning pulses = 5 Normally 5

Specimen orientation - click button

Test along first diameter 8

Test along second diameter 9

02:12 :13.02.2002

Exit Previous Continue

Figura 33: Ventana 9

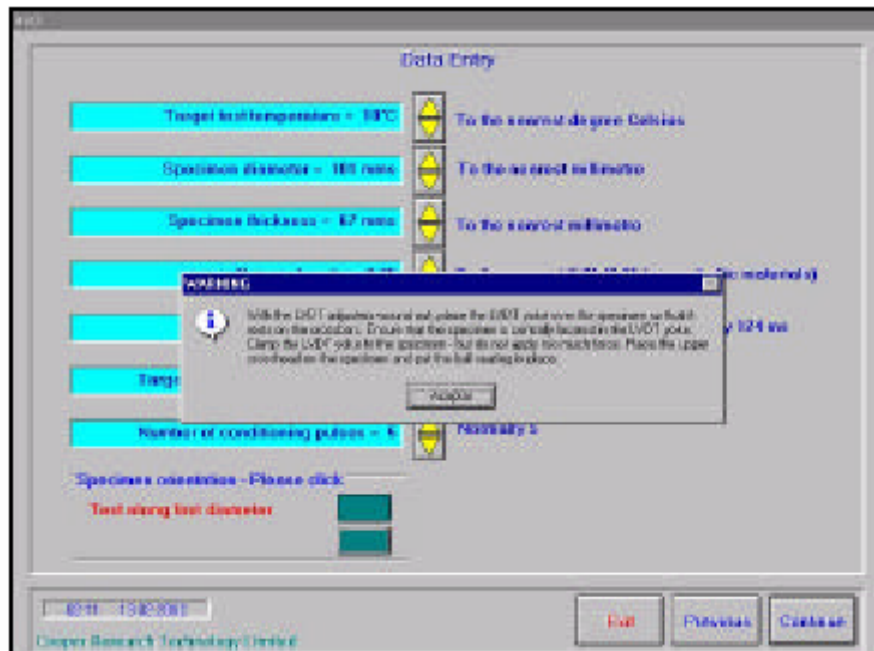


Figura 35: Ventana 11

· Ventana 12: sitúe el montaje del Marco de Tensión Indirecta centradamente bajo el bastidor.

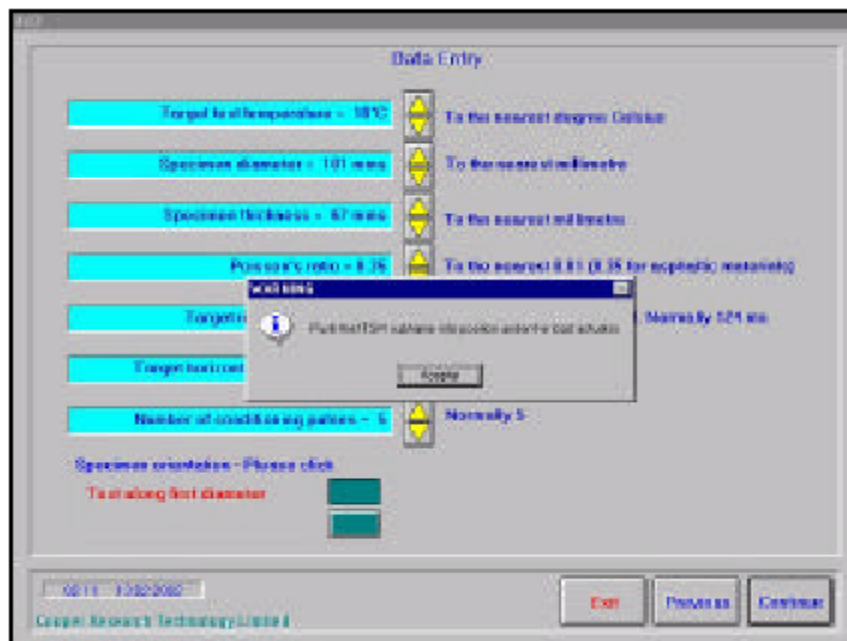
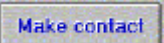



Figura 36: Ventana 12

Posicionamiento de la instrumentación

· Cuando el ensayo cambia a la Ventana 13 ,la barra del bastidor se desplazará rápidamente desde su posición en el extremo superior hasta el límite superior. Para descender la barra del bastidor se utilizan los botones correspondientes, de acuerdo a la distancia que se necesite (5mm ó 10mm). Este movimiento se puede controlar por medio de la escala y leer el valor exacto de la posición en el recuadro azul. La posición lo que muestra es la distancia de la parte inferior de la celda de carga a la media esfera situada en el Marco de Tensión Indirecta; cuando esta distancia este cercana a los 5mm se pulsa el botón  (Hacer contacto) y el bastidor descenderá muy lentamente hasta hacer contacto entre las partes anteriormente mencionadas. 

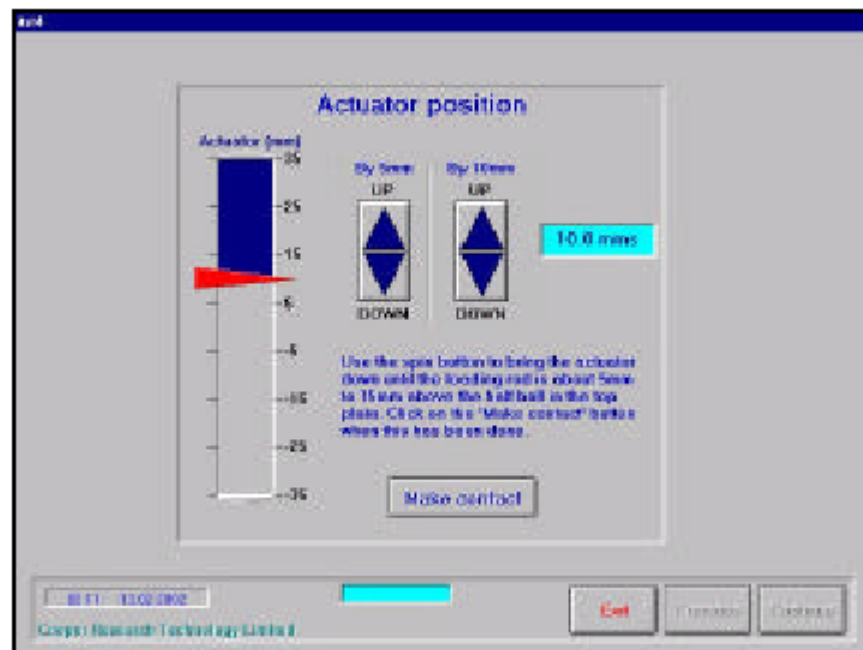



Figura 37: Ventana 13

- En la Ventana 14A observamos las lecturas de la instrumentación del ensayo. En este instante se ajustan los LVDTs. Las flechas blancas nos indican que los LVDTs no están en posición, por lo que se deben ajustar mediante el movimiento de los dispositivos de

ajuste del marco de deformación, observando los cambios que se muestran en la pantalla y hasta lograr las flechas rojas que se observan en la Ventana 14B, que nos indican que los LVDTs están en contacto con la muestra. 

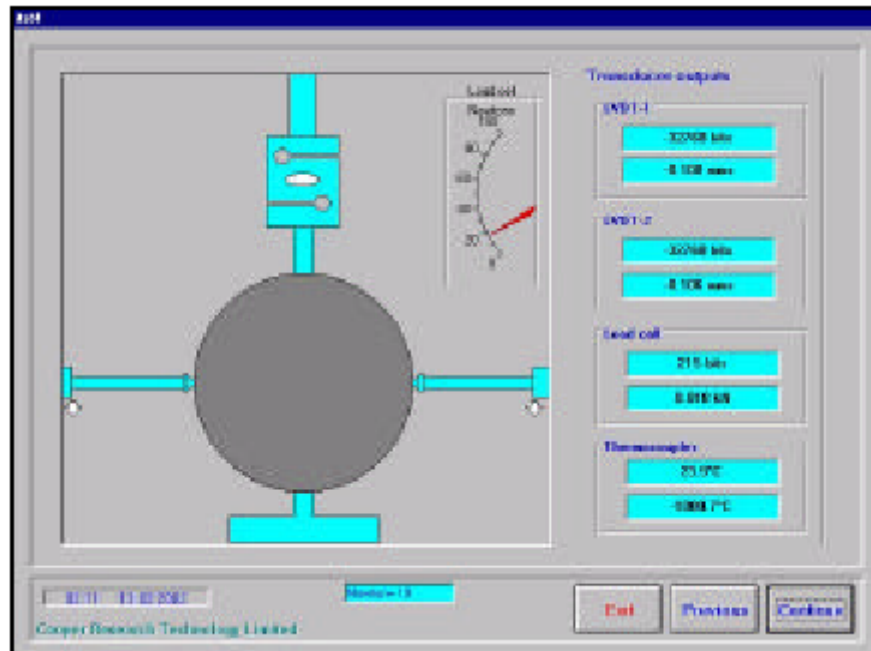


Figura 38: Ventana 14A

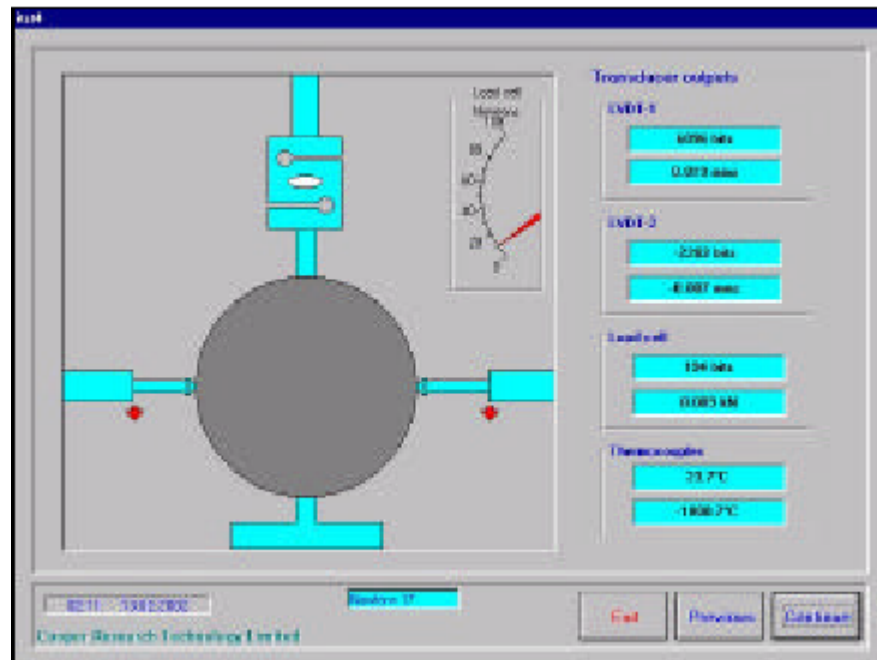



Figura 39: Ventana 14B

- Ventana 15: levante las palancas de leva del marco de alineación, para que las barras transversales bajen y así la muestra queda apoyada en las dos mordazas de carga del marco de tensión indirecta. 

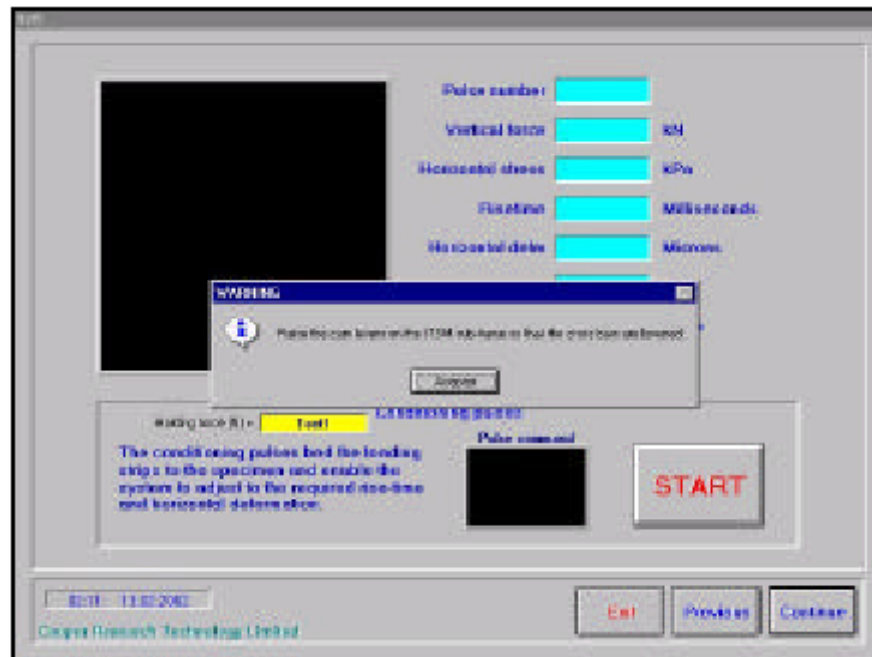



Figura 40: Ventana 15

Acondicionamiento del ensayo

- Ventana 16: en este punto se da inicio a los pulsos de acondicionamiento, los cuales sientan la muestra en las mordazas de carga y permiten al equipo ajustar la magnitud y duración de carga para lograr la deformación horizontal y tiempo de carga establecidos. 

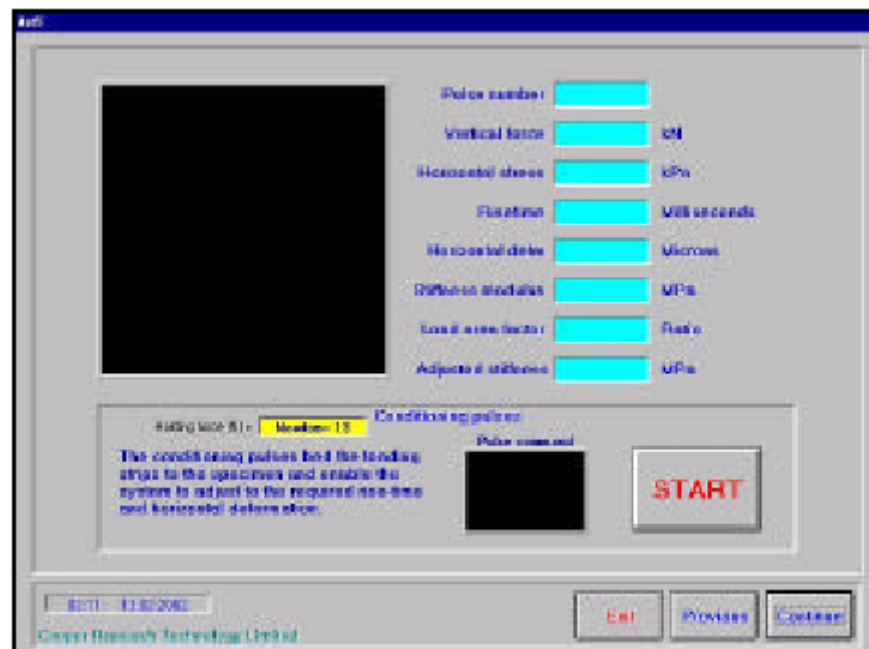



Figura 41: Ventana 16

- Ventana 17: esta ventana muestra los resultados del acondicionamiento, que deben ser analizados para haber si el acondicionamiento logró su fin o no, para ello se debe establecer si el Factor de área de carga está dentro del rango [0,50 – 0,70] y la Deformación horizontal igual a la Deformación horizontal objetivo (Ventana 9:6).
- Si la deformación horizontal es menor a 2mm o mayor a 20mm, la temperatura de la prueba no es la adecuada.
- Si el acondicionamiento fue correcto se continúa,  en el caso contrario se regresa a la Ventana 16 para aplicar nuevamente otros 5 pulsos de acondicionamiento y así sucesivamente, hasta lograr los valores dentro de los rangos establecidos.

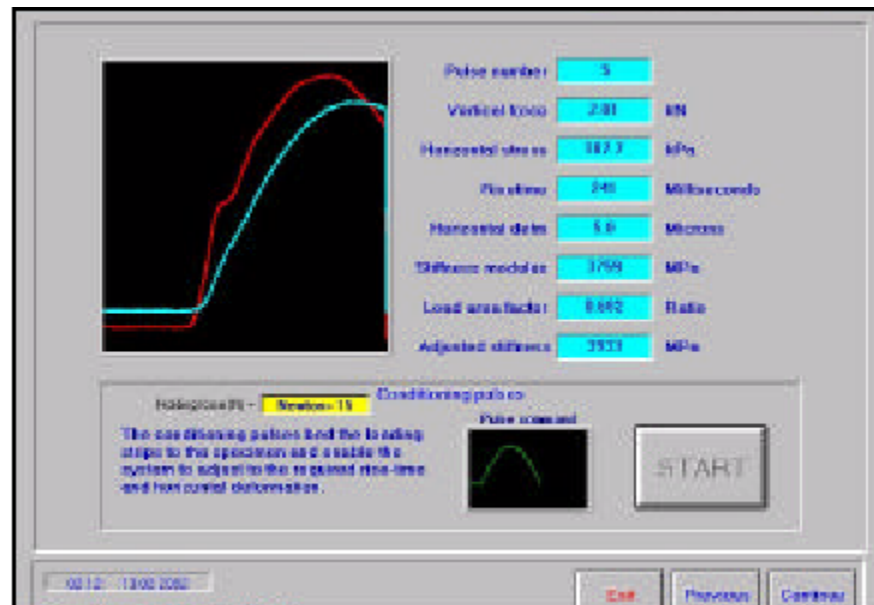


Figura 42: Ventana 17

Comprobaciones finales

- Ventana 18: Se realiza nuevamente la comprobación de la posición de los

LVDTs, descrita en la Ventana 14. ITSM:



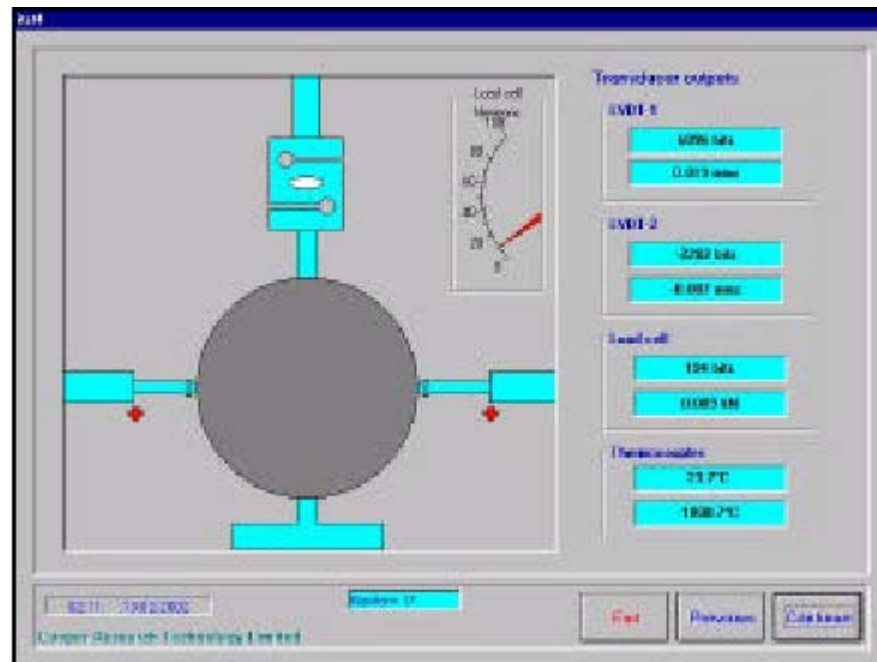


Figura 43: Ventana 18

- Ventana 19: se configura la temperatura real de la muestra, de acuerdo a lo establecido en 1.7. Las lecturas de las dos termocuplas las observamos en los dos recuadros verdes, en la parte superior del cuadro de diálogo. Se recuerda que para una temperatura objetivo de 20°C, la temperatura real debe estar dentro del rango de [18°C – 22°C]; para una temperatura objetivo diferente la variación de la temperatura real respecto de la objetivo debe ser de $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

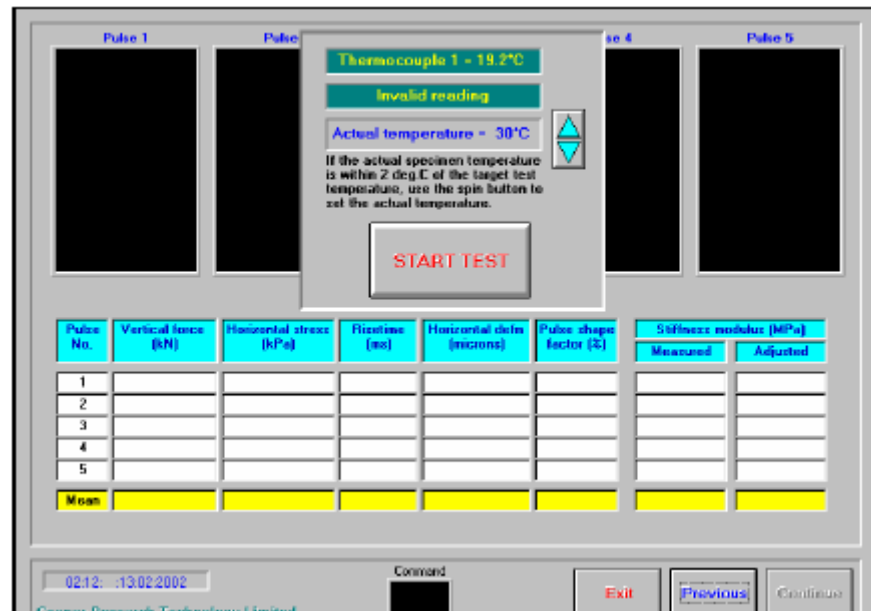


Figura 44: Ventana 19

- Ventana 20: muestra los resultados de Carga vertical, Esfuerzo Horizontal, Tiempo de carga, Deformación horizontal, Factor de área de carga y Módulo Dinámico Elástico Medido y Ajustado, para cada uno de los cinco pulsos de carga y su promedio.

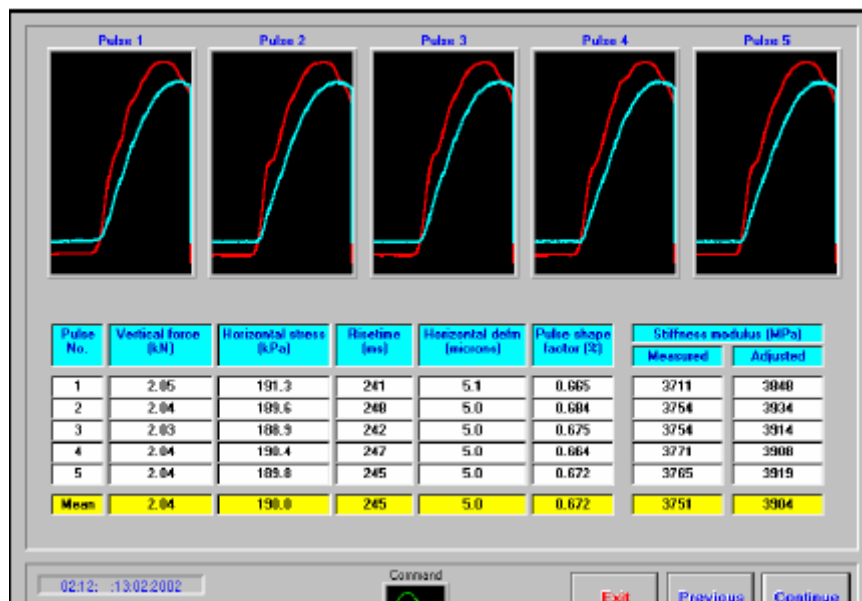


Figura 45: Ventana 20

Segundo ensayo

- Rotación de la muestra: baje la palanca de leva del marco de alineación, para que las barras transversales toquen ligeramente la muestra, retire la cabeza móvil del marco de tensión indirecta, saque los LVDTs, aflojando previamente sus dispositivos de ajuste; suelte los tornillos que sujetan la muestra al marco de deformación y retírelo. Gire la muestra de acuerdo con la siguiente figura para que sea fallada en su segundo diámetro.

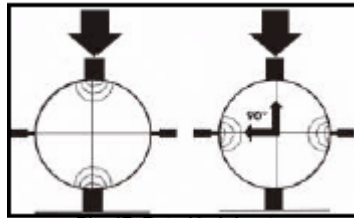


Figura 46: rotación de la briqueta

- *Secuencia:* se siguen los pasos del procedimiento desde el ensamble del marco de tensión indirecta en adelante.
- Es importante que entre el primer y segundo ensayo exista un intervalo de tiempo de cuando menos 20 minutos.

REVISIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO Y CHEQUEO DE VALIDACIÓN

- El valor medido en el segundo diámetro, generalmente es más bajo. Si el valor calculado para el segundo diámetro está dentro del rango de -20% a +10% del valor calculado para el primer diámetro, se toma el promedio de los dos como el módulo dinámico de la muestra. Si la diferencia está por fuera de este rango, los resultados se rechazan. El jefe del laboratorio debe revisar los datos y resultados del ensayo chequeando que estos cumplan con las normas establecidas en el procedimiento técnico.

4.3.1.3. DESCRIPCIÓN DEL FORMATO DE RESULTADOS

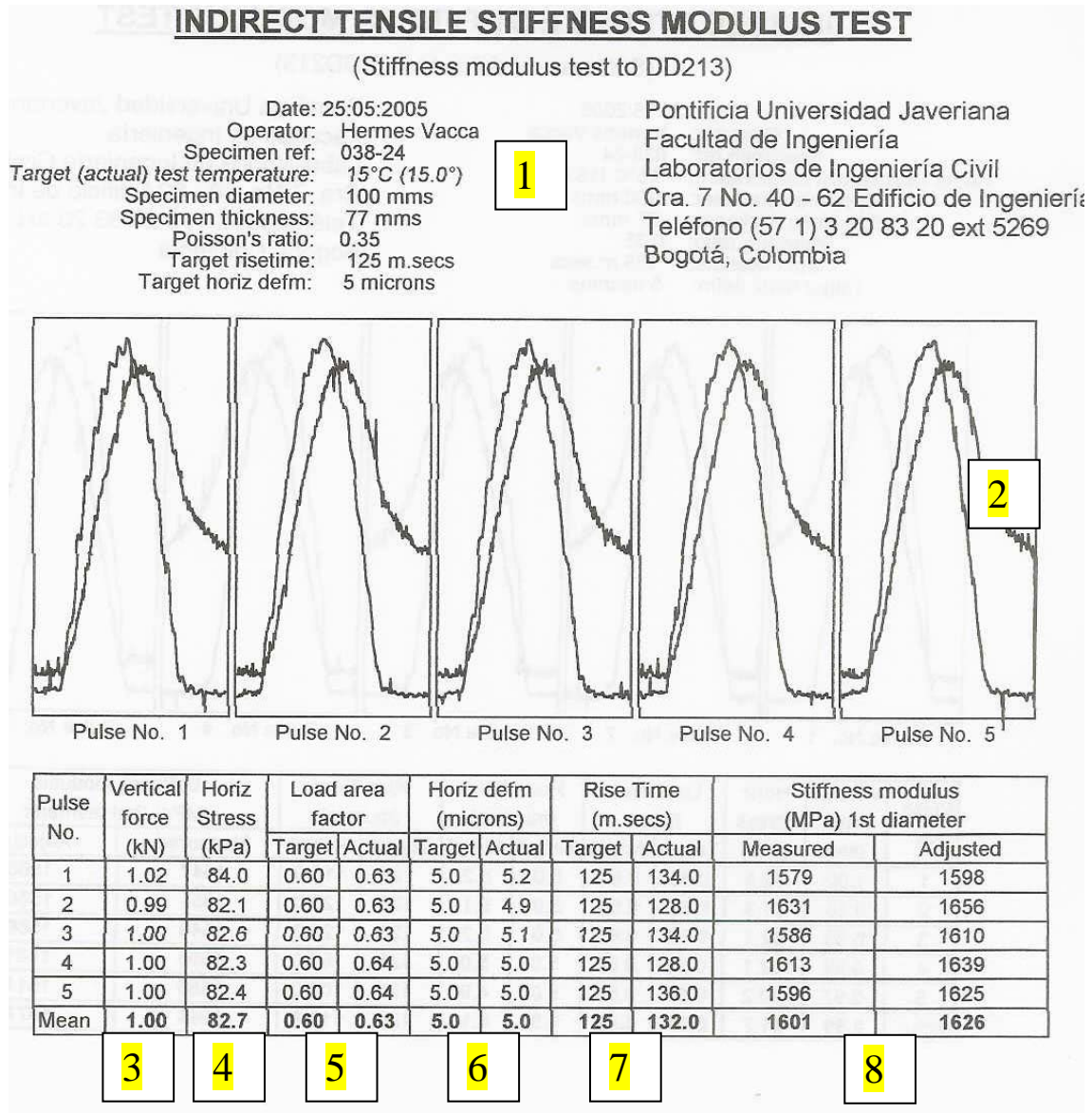


Figura 47: Formato ensayo de Tensión indirecta

1. Descripción física del espécimen.
2. Grafica de los pulsos de carga.
3. Carga vertical.
4. Esfuerzo Horizontal.

5. Factor de área de carga.
6. Deformación horizontal.
7. Frecuencia del ensayo.
8. Módulo Dinámico Elástico (Resiliente) Medido y Ajustado.

4.3.2. DEFORMACIÓN PERMANENTE

“La deformación permanente es el deterioro caracterizado por la existencia de una sección transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original. Se le llama permanente porque representa una acumulación de pequeñas cantidades de deformación irrecuperable que ocurre cada vez que se le aplica la carga.

El asfalto es un material que puede ser considerado elástico – lineal a temperaturas bajas y frecuencias de carga altas, pero muestra propiedades viscosas y plásticas a temperaturas mayores. Debido a este comportamiento, las cargas repetidas del tránsito generan deformaciones permanentes en las capas asfálticas, especialmente durante el periodo de mucho calor. ”²⁹

El comportamiento de las mezclas asfálticas con respecto a las deformaciones permanentes depende fuertemente del tipo de ligante utilizado, así como de la composición de la mezcla, forma y tamaño de las partículas, calidad de los agregados y aditivos, cuando éstos son empleados. La temperatura del asfalto es un factor que afecta fuertemente a la deformación permanente. No sólo las temperaturas máximas, sino también los gradientes de temperatura pueden tener una influencia sobre la deformación permanente. La temperatura máxima, así como el gradiente de temperatura pueden ser cambiados por la conductividad térmica de la mezcla, así como la brillantez o reflectividad, por medio de la selección del agregado.

²⁹ ASFALT INSTITUTE, Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE

En la Tabla 18 se presenta a forma de resumen la incidencia en la deformación permanente de diferentes factores.

	FACTOR	CAMBIO EN EL FACTOR	EFFECTO EN AHUELLAMIENTO
Agregado	Textura	Liso a rugoso	Incremento
	Gradación	Abierta a continua	Incremento
	Forma	Redondeada a angular	Incremento
	Tamaño	Incremento en el tamaño máximo	Incremento
Ligante	Módulo Dinámico ^a	Incremento	Incremento
Mezcla	Contenido de ligante	Incremento	Decremento ^d
	V_v^b	Incremento	Decremento
	VMA ^c	Incremento	Incremento
	Compactación	- ^e	- ^e
Condiciones Ensayo/ Campo	Temperatura	Incremento	Decremento
	Esfuerzo/ Deformación	Incrementa en la presión de contacto de la llanta	Decremento
	Repeticiones de carga	Incrementa	Decremento
	Agua	Seco a húmedo	Disminuye si la mezcla es sensible al agua

^a Se refiere al Módulo Dinámico a la temperatura a la cual la tendencia al ahuellamiento está siendo determinada. Se pueden utilizar modificadores para elevar el Módulo Dinámico a temperaturas críticas y de este modo reducir el potencial de ahuellamiento.

^b Cuando el volumen de aire (V_v) es menor que el 3%, el potencial de ahuellamiento aumenta.

^c Volumen de vacío, igual a la suma del volumen de aire y el volumen de asfalto ($V_v + V_b$)

^d Se ha argumentado que a muy bajo volumen de vacío (menor que 10%) debe ser evitado.

^e Cualquiera de los métodos de compactación (campo o laboratorio) pueden influir en la estructura del sistema y por consiguiente en la tendencia al ahuellamiento.

Tabla 18: Tabla resumen factores que afectan la resistencia a la deformación Permanente³⁰

³⁰ Bituminous Pavements, University of Nottingham

Las deformaciones permanentes se ve reflejadas en el terreno como ahuellamiento “lo que mas que más preocupa a los diseñadores de mezclas asfálticas es la deformación de las capas de asfalto. Esta deformación es el resultado de una mezcla de asfalto sin la suficiente capacidad de fuerza para resistir cargas pesadas. Una mezcla débil va acumulando pequeñas, pero permanentes deformaciones con cada camión que pasa, y eventualmente forma una ruta caracterizada con una inclinación y deslizamiento lateral de la mezcla.”³¹



Figura 48: Ahuellamiento por deficiencias en la capa asfáltica
Fuente: Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de Superpave

El ahuellamiento en una mezcla débil ocurre típicamente durante el verano, bajo temperaturas altas del pavimento. Mientras esto podría sugerir que las deformaciones del cemento asfáltico son un problema causado por el sol, es más correcto pensar que son una combinación entre la resistencia de los agregados minerales y el cemento asfáltico.

Después de la fase de consolidación al comienzo de la vida de servicio del pavimento, el índice de deformaciones permanentes normalmente decrece con un incremento en las repeticiones de carga, hasta que se vuelve razonablemente constante. Finalmente, el índice de deformación permanente puede comenzar a

³¹ Garnica, P., Gómez J. A., Sesma J. A., “Mecánica de materiales para Pavimentos” Ciudad de México, México, (2002).

incrementarse con un aumento en las repeticiones de cargas. Esta última fase ocurre sobre el camino sólo en situaciones extremas, e indican deterioro total.

“Las deformaciones permanentes son la acumulación de pequeñas deformaciones y una manera de incrementar la fuerza contra el deslizamiento de las mezclas es no sólo utilizar cemento asfáltico más duro, sino otro que se comporte más como un sólido elástico a altas temperaturas del pavimento. Así, cuando se aplique la carga, el cemento asfáltico actuará como una banda de goma y volverá a su posición original en lugar de deformarse. Otra manera de generar cortes de fuerza en las mezclas asfálticas es, seleccionando un agregado que tenga un alto grado de fricción interna, uno que sea cúbico, que tenga una superficie rugosa y pueda desarrollar un grado de contacto partícula a partícula. Cuando se aplica una carga a una mezcla, las partículas de los agregados se cierran unidas de tal manera que funcionan más como una sola, larga y elástica piedra. Como en el cemento asfáltico, los agregados actuarán como una banda de goma que volverá a su forma original cuando desaparezca la carga. De esta forma, no se acumula una deformación permanente.”³²

Otro tipo de ahuellamiento que se ven en la superficie puede ser causado por el debilitamiento de alguna de las capas bajas de asfalto. Este tipo de deformación es causada por un excesivo esfuerzo repetido en las capas interiores (base o subbase) bajo la capa de asfalto. Mas sin embargo este tipo de deformación no es considerado en este trabajo por ser una problema de tipo estructural no dependiente de las propiedades intrínsecas de la mezcla asfáltica.

³² ASFALT INSTITUTE, Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE

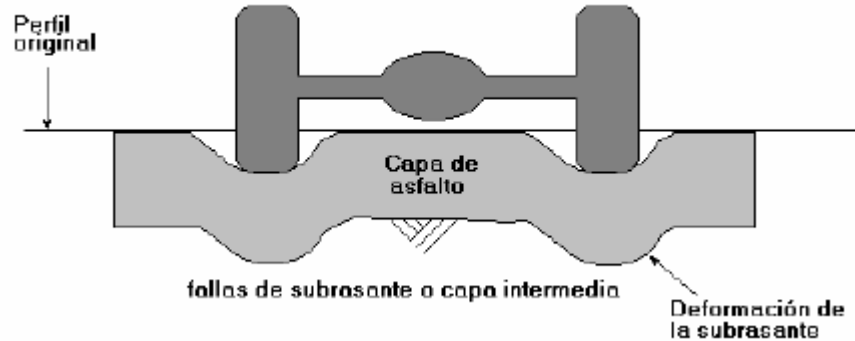


Figura 49: Ahullamiento por deficiencias en las capas inferiores
Fuente: Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de Superpave

Los agrietamientos por reflexión son otro problema que puede presentar la carpeta asfáltica; ocurren si una capa de asfalto yace sobre una capa con grietas o juntas, lo cual muestra movimientos horizontales muy grandes debido a variaciones en la temperatura, o cuando no existe o existe muy poca transferencia de carga a través de las grietas o juntas.

Los agrietamientos por reflexión pueden ser causados por deformaciones horizontales controladas por la temperatura de los materiales subyacentes. Estas deformaciones provocarán esfuerzos de tensión en la capa superior, llevando a grietas de reflexión, con y sin la presencia del tránsito. Si la transferencia de cargas a través de las grietas o juntas es baja, resultando en un gran desplazamiento vertical relativo debido a las cargas generadas por el tránsito, provocará esfuerzos cortantes muy altos en la capa de asfalto alrededor del área de las juntas. Si los esfuerzos portantes son mayores que la resistencia del asfalto o el número de repeticiones de cargas es suficiente para causar fatiga, las grietas aparecerán en la parte superior de la capa de asfalto en la misma posición de las grietas o juntas de la capa subyacente.

4.3.2.1. DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE³³

Existen dos métodos para determinar la resistencia a la deformación permanente de una mezcla bituminosa por medio de la compresión cíclica en confinamiento. En estas pruebas es posible colocar varias mezclas al mismo tiempo con el fin de inspeccionar la aceptabilidad de una mezcla dada. Estos ensayos no permiten una predicción cuantitativa de lo que sucede en campo. La opción para el confinamiento es hecho para obtener los resultados de la prueba reales para las mezclas GAP-graduadas. Las pruebas sin confinamiento sólo dan una clasificación jerárquica real para un rango estrecho de mezclas asfálticas densas.

Se describen dos métodos de la prueba (A y B) para la determinación de la resistencia a la deformación permanente.

La prueba A describe el método para determinar las características de las mezclas bituminosas por medio de la aplicación de una carga uniaxial, la prueba de compresión cíclica y con un poco de confinamiento. En esta prueba un espécimen cilíndrico se sujeta a una tensión axial cíclica. Para lograr el confinamiento se coloca una platina con menos diámetro que el espécimen.

El propósito de la prueba es determinar la resistencia a la deformación permanente. El confinamiento del espécimen es necesario para predecir el desarrollo de la mezcla en campo, sobre todo para las mezclas GAP-graduadas con material granular grueso.

La prueba B describe el método por determinar las características de las mezclas bituminosas por medio de la aplicación de carga de forma triaxial a compresión

³³ EUROPEAN STANDARD. - prEN 12697-25. Cyclic Compression Test

cíclica. En esta prueba un espécimen cilíndrico se sujeta a una tensión de confinamiento estática y a una tensión axial cíclica. El propósito de esta prueba es determinar la resistencia a la deformación permanente de una mezcla bituminosa. La prueba se usa el más a menudo con el propósito de evaluar el desarrollo de nuevos tipos de mezclas.

Pueden usarse especímenes preparados en el laboratorio o tomados en campo. El tamaño máximo de los agregados es 32 mm.

CONDICIONES Y DEFINICIONES

Para los propósitos, se aplican las siguientes condiciones y definiciones:

1. Exactitud: Error permisible en la medición, expresado como un porcentaje.
2. Área de contacto: Es la porción de la platina de presión que está en contacto con el espécimen de la prueba.
3. Creep de la curva: El creep de la curva da la tensión axial acumulativa, expresada en porcentaje, del espécimen como una función del número de cargas aplicadas.
4. Error en la medición: Es la diferencia entre el valor verdadero de la cantidad física y el valor indicado en la medición instrumental, expresado como un porcentaje del valor verdadero.
5. Deformación Permanente: Se define aquí como la deformación axial acumulativa después de un número dado de aplicaciones de carga.

Generalmente las fases siguientes pueden distinguirse como se muestran en la Figura 20 del Creep de la curva:

Fase 1(Inicial): Parte de la curva de la deformación dónde la pendiente disminuye al aumentar el número de ciclos de carga;

Fase 2(Intermedia): Parte de la curva de la deformación dónde la pendiente es casi constante;

Fase 3(Última): Parte de la curva de la deformación dónde la pendiente aumenta con el número al incrementar los ciclos de carga.

Dependiendo de las condiciones de la comprobación y en la mezcla, uno o más fases pueden estar ausentes.

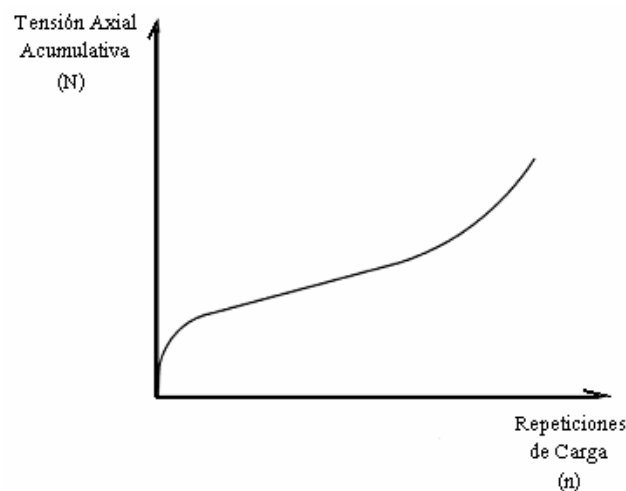


Figura 50: Curva de Creep de la mezcla.

Prueba Uniaxial cíclica de compresión en confinamiento

Esta prueba se realiza en el equipo NAT y determina la resistencia a la deformación permanente de un espécimen cilíndrico de la mezcla bituminosa debido a una carga repetitiva. Los especímenes pueden prepararse en el laboratorio o pueden ser extraídos en campo.

El espécimen de la prueba debe ser cilíndrico con un diámetro de 150 mm, mantenido a elevadas temperaturas, se pone entre dos platinas de carga en forma paralela. La platina superior tiene un diámetro de 100 mm (por la inclinación al presionar el área de contacto del espécimen esta tiene un diámetro

real de 96 mm). Una representación esquemática del dispositivo de la prueba se da en Figura 51. El espécimen se sujeta a una presión de bloque-pulso en forma axial cíclica.

No hay ninguna presión aplicada adicional de confinamiento lateral. Durante la prueba el cambio en la altura del espécimen está moderado en los números especificados de aplicaciones de carga. Debido a esto, la tensión axial acumulada N (deformación permanente) del espécimen de la prueba es determinada como una función del número de aplicaciones de carga. Los resultados se representan en un serpenteo de curva como se muestra en la Figura 50. La prueba no permite una predicción cuantitativa del rutting. No obstante, en la prueba es posible alinear varias mezclas para inspeccionar la aceptabilidad de una mezcla dada.

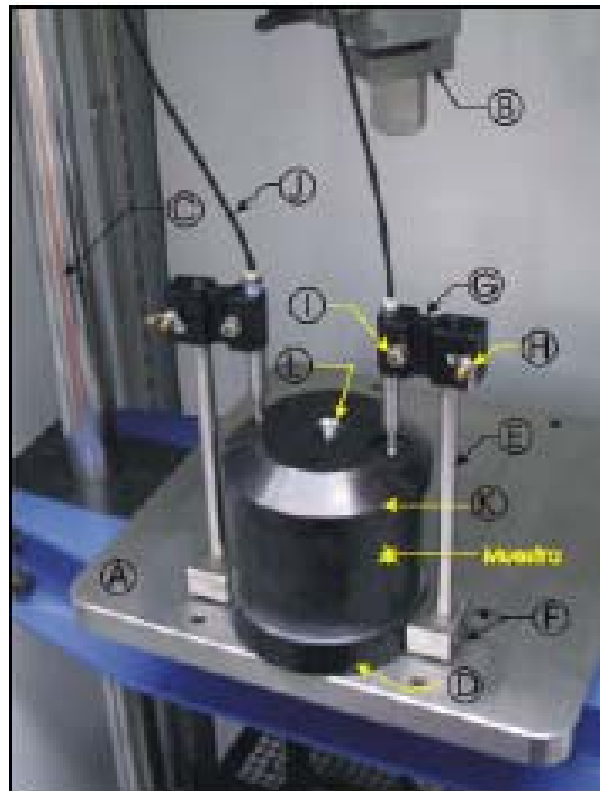
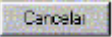


Figura 51: Muestra en el equipo de Prueba (NAT)

4.3.2.2. MODO DE USO DEL SOFTWARE³⁴

Inicio del Software

Se corre el programa CREEP, el cual en cada ventana suministra información sobre el paso que se debe realizar, a continuación se da brevemente la descripción de los cuadros de diálogo. Para salir del ensayo en cualquier punto se pulsa la tecla 

y/o , para pasar a la ventana siguiente  y para retroceder .

- Ventana 1 selecciones la opción Ensayo CREEP 

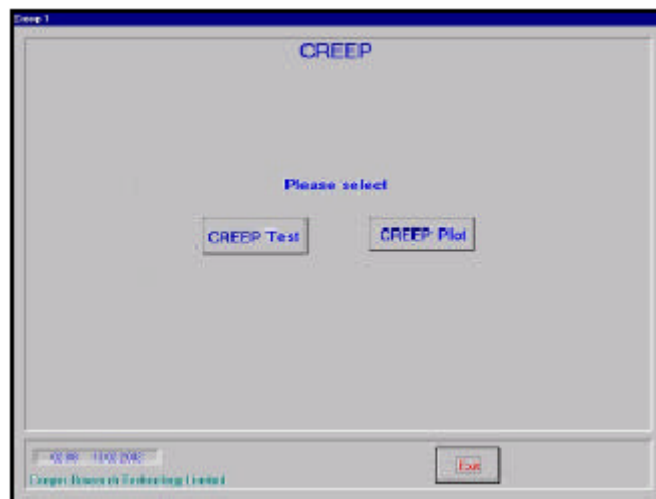



Figura 52: Ventana 1

- Ventana 2: presentación del ensayo con su principio básico y características Fundamentales.

Se muestra esquemáticamente la configuración de la prueba y gráficamente los resultados. 

³⁴ Tavera, A, “Manual de instalación, operación , mantenimiento y montaje de los ensayos para el equipo N.A.T.” Bogota, Colombia, (2002)

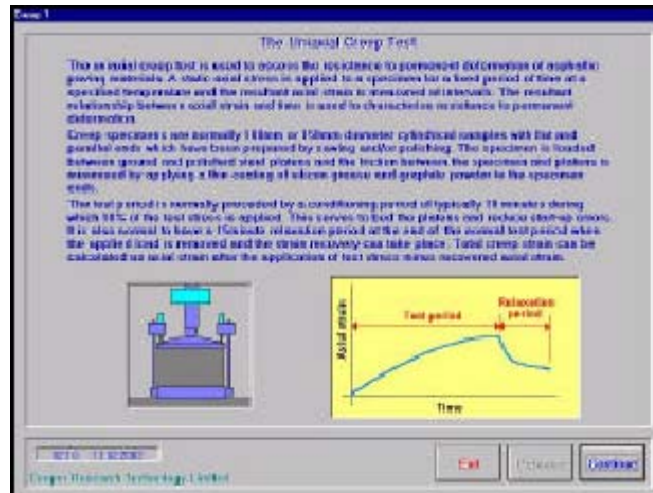


Figura 53: Ventana 2

- Ventana 3: proporcione la ubicación y nombre del archivo.

Guardar

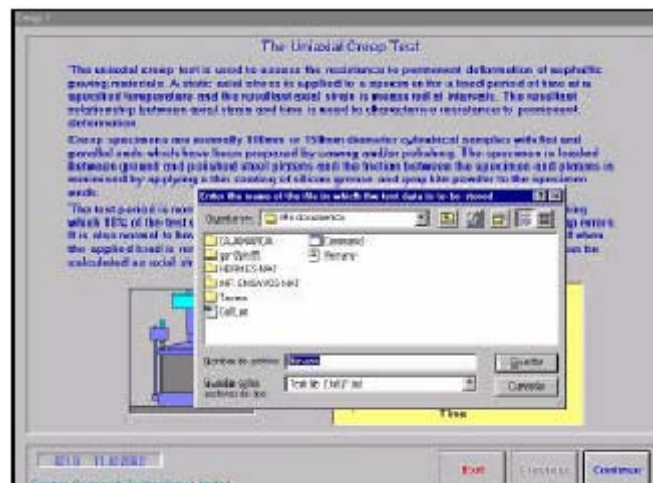


Figura 54: Ventana 3

- Ventana 4: Se deben cubrir las caras planas de la muestra a ensayar con silicona en grasa y grafito en polvo, con el fin de disminuir al máximo, la fricción entre la muestra y los platos. Se recuerda que en el caso de apilar dos núcleos de pavimento, no se debe agregar ninguna sustancia en las caras de junta. Seleccione el nombre del operario; si es un usuario nuevo agréguelo a la lista.

Continuar

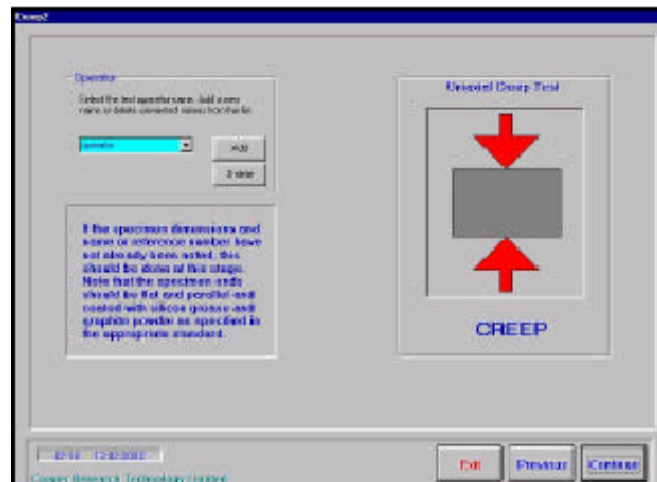


Figura 55: Ventana 4

- Ventana 5: escriba la identificación de la muestra. 

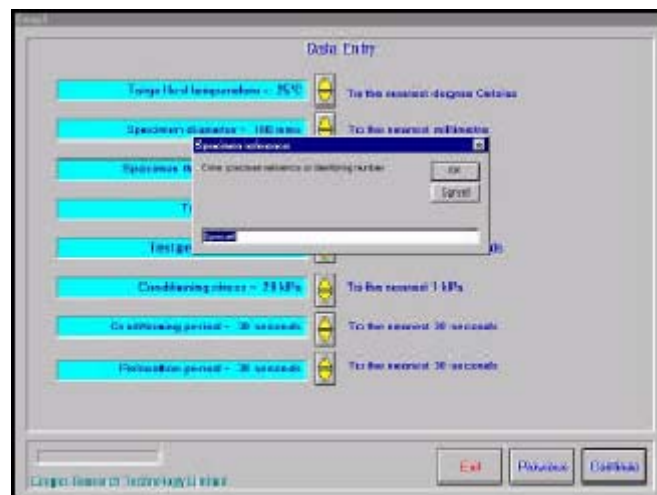



Figura 56: Ventana 5

- Ventana 6: presenta los ocho (8) datos de entrada de la prueba, que se pueden modificar con los botones  y se muestran enumerados de la siguiente manera:

1. Temperatura objetivo de ensayo establecida en 1.8 aproximada al °C más cercano.
2. Diámetro de la muestra medido en 1.4, aproximado a 1mm.
3. Altura de la muestra medida en 1.5, aproximada a 1mm.
4. Esfuerzo axial de ensayo = 100kPa
5. Duración del ensayo = 3.600s

6. Esfuerzo de acondicionamiento = 10kPa

7. Duración del acondicionamiento = 600s


8. Periodo de relajación = 900s 



Figura 57: Ventana 6

Montaje del Marco de Deformación en el Marco de Carga del Equipo NAT.

· Ventana 7: en este paso se ubica centradamente la muestra en el plato base del marco de Deformación, se coloca el plato de carga del mismo diámetro del plato base centrado sobre la muestra y la media esfera de transferencia de carga en su cavidad .


Posteriormente se mueve el montaje del Marco de Deformación Permanente para ubicarlo bajo el bastidor, de tal forma que la barra de extensión de la celda de carga sienta perfectamente en la media esfera, como se puede observar en el esquema de la Ventana 2. 



Figura 58: Ventana 7

Posicionamiento de la instrumentación

· Ventana 8: se colocan los LVDTs de tipo PD en el montaje, para ello se debe primero ajustar la altura y alineación del soporte, entonces se fijan apretando las tuercas de mariposa. Luego se posicionan los dos LVDTs y se fija su altura apretando los tornillos con una llave brístol, de tal manera que los LVDTs PD entren en justo contacto con el plato de carga, para conseguir esto se observa el avance de las flechas en las escalas (Ventana 8A) hasta lograr las dos flechas rojas que se ilustran en la Ventana 8B, que indican que se ha hecho contacto con el plato de carga.

También se debe revisar en la parte inferior de la ventana las lecturas de las dos termocuplas, para que estén dentro del rango de $40 \pm 1^{\circ}\text{C}$.

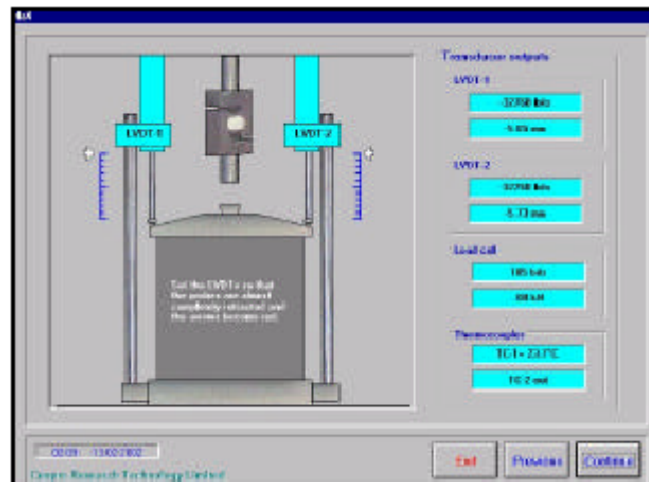


Figura 59: Ventana 8A

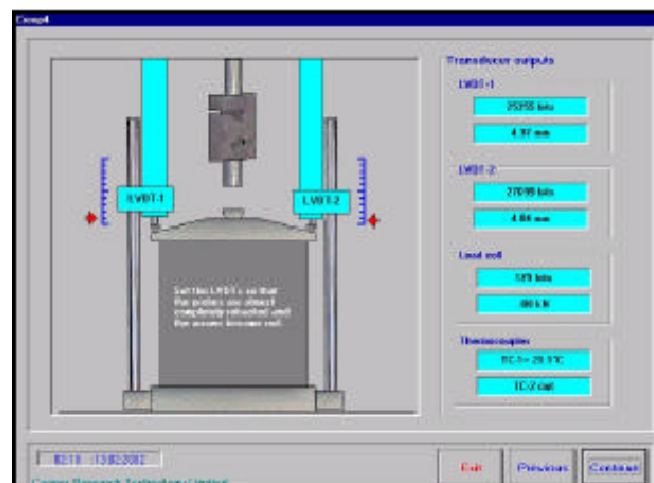


Figura 60: Ventana 8B

· Cuando el ensayo cambia a la Ventana 9, la barra del bastidor se desplazará rápidamente desde su posición en el extremo superior hasta el límite superior. Para descender la barra del bastidor se utiliza la flecha azul que apunta hacia abajo. Este movimiento se puede controlar por medio de la escala y leer el valor exacto de la posición en el recuadro gris.

· La posición muestra la distancia de la parte inferior de la celda de carga a la media esfera situada en el Marco de Deformación; cuando esta distancia esté entre los 5mm y 15mm se pulsa el botón **START TEST** (Empezar Ensayo) y el bastidor descenderá muy lentamente hasta hacer contacto entre las partes anteriormente mencionadas. **Continue**

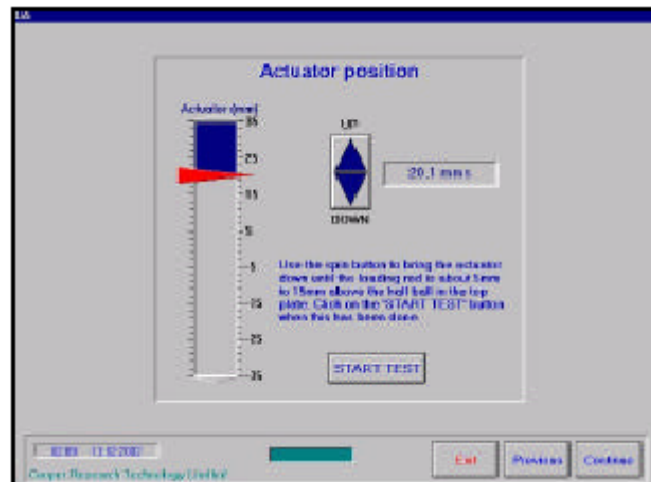


Figura 61: Ventana 9

Acondicionamiento

- Ventana 10: muestra el estado del acondicionamiento de la prueba.

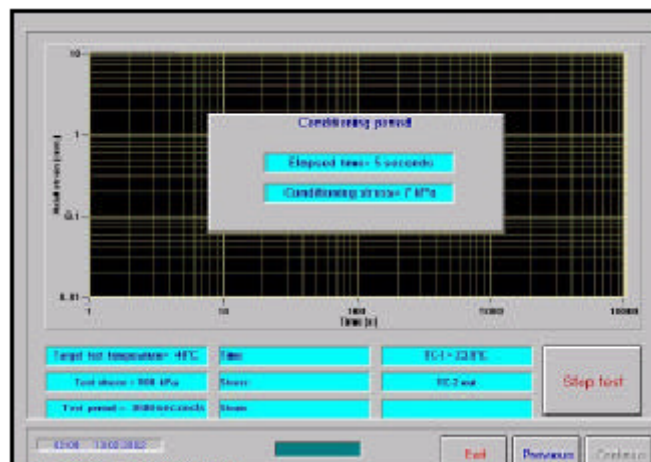



Figura 62: Ventana 10

Inicio del Ensayo

- Ventana 11: muestra el estado de la prueba, indicando en los recuadros de la parte inferior las variables de entrada del ensayo (Temperatura, Esfuerzo y Duración), el esfuerzo y deformación medidos en el tiempo y las lecturas de las termocuplas. Cuando se terminen los 3.600s de aplicación de carga, se iniciará el periodo de 900s de

relajación, que se reflejará en la pantalla como un punto de inflexión en la gráfica, entonces se presiona la tecla .

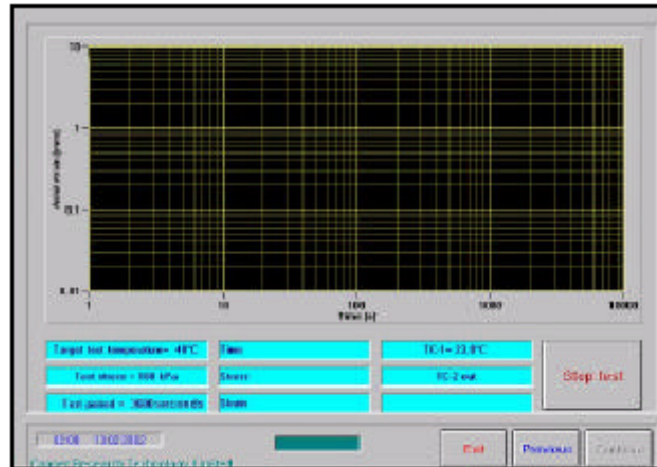


Figura 63: Ventana 11

IMPRESIÓN DE RESULTADOS

Inicio del software

Se corre el programa CREEP

- Ventana 1: seleccione la opción Impresión Ensayo CREEP 

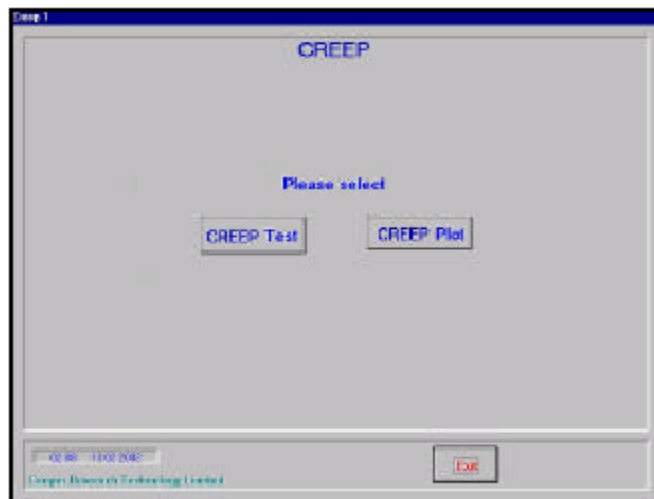





Figura 64: Ventana 1

· Ventana de impresión: al oprimir el botón  se selecciona el nombre del archivo, entonces en los recuadros de la parte derecha de la pantalla, aparecerá el nombre y fecha del archivo, al igual que la referencia de la muestra. Posteriormente se selecciona la impresora y el tipo de fuente a utilizar . Finalmente se da la orden de imprimir. .

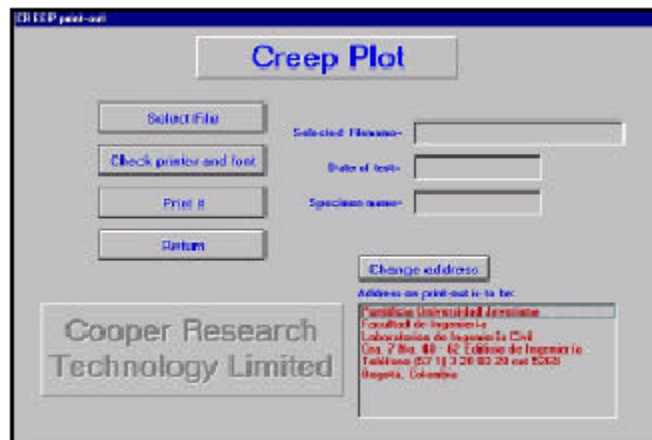


Figura 65: Ventana de impresión.

4.3.2.3. DESCRIPCIÓN DEL FORMATO DE RESULTADOS

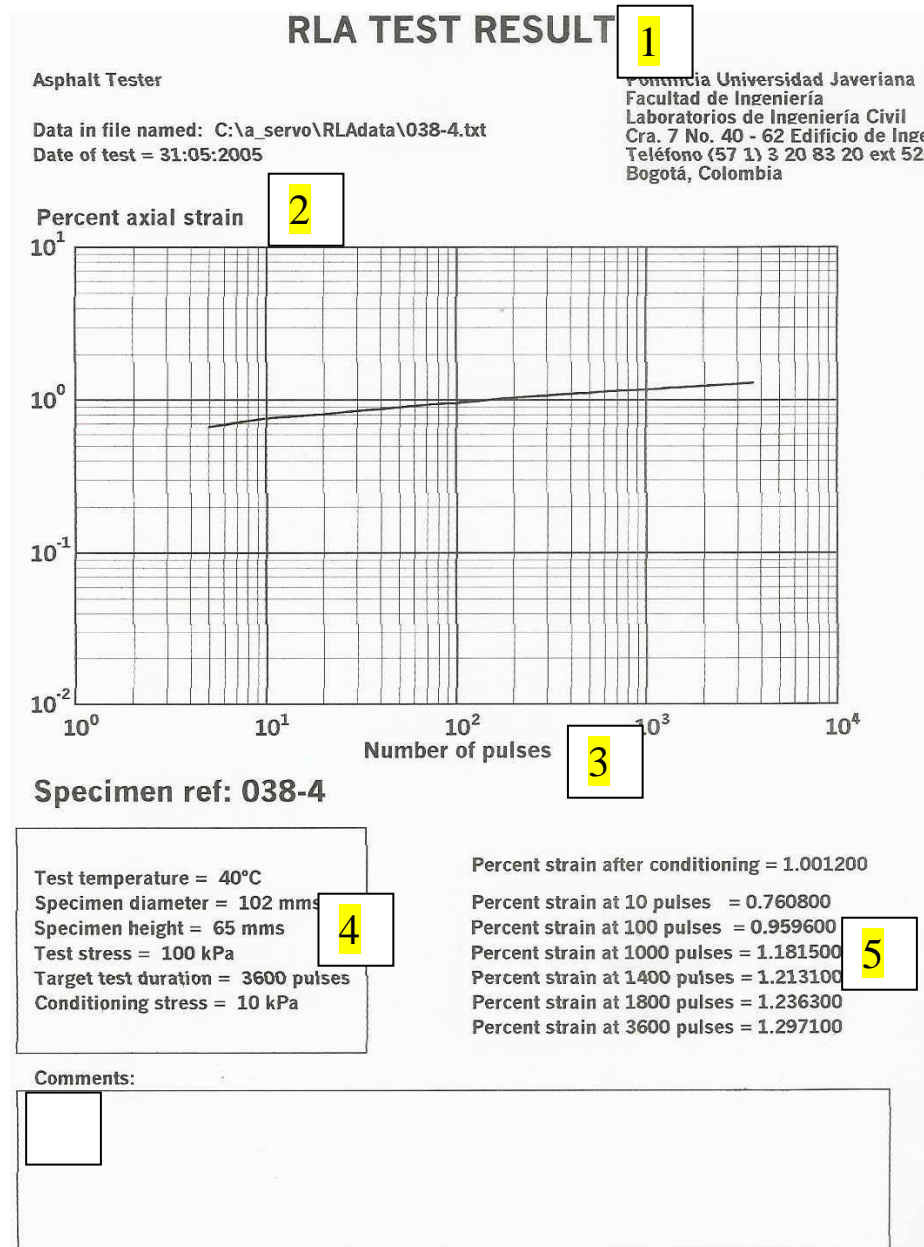


Figura 66: Formato ensayo de deformación permanente

1. Ensayo que se realiza para encontrar la deformación permanente en especímenes de concreto asfáltico.
2. Porcentaje de acumulación de la deformación axial en el espécimen.
3. Numero de pulsos de carga aplicado sobre el espécimen.
4. Descripción física del espécimen.

5. Valores de porcentaje de acumulación de deformación axial correspondiente a cada numero de pulso y al de después del ensayo.

4.3.3. N.A.T. (NOTTINGHAM ASPHALT TESTER)³⁵

El equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT) servo-hidráulico mostrado en Figura 67 fue desarrollado por Cooper Research Technology Limited en Inglaterra, consta de cuatro componentes principales: el marco de carga (A), el sistema hidráulico (B), el sistema de adquisición de datos y módulo de control (C), y la cámara de temperatura controlada (D).



Figura 67: Equipo NAT

Este equipo fue diseñado para ser un aparato relativamente amistoso al usuario y así medir y evaluar las propiedades mecánicas de materiales asfálticos para

³⁵Ibid. P 31. y Larrarte Guzman J., – Rodríguez Estevez.,Juan, “Análisis comparativo de resultados de ensayos de modulo resiliente y deformación permanente de mezclas asfálticas compactadas con martillo Marshall y con compactador giratorio.” (2004)

pavimentos, lo que nos permite realizar: nuevos diseños de mezcla, caracterización de nuevos materiales, valoración de pavimentos en servicio, control de calidad, entre otras aplicaciones. El NAT usa un computador para realizar las pruebas y procesar los datos obtenidos de los ensayos, para este fin utiliza un software especialmente desarrollado, que guía al usuario paso a paso en cada procedimiento.

Marco de carga

El marco de carga se puede observar en la Figura 68 consta de una placa base (A), dos columnas (B) y una cabeza móvil (C), los cuales están hechos en acero inoxidable. La placa base tiene una muesca centrada bajo la cabeza móvil para asegurar que los subsistemas de las pruebas puedan ser localizados con precisión. El bastidor y su LVDT están fijados a la cabeza móvil y una celda de carga es atornillada a la barra de extensión del bastidor.



Figura 68: Marco de Carga

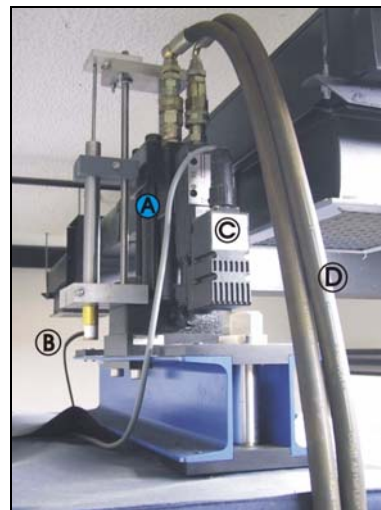


Figura 69: Bastidor, LVDT y Servovalvula

El marco de carga usa un bastidor de tipo hidráulico para aplicar cargas verticales, las cuales son controladas por una servoválvula.

La cabeza móvil que soporta al bastidor, está diseñada de forma rígida, de tal forma que presente una deflexión mínima en el momento de la aplicación de las cargas. El bastidor tiene la capacidad de aplicar cargas de 0 a 10kN a frecuencias superiores a 50Hz y con una exactitud de 0,001kN. La servoválvula conectada al bastidor es controlada por una señal de corriente eléctrica desde un servoamplificador. El transductor de la celda de carga es un dispositivo calibrado que puede medir fuerzas hasta 20kN. La experiencia ha demostrado que este tipo y disposición de la celda de carga es muy confiable.

Entre las ventajas del marco de carga servo-hidráulico están que las pruebas son relativamente simples de realizar y que las muestras pueden ser elaboradas en laboratorio (briquetas) u obtenidas directamente de la vía (núcleos). La experiencia ha mostrado que hay pocos problemas con el equipo y que con un cuidado normal, el marco de carga servo-hidráulico debe proporcionar resultados repetitivos y reproducibles por muchos años. En general, se usan partes normalizadas, para que en el caso de que falte una de ellas, pueda conseguirse un reemplazo rápidamente.

En la Tabla 19 están sintetizadas las especificaciones generales de la cámara de temperatura controlada CRT 625.

Rango de temperatura	-10°C a +60°C
Volumen	625 lts / 22 cu ft
Peso	180 kg
Enfriador	395 gr R404a
Capacidad de refrigeración	560W
Capacidad de calefacción	1,1 Kw
Conexión	230V 50-60Hz
Conexión de carga	2,1 Kw
Tamaño exterior	Altura: 2.000mm; Ancho: 815mm; Fondo: 710mm

Tabla 19: Especificaciones Generales Cámara de Temperatura Controlada

5. DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ESTUDIO

En el presente trabajo se pretende estudiar el efecto del tipo de densificación (amasado o por impacto) en el modulo resiliente y en el ensayo de deformación permanente centrándose en las mezclas del tipo MDC-2 para esto se cuenta con la siguiente metodología:

5.1. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN:

Los trabajos de grado anteriormente mencionados crean una base conceptual importante la cual fue tenida en cuenta para la realización de este trabajo.

5.2. MATERIALES:

Los materiales (asfalto y agregados) provienen de la empresa Concescol S.A. empresa con amplia trayectoria y producción en serie de la mezcla asfáltica en estudio; lo cual garantiza la continuidad y homogeneidad de los materiales que esta empresa facilita.

5.2.1. AGREGADOS CONCESCOL

Enseguida se presenta las características físicas, granulometría y formula de trabajo de la empresa CONCESCOL S.A.

CONCRESCOL S.A.					
TIPO DE MEZCLA	Part. Frac. Mec.	Desgaste (Los Angeles)	Perd, en ensayo de solidos Sulf de Sodio	Indice de Aplan.	Equivalente de arena
Agregado grueso	78%	24%	7%	--	--
Agregado fino	--	--	10%	--	--
Gradación combinada				77%	66%

Tabla 20: características físicas agregados CONCRESCOL S.A

CONCRESCOL S.A.

Laboratorio de control de calidad

ESTUDIO DE FORMULA DE TRABAJO PARA MEZCLAS AS FALTICAS DEL TIPO MDC-2

PORCENTAJES %	33,0	10,0	15,0	42,0
---------------	------	------	------	------

TAMIZ	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4	MEZCLA	NORMA
	Arena Trituración Chicoral	Arena Trituración Conagre	Arena fina Coello	Grava 1/2" Conagre		
25,40	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
19,10	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
12,70	100,0	100,0	100,0	74,3	89,2	100,0
9,52	99,8	99,6	100,0	57,3	81,9	88,0
4,76	83,0	87,1	97,8	6,2	53,4	65,0
2,00	60,2	65,5	90,2	4,7	41,9	45,0
0,42	24,7	42,0	42,9	3,8	20,3	25,0
0,18	14,1	17,5	21,7	2,4	10,7	17,0
0,17	8,4	4,3	15,7	1,3	6,1	8,0

Tabla 21: formula de trabajo de CONCRESCOL S.A

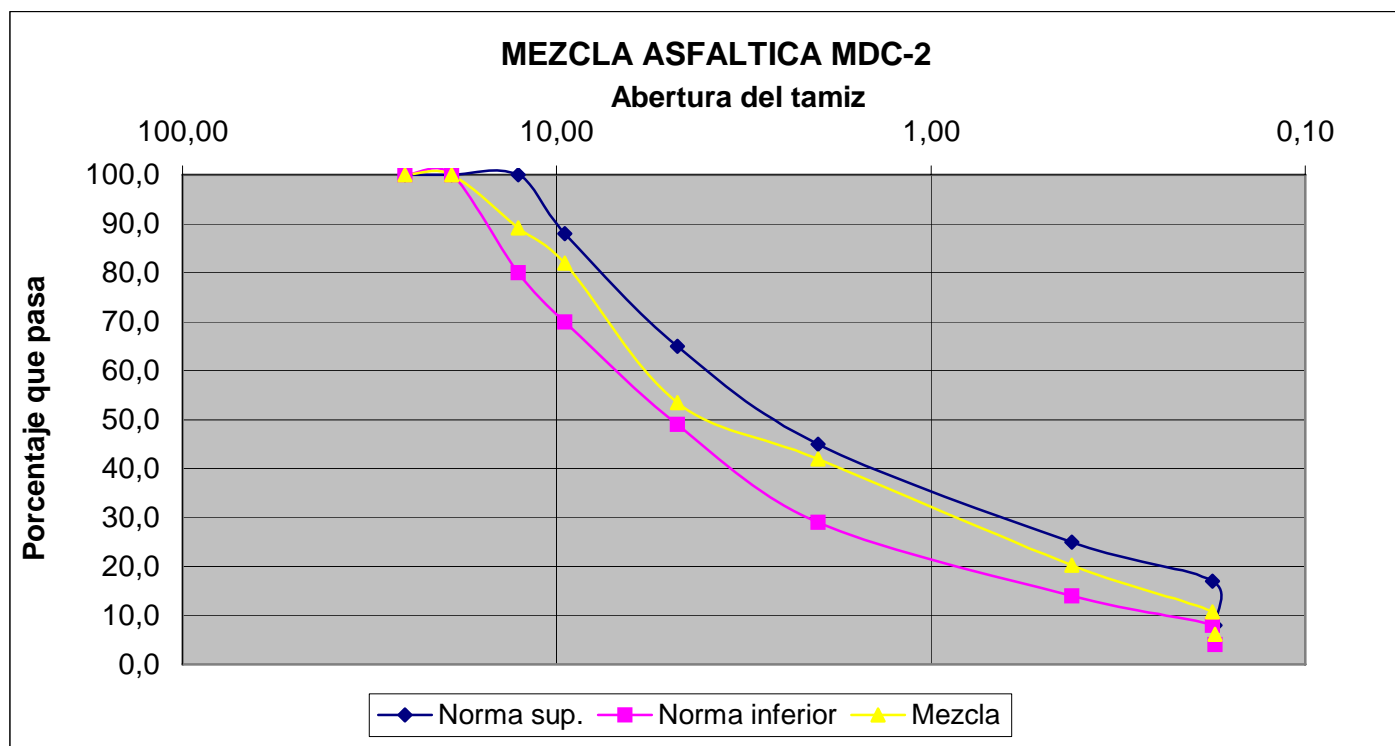


Figura 70: Curva granulométrica formula de trabajo CONCRESCOL S.A

5.2.2. ASFALTO CONCRESCOL

A continuación se presentan las características físicas del asfalto facilitado por CONCRESCOL S.A.

CARACTERISTICAS		NORMA INV	80-100		CONCRESCOL S.A.
			min	max	
Penetración (25°C, 100g, 5s)	0,1 mm	E-706	80	100	92
Índice de penetración		E-724	-1	+1	0,7
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	cm	E-712	100	--	>100
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713	99		110
Contenido de agua	%	E-704		0,2	0,05

Tabla 22: características físicas del asfalto CONCRESCOL S.A

5.3. PRIMER ENSAYO MARSHALL:

Una vez se tenía la fórmula de trabajo, de la empresa anteriormente mencionada, se procedió a “calibrar” y determinar si las condiciones de mano de obra y laboratorio de la Pontificia universidad Javeriana, eran similares a las del laboratorio de Concescol S.A. para esto se realizó un ensayo Marshall completo y se comparó con el obtenido en el laboratorio de dicha empresa. La Tabla 23 y Tabla 24 presentan en resumen los resultados obtenidos por Concescol S.A. y en la Pontificia Universidad Javeriana respectivamente. (Los ensayos completos y los resultados se presentan en el anexo).

CONCESCOL S.A.	RESULTADOS		CON % DE ASFALTO DE DISEÑO		ESPECIFICACIONES
	OPTIMOS	% ASFALTO	% DE ASFALTO	DATOS	
PESO UNITARIO (g/cm ³)	2,264	7,0	5,9	2,243	
% VACÍOS DE LA MEZCLA	5,0	5,7	5,9	4,6	4,0-6,0
FLUJO (mm)	3,3	6,0	5,9	3,3	2-3,5
ESTABILIDAD (kg)	1553,0	6,0	5,9	1520	>900
% DE VACÍOS DEL AGREGADOS	17,0	5,0	5,9	16,5	>15
% VACÍOS LLENOS DE ASFALTO	72,0	5,9	5,9	72	65-75
PROMEDIO		5,9	5,9		

Tabla 23: Resultados ensayo Marshall Concescol.

LABORATORIO P.U.J.	RESULTADOS		CON % DE ASFALTO DE DISEÑO		ESPECIFICACIONES
	OPTIMOS	% ASFALTO	% DE ASFALTO	DATOS	
PESO UNITARIO (g/cm ³)	2,296	7,0	5,7	2,24	
% VACÍOS DE LA MEZCLA	5,0	5,4	5,7	4,2	4,0-6,0
FLUJO (mm)	3,3	5,8	5,7	3,2	2-3,5
ESTABILIDAD (kg)	1900,0	5,7	5,7	1900	>900
% DE VACÍOS DEL AGREGADOS	16,6	5,0	5,7	16,3	>15
% VACÍOS LLENOS DE ASFALTO	70,0	5,5	5,7	74	65-75
PROMEDIO		5,7	5,7		

Tabla 24: Resultado ensayo Marshall Laboratorio P.U.J.

5.4. COMPACTACIÓN BRIQUETAS MARTILLO MARSHALL Y COMPACTADOR GIRATORIO:

Teniendo la certeza que se estaba trabajando en las mismas condiciones. Se procedió a la elaboración de briquetas por martillo Marshall y posteriormente por compactador giratorio. La Figura 71 muestra el esquema de las diferentes mezclas que se realizaron en el presente trabajo de grado:

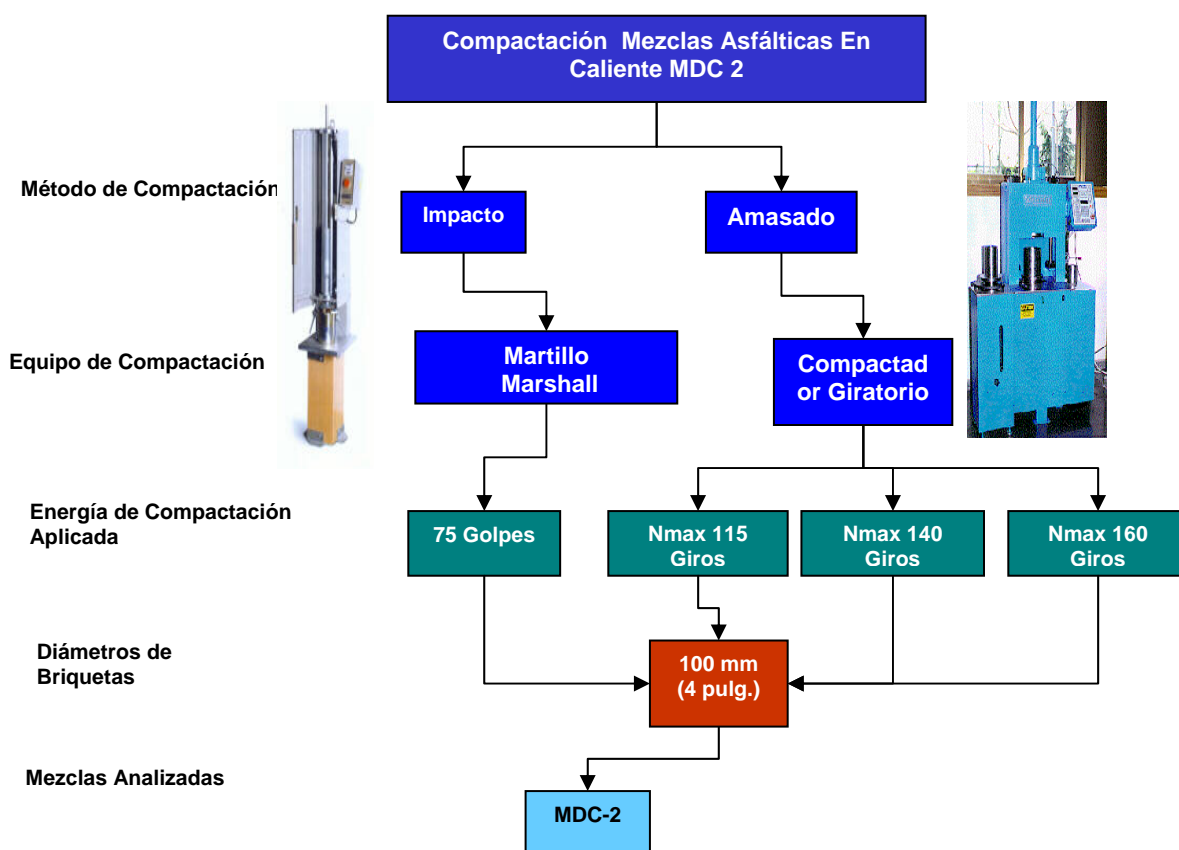


Figura 71: Esquema mezclas analizadas

5.4.1. PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE BRIQUETAS

El procedimiento llevado a cabo para la dosificación de las briquetas es el descrito en el numeral 3.1, posteriormente se comenzó la compactación por separado, impacto y amasado, las briquetas compactadas con martillo Marshall (impacto) se realizaron

con un martillo de funcionamiento manual, cumpliendo todas las especificaciones descritas en el numeral 3.1.2.1, las briquetas elaboradas por amasado (compactador giratorio) se llevaron a cabo con el equipo Rainhart, siguiendo todos los parámetros expuestos por la SHRP (Strategic Highway Research Program) para el SGC (Superave Gyrotory Compactor) la tabla muestra de manera resumida dichos parámetros.

PARAMETRO	Especificación
ANGULO DE GIRO	1,25°
VELOCIDAD DE GIRO	30 rev/min
PRESION DE CONSOLIDACION	600 KPa
DIAMETRO DEL MOLDE	150 mm

Tabla 25: Especificaciones compactador giratorio

Aparte de los parámetros mencionados en la tabla anterior el equipo debe contar con un pórtico de reacción con base rotatoria y un sistema de medición de altura y ángulo.

La calibración del equipo se realizó según el procedimiento descrito en el manual del equipo el cual contemplaba aspectos como calibración de altura, presión de consolidación, ángulo y velocidad entre otros.

Un aspecto en el que se tuvo especial cuidado fue en la presión de consolidación de la maquina, ya que el trabajo de grado estipulaba la compactación de briquetas de 100mm (4") y la presión estipulada en la especificación es de 600KPa pero para un espécimen de 150mm (6") por cual fue necesario recalculer la presión para que cumpliera con lo descrito en la norma pero para especimenes de 4". A continuación se describe como se realizó este cálculo:

$$600Kpa * \frac{1PSI}{6.895KPa} = 87.02PSI$$

$$87.02PSI = \frac{4 * 2460.4lb}{(6)^2 * \pi} = \frac{4 * (x)lb}{(4)^2 * \pi} \quad (x) = 1093.51lb$$

$$\frac{1093.51lb}{(6)^2 * \pi} * \frac{6.895Kpa}{1PSI} = 266KPa$$

lo que marca el compactador giratorio es 266KPa para realizar una presión real de 600KPa sobre una muestra de 100mm (4”).

5.5. ENSAYOS DE TENSIÓN INDIRECTA Y DEFORMACION PERMANENTE:

La

Figura72 y

Figura 73 muestra, en forma esquemática, la manera en que se llevaron a cabo los ensayos de tensión indirecta y deformación permanente respectivamente, de las briquetas mencionadas en el punto anterior.

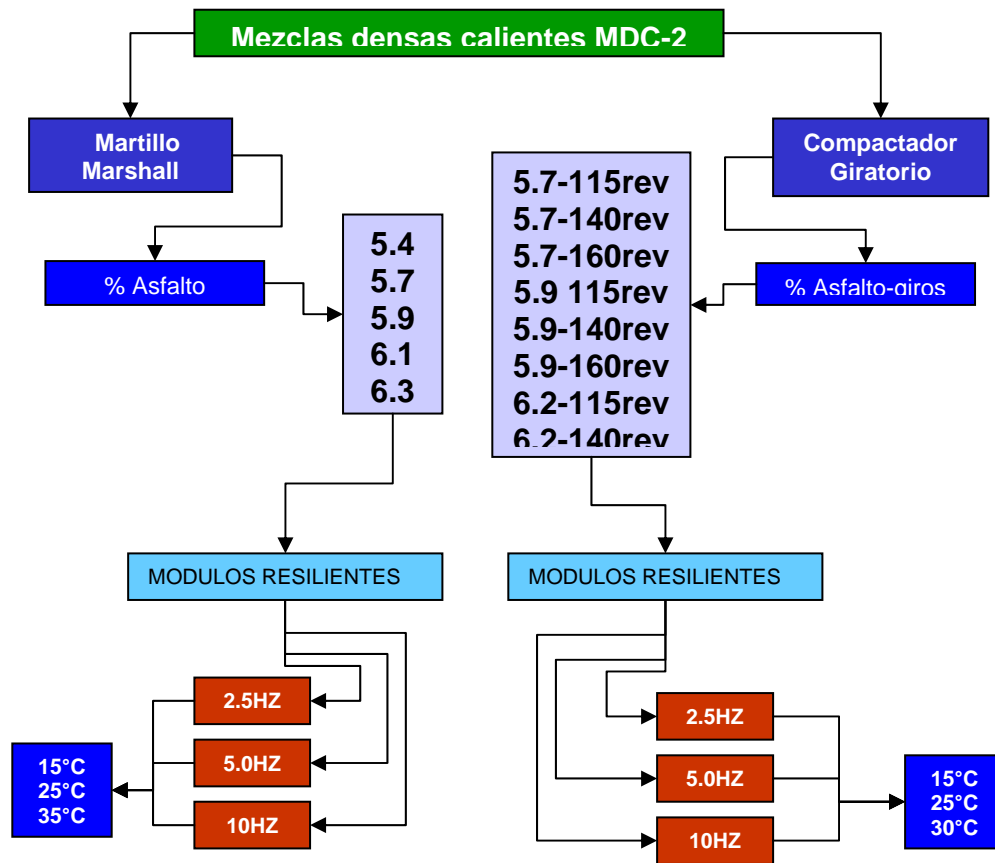


Figura72: Esquema general ensayos de tensión indirecta

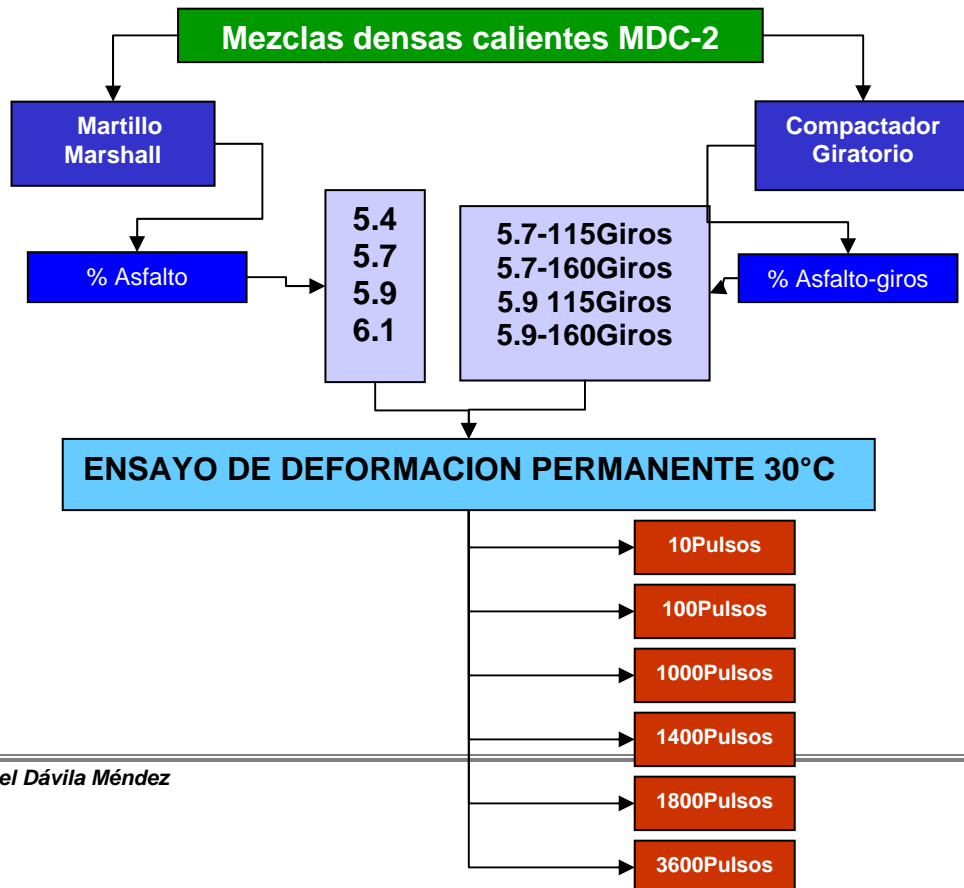


Figura 73: Esquema general ensayos de deformación permanente.

CUADRO RESUMEN	
TOTAL ENSAYOS TENSIÓN INDIRECTA (Marshall):	15
TOTAL ENSAYOS TENSIÓN INDIRECTA (compactador giratorio):	27
TOTAL ENSAYOS DEFORMACIÓN PERMANENTE:	27

6. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS:

Se busca basados en los resultados de los ensayos tensión indirecta y deformación permanente obtener un valor optimo de asfalto, el cual muestra el mejor desempeño respecto al modulo resiliente y la deformación permanente sin dejar de tener en cuenta aspectos de diseño tradicionales como la estabilidad, el flujo y la densidad bulk; a este porcentaje se le realizaron pruebas de estabilidad y flujo para poder comprar si dicho valor de mejor desempeño en la caracterización dinámica muestra igualmente un buen desempeño en los ensayos tradicionales.

Todos los resultados se referencian a los porcentajes óptimos de asfalto encontrados en ensayos Marshall, tanto por la empresa Concescol S.A. (porcentaje optimo 5.9) como por la Pontificia Universidad Javeriana (PUJ) (porcentaje optimo 5.7) (ver numeral 5.3).

6.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PESO ESPECÍFICO (BULK)

6.1.1. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

6.1.1.1. MARTILLO MARSHALL 75 GOLPES

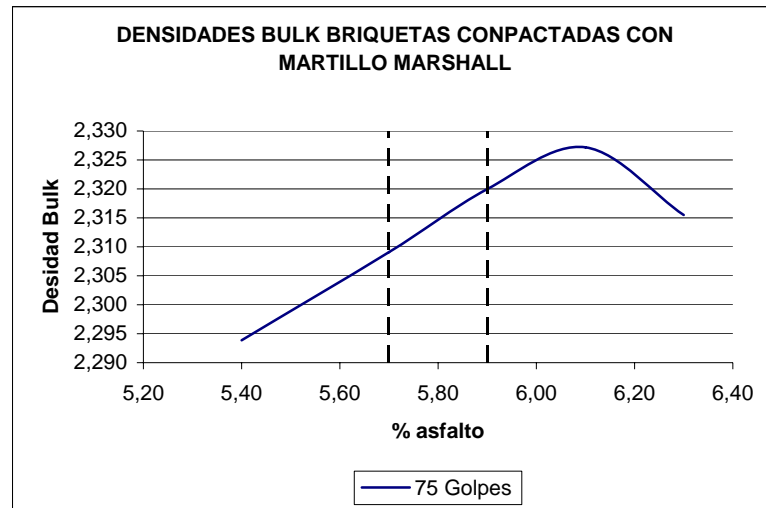


Figura 74: Densidad Bulk 75 golpes

6.1.1.2. COMPACTADOR GIRATORIO 115 – 140 –160 GIROS

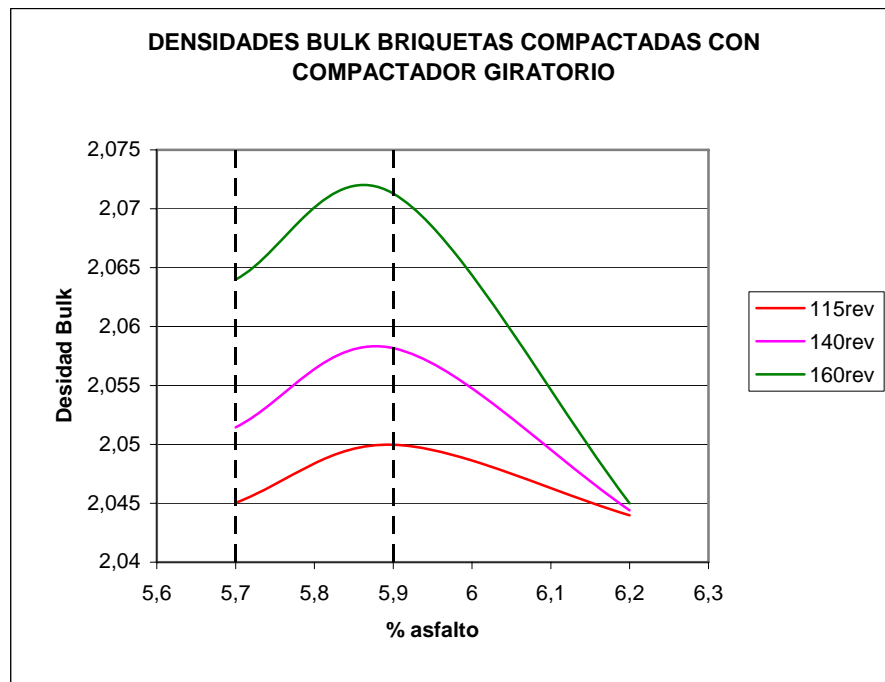


Figura 75: Densidad Bulk 115-140-160 giros

6.1.2. INFLUENCIA DEL MÉTODO DE COMPACTACIÓN EN LA DENSIDAD BULK

La Figura 74 muestra como la densidad máxima se alcanza en un 6.1 de porcentaje de asfalto, mientras que la Figura 75, de briquetas compactadas con compactador giratorio, la densidad máxima, sin importar le numero de giros, se tiene en 5.9 lo cual concuerda con el porcentaje óptimo de diseño encontrado por la empresa Concescol S.A. Es evidente que las densidades encontradas, de briquetas compactadas con martillo Marshall superan a las compactadas con compactador giratorio en valores mayores a un 10% haciendo evidente una menor energía de compactación por parte del compactador. Por otro lado se puede observar en la Figura 75 que el número de giros no muestra una diferencia significativa en aumento de densidad teniendo una diferencia menor al 1% entre los especímenes compactados con 115 giros y 160 giros.

6.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE TENSIÓN INDIRECTA

6.2.1. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

6.2.1.1. MARTILLO MARSHALL 75 GOLPES

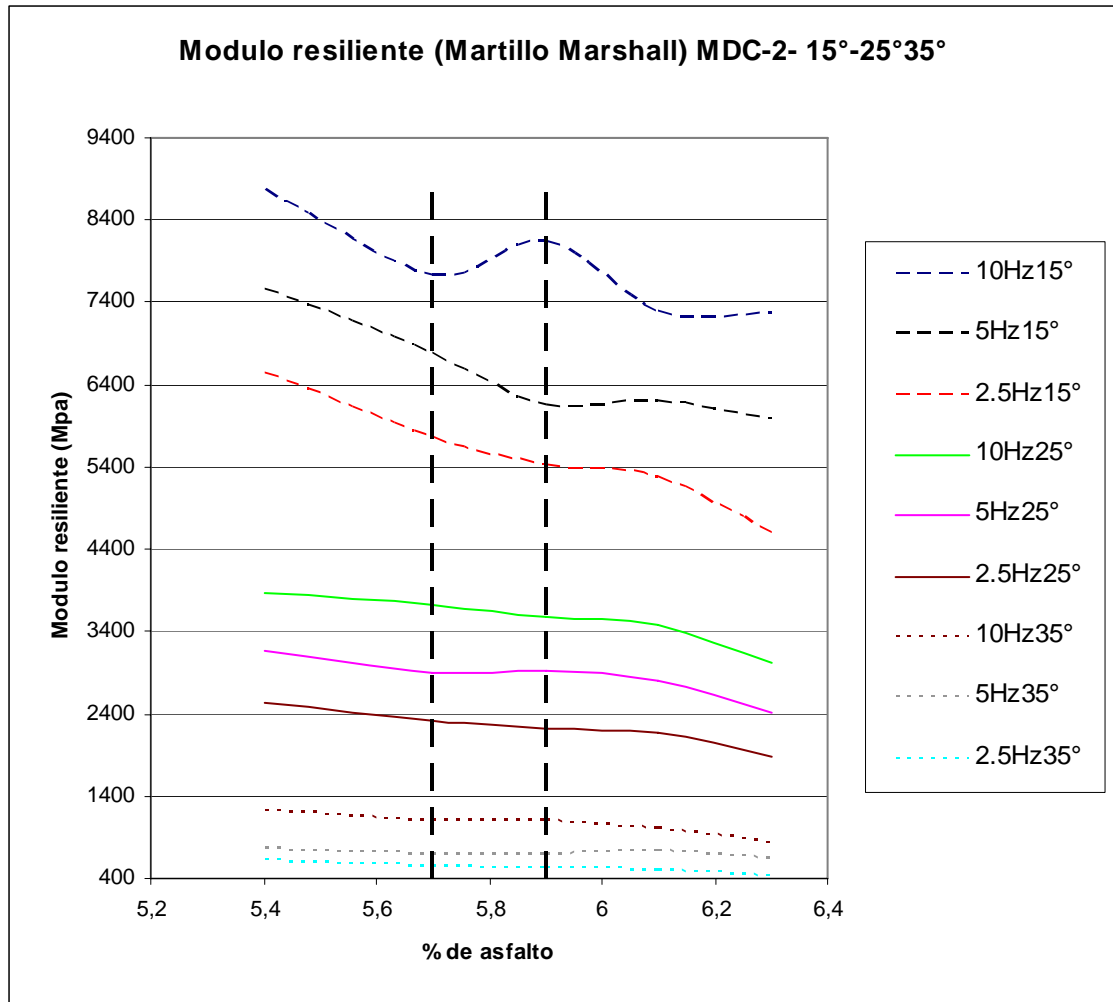


Figura 76: Módulos resilientes 15°-25°-35° - 75 golpes.

La Figura 76 muestra como el modulo resiliente tiende a aumentar con el decremento de porcentajes de asfalto mostrando un valores máximos en un porcentaje de 5.4. Lo cual indicaría un mejor desempeño con porcentajes de

asfalto un poco menores al optimo obtenido en el laboratorio, tanto para la empresa Concescol S.A. como para la PUJ; sin embargo es de esperarse que la curva tenga un descenso para porcentajes menores a 5.4 donde el papel del ligante es fundamental para una buena compactación y por lo tanto para la densidad y uniformidad de la mezcla.

La temperatura juega un papel muy importante en los resultados, haciéndose evidente un descenso en lo módulos con aumento de la temperatura.

Relacionando temperatura y frecuencia, la Figura 76 muestra que para 15° la diferencia entre 10Hz y 2.5Hz es en promedio de 25%, para 25° es de 35% y para 35° es del 50% de lo cual se puede concluir que a mayores temperaturas la frecuencia toma mayor relevancia en los valores de módulos. Haciendo evidente que para una temperatura media alta la incidencia del trafico (mayores frecuencias) tiene mayor repercusión en el rendimiento y por lo tanto la durabilidad de la carpeta asfáltica.

6.2.1.1.1. MR - Densidad Bulk

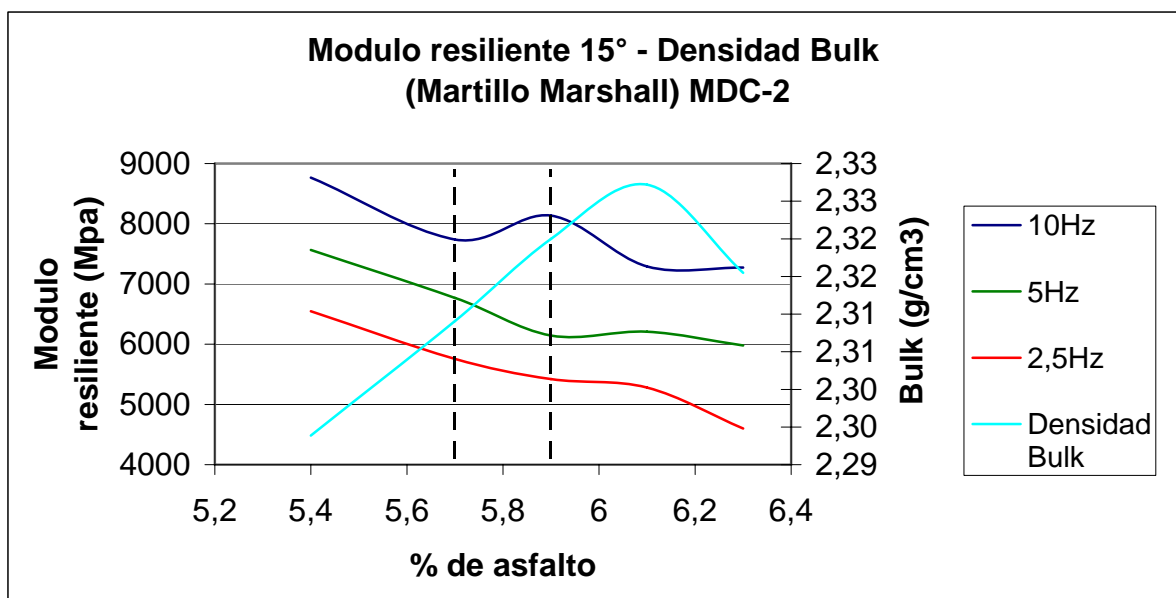


Figura 77: Módulos resilientes 15° - Densidad Bulk - 75 golpes.

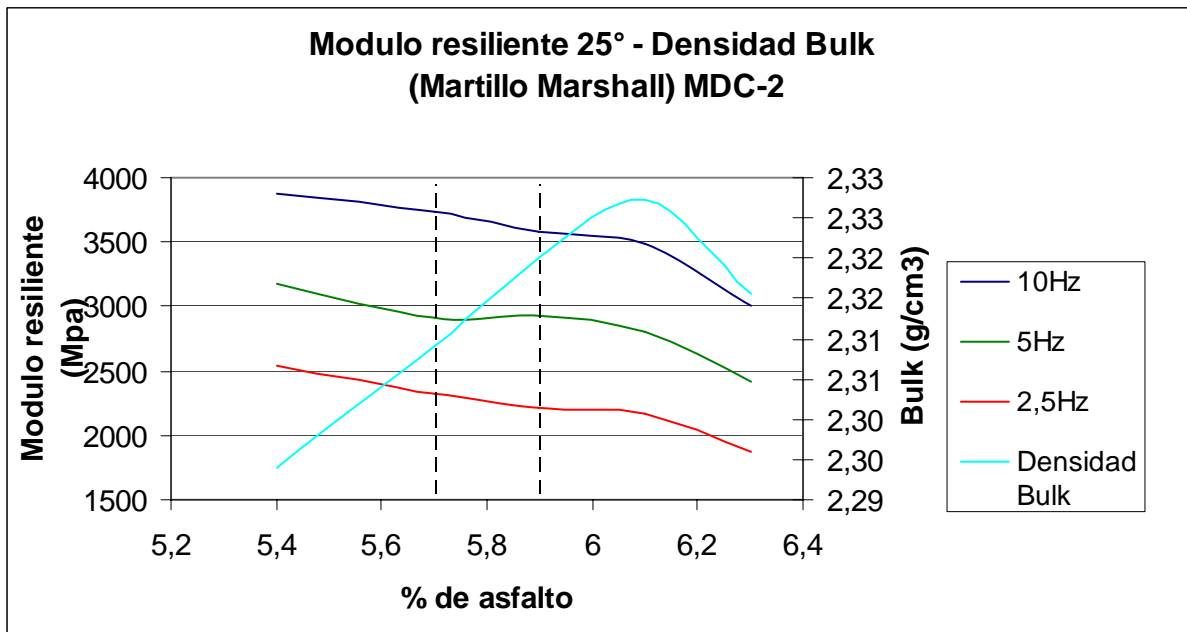


Figura 78: Módulos resilientes 25° - Densidad Bulk - 75 golpes.

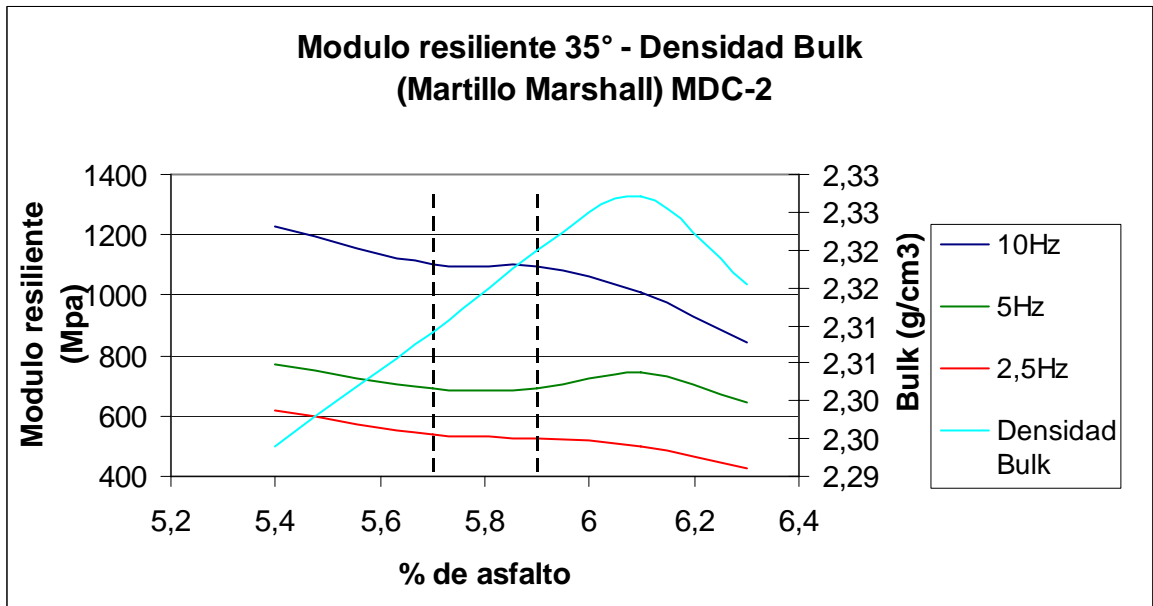


Figura 79: Módulos resilientes 35° - Densidad Bulk - 75 golpes.

Teniendo en cuenta lo descrito en el numeral anterior la disminución del porcentaje de asfalto, aunque representa un mejor comportamiento frente a módulos (sin importar la temperatura) muestra un decremento excesivo en densidad, como se puede observar en la Figura 77, Figura 78 y Figura 79 que

aunque este aspecto no es tenido en cuenta como un ítem mas dentro de las especificaciones de mezclas asfálticas se conoce que bajas densidades conllevan a problemas como oxidación y envejecimiento prematuro de la mezcla, baja resistencia a la fatiga y a la deformación plástica entre otros, para los porcentajes óptimos encontrados en laboratorio, se puede decir que existe un balance entre módulos y densidad teniendo valores buenos para la densidad y aceptables para módulos.

6.2.1.1.2. MR – Estabilidad

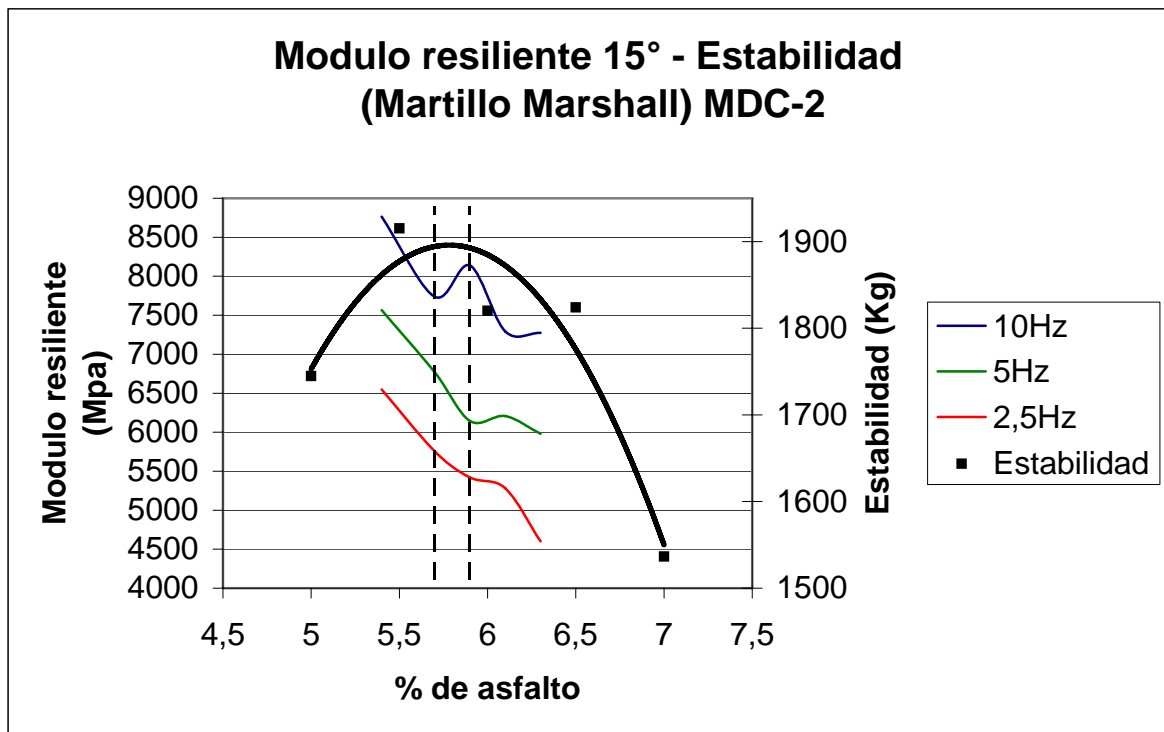


Figura 80: Módulos resilientes 15° - Estabilidad - 75 golpes.

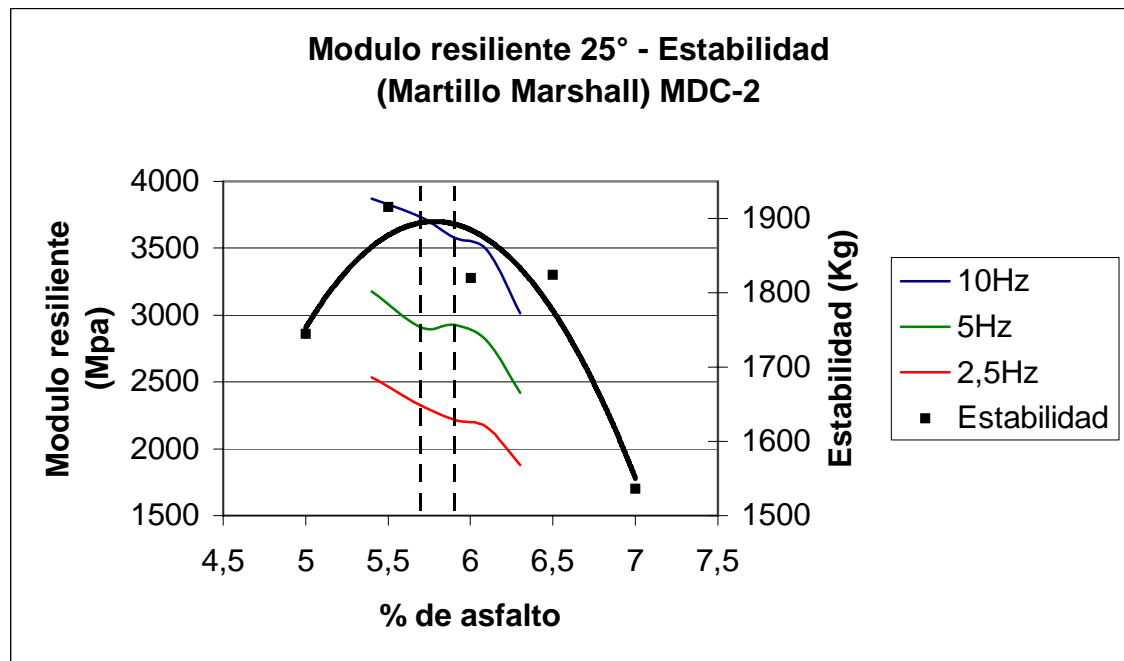


Figura 81: Modulo resiliente 25° - Estabilidad –75 golpes

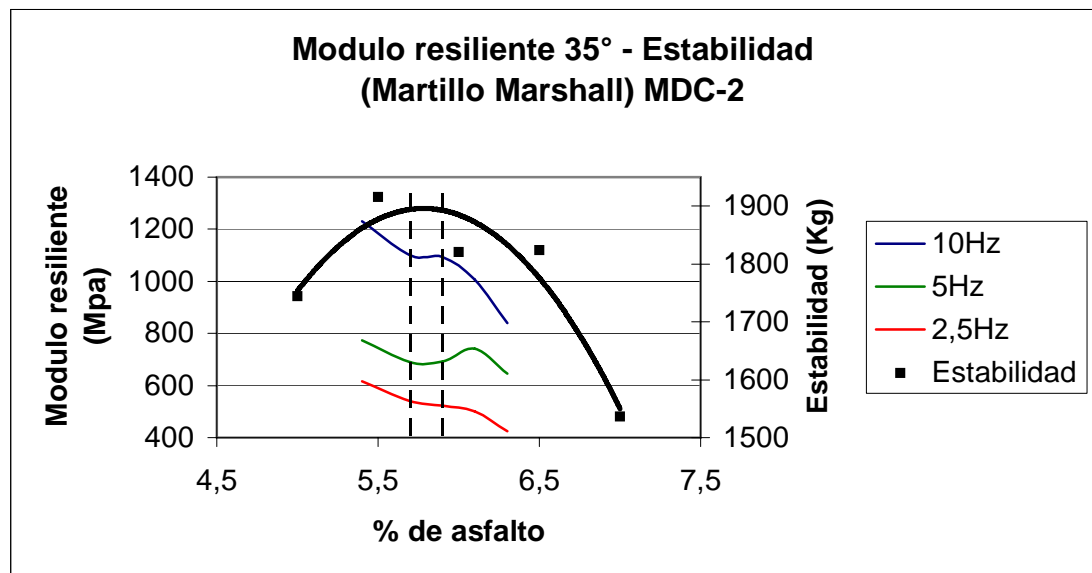


Figura 82: Modulo resiliente 35° - Estabilidad –75 golpes

En cuanto a la estabilidad de la mezcla se cumple el mismo patrón que lo ocurrido con la densidad, ya que aunque los valores de módulos son mayores para contenidos menores de asfalto la estabilidad desciende a valores que, aunque mayores a los de la especificación INVIAS (>900Kg), son

aproximadamente 10% menores a los que la mezcla con los porcentajes de diseño es capaz de soportar ver (Figura 80, Figura 81 y Figura 82).

Para los porcentajes de diseño encontrados en laboratorio, existe un balance entre módulos y estabilidad teniendo valores que superan los de la especificación en más de un 100% para la estabilidad y manteniendo módulos resilientes aceptables.

6.2.1.1.3. MR – Flujo

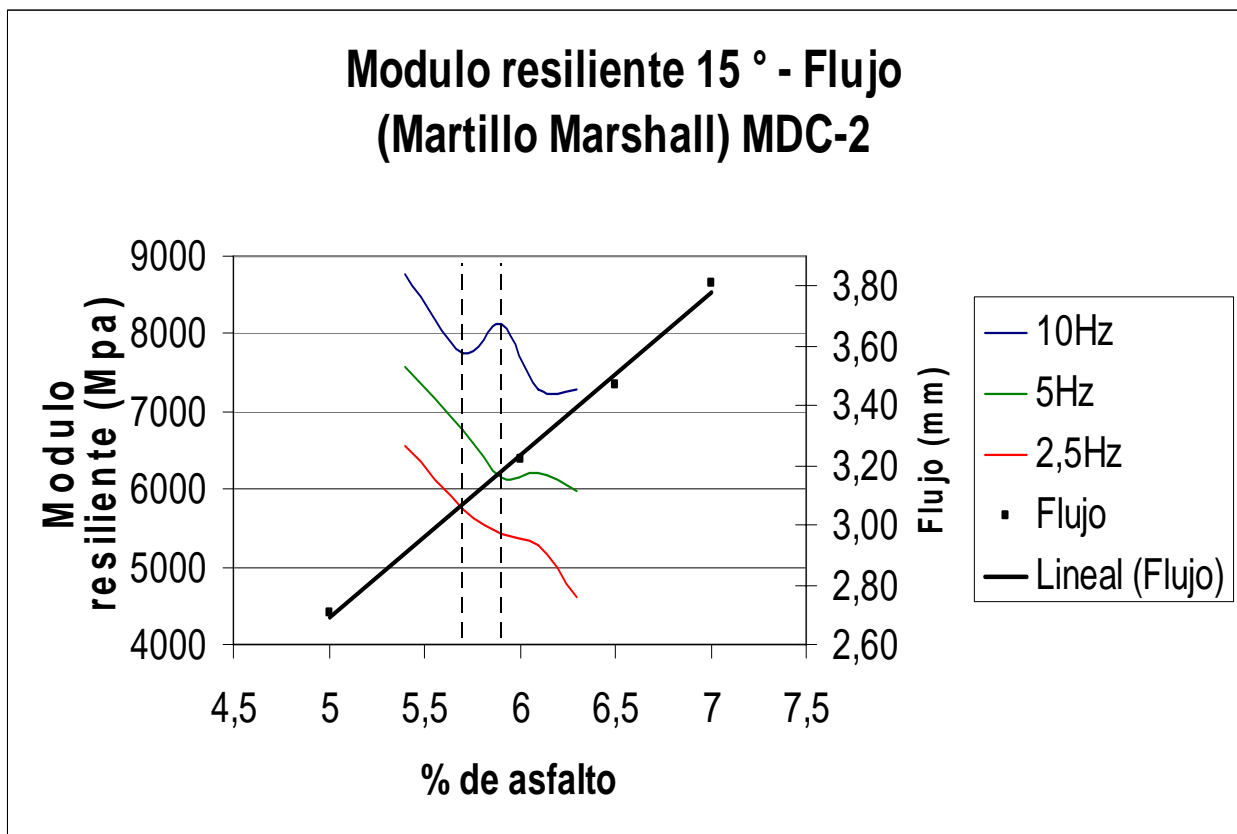


Figura 83: Modulo resiliente 15 ° - Flujo –75 golpes

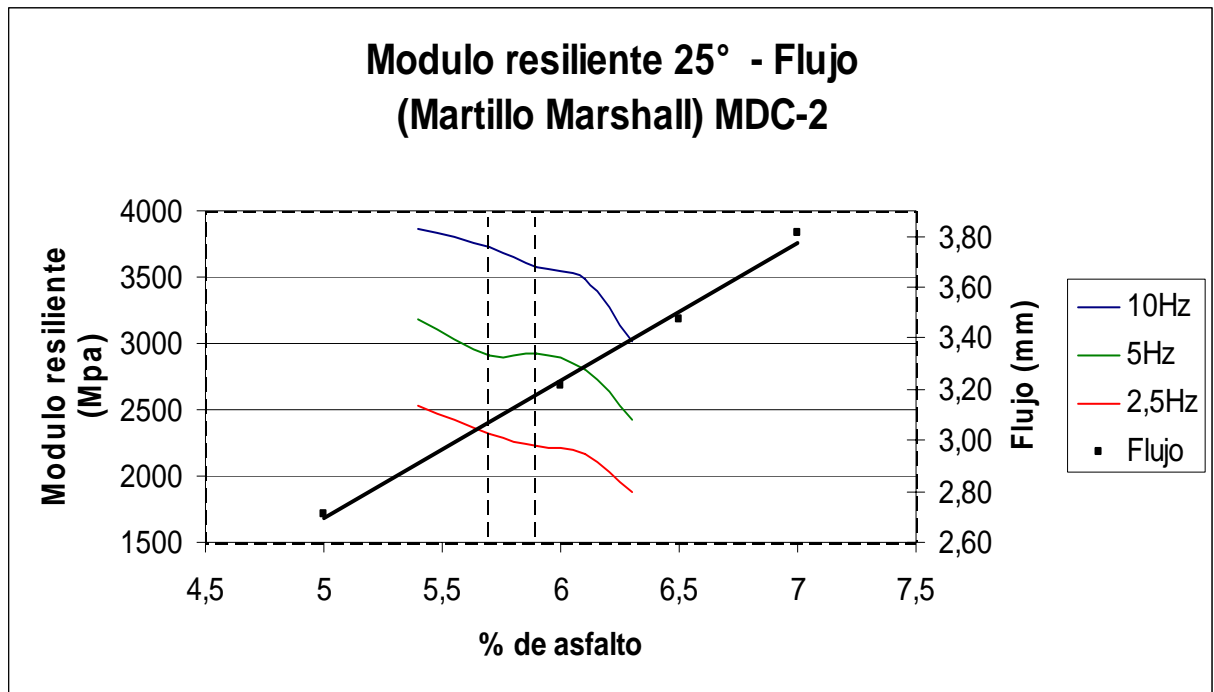


Figura 84: Modulo resiliente 25° - Flujo –75 golpes

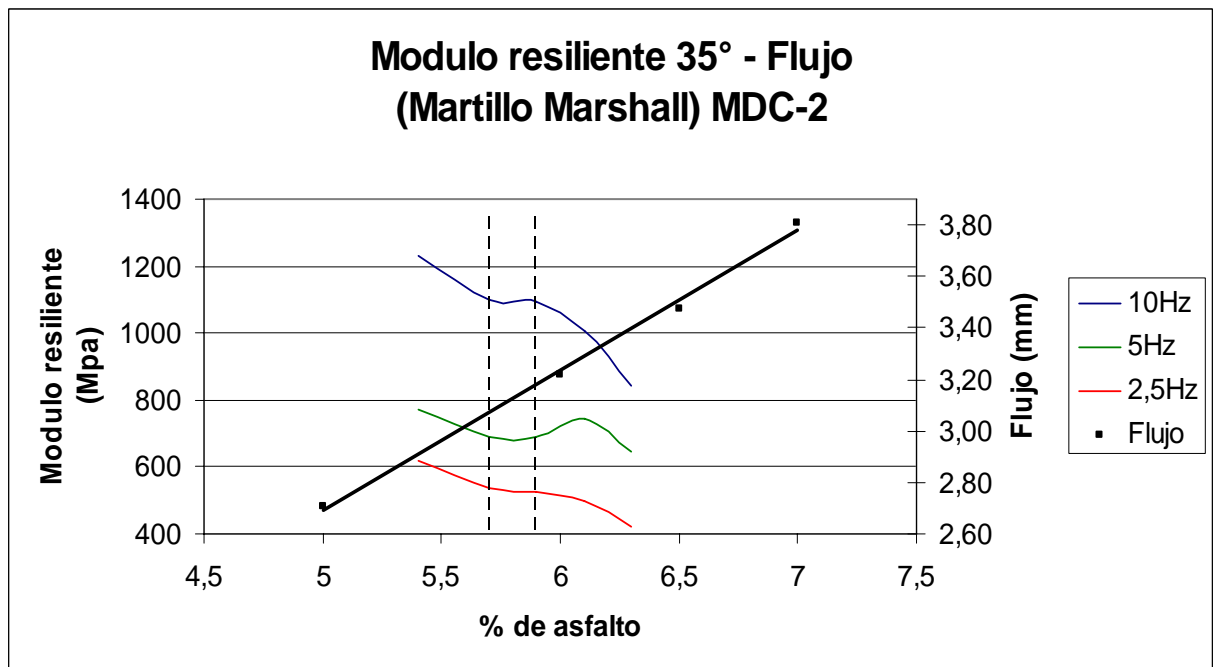


Figura 85: Modulo resiliente 35° - Flujo –75 golpes

El flujo, como se puede ver en la Figura 93, Figura 94 y Figura 95, para valores de porcentaje de asfalto menores a los de diseño muestra un valor dentro de

3.3mm dentro de la especificación (2-3.5mm), valor que difiere en menos de un 5% a los encontrados para porcentajes óptimos, lo cual muestra un buen comportamiento frente al flujo y valores aceptables de módulos, garantizando una mezcla lo suficientemente flexible para un buen comportamiento frente a las deformaciones permanentes (ahuellamiento) y no tan rígida como para tener problemas de fatiga.

6.2.1.2. COMPACTADOR GIRATORIO 115 GIROS

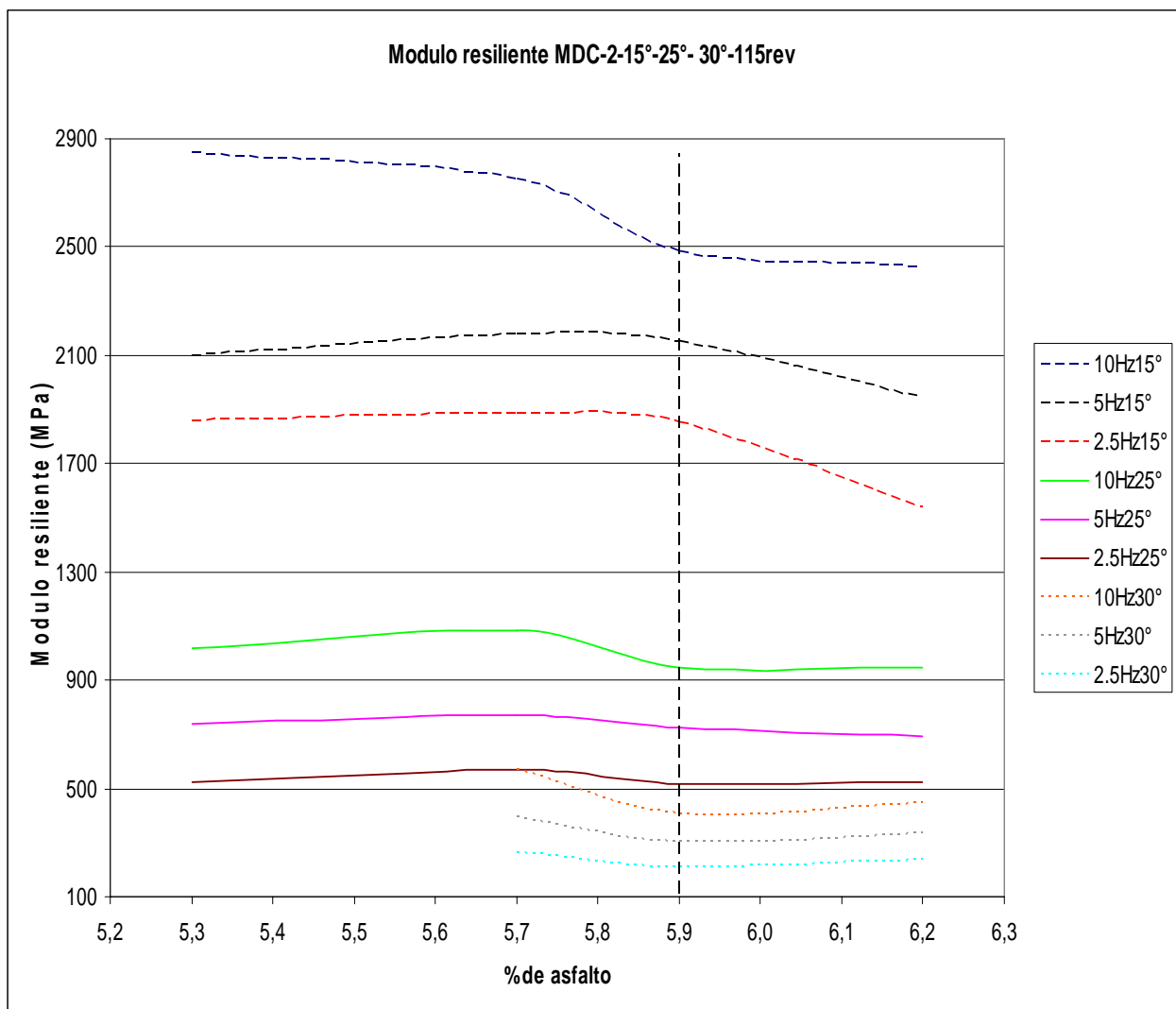


Figura 86: Modulo resiliente 115 giros – 15°-25°-30°

El comportamiento del modulo, como se puede observar en la Figura 86, tiene un comportamiento similar al encontrado para las briquetas compactadas con martillo Marshall, donde para valores de porcentaje de asfalto bajos se tiene que el modulo resiliente tiende a aumentar, Así mismo el modulo resiliente mas alto se encontró con un porcentaje optimo de asfalto de 5.7% que coincide con el porcentaje optimo encontrado en la (PUJ) decreciendo hasta encontrar un valor mínimo y siguiendo con una subida no muy pronunciada, en valores altos de porcentaje de asfalto, sin embargo es conveniente reevaluar esta tendencia revisando porcentajes menores y mayores para comprobar en que porcentaje de asfalto el modulo resiliente presenta verdaderamente un mejor comportamiento.

En comparación con los módulos encontrados para las briquetas compactadas con martillo Marshall, se encuentra un decremento promedio del 70% en los valores de módulos sin importar la temperatura y la frecuencia este comportamiento es constante, lo cual refleja la poca densidad alcanzada por las briquetas compactadas en el compactador giratorio. Nuevamente la temperatura juega un papel muy importante en los resultados, haciéndose evidente un descenso en los módulos con aumento de la temperatura.

Relacionando temperatura y frecuencia, la Figura 86 muestra que para 15° la diferencia entre 10Hz y 2.5Hz es en promedio de 22%, para 25° es de 48% y para 35° es del 56% mostrando nuevamente que para temperaturas mayores la frecuencia (trafico vehicular) toma mayor relevancia en los valores de módulos.

6.2.1.2.1. MR – Densidad Bulk 115 giros

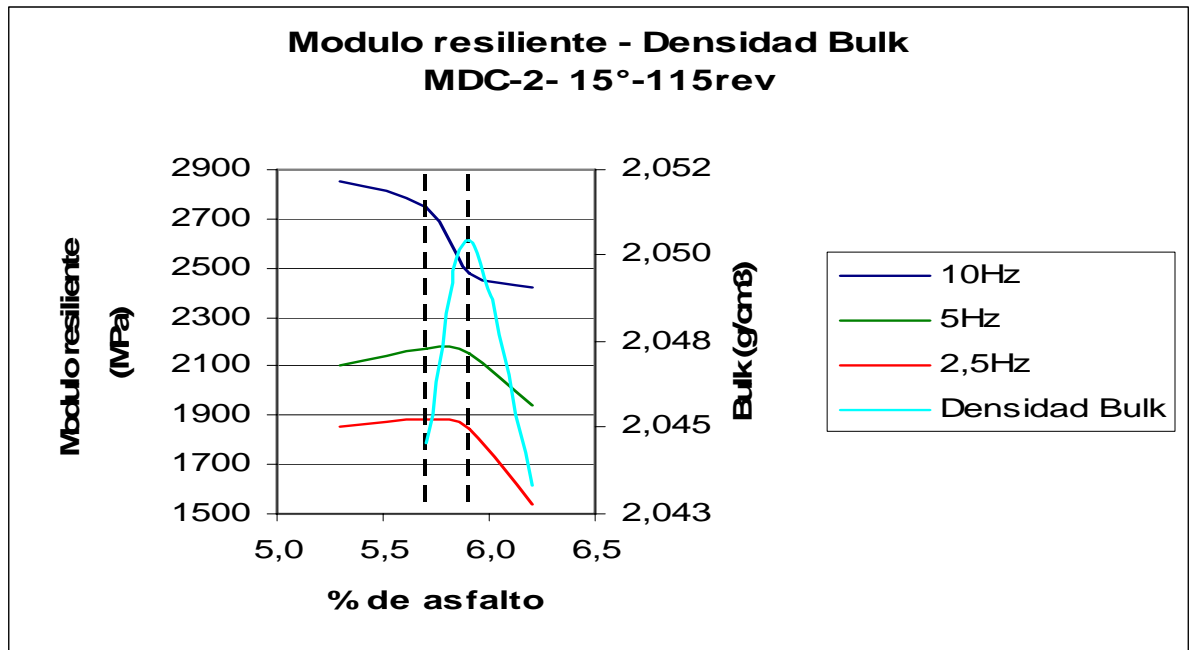


Figura 87: Modulo resiliente 115 giros 15° - Densidad Bulk

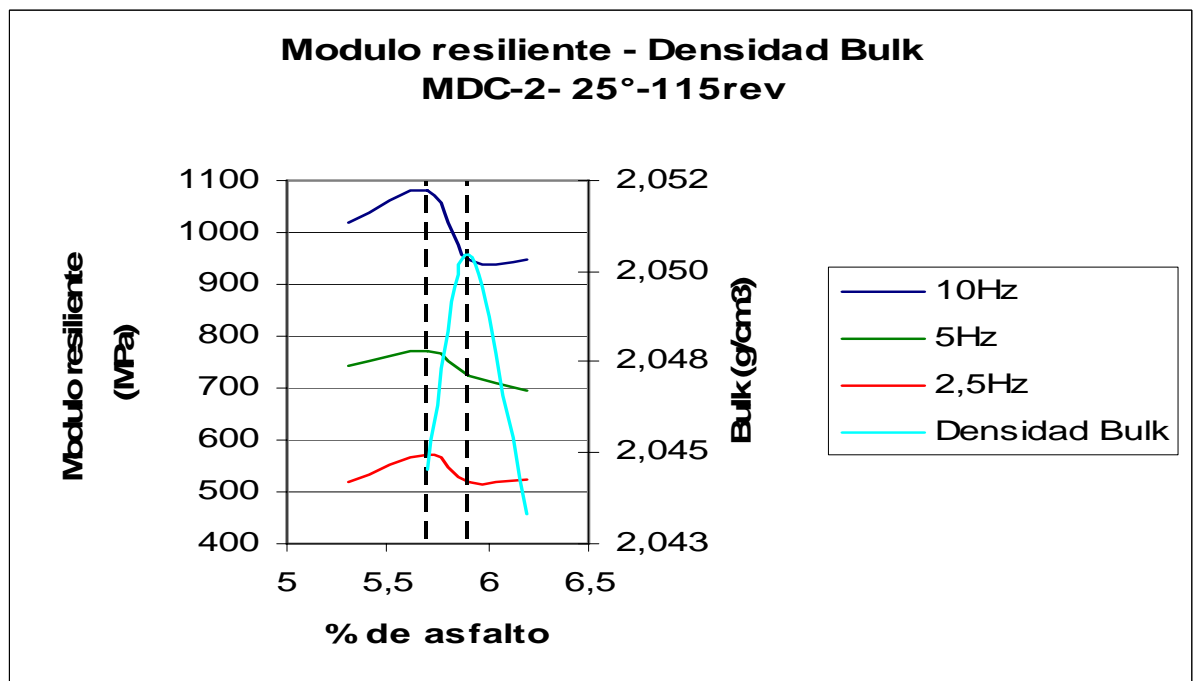


Figura 88: Modulo resiliente 115 giros 25° - Densidad Bulk

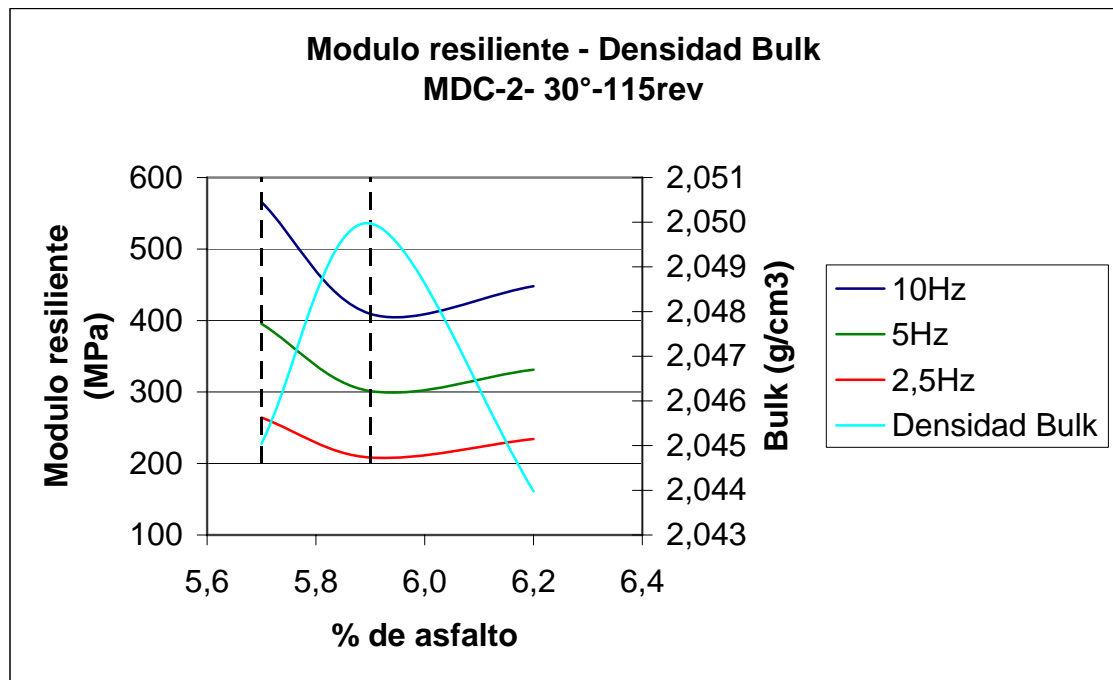


Figura 89: Modulo resiliente 115 giros 30° - Densidad Bulk

La disminución del porcentaje de asfalto presenta un mejor comportamiento frente a módulos, sin embargo muestra un decremento excesivo en la densidad, como se puede observar en la Figura 87, Figura 88 y Figura 89. Aunque este decremento, de la densidad, no es tan amplio como en el caso de las briquetas compactadas con martillo Marshall, con valores que no exceden el 1% con respecto a la mayor densidad alcanzada, la densidad en general obtenida por el compactador giratorio es menor en valores que llegan hasta un 20% a las registradas en las briquetas compactadas con martillo Marshall.

6.2.1.2.2. MR - Estabilidad 115 giros

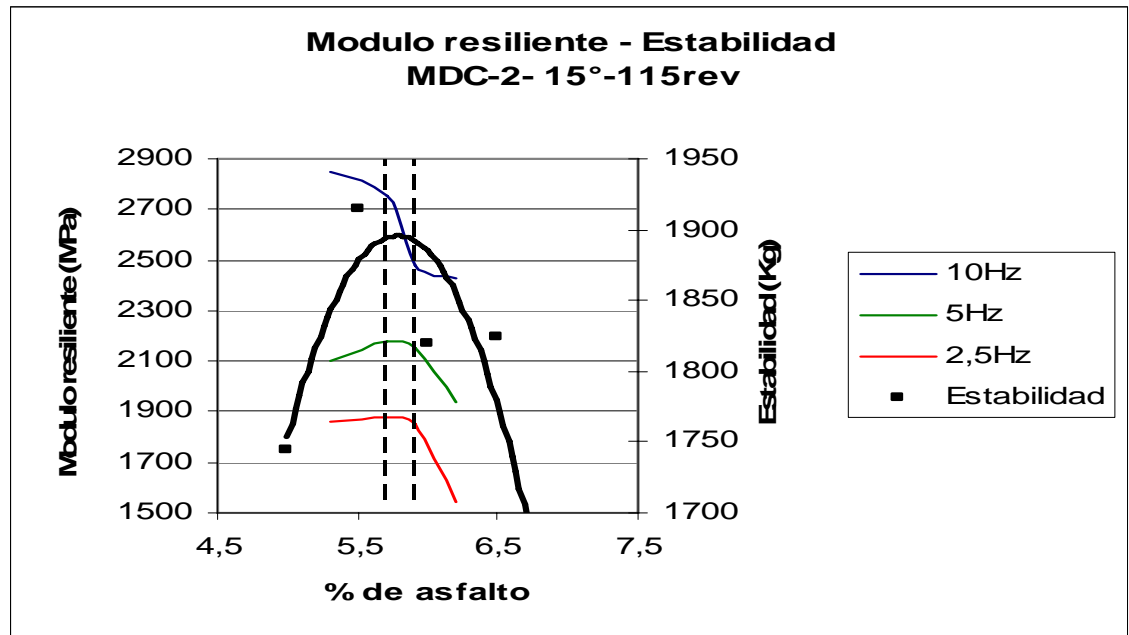


Figura 90: Modulo resiliente 115 giros 15° - Estabilidad

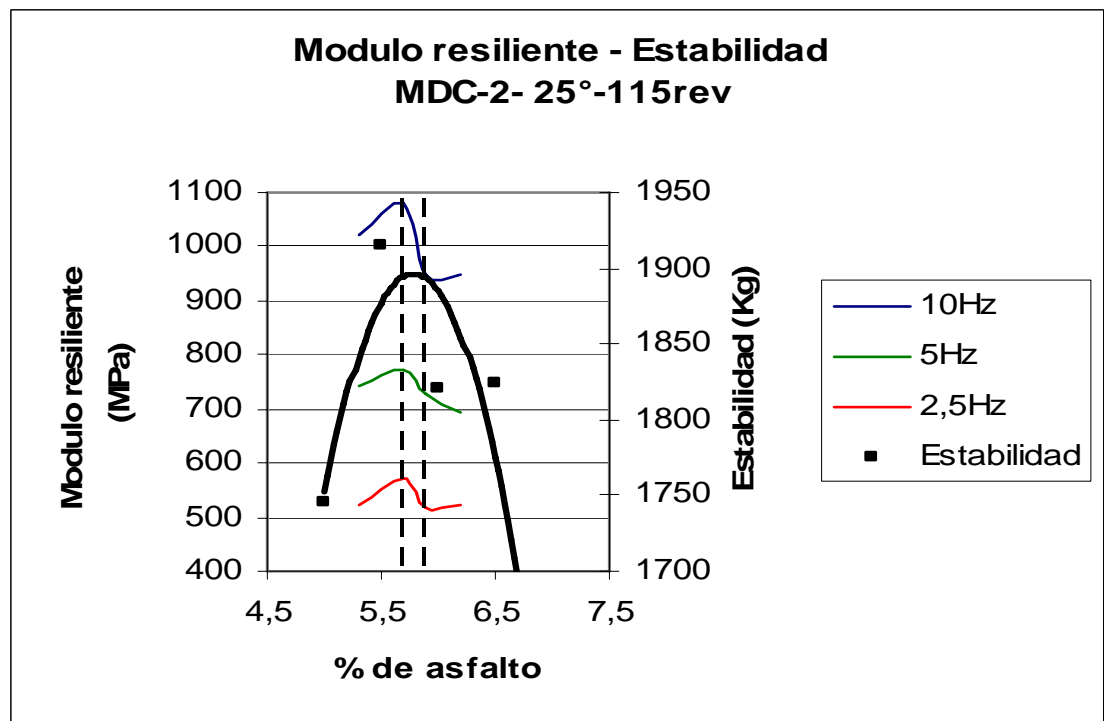


Figura 91: Modulo resiliente 115 giros 25° - Estabilidad

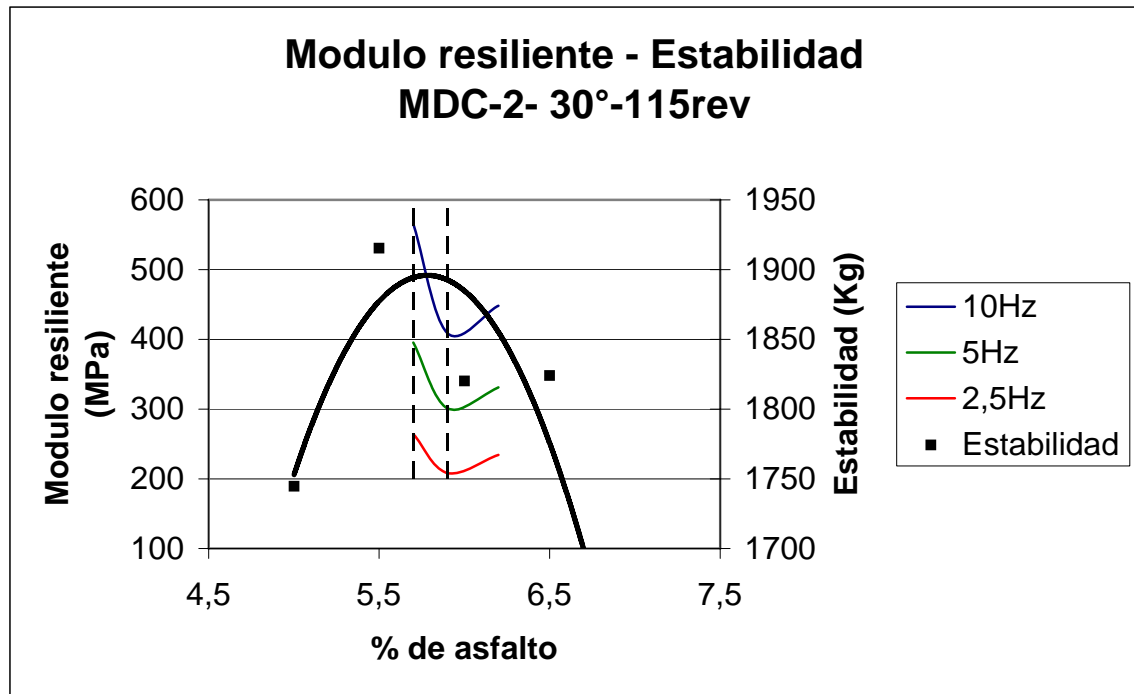


Figura 92: Modulo resiliente 115 giros 30° - Estabilidad

La estabilidad de la mezcla para este caso, de briquetas compactadas con compactador giratorio 115 giros, el mayor módulo ocurre casi perfectamente con la mayor estabilidad, confirmando que las mezclas con bajos contenidos de asfalto presentan mayor rigidez y por lo tanto mejor comportamiento en cuanto a estabilidad y módulos resilientes.

Para los porcentajes de diseño encontrados en laboratorio, se tiene entre los mayores módulos y la mayor estabilidad para el porcentaje encontrado en el laboratorio de la PUJ.

6.2.1.2.3. MR – Flujo 115 giros

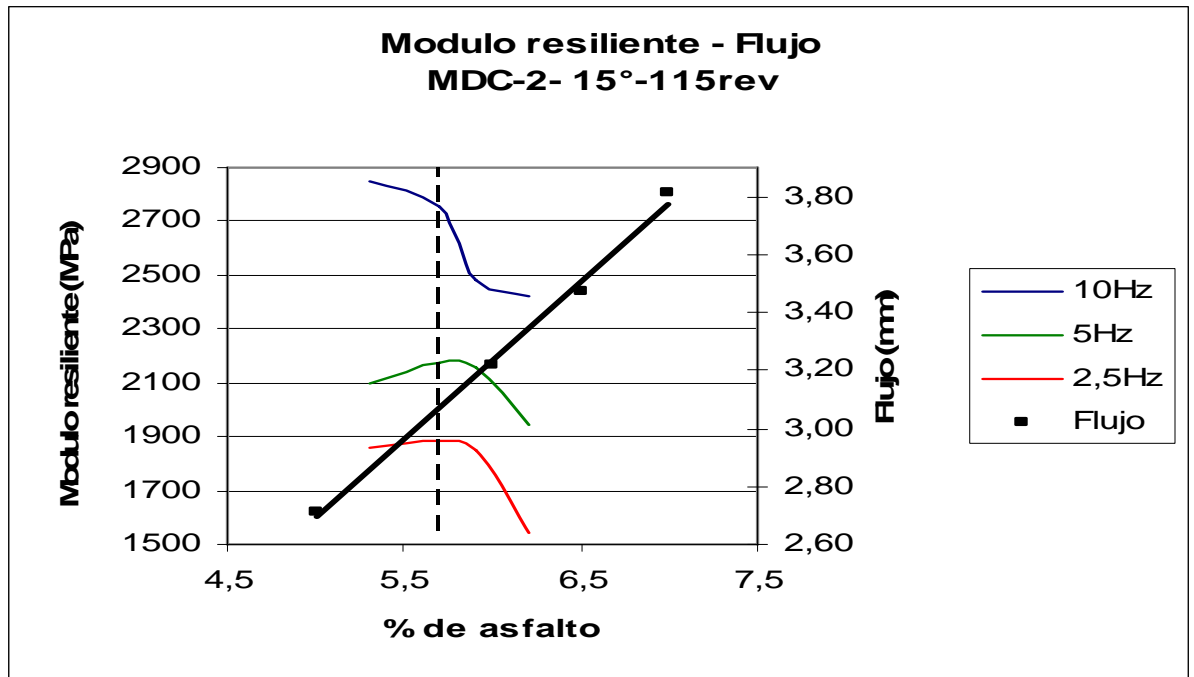


Figura 93: Modulo resiliente 115 giros 15° - Flujo

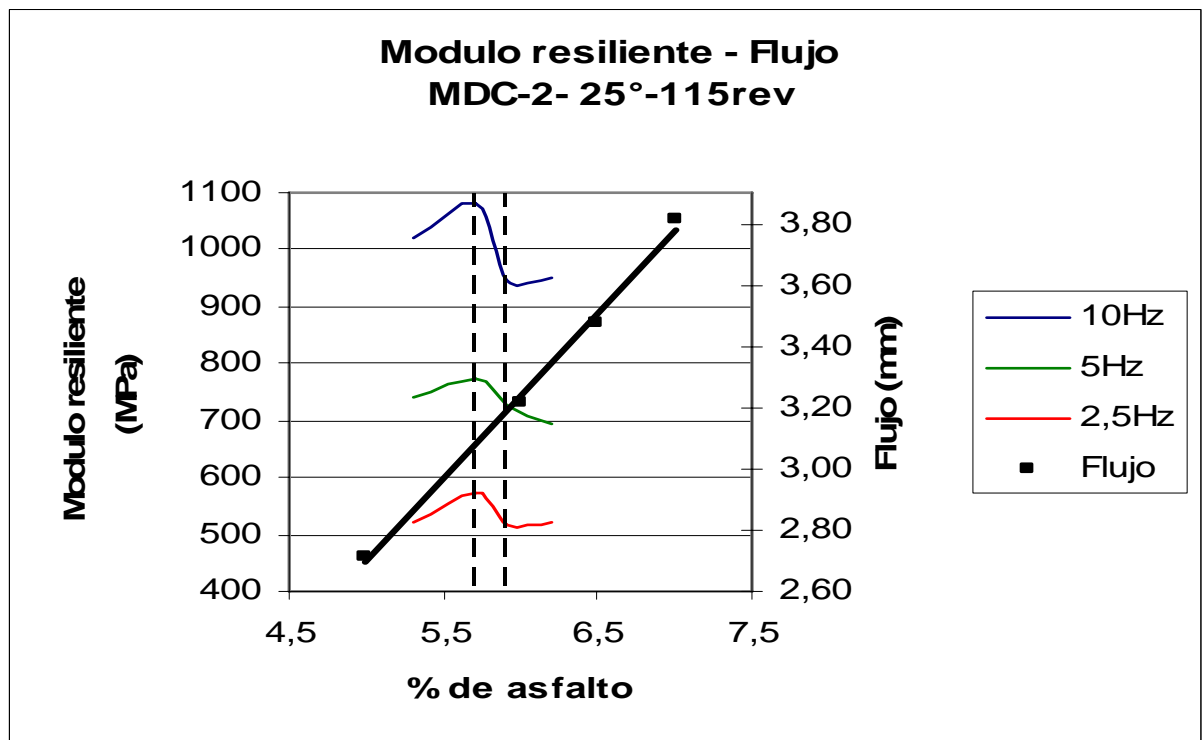


Figura 94: Modulo resiliente 115 giros 25° - Flujo

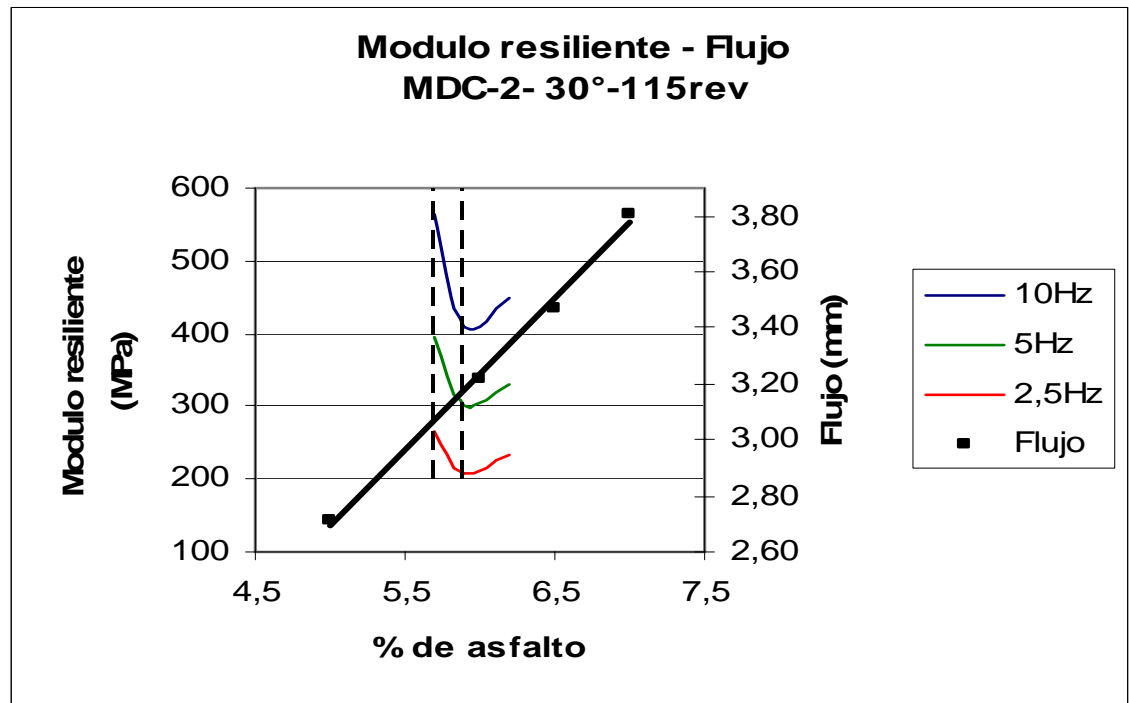


Figura 95: Modulo resiliente 115 giros 30° - Flujo

En la Figura 93, Figura 94 y Figura 95 se puede observar que para los porcentajes de diseño encontrados, los valores de flujo se encuentran dentro de los determinados por las especificaciones, se puede ver también que para porcentajes de asfalto >6.1% se tiene un ascenso en el modulo resiliente mas sin embargo este el flujo para estos valores supera los establecidos por las especificaciones alcanzando valores mayores a 3.5mm lo cual puede presentar problemas como deformaciones excesivas, exudación e hidropilaneamiento por baja resistencia al deslizamiento, muy común en mezclas con altos contenidos de asfalto.

6.2.1.3. COMPACTADOR GIRATORIO 140 GIROS

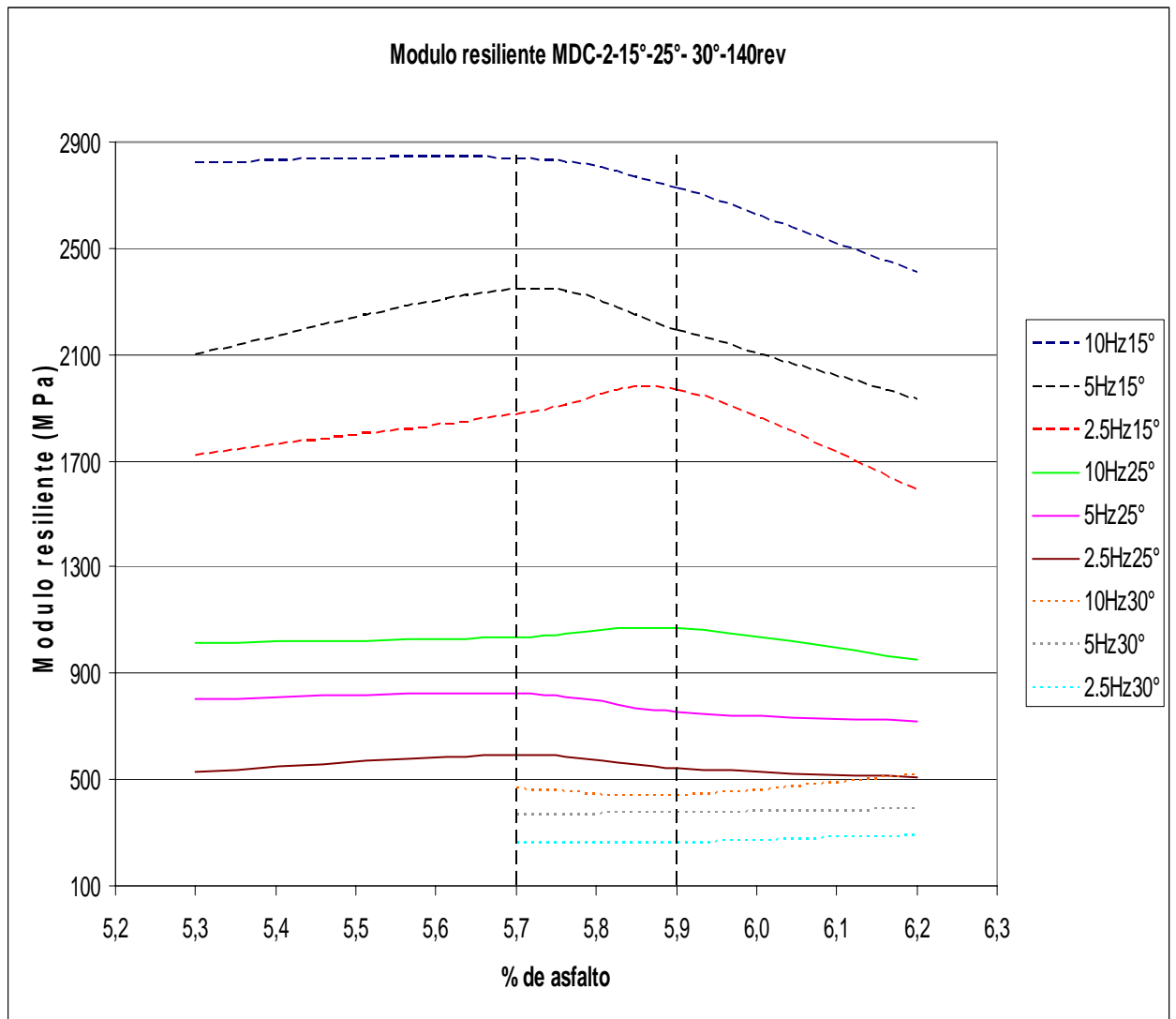


Figura 96: Modulo resiliente 140 giros 15°-25°-30°

Como se puede observar en la Figura 96, tiene menos homogéneo al encontrado en las briquetas compactadas con 115 giros, donde se tenía un porcentaje de asfalto donde los módulos resilientes presentan valores mínimos, en el caso de las briquetas compactadas a 140 giros el comportamiento de los módulos con respecto a la temperatura y frecuencia no se puede generalizar ya que para

temperaturas bajas se tiene un máximo notable y para temperaturas altas continua con la tendencia, menos definida, de las briquetas compactadas con 115 giros.

Si se generaliza se puede concluir que los valores de módulos resiliente mas altos se encuentran en porcentaje de asfalto de 5.9% que coincide con el porcentaje optimo encontrado por Concescol S.A.

En comparación con los módulos encontrados para las briquetas compactadas con martillo marshall, nuevamente se tiene un decremento de aproximadamente 70% en los valores de módulos (sin importar la temperatura y la frecuencia este comportamiento es constante), lo cual refleja la poca densidad alcanzada por las briquetas compactadas en el compactador giratorio.

Nuevamente la temperatura juega un papel muy importante en los resultados, haciéndose evidente un descenso en los módulos con aumento de la temperatura.

Relacionando temperatura y frecuencia, la Figura 86 muestra que para 15° la diferencia entre 10Hz y 2.5Hz es en promedio de 34%, para 25° es de 48% y para 35° es del 55% mostrando nuevamente, pero en menor magnitud, que para temperaturas mayores la frecuencia toma mayor relevancia en los valores de módulos resilientes.

6.2.1.3.1. MR – Densidad Bulk 140 giros

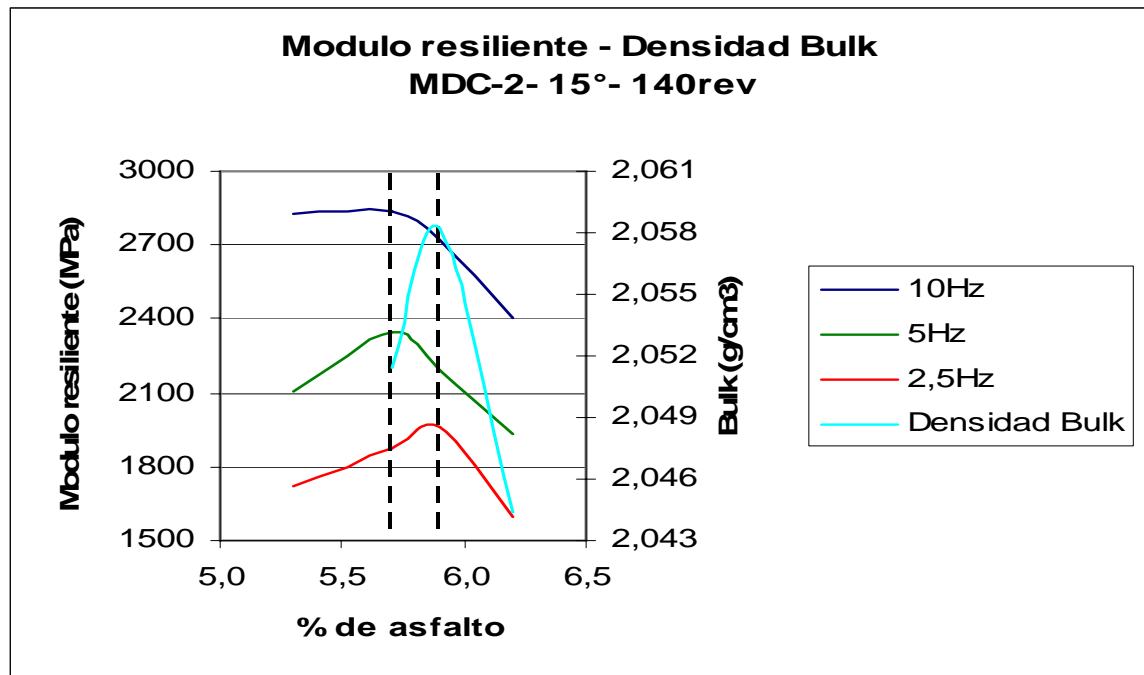


Figura 97: Modulo resiliente 140 giros 15° - Densidad Bulk

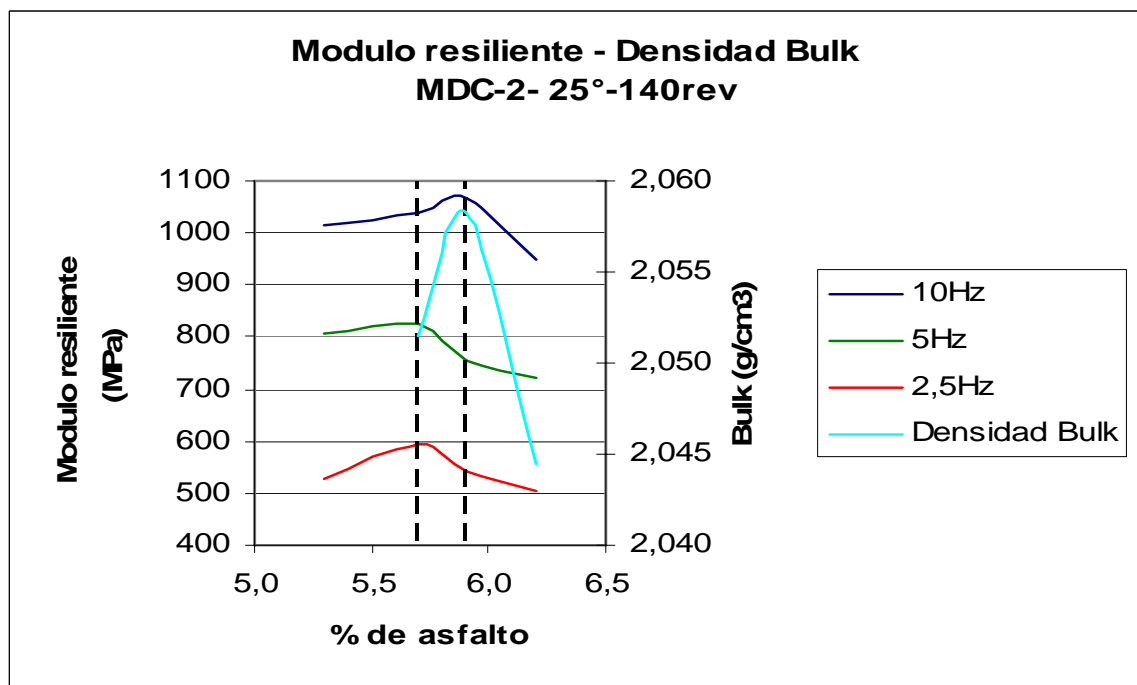


Figura 98: Modulo resiliente 140 giros 25° - Densidad Bulk

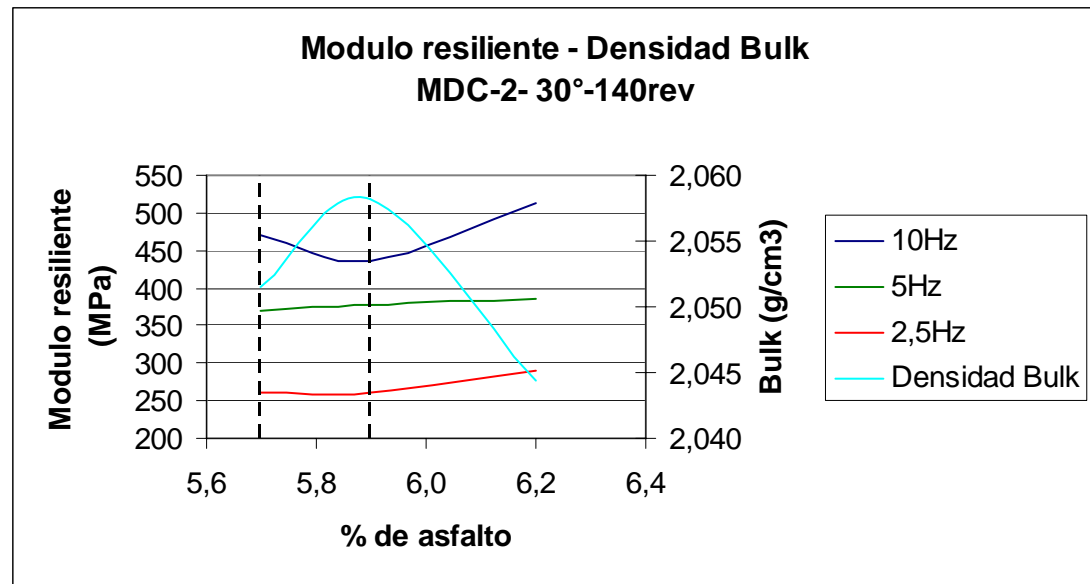


Figura 99: Modulo resiliente 140 giros 30° - Densidad Bulk

La densidad bulk para este caso de briquetas compactadas a 140 giros presenta un mejor comportamiento en comparación con lo encontrado para briquetas compactadas con 115 giros ya que el para el valor de porcentaje de asfalto óptimo de 5,9 % se tiene los mejores valores de módulos resilientes y la mayor densificación (ver Figura 97, Figura 98 y Figura 99).

Por otro lado, en general, la densidad obtenida por el compactador giratorio es menor en valores que llegan hasta un 20% a las registradas en las briquetas compactadas con martillo Marshall.

6.2.1.3.2. MR – Estabilidad 140 giros

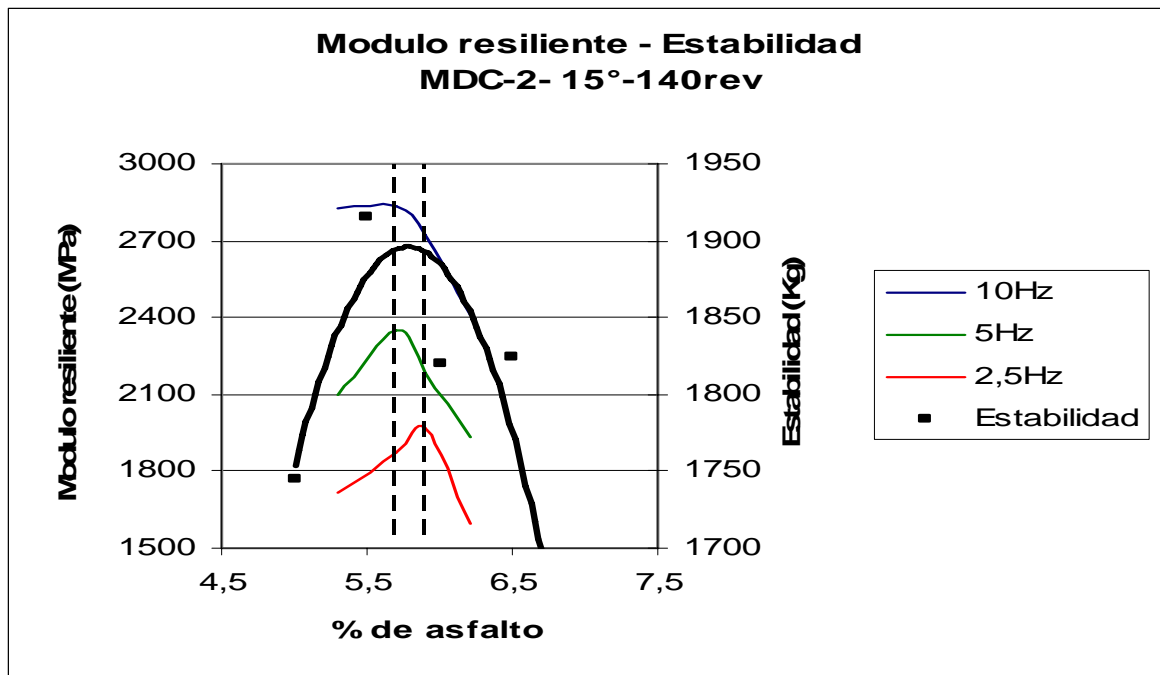


Figura 100: Modulo resiliente 140 giros 25° - Estabilidad

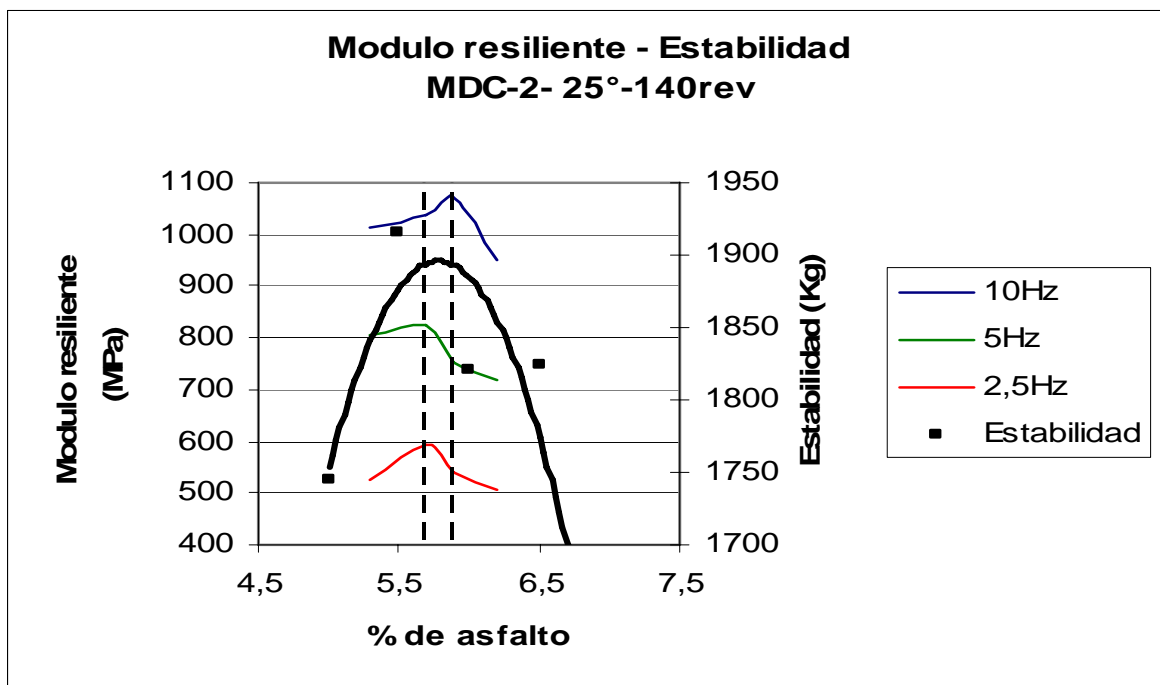


Figura 101: Modulo resiliente 140 giros 30° - Estabilidad

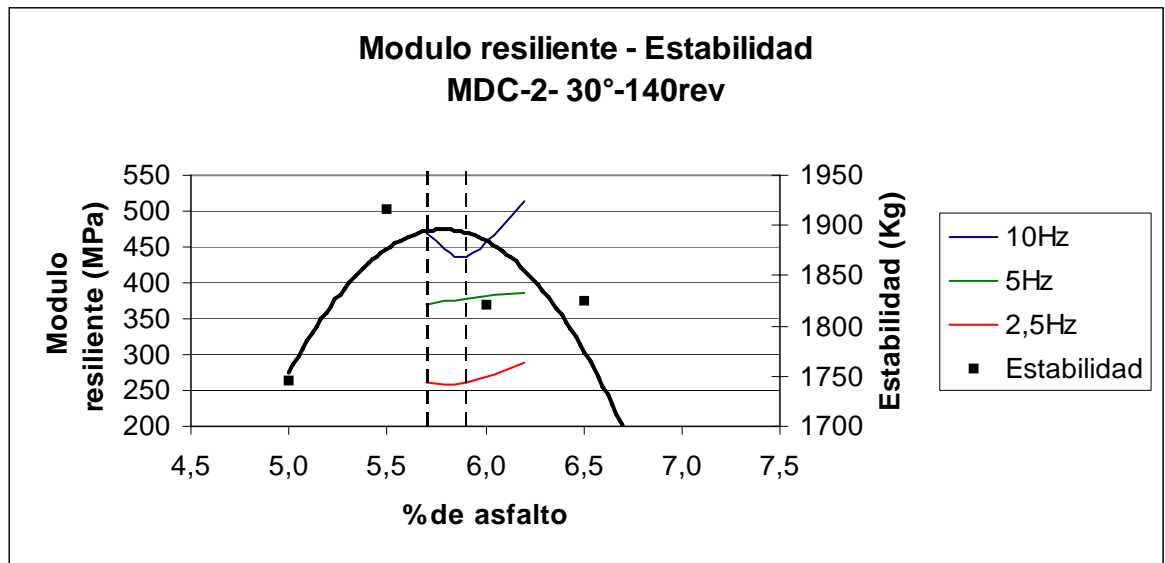


Figura 102: Modulo resiliente 140 giros 30° - Estabilidad

La estabilidad con relación al los módulos encontrados, presenta nuevamente valores por encima de lo exigido por la especificación así que se puede tomar el porcentaje de asfalto que muestre mejor desempeño en módulos y estar seguro que no se esta sacrificando la parte de estabilidad.

6.2.1.3.3. MR – Flujo 140 giros

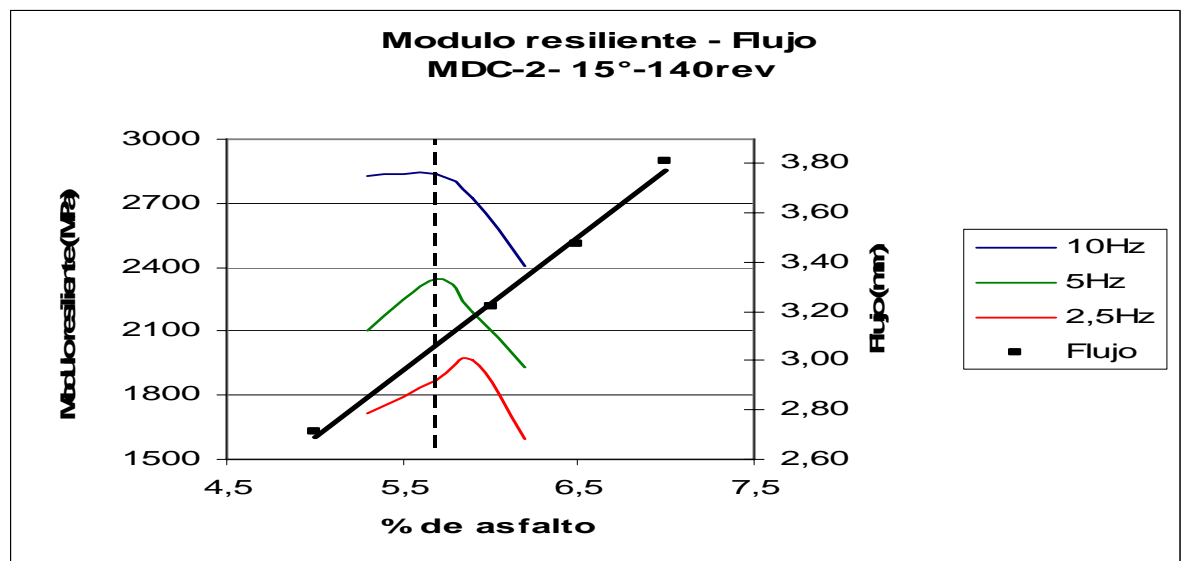


Figura 103: Modulo resiliente 140 giros 15° - Flujo

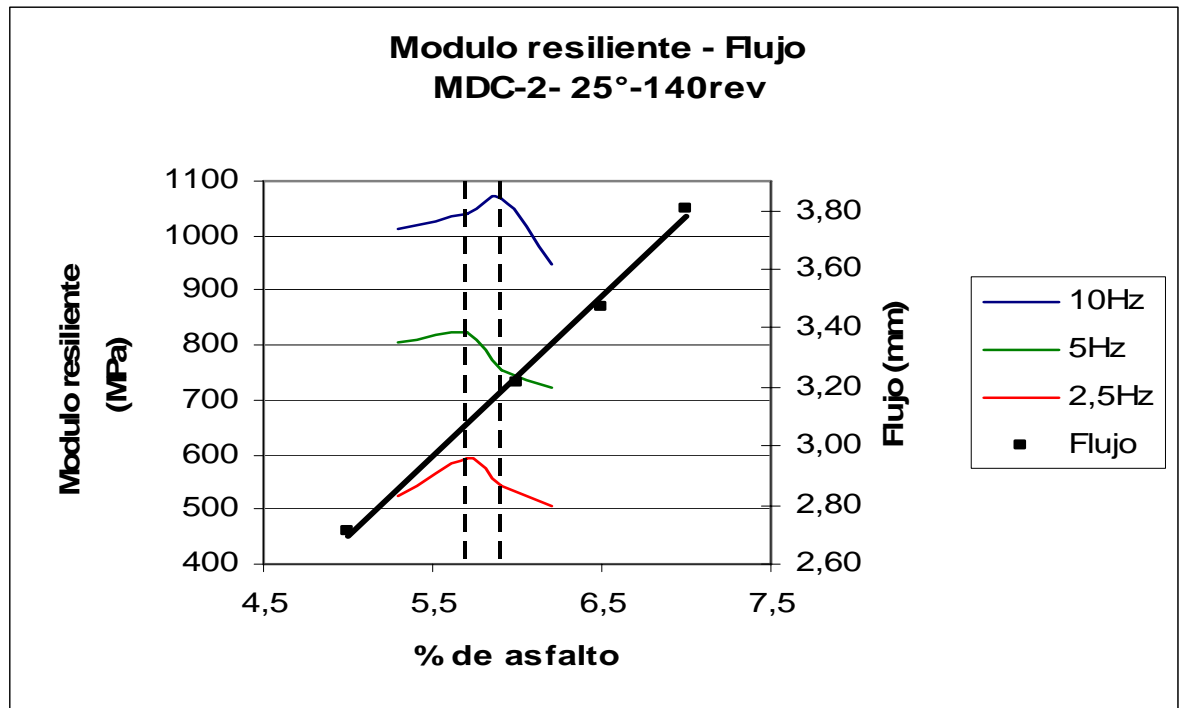


Figura 104: Modulo resiliente 140 giros 25° - Flujo

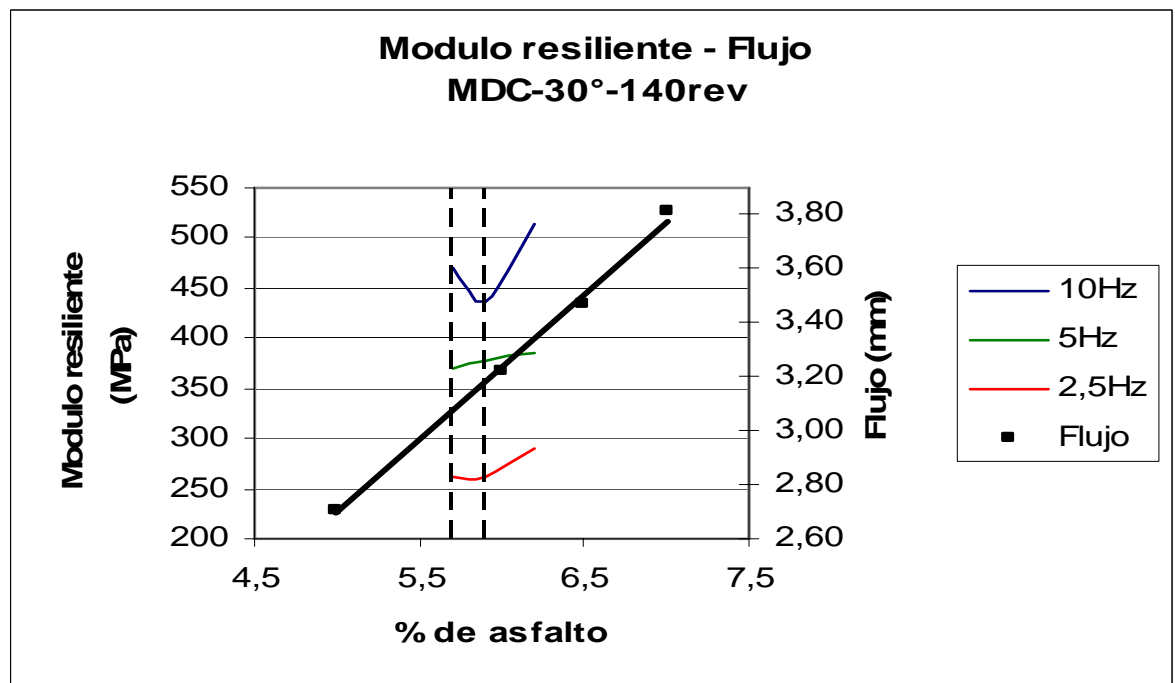


Figura 105: Modulo resiliente 140 giros 30° - Flujo

Los valores de flujo, como se puede observar en la Figura 103, Figura 104 y Figura 105, tienen valores aceptables dentro de los determinados por las especificaciones, si se toma 5.9% como el contenido de asfalto que muestra mejor comportamiento en cuanto a módulos se observa en las figuras que el flujo cumple satisfactoriamente, nuevamente se denota un incremento en los valores de MR para porcentajes altos de asfalto pero se debe tener en cuenta que para esos valores el flujo incrementa a valores no admisibles.

6.2.1.4. COMPACTADOR GIRATORIO 160 GIROS

Figura 106: Modulo resiliente 160giros 15^o-25^o-30^o

La Figura 106, muestra un comportamiento bastante homogéneo de forma convexa, en especial en temperaturas bajas - medias y contrario al encontrado en las briquetas compactadas con 115 giros, donde se tenía un comportamiento cóncavo de los módulos resilientes, se puede generalizar en el caso de las briquetas compactadas a 160 giros el comportamiento de los módulos con respecto a la temperatura y frecuencia ya que se tiene un máximo notable y para temperaturas todas las temperaturas.

Si se generaliza se puede concluir que los valores de módulos resiliente mas altos se encuentran, nuevamente al igual que en las briquetas compactadas a 140 giros, en un porcentaje de asfalto de 5.9% que coincide con el porcentaje optimo encontrado por Concretos S.A.

Contrario a lo esperado se puede ver que la diferencia de los valores de módulos con respecto a el numero de giros no es significativamente mayor a mayor numero de giros, se mantienen diferencias de aproximadamente 70% con respecto a los valores encontrados para briquetas compactadas con martillo Marshall (sin importar la temperatura y la frecuencia este comportamiento es

constante), lo cual refleja la poca densidad alcanzada por las briquetas compactadas en el compactador giratorio y el bajo aumento de la densidad con respecto a el numero de giros.

Es evidente nuevamente un descenso en los módulos con aumento de la temperatura.

6.2.1.4.1. MR – Densidad Bulk 160 giros

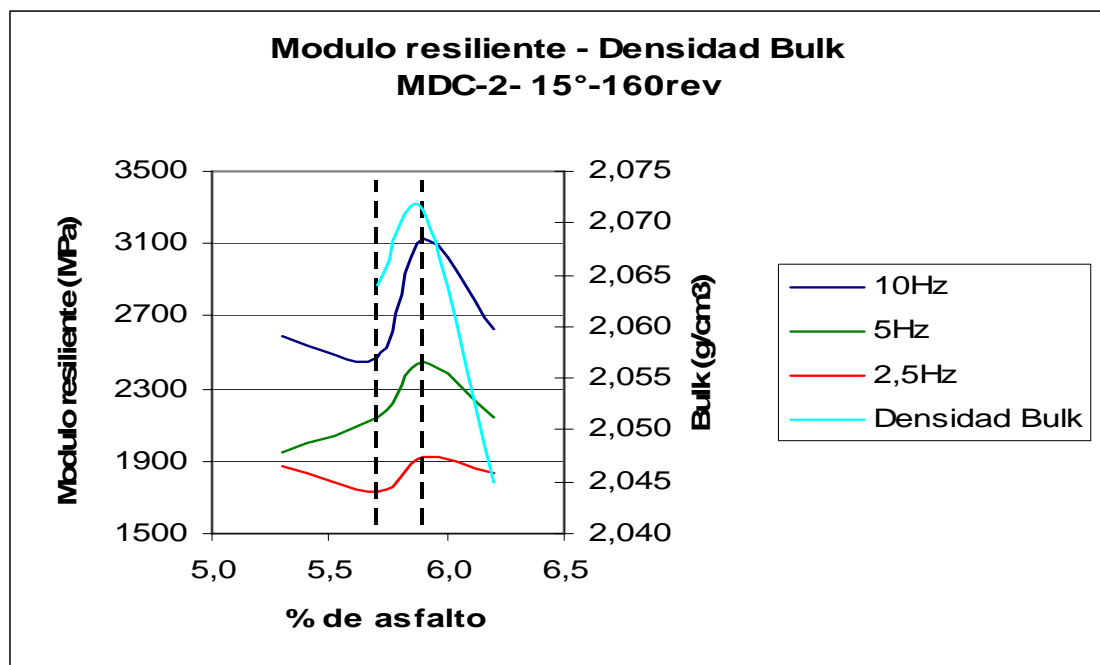


Figura 107: Modulo resiliente 160giros 15° - Densidad Bulk

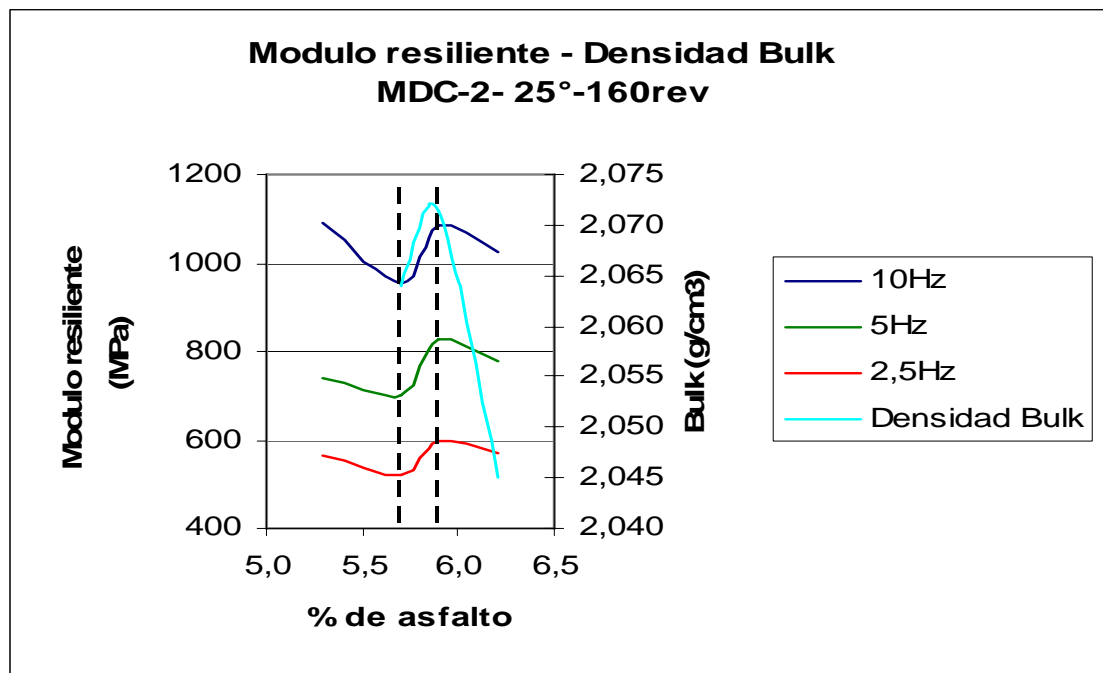


Figura 108: Modulo resiliente 160giros 25° - Densidad Bulk

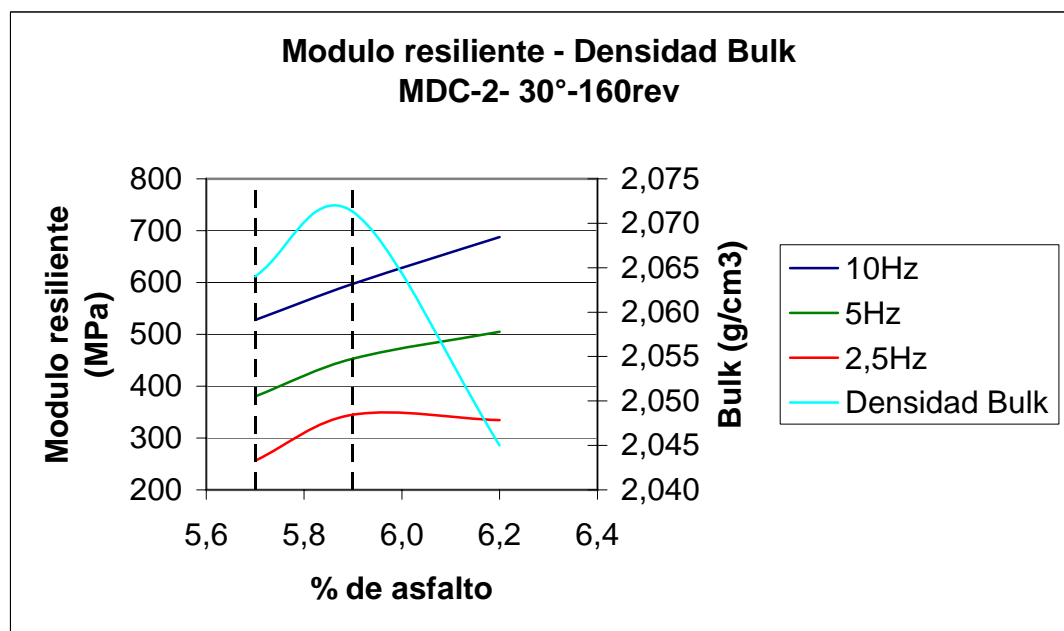


Figura 109: Modulo resiliente 160giros 30° - Densidad Bulk

La densidad bulk para este caso de briquetas compactadas a 160 giros presenta un comportamiento similar al encontrado para briquetas compactadas con 140

donde para el valor de porcentaje de asfalto óptimo de 5.9%, coincidiendo con el porcentaje encontrado por Concescol S.A., se tiene los mejores valores de módulos resilientes y mayores densificaciones

Por otro lado, nuevamente es evidente que las densidades obtenida por el compactador giratorio son menores en valores que llegan hasta un 20% a las registradas en las briquetas compactadas con martillo marshall.

A diferencia de lo encontrado para las briquetas compactadas con martillo marshall, donde se tenía mejor comportamiento del modulo en porcentajes menores a los encontrados como óptimos, las mezclas compactadas con 160 giros muestran un valor máximo de MR definido en un porcentaje cercano al 5.9% coincidiendo con el porcentaje encontrado por Concescol S.A. (ver Figura 107, Figura 108 y Figura 109)

6.2.1.4.2. MR – Estabilidad 160 giros

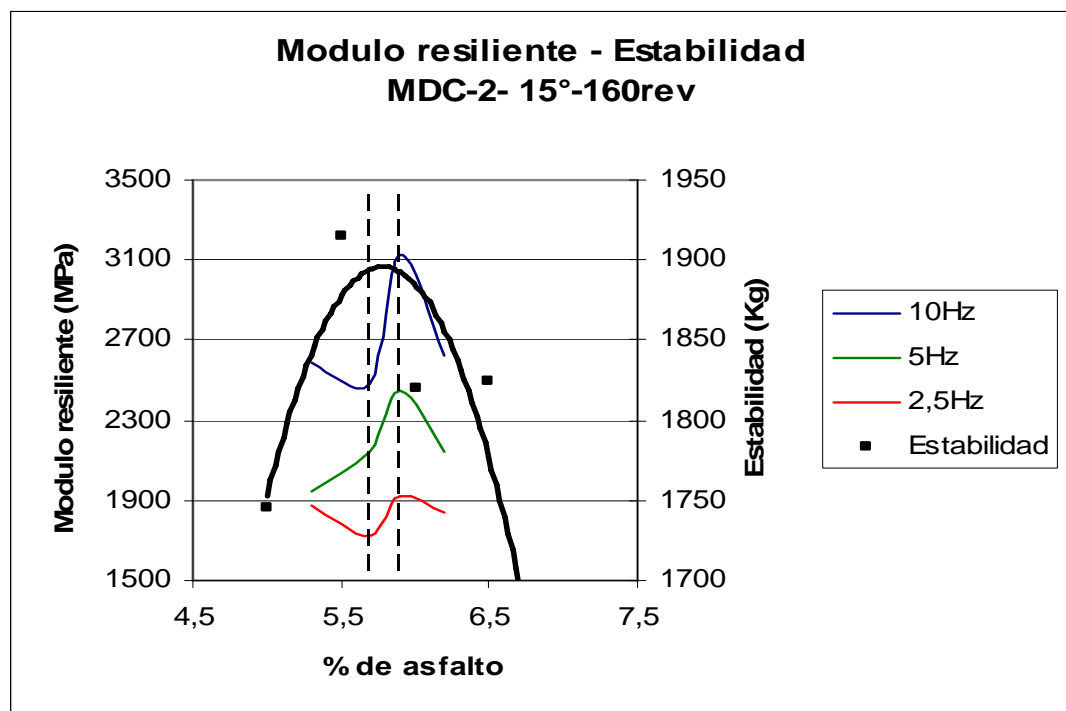


Figura 110: Modulo resiliente 160giros 15° - Estabilidad

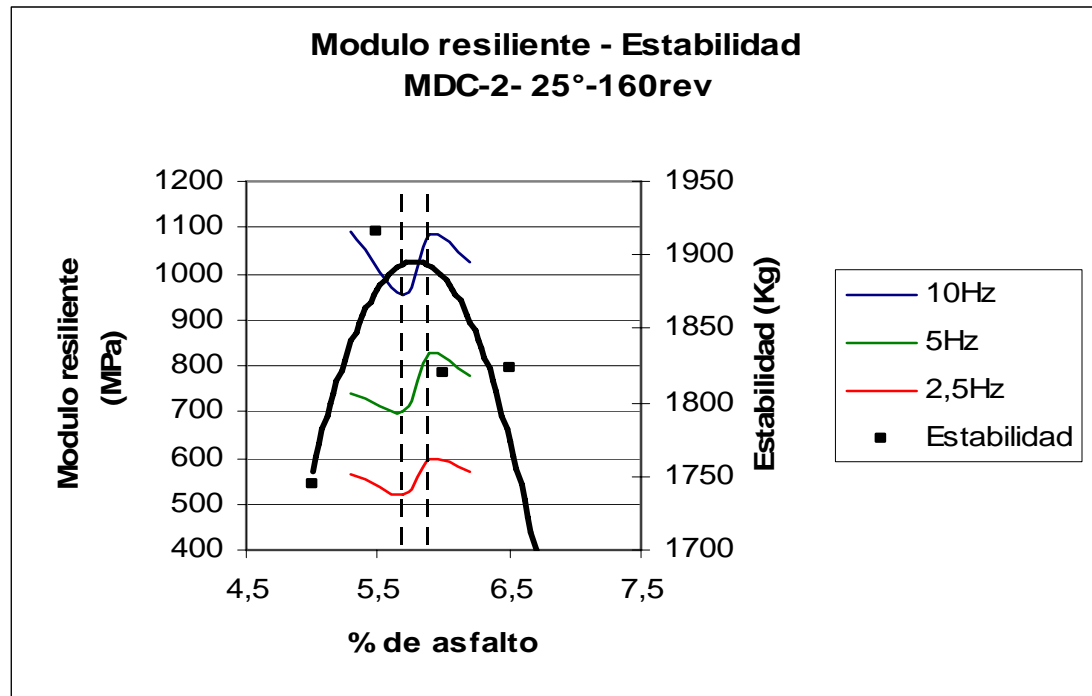


Figura 111: Modulo resiliente 160giros 25° - Estabilidad

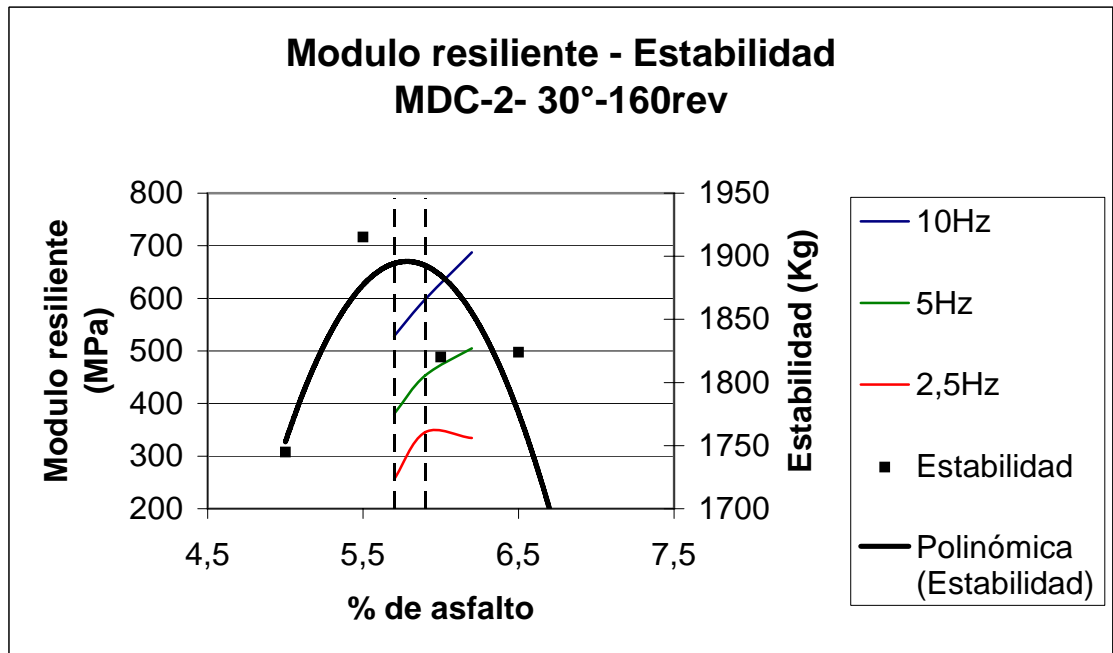


Figura 112: Modulo resiliente 160giros 30° - Estabilidad

La estabilidad como se observa en las Figura 110, Figura 111 y Figura 112 muestra el mismo comportamiento al presentado por los especímenes

compactados a 140 giros; donde para el porcentaje optimo de asfalto obtenido en el laboratorio de la PUJ (5.7%) se encuentran valores máximos de estabilidad y en promedio 3% menores de módulos, en contraste en el optimo obtenido por Concescol S.A. encuentra valores máximos de MR pero menores de estabilidad, sin estar por debajo a los exigidos en las especificaciones.

6.2.1.4.3. MR – Flujo 160 giros

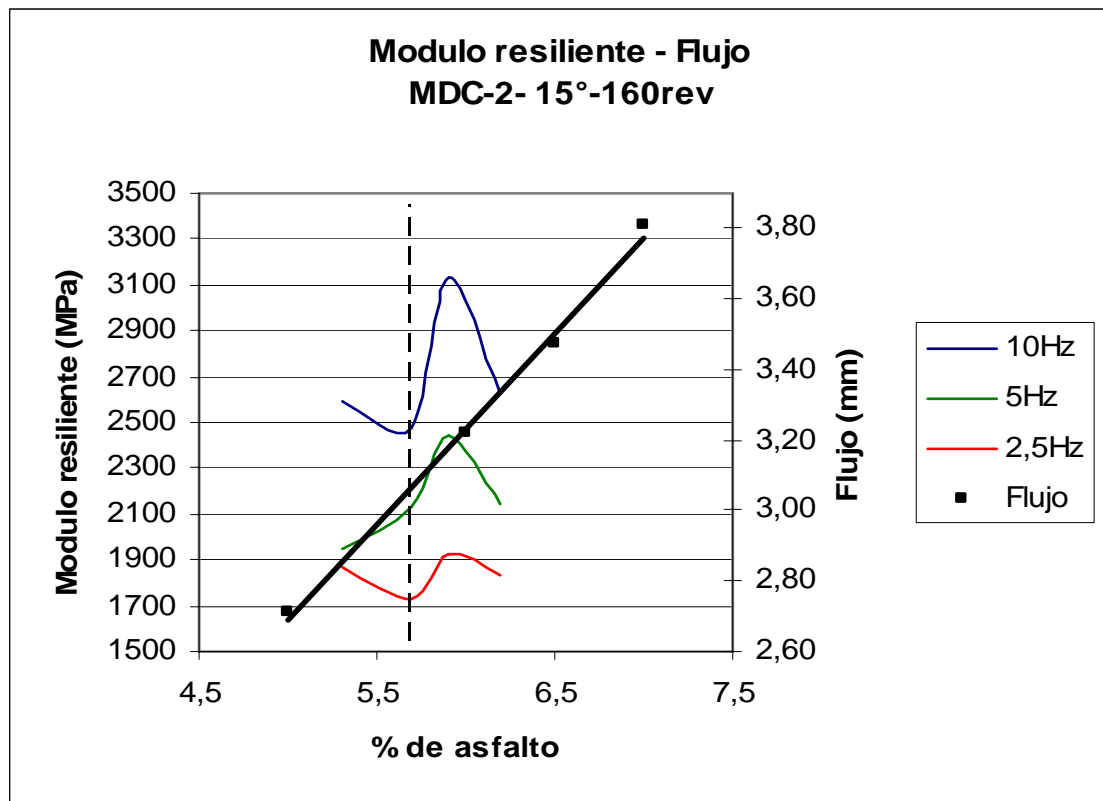


Figura 113: Modulo resiliente 160giros 15° - Flujo

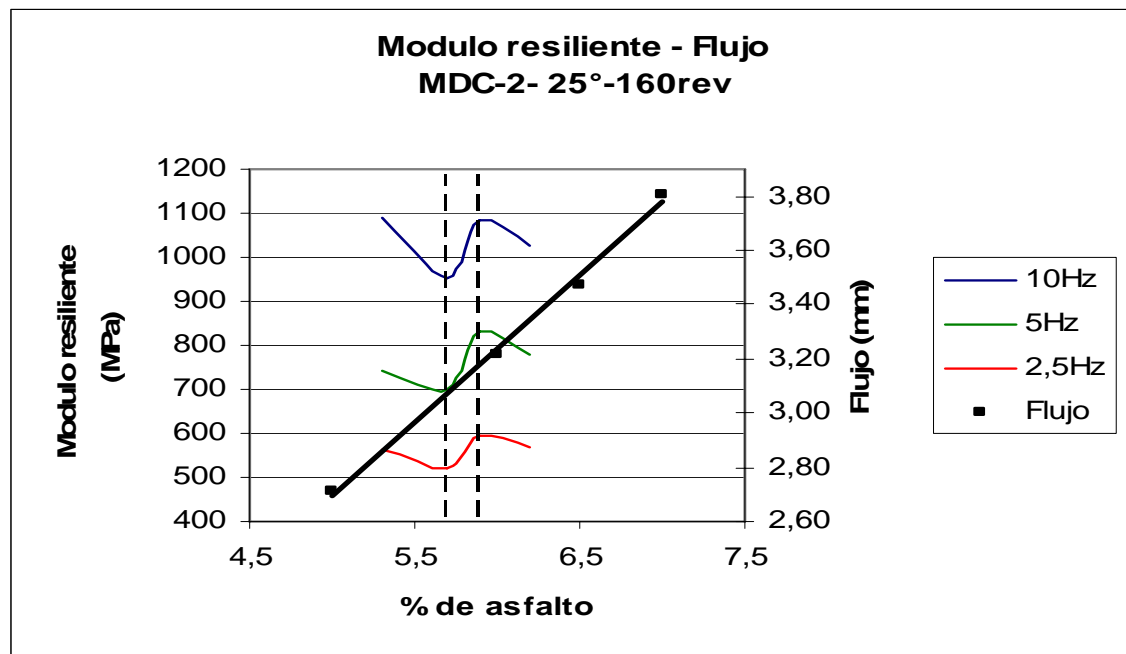


Figura 114: Modulo resiliente 160giros 25° - Flujo

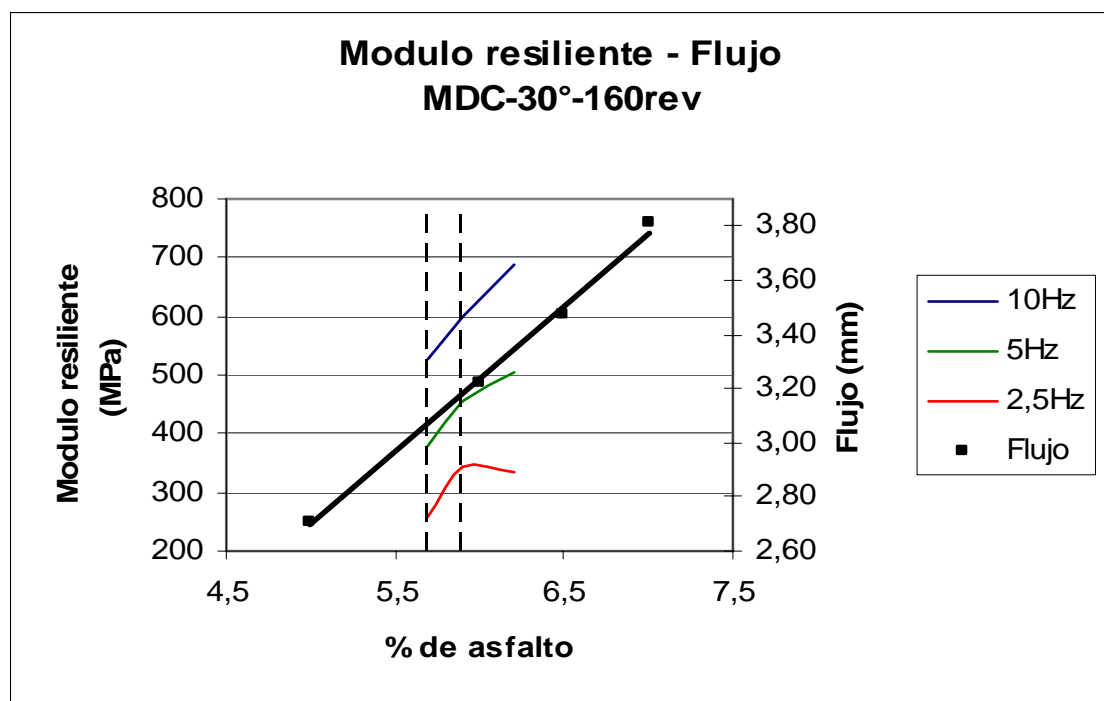


Figura 115: Modulo resiliente 160giros 30° - Flujo

Si se toma 5.9% como el contenido de asfalto que muestra mejor comportamiento en cuanto a módulos se observa en las figuras que el flujo

cumple satisfactoriamente, se denota un decremento en los valores de MR para porcentajes altos de asfalto

6.2.2. ANÁLISIS COMPARATIVO DE ENSAYO

6.2.2.1. SEGÚN MÉTODO DE COMPACTACIÓN

El comportamiento de las mezclas, con respecto a los módulos, estuvo claramente influenciado por el método de compactación utilizado y por lo tanto por la energía de compactación aplicada, lo cual es evidente si se tiene en cuenta que al aplicar una mayor energía de compactación, la mezcla logra un mejor acomodamiento de las partículas logrando una mejor resistencia a las cargas aplicadas de forma repetida (tráfico vehicular), mejor durabilidad y una vida útil más prolongada al tener mezclas más impermeables.

Se puede observar claramente como las mezclas compactadas con el martillo marshall obtienen valores de módulos mayores hasta en un 70% a los encontrados en briquetas compactadas con compactador giratorio aunque, como era de esperarse, la diferencia decrece (no significativamente) al aplicar más giros en la compactación ya que a mayor cantidad de giros la mezcla logra una mayor homogeneidad y por en consecuencia una mejor compactación.

Las briquetas compactadas con compactador giratorio muestran densidades menores hasta en un 20% a las encontradas en las briquetas compactadas con martillo marshall; haciendo evidente una menor energía de compactación en el caso del compactador giratorio. Lo cual se ve ratificado en la consecución de módulos significativamente menores en las briquetas compactadas con el método de amasado.

La tendencia del modulo en las briquetas compactadas a 115 giros muestra una forma cóncava con un mínimo definido, en contraste las briquetas compactadas a 160 giros muestra una tendencia convexa con un máximo bien definido.

Las densidades obtenidas en el compactador giratorio para los diferentes números de giros 115-140-160 aunque muestran un incremento con el numero de revoluciones, este aumento no es el esperado ya que entre 115 y 160 giros se tiene un aumento densidad no mayor al 3%, así mismo, el valor del modulo resiliente tampoco tiene un incremento significativo con el numero de giros.

Teniendo en cuenta lo mencionado en el párrafo anterior se puede decir que los módulos para las briquetas compactadas con el compactador giratorio, presentan bajas variaciones de módulo al variar el porcentaje de asfalto, lo cual puede interpretarse como un buen desempeño de mezclas compactadas por este método. Sin embargo el parámetro de módulo resiliente no presenta una propiedad para evaluar en el momento del diseño de la mezcla, sobre todo si se tiene en cuenta que el modulo alcanzado es prácticamente el mismo en los diferentes porcentajes de asfalto evaluados.

En las mezclas compactadas con martillo Marshall presentan un comportamiento homogéneo, teniendo módulos altos para porcentajes de asfalto bajos, al aumentar el porcentaje de asfalto se tiene un decremento significativo del valor del modulo encontrando un punto mas bajo y luego continuando con un leve aumento. Confirmando así que las mezclas con menores contenidos de asfalto son más rígidas que las mezclas con contenidos de asfalto altos. Contrario a lo encontrado en las briquetas compactada con compactador giratorio conde los valores mínimos y máximos

de módulos variaron con respecto a los giros que se aplicaban en la compactación.

Los valores óptimos de porcentaje de asfalto, de Concescol S.A. y el laboratorio de la PUJ, encontrados con el método Marshall, muestran valores de módulos similares, cabe incluir que el valor de 5.7% encontrado en el laboratorio de la PUJ presenta valores de módulos en promedio mayores en un 8% a los que se tienen con el porcentaje de asfalto de 5.9% de la empresa Concescol S.A.

6.2.2.2. SEGÚN FRECUENCIA DE ENSAYO

En los ensayos de tensión indirecta la variación de la frecuencia, representa un cambio significativo en los resultados del modulo resiliente, teniendo que a mayor frecuencia de aplicación de carga se tiene en correspondencia mayor respuesta del modulo resiliente, al aplicar cargas repetidamente en tiempos mas cortos las mezcla se comportan de manera adecuada soportando las cargas con deformaciones aceptables.

Las mezclas se comportan de la manera esperada, al aumentar las frecuencias de aplicación de carga, el modulo resiliente encontrado es mayor.

Es de notar la relación que se tiene entre la frecuencia y la temperatura. Se observa que para mayores temperaturas la incidencia de la frecuencia, en el valor del modulo, se hace mas evidente. Lo cual indica que en climas cálidos la frecuencia vehicular juega un papel más relevante en el performace de la carpeta asfáltica.

6.2.2.3. SEGÚN TEMPERATURA DE ENSAYO

Las condiciones climáticas a las que va a ser expuesta la mezcla a lo largo de su vida útil se simulan a través de las temperaturas que se manejan en el ensayo. Es evidente que los resultados del ensayo de tensión indirecta obtenidos por la mezcla al estar expuesta a temperaturas más bajas presentan menores deformaciones y por lo tanto mayores valores de módulo. También se puede observar que la variación de los módulos es menor a mayores temperaturas mostrando un comportamiento más homogéneo en temperaturas mayores a 30°.

6.2.2.4. SEGÚN DENSIDAD BULK, ESTABILIDAD Y FLUJO

Relacionando los módulos resilientes con la densidad bulk se puede concluir que los valores máximos de módulos corresponden a valores muy bajos de densidad, lo cual puede tener serias consecuencias en el performance de la mezcla si se decide darle mayor relevancia al módulo que a las densidades.

La estabilidad muestra valores superiores a 1750 kg para el porcentaje de asfalto (5.4%) que muestran mejor comportamiento frente a módulos, de manera similar el flujo tiene un valor de 2.7mm para dicho porcentaje de asfalto; los dos valores se encuentran dentro de un rango satisfactorio, por un lado la estabilidad se encuentra 80% por encima de lo establecido por la especificación para el caso Colombiano (<900kg) y el flujo presenta un valor medio dentro de la especificación (2-3.5mm), satisfactorio para garantizar un buen desempeño de la mezcla.

De lo anterior se puede concluir que porcentajes menores de asfalto presentan un mejor comportamiento frente a los módulos sin sacrificar aspectos del diseño tradicional como la estabilidad y el flujo para el caso de briquetas compactadas con martillo Marshall. Sin embargo se debe tener

especial cuidado con la densificación que alcanzan estas mezclas con contenidos de asfalto bajos ya que puede traer problemas de otro tipo como envejecimiento prematuro de la capa, oxidación y disgregación de los materiales y baja resistencia a la fatiga y al la deformación permanente, entre otros.

6.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE

6.3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

6.3.1.1. MARTILLO MARSHALL 75 GOLPES

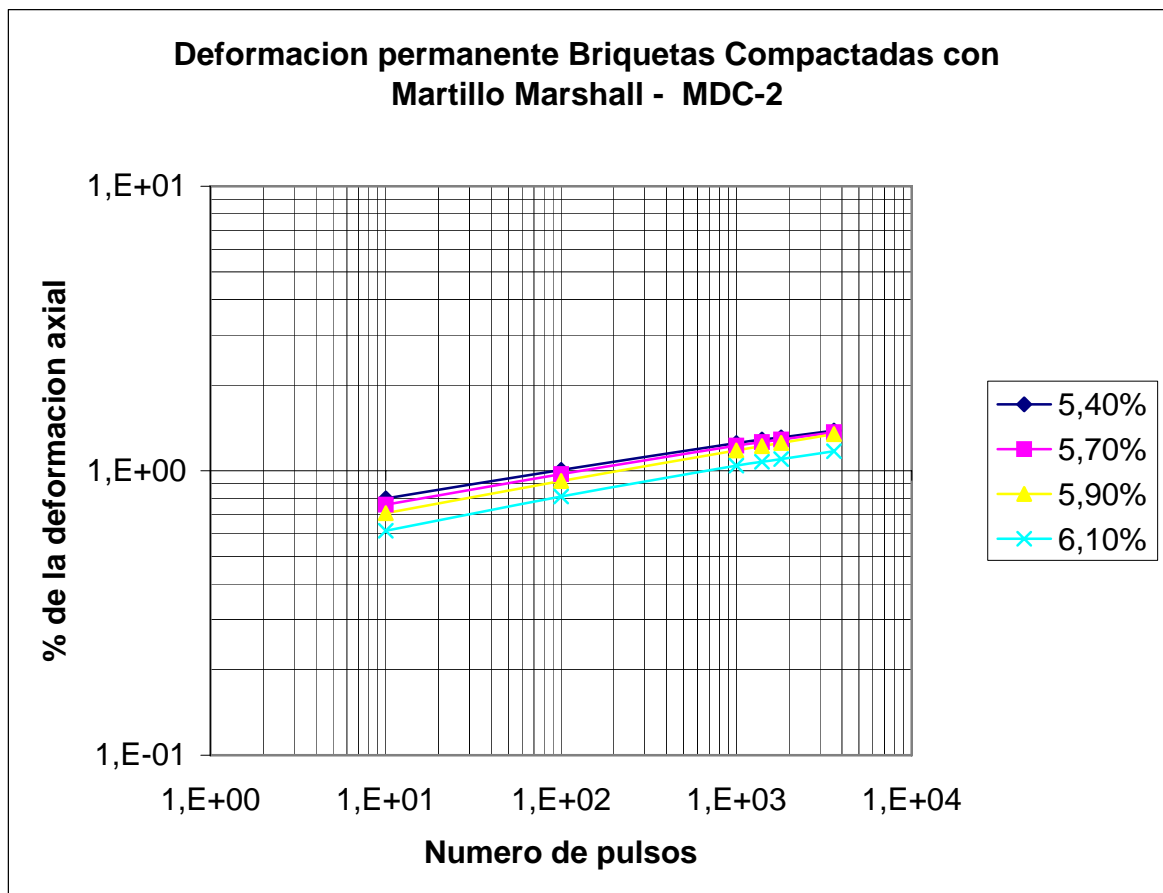


Figura 116: Deformación permanente 75 golpes

El comportamiento de la deformación permanente con respecto al porcentaje de asfalto y el número de pulsos es bastante homogéneo; se tiene que la rata de acumulación de deformaciones, definida por la pendiente de la recta, se mantiene constante para los diferentes porcentajes de asfalto.

Como se observa en la Figura 116 existe una relación inversamente proporcional entre el porcentaje de asfalto y el porcentaje de acumulación de deformaciones. Diferente a lo esperado tradicionalmente y debido posiblemente a la presencia de agregado de naturaleza porosa.

Para los porcentajes óptimos de diseño encontrados, tanto en Concescol S.A. como en el laboratorio de la PUJ. Los valores de acumulación de deformación para 3600 pulsos se encuentra un poco por encima de los especificados en la EN12697-24E que regula lo referente a las deformación es permanentes y la cual especifica como limite superior, una acumulación de deformaciones menor al 1% a los 3600 pulsos. Esto se puede estar dando por lo anteriormente mencionado, y teniendo en cuenta lo anterior un diseño de mezcla teniendo en cuenta este aspecto implicaría un porcentaje de asfalto mayor a 6.2 debido muy posiblemente a agregado de características porosas con mayores sollicitaciones de asfalto.

6.3.1.2. ANALISIS DEFORMACIÓN PERMANENTE – DENSIDAD BULK

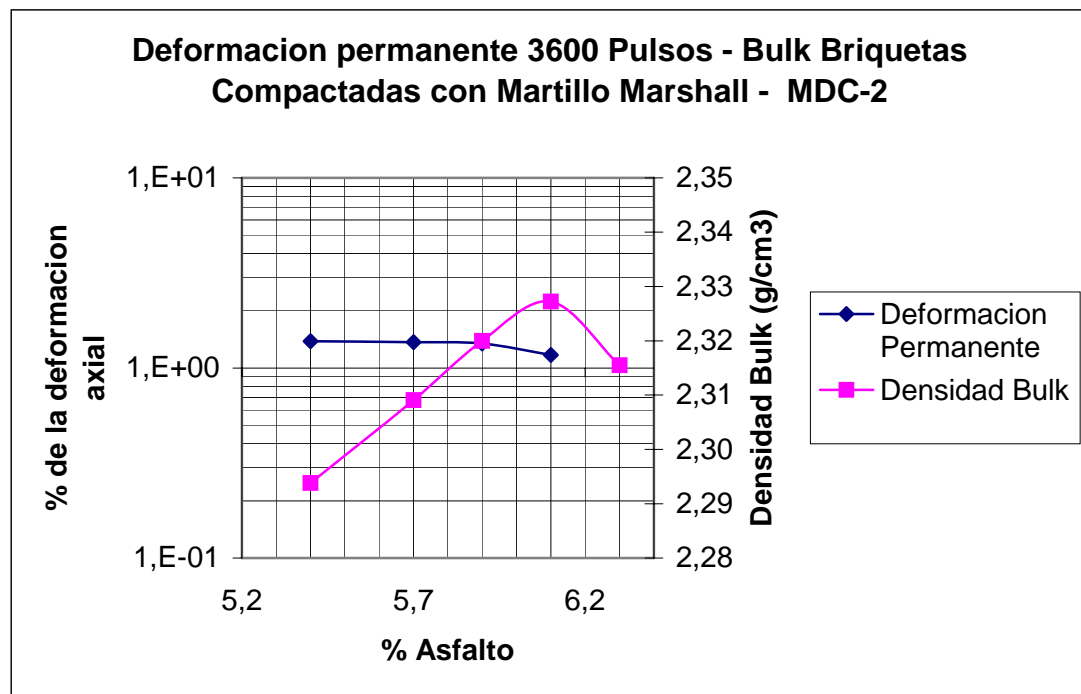


Figura 117: Deformación permanente 3600 Pulsos - Densidad Bulk 75 golpes

En la Figura 117 se observa que para los valores de porcentaje de asfalto de diseño se tiene una densidad bulk de 2.31 para el caso del optimo de la PUJ y de 2.32 para le caso del optimo de Concescol S.A. pero se tiene un mejor comportamiento con respecto al porcentaje de acumulación de deformaciones con 5.9% presentando menores deformaciones a 3600 pulsos. Sin embarco cabe anotar que los dos casos se tienen valores un poco mayores a los aceptables de porcentaje de deformación plástica.

Se observa también en las figuras que para porcentajes menores de asfalto se tienen mayores porcentajes de acumulación de deformaciones, por lo cual un menor porcentaje de asfalto no tendría cabida en el momento de determinar el porcentaje de diseño al tener este comportamiento con respecto al la deformación sumado a la baja densidad lograda en estos contenidos de asfalto

6.3.1.3. ANÁLISIS DEFORMACIÓN PERMANENTE – ESTABILIDAD

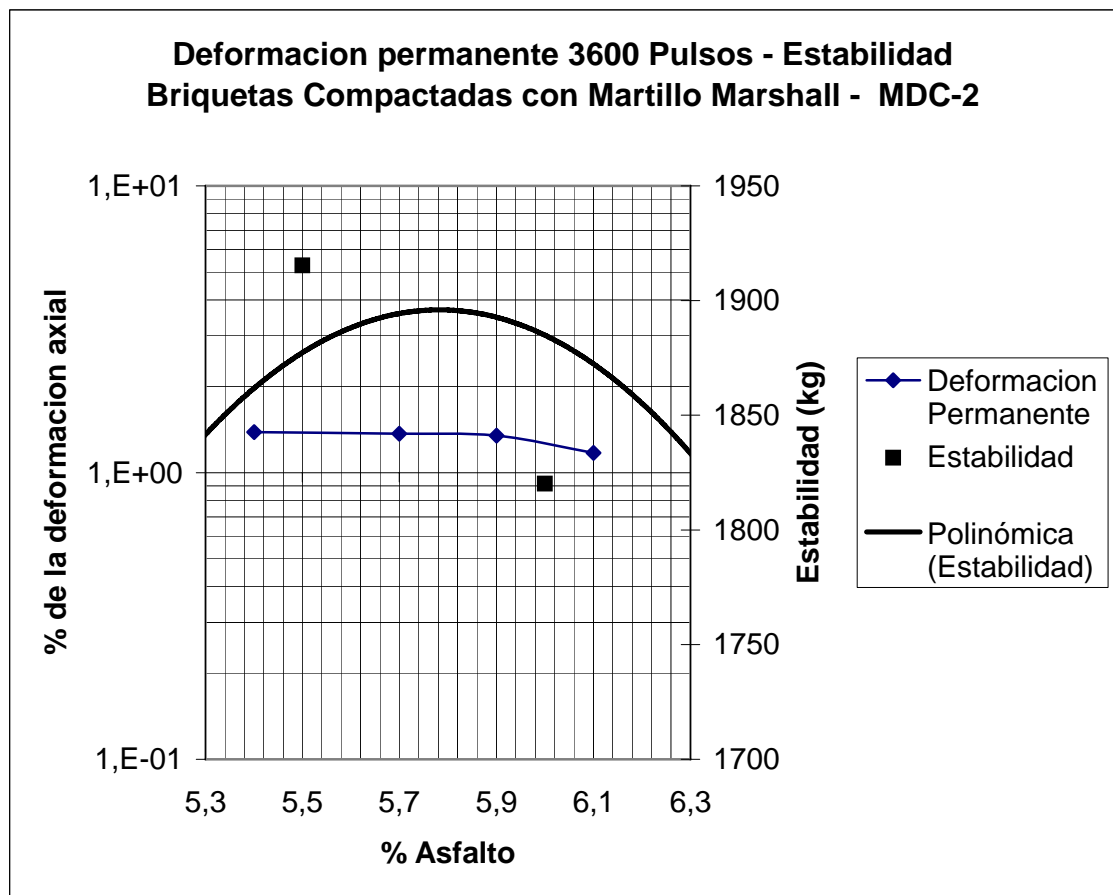


Figura 118: Deformación permanente 3600 pulsos – Estabilidad – 75 golpes

En la Figura 118 relacionando la estabilidad y el porcentaje de acumulación de deformaciones, se tiene que sin importar el porcentaje de asfalto la estabilidad cumple satisfactoriamente lo exigido por las especificaciones así que para la consecución de un porcentaje óptimo basados en la deformación permanente y la estabilidad, esta ultima no juega un papel trascendente el la escogencia de este valor.

Por otro lado se puede observar que porcentajes más altos presentan un decremento en el porcentaje de deformación plástica sacrificando en un porcentaje no elevado la estabilidad de la mezcla.

6.3.1.4. ANÁLISIS DEFORMACIÓN PERMANENTE – FLUJO

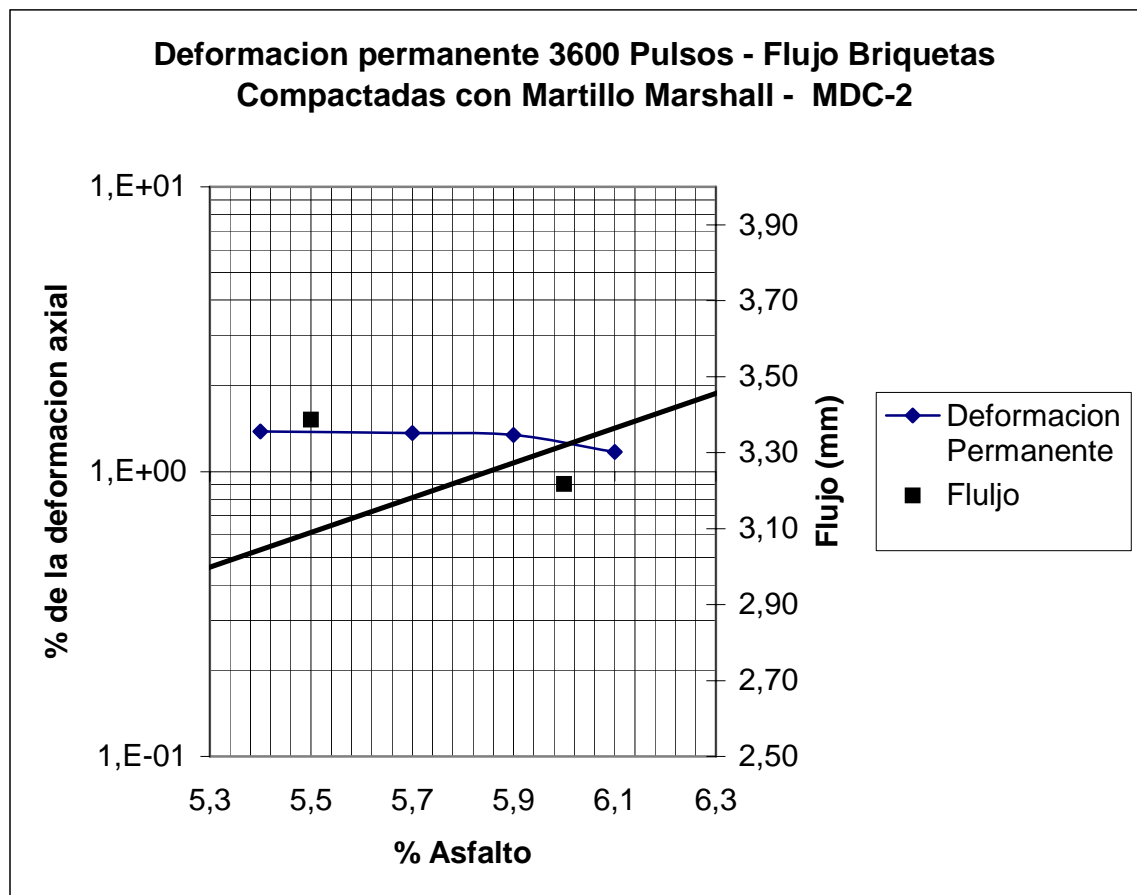


Figura 119: Deformación permanente 3600 pulsos – Flujo – 75 golpes

La Figura 119 muestra que para porcentajes de asfalto mayores a los óptimos encontrados, se tiene valores tanto de flujo como de acumulación del porcentaje de deformaciones que muestran un mejor desempeño con menores deformaciones y con flujos que encajan mejor dentro de lo exigido por la especificaron.

Para los 5.7% y 5.9% de porcentajes de asfalto óptimos para la PUJ y Concescol S.A. respectivamente, se tienen valores aceptables de flujo y un poco por encima de lo especificado para el caso de porcentaje de acumulación de deformaciones.

6.3.2. ANÁLISIS DEFORMACIÓN PERMANENTE – MODULOS RESILIENTES

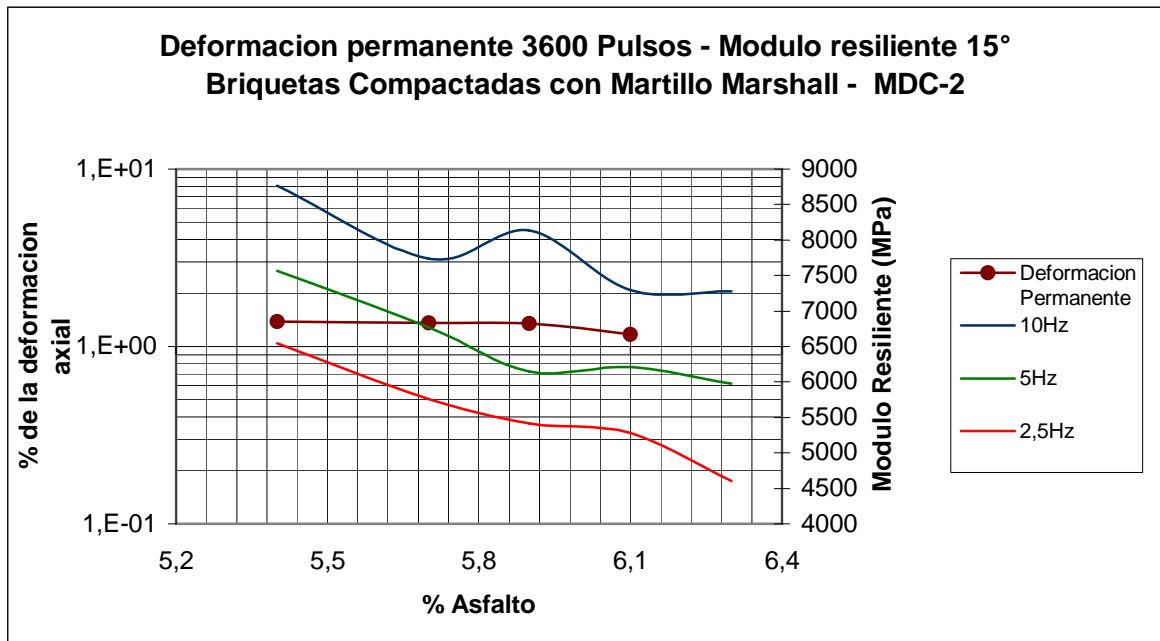


Figura 120: Deformación permanente 3600 pulsos – Modulo resiliente 15°

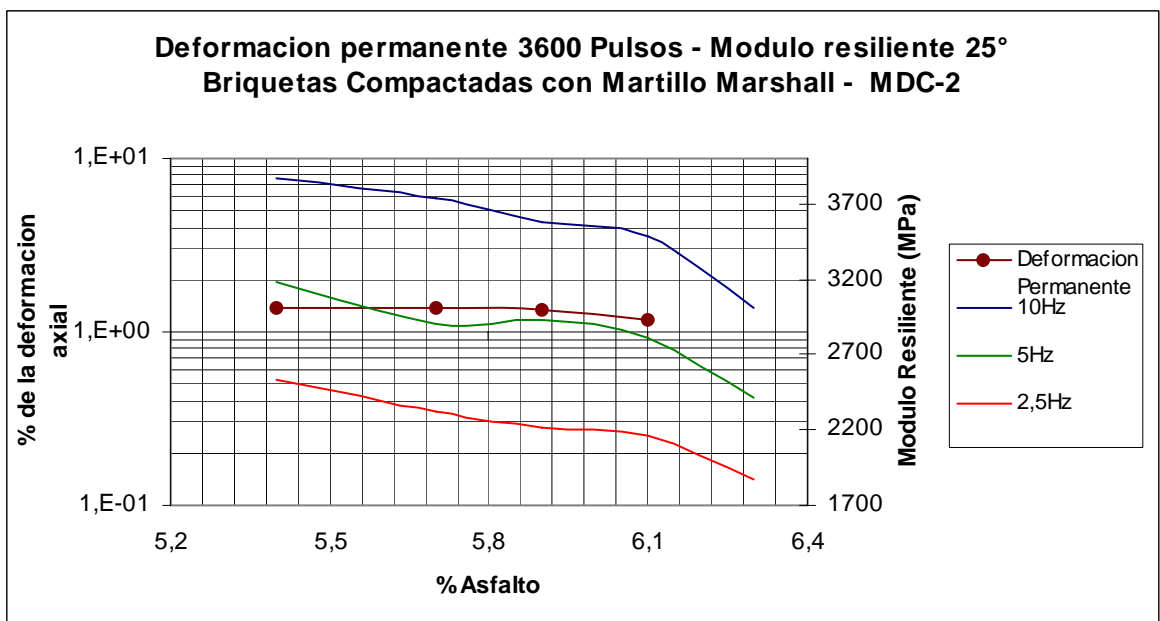


Figura 121: Deformación permanente 3600 pulsos – Modulo resiliente 25°

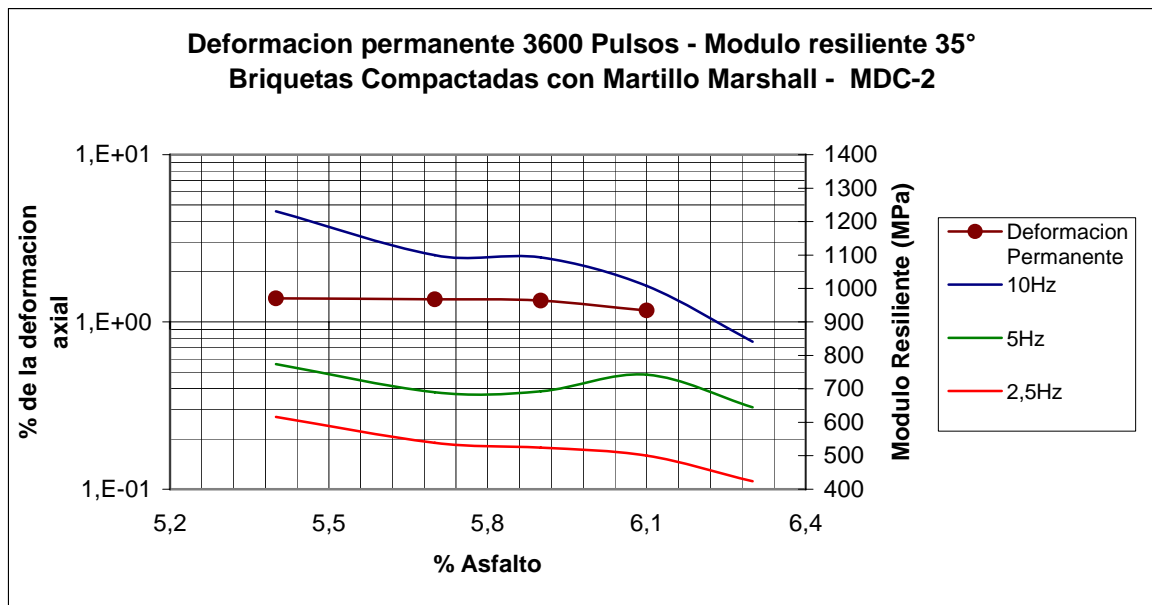


Figura 122: Deformación permanente 3600 pulsos – Modulo resiliente 35°

Teniendo en cuenta lo descrito en el numeral 6.2.2, donde se concluyó que para las briquetas compactadas con martillo Marshall los valores de porcentaje de asfalto que presentaban mejor comportamiento con respecto al módulo resiliente, eran porcentajes considerablemente menores a los obtenidos como óptimos de diseño por método Marshall; se observa en la Figura 120, Figura 121 y Figura 122 que dichos porcentajes menores de asfalto aunque representan mejores módulos el comportamiento con respecto a la deformación permanente no es el mejor que este tipo de mezcla puede ofrecer.

Con los porcentajes de asfalto óptimos se encuentra un mejor equilibrio entre la deformación permanente y los módulos resilientes teniendo valores relativamente aceptables para los dos aspectos evaluados. Mientras que si se toma el otro extremo con contenidos de asfalto mayores a los óptimos se corre el riesgo de encontrar valores de módulos significativamente menores que podrían presentar problemas de durabilidad por la acción repetida de cargas.

7. CONCLUSIONES

Un diseño adecuado de una mezcla asfáltica debe llevarse acabo con los elementos que me representen de la mejor manera el comportamiento de estas en campo. La consecución de estos elementos ha constituido para los investigadores una parte fundamental en sus estudios, lo cual ha llevado al desarrollo de nuevos medios para la evaluación de las propiedades de las mezclas.

Anteriormente propiedades como la densidad, la estabilidad y el flujo constituían los únicos elementos de juicio para categorizar una mezcla y encontrar un porcentaje determinado de diseño, hoy en día se ha comprobado que la caracterización dinámica de las mezclas en lo referente a módulos resilientes, deformaciones permanentes y la fatiga entre otras, crea una idea bastante acertada del comportamiento de la mezcla en servicio y durante su vida útil a largo plazo.

En un país en desarrollo, como en el caso de Colombia, consultores y constructores, por razones de tipo mas de tipo económico por el alto costo de ensayos de caracterización dinámicas de las mezclas, se dedican a diseñar pavimentos por los métodos tradiciones, dejando a un lado el comportamiento dinámico de las mezclas y lo que este representa en la vida útil de una carpeta asfáltica.

Es importante evaluar, estudiar y dar recomendaciones sobre como estos diseños tradicionales se comportan con respecto a factores dinámicos, para así sin apartarse drásticamente de los diseños tradicionales poder establecer

tendencias y recomendaciones para que un diseño tradicional pueda tener un mejor desempeño.

- Las mezclas compactadas con martillo Marshall alcanzan valores considerablemente mayores de la densidad bulk que los encontrados para briquetas compactadas con compactador giratorio.
- De la misma manera se puede concluir que el aumento de la densidad con el número de giros, no fue el esperado con valores que no superan el 3% entre las briquetas compactadas a 115 giros y las compactadas a 160 giros.
- Para las briquetas compactadas con martillo Marshall se encontró que el mejor comportamiento en cuanto a módulos se obtenía en valores de asfalto considerablemente mas bajos a los establecidos como óptimos por método Marshall. En cambio en las briquetas compactadas con compactador giratorio se encontraron valores de módulos mas altos para valores intermedios de contenido de asfalto
- En cuanto al tipo de método de compactación se puede concluir que la energía de compactación empleada por el compactador giratorio es considerablemente menor a la obtenida con el martillo Marshall reflejándose en valores mucho menores de módulos y mayores de acumulación del porcentaje de compactación.
- Se observa que la frecuencia adquiere una importancia mayor para temperaturas altas lo cual indica que para climas cálidos el deterioro del pavimento esta bastante relacionado con la frecuencia de repeticiones de carga vehicular.

- Se puede concluir que porcentajes menores de asfalto presentan un mejor comportamiento frente a los módulos sin sacrificar aspectos del diseño tradicional como la estabilidad y el flujo para el caso de briquetas compactadas con martillo Marshall. Sin embargo se debe tener especial cuidado con la densificación que alcanzan estas mezclas con contenidos de asfalto bajos ya que puede traer problemas de otro tipo como envejecimiento prematuro de la capa, oxidación y disgregación de los materiales y baja resistencia a la fatiga y a la deformación permanente, entre otros.
- La temperatura del ensayo juega un papel muy importante en los resultados, haciéndose evidente un descenso drástico en los módulos con aumento de la temperatura.
- Las deformaciones permanentes se muestran homogéneas con respecto a el aumento en el porcentaje de asfalto y los pulsos utilizados en el ensayo. Mostrando una relación inversamente proporcional de el contenido de asfalto y el porcentaje de acumulación de deformaciones.
- Para los porcentajes óptimos encontrados, la deformación permanente se encuentra por encima de los valores exigidos por la especificación. Por lo cual un diseño teniendo en cuenta este aspecto debe tener un mayor contenido de ligante teniendo en cuenta la tendencia inversamente proporcional descrita en el punto anterior.
- Los valores de densidad, estabilidad y flujo son aceptables relacionándolos con los contenidos de asfalto que muestran buena resistencia frente a la deformación permanente. Haciendo estos valores no decisivos en el momento de la determinación de un contenido óptimo considerando estos aspectos.

- Para los valores óptimos encontrados por la empresa Concescol S.A. (5.9%) y el laboratorio de la PUJ (5.7%) se cumple satisfactoriamente con los aspectos evaluados (densidad bulk, estabilidad, flujo y módulos). Cabe mencionar que el valor encontrado por Concescol S.A. presenta mejores desempeños en cuanto a flujo, densidad bulk y deformaciones permanentes (sin estar dentro de la especificación para este aspecto), mientras que el valor obtenido en la PUJ presenta mejor comportamiento en cuanto a módulos resilientes y estabilidad.
- Se puede decir que para los porcentajes óptimos encontrados existe un balance satisfactorio de los parámetros evaluados en el presente trabajo (estabilidad, densidad bulk, flujo, módulos resilientes y deformaciones permanentes) cabe incluir que para este último parámetro los resultados obtenidos están un poco por encima de lo exigido en las especificaciones.

8. RECOMENDACIONES

- Es conveniente evaluar contenidos de asfalto menores y mayores a los estudiados en este trabajo para así tener una base estadística confiable y poder predecir con mayor exactitud el comportamiento dinámico de la mezcla del tipo MDC-2.
- Contenidos de asfalto menores a los encontrados como óptimos muestran un buen desempeño con respecto a módulos, sin embargo es importante tener en cuenta que estos valores de contenido de asfalto presentan densidades bajas y deformaciones permanentes altas, por lo tanto es bueno estudiar mezclas con diferentes porcentajes de compactación y observar el comportamiento dinámico de dichas mezclas.
- Este trabajo debe ser complementado con la realización de las leyes de fatiga corriendo pendientes para los diferentes casos, lo cual resulta en una visión más amplia del comportamiento dinámico de este tipo de mezcla.

9. BIBLIOGRAFÍA

- ASPHALT INSTITUTE, “Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de Superpave”, EE.UU., (1995)
- Garnica, P., Gómez J. A., Sesma J. A., “Mecánica de materiales para Pavimentos” Ciudad de México, México, (2002)
- Arenas, L. H. , “Teoría de los Pavimentos” (Parte 1), Cali, Colombia, (2000)
- Prithvi S. Kandhal, S. P., Chakraboily S., “EVALUATION OF VOIDS IN THE MINERAL AGGREGATE FOR HMA PAVING MIXTURES” Auburn, EE.UU., (1996)
- Kandhal, P. S., Khatri, M. A., “EVALUATION OF ASPHALT ABSORPTION BY MINERAL AGGREGATES” Auburn, EE.UU., (1998)
- Rodríguez, J. A., “Incidencia de los agregados en el comportamiento de las carpetas asfálticas” San Salvador, El salvador, (2001)
- Garnica, P., Gómez J. A., Delgado A. H., “Algunos Aspectos de la Densificación de Mezclas Asfálticas con el Compactador Giratorio” Ciudad de México, México, (2003).
- Tavera, A, “Manual de instalación, operación , mantenimiento y montaje de los ensayos para el equipo N.A.T.” Bogota, Colombia, (2002)
- Guzmán, J. E., Rodríguez J. C., “ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE MODULOS RESILIENTES Y DEFORMACIONES PERMANENTES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

COMPACTADAS CON MARTILLO MARSHALL Y CON COMPACTADOR
GIRATORIO” Bogota, Colombia, (2004)

- Cortes, S. M., Núñez, J. G., ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE COMPACTACIÓN MARSHALL Y SHRP DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON MIRAS A IMPLEMENTAR EL MÉTODO DE DISEÑO VOLUMÉTRICO DE SUPERPAVE” Bogota, Colombia, (2004)
- Yang, C. N., “Desing of Funcional Pavements” Nueva York, EE.UU., (1972)
- BITUMINOUS PAVEMENTS. Material, Design and Evaluation. G-15. 15Th-17th APRIL, 1996.
- Cajiao, H., “Curso de pavimentos para graduados – Importancia de la Compactación del Concreto asfáltico” Bogota, Colombia, (1968)
- <http://www.miliarium.com/Proyectos/Carreteras/Manuales.htm>
- León, H., “Tecnologías del Cemento Asfáltico”. Cali, Colombia, (2002)
- Sánchez, S, F, “Curso de Laboratorio de Pavimentos”. Cali, Colombia, (1983).

10. Anexos