

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

**Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales
y Puertos de Barcelona (ETSECCPB)**

**Departamento de Infraestructura del Transporte y del
Territorio**

TESIS DOCTORAL

**ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LAS MEZCLAS
BITUMINOSAS MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL ENSAYO
DE MÓDULO RESILIENTE EN EL CONTROL DE SU
EJECUCIÓN**

Autor: Pedro Limón Covarrubias
Director: Dr. Rodrigo Miró Recasens

Barcelona, España

Índice

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1 Planteamiento general del problema.....	1
1.2 Objetivos de la tesis.....	8
CAPÍTULO 2. EL CONTROL DE CALIDAD DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS.....	11
2.1 El Concepto de calidad.....	11
2.1.1 <i>Sistema de calidad</i>	12
2.2 Evolución del control de calidad de las mezclas bituminosas.....	14
2.2.1 <i>Antecedentes</i>	14
2.2.2 <i>Desarrollo del control de calidad de las mezclas bituminosas</i>	15
2.3 El control de calidad de las mezclas bituminosas en la actualidad.....	19
2.3.1 <i>El control de calidad en el diseño</i>	20
2.3.2 <i>El control de calidad en la fabricación</i>	23
2.3.3 <i>El control de calidad en la puesta en obra</i>	26
2.4 Revisión de las normativas de control de ejecución.....	31
2.4.1 <i>Estados Unidos</i>	31
2.4.2 <i>Asphalt Institute</i>	35
2.4.3 <i>México</i>	40
2.4.4 <i>Francia</i>	45
2.4.5 <i>España</i>	48
2.5 Consideraciones finales.....	54
CAPÍTULO 3. EL MÓDULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS.....	61
3.1 Introducción.....	61
3.2 Caracterización de la sollicitación en firmes.....	64

3.2.1 Mediciones de esfuerzos y deformaciones en casos reales.....	66
3.3 Mecanismos de deformación de un material sujeto a carga cíclica.....	67
3.4 El módulo resiliente.....	69
3.4.1 Factores que afectan al módulo resiliente.....	73
3.5 Aplicación del módulo resiliente en el diseño de firmes.....	90
3.5.1 Método de diseño de firmes AASHTO.....	90
3.5.2 Métodos mecanicistas.....	91
3.6 Consideraciones finales.....	93

CAPÍTULO 4. ESTUDIO DE LA APLICACIÓN DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE EN EL CONTROL DE CALIDAD DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS.....95

4.1 Metodología.....	95
4.2 Sensibilidad del ensayo.....	97
4.2.1 Efecto de la composición de la mezcla.....	101
4.2.2 Efecto de la elaboración de la probeta.....	107
4.2.3 Efecto de las condiciones de ejecución del ensayo.....	113
4.3 Análisis experimental de los resultados de laboratorio.....	120
4.3.1 Introducción.....	120
4.3.2 Análisis de resultados.....	122
4.4 Aplicación del ensayo en el control de ejecución. Ensayo sobre testigos.....	134
4.4.1 Relación entre módulo y densidad.....	134
4.5 Consideraciones finales.....	145

CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN DEL EFECTO PRODUCIDO POR FALTA DE CALIDAD EN LA EJECUCIÓN DE LAS CAPAS BITUMINOSAS.....147

5.1 Planteamiento del análisis.....	147
5.2 Obtención de las leyes de fatiga.....	149
5.2.1 Ley de fatiga para las variables de composición de la mezcla que más influyen en el módulo resiliente.....	150
5.2.2 Ley de fatiga para las variables de elaboración de la mezcla que más influyen en el módulo resiliente.....	151

5.2.3 Ley de fatiga para las variables de ejecución del ensayo que más influyen en el módulo resiliente.....	153
5.2.4 Comparación de las leyes de fatiga para las variables estudiadas en laboratorio.....	154
5.2.5 Ley de fatiga de las probetas fabricadas en planta y de los testigos de la obra tres.....	155
5.2.6 Ley de fatiga de las probetas fabricadas en planta y de los testigos de la obra cinco.....	157
5.3 Cálculo de la vida del firme.....	159
5.3.1 Variable de elaboración de una mezcla bituminosa.....	159
5.3.2 Ejecución en campo.....	160
5.4 Consideraciones finales.....	164

CAPÍTULO 6. DETERMINACIÓN DE CRITERIOS PARA EL CONTROL DE CALIDAD A PARTIR DEL MÓDULO RESILIENTE.....165

6.1 Limitaciones del control de calidad actual.....	165
6.2 Criterios de control de calidad.....	167
6.2.1 Determinación de valores mínimos de aceptación y rechazo.....	174
6.3 Verificación del control de calidad propuesto.....	177
6.3.1 Relación (módulo testigo/módulo probeta) vs porcentaje de compactación.....	177
6.4 Consideraciones finales.....	182

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....183

7.1 Conclusiones.....	184
7.2 Líneas futuras de investigación.....	187

BIBLIOGRAFÍA.....189

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios por haberme dado la oportunidad de desarrollar esta gran meta de mi vida.

Agradezco a mi esposa Samanta por el apoyo que me ha brindado durante todo mi doctorado, ya que aunque la distancia fue mucha, siempre estuvimos cerca. Te amo chiquita.

A mis Papás por tener tanta paciencia y por el sacrificio que han hecho para que yo me desarrolle personal y profesionalmente. Los quiero mucho.

Agradezco a mi director de tesis, Dr. Rodrigo Miró Recasens, por haberme dado la oportunidad de trabajar en su equipo de investigación y sobretodo por el tiempo e interés que me ha brindado a lo largo de todos estos años.

También agradezco al Dr. Felix Pérez y Dra. Adriana Martínez cuya ayuda y orientación ha sido especialmente oportuna y valiosa en ciertos momentos clave a lo largo del doctorado.

A mis hermanos Fernando, Nallely y Eduardo por el apoyo que me han brindado durante mis estudios. Además, quiero agradecer a mi Tía Rosa, Juan Pablo, Luis Jorge, Ramón, Armando, Manuel, Gerardo, Jorge González, Tío Alfonso, Tía Toña, Tío Manuel Limón, Tío Julián Limón, Tío Luís Limón, Tío Toño Limón, Francisco, Juan Carlos y Jorgín.

A mi Tío Rafael por todo el apoyo y asesoría que me ha brindado en mis estudios y en mi vida profesional.

A mis Suegros, cuñados y sobrinas, por el aliento que siempre me han otorgado durante este largo recorrido.

A D. Josep Amorós, quien además de ser excelente persona, es parte fundamental del equipo de investigación.

A todos mis amigos del doctorado, por todo el tiempo compartido dentro y fuera de la universidad, en especial a Oscar, Mario, Gonzalo, Noe, Sergio, Mauricio, Jesús Mota, Alfredo y Mauro.

Al personal de la UPC con el cual he convivido durante todo este tiempo, particularmente a Mónica, Mayte y Maria José.

A todos mis amigos, en especial Alejandro, Lalo, Omar, Eloy, Juan Carlos, Luís, Alejandra, Oscar, Mónica, Toño, Gaby, Javier Herrera y Alberto.

A mis compañeros del trabajo, Omar, Emmanuel, Israel, Mario, Norberto, Juan Daniel, Leo, Nacho, Carlos, Miguel, Mauricio, Cicela, Paola, Violeta y en especial al Ingeniero Cremades, Alcayde y Carrete por el apoyo y confianza que han tenido en mi.

A todos mis compañeros de piso Mateo y Luís (El pibe), con quienes he compartido la mayor parte de mi estancia en Barcelona.

Agradezco de manera muy especial al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) por su apoyo económico, sin el cual no hubiera sido posible mi estancia en esta ciudad y por lo tanto, tampoco hubiera sido posible mi formación.

El autor de esta tesis desea poner de manifiesto su agradecimiento a la Universidad Politécnica de Cataluña por la oportunidad recibida para realizar mis estudios de doctorado.

Así mismo, el autor desea hacer constar y agradecer la colaboración del Intituto Mexicano del Transporte en especial al Dr. Paul Garnica Anguas y Alfonso Pérez.

También quiero agradecer a las empresas SURFAX y PACCSA por el apoyo recibido para la obtención de los resultados de la tesis doctoral.

Por último quiero agradecer a las empresas que colaboraron de una u otra manera para la elaboración de esta tesis como son Agacel, Asfaltos Guadalajara, CCM, CYPASA VISE, Construcarr, Constructora Arcon, Grupo Escudero y Suelos y Control.

Lista de Tablas

2.1 Especificaciones de colocación de mezcla bituminosa del estado de Alaska.....	33
2.2 Especificaciones de colocación de mezcla bituminosa del estado de Maryland.....	33
2.3 Especificaciones de colocación de mezcla bituminosa del estado de Texas.....	34
2.4 Especificaciones de colocación de mezcla bituminosa del estado de Washington.....	34
2.5 Especificaciones de colocación de mezcla bituminosa del estado de Wisconsin.....	35
2.6 Recomendaciones mexicanas de temperaturas de mezclado para mezclas fabricadas en caliente.....	41
2.7 Índice de regularidad Internacional (IRI), para firmes de nueva construcción.....	51
2.8 Macrotextura superficial y resistencia al deslizamiento.....	51
2.9 Especificaciones de pruebas y frecuencias de muestreo.....	52
2.10 Efecto del nivel de compactación en el módulo resiliente.....	56
4.1 Husos granulométricos de acuerdo a la normativa mexicana.....	98
4.2 Propiedades de los áridos utilizados.....	99
4.3 Propiedades de los betunes utilizados.....	99
4.4 Dosificaciones de betún de las mezclas utilizadas.....	100
4.5 Resultados de módulo resiliente vs contenido de betún.....	101
4.6 Resultados de módulo resiliente vs tipo de betún.....	102
4.7 Resultados de módulo resiliente vs tipo de árido.....	104
4.8 Resultados de módulo resiliente vs granulometría del árido.....	105
4.9 Resultados de módulo resiliente vs tamaño máximo del árido.....	106
4.10 Efecto de la variación de la energía de compactación sobre el módulo resiliente a 40 °C menos que la temperatura óptima de compactación.....	107

4.11 Efecto de la variación de la energía de compactación sobre el módulo resiliente a 20 °C menos que la temperatura óptima de compactación.....	108
4.12 Efecto de la variación de la energía de compactación sobre el módulo resiliente a la temperatura óptima de compactación.....	108
4.13 Módulo resiliente vs energía de compactación en el equipo Marshall....	110
4.14 Módulo resiliente vs energía de compactación en el compactador giratorio.....	111
4.15 Resultados altura de probeta vs Módulo resiliente.....	112
4.16 Módulo resiliente vs temperatura de ensayo, con betún PG 58-22.....	114
4.17 Módulo resiliente vs temperatura de ensayo, con betún PG 64-22.....	114
4.18 Módulo resiliente vs temperatura de ensayo, con betún PG 70-22.....	114
4.19 Módulo resiliente vs temperatura de ensayo, con betún PG 76-22.....	115
4.20 Módulo resiliente vs temperatura de ensayo, con betún PG 82-22.....	115
4.21 Módulo resiliente vs frecuencia de aplicación de carga.....	116
4.22 Módulo resiliente vs tipo de árido, vía seca.....	117
4.23 Módulo resiliente vs tipo de árido, vía húmeda.....	117
4.24 Módulo resiliente vs tipo de betún, vía seca.....	118
4.25 Módulo resiliente vs tipo de betún, vía húmeda.....	119
4.26 Identificación de las variables y valores de módulo resiliente de las variables de composición para el estudio estadístico.....	125
4.27 Estimación de efectos de las variables de composición de una mezcla bituminosa.....	128
4.28 Identificación de las variables y valores de módulo resiliente de las variables de elaboración de probetas para el estudio estadístico.....	130
4.29 Estimación de efectos de las variables de elaboración de una mezcla bituminosa.....	131
4.30 Identificación de las variables y valores de módulo resiliente de las variables de ejecución del ensayo para el estudio estadístico.....	132
4.31 Estimación de efectos de las variables de ejecución del ensayo de módulo resiliente.....	133
4.32 Características de las mezclas de las obras analizadas.....	135
4.33 Resultados medios de probetas de mezcla fabricada en planta y testigos extraídos de obra.....	143
5.1 Capas y espesores empleados en la sección de firme considerada.....	148

5.2 Módulos resilientes de las mezclas consideradas en el estudio de fatiga.....	150
5.3 Módulos resilientes de las mezclas consideradas en el estudio de fatiga.....	152
5.4 Módulos resilientes de las mezclas consideradas en el estudio de fatiga.....	153
5.5 Módulos resilientes de las probetas fabricadas en planta y de los testigos de la obra 3.....	156
5.6 Módulos resilientes de las probetas fabricadas en planta y de los testigos de la obra 5.....	157
5.7 Vida de la sección, en millones de ejes equivalentes, al variar la temperatura de compactación de la mezcla.....	160
5.8 Vida de la sección, en millones de ejes equivalentes, de la obra 3.....	161
5.9 Vida de la sección, en millones de ejes equivalentes, de la obra 5.....	162
6.1 Valores de módulo resiliente, porcentajes de compacidad y módulo retenido, para las diferentes variables de elaboración, cuando se utiliza un betún PG 70-22.....	169
6.2 Obtención del valor medio de módulo retenido para el punto más bajo de la figura 6.3.....	171
6.3 Valores de porcentaje de módulo retenido de la obra 3.....	175
6.4 Valores de módulo, porcentajes de módulo retenido y porcentaje de compacidad de las obras estudiadas.....	179

Lista de Figuras

1.1 Variación de la resistencia con la granulometría del árido. Mezclas S-20.....	3
1.2 Variación de la resistencia a tracción indirecta con la temperatura y energía de compactación. Mezclas S-20.....	4
1.3 Variación de la resistencia con el tipo de betún. Mezclas S-12.....	5
2.1 Curva de compactación típica.....	16
2.2 Transporte de la mezcla bituminosa.....	27
2.3 Colocación de la mezcla bituminosa.....	28
2.4 Compactación de una mezcla bituminosa.....	29
2.5 Extracción de un espécimen para obtener espesor y compacidad.....	30
2.6 Durabilidad del firme vs Contenido de huecos.....	37
2.7 Cuarteo por calor.....	38
2.8 Tiempo mínimo de compactación, basado en temperatura, espesor de mezcla bituminosa y en la temperatura de la capa de soporte.....	39
2.9 Ilustración de un aparato nuclear.....	46
2.10 Equipo francés para determinar permeabilidad.....	46
2.11 Equipo para determinar espesores de firmes mediante ondas electromagnéticas.....	47
2.12 Ilustración del equipo APL.....	48
2.13 Resistencia a la tracción indirecta con diferentes temperaturas de compactación.....	55
2.14 Resistencia a tracción indirecta y módulo de elasticidad estático con diferentes energías y temperaturas de compactación.....	56
2.15 Leyes de fatiga de mezclas bituminosas con diferente compacidad.....	57
2.16 Efecto de la compacidad en la tracción indirecta de testigos de obra.....	58
3.1 Estado de tensiones en un firme bajo una carga simple.....	62
3.2 Estado de esfuerzos en un firme.....	66
3.3 Mecanismo de deformación permanente en los firmes.....	67
3.4 Deformación acumulada con el número de aplicaciones de un esfuerzo desviador.....	68

3.5 Forma de pulso de carga.....	70
3.6 Ensayo de compresión diametral y montaje del aparato.....	72
3.7 Amplitud de deformación.....	72
3.8 Valores de módulo resiliente para diferentes niveles de esfuerzos en función de la temperatura.....	74
3.9 Valores de módulo resiliente para distintas frecuencias en función de temperatura.....	75
3.10 Tiempo de duración de carga (ms) vs Módulo resiliente.....	76
3.11 Valores de módulo resiliente para distintos porcentajes de betún en función de la temperatura.....	77
3.12 Efecto del contenido de betún en mezclas envejecidas y no envejecidas sobre el módulo resiliente.....	78
3.13 Valores de módulo resiliente para distintos áridos en función de la temperatura.....	79
3.14 Efecto del tamaño máximo sobre el módulo resiliente de una mezcla bituminosa.....	80
3.15 Efecto del porcentaje de lajas del árido grueso sobre el módulo resiliente.....	81
3.16 Valores del módulo resiliente para distintos porcentajes de huecos en función de la temperatura.....	82
3.17 Valores de módulo resiliente para distintos contenidos de modificadores de betún.....	83
3.18 Valores de módulo resiliente para distintos tipos de betún.....	84
3.19 Valores de módulo resiliente para mezclas bituminosas convencionales y modificadas.....	85
3.20 Valores de módulo resiliente para mezclas bituminosas en ensayos diametrales y axiales.....	86
3.21 Valores de módulo resiliente para diferentes temperaturas de ensayo....	87
3.22 Valores de resistencia a tracción indirecta de mezclas bituminosas ejecutadas a diferentes temperaturas de ensayo.....	88
3.23 Efecto de la temperatura de ensayo sobre el módulo resiliente de las mezclas bituminosas.....	89
4.1 Plan de trabajo.....	96

4.2 Resultados de módulo resiliente vs contenido de betún.....	102
4.3 Resultados de módulo resiliente vs tipo de betún.....	103
4.4 Resultados de módulo resiliente vs tipo de árido.....	104
4.5 Resultados de módulo resiliente vs granulometría de la mezcla.....	105
4.6 Resultados de módulo resiliente vs tamaño máximo de árido.....	106
4.7 Variación del módulo resiliente en función de la temperatura y energía de compactación.....	108
4.8 Variación del módulo resiliente y densidad en función de la temperatura y energía de compactación.....	110
4.9 Variación del módulo resiliente en función del equipo y energía de compactación utilizada.....	112
4.10 Variación del módulo resiliente en función de la altura de la probeta.....	113
4.11 Variación del módulo resiliente en función de la temperatura de ensayo y tipo de betún.....	115
4.12 Variación del módulo resiliente en función de la frecuencia de aplicación de carga.....	116
4.13 Variación del módulo resiliente en función del tipo de árido y acondicionamiento.....	118
4.14 Variación del módulo resiliente en función del tipo de betún y acondicionamiento.....	119
4.15 Gráfico de probabilidad normal de las variables de composición de una mezcla bituminosa.....	129
4.16 Gráfico de probabilidad normal de las variables de elaboración de una mezcla bituminosa.....	131
4.17 Gráfico de probabilidad normal de las variables de ejecución de una mezcla bituminosa.....	133
4.18 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 1.....	136
4.19 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 2.....	136
4.20 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 3.....	137
4.21 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 4.....	137
4.22 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 5.....	138
4.23 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 6.....	138
4.24 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 7.....	139
4.25 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 8.....	139

4.26 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 9.....	140
4.27 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 10.....	140
4.28 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 11.....	141
4.29 Efecto del betún y temperatura de ensayo sobre el módulo resiliente....	145
5.1 Leyes de fatiga para diferentes tipos de betún.....	151
5.2 Leyes de fatiga para diferentes temperaturas de compactación.....	152
5.3 Leyes de fatiga para diferentes temperaturas de ensayo.....	154
5.4 Leyes de fatiga para las variables consideradas.....	155
5.5 Leyes de fatiga sobre probetas fabricadas en planta y sobre testigos de la obra 3.....	156
5.6 Leyes de fatiga sobre probetas fabricadas en planta y sobre testigos de la obra 5.....	158
5.7 Vida de la sección, en millones de ejes equivalentes, al variar la temperatura de compactación de la mezcla.....	160
5.8 Vida de la sección, en millones de ejes equivalentes, de la obra 3.....	162
5.9 Vida de la sección, en millones de ejes equivalentes, de la obra 5.....	163
6.1 Módulo resiliente vs Porcentaje de compacidad para las variables de elaboración y composición.....	170
6.2 Módulo resiliente vs Módulo retenido para las variables de elaboración y composición.....	170
6.3 Módulo retenido vs Porcentaje de compacidad para las variables de elaboración y composición.....	172
6.4 Gráfico de control de calidad de una mezcla bituminosa a partir del porcentaje de compacidad y módulo retenido.....	173
6.5 Gráfico de control de calidad de obra a partir del porcentaje de compacidad y la relación entre módulos de testigos y probetas.....	180
7.1 Gráfico de control de calidad de una mezcla bituminosa a partir del porcentaje de compacidad y módulo retenido.....	186

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROBLEMA

En el año 2000, Martínez, A. [30], en su Tesis Doctoral “Aseguramiento de la calidad de mezclas bituminosas mediante la aplicación del ensayo de tracción indirecta en el control de su ejecución”, estableció un método de control de calidad de las mezclas bituminosas basado en el ensayo de tracción indirecta, debido a que el método de control utilizado hasta el momento, basado en el análisis de compacidad, tenía baja correlación con la durabilidad de una mezcla bituminosa.

En la industria de las mezclas bituminosas no se da la importancia necesaria a la calidad, ya que los controles realizados sobre la mezcla no aseguran que, después de su colocación y compactación, tendrá las propiedades mecánicas con las que fue diseñada. Concretamente, en la Tesis Doctoral de Martínez se menciona: “El control de calidad del producto suele establecerse sobre la adhesividad y sobre la resistencia a las deformaciones plásticas (estabilidad Marshall), ignorando propiedades que pueden resultar igualmente significativas en el comportamiento del material: módulo, abrasión, resistencia a la fatiga, etc.”.

Además, los controles que se realizan no son lo suficientemente sensibles para determinar cuando una mezcla bituminosa se encuentra mal ejecutada: “El control de calidad suele realizarse sobre el material fabricado en planta, no sobre el producto una vez extendido y compactado en el firme; lo único que llega a realizarse sobre el producto ya terminado es comparar su densidad con la de referencia” [30].

En España, y en la mayoría de los países latinoamericanos, el control de calidad de las mezclas bituminosas suele aplicarse sobre:

- La composición de la mezcla, determinada tras la extracción del ligante.
- La estabilidad y el contenido de huecos de la mezcla, determinados mediante la realización del ensayo Marshall sobre el producto fabricado en planta. Para conocer la resistencia de la mezcla a la acción del agua, solía utilizarse el ensayo de inmersión compresión o, actualmente, la pérdida de resistencia a tracción indirecta por inmersión en agua.
- La compacidad conseguida en la ejecución, mediante la extracción de testigos y la comparación de su densidad con la densidad Marshall patrón.

Así, el control que se realiza sobre el producto final se reduce normalmente al control de su compacidad, exigiéndose que la mezcla colocada alcance una densidad entre el 97 y 98% de la de referencia (en función del espesor de la capa), determinada en probetas fabricadas en la compactadora Marshall con la mezcla utilizada; esta exigencia es, en particular, de España, pero en países latinoamericanos las exigencias pueden ser menores, reduciéndose esta compacidad hasta un 95%.

Sin embargo, tal como mencionaba Martínez: “Muchas veces existen problemas mecánicos y resistentes en las mezclas colocadas, como baja cohesión o pérdida de rigidez, que no han sido detectados con los controles habituales. Esto significa que el producto final puede bajar su calidad, debido a variaciones en la mezcla, que no afectan a las características Marshall ni a la densidad final de los testigos, quedando esta pérdida de calidad momentáneamente oculta y sin conocer sus causas”.

Por ello, Martínez propuso un método de control de calidad de las mezclas bituminosas basado en la aplicación del ensayo de tracción indirecta, a 5 °C. En primer lugar, estudió la sensibilidad del ensayo y encontró que el valor de la resistencia a tracción indirecta podía diferenciar mezclas de características diferentes. Así por ejemplo, mediante la resistencia a tracción indirecta se podía diferenciar dos mezclas con granulometrías diferentes, cuya densidad era la misma, por lo que el control a partir de densidades no

podía diferenciarlas. En la figura 1.1 se observa una mayor resistencia a tracción indirecta de la mezcla con la granulometría centrada, pero que presenta una densidad similar a la mezcla con la granulometría ajustada al límite inferior del huso.

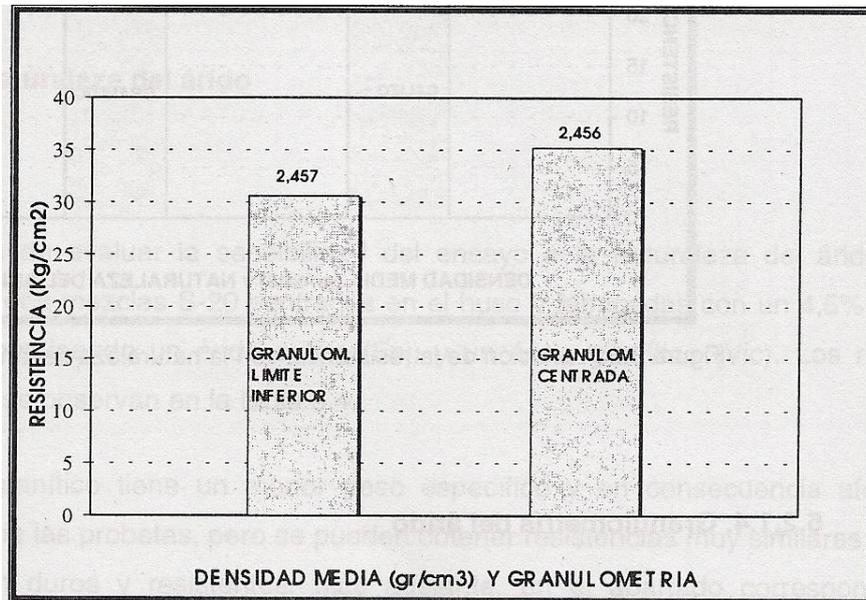


Figura 1.1 Variación de la resistencia con la granulometría del árido. Mezclas S-20 (Fuente: Martínez, 2000).

Otro ejemplo claro es cuando estudió el efecto de la energía y temperatura de compactación. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto una clara diferencia de resistencias a tracción indirecta entre las mezclas cuando son compactadas a diferentes temperaturas y energías de compactación. En la figura 1.2 se observa que una mezcla bituminosa compactada a menor temperatura pero a igual energía de compactación tiene una resistencia a tracción indirecta menor, y que una mezcla compactada a una misma temperatura pero con mayor energía de compactación tiene una resistencia a tracción indirecta mayor. Sin embargo, y aunque se observa una cierta variación en las densidades, hay casos en que la densidad se mueve en un rango similar, lo que pone de manifiesto el pobre desempeño de la densidad como método para conocer la variación de calidad en una mezcla bituminosa.

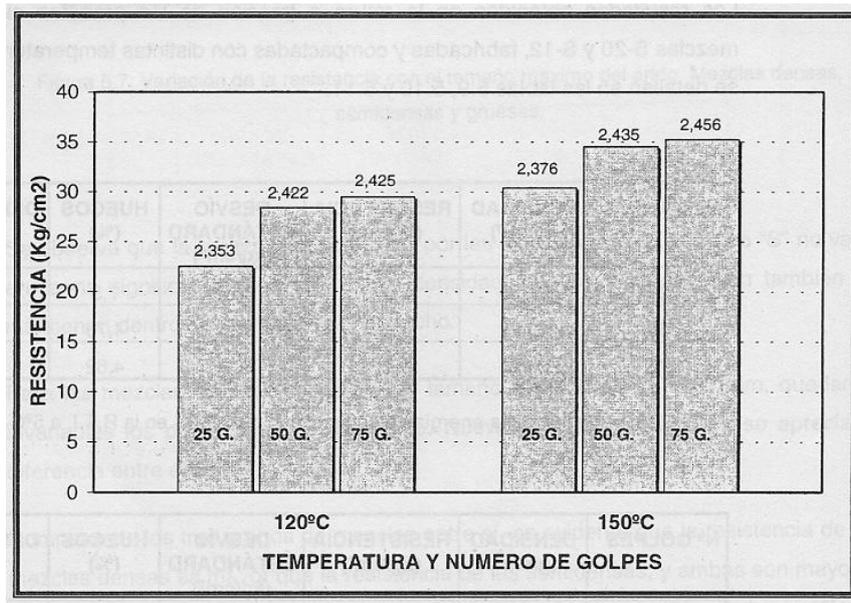


Figura 1.2 Variación de la resistencia a tracción indirecta con la temperatura y energía de compactación. Mezclas S-20 (Fuente: Martínez, 2000).

Sin embargo, aunque los resultados obtenidos por Martínez mediante la aplicación del ensayo de tracción indirecta a 5 °C fueron, en general, contundentes, para algunas de las variables estudiadas el ensayo mostró una menor capacidad para discernir entre las mezclas. Así por ejemplo, en la figura 1.3 se puede observar cómo, aunque existe una gran diferencia entre la penetración de los betunes utilizados en la fabricación de las mezclas, la resistencia a tracción indirecta no presenta grandes variaciones, siendo esta variación de apenas 0.2 MPa entre los diferentes betunes.

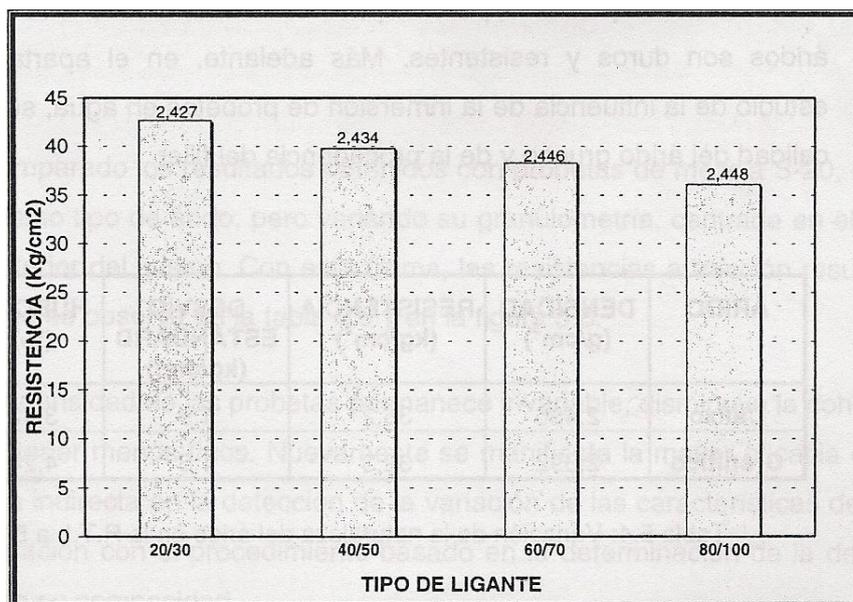


Figura 1.3 Variación de la resistencia con el tipo de betún. Mezclas S-12 (Fuente: Martínez, 2000).

Esta limitación abre la puerta a pensar en otro ensayo que, con la misma finalidad de evaluar una propiedad mecánica de la mezcla, tuviera una mayor capacidad de diferenciar entre mezclas diferentes. Además, en los últimos años, los métodos mecanístico-empíricos para el diseño de firmes han otorgado una gran relevancia al módulo de la mezcla, siendo necesario conocer su valor durante la etapa de proyecto de la estructura.

Por tanto, el ensayo de módulo resiliente aparece como la opción más adecuada, ya que si es necesario determinarlo en la fase de diseño, es también relativamente fácil conocerlo tras la ejecución de la mezcla, ya que al igual que ocurría con el ensayo de tracción indirecta, no se tienen que realizar operaciones adicionales, ya que puede evaluarse sobre los mismos testigos extraídos de la capa ejecutada que van a ser utilizados para la obtención de densidades.

En conclusión, el ensayo de módulo resiliente aparece como un ensayo práctico para complementar al actual método de control de calidad, basado sólo en la determinación de densidades, lo que hace que en el momento de tomar decisiones sobre la aceptación o rechazo de la capa, se desconozca la capacidad resistente de la mezcla.

Así pues, el objetivo de esta tesis ha sido la búsqueda de una metodología de aseguramiento de la calidad de las mezclas bituminosas que cubra ciertos aspectos de la

puesta en obra que no son considerados por los procedimientos de control utilizados actualmente, y que pueden afectar al comportamiento en servicio del firme.

Para ello, se ha estudiado un procedimiento de control basado en la determinación del módulo resiliente de la mezcla bituminosa colocada, según la nueva norma Europea, a 20 °C, UNE-EN 12697-26 ANEXO C.

Puesto que los ensayos pueden realizarse sobre testigos extraídos del firme para el control de densidades, no supone ninguna actuación suplementaria; además, al ser un ensayo no destructivo, los testigos extraídos pueden ser utilizados para alguna otra prueba adicional. Así pues, este análisis se ha complementado mediante la determinación del comportamiento a fatiga a partir de un ensayo a tracción indirecta, de acuerdo al procedimiento descrito en la norma Europea UNE-EN 12697-24 ANEXO E.

En primer lugar, se ha analizado la sensibilidad del ensayo a la variación de la calidad y la cantidad de los componentes de la mezcla, así como de las condiciones de elaboración.

En segundo lugar, se ha determinado módulo resiliente de mezclas fabricadas en planta y de testigos procedentes de diferentes obras y se ha determinado, para cada mezcla, la relación compacidad-módulo resiliente. Además, se han contrastado los resultados de las obras con los obtenidos de probetas elaboradas en laboratorio con las mismas mezclas.

Posteriormente, se han ensayado testigos a fatiga por tracción indirecta, para obtener una ley de fatiga, a partir de la cual, junto con su módulo resiliente, pueda evaluarse el efecto de una disminución de la calidad de la mezcla en la vida del firme.

Por último, a través del análisis de los resultados obtenidos, se han propuesto unos umbrales mínimos de módulo resiliente retenido de las mezclas, así como un criterio comparativo de evaluación de la calidad de la mezcla colocada y compactada con respecto a la fabricada en planta, esto es, un parámetro de calidad para definir si una mezcla debe ser aceptada o rechazada.

1.2 OBJETIVOS DE LA TESIS

Las limitaciones que presenta el actual procedimiento de aseguramiento de la calidad de las mezclas bituminosas en caliente, basado fundamentalmente en el control del proceso de elaboración y carente de una evaluación de la calidad mecánica y resistente del producto final, han sido los motivos para desarrollar la investigación recogida en la presente tesis.

El objetivo general de la misma ha sido la elaboración de una propuesta de aseguramiento de la calidad de ejecución de las mezclas bituminosas, complementario con el utilizado habitualmente, mediante la aplicación del ensayo de módulo resiliente sobre testigos extraídos de la capa terminada. Para alcanzar este propósito, se ha trabajado en las etapas diferenciadas por los siguientes objetivos parciales:

1.- Análisis de proceso de medida

Con el objeto de evaluar la sensibilidad del ensayo de módulo resiliente, se ha analizado su respuesta al cambiar las variables más significativas de la composición y elaboración de la mezcla, así como las de ejecución del ensayo.

Para ello se han ensayado a módulo resiliente, probetas elaboradas con mezclas densas, según el Pliego de Prescripciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México, variando las siguientes características:

- Composición de mezcla: naturaleza del árido, tipo y contenido de ligante, granulometría y tamaño máximo del árido.
- Elaboración de la probeta: temperatura y energía de compactación y espesor de la probeta.
- Ejecución del ensayo: temperatura y velocidad de aplicación del ensayo, así como inmersión en agua.

2.- Sensibilidad de las variables de composición y ejecución

Se analizan los resultados de laboratorio mediante un análisis de diseño de experimentos con la ayuda de métodos factoriales, con el objeto de conocer cuales son las variables que tienen más influencia en el módulo resiliente.

3.- Análisis de su aplicación en obra

Se han analizado los valores de módulo resiliente obtenidos de probetas de planta y testigos extraídos de diversas obras, elaborados con mezclas densas, con diferentes tipos de árido y betún, granulometría y tamaño máximo del árido, a fin de estudiar la correlación entre el módulo resiliente y la compactación alcanzada. También se han comparado estos resultados con los obtenidos sobre las probetas fabricadas en laboratorio, para cada tipo de mezcla, para ver su variabilidad.

4.- Análisis del efecto de la disminución del módulo resiliente

Se han analizado los resultados de módulo resiliente y de fatiga a tracción indirecta sobre testigos. A partir de los módulos y leyes de fatiga obtenidos se ha calculado y evaluado el efecto de la disminución de módulo resiliente de la mezcla sobre la vida del firme mediante métodos analíticos.

5.- Propuesta de un procedimiento de aseguramiento de la calidad

Con la información obtenida, se han establecido unos valores mínimos de módulo resiliente retenido que las mezclas bituminosas en caliente deberán alcanzar una vez colocadas y compactadas, a la vez que se han propuesto unos límites de aceptación, penalización y rechazo para evaluar la calidad del producto terminado en función de la calidad de la mezcla elaborada.

CAPÍTULO 2

EL CONTROL DE CALIDAD DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

2.1 EL CONCEPTO DE CALIDAD

Antes de analizar el aseguramiento de la calidad de una mezcla bituminosa es importante conocer el concepto de calidad. En los últimos años la calidad de un producto o un servicio ha tomado gran importancia debido a los sistemas ISO, que han venido a establecer una serie de características que deben cumplir tanto un producto como un servicio.

Martínez [30] en su tesis doctoral menciona: “La Organización Internacional de la Normalización (ISO), según su norma ISO 8402, expresa que la calidad es la totalidad de las características de un producto, proceso o servicio que le confiere la aptitud para satisfacer las necesidades expresas o implícitas de los usuarios”.

Por tanto, se entiende que la calidad es el conjunto de propiedades inherentes a un objeto que le confieren capacidad para satisfacer necesidades implícitas o explícitas. Pero por otro lado, la calidad de un producto o servicio depende de la percepción que el cliente tiene sobre el mismo, es una fijación mental del consumidor que asume conformidad con dicho producto o servicio y la capacidad del mismo para satisfacer sus necesidades.

2.1.1 Sistema de calidad

Para asegurar la calidad de un producto o servicio es necesario establecer un sistema de calidad, que es la organización de los recursos y documentos que permiten implantar, mantener y corregir el aseguramiento de la calidad de la empresa, a fin de garantizar que los productos y servicios cumplan con los requisitos y especificaciones pactadas. Por este motivo se han desarrollado las normas ISO 9000 que establecen los requisitos de los sistemas de calidad:

- La empresa debe desarrollar e implementar en una forma apropiada, un sistema de calidad que obedezca a cada uno de los elementos de la norma.
- La norma no está orientada al producto, sino al proceso.
- ISO 9000 permite e incluso motiva a las empresas a desarrollar un programa de calidad efectivo y único para cada empresa.
- La empresa decide si uno o más de los elementos aplica o no a su organización.

El sistema de calidad deberá estar dirigido por la dirección y cubrir todos los aspectos de la empresa. Este elemento requiere que la empresa mantenga un “sistema de calidad documentado” que obedezca a los requisitos que allí estén especificados. Este elemento también requiere específicamente la preparación de procedimientos e instrucciones de calidad. Por último, se requiere de la implementación efectiva de estos procedimientos e instrucciones.

Estos procedimientos son estrategias que ayudan a una empresa a no sólo cumplir con un requisito, sino a tener una ventaja sobre otras y aumentar la competitividad de un país.

Por lo tanto el aseguramiento de la calidad no sólo se enfocará en controlar una serie de procesos sino en cumplir con la calidad total de un producto o servicio. Martínez [30] menciona: “El aseguramiento de la calidad deja de ser un objetivo parcial para ser una actividad global de la empresa”.

En resumen, la utilización de este procedimiento resolverá los problemas que pueden presentarse durante el desarrollo de un producto o servicio y, por otra parte, otorgará al consumidor la tranquilidad de que el producto servicio que está adquiriendo es de la calidad esperada. Sin embargo, todo este procedimiento implicará la adquisición de una consciencia de cambio, tanto en consumidores como en vendedores.

2.2 EVOLUCIÓN DEL CONTROL DE CALIDAD DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

2.2.1 Antecedentes

Para cualquier país, el contar con una infraestructura adecuada, funcional y estratégica es de vital importancia para facilitar el desarrollo del mismo, por lo que las inversiones para construir y/o conservar carreteras son cada vez mayores.

Es por ello que el control de calidad en cualquier tipo de infraestructura es importante, debido a la relevancia en su servicio del coste que se tuvo durante su construcción y el que se puede tener durante su conservación.

Sin embargo, Martínez [30] indica: “La industria de la construcción ha sido el sector más postergado en admitir la importancia de la calidad en la competencia de una empresa y en impartir su nuevo concepto mediante la aplicación de un sistema de aseguramiento de calidad”.

Y dentro de la industria de la construcción, la construcción de carreteras ha sido uno de los sectores con menor desarrollo del control de calidad, y esto no debería ser así ya que no hay infraestructura más grande y costosa como las carreteras. Además, en muchos casos se puede decir que si un país tiene malas carreteras es porque es pobre, o es pobre porque tiene malas carreteras, ya que los gastos de conservación son, en muchos casos, demasiado elevados para abordarlos.

Las mezclas bituminosas son las últimas capas en la construcción de un firme, y cualquier defecto que presenten éstas, se reflejará en el firme. Los firmes deben proporcionar comodidad y, sobretodo, seguridad al usuario, por lo que si las mezclas bituminosas se encuentran en malas condiciones, el firme no cumplirá sus funciones. Y, en muchos casos, el deterioro que presentan los firmes es debido a que las mezclas

bituminosas no han durado el tiempo para el que fueron diseñadas, como consecuencia de un mal control de calidad durante su ejecución.

Uno de los procesos más importantes y poco atendidos de la ejecución de las mezclas bituminosas es su control de calidad. En la mayoría de las ocasiones se presta más atención a la selección de materiales, diseño u otros procesos, que al control de calidad de la obra. Es cierto que la selección de materiales y un buen diseño de la mezcla bituminosa están relacionados con la durabilidad de la misma, pero en muchos casos el buen control de calidad de una obra dependerá del éxito de la misma.

2.2.2 Desarrollo del control de calidad de las mezclas bituminosas

Durante los años 40 las mezclas bituminosas se convirtieron en una capa de rodadura útil para el traslado de vehículos y también para algunas pistas de aterrizaje, especialmente durante la segunda guerra mundial.

El control de calidad que había en aquel tiempo sobre la ejecución de una mezcla bituminosa era nulo, debido a que no había ni métodos, ni equipos, ni compromiso por parte del constructor para garantizar la calidad de ésta, ya que no había interés en conocer si las mezclas bituminosas colocadas tenía las características esperadas.

En esa época, y traídas de Estados Unidos, llegaron las primeras plantas de fabricación de mezcla a México, siendo éstas de producción continua. Posteriormente, a mediados de esta década, llegaron las dos primeras plantas de producción discontinua (*bachas*). Entonces se trabajaba con normas extranjeras debido a que la Secretaría de Comunicaciones no editó sus primeras normas hasta el año 1957, que eran traducción de las normas ASTM de 1953.

Uno de los primeros métodos que se usó como control de ejecución de las mezclas bituminosas, y que aún se aplica actualmente, es el de medir la densidad de la mezcla después de su compactación y compararla con la densidad de diseño, figura 2.1. Este método, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros responsable de construir mezclas

bituminosas durante la segunda guerra mundial, es sencillo, económico y está relacionado con las propiedades volumétricas que la mezcla debe tener.

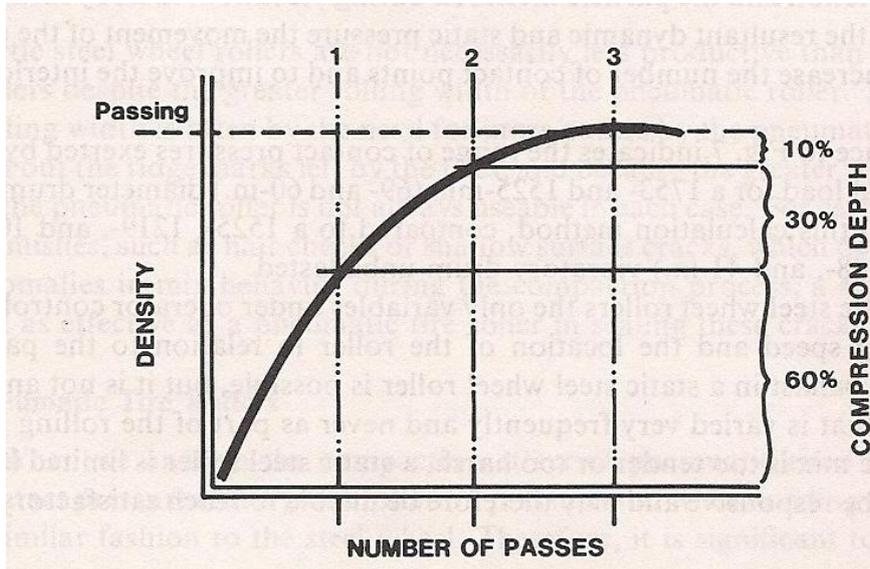


Figura 2.1 Curva de compactación típica (Fuente: Wagner, 1984).

En los años 40 se realizaron diversos estudios que determinaron que las densidades obtenidas sobre testigos extraídos de obra eran similares con las obtenidas sobre probetas fabricadas con la compactadora Marshall aplicando 50 golpes por cara.

Sin embargo, no fue hasta los años 60 cuando la *Federal Highway Administration* (FHWA) comenzó a exigir a los Departamentos de Transporte (DOT) y a los contratistas el aseguramiento de la calidad. En esos años, en los países latinoamericanos apenas se empezaba a contar con los equipos Hveem y Marshall para el diseño de mezclas bituminosas, mientras que en Estados Unidos el aseguramiento de control de calidad se convertía en un importante componente en la organización de los recursos de gerencia, en el que se consideraban actividades como el control de procesos, la aceptación y, algunas veces, el aseguramiento independiente del producto, tal como indica Radha [42]. Fue así como, poco a poco, se fue adoptando la consciencia del control de calidad de las mezclas bituminosas.

Radha [42] en 2006 mencionó: “El desempeño del producto final está relacionado con la especificación requerida y lo que el contratista logre con el producto final”. En ese mismo año se describieron las principales ventajas de la aceptación en el aseguramiento de la calidad:

1.- La responsabilidad de la calidad de los materiales y de la construcción reside en el contratista.

2.- Al contratista se le permite escoger los materiales, equipos y métodos para tener más control sobre los mismos y sobre la calidad de la construcción.

3.- La decisión de aceptación/rechazo es objetiva, consistente y estadísticamente defendible.

4.- Durante la construcción se le permitirá al constructor realizar un tramo de prueba, en el cual se puede realizar una inspección rápida, con el motivo de realizar correcciones en la construcción y pago de materiales.

En el año 2002, el Departamento de Transporte DELAWARE (DELDOT) modificó sus especificaciones para que en las mezclas bituminosas se consideraran conceptos de aseguramiento de la calidad, el cual plantea tener las acciones necesarias para proveer un adecuado producto o servicio que satisfaga los requerimientos de calidad.

Este protocolo menciona lo siguiente: el contratista es responsable de la calidad del proceso, mientras que el DOT es responsable del aseguramiento de la calidad. Para el DOT esto involucra componentes (70%) y aplicaciones (30%); dentro los componentes están las plantas de producción, mientras que en las aplicaciones están las mediciones de la densidad durante la colocación de la mezcla bituminosa. En este caso, el control de calidad propuesto se realizó sobre lotes de 2000 toneladas de mezcla; estos mismos lotes fueron divididos en sublotos de 500 toneladas cada una.

Los cinco ensayos que se realizaron durante el proyecto para el aseguramiento de la calidad fueron:

- a) Contenido de betún

- b) Granulometría
- c) Densidad
- d) Contenido de huecos
- e) Compactación con la máquina giratoria

Como se ha visto, el desarrollo de control de calidad mejoraba y dejaba de ser un simple requisito para convertirse en parte fundamental de la obra.

Sin embargo, en muchas ocasiones y en ciertos países, esto todavía no se ha logrado, ya que los Organismos encargados de gestionar las obras, por ahorrar en el concepto de supervisión, es decir, en lo correspondiente al “control de calidad” (menos del 1% del valor total de la obra), ponen en riesgo la calidad de la misma.

2.3 EL CONTROL DE CALIDAD DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS EN LA ACTUALIDAD

Para las organizaciones tanto europeas como las del resto del mundo, la calidad de un producto es el resultado de la calidad del diseño y la calidad de fabricación. En el caso particular de las mezclas bituminosas se debe añadir la calidad en el proceso de colocación del material, como anteriormente se ha señalado. Casi toda la normativa en el mundo va dirigida al producto que es empleado dentro de la obra, pero hasta el momento no existen normativas comunitarias dirigidas al control de aplicación de estos productos en obra. No se ha llegado a definir cuáles son las características a exigir al producto final, es decir, a la carretera o a la capa de mezcla construida.

Esto es debido, en primer lugar, a que cada carretera y cada capa tienen unas características singulares y es difícil dar unos valores que sirvan para todas, y, en segundo lugar, a que el objetivo principal de la normativa de calidad ha sido asegurar la calidad de los productos empleados pero no el producto final: la carretera.

No obstante, dentro de las diferentes administraciones de carreteras receptoras de las obras se observa una preocupación por fijar unos criterios y unos niveles mínimos de calidad de la obra ejecutada. Esto va dirigido, en el caso de las capas bituminosas, a definir unas características mecánicas y de compactación a exigir en la mezcla colocada y compactada, y unos niveles de regularidad de la capa ejecutada y, en el caso de los firmes, a controlar su capacidad estructural a partir de su deflexión y del módulo de las capas construidas.

Todo esto se encuentra, tal como se recoge y se analiza a continuación, en unos niveles muy incipientes y es lo que ha llevado a la elaboración de esta tesis, dirigida a mejorar y establecer unos procedimientos de control sobre el producto final.

El control de calidad de las mezclas bituminosas suele realizarse de dos formas: la primera, controlando el procedimiento de fabricación y puesta en obra de la misma, y la segunda, controlando el producto terminado (después de que haya sido extendido y compactado).

En los países europeos existe un debate en conocer cuál es la mejor forma de asegurar la calidad de la mezcla bituminosa ya extendida y compactada: si controlando todos los procedimientos de fabricación y puesta en obra, que resulta algo complejo, ó realizando un control de calidad sobre el producto final, el cual crea una cierta incertidumbre.

Para analizar cuál de estas dos formas de control de calidad está más extendida para garantizar la calidad de las mezclas, se han seleccionado algunos países para observar sus pliegos y normativas, y así poder tener una mejor perspectiva del control de calidad de las mezclas bituminosas en el momento de su ejecución.

Los países que fueron tomados como ejemplo para esta revisión sobre el uso normalizado del aseguramiento de la calidad de las mezclas bituminosas en el momento de su colocación son los siguientes: Estados Unidos (Alaska, Maryland, Texas, Washington, Wisconsin), México, Francia y España.

2.3.1 El control de calidad en el diseño

El diseño de una mezcla bituminosa se realiza teniendo en cuenta que ésta debe conseguir unos niveles mínimos de calidad, normalmente relacionados con las condiciones climatológicas y de tráfico a que va a ser sometida. La calidad en el proyecto de la mezcla bituminosa se establece definiendo unas prescripciones sobre el producto en sí y también sobre los materiales a emplear en su fabricación y sobre la composición de la misma, es decir, debe realizarse un control sobre:

- Los áridos
- El ligante
- La fórmula de trabajo

2.3.1.1 Control de los áridos

Los requisitos que se piden a los áridos son importantes ya que a partir de ellos una mezcla bituminosa puede tener mejores o peores propiedades funcionales y estructurales, y en consecuencia un mejor o peor comportamiento durante su servicio.

Los principales requisitos que se piden son los siguientes:

Árido grueso:

- Partículas fracturadas: este parámetro es importante para que la mezcla tenga mayor ángulo de fricción interna y, por lo tanto, mayor resistencia a las deformaciones plásticas.
- Partículas alargadas y lascas: de esta propiedad dependen las propiedades volumétricas de la mezcla.
- Desgaste de Los Ángeles: este parámetro está relacionado con las propiedades volumétricas de la mezcla, así como con las características funcionales de la capa bituminosa.
- Densidad: relacionada con las propiedades volumétricas de la mezcla.
- Pulimento: permite simular de manera acelerada en el laboratorio la susceptibilidad al pulimento que experimentan los áridos bajo la acción del tránsito real.

Árido Fino:

- Equivalente de arena: permite conocer la cantidad y la calidad de la fracción fina.
- Plasticidad: la plasticidad de los finos está relacionada con la adhesividad árido-ligante.
- Limpieza: nos define el porcentaje de masa de contaminantes, como grumos de arcilla, maderas, pizarras, micas y carbón dentro de los áridos.

Filler:

- Plasticidad: la plasticidad del filler está relacionada con la adhesividad árido-ligante.
- Granulometría: permite conocer la distribución de tamaños que tiene el material.

2.3.1.2 Control del ligante

De la misma forma en que los áridos, el control del ligante es muy importante, ya que éste influye directamente sobre las propiedades de la mezcla bituminosa.

El tipo de ligante generalmente se selecciona en función de la capa a la que se destine la mezcla bituminosa, de la zona térmica estival en que se encuentre y de la categoría de tráfico.

Algunos ensayos a los que son sometidos los betunes para comprobar su idoneidad son los siguientes:

- Penetración: ésta propiedad nos indica la consistencia de un betún, además de que es una forma de clasificar al betún.
- Punto de reblandecimiento anillo y bola: permite conocer la susceptibilidad térmica del betún
- Viscosidad: la viscosidad permite establecer las temperaturas de mezclado y compactación a las cuales el betún debe utilizarse, además que es una forma de clasificar al betún. La variación de la viscosidad con la temperatura define la susceptibilidad térmica del betún.
- Recuperación elástica por torsión: permite comprobar lo modificado que está un betún.
- Grado de desempeño (PG): se utiliza en casi todo el mundo para clasificar los betunes; además, mediante los ensayos que permiten determinar el PG se pueden conocer las propiedades reológicas de los betunes, las cuales son de gran importancia en el comportamiento mecánico de una mezcla bituminosa.

2.3.1.3 Establecimiento de la fórmula de trabajo

Después de comprobar las características de los áridos y del ligante, se debe establecer la cantidad de betún que debe llevar la mezcla que se está diseñado, es decir, establecer la fórmula de trabajo.

Seleccionada una granulometría de la mezcla, se fabrican probetas con diferentes contenidos de betún, que son ensayadas de acuerdo a lo establecido por el método de diseño.

Los diferentes métodos de diseño evalúan diferentes propiedades sobre la mezcla fabricada, algunos de estos métodos son:

- Diseño Marshall: es el método más utilizado en el mundo para el diseño de mezclas bituminosas. Además de controlar las propiedades volumétricas, se determina su estabilidad y flujo Marshall.
- Diseño Hvemmm: se controla la cohesión de la mezcla.
- Máquina giratoria: con este equipo se controlan las propiedades volumétricas de la mezcla compactada, así como su post-compactación.
- Diseño mecánico: en este tipo de diseño se encuentran los ensayos de simulación, como las máquinas de pista, los ensayos de fatiga, módulos, etc., que pretenden evaluar el comportamiento de las mezclas sometiéndolas a solicitaciones lo más parecidas posibles a las que tendrá en servicio.

2.3.2 El control de calidad en la fabricación

La fabricación se realiza en una planta formada por un conjunto de equipos mecánicos y electrónicos donde los áridos son calentados, secados y mezclados con el betún para producir una mezcla bituminosa en caliente según las proporciones deseadas y cumpliendo las especificaciones requeridas.

Durante la fabricación, se realizan controles sobre la planta para asegurar que funcione adecuadamente. Por otra parte, están los controles que se realizan a la mezcla fabricada, para asegurar que sea similar a la de mezcla diseñada.

2.3.2.1 Controles en planta

Martínez [30], en su Tesis Doctoral, describe los controles que se deben realizar a la planta de fabricación de mezcla, entre los que se destacan los siguientes:

1.- Sistema de dosificación de los áridos en frío: en las tareas de control se debe considerar la verificación de la carga en las tolvas, que se debe realizar en forma tal, que siempre estén llenas entre un 50 y 100% de su capacidad y tratando de minimizar la segregación y degradación del árido.

2.- Secador de áridos: es fundamental conseguir el tiro de aire necesario para que la combustión sea completa. El secador debe estar provisto de un termómetro que permita controlar la temperatura de los áridos a la salida.

3.- Colector de polvo: diariamente se controla la granulometría y densidad del filler de recuperación. Es preciso que el extractor de aire funcione en equilibrio con el mechero para lograr una combustión perfecta. Si a este balance se le añade una correcta alimentación de áridos, entonces la granulometría del material recuperado será uniforme.

4.- Sistema de clasificación de áridos en caliente: es importante que el rendimiento de las cribas se ajusten a la producción del mezclador. Además no deben sobrecargarse porque podría realizar una clasificación incorrecta del material. También se debe controlar que no se produzca rotura o desgaste de las mallas en las cribas.

5.- Silos de almacenamiento de los áridos cribados calientes: los silos cuentan con una alarma que advierte cuando el nivel de llenado es menor del necesario para asegurar el caudal previsto y un dispositivo para la toma de muestras de cada fracción de áridos. Están provistos de un termómetro para el control de la temperatura de los áridos.

6.- Sistema de alimentación del relleno mineral: debe realizarse un control frecuente de la cantidad de relleno mineral añadida a la mezcla pues esta variable puede afectar de modo considerable a la calidad de la mezcla. Para ello se debe revisar constantemente la calibración de los mecanismos de alimentación y pesado.

7.- Sistema de alimentación, calefacción y alimentación de ligante: se instalan varios termómetros para asegurar el control de temperatura del ligante. Para tomar muestras del ligante existen válvulas adecuadas en el tanque o la tubería.

8.- Sistema de dosificación de áridos, filler y del ligante bituminoso: en una planta discontinua se debe realizar un control periódico de las básculas y sistemas de dosificación. En una planta continua el control se puede hacer desviando parte del material que sale de cada silo. Es muy importante considerar la temperatura de bombeo porque la densidad del betún cambia y, además, esta temperatura debe mantenerse constante.

9.- Mezclador: en una planta discontinua se debe controlar el tiempo de mezclado mínimo necesario para obtener una masa homogénea, equilibrando con el máximo rendimiento posible. También es posible variar la velocidad de las paletas de los ejes, así como su forma y disposición. En una planta continua la combinación de áridos que pasa sobre la cinta es pesada continuamente. Es importante conocer la humedad del árido que entra al secador para realizar los ajustes en el medidor del ligante y asegurar la dosificación necesaria para el árido una vez seco.

10.- Descarga del mezclador: a la salida del mezclador, y de acuerdo al tipo de planta que se trate, la mezcla puede descargarse directamente al camión. Es importante controlar que la mezcla no se segregue al caer por un exceso de altura de descarga, ni que forme conos demasiados altos en el camión. La mezcla también puede llegar al camión a través de una cinta transportadora y en ese caso se debe cuidar que los finos no queden adheridos a la cinta. En esta etapa es fundamental el control de la temperatura de la mezcla en el camión, antes de iniciar el transporte.

2.3.2.2 Controles en mezcla fabricada

Los controles no terminan con las revisiones de la planta y los pesos de las cargas en los camiones. También se debe evaluar la mezcla fabricada, mediante los siguientes ensayos:

1.- Extracción del betún: mediante el ensayo de extracción se mide el contenido de betún, y se obtiene el árido limpio para el análisis granulométrico. Es la revisión final de todas las operaciones individuales que han hecho durante la producción de la mezcla, y puede ser de gran ayuda en la evaluación de la calidad de la mezcla. Cuando el ensayo muestre variaciones repetidas en sucesivas extracciones, se deberá efectuar una inspección cuidadosa de los alimentadores en frío, de la cubierta de la criba, de las

paletas y de la barra suministradora de betún. Adicionalmente, los tiempos de mezclado y de dosificación deberán ser revisados.

2.- Análisis granulométrico: sobre el árido extraído deberá efectuarse un análisis granulométrico, que permitirá asegurar la correcta calibración de la planta y fabricación de la mezcla.

3.- Densidad de mezcla: las determinaciones de densidad en la mezcla son necesarias para garantizar una correcta compactación de la mezcla. Comúnmente, las especificaciones requieren que la mezcla se compacte hasta un porcentaje mínimo de la densidad máxima teórica o de la densidad obtenida mediante compactación de laboratorio.

4.- Estabilidad Marshall: el ensayo Marshall sobre las probetas compactadas ayuda a verificar que la mezcla que se está fabricando tenga las mismas características que la de diseño, ya que variaciones en el tipo de árido, granulometría, contenido y tipo de betún pueden ser significativas en los cambios de valores de estabilidad Marshall.

2.3.3 El control de calidad en la puesta en obra

Las etapas incluidas en la puesta en obra de la mezcla bituminosa son el transporte de la misma, su extensión sobre la superficie preparada y su compactación.

La preparación de la superficie existente exige que se compruebe la regularidad superficial de la capa subyacente. Si la superficie está constituida por una mezcla bituminosa, se debe ejecutar un riego de adherencia, si es granular o tratado con conglomerantes hidráulicos, se ejecuta un riego de imprimación.

Se toman las medidas de control correspondientes al riego aplicado: verificar el plazo de rotura o de curado del mismo, que no queden restos de fluidificante o de agua en la

superficie y que mantenga su capacidad de adherencia si ha transcurrido mucho tiempo desde su aplicación.

2.3.3.1 Transporte

Es la etapa en la que la mezcla es trasladada de la central de fabricación a la extendedora por medio de camiones. Es inevitable el enfriamiento de la mezcla por efecto en la temperatura ambiente y el viento. De todos modos, estando la mezcla protegida con una lona, figura 2.2, sólo se enfría en la zona superficial, aunque se debe evaluar las condiciones climáticas de cada caso para determinar las distancias de transporte máximas posibles. Debe especificarse que la temperatura de la mezcla en el momento de la descarga no sea menor a la especificada en la fórmula de trabajo.

También es importante evitar la segregación de la mezcla durante la carga y la descarga de los camiones, y para ello se debe mantener una altura mínima de descarga y evitar la formación de pilas cónicas de material, haciendo que el camión se mueva lentamente o esparciendo la mezcla lateralmente en la caja.



Figura 2.2 Transporte de mezcla bituminosa

2.3.3.2 Extendido

Normalmente el camión descarga la mezcla sobre la tolva de la extendedora y ésta se distribuye sobre la superficie a través de cintas y compuertas que regulan la salida del material.

El extendido normalmente se realiza en franjas longitudinales, figura 2.3, calculando el ancho de las franjas de tal modo que se realice el menor número de juntas posibles. La extendedora se regula para que la capa extendida resulte lisa y uniforme, sin segregaciones, ni arrastres y con un espesor tal que, una vez compactada, se ajuste a la rasante y la sección transversal indicadas en los planos, con las tolerancias admitidas.

Durante el proceso de extendido de la mezcla bituminosa se debe:

- Verificar que no exista ninguna imperfección en la superficie de colocación
- Comprobar que exista riego de adherencia sobre la capas asfáltica subyacente
- Vaciar cuidadosamente y de manera continua la mezcla bituminosa sobre la extendedora
- Verificar que las planchas de la extendedora se encuentren calentadas adecuadamente
- Controlar el espesor de mezcla que se está colocando
- Cuidar que no se produzcan imperfecciones durante el extendido de la mezcla



Figura 2.3 Colocación de mezcla bituminosa

2.3.3.3 Compactación

Una vez extendida la mezcla, pasan los compactadores, figura 2.4, que pueden ser neumáticos o lisos, con o sin vibración, y se elige en función del tipo y espesor de la mezcla. Se propone un plan de compactación que debe ser aprobado por el director de la obra de acuerdo a los resultados de un tramo de prueba. En esta oportunidad el director

puede ordenar modificar la fórmula de trabajo, cambiar la forma de empleo de algún equipo o su reemplazo.

Para poder conseguir la densidad necesaria, que suele expresarse como un porcentaje de la densidad Marshall de referencia, es de suma importancia que la temperatura de la mezcla se mantenga elevada, cerca de la temperatura óptima de compactación, para que sea posible su densificación.

La compactación debe realizarse de manera continua y sistemática, si la mezcla ha sido extendida en tres franjas, al compactar cada una de éstas, se ha de superponer la zona de compactación al menos quince centímetros.

Deben mantenerse limpios los elementos de compactación y en lo posible húmedos.

Los cambios de dirección de los compactadores deben hacerse sobre una superficie ya compactada y los cambios de sentido deben hacerse con mucha suavidad.



Figura 2.4 Compactación de una mezcla bituminosa

El control del producto terminado se lleva a cabo sobre el espesor, la compactación de la mezcla y el acabado de la capa, evaluando las tres características por capas asiladas y por lotes:

- Espesor: se extraen testigos aleatoriamente situados y se determina su espesor. La empresa puede realizar un control previo comprobando el espesor con un

vástago graduado, inmediatamente detrás de los compactadores cuando la capa está aún caliente. Siempre que la capa inferior esté bien definida y sea resistente al punzonamiento, con este método se pueden hacer muchas mediciones.

- Compacidad: La compacidad de la capa se evalúa comparando la densidad de un testigo extraído, figura 2.5, con la de una probeta de referencia fabricada a partir de la mezcla obtenida en planta. Los criterios de aceptación o rechazo están especificados en los pliegos correspondientes.



Figura 2.5 Extracción de un espécimen para obtener espesor y compacidad

- Acabado: la regularidad superficial del lote se comprueba con una regla de tres metros, con el índice de regularidad internacional (IRI) o con el viógrafo. Los criterios de aceptación o rechazo están especificados en los pliegos correspondientes. En las capas de rodadura se verifica la macrotextura con ensayos de círculo de arena y resistencia al deslizamiento.

2.4 REVISIÓN DE LAS NORMATIVAS DE CONTROL DE EJECUCIÓN

2.4.1 Estados Unidos

En los Estados Unidos la *Federal Highway Administration* (FHWA) se ha preocupado desde hace algunos años en estimular el aseguramiento de la calidad de las mezclas bituminosas en la construcción de su red federal y estatal de carreteras. Esta preocupación se refleja a través de políticas federales que se comunican a los estados de la unión para que cada uno de ellos las implemente dentro de su ámbito.

Una de las políticas federales emitida por la FHWA para el diseño, construcción y control de calidad de mezclas bituminosas data del 1 de Octubre de 1999. Esta política emitida por el Director Ejecutivo de la FHWA, invita a los departamentos de transporte estatales a considerar, tan pronto como sea posible, el diseño, construcción y control de calidad en cada proyecto que se lleve a cabo. También indica la forma en que se debe evaluar la calidad de la mezcla bituminosa y en que condiciones se debe o no construir.

Durante dicha política se indicó que el aseguramiento de la calidad de las mezclas bituminosas se realizará mediante la obtención de la densidad de la mezcla colocada, medición de espesores de capa y propiedades de terminado de obra como: rugosidad, permeabilidad, índice de rugosidad, etc., todo dependiendo del tipo de proyecto. La evaluación de la densidad de la mezcla bituminosa colocada se debe realizar correlacionando la densidad de campo con la densidad patrón, y la densidad de campo debe ser por lo menos del 95% de la densidad patrón. Esta densidad se puede realizar mediante la extracción de testigos de obra, allí mismo en campo mediante densímetros nucleares o mediante el Indicador de calidad del pavimento [5].

En el momento de evaluar la densidad de la mezcla bituminosa colocada se tuvo el problema de que no se tenía una correlación entre las tres formas mencionadas. En noviembre de 2001 el Sr. Pedro Romero, por encargo de la Federal Highway Administration, realizó un estudio en varios proyectos, en los cuales encontró diferencias en la correlación entre el Indicador de calidad modelo 300 y la densidad de testigos de obra mediante el ensayo AASTHO T-166: en el 17% de los proyectos fue de 0,9 y en el 60% de los proyectos fue de 0,71, mientras que la diferencia en la correlación del densímetro nuclear con el ensayo de testigos AASTHO T-166, en el 29% de los proyectos fue de 0,9 y en el 40% de los proyectos fue de 0,71. Se puede observar, pues, que existe un problema en la correlación entre las diferentes formas de

medir la densidad. Además, podemos añadir que el densímetro nuclear requiere tener licencia para su adquisición y su uso, y tiene que existir un entrenamiento previo del usuario, entre otros aspectos [1].

El Indicador de calidad tiene que ser calibrado para diferentes tipos de árido y tipos de betún, dependiendo de condiciones ambientales como la temperatura, la humedad, etc.

Es por esto, y otros factores, que el aseguramiento de la calidad de las mezclas bituminosas colocadas, a partir de la obtención de densidades de testigos, tiene muchas incertidumbres en el momento de evaluar si un firme está o no bien construido y, por consiguiente, un problema en el momento de aceptar, penalizar o rechazar un firme.

Otras cuestiones que se indicaron durante dicha política fue que en el momento de colocar y compactar la mezcla bituminosa las condiciones ambientales deben ser favorables, además de que no debe existir lluvia, nieve, exceso de viento o exceso de frío. También se indicó que al terminar la compactación, la temperatura de la mezcla bituminosa deber ser mayor a 79 °C [5].

En Octubre de 2004 la Federal Highway Administration publicó un artículo relativo a la evaluación de los procedimientos para asegurar la calidad recogidos en las especificaciones FHWA-HRT-04-046, en el cual se propusieron ciertas especificaciones y medidas de control de calidad de las mezclas bituminosas, en ciertos estados de Estados Unidos.

A continuación, tablas 2.1 a 2.5, se mostrarán ejemplos de especificaciones de algunas DOT de Estados Unidos, en lo que se refiere a control de calidad de fabricación y ejecución de una mezcla bituminosa [1].

ALASKA

Prueba	Localización de la muestra	Frecuencia de muestreo por el contratista	Frecuencia de muestreo por el DOT de Alaska
Granulometría	Del camión	Determinada por el	1 por sublote

extraída		contratista	
Contenido de betún	Del camión	Determinada por el contratista	1 por sublote
Densidad	Testigo de obra	Determinada por el contratista	1 por sublote

Tabla 2.1 Especificaciones de colocación de mezcla bituminosa en el estado de Alaska (Fuente:

www.fhwa.dot.gov).

MARYLAND

Prueba	Localización de la muestra	Frecuencia de muestreo por el contratista	Frecuencia de muestreo por el DOT de Maryland
Densidad	Testigo de obra	5 corazones por 1000 Ton.	3 corazones por 6000 Ton.
Granulometría	Planta de mezcla	1 por día	1 por lote
Contenido de betún	Planta de mezcla	1 por día	1 por lote
VAM	Planta de mezcla	1 por día	1 por lote
Flujo Marshall	Planta de mezcla	1 por día	1 por lote
Estabilidad Marshall	Planta de mezcla	1 por día	1 por lote
Medición de rugosidad	En el lugar	Cada 0,1 millas de construcción	Depende a especificación

Tabla 2.2 Especificaciones de colocación de mezcla bituminosa en el Estado de Maryland (Fuente:

www.fhwa.dot.gov).

TEXAS

Prueba	Localización de la muestra	Frecuencia de muestreo por el contratista	Frecuencia de muestreo por el DOT Texas
Temperatura de mezcla bituminosa	Planta de mezcla	1 por sublote	1 por día
Porcentaje de huecos	En el lugar	1 por sublote	1 por 10 sublotos
Perdida del árido por decantación	Planta de mezcla	1 por 5 días de producción	1 por 10 sublotos
Esfuerzo a flexión a 7 días (viga Beenkelman)	En el lugar	No aplica	1 por sublote
Módulo de la mezcla bituminosa	Planta de mezcla	1 por día	1 por 10 sublotos

Equivalente de arena	Planta de mezcla	1 por 5 días de producción	1 por 10 sublotes
Impureza orgánica	Planta de mezcla	1 por día	1 por 10 sublotes
Medición de permeabilidad	En el lugar	1 por día	No aplica
Medición de espesor	Testigos de obra	1 por sublote	1 por sublote

Tabla 2.3 Especificaciones de colocación de mezcla bituminosa en el Estado de Texas (Fuente:

www.fhwa.dot.gov).

WASHINGTON

Prueba	Localización de la muestra	Frecuencia de muestreo por el contratista	Frecuencia de muestreo por el DOT Washington
Granulometría extraída (malla 5/8", 1/2", 3/8", 1/4, #10 y #200)	Del camión	A consideración del contratista	5 por lote
Contenido de betún	Del camión	A consideración del contratista	5 por lote
Densidad	En el lugar ó testigos de obra	A consideración del contratista	5 por lote
Medición de rugosidad	En el lugar	A consideración del contratista	1 por lote
Trituración de árido	Planta de mezcla	A consideración del contratista	5 por lote

Tabla 2.4 Especificaciones de colocación de mezcla bituminosa en el Estado de Washington (Fuente:

www.fhwa.dot.gov).

WISCONSIN

Prueba	Localización de la muestra	Frecuencia de muestreo por el contratista	Frecuencia de muestreo por el DOT Wisconsin
Granulometría extraída	Del camión	A consideración del contratista	Depende especificación
Porcentaje de huecos	Del camión	A consideración del contratista	Depende especificación
VAM	Del camión	A consideración del contratista	Depende especificación
Contenido de betún	Del camión	A consideración del contratista	Depende especificación

Tabla 2.5 Especificaciones de colocación de una mezcla bituminosa en el Estado de Wisconsin (Fuente:

www.fhwa.dot.gov).

2.4.2 Asphalt Institute

Desde los años 90 en Estados Unidos, especialmente el Asphalt Institute, se ha investigado cómo mejorar los diseños de las mezclas bituminosas, indicándose los factores que más afectan los procesos de ejecución de una mezcla bituminosa [5].

En los diferentes procesos en la ejecución de una mezcla bituminosa se menciona lo siguiente:

2.4.2.1 Carga de la mezcla bituminosa en el camión

Durante el proceso de carga de la mezcla existen algunos problemas que se pueden presentar, entre los cuales el Asphalt Institute menciona los siguientes:

- Humo Azul
- Apariencia dura
- Asentamiento de la mezcla en el camión
- Apariencia opaca y magra
- Vapor ascendente
- Segregación
- Contaminación
- Exudación

En demasiadas ocasiones, estos problemas no se detectan o no se les da la atención necesaria; sin embargo, son de suma importancia para que la mezcla que es transportada tenga las mismas características que la mezcla proyectada.

2.4.2.2 Colocación de la mezcla bituminosa

La calidad de la mezcla y consecuentemente la durabilidad de la misma como parte del firme, dependerá de cómo se lleve a cabo la colocación de la mezcla bituminosa. El Asphalt Institute señala algunos detalles a cuidar durante este proceso:

- Ajuste del enrasador durante la ejecución

- Ancho de distribución
- Operaciones manuales
- Temperatura de la mezcla bituminosa
- Apariencia de la superficie
- Pendiente de la calzada

2.4.2.3 Compactación

El proceso más importante en la ejecución de una mezcla bituminosa es la compactación, proceso que consiste en comprimir un volumen de una mezcla bituminosa en uno más pequeño. El Asphalt Institute indica que “La compactación ha sido exitosa cuando la capa terminada tiene valores óptimos de huecos y densidad”.

Es importante que se logren los valores esperados de densidad y huecos, ya que son importantes en la durabilidad de una mezcla: el oxígeno del agua y del aire puede oxidar el ligante bituminoso, causando su fragilidad, lo que implicará que el firme no resista las cargas repetidas del tráfico, provocando su fallo.

Por otra parte el Asphalt Institute también señala: “Un pavimento que no ha sido compactado correctamente durante su construcción presentará huellas o surcos a causa de su canalización. Por otra parte, si no se dejan huecos suficientes en la mezcla compactada, entonces el firme presentará un afloramiento y tendrá a volverse inestable debido a la reducción del contenido de huecos causada por el tráfico y el flujo provocado por altas temperaturas”, figura 2.6.

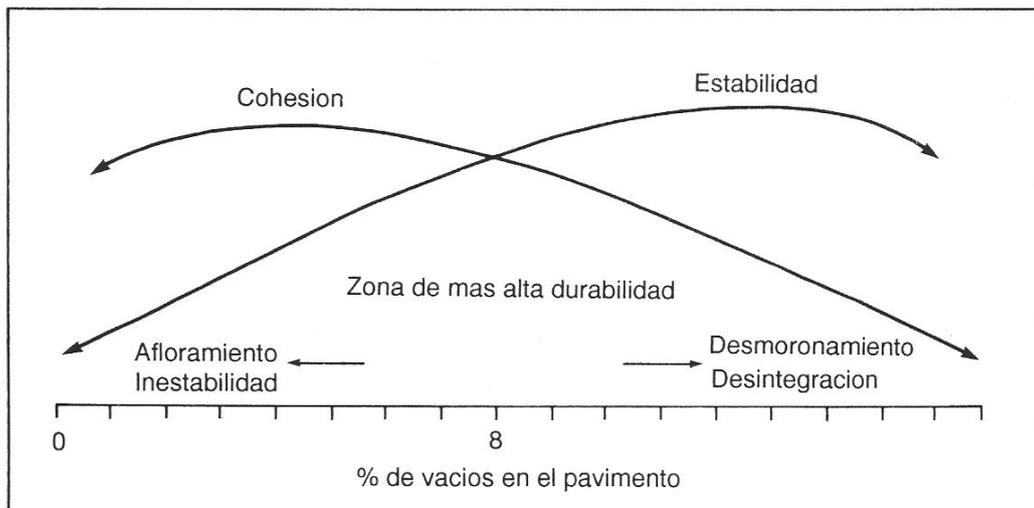


Figura 2.6 Durabilidad del firme vs Contenido de huecos (Fuente: Asphalt Institute, 1991).

Factores que afectan la compactación

- **Árido:** la granulometría y el tamaño máximo del árido, así como su textura y angulosidad son las características que pueden afectar más a la trabajabilidad y compactación de una mezcla bituminosa. A medida que aumenta el tamaño máximo de árido, o el porcentaje del agregado árido, la trabajabilidad disminuye y, por tanto, se requiere un mayor esfuerzo de compactación para obtener la densidad deseada.
- **Betún:** debido a que durante la compactación el betún trabaja como un lubricante, este debe tener cierta fluidez para que las partículas de árido se muevan unas respecto a otras. A medida que el betún se enfría, pierde esta fluidez y la mezcla resulta menos trabajable.
- **Temperatura de mezclado:** es fundamental que la mezcla bituminosa se fabrique a una temperatura adecuada; si se fabrica a baja temperatura, la mezcla puede tener problemas de compactación, y si se fabrica con a altas temperaturas el betún puede dañarse.

Uno de los principales problemas cuando la mezcla se produce a altas temperaturas es el cuarteo por calor, el Asphalt Institute indica que “El cuarteo por calor es un fenómeno común que ocurre durante la compactación de las mezclas asfálticas, figura 2.7, particularmente cuando se colocan capas delgadas”.

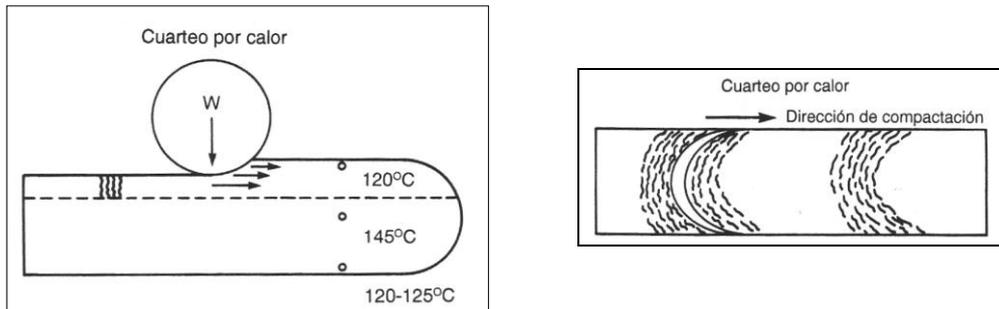


Figura 2.7 Cuarteo por calor (Fuente: Asphalt Institute, 1991).

- Efectos ambientales: la temperatura ambiente, la humedad, el viento y las superficies frías acortan el tiempo durante el cual se debe efectuar la compactación, figura 2.8.
- Espesor de capa: es más fácil compactar capas gruesas que delgadas, ya que estas tardan más tiempo en enfriarse, pero por otra parte para compactar capas muy gruesas se requiere de equipos de compactación especiales.

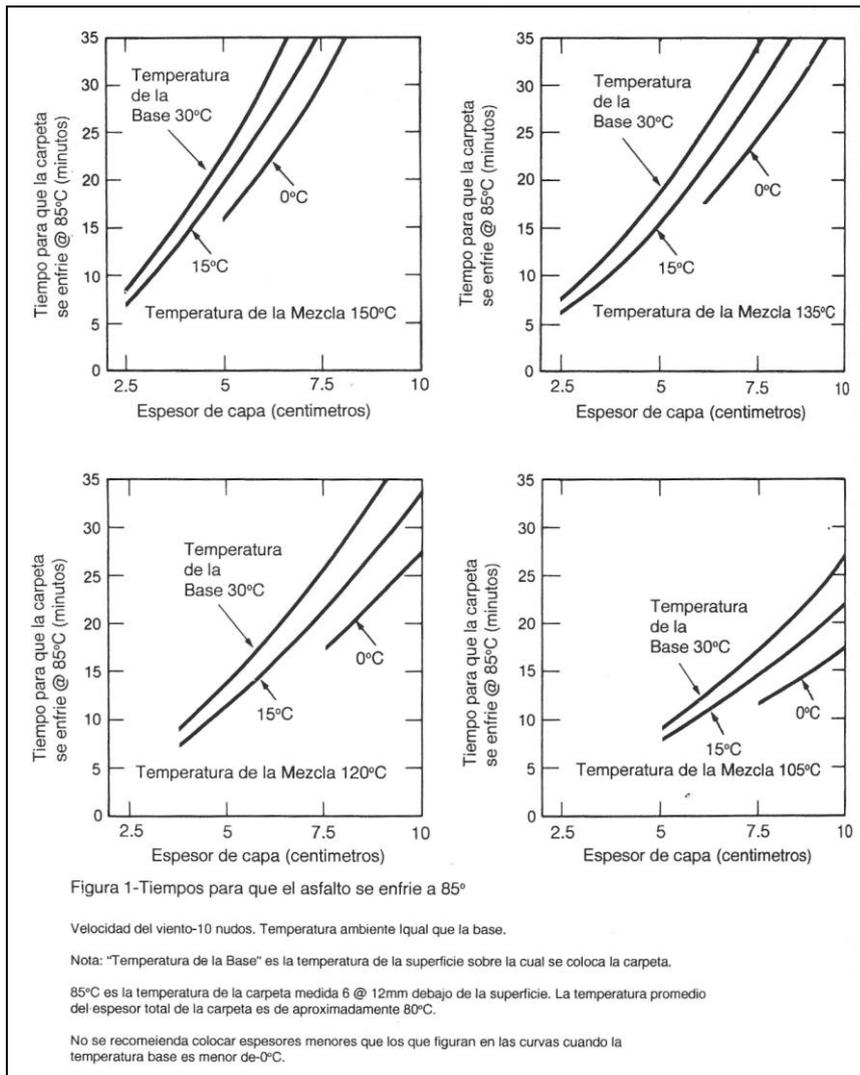


Figura 2.8 Tiempo mínimo de compactación, basado en temperatura, espesor de mezcla bituminosa y en la temperatura de la capa de soporte (Fuente: Asphalt Institute, 1991).

Requisitos de aprobación y verificación del firme

El Asphalt Institute menciona tres criterios para la aprobación de una capa compactada:

- Textura superficial: los defectos de la textura superficial pueden ser causados por errores en el mezclado, en el manejo, en la colocación o en la compactación.
- Tolerancia de la superficie: la variaciones en la regularidad de la capa no deberán exceder 6 mm bajo una regla recta de 3 metros colocada perpendicularmente a la línea central, y 3 mm cuando sea colocada paralelamente a la línea central.

- Densidad: la densidad del pavimento se considera aceptable o no, cuando se compara la densidad de referencia establecida en el laboratorio con una muestra de campo. Existen tres métodos básicos para determinar la densidad de referencia:
 1. Porcentaje de densidad de laboratorio: la densidad de referencia se obtiene como promedio de cuatro ó más probetas de laboratorio preparadas con mezcla proveniente de los camiones que llegan a la obra.
 2. Porcentaje de la densidad máxima teórica: la densidad de referencia se obtiene calculando cual sería el peso unitario de la mezcla si se compactara hasta que no tuviera huecos.
 3. Densidad de la sección de prueba: la densidad de referencia se obtiene a partir de un tramo de prueba construido.

En cualquier caso, se debe lograr el 92% de la densidad máxima teórica o el 96% de la densidad de laboratorio, según sea el caso, antes que la mezcla bituminosa se enfríe a una temperatura de 85 °C.

En resumen, las recomendaciones del Asphalt Institute para el control de ejecución de las mezclas bituminosas están orientadas a controlar las operaciones de carga, extendido y compactación, y los requisitos de aprobación de la capa ejecutada están basados en la medida de la densidad, textura superficial y regularidad, pero no en un ensayo mecánico del producto final.

2.4.3 México

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes emitió la Normativa para la Infraestructura del Transporte en el año de 1999. En esta normativa, dentro del libro de Control de Calidad, se encuentran las normas que deben cumplir los trabajos ó ensayos que deben realizarse en el momento de la ejecución de una mezcla bituminosa.

La norma N-CMT-4-05-003/08, establecida por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes y publicada en Internet en la página del Instituto Mexicano del Transporte www.imt.mx, establece los siguientes parámetros y normas a seguir al momento de colocar una mezcla bituminosa [39]:

2.4.3.1 Condiciones de elaboración de una mezcla bituminosa

Las mezclas bituminosas en caliente se elaboran a las temperaturas más bajas posibles que permitan obtener una mezcla y cubrimiento árido uniforme, pero lo suficientemente altas para disponer del tiempo requerido para su transporte, extendido y compactación. En general, las temperaturas de mezclado dependen del tipo de betún y se muestran en la tabla 2.6:

Clasificación del betún	Temperatura de mezclado (°C)
AC-5	120 - 145
AC-10	120 - 155
AC-20	130 - 160
AC-30	130 - 165

Tabla 2.6 Recomendaciones mexicanas de temperaturas de mezclado para mezclas fabricadas en caliente

(Fuente: www.imt.mx).

Para betunes modificados con polímero será necesario preguntar al fabricante del modificador la temperatura de mezclado óptima.

En la tabla 2.6 aparece una clasificación de betunes, que ya no existe en México, ya que actualmente los betunes se clasifican respecto a su grado de desempeño (PG); es por ello que esta tabla no es de aplicación y será mejor realizar una carta de viscosidad-temperatura para saber la temperatura de mezclado.

Las mezclas no se colocarán, ni compactarán, si la temperatura ambiente es menor a 5 °C, ni tampoco si se presenta amenaza de lluvia, ni ráfagas fuertes de viento.

Las temperaturas mínimas de colocación y compactación de la mezcla bituminosa, serán determinadas por el responsable de esas actividades, mediante la curva de viscosidad-temperatura del material bituminoso que se utilice.

Al igual que el mezclado, para los betunes modificados con polímero, será necesario preguntar al fabricante del modificador la temperatura óptima de extendido y compactación.

Los espesores de las capas compactadas que se construyan con mezcla bituminosa en caliente, no serán menores que una vez y media (1,5) el tamaño nominal del árido utilizado.

El espesor máximo de la capa será aquel que el equipo que sea capaz de compactar, de tal forma que la diferencia entre el grado de compactación de los tres (3) centímetros superiores y los tres (3) centímetros inferiores, no difiera en más del uno (1) por ciento; si esto sucede, la capa se compactará en dos o más capas.

Las capas construidas con mezcla bituminosa, serán compactadas como mínimo al noventa y cinco (95) por ciento de su masa volumétrica máxima, determinada en cada caso, de acuerdo a los métodos de densidad de referencia que fije la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

2.4.3.2 Transporte y almacenamiento de las mezclas bituminosas en caliente

Con el propósito de evitar alterar las características de las mezclas bituminosas en caliente antes de su utilización en la obra, se tendrá cuidado en su transporte y almacenamiento, atendiendo a los siguientes aspectos:

La mezcla bituminosa en caliente puede ser almacenada por corto tiempo en tolvas metálicas sin orificios, con superficie interior lisa y limpia, pero teniendo en cuenta que la temperatura de la mezcla se reducirá rápidamente. No se permite el almacenamiento en pilas, ni en montones, aún cuando éstos se cubran con lonas.

Si se utilizan silos térmicamente aislados, la mezcla puede ser almacenada hasta veinticuatro (24) horas sin pérdidas de temperatura, ni calidad considerable.

De requerirse varios periodos de almacenamiento, se utilizarán silos que incluyan sistemas de calentamiento que permitan mantener la temperatura de la mezcla, pero cuidando que no se presente un escurrimiento u oxidación de la mezcla.

Las mezclas bituminosas en caliente se transportarán en vehículos con caja metálica con superficie interior lisa, sin orificios y que esté siempre limpia y libre de residuos de mezcla bituminosa, para evitar que ésta se adhiera a la caja.

Antes de cargar el vehículo de transporte, se limpiará su caja y se cubrirá la superficie de la misma con un lubricante para evitar que se adhiera la mezcla, utilizando para ello una solución de agua y cal, agua jabonosa o algún producto comercial apropiado. En ningún caso deberá utilizarse productos derivados del petróleo, como diesel, debido a sus problemas ambientales y posibles daños a la mezcla. Una vez hecho lo anterior, se levantará la caja para drenar el exceso de lubricante.

El vehículo de transporte se llenará con varias descargas sucesivas de la mezcla para minimizar la segregación de los áridos, acomodándolos de los extremos de su caja hacia el centro.

Una vez cargado el vehículo de transporte, se cubrirá la mezcla bituminosa con una lona que la preserve del polvo, materias extrañas y de la pérdida de calor durante el trayecto.

El tiempo de transporte está en función de la pérdida de temperatura de la mezcla, que será colocada y compactada a las temperaturas mínimas determinadas en la carta de viscosidad-temperatura; sin embargo, para el caso de granulometrías abiertas o porosas, el tiempo de transporte será menor a una hora y media (1,5), para evitar el escurrimiento del betún.

La temperatura de fabricación de la mezcla no deberá incrementarse para que al final de su transporte tenga la temperatura adecuada para su colocación y compactación.

En el caso de mezclas bituminosas de granulometrías abiertas o porosas, se considerará lo siguiente:

- No transportar por caminos sin pavimentar.
- Se manejarán de tal forma que el contenido de betún en la parte superior e inferior de la mezcla en el camión o almacenamiento, esté dentro de las tolerancias establecidas.

2.4.3.3 Criterios de aceptación o rechazo

La aceptación de mezclas bituminosas por parte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, se hace considerando lo siguiente:

El contratista de la obra será responsable de demostrar que la mezcla cumple con los requisitos señalados, como son: características del árido, granulometría, porcentaje de betún, tipo de betún, Estabilidad y Flujo Marshall, huecos en la mezcla, VAM (huecos en los áridos) y huecos rellenos con betún. El contratista entregará a la Secretaría un certificado de calidad que garantice el cumplimiento de los requisitos de la norma, expedido por su propio laboratorio ó un laboratorio externo, aprobado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Durante el proceso de producción, con objeto de controlar la calidad de la mezcla bituminosa durante la ejecución de la obra, el contratista de obra, por cada doscientos (200) metros cúbicos ó fracción de la mezcla de un mismo tipo producido en la planta, realizará las pruebas necesarias que aseguren que cumplen con el contenido de betún establecido en esta norma y entregará los resultados a la Secretaría.

En el caso de mezclas en caliente con granulometría densa, el contratista realizará las pruebas necesarias para garantizar que la mezcla bituminosa ha sido extendida y compactada adecuadamente, como son estabilidad Marshall ó Hvemmm, densidad, índice de regularidad superficial y textura de la mezcla.

Cabe señalar que la estabilidad sólo suele medirse en algunas ocasiones, y es un ensayo que no arroja resultados del comportamiento mecánico de la mezcla bituminosa, y por lo tanto no puede ser tomado como un ensayo de aceptación ó rechazo.

En cualquier momento, la Secretaría puede verificar que la mezcla bituminosa suministrada cumpla con cualquiera de los requisitos de calidad establecidos en la norma, según el tipo de mezcla que se trate, siendo motivo de rechazo el incumplimiento de cualquiera de ellos.

2.4.4 Francia

La Asociación Francesa de Normalización (AFNOR), junto con el Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), se han encargado de determinar ciertos criterios, para asegurar la calidad de las mezclas bituminosas colocadas y compactadas. Estos criterios son los siguientes [3]:

2.4.4.1 Temperatura de compactación

La temperatura de compactación mínima que sugiere el LCPC es de 120 °C, ya que por debajo de esta temperatura, las mezclas bituminosas se vuelven más difíciles de densificar. Se prohíbe la compactación con temperaturas bajas y con amenaza de lluvia.

No se permite el transporte de la mezcla sin lona que la proteja de las contaminaciones del medio ambiente y de la pérdida de temperatura; además, no se permiten trayectos más largos a 1,5 horas, ya que en Francia existen aproximadamente 76 plantas de mezclas que cubren todo el territorio francés.

2.4.4.2 Compactación

La compactación debe ser efectuada con neumáticos o rodillos lisos. El espesor máximo de mezcla bituminosa a compactar es de 15 cm.

2.4.4.3 Densidades

Las densidades son medidas por medio de extracción de testigos de obra ó por aparatos nucleares, figura 2.9. La especificación de densidad establece que el porcentaje de vacíos de la mezcla compactada debe estar entre 4 y 8 por ciento.

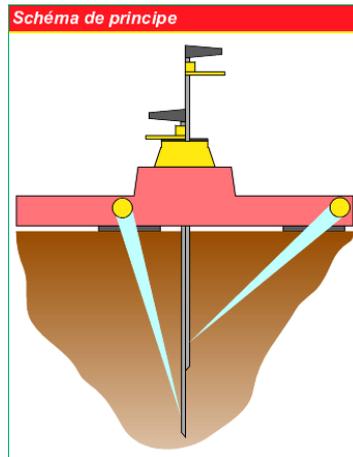


Figura 2.9 Ilustración de un aparato nuclear (Fuente: www.afnor.org).

2.4.4.4 Permeabilidad

La permeabilidad de las mezclas bituminosas deben ser medida tanto en granulometrías de textura cerrada, como en microaglomerados y mezclas drenantes, figura 2.10.



Figura 2.10 Equipo Francés para determinar permeabilidad (Fuente: www.afnor.org).

2.4.4.5 Espesor de la mezcla bituminosa

El espesor de la mezcla bituminosa compactada es verificado a través de la extracción de testigos de obra y con equipos de ondas magnéticas, figura 2.11.



Figura 2.11 Equipo para determinar espesores de firmes mediante ondas electromagnéticas (Fuente: www.afnor.org).

2.4.4.6 Textura

La textura es evaluada mediante el ensayo del círculo de mancha de arena. Los valores promedios necesarios son de 0,7 mm y el valor mínimo permitido es de 0,4 mm.

2.4.4.7 Índice de perfil longitudinal y transversal

La medición de índice del perfil longitudinal se realiza mediante el equipo APL, figura 2.12, y la medición del índice de perfil transversal se obtiene mediante el equipo transversoperfilógrafo estático ó dinámico.



Figura 2.12 Ilustración del equipo APL (Fuente: www.afnor.org).

Como se observa en los criterios establecidos por la AFNOR y el LCCP, no se cuenta con ningún ensayo mecánico que verifique la calidad de la mezcla bituminosa.

Los parámetros son muy similares a los que se establecen en Estados Unidos y México.

2.4.5 España

La normativa que recoge las especificaciones para el diseño y control de mezclas en caliente se encuentra en el artículo 542 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), actualizado en el año 2008. Este artículo trata sobre mezclas en caliente tipo de hormigón bituminoso y hace referencia a algunas particularidades, que se deben seguir al momento de colocar y compactar las mezclas bituminosas. En el artículo 543 se recogen las especificaciones para las mezclas discontinuas y drenantes.

En este documento (artículo 542, PG-3) se menciona lo siguiente [12]:

2.4.5.1 Transporte

La mezcla será transportada en camiones de caja lisa y estanca, perfectamente limpia, y que se tratará para que la mezcla bituminosa no se adhiera.

La forma y altura de la caja deberá ser de tal forma que, durante el momento del vertido de la mezcla a la extendedora, el camión solo toque a ésta a través de los rodillos previstos al efecto.

Los camiones deberán estar provistos de una lona o cobertor adecuado para proteger la mezcla bituminosa en caliente durante su transporte.

2.4.5.2 Extendedora

La extendedora será autopropulsada y estará dotada de los dispositivos necesarios para extender la mezcla bituminosa en caliente con la geometría y producción deseada y con un mínimo precompactación.

La extendedora deberá estar dotada de un dispositivo automático de nivelación, y de un elemento calefactor para la ejecución de la junta longitudinal.

2.4.5.3 Equipos de compactación

Se podrán utilizar rodillos metálicos, estáticos o vibrantes, de neumáticos o mixtos. Todos los compactadores deberán ser autopropulsados, tener inversores de sentido de marcha, de acción suave, y estar dotados para la limpieza de sus llantas o neumáticos durante la compactación y para mantenerlos húmedos en caso necesario.

2.4.5.4 Temperatura de compactación

Solo se señala que no se deberá colocar mezcla sobre superficies húmedas, cuando se encuentre lloviendo, ni cuando la temperatura ambiente sea fría.

2.4.5.5 Compactación

La compactación se debe realizar a la mayor temperatura posible, sin rebasar la prescrita en la fórmula de trabajo, y sin que se produzca un desplazamiento de la mezcla extendida; y se continuará mientras la temperatura no baje de la mínima prescrita en la fórmula de trabajo y la mezcla se halle en condiciones de ser compactada, hasta que alcance la densidad que se requiere.

La compactación se realizará longitudinalmente y de manera continua y sistemática. Si la extensión de la mezcla bituminosa se realizará por franjas, al compactar una de ellas se ampliará la zona de compactación para que incluya por lo menos 15 cm de la anterior.

2.4.5.6 Especificaciones

Densidad

La densidad no deberá ser inferior al siguiente porcentaje de la densidad de referencia:

- Capas de espesor igual o superior a seis centímetros (6 cm): noventa y ocho por ciento (98%).
- Capas de espesor no superior a seis centímetros (6 cm): noventa y siete por ciento (97%).

Rasante, espesor y anchura

La superficie acabada, no deberá diferir de la teórica en más de diez milímetros (10 mm) en capas de rodadura, ni de quince milímetros (15 mm) en las demás capas.

El espesor de una capa no deberá ser inferior al previsto para ella en la sección tipo de los planos.

En todos los semiperfiles se comprobará la anchura extendida que en ningún caso deberá ser inferior a la teórica deducida de la sección tipo de los planos del proyecto.

Regularidad superficial

El índice de regularidad internacional (IRI), solo para capas de rodadura o intermedias, según la NLT-330, deberá cumplir con las especificaciones recogidas en la tabla 2.7.

Porcentaje de hectómetros	Calzada de autopistas y autovías	Resto de vías	Otras capas bituminosas
50	< 1,5	< 1,5	< 2,0
80	< 1,8	< 2,0	< 2,5
100	< 2,0	< 2,5	< 3,0

Tabla 2.7 Índice de Regularidad Internacional (IRI), para firmes de nueva construcción (Fuente: www.carreteros.org).

Macrotextura superficial y resistencia al deslizamiento

La superficie de la capa deberá presentar una textura homogénea, uniforme y exenta de segregaciones.

Únicamente a efectos de recepción de capas de rodadura, la macrotextura superficial, según la norma UNE-EN 13036-1, y la resistencia al deslizamiento, según la norma NLT-336, no deberán ser menores que los valores mostrados en la tabla 2.8.

Característica	Mezcla drenante	Resto de mezclas
Macrotextura superficial (*) valor mínimo (mm)	1,5	0,7
Resistencia al deslizamiento (**) CTR mínimo en (%)	60	65

(*) Medida antes de la puesta en servicio de la capa

(**) Medida una vez transcurrido dos meses de la puesta en servicio de la capa

Tabla 2.8 Macrotextura superficial y resistencia al deslizamiento (Fuente: www.carreteros.org).

2.4.5.7 Muestreo

Prueba	Localización de la muestra	Frecuencia de muestreo
Granulometría	Planta de mezcla	2 veces al día
Equivalente de arena	Planta de mezcla	2 veces al día
Índice de lajas	Planta de mezcla	1 vez a la semana
Partículas trituradas	Planta de mezcla	1 vez a la semana
Impurezas del árido grueso	Planta de mezcla	1 vez a la semana
Desgaste de Los Ángeles	Planta de mezcla	1 vez al mes
Densidad relativa	Planta de mezcla	1 vez al mes
Pulimento acelerado	Planta de mezcla	1 vez al mes
Verificación de mezcla fabricada en planta (granulometría extraída, contenido de betún, ensayos Marshall y análisis de huecos	Planta de mezcla	2 muestras diarias
Verificación de mezclas de alto módulo (ensayo de módulo a 20 °C)	Planta de mezcla	1 muestra al día
Verificación de mezclas drenantes (ensayo de perdida por desgaste)	Planta de mezcla	1 muestra al día
Determinación de espesor	Extracción de testigos de obra	5 por día
Densidad	Extracción de testigos de obra	5 por día
Regularidad superficial de la mezclas bituminosas	En el lugar	A las 24 h de puestas en servicio
Macrotextura en capas de rodadura	En el lugar	5 por día
Resistencia al deslizamiento en capas de rodadura	En el lugar	A los 2 meses de puestas en servicio

Tabla 2.9 Especificaciones de pruebas y frecuencia de muestreo (Fuente: www.carreteros.org).

2.4.5.8 Criterios de aceptación o rechazo

Densidad

En mezclas densas, semidensas y gruesas, la densidad no deberá ser menor a lo especificado. Si no se procederá de la siguiente manera:

- Si la densidad media obtenida es inferior al noventa y cinco por ciento (95%) de la densidad de referencia, se procederá a levantar la mezcla bituminosa correspondiente al lote controlado mediante fresado y se repondrá por cuenta del contratista.
- Si la densidad media obtenida no es inferior al noventa y cinco por ciento (95%) de la densidad de referencia, se penalizará económicamente con un diez por ciento (10%) del lote controlado.

Espesor

Los espesores deben cumplir con lo especificado en el contrato, no se podrá tener una variación de más del diez por ciento (10%) de tres testigos extraídos.

- En cualquier tipo de mezcla bituminosa (base, intermedia y rodadura), si no se cumple con el apartado de espesores, se deberá levantar la capa mediante fresado y reponerla o tirar otra capa sobre la rechazada, si no existieran problemas de gálibo o sobrecargas de estructura.

Regularidad superficial

Si los límites de regularidad exceden de los permitidos, se procederá de la siguiente manera:

- En cualquier tipo de mezcla bituminosa (base, intermedia y rodadura), si no se cumple con el apartado de regularidad superficial, se deberá levantar la capa y reponerla por una nueva.

Macrotextura y resistencia al deslizamiento

En capas de rodadura la macrotextura no deberá ser inferior a lo especificado en norma.

- Si la macrotextura es inferior al noventa por ciento (90%) de lo especificado, se deberá levantar la capa mediante fresado y reponerla por otra.
- Si la macrotextura no es inferior al noventa por ciento (90%) de lo especificado, se deberá penalizar económicamente con un diez por ciento (10%).

En capas de rodadura el resultado medio de resistencia al deslizamiento no deberá ser inferior a lo especificado en norma.

- Si la resistencia al deslizamiento es inferior al noventa por ciento (90%) de lo especificado, se deberá levantar la capa mediante fresado y reponerla por otra.
- Si la resistencia al deslizamiento no es inferior al noventa por ciento (90%) de lo especificado, se deberá penalizar económicamente con un diez por ciento (10%).

2.5 CONSIDERACIONES FINALES

Como se observó en las normativas y pliegos de los países estudiados, el aseguramiento de la calidad de las mezclas bituminosas en el momento de su extendido y compactación es muy similar, ya que todos los países controlan la calidad obtenida durante el procedimiento de fabricación y, además, controlan la calidad del producto terminado a partir de algunas características funcionales (índice de perfil y medición de textura), aunque la evaluación de las características estructurales se suele limitar a la medida de la densidad y el espesor de testigos de obra. Sin embargo, estos parámetros no aseguran que la mezcla bituminosa tenga las características mecánicas necesarias para un comportamiento adecuado de la misma.

Se concluye, pues, que el control de calidad en el momento de su ejecución sólo se enfoca a parámetros comunes y que no existe ningún parámetro de resistencia mecánica de la mezcla compactada. No obstante, para asegurar que las características estructurales se cumplan, sería importante añadir algún ensayo que asegure que las mezclas bituminosas tienen las propiedades mecánicas esperadas.

No fue hasta los años 70, en que Kennedy et al. [22] realizaron una investigación en la cual no sólo se evaluó las densidades de las mezclas bituminosas, sino también sus propiedades mecánicas; y fue entonces cuando se comenzó a dudar del actual método de control, que sólo se basa en la determinación de densidades.

En particular, Kennedy et al. [22] analizaron el efecto de la temperatura y de la energía de compactación, factores a los que hasta entonces no se les daba la importancia necesaria, sobre la resistencia a la tensión de la mezcla, medida con el ensayo de tracción indirecta. El estudio se realizó sobre mezclas con diferentes granulometrías y contenidos de betún. En la figura 2.13 se puede observar, principalmente, como al disminuir la temperatura de compactación, la resistencia a la tensión disminuye en todas las mezclas.

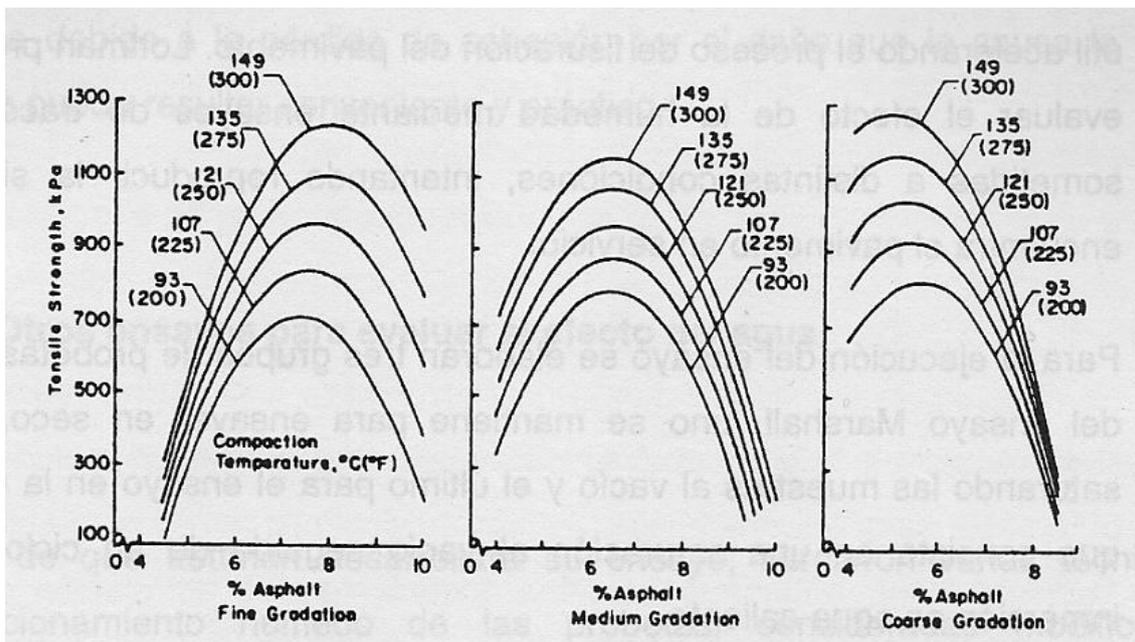


Figura 2.13 Resistencia a tracción indirecta con diferentes temperaturas de compactación (Fuente: Kennedy et al, 1984).

En la figura 2.14 se puede observar el efecto de la energía y temperatura de compactación en la resistencia a tracción indirecta y en el módulo de elasticidad estático. Al disminuir la energía de compactación, disminuye tanto la resistencia a tracción indirecta como el módulo de elasticidad estático de las mezclas, siendo más acusado este efecto para temperaturas de compactación bajas.

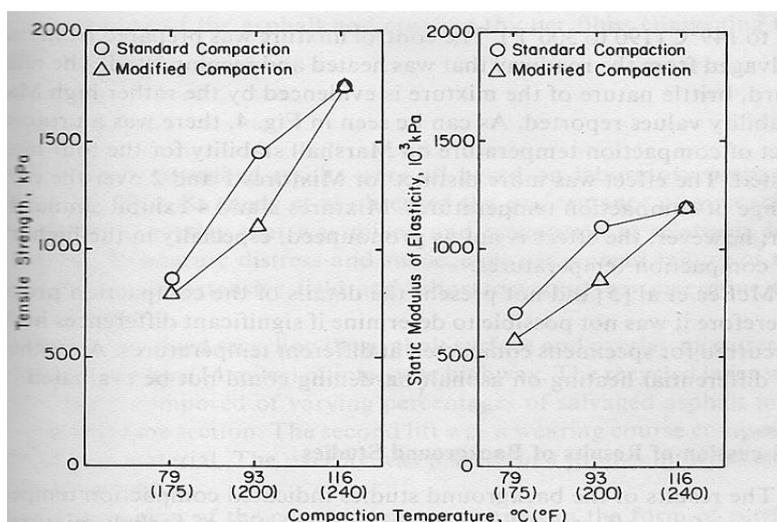


Figura 2.14 Resistencia a tracción indirecta y módulo de elasticidad estático con diferentes energías y temperaturas de compactación (Fuente: Kennedy et al, 1984).

Por otra parte, Wagner [52] realizó un estudio para evaluar el efecto de la compactación de las mezclas bituminosas mediante ensayos de fatiga y módulo resiliente.

En primer lugar, se analizó el efecto que una disminución del nivel de compactación de una mezcla bituminosa tiene en el módulo resiliente, Tabla 2.10. Puede observarse que al disminuir el nivel de compactación hasta el 92%, el valor del módulo resiliente se reduce del orden del 50%.

Nivel de compactación (%)	Módulo resiliente (MPa)
100	3360
96	2680
92	1520
91	1320

Tabla 2.10 Efecto del nivel de compactación en el módulo resiliente (Fuente: Wagner, 1984).

En segundo lugar, se analizó el efecto que tiene la disminución del nivel de compactación a partir del ensayo a fatiga. En la figura 2.15 se observa cómo la ley de fatiga cambia sensiblemente de pendiente, siendo mayor cuanto menor es el nivel de compactación en la mezcla bituminosa.

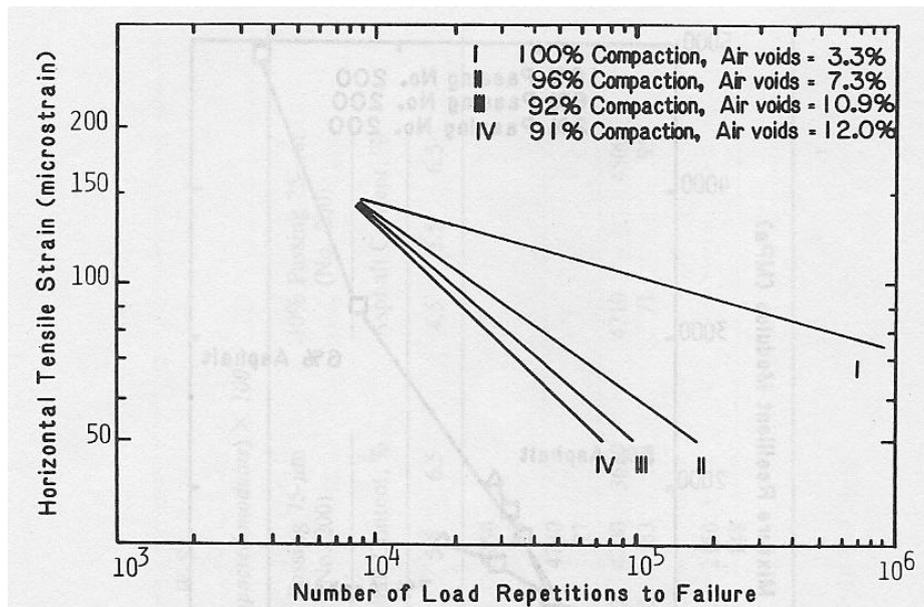


Figura 2.15 Leyes de fatiga de mezclas bituminosas con diferente compactación (Fuente: Wagner, 1984).

Martínez [30] en su investigación también analizó el efecto del porcentaje de la compactación en la resistencia a tracción indirecta de testigos extraídos de diversas obras, figura 2.16, constatando una disminución de la resistencia al disminuir el porcentaje de compactación de la mezcla.

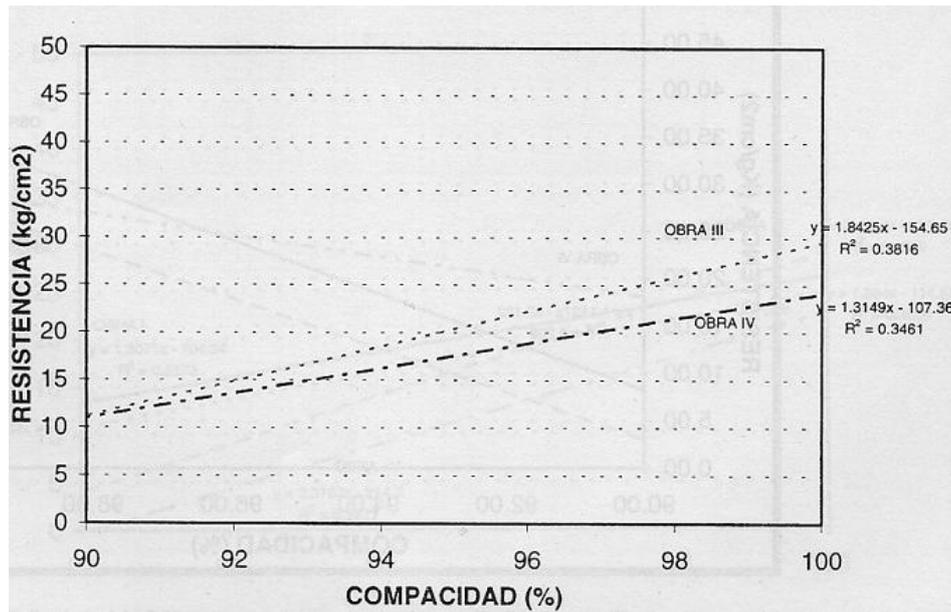


Figura 2.16 Efecto de la compactación en la tracción indirecta de testigos de obra (Fuente: Martínez, 2000).

En resumen, los estudios de Kennedy et al., de Wagner et al. y de Martínez ponen de manifiesto las limitaciones del actual método de control de calidad basado únicamente en la determinación de densidades, y la importancia de controlar alguna propiedad mecánica de la mezcla.

Por tal motivo, se realiza esta investigación sobre mezclas bituminosas fabricadas en laboratorio y en obra, para demostrar que el ensayo de módulo resiliente es un ensayo sencillo, económico y confiable, que puede ser utilizado para medir las características mecánicas de la mezcla bituminosa compactada, durante el control de calidad.

Durante la etapa experimental en laboratorio se pretende identificar qué variables y cómo afectan al módulo resiliente de una mezcla bituminosa. Mediante un análisis estadístico se determinará cual de las variables de composición, elaboración y ejecución del ensayo influyen más en el comportamiento del módulo resiliente. Esto ayudará a tomar más en cuenta estas variables al momento de fabricar una mezcla bituminosa. En campo se recolectarán datos de compactación y módulo resiliente, para poder ver la correlación que existe entre estos dos parámetros. Además, se analizará si alcanzada la compactación siempre se alcanzan las propiedades mecánicas.

Posteriormente, se evaluará el servicio de la mezcla bituminosa cuando está bien y mal ejecutada, con el fin de demostrar que un mal control de calidad incide directamente en la vida de una capa bituminosa.

Por último, se elaborará un gráfico de control de calidad, a partir de intervalos de confianza de los resultados de módulo resiliente recolectados en campo.

CAPÍTULO 3

EL MÓDULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

3.1 INTRODUCCIÓN

Para conocer el deterioro que se produce en un firme cuando está sometido al paso de cargas y a los agentes climáticos, es necesario conocer los parámetros que caracterizan a la mezcla bituminosa y definir sus límites de fallo, tanto por fatiga, como por fisuración térmica ó deformación plástica. Por tanto, es importante saber qué ensayo debe utilizarse para caracterizar la mezcla y qué análisis se debe realizar a partir de los datos obtenidos.

Generalmente, estos parámetros son los datos básicos utilizados en los modelos teóricos que intentan reproducir el comportamiento estructural de un firme. De acuerdo al grado de sofisticación del modelo, variará el tipo de información necesaria a obtener mediante los diferentes ensayos. La elección del tipo de ensayo para determinar las características de una mezcla bituminosa resultará de un balance entre la precisión obtenida con el mismo y la factibilidad de su empleo, con el fin de obtener un modelo tan representativo como sea posible, pero a la vez de fácil aplicación considerando la disponibilidad de tiempo, de recursos económicos y de equipamiento.

Algunos investigadores, como Kennedy, Von Quintus y Mitchell [23] mencionan que: “han coincidido según sus experiencias, en que los valores típicos de diseño de una mezcla bituminosa, tales como los obtenidos con los ensayos Marshall o Hveem, tienen

una pobre correlación con las propiedades comúnmente requeridas para evaluar el fallo y el comportamiento de una mezcla bituminosa, que suelen ser la fluencia, resistencia a tracción indirecta, fatiga y deformación permanente”.

Sería ideal contar con un ensayo capaz de introducir un estado de tensiones a las probetas, similar al que se produce en la capa real. Roque y Buttlar [45] esquematizan el estado de tensiones provocado por una carga simple en la estructura de un firme, donde se distinguen cuatro casos, figura 3.1:

- 1.- Compresión triaxial en la superficie e inmediatamente bajo la rueda.
- 2.- Tracción longitudinal y transversal combinado con compresión vertical en la parte inferior de la capa bituminosa debajo de la rueda.
- 3.- Tracción longitudinal o transversal en la superficie a una cierta distancia de la carga.
- 4.- Compresión longitudinal o transversal en el fondo de la capa bituminosa a una cierta distancia de la carga.

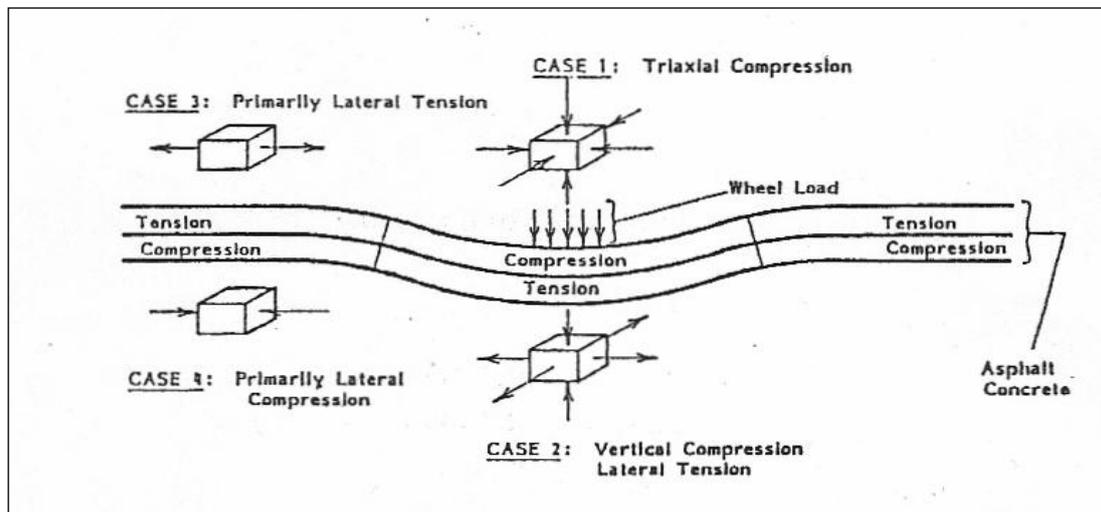


Figura 3.1 Estado de tensiones en un firme bajo una carga simple (Fuente: Roque y Buttlar, 1992).

Existen ensayos que representan cada uno de estos cuatro estados, pero no hay uno que reúna a todos. Sin embargo, tampoco es necesario analizar todas las situaciones, pues la experiencia ha determinado que la zona más crítica de tensiones se produce en la fibra inferior de la capa bituminosa, bajo la carga.

Tal como se describe en el apartado siguiente, el ensayo de módulo resiliente reproduce este estado de tensión crítica para una mezcla bituminosa y la propuesta de la presente tesis consiste en su utilización para la determinación de los valores necesarios de módulo resiliente.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA SOLICITACIÓN EN FIRMES

Los materiales que constituyen los firmes se ven sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes que le son transmitidas por el tráfico. Con el fin de tener en cuenta la naturaleza cíclica de las cargas que actúan en los materiales que conforman la estructura de firme, así como el comportamiento no lineal y resiliente de los materiales, se han realizado en el mundo varios trabajos experimentales, tanto en modelos a escala natural como en muestras de material probadas en laboratorio, obteniéndose valiosa información sobre el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales.

Las deformaciones resilientes elásticas son de recuperación instantánea y suelen denominarse plásticas a aquéllas que permanecen en el firme después de cesar la carga.

Bajo carga móvil, la deformación permanente se va acumulando y para ciclos intermedios la deformación permanente para cada ciclo disminuye, hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales. La muestra llega así a un estado tal en que toda deformación es recuperable; en este momento se tiene un comportamiento resiliente, el cual se ha definido por la relación entre el esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión triaxial y la deformación axial recuperable.

Así pues, el concepto de módulo resiliente está ligado invariablemente a un proceso de carga repetida.

Como se ha observado en los estudios realizados llevados a cabo sobre módulo resiliente, este parámetro no es una propiedad constante del material, sino que depende de muchos factores. Los principales son: número de aplicaciones del esfuerzo, tixotropía, magnitud del esfuerzo desviador, método y condiciones de compactación.

La metodología actual para diseño de firmes utilizada por el método AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) considera que la propiedad fundamental para caracterizar los materiales constitutivos de la sección de una carretera es el denominado módulo de resiliencia [18].

Es por ello que el especialista encargado de diseño y conservación de tales estructuras, debe tener el conocimiento básico de lo que el parámetro de módulo resiliente representa, de la prueba de laboratorio a partir de la cual se obtiene y de los factores que hay que considerar para la selección del valor adecuado para su uso en una determinada metodología de diseño.

La figura 3.2 muestra el esquema de una sección longitudinal de la capas de un firme, sobre el cual una carga se mueve a velocidad constante. El estado de esfuerzos experimentado por el punto P, debido a la carga en el punto A, puede observarse en la figura; en este punto actúan tanto esfuerzos normales como esfuerzos cortantes.

Cuando la carga se mueve al punto B, los esfuerzos cortantes son nulos y únicamente actúan esfuerzos normales, como se representa en la misma figura 3.2; en este punto se tiene un estado triaxial de esfuerzos, debido a que se presentan solo esfuerzos normales. La dirección de los esfuerzos cortantes originados en el punto C es contraria a la dirección de los esfuerzos originados en el punto A, como se muestra en la misma figura.

En laboratorio se realizan pruebas triaxiales simulando la condición B, tratando de simular las condiciones más desfavorables. Durante las pruebas debe aplicarse una presión de confinamiento que varíe con el esfuerzo desviador; sin embargo, es difícil simular en laboratorio este cambio, por lo que la presión de confinamiento se mantiene constante y el esfuerzo desviador es el que se aplica en forma repetida.

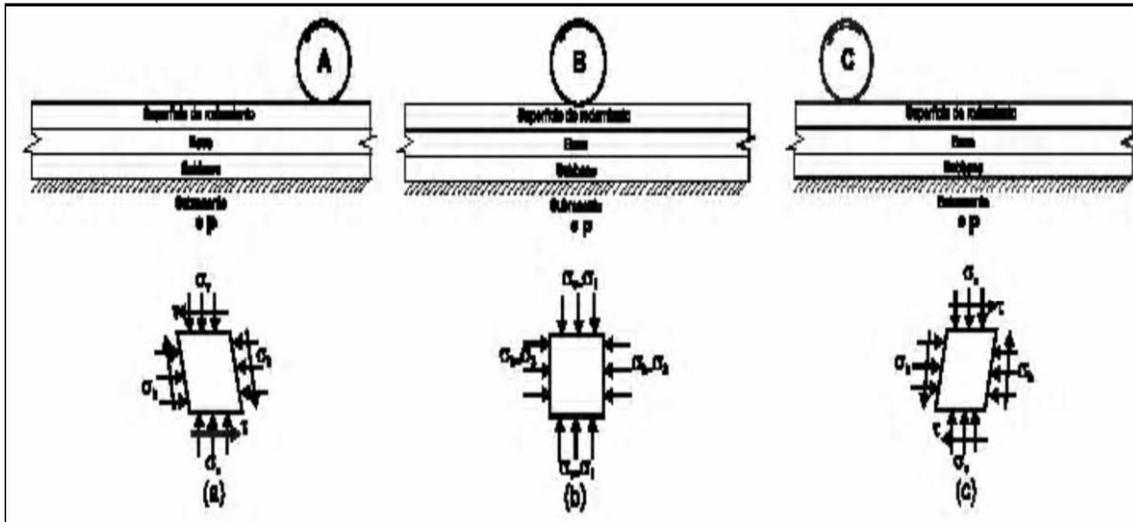


Figura 3.2 Estado de esfuerzos de un firme (Fuente: Huang et al., 1993).

3.2.1 Mediciones de esfuerzos y deformaciones en casos reales

Dada la forma tradicional de estructuración de los materiales que conforman un firme, la deformabilidad suele crecer hacia abajo. La deformabilidad interesa sobre todo a niveles profundos, pues es relativamente fácil que las capas superiores tengan niveles de deformación tolerables aún para los altos esfuerzos que en ellas actúan.

En firmes, las deformaciones interesan desde dos puntos de vista: por un lado, las deformaciones excesivas están asociadas a estados de fallo y, por otro, porque es sabido que un firme deformado puede dejar de cumplir sus funciones, independientemente de que las deformaciones no hayan conducido a un colapso estructural propiamente dicho, Rico A. [44].

3.3 MECANISMOS DE DEFORMACIÓN DE UN MATERIAL SUJETO A CARGA CÍCLICA

De acuerdo con el diseño estructural del firme, el tipo y la magnitud de las sollicitaciones, repeticiones de carga acumuladas, características asociadas al clima y localización de las diferentes capas de material, el comportamiento esfuerzo-deformación de un suelo puede ser de dos tipos: resiliente y plástico.

En la figura 3.3 se ilustra el mecanismo por el cual la deformación permanente se va acumulando; debe hacerse notar el hecho de que, en ciclos intermedios la deformación permanente para cada ciclo disminuye, hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales.

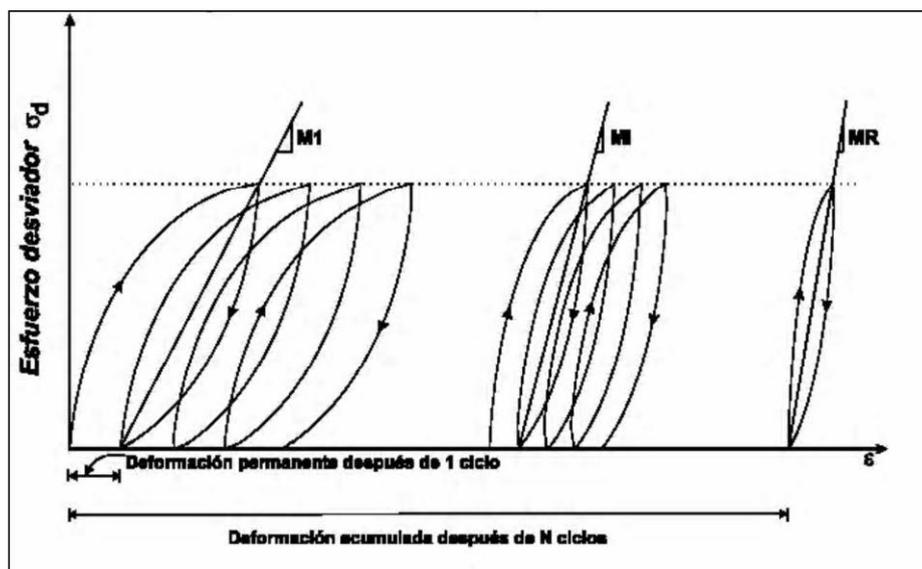


Figura 3.3 Mecanismo de deformación permanente en los firmes (Fuente: Huang et al., 1993).

En la figura 3.4 se muestra la acumulación de las deformaciones total y plástica durante un cierto número de ciclos.

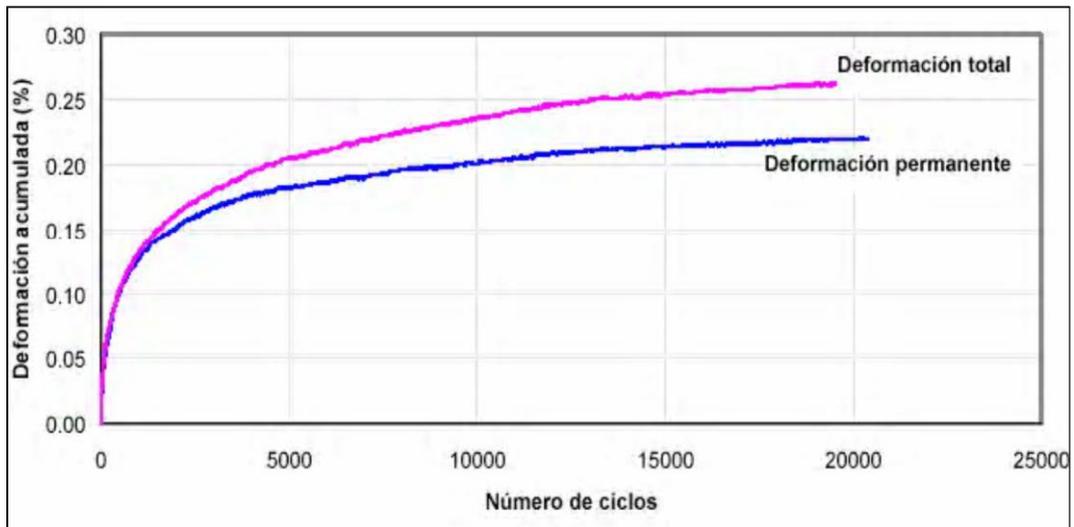


Figura 3.4 Deformación acumulada con el número de aplicaciones de un esfuerzo desviador (Fuente: Huang et al., 1993).

La deformación elástica repetida preocupa sobretodo en materiales con resistencia a la tensión (carpetas bituminosas o capas estabilizadas), en las que se puede llegar a generar un fallo de agrietamiento por fatiga si el número de repeticiones es importante y los materiales son susceptibles a este efecto.

La importancia que la deformación tiene en los firmes es debida a que en los métodos de diseño actuales la deformabilidad es el punto básico a considerar y, de hecho, la mayoría de ellos se centran en mantenerla en límites razonables.

3.4 EL MÓDULO RESILIENTE

Martínez [30] en su tesis doctoral menciona: “Hveem y Carmany en 1948 han reconocido que el módulo dinámico de elasticidad para subrasantes es un parámetro de gran importancia para entender el agrietamiento por fatiga en las superficies con betún y que la carga monotónica podría no ser la adecuada para su determinación”.

En 1948, Hveem [19] desarrolló el tema “comportamiento resiliente en firmes”. El propuso la prueba del estabilómetro para caracterizar a las subrasantes.

Seed et al [49] (1962), de la Universidad de California, menciona que: “siguieron lo establecido por Hveem. Desarrollaron pruebas de carga repetida e introdujeron el término de módulo resiliente, él cual fue definido como la magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable y se presenta como sigue”:

$$Mr = (\sigma_1 - \sigma_3) / \epsilon_{axial} = \sigma_d / \epsilon_{axial} \quad (3.1)$$

donde:

σ_1 = Esfuerzo principal mayor

σ_3 = Esfuerzo principal menor

σ_d = Esfuerzo desviador

ϵ_{axial} = Deformación recuperable

Durante pruebas de carga repetida se observa que, después de un cierto número de ciclos de carga, el módulo llega a ser aproximadamente constante y la respuesta del material que se está ensayando puede asumirse como elástica. Al módulo que permanece constante se le llama módulo resiliente (Figura 3.3).

El módulo resiliente M_r es la respuesta al ensayo dinámico, definido como el cociente entre la tensión desviadora axial repetida σ_d y la deformación axial recuperable ϵ_a , ecuación 3.1.

El ensayo, recogido en la norma europea [38] “Determinación del módulo resiliente, en mezclas bituminosas, mediante el ensayo de compresión diametral”, UNE-EN 12697-26 ANEXO C, consiste en someter una probeta de mezcla bituminosa a una serie de pulsos de carga, cuya magnitud se debe ajustar para alcanzar una deformación horizontal transitoria máxima de referencia de 0,005% del diámetro de la probeta. El tiempo de subida, medido a partir del comienzo del pulso de la carga, que es el tiempo necesario para que la carga aplicada aumente desde cero hasta el valor máximo, debe ser de (124 ± 4) ms. El periodo de repetición de los impulsos debe ser de $(3,0 \pm 0,1)$ s (ver figura 3.5).

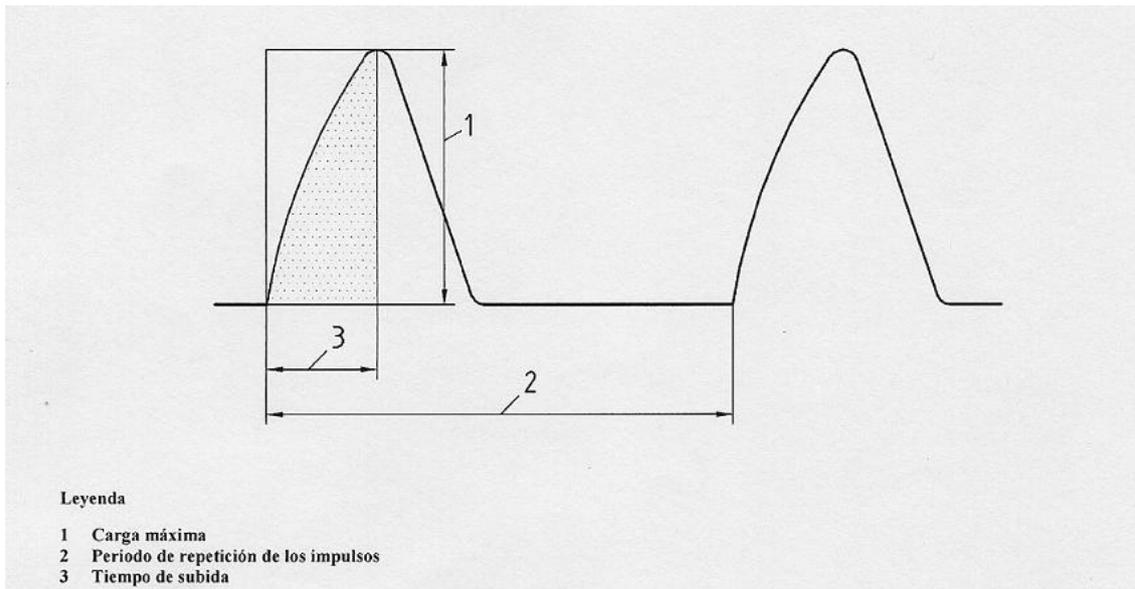


Figura 3.5 Forma del pulso de carga (Fuente: Norma UNE-EN 12697-26:2006).

Primero, se aplican 10 pulsos de acondicionamiento para permitir que el equipo ajuste la magnitud de la carga y duración, para obtener la deformación diametral horizontal y el tiempo de carga especificados. Posteriormente, se aplican 5 pulsos de carga adicionales y, para cada pulso de carga se mide y registra la variación de la carga aplicada y de la deformación diametral horizontal en el tiempo. A partir de esta

deformación, las dimensiones de la probeta ensayada y el pulso de carga, para cada uno de los pulsos de carga se determina el módulo resiliente medido, aplicando la siguiente fórmula:

$$S_m = \frac{F(v+0,27)}{z h} \quad (3.2)$$

donde:

S_m = Módulo resiliente

F = Valor máximo de la carga vertical aplicada

v = Coeficiente de Poisson

h = Espesor de la probeta

z = Amplitud de la deformación horizontal obtenida durante el ciclo de carga

Después de obtener el módulo en los 5 pulsos de carga, se extrae la probeta del equipo y se gira $(90 \pm 10)^\circ$ alrededor de su eje horizontal, y se restituye de acuerdo con el procedimiento. Si el valor medido del módulo resiliente de este ensayo, está comprendido entre el +10% o el -20% del valor medido registrado para el primer ensayo, se calcula el valor medio de los dos ensayos obteniendo el módulo resiliente de la probeta; pero si la diferencia entre los dos valores es mayor que lo especificado anteriormente, los resultados se deben rechazar.

Se presenta a continuación un esquema del ensayo de compresión diametral para la determinación del módulo resiliente, con el montaje del aparato de medición de deformación, figura 3.6, y la deformación resultante, figura 3.7.

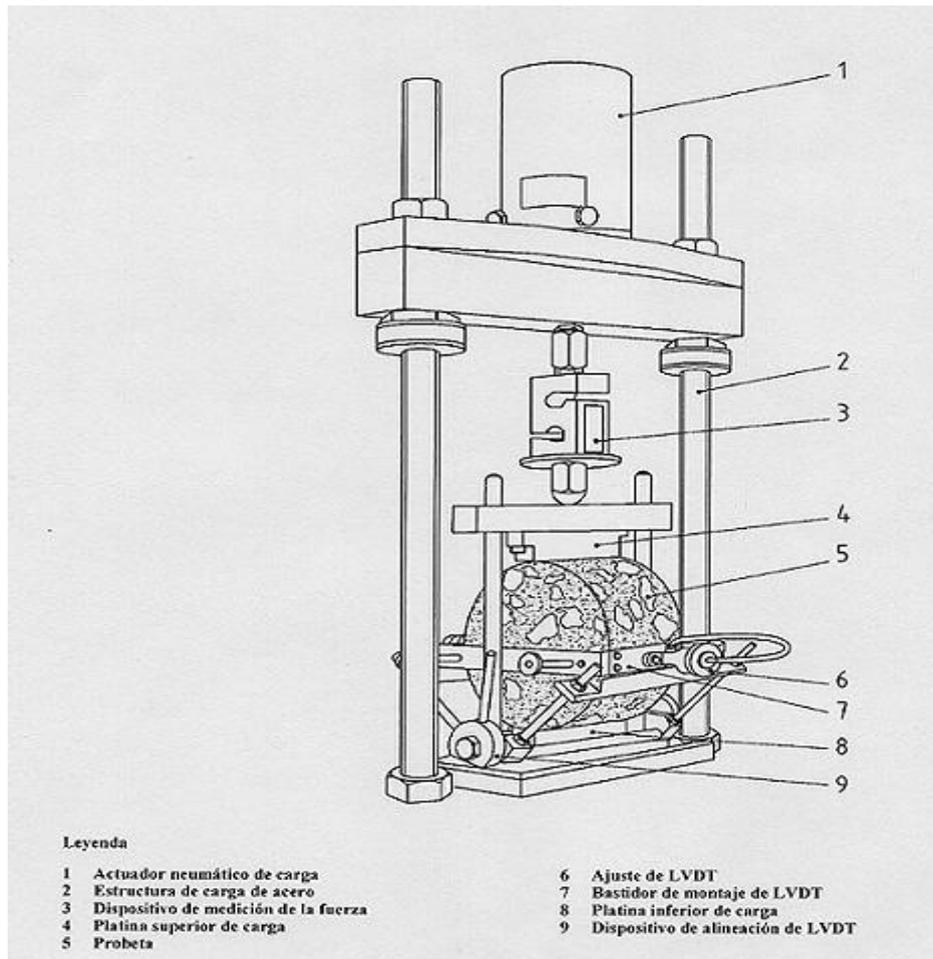


Figura 3.6 Ensayo de compresión diametral y montaje del aparato (Fuente: Norma UNE-EN 12697-26:2006).

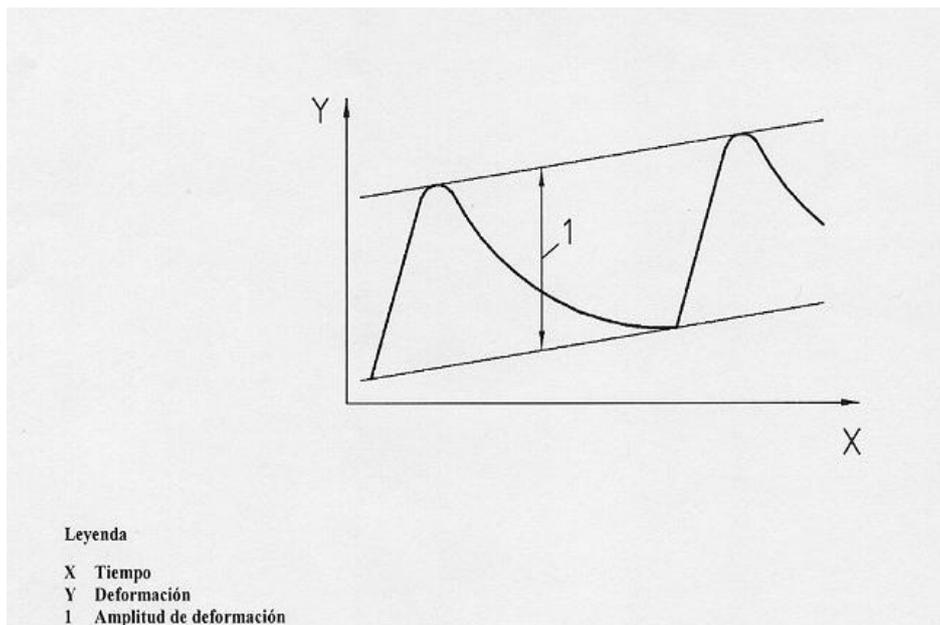


Figura 3.7 Amplitud de deformación (Fuente: Norma UNE-EN 12697-26:2006).

3.4.1 Factores que afectan al módulo resiliente

Como se sabe en los estudios que se han llevado a cabo sobre módulo resiliente, este parámetro no es una propiedad constante de la mezcla, sino que depende de muchos factores. El análisis de estos factores se muestra a continuación.

3.4.1.1 Factores que afectan al módulo resiliente en mezclas bituminosas

Existen diversos factores que afectan al módulo resiliente de las mezclas bituminosas. A continuación se resumen los factores principales:

- Nivel de Esfuerzo
- Frecuencia de carga
- Contenido de betún
- Tipo de árido
- Contenido de huecos
- Tipo de betún
- Tipo de ensayo
- Temperatura de ensayo

Nivel de esfuerzos

Monismith et al. [35] en el informe denominado SHRP-A-388, referente a la determinación de módulos resilientes, analizaron el efecto de nivel de esfuerzos sobre el comportamiento de las mezclas bituminosas. Para ello utilizaron dos métodos de ensayo (axial y diametral), dos niveles de esfuerzo (alto y bajo) y tres temperaturas de ensayo (0, 20 y 40 °C), y observaron el comportamiento del módulo resiliente. En la figura 3.8 se puede observar que existe muy poca influencia del nivel de esfuerzos sobre el módulo resiliente, existiendo sólo ligeras variaciones entre ambos niveles de esfuerzo a medida que la temperatura de prueba se va incrementando. Por su parte, dichos incrementos en la temperatura de prueba reflejan una disminución notoria en los valores de módulo resiliente. Por otro lado, se observa que los ensayos diametrales arrojan valores mayores de módulo resiliente con respecto a los obtenidos mediante ensayos axiales.

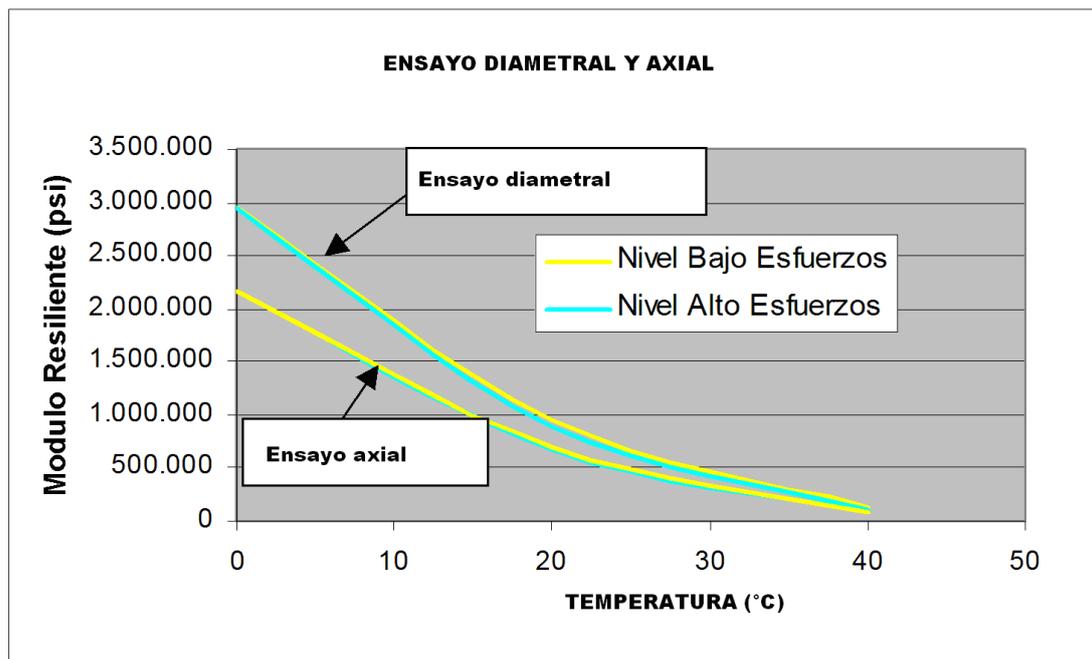


Figura 3.8 Valores de módulo resiliente para diferentes niveles de esfuerzo en función de la temperatura (Fuente: Monismith et al., 1989).

Almundaheen y Al-Sugair [4] analizaron el efecto de la magnitud de la carga sobre el módulo resiliente. Mediante ensayos diametrales de módulo resiliente no encontraron una diferencia importante entre los niveles de carga.

Frecuencia de carga

Monismith et al. [35] contemplaron en su estudio el efecto de la variación de frecuencia de carga sobre las mezclas bituminosas. El desarrollo de los estudios fue similar al utilizado para el análisis del nivel de esfuerzos.

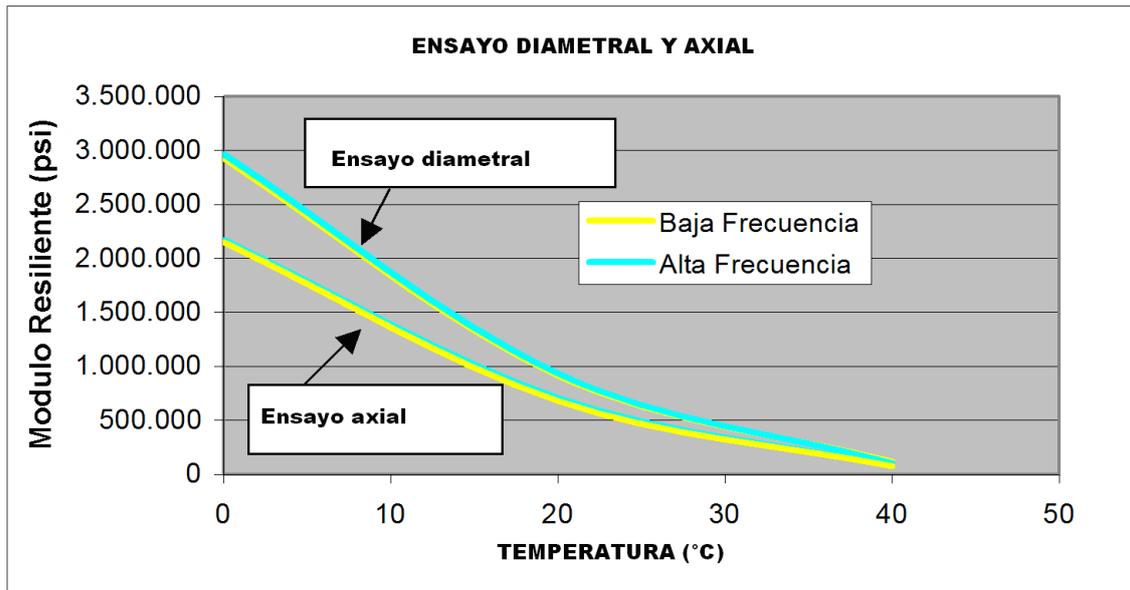


Figura 3.9 Valores de módulo resiliente para distintas frecuencias en función de la temperatura (Fuente: Monismith et al., 1989).

Al igual que en el caso del análisis de los niveles de esfuerzos, como se puede ver en la figura 3.9 existe muy poca influencia de la frecuencia de carga sobre el módulo resiliente, solamente que en este caso, los valores de módulo resiliente tienen un ligero incremento en función del aumento en las frecuencias de carga. Nuevamente, se observa el efecto del tipo de método y temperatura de ensayo utilizada sobre el módulo resiliente. Los valores de módulo resiliente disminuyen con un incremento de la temperatura de ensayo y muestran un aumento con utilización de los ensayos diametrales comparados con los valores obtenidos mediante ensayos axiales.

Saleh M. [48] observó que al aumentar la duración de la carga, disminuía el módulo resiliente de las mezclas bituminosas, como se puede observar en la figura 3.10

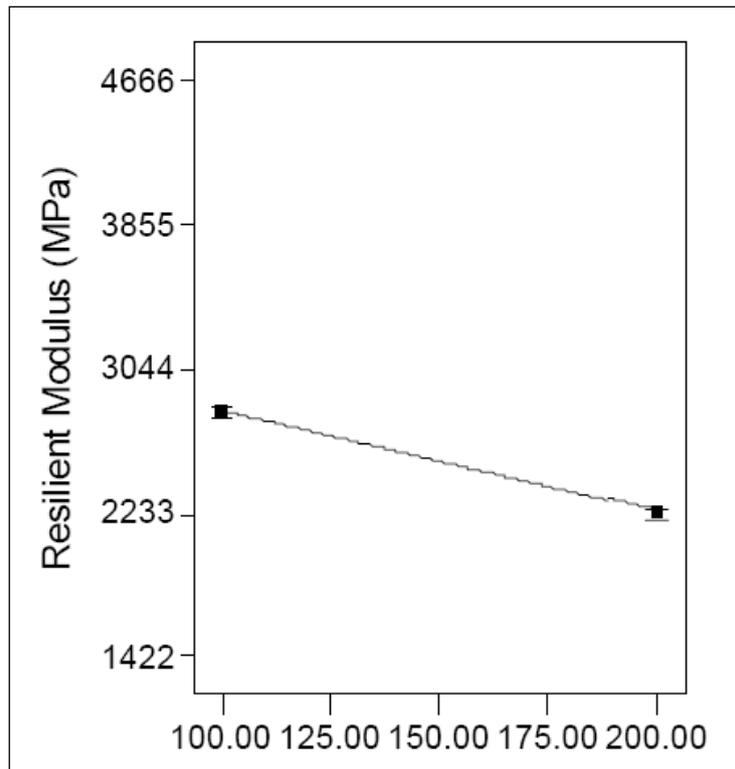


Figura 3.10 Tiempo de duración de carga (ms) vs Módulo resiliente (Fuente: Saleh, 2005).

Contenido de betún

Almundaheen y Al-Sugair [4] analizaron el efecto del contenido de betún sobre el módulo resiliente. Mediante ensayos diametrales de módulo resiliente encontraron que los valores de módulo resiliente decrecen con un incremento en el contenido de betún.

Monismith et al. [35] utilizaron dos contenidos de betún. El primero, el más bajo (óptimo), fue determinado con el procedimiento estándar Hveem. El segundo contenido de betún fue fijado 0,6% mayor, correspondiendo aproximadamente al contenido de betún óptimo que se obtiene utilizando el procedimiento de diseño del Cuerpo de Ingenieros (método Marshall). Se consideraron nuevamente los dos métodos (axial y diametral) y tres temperaturas de ensayo (0, 20 y 40 °C).

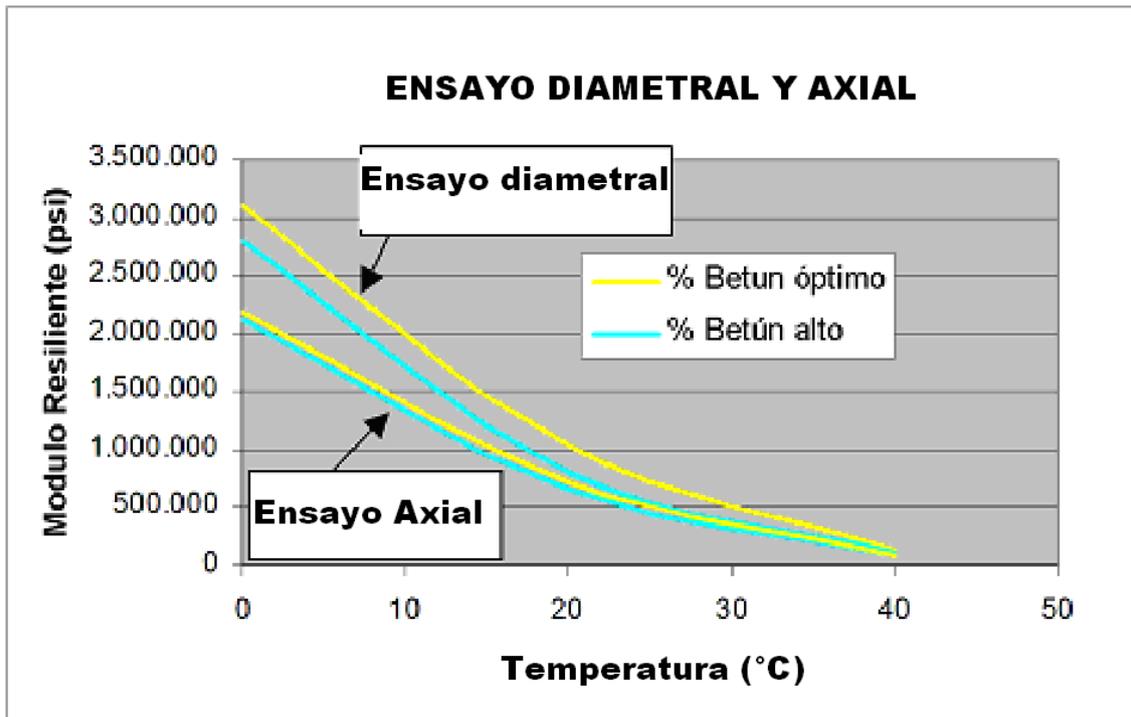


Figura 3.11 Valores de módulo resiliente para distintos porcentajes de betún en función de la temperatura (Fuente: Monismith et al., 1989).

En la figura 3.11 se observa, de manera general, como disminuyen los valores de módulo resiliente para contenidos de betún altos en relación con los contenidos de betún óptimos. Se obtiene una disminución del módulo resiliente con respecto al incremento de las temperaturas de ensayo.

Meor O. Hamzah [32] observó que las mezclas bituminosas con un contenido de betún alto tienen menor módulo resiliente; este fenómeno lo observó tanto en mezclas envejecidas, como en mezclas no envejecidas. Estas tendencias se observan en la figura 3.12.

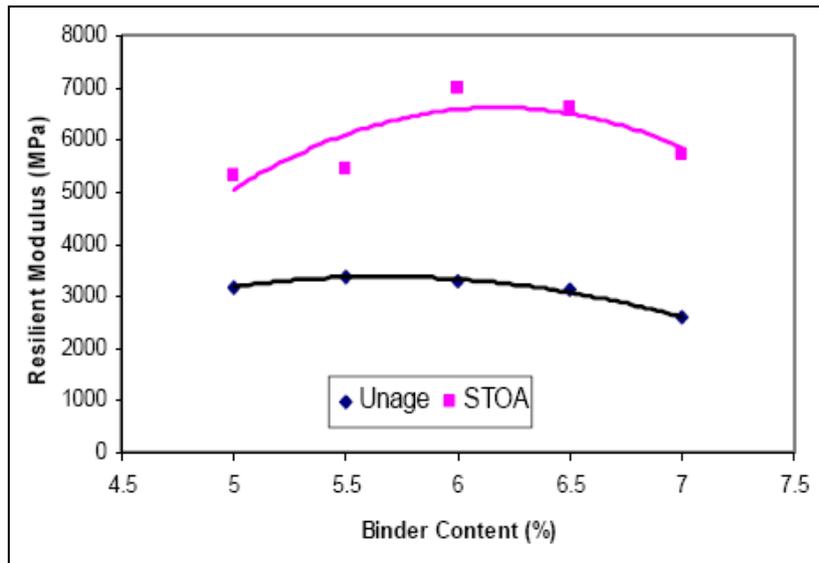


Figura 3.12 Efecto del contenido de betún en mezclas envejecidas y no envejecidas sobre el módulo resiliente (Fuente: Meor, 2008).

Tipo de árido

Elliot [15] condujeron un estudio donde seis mezclas bituminosas fueron ensayadas para investigar los efectos de la variación en la granulometría de los áridos sobre las propiedades de cohesión de las mezclas. Utilizaron cinco granulometrías diferentes para cada mezcla (mezcla de trabajo, fina, granular, granular-fina y fina granular).

Los análisis de la información obtenida revelaron que las variaciones en las granulometrías fina-granular y granular-fina tiene el mayor impacto sobre las propiedades de cohesión de las mezclas, pero que ninguna de las variaciones tiene un efecto significativo sobre el módulo resiliente. Los análisis de toda información indicaron efectos significativos atribuibles al tipo de árido 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 resiliente de la mezcla.

Monismith et al. [35], analizaron dos diferentes tipos de áridos, granito y pedernal, que es una variedad de cuarzo con pequeñas cantidades de sílice. En la figura 3.13 se observa de manera general, que el granito presenta valores mayores de módulo resiliente con relación a los obtenidos para el pedernal. Nuevamente se obtiene una

disminución del módulo resiliente con respecto al incremento de las temperaturas de ensayo.

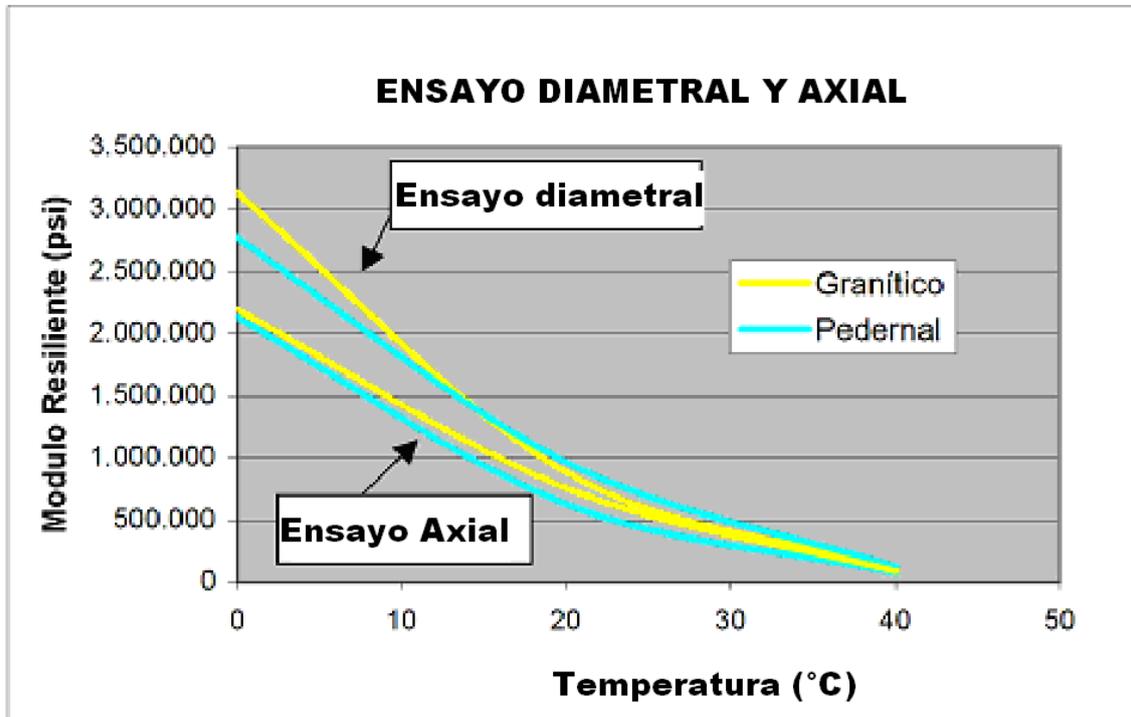


Figura 3.13 Valores de módulo resiliente para distintos áridos en función de la temperatura (Fuente: Monismith et al., 1989).

Abdulshafi [2] realizaron un estudio con el fin de observar el comportamiento de diferentes tipos de árido utilizados en la elaboración de mezclas bituminosas, con cinco diferentes granulometrías para dos tipos de áridos: grava natural (redondeada) y caliza triturada (angular). Las cinco granulometrías (tamaño máximo del árido nominal, 2,5 cm) fueron: ajustada al límite superior, centrada, ajustada al límite superior, fuera del límite inferior y fuera del límite superior del huso empleado. Los resultados indicaron que con la granulometría fuera del límite inferior del huso se obtuvieron los valores más bajos de módulo resiliente para ambos tipo de árido. La granulometría ajustada al límite superior de los husos logró valores altos para ambos tipos de árido. Para la granulometría centrada en el huso, se obtuvieron valores altos de módulo resiliente para las mezclas con gravas naturales; está 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 módulo resiliente para las mezclas con áridos grandes oscilaron entre 3280 a

5140 MPa. Este rango es considerablemente mayor que el rango de 2070 a 3450 MPa, que debería esperarse para mezclas bituminosas convencionales.

Saleh M. [48] observó que el tamaño máximo del árido utilizado en la mezcla bituminosa era un factor importante en los resultados de módulo resiliente; en la figura 3.14 se observa que al ir aumentando el tamaño máximo nominal del árido, va aumentando el módulo resiliente.

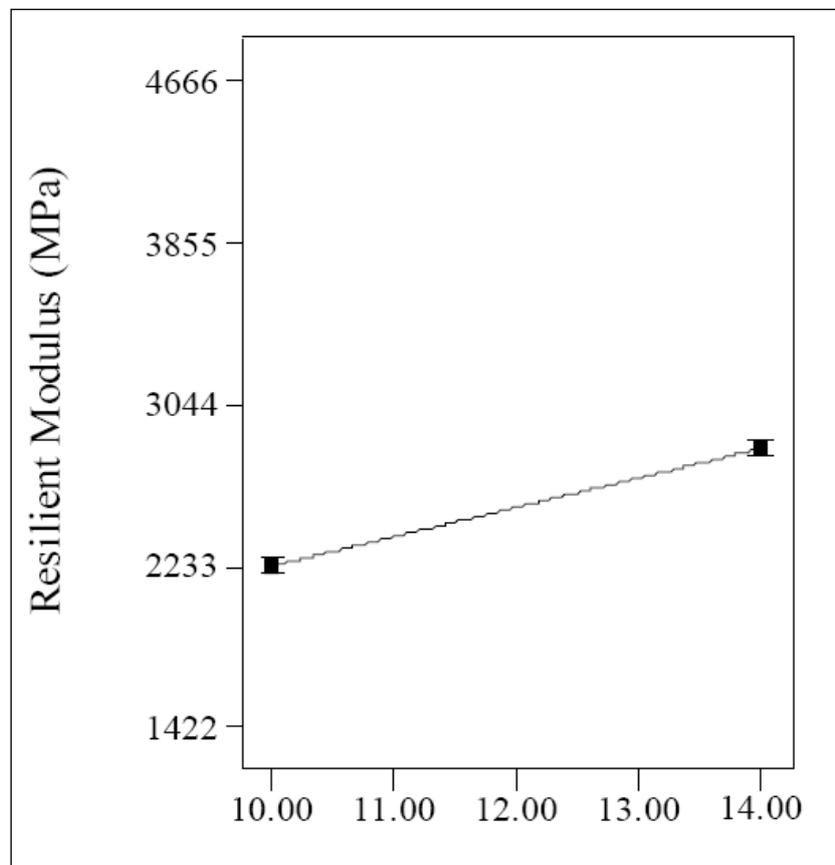


Figura 3.14 Efecto del tamaño máximo sobre el módulo resiliente de una mezcla bituminosa (Fuente: Saleh, 2005).

Bambang Ismanto [8] observó que el porcentaje lajas en el árido grueso empleado en una mezcla bituminosa tiene también un gran efecto en el módulo resiliente; en la figura 3.15 se observa que cuanto mayor es el porcentaje de lajas, menor es el módulo resiliente.

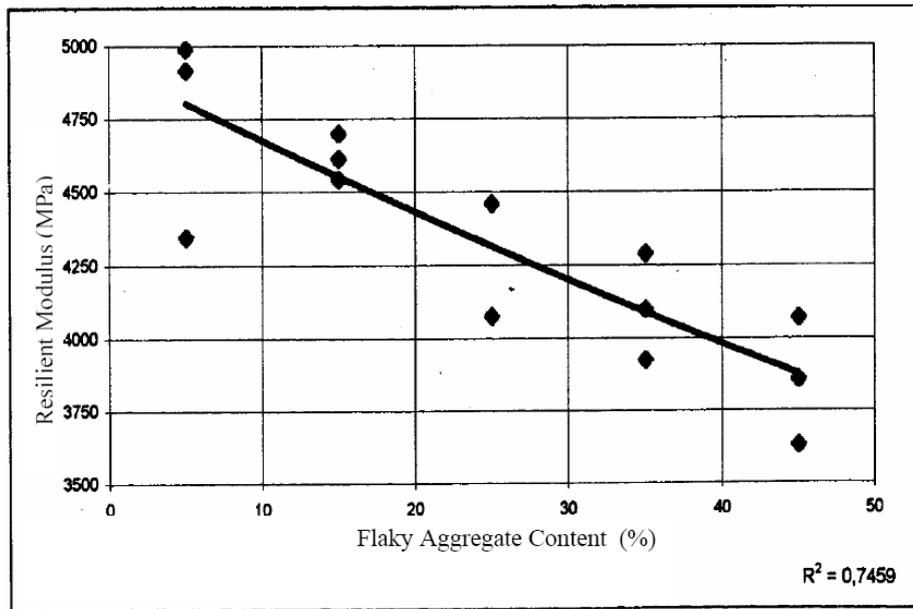


Figura 3.15 Efecto del porcentaje de lascas del árido grueso sobre el módulo resiliente (Fuente: Bambang, 2005).

Porcentaje de huecos

Monismith et al. [35] emplearon dos niveles de esfuerzos de compactación para generar contenidos de vacíos del 4 y 8% respectivamente. En la figura 3.16 se observa, de manera general, una disminución considerable en los valores de módulo resiliente cuando aumenta el contenido de huecos de la mezcla analizada. Nuevamente se obtiene una disminución del módulo resiliente con respecto al incremento en las temperaturas de ensayo.

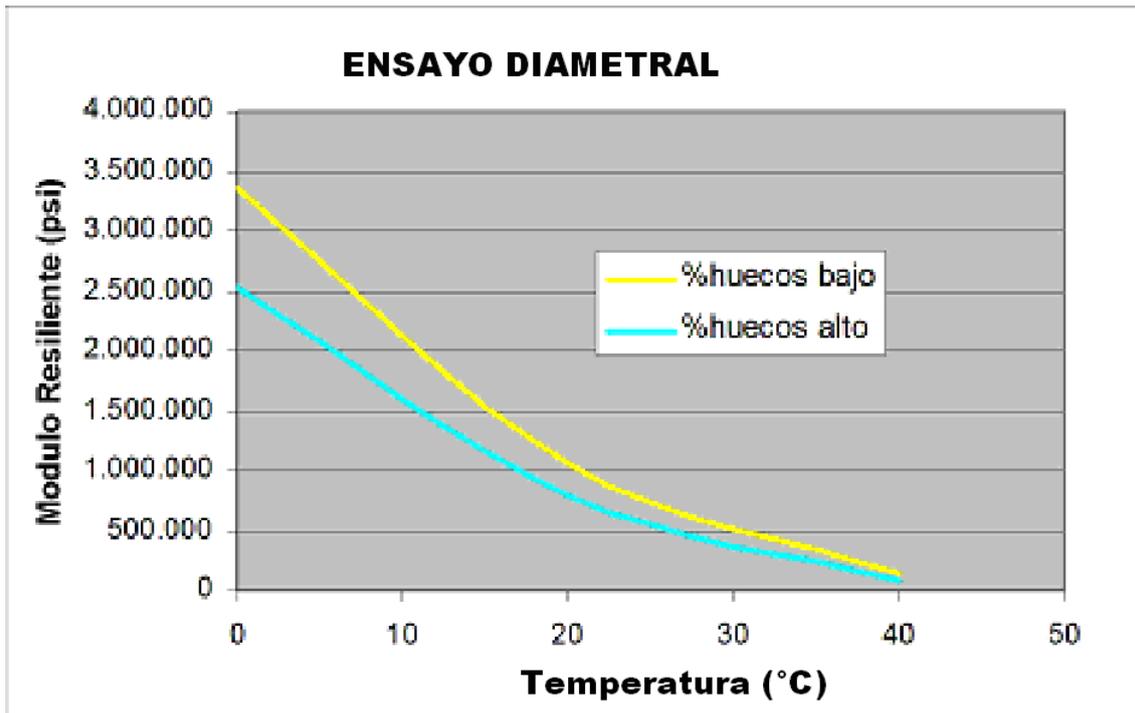


Figura 3.16 Valores de módulo resiliente para distintos porcentajes de huecos en función de la temperatura (Fuente: Monismith et al., 1989).

Tipo y contenido de modificadores en el betún

Jiménez [41] mostró que los módulos resilientes de mezclas bituminosas con caucho están cerca del 75% del valor para mezclas convencionales. Además, estudió el efecto de una adición extra del 2% de caucho fino reciclado para tres mezclas bituminosas con contenidos de caucho de 2,5; 3,0 y 3,5%, figura 3.17. Los valores de módulo resiliente aumentaron en las tres mezclas cuando se adicionó el 2% extra de caucho. La mayor mejora ocurrió para un contenido del 2,5% de caucho reciclado, que mostró un incremento de cerca del 60%.

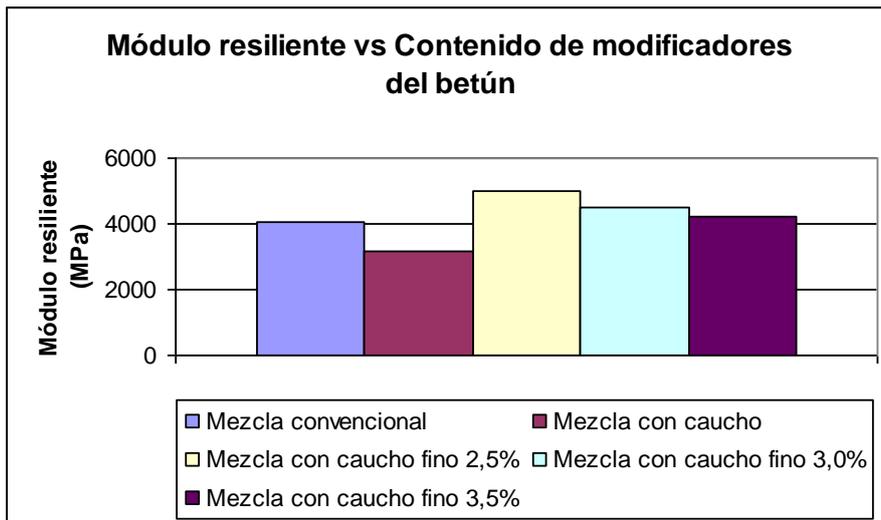


Figura 3.17 Valores de módulo resiliente para distintos contenidos de modificadores del betún (Fuente: “Elaboración propia”, 2010)

Said y Vallerga [46] mostraron que los valores de módulo resiliente para mezclas bituminosas modificadas con caucho son más bajos que los obtenidos para mezclas convencionales, pero sólo para temperaturas bajas (debajo de 25 °C), figura 3.18. Para temperaturas mayores, los valores de módulo resiliente de las mezclas modificadas son mayores que los obtenidos para mezclas convencionales. Además, encontraron que las mezclas modificadas con caucho fino reciclado presentan valores mayores de módulo resiliente que las mezclas modificadas con cauchos granulares.

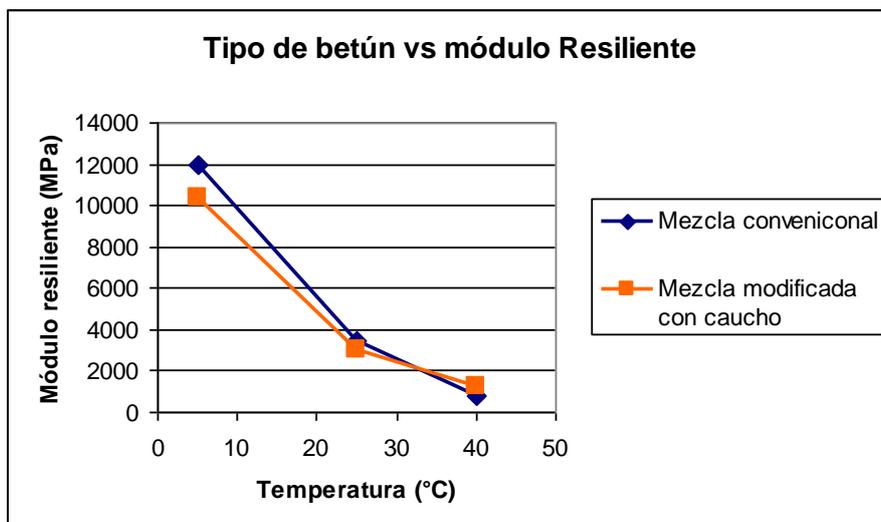


Figura 3.18 Valores de módulo resiliente para distintos tipos de betún (Fuente: Said et al., 1990)

Kamel et al. [20] realizaron un estudio donde observaron el efecto de los modificadores sobre el módulo resiliente de las mezclas bituminosas. Utilizaron dos tipos de betunes: uno convencional y otro modificado mediante un proceso de refinamiento sin el uso de polímeros, denominado premium. Además, consideraron tres temperaturas de ensayo: 5, 20 y 40 °C, para observar la susceptibilidad a la temperatura que presentan los betunes modificados, figura 3.19. Se obtuvieron mejoras en los valores de módulos resilientes para temperaturas altas y bajas en los betunes tipo premium. El módulo de las mezclas a 5 °C fue un 15% menor y a 40 °C fue un 25% mayor para el betún premium comparado con el betún convencional. Estos resultados confirmarían el mejor comportamiento a las roderas y a bajas temperaturas observando en los firmes con mezclas con betún tipo premium.

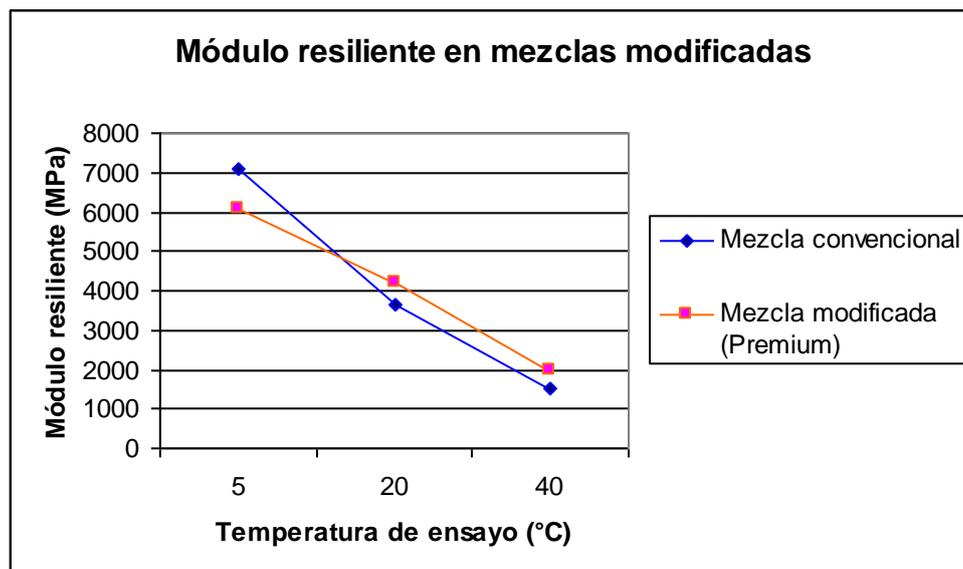


Figura 3.19 Valores de módulo resiliente para mezclas bituminosas convencionales y modificadas (Fuente: Kamel y Millar, 1994).

Baldai y Kattar [6] desarrollaron un programa de investigación patrocinado por el Departamento de Transporte en Michigan, diseñado para evaluar el efecto de la modificación mediante el uso de polímeros sobre las propiedades de las mezclas bituminosas. Utilizaron dos tipos de betunes (AC-5 y AC-10), dos tipos de polímeros

(estireno-butadieno-estireno, SBS y estireno-etileno-butileno-estireno, SEBS) y tres temperaturas de ensayo (-5, 25 y 60 °C). Los resultados obtenidos concluyeron, de manera general, que los betunes modificados con polímeros exhiben valores de módulo resiliente mayores comparados con los betunes convencionales.

Tipos de ensayo

Como parte del proyecto A-003A, Tayebali [50] realizaron una comparación entre los métodos de ensayos axiales y diametrales para la determinación del módulo resiliente en mezclas bituminosas. Los resultados de este estudio, figura 3.20, indicaron que ambos tipos de pruebas son sensibles a la mezcla y a las variables involucradas en dichas pruebas, tipo de betún, tipo de árido, contenido de huecos, temperaturas, etc.

Además encontraron que, utilizando los ensayos diametrales, se obtiene un valor promedio de módulo resiliente entre un 35 y un 45% mayor respecto a los valores obtenidos mediante ensayos axiales.

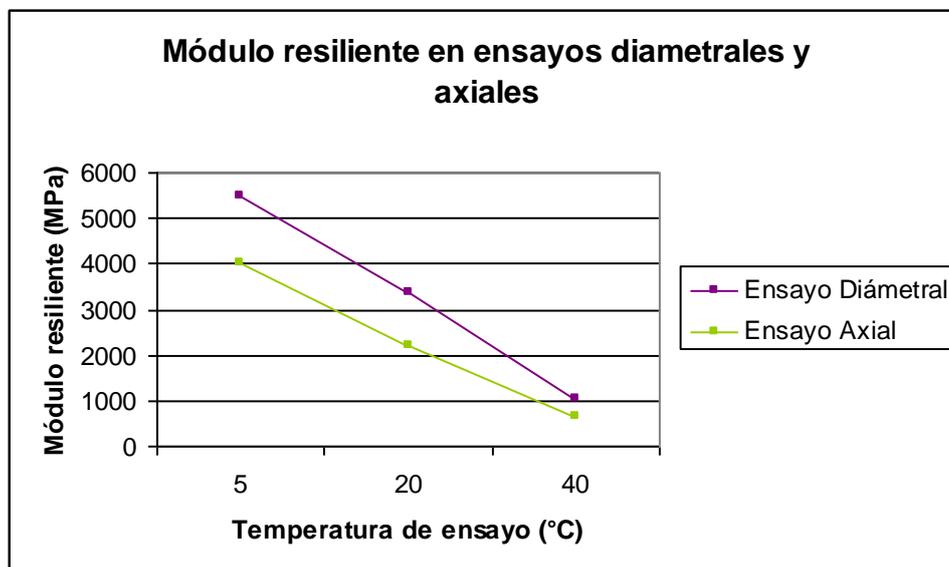


Figura 3.20 Valores de módulo resiliente para mezclas bituminosas en ensayos diametrales y axiales

(Fuente: Tayebali et al., 1997).

Tal como ya se ha indicado, Monismith et al. [35] observaron que para casi todas las variables analizadas en su estudio, el módulo resiliente del ensayo de compresión diametral fue mayor que el del ensayo axial.

Temperatura

Cochran y Furber [13] indicaron que en el módulo resiliente depende mucho de la temperatura de ensayo. Ellos observaron que con un incremento en la temperatura, se genera un decremento notable en los valores de módulo.

Boudreau et al. [10] realizaron un estudio paramétrico con el fin de observar, entre otras cosas, el efecto de la temperatura y de la duración de la carga en el módulo de las mezclas bituminosas. Utilizaron dos mezclas bituminosas en caliente compactadas con dos diferentes contenidos de huecos (4 y 10%), obtenidas mediante la utilización del método Marshall de compactación. Empleando ensayos diametrales con carga repetida, se consideró una duración de carga de 0,1 a 0,4 segundos; un nivel de esfuerzo introducido de 10 a 50% de la resistencia a la tensión; tres temperaturas de prueba (5, 25 y 40 °C) y tres frecuencias de carga (0,33, 0,5 y 1 Hz). Los resultados han mostrado que los valores de módulo decrecen con el incremento de la temperatura y de la duración de la carga.

Paul y Mohammad [40] muestran en un estudio realizado mediante ensayos de tracción indirecta sobre las mezclas asfálticas, el efecto de la temperatura sobre el módulo resiliente, figura 3.21. Encontraron que los valores de módulo resiliente disminuyen a medida que se incrementa la temperatura, independientemente del valor que se considere para dichas temperaturas de prueba.

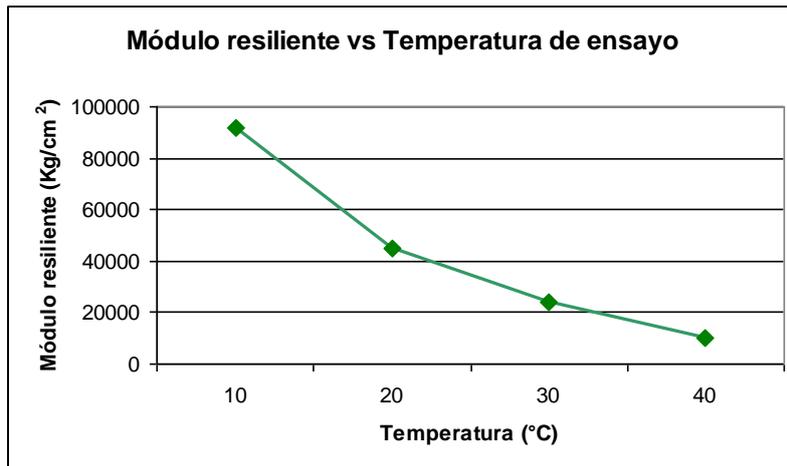


Figura 3.21 Valores de módulo resiliente para diferentes temperaturas de ensayo (Fuente: Paul y Mohammad, 1997).

Martínez y Pérez Jiménez [30] también estudiaron mediante el ensayo de tracción indirecta, la sensibilidad de las mezclas bituminosas al cambio de temperatura, figura 3.22. La temperatura de ensayo tiene gran influencia en los resultados obtenidos a tracción indirecta, ya que cuanto mayor sea la temperatura de ensayo, menor es la resistencia a tracción de la mezcla bituminosa. Además, los resultados obtenidos no sólo dependían de la temperatura de ensayo, si no también del betún utilizado.

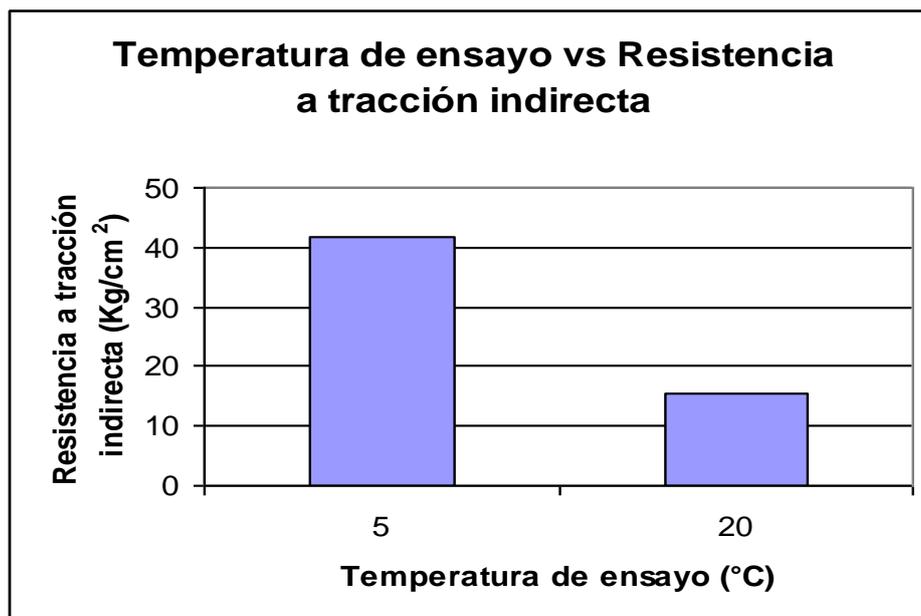


Figura 3.22 Valores de resistencia a tracción indirecta de mezclas bituminosas ejecutadas a diferentes temperaturas de ensayo (Fuente: Martínez y Pérez Jiménez, 2000).

Monismith et al. [35] observaron el gran efecto que tiene la temperatura de ensayo sobre los valores de módulo resiliente. Este punto ha sido mencionado anteriormente. Los valores de módulo resiliente disminuyen con un incremento en la temperatura de ensayo: al aumentar la temperatura de 0 a 20 °C, se tiene un decremento del 60 al 70% en los valores de módulo y alrededor del 90% cuando la temperatura varía de 20 a 40 °C.

Meor O. Hamzah [32] estudió el efecto de la temperatura de ensayo en el módulo resiliente de las mezclas bituminosas, tanto en mezclas envejecidas, como en mezclas no envejecidas. En la figura 3.23 se observa que las mezclas no envejecidas presentan un menor módulo que las envejecidas y que cuanto mayor es la temperatura de ensayo menor es el módulo resiliente, tanto para mezclas envejecidas, como no envejecidas.

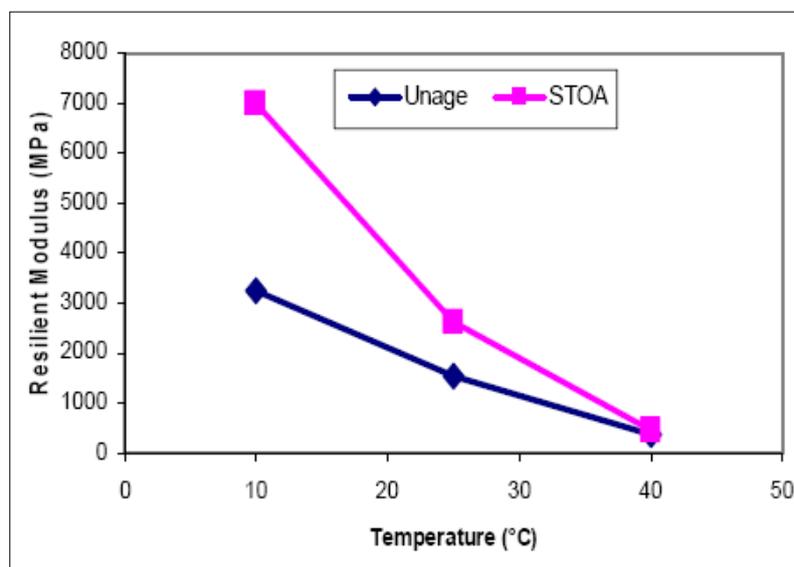


Figura 3.23 Efecto de la temperatura de ensayo sobre el módulo resiliente de mezclas bituminosas (Fuente: Meor, 2008).

3.5 APLICACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE EN EL DISEÑO DE FIRMES

3.5.1 Método de diseño de firmes AASHTO

El método de diseño AASHTO, versión 1993, describe con detalle los procedimientos para el diseño de la sección estructural de los firmes flexibles. Este diseño está basado principalmente en encontrar el número estructural SN para que el firme flexible pueda soportar el nivel de carga solicitado.

Al utilizar el método AASHTO, la propiedad fundamental para caracterizar los suelos de subrasante para el diseño de firmes es el módulo resiliente.

Muchas de las discusiones respecto al módulo resiliente han estado centradas en métodos de ensayo, equipos, repetibilidad de resultados, etc. Sin embargo, hay otras preguntas fundamentales que necesitan discutirse, preguntas que seguramente fueron

consideradas al desarrollarse la guía AASHTO 1986, pero que hasta ahora no han sido entendidas. Estas preguntas están relacionadas con la selección del valor “correcto” del módulo resiliente para ser usado en el diseño de firmes.

Puede parecer que la aplicación del módulo resiliente es simple, pero su uso se complica ya que no existe un valor único para un suelo, si no que hay un infinito número de valores dependiendo de las condiciones de ensayo.

Por lo tanto, el valor apropiado del módulo resiliente debería ser determinado para las condiciones que corresponden a la condición final del suelo y de acuerdo con el nivel de esfuerzo aplicado por un vehículo. Idealmente, este sería el caso.

Sin embargo, la determinación del módulo resiliente de la forma mencionada anteriormente, no sirve de nada cuando se utiliza el procedimiento para diseño de firmes AASHTO, ya que el actual método solo involucra un número estructural SN que está determinado por variables, en las cuales no es considerado el módulo resiliente.

Por otro lado la guía mecanicista empírica AASHTO 2002 [18] considera para el diseño de un firme el módulo resiliente tanto de suelos, como de mezclas bituminosas.

3.5.2. Métodos mecanicistas

Los procedimientos mecanicistas están basados en la suposición de que un firme puede ser modelado como una estructura multicapa elástica o viscoelástica sobre una cimentación elástica o viscoelástica. Suponiendo que los firmes pueden ser modelados de esta manera, es posible calcular los esfuerzos, las deformaciones o las deflexiones debidas al tráfico en cualquier punto de un firme. Sin embargo, se sabe que hay factores que no pueden ser modelados, por lo que es necesario calibrar los modelos con observaciones de campo.

En estos métodos, la caracterización de los materiales que conforman las capas de un firme se realiza tomando como propiedad básica el módulo resiliente, que es una medida de las propiedades elásticas de los materiales que conforman el firme.

Es bien sabido que los materiales bituminosos debido a sus características reológicas tienen un comportamiento viscoelástico y que el módulo de elasticidad varía con el nivel de esfuerzos, frecuencia de carga y temperatura.

Por este motivo el modelo de diseño deben ser calibrados a partir de diferentes materiales ensayados en diferentes condiciones de ensayo, de forma que se asegure que lo que se obtiene en el modelo, sea lo más aproximado a lo que se sucede en campo.

Dentro de estos modelos se encuentran el de clima, el de transferencia de calor, el de equilibrio de humedad, el de tráfico, el estructural, el de respuesta del firme, el de fatiga y el de deformación permanente en mezcla bituminosa. Estos modelos generalmente son apoyados con software de elementos finitos.

Dentro de los modelos para mezclas bituminosas se encuentra el agrietamiento por fatiga, Miner (1945), el cual ha sido mencionado por Huang [18], el cual predice el agrietamiento por fatiga que va a tener una mezcla, a partir del número de repeticiones de cargas que va a resistir en relación a la deformación a tensión que tiene.

Para el modelo de deformación permanente, en el estado de Ohio se desarrolló un modelo que asume una relación lineal entre la deformación permanente y el número de repeticiones, el cual se realizó midiendo la deformación en un ensayo de compresión vertical.

Considerando que la mayoría de las agencias, instituciones y empresas dedicadas al diseño de firmes no cuentan con el equipo para realizar los ensayos de módulo resiliente, se han desarrollado investigaciones tendientes a establecer correlaciones entre los ensayos habituales y el módulo resiliente, tanto para suelos como para mezclas bituminosas.

El método de diseño AASHTO está considerando colocar en el coeficiente estructural el módulo resiliente, mediante la ayuda de los ensayos Marshall y Cohesímetro, Yoder y Witczak, los cuales son mencionados por Huang [18].

Una relación similar ha sido desarrollada por el Instituto del Asfalto, la cual relaciona el valor de resistencia R y el módulo resiliente y es presentada por Huang como sigue [18]:

$$Mr(\text{psi}) = A + BX(\text{Valor de R}) \quad (3.4)$$

donde:

$$A = 772 \text{ a } 1155$$

$$B = 369 \text{ a } 555$$

3.6 CONSIDERACIONES FINALES

Las investigaciones experimentales que se han descrito demuestran que el ensayo de módulo resiliente puede ser utilizado, considerando ciertas variables como pueden ser temperatura, la frecuencia y el nivel de esfuerzo, para conocer el módulo resiliente de una mezcla bituminosa.

Sin embargo, esta información proviene de otros países, y por tanto los resultados obtenidos son válidos para los materiales propios del lugar, así como para sus tipos de mezclas, que respetan especificaciones diferentes de acuerdo al estado o país donde se estudie.

Es por ello que el desarrollo experimental de esta tesis tiene como punto de partida el análisis de la sensibilidad del ensayo aplicado a las mezclas bituminosas según recomendaciones mexicanas y con los materiales utilizados habitualmente en México.

De todos modos, y con el propósito de obtener mayor y más confiable información, se cotejarán los resultados obtenidos de módulos resilientes con los expuestos en este capítulo en los casos de condiciones comparables.

Se realizará un análisis detallado de las variables que influyen en el módulo resiliente: composición de la mezcla, elaboración de las probetas y ejecución del ensayo, con objeto de analizar la sensibilidad del ensayo y poder establecer valores de control.

Por otro lado, se comparará el módulo resiliente en mezcla fabricada en planta con el de los testigos extraídos de obra, con el objeto de determinar la calidad de fabricación y puesta en obra de la mezcla bituminosa, y posteriormente poder determinar un parámetro de control de obra, a partir del ensayo de módulo resiliente.

Durante este análisis se demostrará que el actual método de control de calidad a partir de la medida de la densidad, no asegura la calidad de una mezcla bituminosa ya compactada, si no que es necesario de un ensayo que lo complemente, como el módulo resiliente, que tenga capacidad para medir las propiedades mecánicas de la mezcla, determinantes para la durabilidad de la misma.

La principal ventaja de esta propuesta de ampliación del control de calidad de la mezcla ejecutada es que permite utilizar tanto las mismas probetas elaboradas en planta, como los mismos testigos extraídos de obra utilizados para el control de densidad. Además, el ensayo de módulo resiliente es sencillo, útil y práctico.

CAPÍTULO 4

ESTUDIO DE LA APLICACIÓN DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE EN EL CONTROL DE CALIDAD DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

4.1 METODOLOGÍA

El desarrollo de la investigación experimental sobre la aplicación del ensayo de módulo resiliente en el control de calidad de las mezclas bituminosas, se ha realizado en dos etapas diferentes, en función de los objetivos propuestos: por un lado, el ensayo probetas fabricadas en laboratorio con objeto de evaluar la sensibilidad del ensayo y, por otro lado, el ensayo de testigos extraídos de firmes construidos para analizar los valores de módulo realmente obtenidos, de acuerdo al esquema recogido en la figura 4.1.

Tanto las probetas como los testigos han sido ensayados a módulo resiliente mediante una prensa dinámica, con actuador de aire comprimido, modelo Cooper. A partir de los resultados obtenidos se han realizado análisis estadísticos y se han obtenido correlaciones entre los parámetros estudiados, tal como se describe más adelante en este capítulo.

Mediante el análisis estadístico se ha determinado la variable más sensible al ensayo de módulo resiliente y posteriormente, mediante el ensayo de fatiga por tensión indirecta, se ha demostrado el efecto que tiene esta variable en la vida a fatiga de la mezcla.

Finalmente, se ha hecho un análisis estructural mediante un modelo multicapa, a partir de los valores de módulos resilientes obtenidos en testigos, con objeto de evaluar el efecto de una ejecución deficiente de la mezcla sobre la vida del firme.

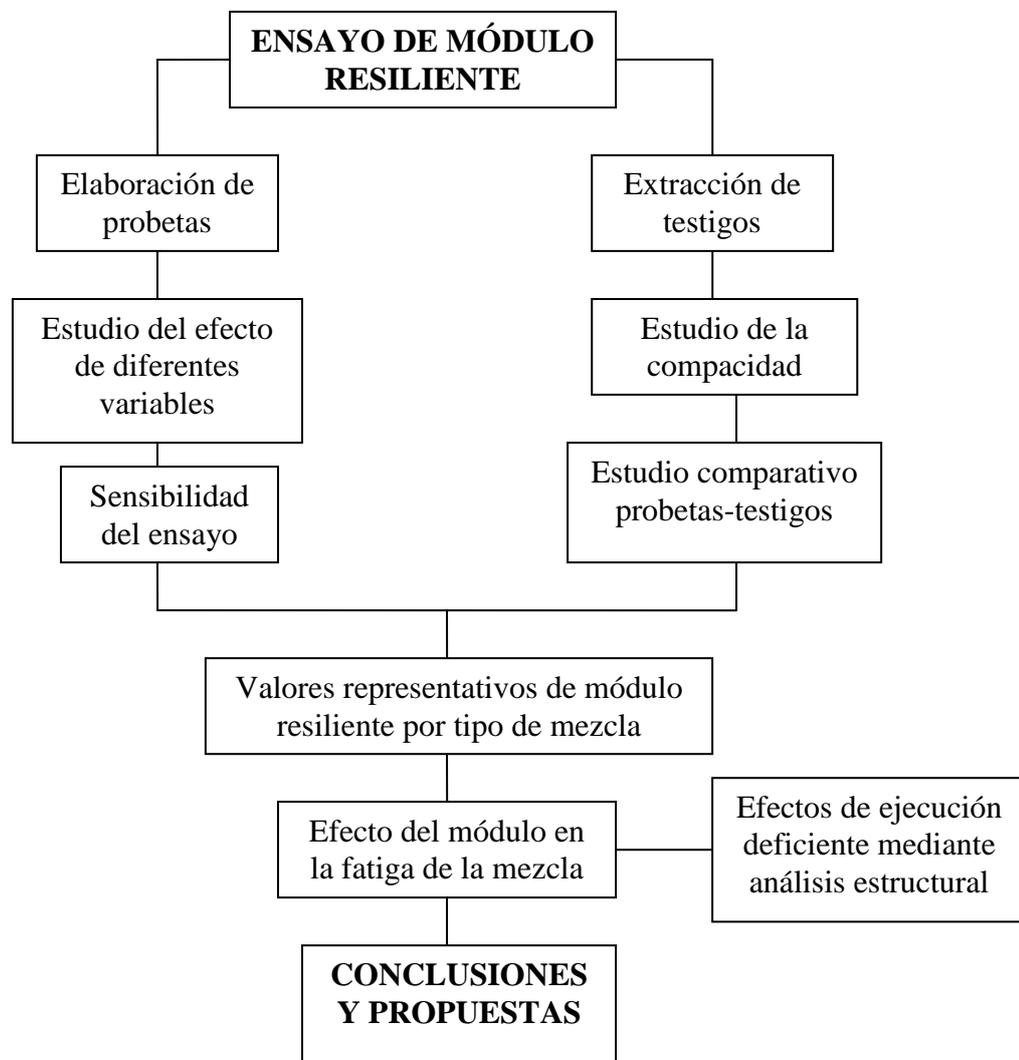


Figura 4.1 Plan de Trabajo

4.2 SENSIBILIDAD DEL ENSAYO

El objetivo de esta etapa ha sido comprobar si el ensayo de módulo resiliente es capaz de detectar pequeñas variaciones en la composición de la mezcla y conocer los valores de módulo resiliente que se pueden obtener con los diferentes tipos de mezclas estudiadas. Para ello, se han realizado en laboratorio series de probetas que han sido ensayadas a módulo resiliente a 20 °C, evaluando el efecto de las siguientes variables:

- a) Composición de la mezcla:
 - Contenido de ligante
 - Tipo de ligante
 - Naturaleza y calidad del árido
 - Granulometría
 - Tamaño máximo del árido

- b) Elaboración de las probetas
 - Energía de compactación
 - Temperatura de compactación
 - Tipo de compactación
 - Altura de la probeta

- c) Ejecución del ensayo
 - Temperatura de ensayo
 - Frecuencia de aplicación de carga
 - Inmersión de probetas en agua

Las mezclas que se han estudiado en el laboratorio son densas con tamaños máximos de 12,5, 19 y 25 mm (de acuerdo a la actual normativa mexicana N-CMT-4-04/08) [39].

Las granulometrías que se han utilizado corresponden a los valores medios de los husos granulométricos especificados en México, de acuerdo a la normativa mexicana de la Secretaría de Comunicaciones y transportes (N-CMT-4-04/08), tabla 4.1. Además, se

han considerado las granulometrías correspondientes al límite inferior y superior de estos husos.

Tamiz	Tamaño nominal del árido (mm)		
	12,5	19	25
Designación	Porcentaje que pasa		
2"	---	---	---
1 ½"	---	---	100
1"	---	100	90-100
¾"	100	90-100	79-90
½"	90-100	72-90	58-71
3/8"	76-90	60-76	47-60
¼"	56-69	44-57	36-46
Nº4	45-59	37-48	30-39
Nº10	25-35	20-29	17-24
Nº20	15-22	12-19	9-16
Nº40	11-16	8-14	5-11
Nº60	8-13	6-11	4-9
Nº100	5-10	4-8	2-7
Nº200	2-6	2-5	1-4

Tabla 4.1 Husos granulométricos de acuerdo a la normativa Mexicana (Fuente: www.imt.mx)

Los áridos han sido: un árido tipo basalto, perteneciente al Occidente de México, cerca de la localidad de Guadalajara; un árido tipo calizo, proveniente del Sureste de México, cercano a la ciudad de Tabasco; y un material tipo granito, perteneciente al norte de México, cerca de la ciudad de Tijuana. Sus principales características se recogen en la tabla 4.2.

Propiedad	Tipo de árido		
	Basalto	Calizo	Granito
Densidad (g/cm ³)	2,713	2,345	2,628
Absorción (%)	1,9	7,2	1,1
Desgaste de Los Ángeles (%)	13	29	20

Tabla 4.2 Propiedades de los áridos utilizados

El betún utilizado en la mayoría de las probetas elaboradas en laboratorio ha sido un PG 70-22 proveniente de la refinería de Salamanca, México; esta clasificación del betún se ha realizado de acuerdo a la nueva normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México N-CMT-4-05-004/08 [39]. Además, para evaluar el efecto del tipo de betún, se ha utilizado un betún PG 58-22 de la misma refinería, un PG 64-22 proveniente de la refinería de Tampico Madero, así como los betunes modificados PG 76-22 y PG 82-22, respectivamente. Las principales características de estos betunes se muestran en la tabla 4.3.

Propiedad	Tipo de betún				
	PG 58-22	PG 64-22	PG 70-22	PG 76-22	PG 82-22
Temperatura [G*/senδ =1.0 kPa] (°C)	58,3	67,5	70,2	80,9	83,2
Penetración a 25 °C (1/10 mm)	187	148	45	42	38
Punto de reblandecimiento (°C)	42	43	50	65	68
Recuperación elástica por torsión a 25°C (%)	10	4	9	50	55

Tabla 4.3 Propiedades de los betunes utilizados

El contenido óptimo de betún en las mezclas se ha obtenido con el método Marshall, de acuerdo a la normativa mexicana de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes

(N-CMT-4-05-003/08) [39]. Los resultados finales de las dosificaciones de las mezclas utilizadas se muestran en la tabla 4.4.

Tipo de Mezcla	Porcentaje de betún óptimo (%)
Árido Basalto, tamaño máximo 12,5 mm, granulometría centrada en el huso	7,0
Árido Basalto, tamaño máximo 19,0 mm, granulometría en el inferior del huso	6,5
Árido Basalto, tamaño máximo 19,0 mm, granulometría centrada del huso	6,5
Árido Basalto, tamaño máximo 19,0 mm, granulometría en el superior del huso	6,0
Árido Basalto, tamaño máximo 25,0 mm, granulometría centrada del huso	5,5
Árido Calizo, tamaño máximo 19,0 mm, granulometría centrada del huso	9,5
Árido Granito, tamaño máximo 19,0 mm, granulometría centrada del huso	5,0

Tabla 4.4 Dosificaciones de betún de las mezclas utilizadas

En la mayoría de los casos se han elaborado series de cuatro probetas (en algunos casos de tres). Se ha considerado como mezcla patrón la fabricada con una energía de compactación de 75 golpes por cara con el martillo Marshall y a una temperatura de compactación de 145 °C, de acuerdo a los resultados de la carta de viscosidad. La densidad y porcentaje de huecos fueron calculados de acuerdo a los métodos establecidos en la norma NLT-168/90 [12]. Las probetas se han ensayado a módulo resiliente de acuerdo a la nueva norma Europea, UNE-EN 12697-26 ANEXO C [38], a una temperatura de 20 °C, y finalmente, a partir de los resultados individuales obtenidos, se han representado en tablas y figuras los valores medios.

4.2.1 Efecto de la composición de la mezcla

4.2.1.1 Contenido de betún

El efecto del contenido de ligante sobre el módulo resiliente de la mezcla ha sido evaluado en una mezcla de tipo densa, de tamaño máximo de árido de 19 mm, con un tipo de betún PG 70-22 en el que se ha variado el contenido entre su óptimo $\pm 1\%$. El árido empleado es de tipo basalto y la granulometría de la mezcla ha sido ajustada al centro del huso granulométrico. Todas las probetas fueron compactadas a la temperatura de 145 °C según la carta de viscosidad del betún usado y 75 golpes/cara, condiciones patrón del estudio.

Los resultados medios obtenidos se muestran en la tabla 4.5 y se representan en la figura 4.2. En ellas se observa que aumentando el porcentaje de betún, disminuye el módulo resiliente de la mezcla bituminosa, y cuando se aumenta el porcentaje de betún un 1% respecto al óptimo, la disminución del módulo resiliente es más significativa que el aumento producido al aumentarlo en un 1%.

Contenido de betún (%)	Densidad (g/cm³)	Módulo resiliente (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
5,5 (1% menor)	2,288	4102	360,1	8,8
6,5 (Óptimo)	2,327	3752	62,2	1,7
7,5 (1% mayor)	2,334	2920	67,8	2,3

Tabla 4.5 Resultados de módulo resiliente vs contenido de betún

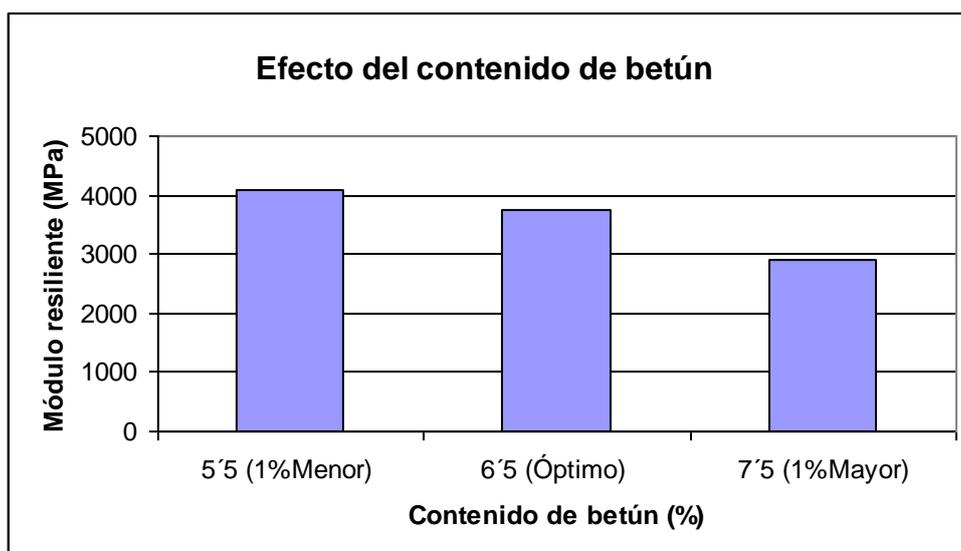


Figura 4.2 Resultados de módulo resiliente vs contenido de betún

4.2.1.2 Tipo de betún

Se ha analizado el efecto del tipo de ligante sobre el módulo resiliente, ensayando una mezcla densa, con árido basalto, centrada en el huso, fabricada con el contenido óptimo de betún (6,5%) y con diferentes betunes, tabla 4.6. Los resultados medios obtenidos se han representado en la figura 4.3.

Tipo de betún	Densidad (g/cm ³)	Módulo resiliente (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
PG 58-22	2,299	1159	104,7	9,1
PG 64-22	2,293	2321	240,0	10,3
PG 70-22	2,327	3752	62,2	1,7
PG 76-22	2,311	4408	65,9	1,5
PG 82-22	2,308	4630	58,6	1,3

Tabla 4.6 Resultados de módulo resiliente vs tipo de betún

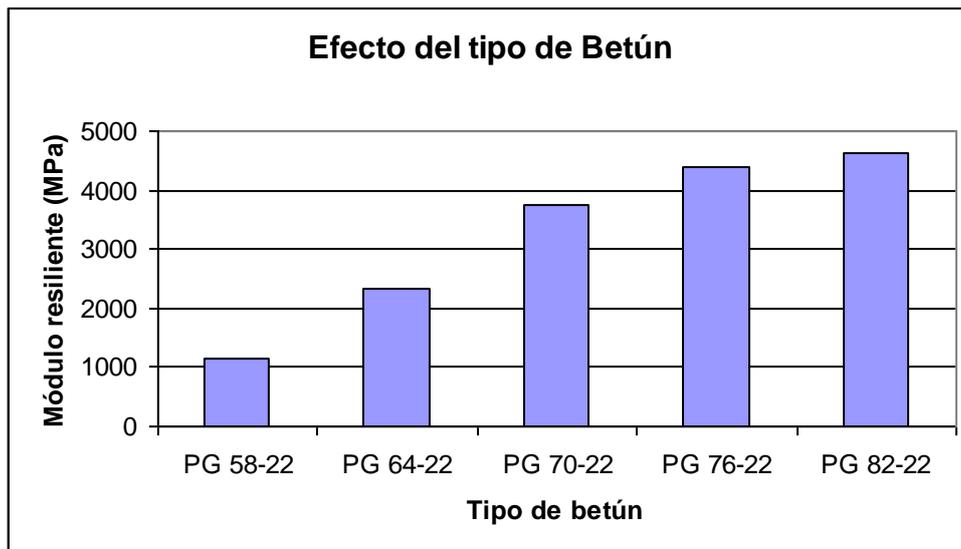


Figura 4.3 Resultados de módulo resiliente vs tipo de betún

Se comprueba que los betunes con mayor grado de desempeño (PG), aumentan los módulos resilientes. La variación de la densidad es muy pequeña. Es importante señalar que el ensayo se ha realizado a 20 °C, y que el comportamiento de estos betunes a otras temperaturas dependerá de la susceptibilidad térmica de cada uno de ellos.

4.2.1.3 Naturaleza del árido

Con el fin de evaluar la sensibilidad del ensayo frente a la naturaleza del árido se ha ensayado una mezcla densa, de tamaño máximo de árido de 19 mm, centrada en el huso y fabricada con un betún PG 70-22, empleando tres diferentes de áridos: calizo, basalto y granito. El óptimo de betún depende del tipo de árido utilizado, tabla 4.4.

El árido calizo tiene un menor peso específico y en consecuencia se obtiene una menor densidad de las probetas; sin embargo los módulos son los más elevados, aunque la diferencia entre unos y otros no es excesiva. Más adelante, en el apartado correspondiente al estudio de la influencia de la inmersión de las probetas en agua (apartado 4.2.3.3), se analiza el efecto de la calidad del árido grueso y del filler.

Tipo de Árido	Densidad (g/cm³)	Módulo resiliente (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
Calizo	2,171	4483	369,4	8,2
Basalto	2,327	3752	62,2	1,7
Granito	2,391	4227	117,5	4,2

Tabla 4.7 Resultados de módulo resiliente vs tipo de árido

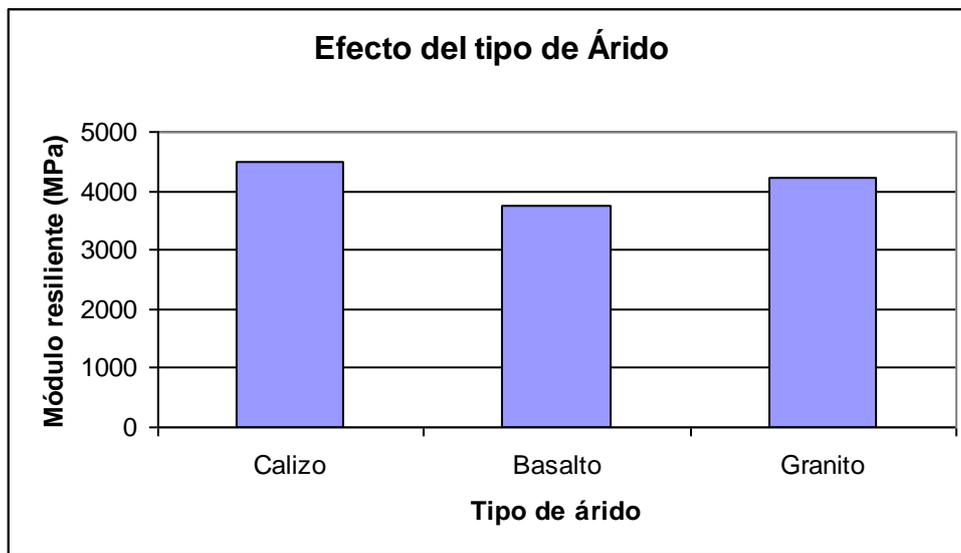


Figura 4.4 Resultados de módulo resiliente vs tipo de árido

Tal como se ha indicado, con el árido calizo se obtienen los mayores módulos. Por otra parte, el árido granito tiene mayor módulo que el basalto debido a su mayor peso específico y mayor densidad de las probetas.

4.2.1.4 Granulometría

En este punto se evalúa el efecto de las variaciones de la granulometría de la mezcla dentro de los husos, en los que se ha ensayado una granulometría centrada y otras ajustadas al límite inferior y superior respectivamente, utilizando el árido tipo basalto con tamaño máximo de árido de 19 mm, un betún PG 70-22 y el óptimo de betún depende de la granulometría utilizada, tabla 4.4.

Granulometría	Densidad (g/cm³)	Módulo resiliente (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
Inferior	2,259	3114	150,3	4,8
Centrada	2,327	3752	62,2	1,7
Superior	2,279	4438	151,3	3,4

Tabla 4.8 Resultados de módulo resiliente vs granulometría del árido

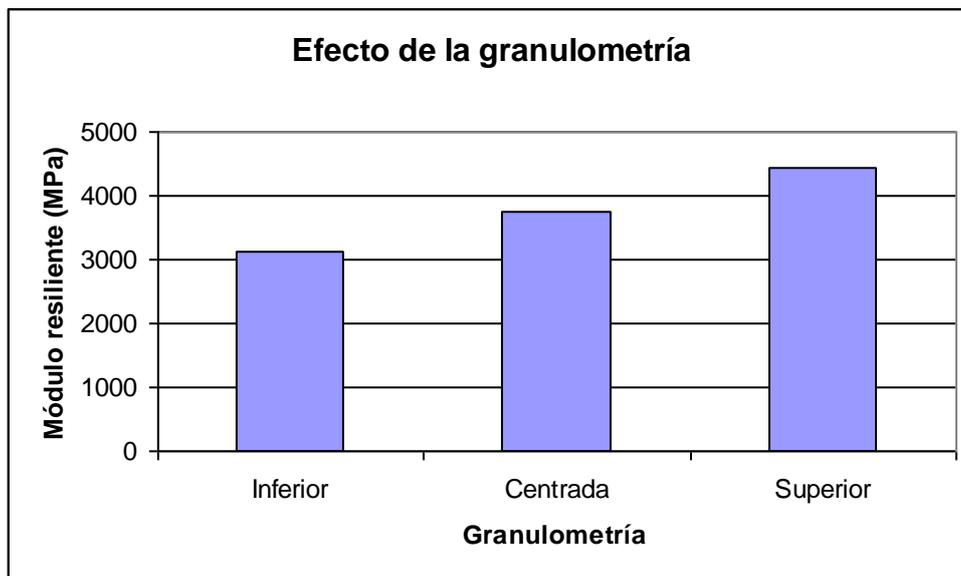


Figura 4.5 Resultados de módulo resiliente vs granulometría de la mezcla

En la tabla 4.8 se puede observar como las densidades están próximas entre sí, pero el módulo resiliente aumenta conforme la granulometría se acerca al límite superior del huso. Esta granulometría tiene mayor cantidad de finos, que proporcionan una mayor cohesión que la granulometría del límite inferior del huso.

4.2.1.5 Tamaño máximo del árido

Con el mismo tipo y dosificación de betún PG 70-22, con una granulometría centrada en el huso correspondiente y empleando el árido basalto, se han elaborado probetas variando el tamaño máximo de árido de 12,5, 19 y 25 mm. Los resultados se presentan en la tabla 4.9 y en la figura 4.6.

Tamaño máximo de árido	Densidad (g/cm ³)	Módulo resiliente (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
1/2"	2,293	3602	269,9	7,5
3/4"	2,327	3752	62,2	1,7
1"	2,421	4150	270,8	6,5

Tabla 4.9 Resultados de módulo resiliente vs tamaño máximo de árido

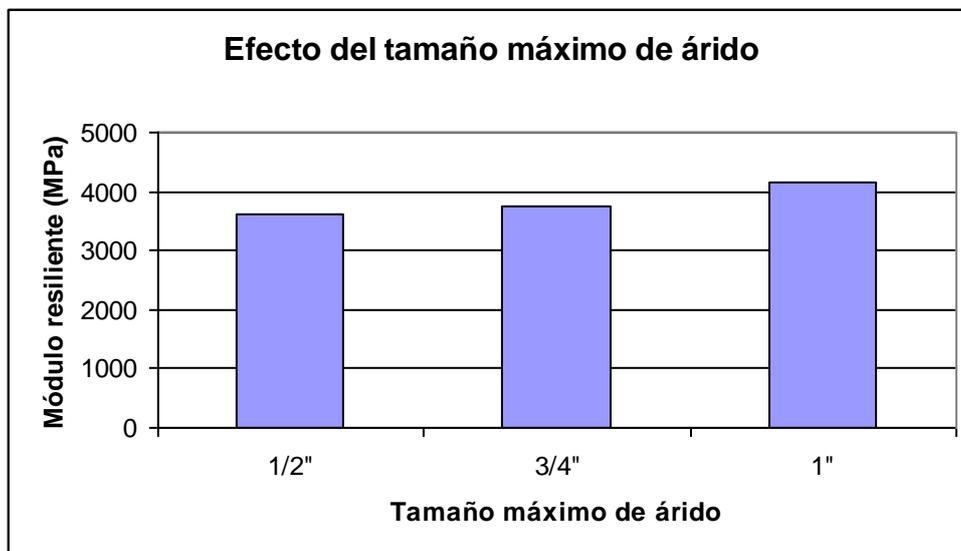


Figura 4.6 Resultados de módulo resiliente vs tamaño máximo de árido

Se puede apreciar como el tamaño máximo de árido influye poco en el módulo resiliente, ya que los valores obtenidos son muy similares para las mezclas bituminosas ensayadas.

De las variables relativas a la composición de la mezcla que se han estudiado, se observa que el tipo de betún es la que tiene una mayor influencia en el módulo resiliente, ya que se han observado las mayores diferencias. Le siguen el contenido de betún y la granulometría.

4.2.2 Efecto de la elaboración de la probeta

4.2.2.1 Energía y Temperatura de Compactación

El efecto de la compacidad de las mezclas bituminosas, la mayor o menor densidad obtenida en su compactación, se ha estudiado en una mezcla con granulometría centrada en huso, árido basalto, tamaño máximo de árido de 19 mm y con el contenido óptimo de betún PG 70-22 (6,5%), que se ha fabricado y compactado variando la energía de compactación Marshall: 35, 50, 75, 100 y 125 golpes por cara y la temperatura de compactación: la óptima, la óptima menos 20 °C y la óptima menos 40 °C.

Los resultados obtenidos de módulos resilientes se muestran en las tablas 4.10, 4.11 y 4.12 y se representan en la figura 4.7.

Nº golpes	Densidad (g/cm³)	Módulo resiliente (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
35	2,151	2243	383,2	17,1
50	2,181	2535	161,1	6,4
75	2,265	2980	339,3	11,4
100	2,281	2986	20,6	0,7
125	2,317	3222	29,3	0,8

Tabla 4.10 Efecto de la variación de la energía de compactación sobre el módulo resiliente, a 40 °C menos que la temperatura óptima de compactación

Nº golpes	Densidad (g/cm ³)	Módulo resiliente (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
35	2,205	2694	109,9	4,1
50	2,221	3098	194,7	6,3
75	2,266	3182	127,8	4,0

Tabla 4.11 Efecto de la variación de la energía de compactación sobre el módulo resiliente a 20 °C menos que la temperatura óptima de compactación

Nº golpes	Densidad (g/cm ³)	Módulo resiliente (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
35	2,196	2886	210,2	7,3
50	2,272	3135	486,2	15,5
75	2,327	3752	62,2	1,7

Tabla 4.12 Efecto de la variación de la energía de compactación sobre el módulo resiliente a la temperatura óptima de compactación

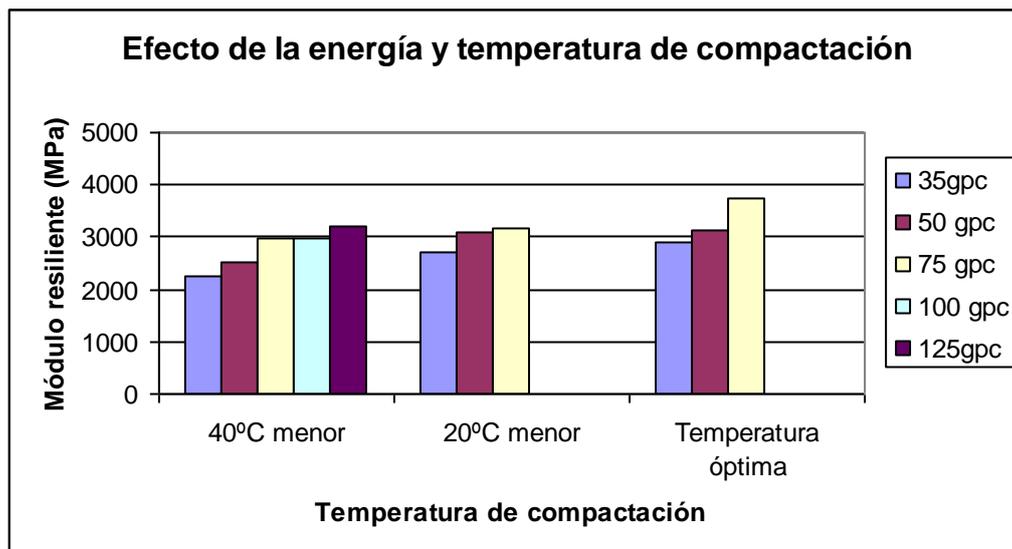


Figura 4.7 Variación del módulo resiliente en función de la temperatura y energía de compactación

A partir de los resultados obtenidos, se puede decir que la temperatura y energía de compactación son variables muy importantes en módulo resiliente. Al ir disminuyendo la temperatura de compactación el módulo disminuía, al igual que disminuir la energía de compactación. Además, cuando existe una combinación de una baja energía y de baja temperatura de compactación, los resultados de módulo resiliente decrecen notablemente.

Sin embargo, al aumentar la energía de compactación por encima de la energía normalizada, aunque se aprecia un ligero aumento del módulo, éste es mucho menos significativo que la disminución que se produce cuando la energía disminuye en la misma proporción.

En la figura 4.8 se puede observar como para una temperatura de compactación, al ir aumentando la energía de compactación, aumenta el módulo resiliente; análogamente, para una energía de compactación, el módulo resiliente aumenta al aumentar la temperatura de compactación. Pero lo más importante de esta figura es que, sí se compacta a una temperatura inferior a la óptima de compactación, aunque aumentando la energía de compactación más allá de lo habitual (75 golpes por cara) se puede llegar a alcanzar la misma densidad que compactando a la temperatura óptima, no se logra alcanzar el mismo módulo resiliente. Esto es debido a que el betón ya ha adquirido consistencia por el enfriamiento y por más fuerza de compactación que se proporcione, lo único que se puede lograr es romper esta cohesión y aumentar la densidad por la aproximación de las partículas, pero afectando a las propiedades mecánicas, que ya nunca se lograrán restablecer.

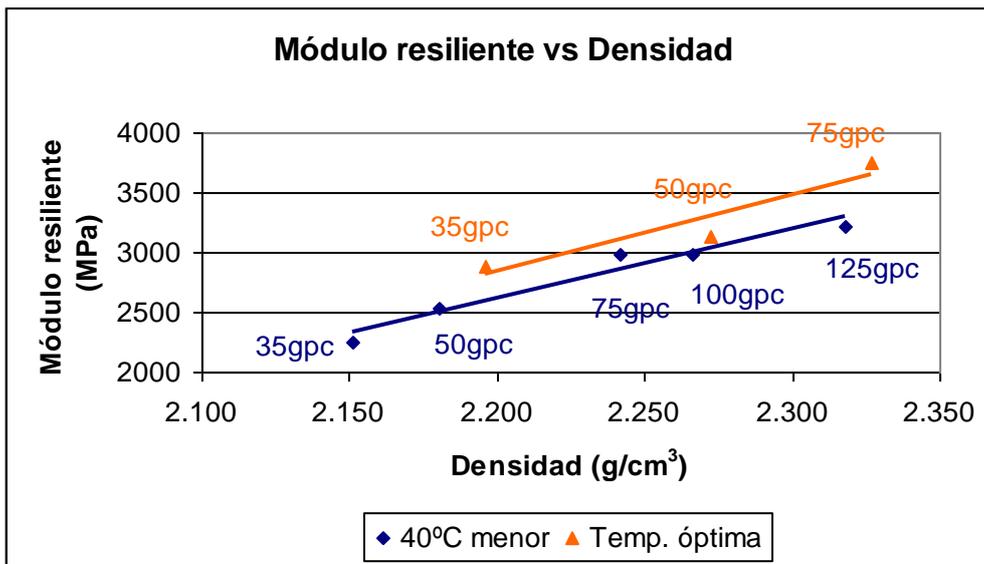


Figura 4.8 Variación del módulo resiliente y densidad en función de la temperatura y energía de compactación

4.2.2.2 Tipos de Energía de compactación

Otros de los factores que intervienen en el momento de fabricar una probeta de mezcla bituminosa es el tipo de compactación que se realice, así como la energía que es aplicada.

Es por ello que se ha analizado el efecto de dos tipos de compactadores: el compactador giratorio y el tradicional equipo Marshall, variando las energías de compactación que pueden aplicar ambos equipos, sobre una mezcla tipo densa con árido basalto, tamaño máximo de 19 mm, granulometría centrada en huso, porcentaje de betún óptimo (6,5%) y tipo de betún PG 70-22.

Energía de compactación (golpes)	Densidad (g/cm ³)	Módulo resiliente (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
35	2,196	2886	210,2	7,3
50	2,272	3135	486,2	15,5
75	2,327	3752	62,2	1,7

Tabla 4.13 Módulo resiliente vs energía de compactación en el equipo Marshall

Ángulo de giro de compactación (a 600 KPa)	Densidad (g/cm³)	Módulo resiliente (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
0,5°	2,108	2074	72,5	4,8
1,0°	2,163	2694	211,7	8,8
1,25°	2,254	3135	426,2	15,8
2,0°	2,285	3402	118,1	3,7

Tabla 4.14 Módulo resiliente vs energía de compactación en el Compactador Giratorio

Los resultados obtenidos, recogidos en las tablas 4.13 y 4.14 y representados en la figura 4.9, demuestran que el tipo de energía de compactación es un parámetro que tiene mucho efecto en las propiedades mecánicas de la mezcla. Cuando se utiliza la compactación por impacto, con la energía habitual de 75 golpes/cara, se obtiene sobre la mezcla analizada una mayor densidad y, consecuentemente, un mayor módulo que cuando se utiliza el compactador giratorio (con las condiciones habituales de 1,25°). Además, la disminución del número de golpes en el compactador Marshall implica una disminución en el módulo, pero esta disminución es menor, que la que se observa cuando disminuye el ángulo de giro en el compactador giratorio. Así, cuando se pasa de 75 a 35 golpes, el módulo pasa de 3752 a 2886 MPa, y cuando se pasa de 1,25 a 0,5°, el módulo pasa de 3135 a 2074 MPa.

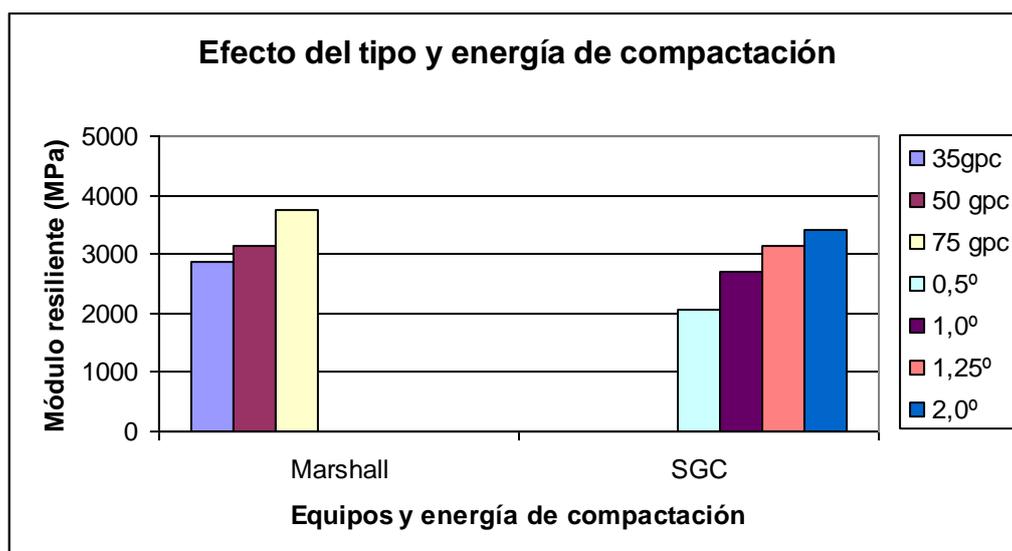


Figura 4.9 Variación del módulo resiliente en función del equipo y energía de compactación utilizada

4.2.2.3 Altura de probeta

También se ha analizado en el laboratorio el posible efecto de la altura de la probeta sobre las densidades y módulos resilientes obtenidos. Se ha ensayado una mezcla con árido basalto, de tamaño máximo de árido de 19 mm, granulometría centrada en huso, con el óptimo de betún (6,5%) y tipo de betún PG 70-22, compactada con compactador Marshall a 75 golpes.

En la tabla 4.15 y en la figura 4.10 se observa como al disminuir la altura de la probeta, disminuye tanto la densidad como el módulo resiliente, siendo esta disminución considerable cuando la altura de la probeta está por debajo de los 4 cm.

Altura (mm)	Densidad (g/cm ³)	Módulo resiliente (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
25	2,252	2870	411,8	10,1
40	2,309	3443	139,7	4,2
65	2,327	3752	62,2	1,7

Tabla 4.15 Resultados altura de probeta vs Módulo resiliente

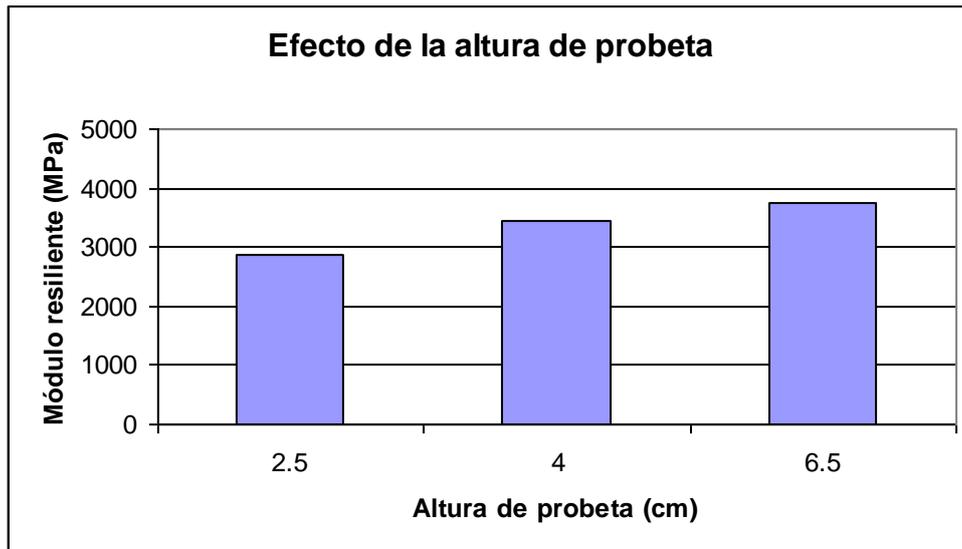


Figura 4.10 Variación del módulo resiliente en función de la altura de la probeta

4.2.3 Efecto de las condiciones de ejecución del ensayo

4.2.3.1 Temperatura de ensayo

Para analizar la influencia de la temperatura de ensayo se han realizado series de probetas de una mezcla densa, con árido basalto de tamaño máximo de 19 mm, granulometría centrada en huso, con diferentes tipos de betún (PG 58-22, 64-22, 70-22, 76-22 y 82-22) y contenido de betún óptimo (6,5%), y se ha determinado su módulo resiliente a 5, 20 y 40 °C.

Los valores obtenidos pueden verse en las tablas 4.16 a 4.20. La susceptibilidad térmica y rigidez del betún es la causa de los cambios tan notables del comportamiento de las mezclas a cambiar las temperaturas de ensayo.

Temperatura de ensayo (°C)	Densidad (g/cm³)	Módulo resiliente (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
5	2,298	2778	190,6	6,9
20	2,299	1159	104,7	9,0
40	2,299	248	22,1	9,3

Tabla 4.16 Módulo resiliente vs temperatura de ensayo, con betún PG 58-22

Temperatura de ensayo (°C)	Densidad (g/cm³)	Módulo resiliente (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
5	2,289	6655	101,7	1,5
20	2,292	2321	240,0	10,3
40	2,292	416	10,5	2,5

Tabla 4.17 Módulo resiliente vs temperatura de ensayo, con betún PG 64-22

Temperatura de ensayo (°C)	Densidad (g/cm³)	Módulo resiliente (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
5	2,292	12107	317,2	2,6
20	2,327	3752	62,2	1,7
40	2,308	602	10,1	6,4

Tabla 4.18 Módulo resiliente vs temperatura de ensayo, con betún PG 70-22

Temperatura de ensayo (°C)	Densidad (g/cm ³)	Módulo resiliente (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
5	2,307	10048	647,2	6,4
20	2,311	4408	65,9	1,5
40	2,307	952	27,8	2,9

Tabla 4.19 Módulo resiliente vs temperatura de ensayo, con betún PG 76-22

Temperatura de ensayo (°C)	Densidad (g/cm ³)	Módulo resiliente (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
5	2,304	10593	403,5	3,8
20	2,308	4630	58,6	1,3
40	2,300	1043	5,9	0,6

Tabla 4.20 Módulo resiliente vs temperatura de ensayo, con betún PG 82-22

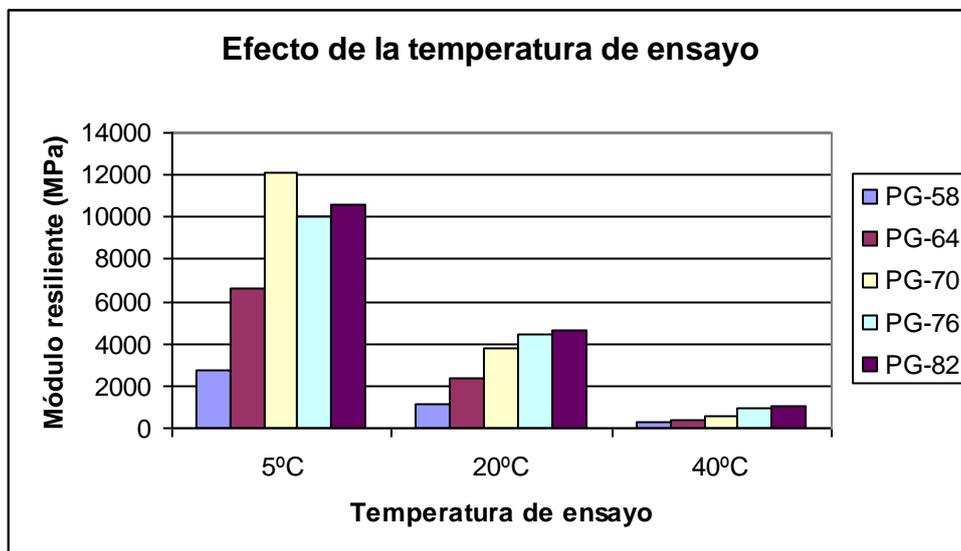


Figura 4.11 Variación del módulo resiliente en función de la temperatura de ensayo y tipo de betún

En las anteriores tablas se observa que, para cualquier tipo de betún, al ir aumentando la temperatura de ensayo, va disminuyendo fuertemente el módulo resiliente; además, se

puede ver como el betún PG 70-22 a bajas temperaturas tiene el mayor módulo, mientras que a medias y altas temperaturas no es así; esto quiere decir que este betún presenta una rigidización excesiva a bajas temperaturas.

4.2.3.2 Frecuencia de aplicación de carga

También se han elaborado probetas con mezcla densa, árido basalto con tamaño máximo de 19 mm, granulometría centrada en huso, contenido óptimo de betún (6,5%) y tipo de betún PG 70-22, que se han ensayado variando la frecuencia de aplicación de carga, tabla 4.21 y figura 4.12.

Frecuencia de aplicación de carga (Hz)	Densidad (g/cm³)	Módulo resiliente (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
0'33	2,317	3146	121,2	3,9
0'5	2,327	3752	62,2	1,7
1'0	2,311	4352	271,5	6,2

Tabla 4.21 Módulo resiliente vs frecuencia de aplicación de carga

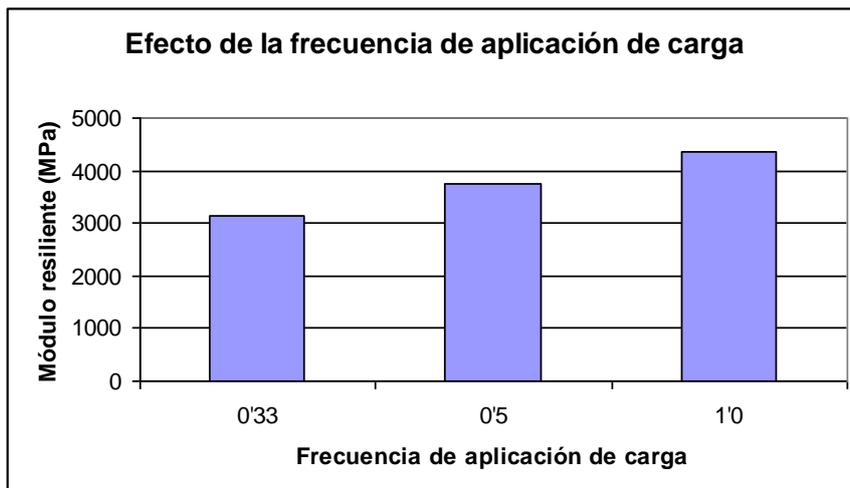


Figura 4.12 Variación del módulo resiliente en función de la frecuencia de aplicación de carga

Cuando menor es la frecuencia de aplicación de la carga, menor es el módulo resiliente, observando variaciones de 4352 y 3146 MPa cuando la frecuencia pasa de 1,0 a 0,33 Hz.

4.2.3.3 Inmersión de probetas en agua

Por último, para estudiar el efecto de la acción del agua, se han fabricado probetas de mezcla densa, centrada en huso de tamaño máximo de árido de 19 mm, óptimo de betún, tipo de betún PG 70-22, con tres tipos de áridos: basalto, calizo y granito. Un grupo de probetas se ha mantenido sumergido en agua durante 1 día a 60 °C antes de ensayar, mientras que otro se ha mantenido en condiciones ambientales. Los resultados obtenidos se recogen en las tablas 4.22 y 4.23 y se representan en la figura 4.13.

Tipo de árido	Densidad (g/cm³)	Módulo resiliente (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
Basalto	2,327	3752	62,2	1,7
Calizo	2,171	4483	369,4	8,2
Granito	2,391	4227	177,5	4,2

Tabla 4.22 Módulo resiliente vs tipo de árido, vía seca

Tipo de árido	Densidad (g/cm³)	Módulo resiliente (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
Basalto	2,307	3153	52,0	1,7
Calizo	2,165	4245	208,0	4,9
Granito	2,394	3509	52,9	1,5

Tabla 4.23 Módulo resiliente vs tipo de árido, vía húmeda

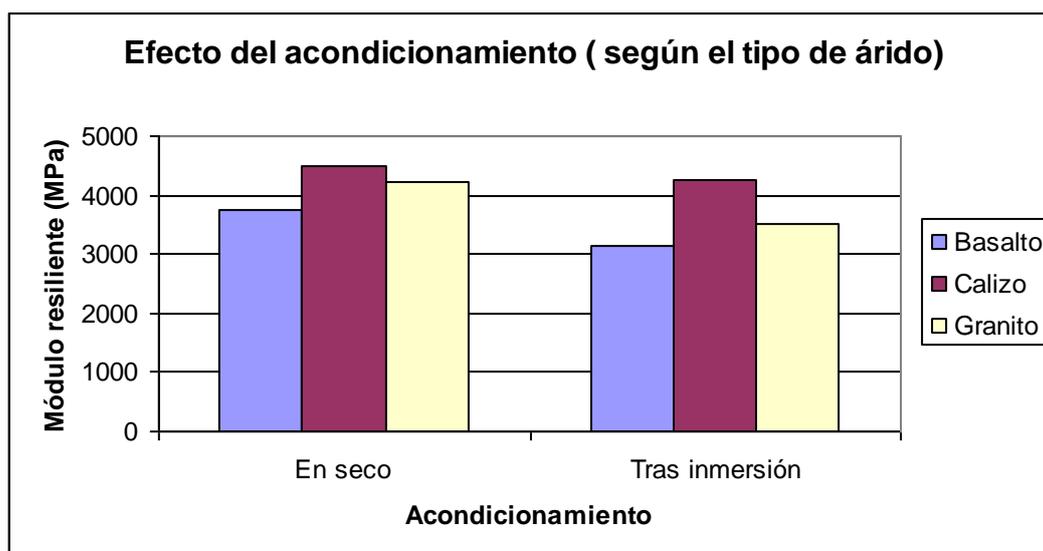


Figura 4.13 Variación del módulo resiliente en función del tipo de árido y acondicionamiento

Como se observa en la figura 4.13 el tipo de árido tiene gran importancia en la pérdida de módulo resiliente por inmersión en agua. Los de naturaleza ácida, el basalto y el granito, son los áridos más susceptibles a la acción del agua, mostrando una mayor pérdida de módulo.

Adicionalmente, se ha realizado este mismo estudio utilizando una mezcla densa de granulometría centrada en huso, árido basalto, tamaño máximo de 19 mm, óptimo de betún, variando el tipo de betún de acuerdo a su grado de desempeño (PG). Los resultados se muestran en las tablas 4.24, 4.25 y se representan en la figura 4.14.

Tipo de betún	Densidad (g/cm ³)	Módulo resiliente (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
PG 58-22	2,299	1159	104,7	9,1
PG 64-22	2,293	2321	240,0	10,3
PG 70-22	2,327	3752	62,2	1,7
PG 76-22	2,311	4408	65,9	1,5
PG 82-22	2,308	4630	58,6	1,3

Tabla 4.24 Módulo resiliente vs tipo de betún, vía seca

Tipo de betún	Densidad (g/cm ³)	Módulo resiliente (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
PG 58-22	2,310	877	31,0	3,5
PG 64-22	2,285	1796	122,5	6,8
PG 70-22	2,309	3153	52,0	1,7
PG 76-22	2,302	4358	167,5	3,8
PG 82-22	2,303	4428	1,2	0,1

Tabla 4.25 Módulo resiliente vs tipo de betún, vía húmeda

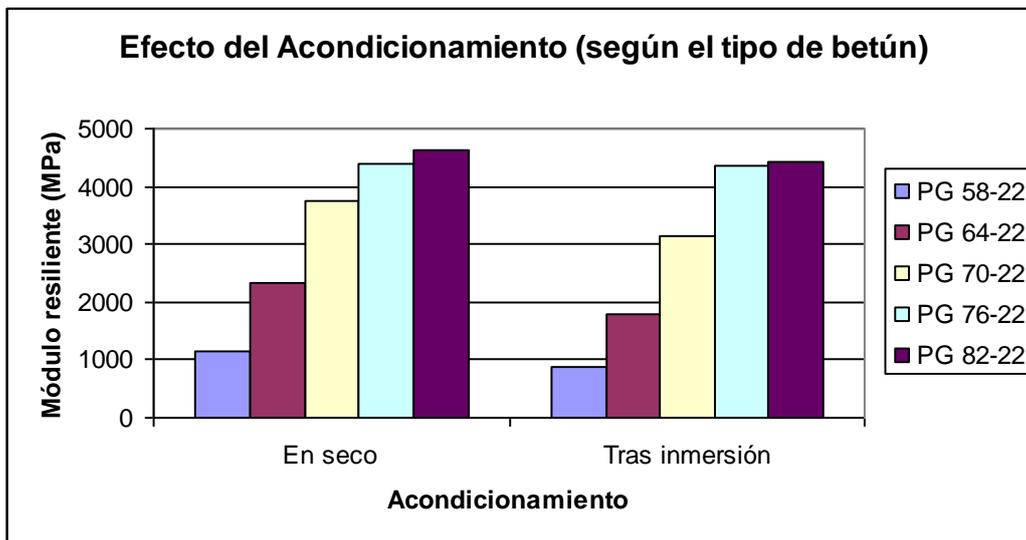


Figura 4.14 Variación del módulo resiliente en función del tipo de betún y acondicionamiento

En este caso (árido basalto), se observa que la pérdida de módulo resiliente por efecto de la inmersión en agua, varía para cada betún, siendo los betunes PG 58-22, 64-22 y 70-22 los que presentan mayor pérdida, mientras que los betunes PG 76-22 y 82-22, tienen una pérdida de módulo insignificante, ya que estos dos betunes están modificados con polímero, mejorándose, consecuentemente, la adhesividad árido-ligante.

4.3 ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO

4.3.1 Introducción

Investigadores de prácticamente todos los campos de estudio llevan a cabo experimentos, por lo general, para descubrir algo acerca de un proceso o sistema particular. En un sentido literal, un experimento es una prueba. En una perspectiva más formal, un experimento puede definirse como una prueba o una serie de pruebas en las que se hacen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema para observar o identificar las razones de los cambios que pudieran observarse en la respuesta de salida.

En general, los experimentos se usan para estudiar la función de procesos ó sistemas. El proceso generalmente puede visualizarse como una combinación de máquinas, métodos, personas u otros recursos que transforman cierta entrada (con frecuencia un material), en una salida que tiene una o más respuestas observables. Algunas variables del proceso x_1, x_2, \dots, x_p son controlables, mientras que otras z_1, z_2, \dots, z_p no son controlables (aunque puedan serlo para los fines de una prueba). Los objetivos del experimento podrían comprender los siguientes:

- 1.- Determinar cuáles son las variables que tienen mayor influencia sobre la respuesta.
- 2.- Determinar cuál es el ajuste de las variables controlables que tiene mayor influencia para que el resultado esté casi siempre cerca del valor nominal deseado.
- 3.- Determinar cuál es el ajuste de las variables controlables que tiene mayor influencia para que los efectos de las variables no controlables sean mínimos.

4.3.1.1 Implementación del diseño experimental

Los métodos de diseño experimental han encontrado amplia aplicación en diversas disciplinas [36]. De hecho, la experimentación puede considerarse parte del proceso científico y uno de los medios para conocer el funcionamiento de sistemas y procesos.

En general, el aprendizaje ocurre a través de una serie de actividades en las que se hacen conjeturas acerca de un proceso, se llevan a cabo experimentos para generar datos del proceso y después se usa la información del experimento para establecer nuevas conjeturas, lo que lleva a nuevos experimentos, y así sucesivamente.

El diseño experimental es una herramienta de importancia fundamental en el ámbito de la ingeniería para mejorar la función de un proceso de manufactura. También tiene múltiples aplicaciones en el desarrollo de nuevos procesos. La aplicación de las técnicas del diseño experimental en las fases iniciales del desarrollo de un proceso puede redundar en:

- 1.- Mejora del rendimiento del proceso.
- 2.- Variabilidad reducida y conformidad más cercana con los requerimientos nominales o proyectados
- 3.- Reducción del tiempo de desarrollo
- 4.- Reducción de los gastos globales

Los métodos del diseño experimental desempeñan también un papel importante en las actividades del diseño en ingeniería, donde se desarrollan productos nuevos y se hacen mejoras en los productos existentes. Entre las aplicaciones del diseño experimental en el diseño en ingeniería se encuentran:

- 1.- La evaluación y comparación de las configuraciones de diseños básicos.
- 2.- La evaluación de materiales alternativos.
- 3.- La selección de los parámetros del diseño para que el producto tenga un buen funcionamiento en una amplia variedad de condiciones de campo, es decir, para que el producto sea robusto.
- 4.- La determinación de los parámetros clave del diseño del producto que afectan la función del mismo.

El uso del diseño experimental en estas áreas puede redundar en productos cuya fabricación sea más sencilla, en productos que tengan la función y confiabilidad de campos mejorados, en costos de producción más bajos y en tiempos más cortos para el diseño y desarrollo del producto.

4.3.1.2 Algunas aplicaciones típicas del diseño experimental

Para aplicar el enfoque estadístico en el diseño y análisis de un experimento, es necesario que todos los que participan en el mismo tengan, desde el principio, una idea clara de qué es exactamente lo que va a estudiarse, cómo van a recogerse los datos y al menos una comprensión cualitativa de la forma en que van a analizarse los mismos.

Las pautas generales de los datos son las siguientes:

- a) Identificación y exposición del problema
- b) Elección de los factores, los niveles y rangos
- c) Selección de la variable de respuesta
- d) Elección del diseño experimental
- e) Realización del experimento
- f) Análisis estadístico de los datos
- g) Conclusiones y recomendaciones

4.3.2 Análisis de resultados

A partir de los módulos obtenidos en laboratorio cuando se combinan diferentes variables, se pretende aplicar el concepto de diseño y análisis de experimentos, con la finalidad de conocer cuáles son las variables que más influyen en el módulo resiliente de las mezclas bituminosas. Para ello, se han fabricado y ensayado nuevas series de probetas, que se han dividido en tres categorías de acuerdo con las variables analizadas:

- a) Composición de la mezcla:
 - Contenido de ligante
 - Tipo de ligante
 - Naturaleza del árido
 - Granulometría
 - Tamaño máximo del árido

- b) Elaboración de las probetas

- Energía de compactación
 - Temperatura de compactación
 - Tipo de compactación
 - Altura de la probeta
- c) Ejecución del ensayo
- Temperatura de ensayo
 - Frecuencia de aplicación de carga
 - Inmersión de probetas en agua

Mediante un análisis de diseño factorial se ha obtenido, para cada categoría, la variable y las combinaciones entre variables, que tiene mayor y menor influencia sobre el módulo resiliente.

4.3.2.1 Composición de la mezcla

Las variables de composición son muy importantes, ya que gran parte de las propiedades mecánicas de la mezcla bituminosa son dadas por los componentes de la misma.

Las cinco variables a analizar son el contenido de ligante (A), el tipo de betún (B), la granulometría (C), el tamaño máximo de árido (D) y el tipo de árido (E).

En la tabla 4.26 se recoge la identificación de las variables y el valor del módulo obtenido para cada una de ellas. Las probetas se fabricaron a la temperatura de compactación óptima, con una energía de compactación de 75 golpes por cara, y el ensayo se realizó a una temperatura de 20 °C y a una frecuencia de carga de 0'5 Hz.

Tipo de árido	Tamaño máximo	Granulometría	Tipo de betún	Contenido de betún	Módulo resiliente (MPa)	Identificación de la variable
Basalto	½"	Inferior	PG 58	1% menor	1004,2	1
Basalto	½"	Inferior	PG 58	1% mayor	714,8	a

Basalto	½"	Inferior	PG 82	1% menor	4019,9	b
Basalto	½"	Inferior	PG 82	1% mayor	2861,4	ab
Basalto	½"	Superior	PG 58	1% menor	1431,8	c
Basalto	½"	Superior	PG 58	1% mayor	1019,1	ac
Basalto	½"	Superior	PG 82	1% menor	5731,6	bc
Basalto	½"	Superior	PG 82	1% mayor	4079,8	abc
Basalto	1"	Inferior	PG 58	1% menor	1158,1	d
Basalto	1"	Inferior	PG 58	1% mayor	824,3	ad
Basalto	1"	Inferior	PG 82	1% menor	4636,1	bd
Basalto	1"	Inferior	PG 82	1% mayor	3300	abd
Basalto	1"	Superior	PG 58	1% menor	1651,2	cd
Basalto	1"	Superior	PG 58	1% mayor	1175,3	acd
Basalto	1"	Superior	PG 82	1% menor	6610,2	bcd
Basalto	1"	Superior	PG 82	1% mayor	4705,2	abcd
Calizo	½"	Inferior	PG 58	1% menor	1199	e
Calizo	½"	Inferior	PG 58	1% mayor	853,5	ae
Calizo	½"	Inferior	PG 82	1% menor	4799,8	be
Calizo	½"	Inferior	PG 82	1% mayor	3416,5	abe
Calizo	½"	Superior	PG 58	1% menor	1709,6	ce
Calizo	½"	Superior	PG 58	1% mayor	1216,8	ace
Calizo	½"	Superior	PG 82	1% menor	6843,5	bce
Calizo	½"	Superior	PG 82	1% mayor	4871,3	abce
Calizo	1"	Inferior	PG 58	1% menor	1382,8	de
Calizo	1"	Inferior	PG 58	1% mayor	984,2	ade
Calizo	1"	Inferior	PG 82	1% menor	5535,5	bde
Calizo	1"	Inferior	PG 82	1% mayor	3940,2	abde
Calizo	1"	Superior	PG 58	1% menor	1971,5	cde
Calizo	1"	Superior	PG 58	1% mayor	1403,3	acde
Calizo	1"	Superior	PG 82	1% menor	7892,6	bcde
Calizo	1"	Superior	PG 82	1% mayor	5618	abcde

Tabla 4.26 Identificación de las variables y valores de módulo resiliente de las variables de composición para el estudio estadístico

El análisis factorial se realizó de la siguiente forma:

- 1.- Se identifican las variables a utilizar en el diseño de experimentos (con una letra).
- 2.- Después de identificar las variables se obtiene el contraste, como la suma y resta de los valores (módulos resilientes) correspondientes a las variables analizadas, con objeto de conocer cuál es el efecto que tiene una variable sobre la otra y la combinación de éstas.

$$\text{Contraste}_{AB\dots K} = (a\pm 1)(b\pm 1)\dots(k\pm 1) \quad (4.1)$$

donde:

a, b, ..., k = valores correspondientes a las variables A, B, ..., K

k = total de variables a estudiar

A modo de ejemplo, se obtiene a continuación el valor del contraste para la combinación de las variables ABCDE:

$$\text{Contraste}_{ABCDE} = (a+b-ab+c-ac-bc+abc+d-ad-bd+abd-cd+acd+bcd-abcd+e-ae-be+abe-ce+ace+bce-abce-de+ade+bde-abde+cde-acde-bcde+abcde-1)$$

donde:

a, b, ..., k = el valor (módulo resiliente) más desfavorable en el diseño de experimentos de este análisis, es decir, el valor más bajo de las variables ABCDE.

$$\begin{aligned} \text{Contraste}_{ABCDE} = & (714,8+4019,9-2861,4+1431,8-1019,1-5731,6+4079,8+1158,1-824,3 \\ & -4636,1+3300-1651,2+1175,3+6610,2-4705,2+1199-853,5-4799,8 \\ & +3416,5-1709,6+1216,8+6843,5-4871,3-1382,8+984,2+5535,5 \\ & -3940,2+1971,5-1403,3-7892,6+5618-1004,2) = \mathbf{-11,3} \end{aligned}$$

3.- Posteriormente se obtiene la estimación del contraste. Se denomina estimación al conjunto de técnicas que permiten dar un valor aproximado de un parámetro de una población a partir de los datos proporcionados por una muestra. En nuestro caso, se aplica una ecuación que considera los valores de módulo resiliente de cada variable y el

número de réplicas (en nuestro caso es 1, ya que se utilizó el valor medio de los módulos resilientes) que se utilizó en el análisis.

$$\text{Estimación del contraste AB ...K} = 2/n2^k (\text{Contraste}_{\text{AB...K}}) \quad (4.2)$$

donde:

n = número de replicas

k = total de variables a estudiar

En nuestro ejemplo, el valor de la estimación del contraste para la combinación de las variables ABCDE es:

$$\text{Estimación del contraste ABCDE} = 2/((1)(2)^5) (-11,3) = \mathbf{-0,70625}$$

4.- Posteriormente, se determina la suma de cuadrados de cada variable; esta suma de cuadrados se obtiene a través de una ecuación que involucra los resultados del módulo resiliente de cada variable, elevados al cuadrado, y el número de replicas que se utilizó en el análisis.

$$SS_{\text{AB...K}} = 1/n2^k (\text{Contraste}_{\text{AB...K}})^2 \quad (4.3)$$

Así, el valor de la suma de cuadrados para la combinación de las variables ABCDE es:

$$SS_{\text{ABCDE}} = 1/((1)(2)^5) (-11,3)^2 = \mathbf{3,99031}$$

5.- A continuación, se calcula la contribución porcentual, que se obtiene a través del porcentaje de la suma de cuadrados de cada variable.

$$\text{Contribución porcentual} = (SS_{\text{AB...K}}/\Sigma SS_{\text{AB...K}}) \times 100 \quad (4.4)$$

Siguiendo con nuestro ejemplo, el valor de la contribución porcentual para la combinación de las variables ABCDE es:

$$\text{Contribución porcentual} = (3,99031/139826991) \times 100 = \mathbf{0,000029}$$

6.- Por último, se establece cuáles son las variables que tienen mayor y menor influencia en el diseño de experimentos, a través de la contribución porcentual de cada variable: cuando mayor sea la contribución porcentual, mayor es la influencia que tiene esa variable sobre el módulo resiliente, siendo los valores de contribución porcentual mayores a la unidad los que se consideran que tienen alguna influencia en el experimento.

En la tabla 4.27 se observa que la mayor contribución porcentual la tiene la variable (B) “tipo de betún”.

Variable	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución porcentual
A	-1037	8604715	6,15
B	3697,63	109379815	78,22
C	1081,28	93533353	6,68
D	438,49	1538214	1,10
E	544,69	2373530	1,69
ABCDE	-0,70	3,99	2,9E-06
BCDE	4,09	134,1	1E-04
ACDE	-1,14	10,47	7E-06
CDE	6,80	370,6	3E-04
ABDE	-3,92	122,9	9E-05
BDE	23,28	4336	3E-03
ADE	-6,531	341,26	2E-04
DE	38,76	12024	8,6E-03
ABCE	-9,65	745,9	5E-04
BCE	57,39	26352	0,02
ACE	-16,1	2072	1E-03
CE	95,61	73,12	0,05
ABE	55,04	24,23	0,02
BE	326,96	855203	0,61
AE	-91,7	67280	0,05
ABCD	-7,80	487,5	3,5E-04

BCD	46,22	17089	0,01
ACD	-12,94	1340	1E-03
CD	76,98	47,4	0,03
ABD	-44,31	15713	0,01
BD	263,26	554431	0,39
AD	-73,83	43608,4	0,03
AB	-622,49	3099988	2.21
AC	-182,04	265619	0,18
BC	649,06	3370322	2,41
ABC	-109,3	95495	0,07

Tabla 4.27 Estimación de efectos de las variables de composición de una mezcla bituminosa

Para hacer más claro el análisis se procedió a realizar un gráfico de probabilidad normal. El gráfico se elaboró a partir de los valores de estimación de efectos y el porcentaje de probabilidad normal, obtenido a partir de los datos de la media estadística, desviación estándar y los valores esperados. En donde en el eje de las abscisas se coloca los valores de la estimación y en el eje de las ordenadas el porcentaje de probabilidad normal.

La variable que más influye es la que se aleja más del conjunto de valores; los valores más separados del conjunto de datos son los que más influyen.

En la figura 4.15 se observa que los componentes de una mezcla bituminosa que más influyen en el módulo resiliente son el tipo de betún, contenido de betún, granulometría y la combinación tipo de betún-contenido de betún, siendo el tipo de betún el que mayor influencia tiene.

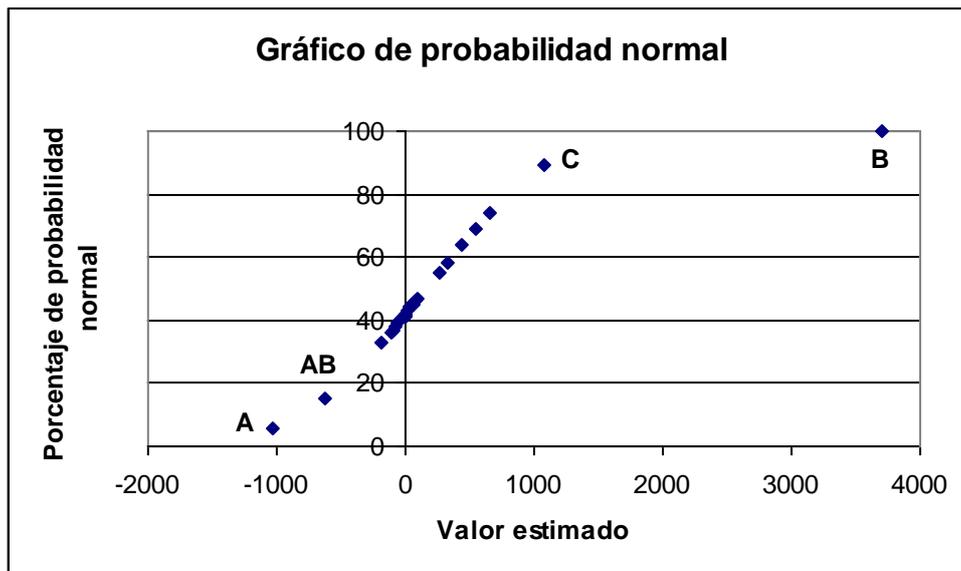


Figura 4.15 Gráfico de probabilidad normal de las variables de composición de una mezcla bituminosa

4.3.2.2 Elaboración de las probetas

Las variables de elaboración de las probetas son de igual o mayor importancia que las de composición, ya que de estas variables dependerá en gran parte la calidad de una mezcla bituminosa evaluada en laboratorio.

Las cuatro variables a analizar son la altura de la probeta (A), la energía de compactación (B), la temperatura de compactación (C) y el tipo de compactación (D).

En la tabla 4.28 se recoge la identificación de las variables y el valor del módulo obtenido para cada una de ellas. Las probetas se fabricaron con árido tipo basalto, tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ ", granulometría centrada, tipo de betún PG 82 y contenido de betún óptimo, y el ensayo se realizó a una temperatura de 20 °C y a una frecuencia de carga de 0,5 Hz.

Tipo de compactación	Temperatura de compactación	Energía de compactación	Altura de probeta (mm)	Módulo resiliente (MPa)	Identificación de la variable
Giratorio	40 °C menor	0,5 °	25	1105,4	1
Giratorio	40 °C menor	0,5 °	65	1383	a

Giratorio	40 °C menor	1,25°	25	1640	b
Giratorio	40 °C menor	1,25°	65	2644	ab
Giratorio	Óptima	0,5 °	25	1671	c
Giratorio	Óptima	0,5 °	65	2074	ac
Giratorio	Óptima	1,25 °	25	2465	bc
Giratorio	Óptima	1,25 °	65	3135	abc
Marshall	40 °C menor	35 gpc	25	1715,7	d
Marshall	40 °C menor	35 gpc	65	2000	ad
Marshall	40 °C menor	75 gpc	25	2279,2	bd
Marshall	40 °C menor	75 gpc	65	2600	abd
Marshall	Óptima	35 gpc	25	2207,3	cd
Marshall	Óptima	35 gpc	65	2885	acd
Marshall	Óptima	75 gpc	25	2870	bcd
Marshall	Óptima	75 gpc	65	3752	abcd

Tabla 4.28 Identificación de las variables y valores de módulo resiliente de las variables de elaboración de probetas para el estudio estadístico

Después de identificar las variables con una letra, se procedió a determinar, de forma análoga al caso anterior, cuáles son las variables y las combinaciones entre variables que tienen mayor y menor influencia en el módulo resiliente.

En la tabla 4.29 se puede observar que la contribución porcentual mayor la tiene la variable (B) o “energía de compactación”, seguido por la variable (C) o “temperatura de compactación”.

Variable	Estimación del factor	Suma de cuadrados	Contribución porcentual
A	564,9	19946	17,51
B	793	39301	34,5
C	711,5	31640	27,78
D	524	17159	15,06
AB	154,28	14875	1,3
AC	93,25	543,5	0,47
BC	53,2	176,9	0,15

ABC	-36,4	83,04	0,07
AD	-23,72	35,18	0,03
BD	-119,7	895,13	0,78
ABD	-94,1	553,1	0,48
CD	68,35	292	0,25
ACD	145,4	1321,3	1,16
BCD	38,45	91,92	0,08
ABCD	78,4	384,2	0,33

Tabla 4.29 Estimación de efectos de las variables de elaboración de una mezcla bituminosa

En la figura 4.16 se observa que todas las variables de elaboración de una probeta de mezcla bituminosa tienen mucha influencia en el módulo resiliente, de acuerdo a su contribución porcentual, siendo la energía y la temperatura de compactación las que más influyen en el comportamiento del módulo resiliente.

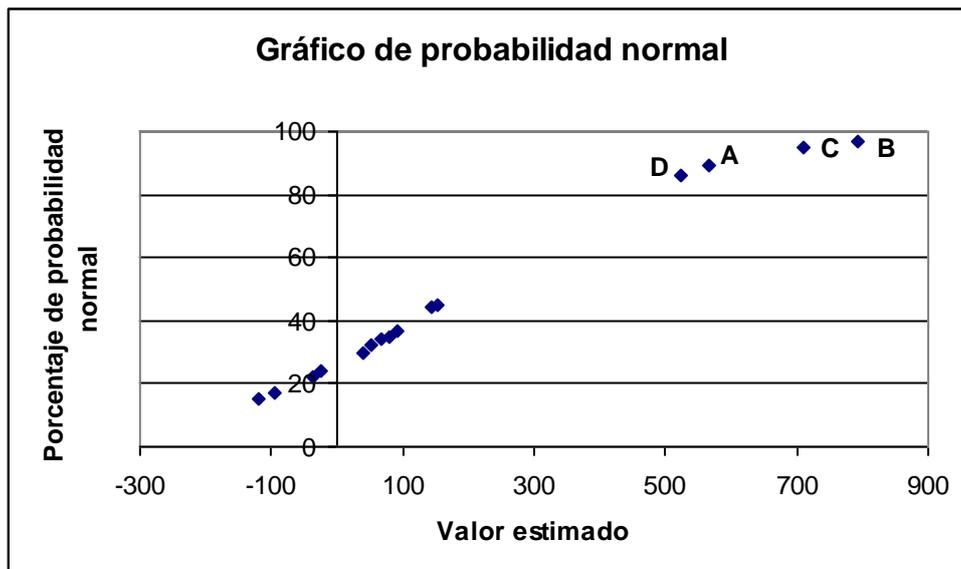


Figura 4.16 Gráfico de probabilidad normal de las variables de elaboración de una mezcla bituminosa

4.3.2.3 Ejecución del ensayo

Las tres variables a analizar son el acondicionamiento de las probetas (A), la frecuencia de carga (B) y la temperatura de ensayo (C).

En la tabla 4.30 se recoge la identificación de las variables y el valor del módulo obtenido para cada una de ellas. Las probetas se fabricaron con árido tipo basalto, tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ ", granulometría centrada, tipo de betún PG 82, contenido de

betún óptimo, temperatura de compactación óptima y energía de compactación de 75 golpes por cara.

Temperatura de ensayo (°C)	Frecuencia de carga (Hz)	Acondicionamiento	Módulo resiliente (MPa)	Identificación de la variable
5	0'33	Sin Acondicionar	10035	1
5	0'33	Acondicionada	8433,4	a
5	1,0	Sin Acondicionar	13819	b
5	1,0	Acondicionada	11667	ab
40	0'33	Sin Acondicionar	505	c
40	0'33	Acondicionada	424,3	ac
40	1,0	Sin Acondicionar	698,6	bc
40	1,0	Acondicionada	587	abc

Tabla 4.30 Identificación de las variables y valores de módulo resiliente de las variables de ejecución del ensayo para el estudio estadístico

En la tabla 4.31 se observa que la variable con mayor contribución porcentual es el (C) o “temperatura de ensayo”.

Variable	Estimación Del factor	Suma de cuadrados	Contribución porcentual
A	-986,47	121641,62	0,83
B	1843,48	424800	2,9
C	-10434,88	13610827	93,17
AB	-145,3	2639,9	0,01
AC	890,3	99085	0,67
BC	-1665	346663	2,37
ABC	129,9	2108	0,01

Tabla 4.31 Estimación de efectos de las variables de ejecución del ensayo de módulo resiliente

En la figura 4.17 se observa que la variable de ejecución del ensayo de módulo resiliente de una mezcla bituminosa que más influye es la temperatura de ensayo.

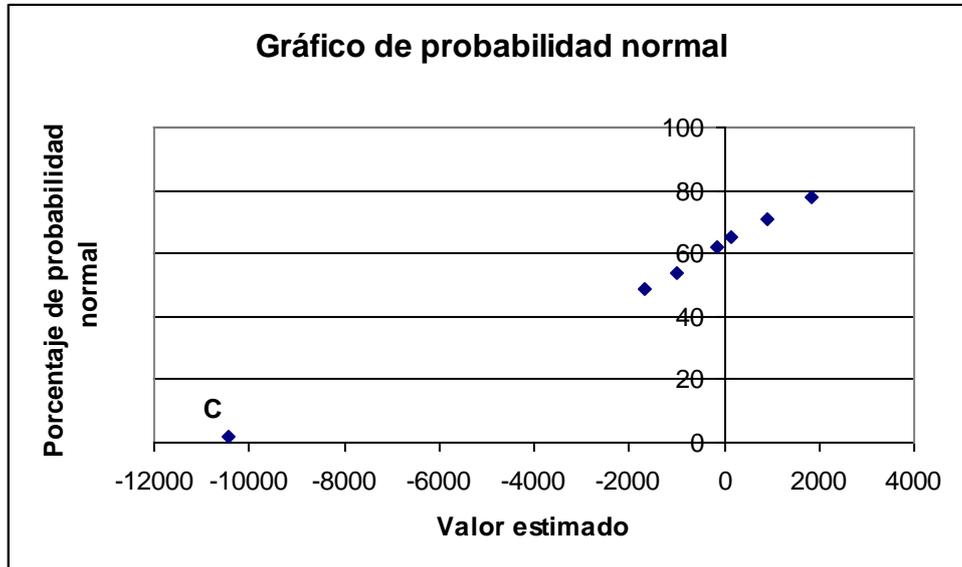


Figura 4.17 Gráfico de probabilidad normal de las variables de ejecución del ensayo de módulo resiliente

4.4 APLICACIÓN DEL ENSAYO EN EL CONTROL DE EJECUCIÓN. ENSAYO SOBRE TESTIGOS

El ensayo de módulo resiliente se ha aplicado en el control de ejecución de diferentes obras de firmes bituminosos realizadas en México, durante un largo periodo de tiempo. Se han extraído testigos de las capas de mezcla bituminosa ejecutadas y se han ensayado a módulo resiliente a 20 °C, con objeto de correlacionar su módulo con su compacidad.

4.4.1 Relación entre módulo y densidad

Las mezclas estudiadas han sido mezclas densas con diferentes tamaño máximo de árido, granulometrías diferentes, diferentes tipos de árido y betún y diferente contenido de betún. Tanto de las probetas elaboradas a partir de la mezcla fabricada en planta, como de los testigos extraídos de la capa ejecutada, se han representado los valores de módulo resiliente en función de la densidad alcanzada. En éstos gráficos se puede observar que las nubes de puntos obtenidas, para cada caso, se distribuyen de forma aproximadamente lineal y las rectas calculadas por regresión son, en muchos casos, prácticamente paralelas.

En la tabla 4.32 se presentan las características de las mezclas de las obras estudiadas, como el tipo de árido, tamaño máximo, granulometría y tipo de betún.

Obra (N°)	Tipo de árido	Tamaño máximo (mm)	Granulometría	Tipo de betún
1	Basalto	19	Superior en huso	PG 70-22
2	Granito	19	Centrada en huso	PG 70-22
3	Basalto	19	Centrada en huso	PG 70-22
4	Basalto	19	Superior en huso	PG 70-22
5	Basalto	25	Superior en huso	PG 76-22
6	Basalto	19	Superior en huso	PG 70-22
7	Basalto	19	Centrada en huso	PG 76-22
8	Basalto	19	Centrada en huso	PG 70-22
9	Calizo	19	Centrada en huso	PG 70-22
10	Calizo	19	Centrada en huso	PG 70-22
11	Basalto	19	Inferior en huso	PG 82-22

Tabla 4.32 Características de las mezclas de las obras analizadas

En las figura 4.18 y 4.19 se aprecia cierta diferencia entre las rectas de regresión de las probetas de planta y de los testigos de obra; en cambio, en la figura 4.20 se observa lo contrario, las rectas de regresión son muy similares, esto es, las densidades y módulos de las probetas de planta y las de los testigos extraídos de obra son muy parecidos, lo que pone de manifiesto que la capa de mezcla bituminosa se ha ejecutado mucho mejor y sus características físicas y mecánicas son más parecidas a las de la mezcla fabricada.

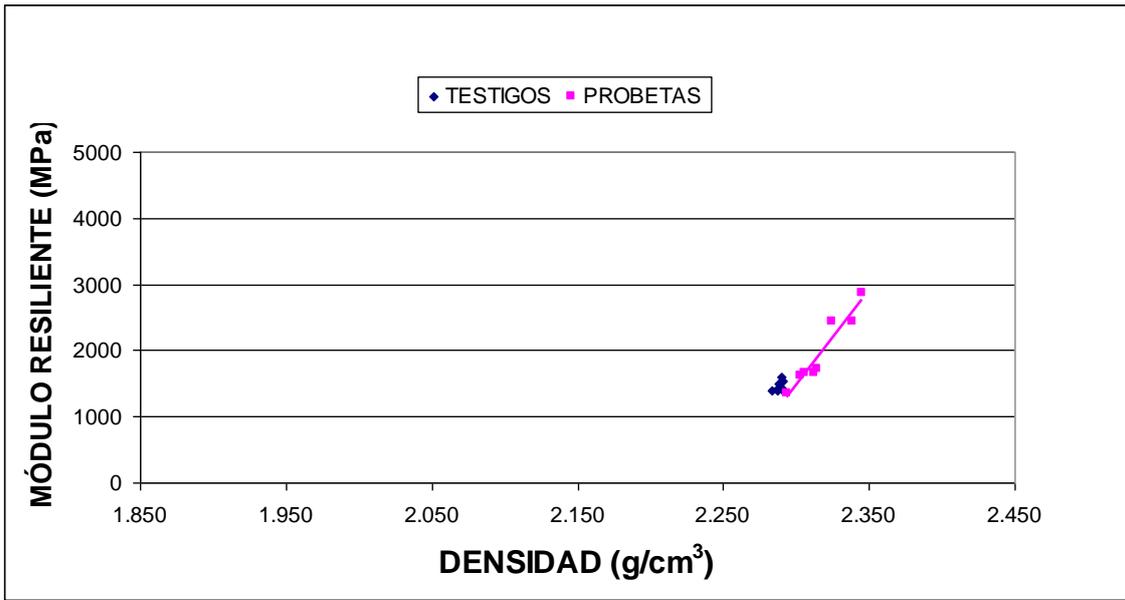


Figura 4.18 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 1

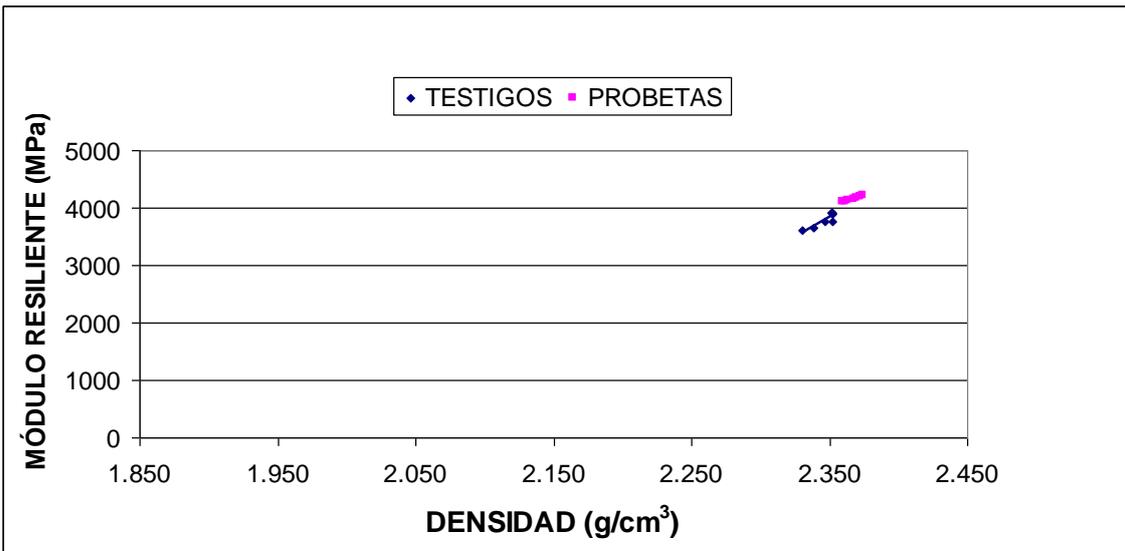


Figura 4.19 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 2

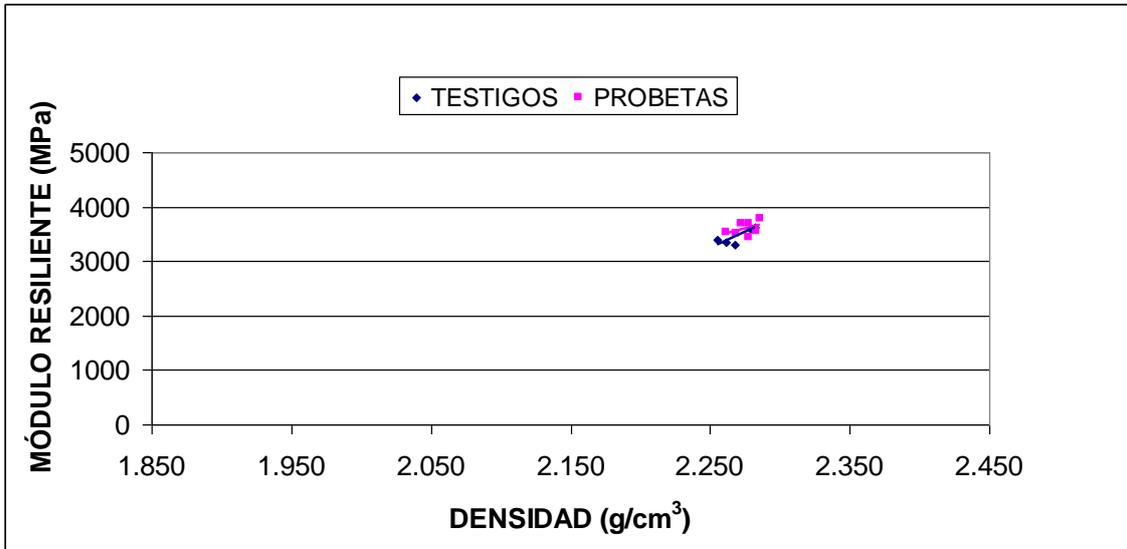


Figura 4.20 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 3

Estas diferencias todavía se ponen más de manifiesto en las figuras 4.21 y 4.22. En la figura 4.21 las rectas de regresión entre las probetas de planta y los testigos de obra se agrupan entorno a los mismos valores de densidad; en cambio, en la figura 4.22 se observa una gran distancia entre las rectas de regresión de probetas de planta y testigos de obra, lo que pone de manifiesto una mala ejecución de la mezcla bituminosa.

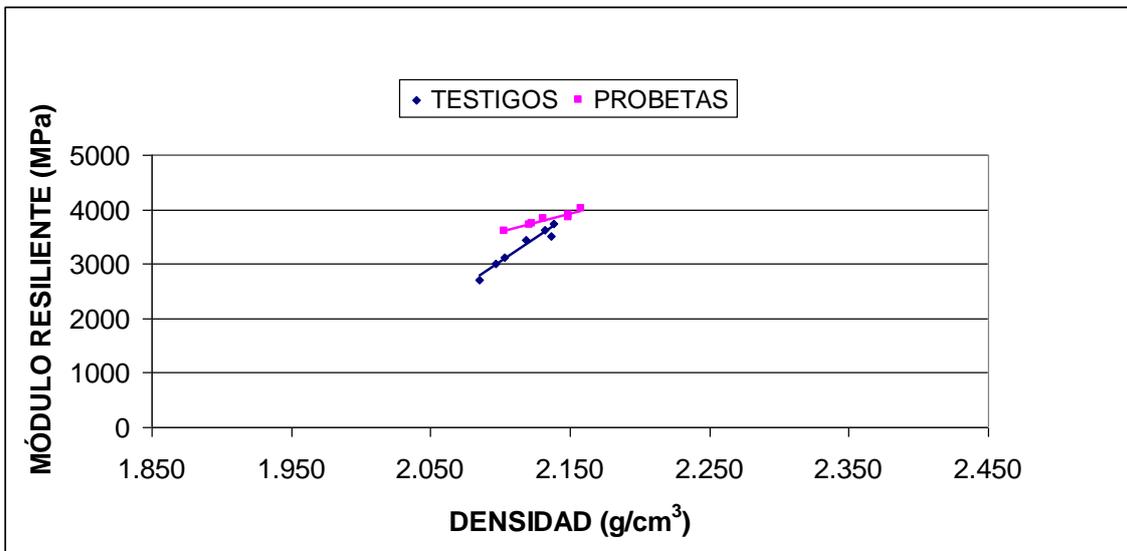


Figura 4.21 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 4

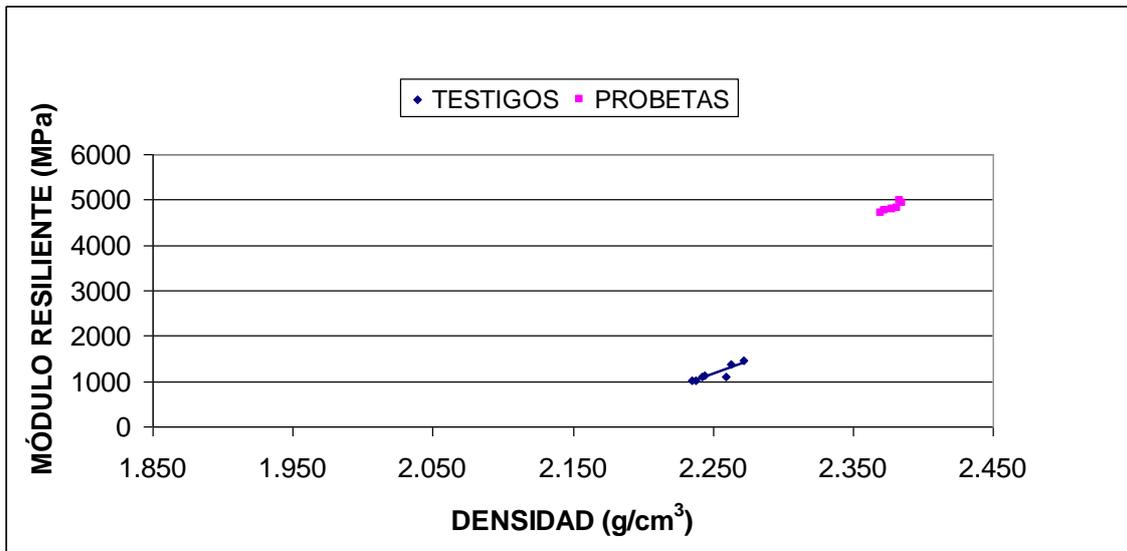


Figura 4.22 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 5

Nuevamente, en la figura 4.23 se recoge un caso de una ejecución de la mezcla bituminosa aceptable, ya que las rectas de regresión de probetas de planta y testigos extraídos no sólo son paralelas, sino que están cerca una de la otra (los valores de densidad y módulo no difieren excesivamente). En cambio, en la figura 4.24 se observa una gran distancia entre las rectas de regresión de probetas y testigos, debido a una mala ejecución de la mezcla bituminosa.

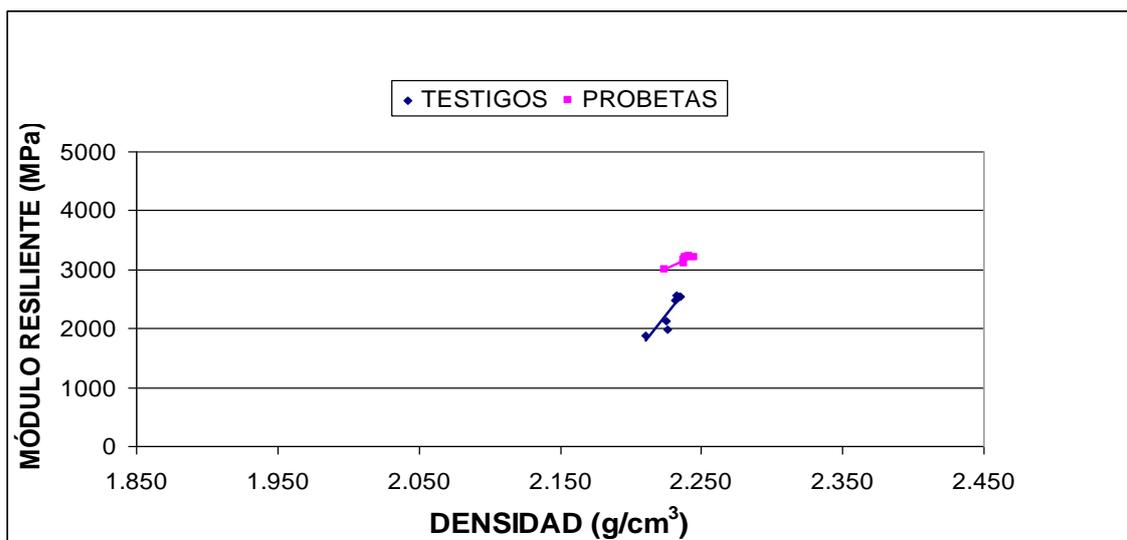


Figura 4.23 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 6

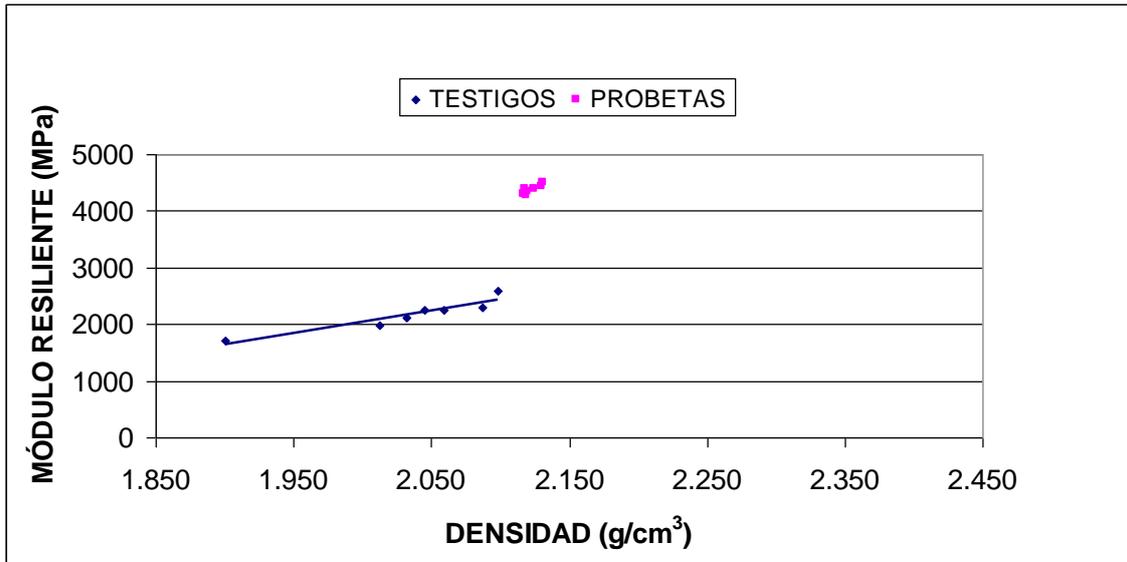


Figura 4.24 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 7

En las figuras 4.25 y 4.26 se observa que las rectas de regresión de probetas fabricadas en planta y testigos extraídos de obra se encuentran un poco distantes, estando siempre las rectas de regresión de las mezclas de planta por encima de las de testigos de obra, lo que pone de manifiesto la diferencia entre la calidad de la mezcla fabricada y la de la mezcla puesta en obra.

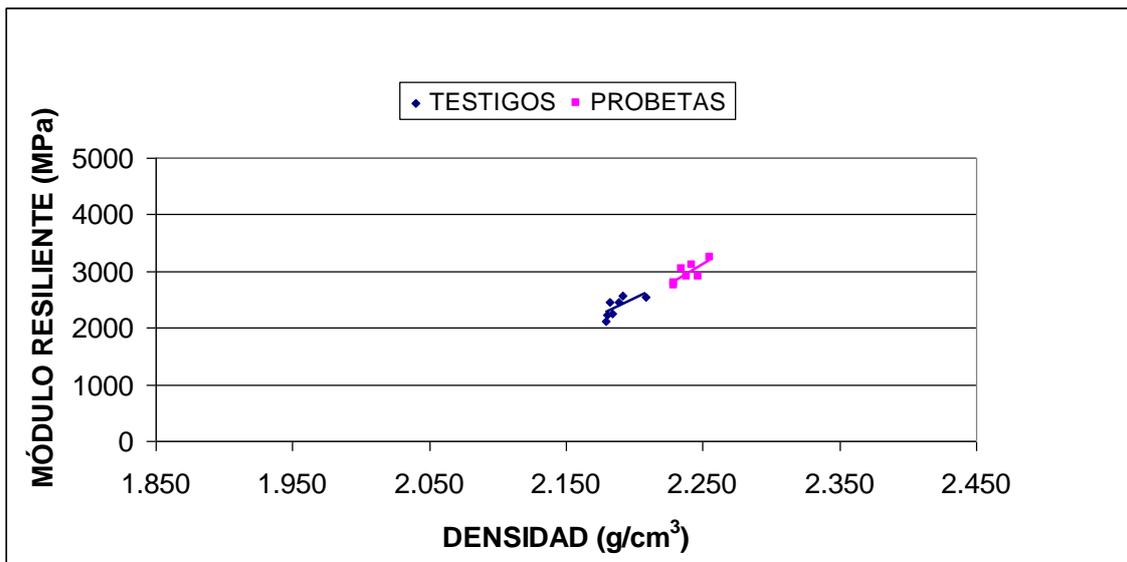


Figura 4.25 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 8

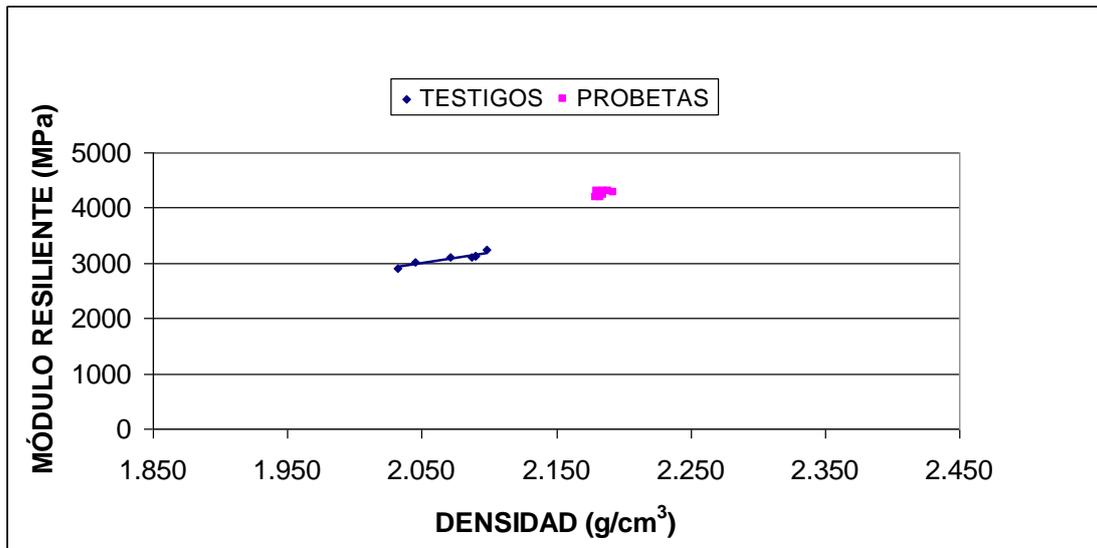


Figura 4.26 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 9

En la figura 4.27 las rectas de regresión de probetas de planta y testigos están muy cerca una de la otra, lo que, tal como se ha indicado, pone de manifiesto que existe una buena ejecución. Por su parte, en la figura 4.28 se observa que las rectas de regresión de probetas de planta y testigos de obra están una a continuación de otra, lo que indica que si la mezcla se hubiera compactado adecuadamente, alcanzando la densidad de referencia de las probetas, se hubieran alcanzado los módulos obtenidos sobre las probetas.

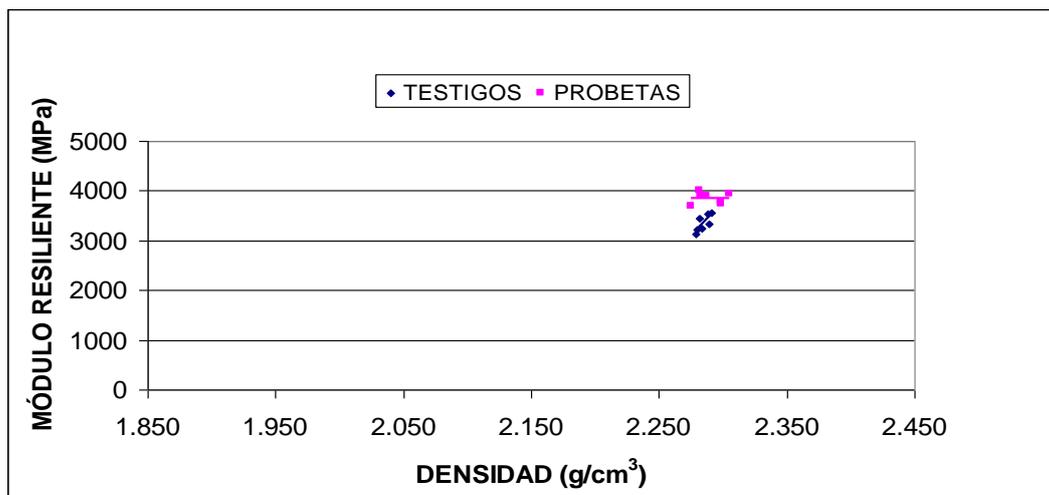


Figura 4.27 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 10

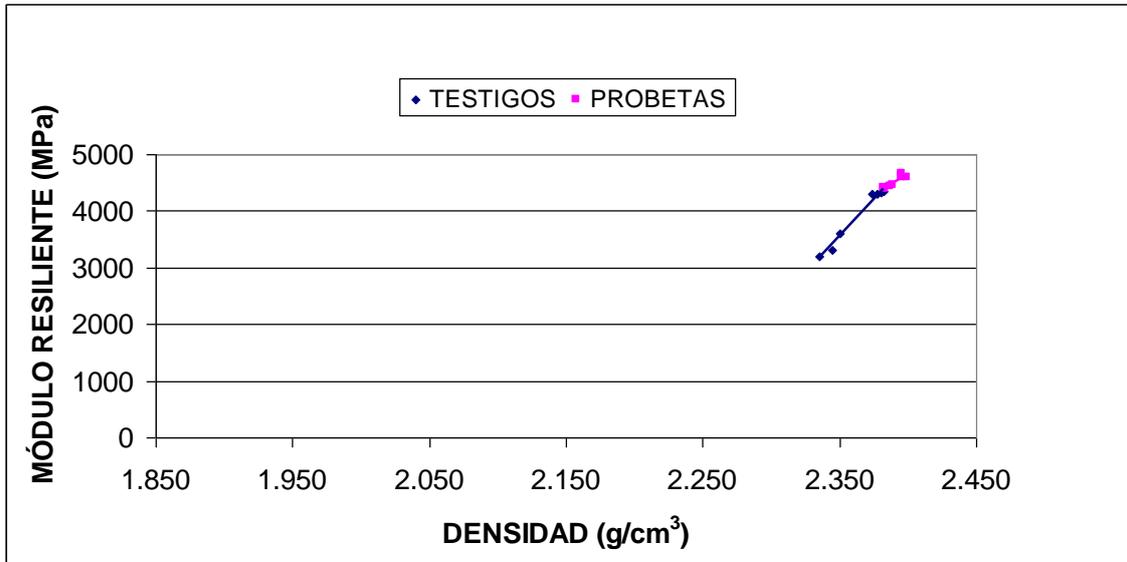


Figura 4.28 Módulo resiliente vs Densidad, Obra 11

En la tabla 4.33 se resumen los valores medios de densidad y módulo obtenidos tanto sobre las probetas procedentes de la planta y como sobre los testigos extraídos de las distintas obras, con objeto de visualizar que tan cerca o lejos están los resultados.

Mezcla	Densidad (g/cm³)	Compacidad (%)	Módulo Resiliente (MPa)	Desviación Estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)
Obra 1 (Planta)	2,317	98,7	1963	536,1	27,3
Obra 1 (Testigos)	2,288		1460	77,5	5,3
Obra 2 (Planta)	2,367	99,1	4153	48,8	1,2
Obra 2 (Testigos)	2,346		3784	130,6	3,5
Obra 3 (Planta)	2,275	99,8	3594	126,0	3,5
Obra 3 (Testigos)	2,272		3498	143,2	4,1
Obra 4 (Planta)	2,133	99,2	3806	130,5	3,4
Obra 4 (Testigos)	2,116		3305	370,3	11,2
Obra 5 (Planta)	2,378	94,6	4827	100,3	2,1
Obra 5 (Testigos)	2,250		1170	169,3	14,5
Obra 6 (Planta)	2,238	99,5	3152	77,8	2,5
Obra 6 (Testigos)	2,228		2304	293,3	12,7
Obra 7 (Planta)	2,123	95,7	4380	77,1	1,8
Obra 7 (Testigos)	2,033		2173	277,1	12,8

Obra 8 (Planta)	2,239	97,7	2964	180,5	6,1
Obra 8 (Testigos)	2,188		2368	170,2	7,2
Obra 9 (Planta)	2,185	94,8	4261	46,7	1,1
Obra 9 (Testigos)	2,073		3089	105,8	3,4
Obra 10 (Planta)	2,290	99,7	3856	113,3	2,9
Obra 10 (Testigos)	2,285		3353	166,7	5,0
Obra 11 (Planta)	2,390	98,8	4511	107,8	2,4
Obra 11 (Testigos)	2,363		3913	517,7	13,2

Tabla 4.33 Resultados medios de probetas de mezcla fabricada en planta y testigos extraídos de obra

Del análisis de los valores de la tabla 4.33 se pueden obtener varias conclusiones; en primer lugar, se observa que los módulos de todas las probetas de mezcla de planta tienen menos dispersión (y su coeficiente de variación es menor) que la de los testigos extraídos de obra, a excepción de la Obra 1 en la que hay mayor dispersión en las probetas de planta que en los testigos.

También se observa como en las Obras 5, 6, 7 y 9 existe una gran diferencia entre el módulo resiliente obtenido sobre las probetas de mezcla de planta y el obtenidos sobre los testigos extraídos de obra, debido a la mala ejecución de la mezcla bituminosa, a diferencia de la Obra 3, en la que los módulos resilientes de probetas de planta son casi iguales a los de testigos extraídos de obra, poniendo de manifiesto una buena ejecución de lo que se fabrica en planta.

Además, se observa que cuanto menor es el porcentaje de compacidad mayor es la diferencia entre el módulo resiliente de las probetas de planta y el de testigos extraídos

de obra, como es el caso de las Obras 5 y 9. Las especificaciones Mexicanas establecen que los testigos extraídos de obra deben tener al menos una compacidad del 95% con respecto a la densidad patrón.

Pero también se observa como, en las Obras 1, 6 y 10, aún cuando el porcentaje de compacidad está por encima del 95% que establecen las especificaciones Mexicanas, el decremento de módulo resiliente entre probetas de planta y testigos de obra alcanza, en algunos casos, hasta el 30%.

Es por ello que el porcentaje de compacidad ó el solo medir la densidad de los testigos de obra, no asegura que la mezcla bituminosa esté bien ejecutada.

4.5 CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados que se obtuvieron sobre probetas en laboratorio han puesto de manifiesto la influencia de los componentes de las mezclas bituminosas en su comportamiento mecánico, y se ha demostrado la sensibilidad del módulo resiliente para detectar modificaciones en la composición y la ejecución de una mezcla bituminosa.

Además, en muchos casos, el módulo resiliente es más sensible que la compactación frente a las variaciones de determinadas variables, por lo que con este parámetro se podría obtener una mayor precisión al evaluar la calidad de una capa ejecutada. Tal es el caso, por ejemplo, del tipo de betún utilizado, que a medida que baja su penetración, el módulo resiliente aumenta, aunque no parece haber una clara tendencia en la variación de la densidad, figura 4.29.

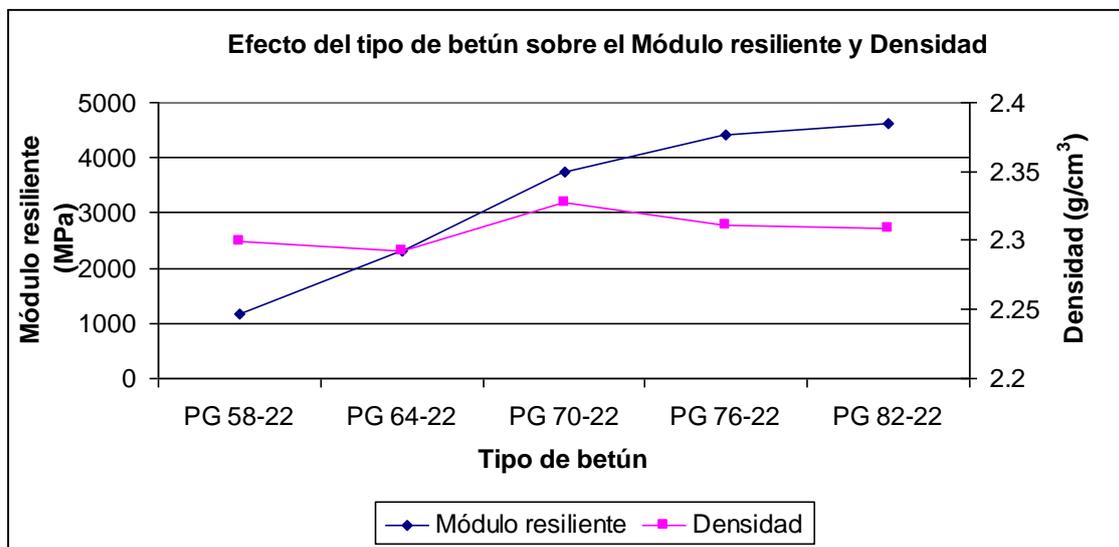


Figura 4.29 Efecto del tipo de betún y temperatura de ensayo sobre el módulo resiliente

También se ha puesto de manifiesto la existencia de una correlación entre la compactación y el módulo resiliente para las diferentes mezclas controladas y ejecutadas. Cuando la ejecución de una capa bituminosa ha sido correcta, se ha detectado conjuntamente una alta compactación en los testigos de obra y un módulo resiliente

próximo al obtenido con las probetas fabricadas en planta (caso de la obra 3). En cambio, tal como se observó en la obra 5, cuando se alcanza una baja compactación, el módulo resiliente de los testigos de obra es también más bajo, con respecto al de las probetas fabricadas en planta.

Lo más importante que se puede concluir de esta serie de ensayos y análisis es que es difícil decir que una mezcla se encuentra bien ejecutada con solo medir su densidad y compararla con la densidad patrón, debido a la cantidad de componentes y variables que definen su comportamiento mecánico; es por ello que se hace hincapié en controlar las mezclas bituminosas en el momento de su ejecución mediante un ensayo mecánico como es el módulo resiliente. Este ensayo es confiable, útil y muy sencillo de utilizar, además de que puede ser utilizado en los modelos analíticos multicapa para calcular la vida útil de una capa de mezcla bituminosa.

CAPÍTULO 5

EVALUACIÓN DEL EFECTO PRODUCIDO POR LA FALTA DE CALIDAD EN LA EJECUCIÓN DE LAS CAPAS BITUMINOSAS

En el desarrollo del plan de trabajo esquematizado en el capítulo anterior ha quedado pendiente un estudio complementario sobre el análisis de la falta de calidad en la ejecución de una capa bituminosa, con el objeto de analizar la incidencia de una disminución del módulo resiliente en la vida del firme, tal y como se expone a continuación.

5.1 PLANTEAMIENTO DEL ANÁLISIS

Los resultados obtenidos han permitido verificar que, si no se controlan debidamente las condiciones de ejecución de una mezcla bituminosa, como la temperatura y la energía de compactación, aún en el caso de alcanzar la densidad especificada, es posible que su módulo haya disminuido de forma significativa y, consecuentemente, se producirá una disminución en la vida del firme.

En este capítulo se pretende analizar la variación de la vida de un firme, calculado bajo determinadas hipótesis, considerando una disminución del módulo resiliente de la mezcla que constituye las capas bituminosas.

Mediante el empleo de métodos analíticos utilizados en el dimensionamiento de firmes y considerando los resultados de módulos resilientes obtenidos, y a partir de las leyes de fatiga obtenidas a partir de un ensayo a tracción indirecta, se ha evaluado el efecto de una mala ejecución de la mezcla bituminosa sobre la vida del firme, con el objeto de demostrar la importancia que tiene controlar las propiedades mecánicas de la mezcla ejecutada.

Para evaluar el efecto producido por la disminución de módulo de la capa bituminosa se han determinado, en primer lugar, las leyes de fatiga, de acuerdo al ensayo de fatiga a tracción indirecta descrito en la norma Europea UNE-EN 12697-24 ANEXO E [38] sobre las probetas fabricadas en laboratorio, considerando las variables que más influían en el módulo, de acuerdo a su composición, elaboración y ejecución del ensayo. Además, se han determinado las leyes de fatiga de las probetas fabricadas en planta y de los testigos extraídos de las obras 3 y 5, las cuales corresponderían a las obras con menor y mayor diferencia entre módulos resilientes respectivamente.

En segundo lugar, mediante el empleo de métodos analíticos, y a partir de las leyes de fatiga obtenidas, se analizará la pérdida de vida que tendrá un firme cuando la mezcla bituminosa se ejecuta de forma deficiente. La sección de firme considerada corresponde a la recogida en la norma española 6.1-IC sobre Secciones de Firme, para una categoría de tráfico T1 y una explanada E3.

La categoría de tráfico pesado corresponde al rango de 1999-800 vehículos pesados por día. La explanada E3 presenta un módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (Ev2), obtenido de acuerdo con la norma NLT-357 “Ensayo de carga con placa”, de 300 MPa.

La sección de firme considerada se indica en la tabla 5.1.

Capa	Espesor (cm)
Mezcla bituminosa	25
Zahorra artificial	25

Tabla 5.1 Capas y espesores empleados en la sección de firme considerada

5.2 OBTENCIÓN DE LAS LEYES DE FATIGA

La ley de fatiga se ha obtenido a partir de un ensayo a tracción indirecta, de acuerdo a la norma Europea UNE-EN 12697-24 ANEXO E. El ensayo se ha realizado a tensión controlada; esta tensión depende del esfuerzo máximo a tracción indirecta de cada mezcla bituminosa. La frecuencia de carga que se utilizó es de 5 Hz y una temperatura de ensayo de 20 °C, a excepción de las leyes de fatiga que se obtuvieron para la variable de ejecución del ensayo, en donde se utilizaron temperaturas de 5 y 40 °C respectivamente.

Aplicando el ensayo de fatiga a tracción indirecta, se han obtenido las leyes de fatiga sobre las probetas elaboradas en laboratorio y los testigos extraídos de campo. En primer lugar, se ha determinado la ley de fatiga sobre probetas considerando las variables que más influyen en la composición y elaboración de la mezcla y en la ejecución del ensayo de módulo resiliente. En segundo lugar, se ha determinado la ley de fatiga sobre probetas fabricadas en planta y testigos de obra, de una obra en la que casi no existe diferencia entre los módulos de probetas y testigos (Obra 3), y otra en la que existe una gran diferencia entre los módulos (Obra 5).

Las leyes de fatiga se han obtenido a partir de la siguiente ecuación:

$$N_f = K_1(1/\varepsilon)^{K_2} \quad (5.1)$$

donde:

N_f = número de aplicación de carga

ε = deformación unitaria

K_1 y K_2 = coeficientes de la ley de fatiga en deformación (adimensionales)

5.2.1 Ley de Fatiga para las variables de composición de la mezcla que más influyen en el módulo resiliente

La variable de composición que más influye sobre el módulo resiliente, de acuerdo al análisis estadístico que se realizó en el apartado 4.3.2.1, es el tipo de betún. Por lo tanto, se decidió obtener las leyes de fatiga de las mezclas con mayor y menor módulo que corresponden a los tipos de betún PG 82-22 y PG 58-22 respectivamente. Hay que recordar que el betún PG 82-22 es un betún modificado con polímero.

Para estas mezclas se utilizó un árido basalto, tamaño máximo de árido de 19 mm, granulometría centrada en huso, energía de compactación Marshall de 75 golpes por cara y compactando a una temperatura óptima.

En la Tabla 5.2 se presentan los módulos resilientes de las mezclas, que se obtuvieron para los dos tipos de betún, y sobre las que se determinaron las leyes de fatiga.

Tipo de betún	Módulo resiliente (MPa)
PG 58-22	1159
PG 82-22	4630

Tabla 5.2 Módulos resilientes de las mezclas consideradas en el estudio de fatiga

En la figura 5.1 se observa que la ley de fatiga de la mezcla fabricada con el betún PG 82-22 se encuentra por debajo de la ley de fatiga de la mezcla fabricada con el betún PG 58-22, aunque con pendientes muy similares.

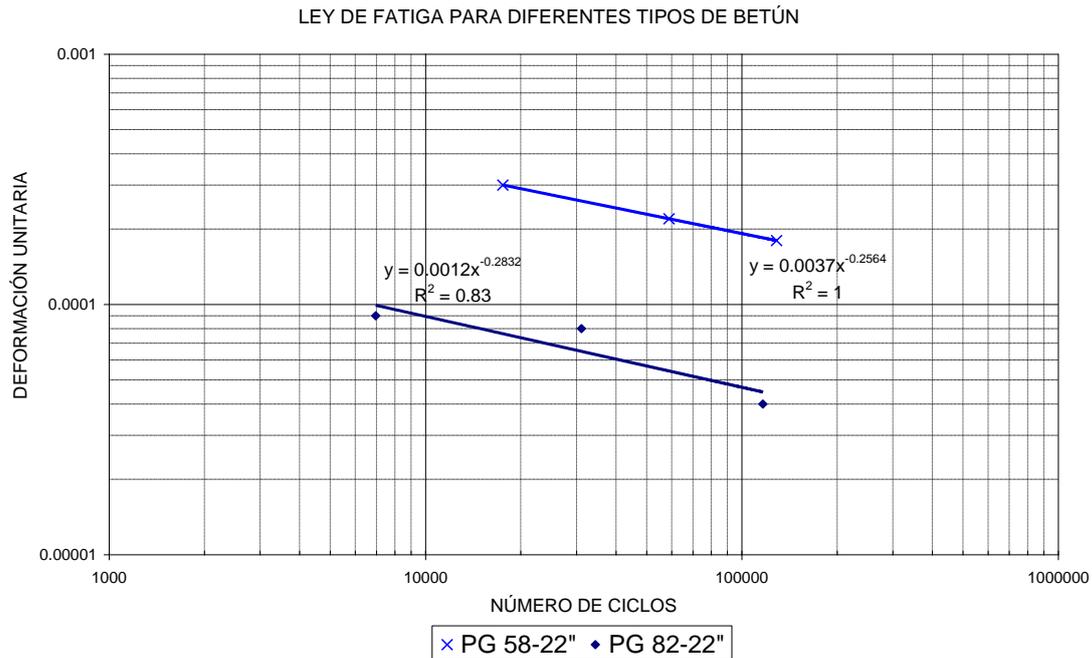


Figura 5.1 Leyes de fatiga para diferentes tipos de betón

5.2.2 Ley de Fatiga para las variables de elaboración de la mezcla que más influyen en el módulo resiliente

La variable de elaboración que más influye sobre el módulo resiliente, de acuerdo al análisis estadístico que se realizó en el apartado 4.3.2.2, es la temperatura de compactación. Por lo tanto, se decidió obtener las leyes de fatiga de las mezclas con mayor y menor módulo, que corresponden a compactar a la temperatura óptima y compactar a 40 °C por debajo de la temperatura óptima respectivamente.

Para estas mezclas, se utilizó un betón PG 70-22, árido basalto, tamaño máximo de árido de 19 mm, granulometría centrada en huso y energía de compactación Marshall de 75 golpes por cara.

En la Tabla 5.3 se presentan los módulos resilientes de las mezclas que se obtuvieron para las dos temperaturas de compactación, y sobre las que se determinaron las leyes de fatiga.

Temperatura de compactación (°C)	Módulo resiliente (MPa)
105	2980
145	3752

Tabla 5.3 Módulos resilientes de las mezclas consideradas en el estudio de fatiga

En la figura 5.2 se observa que la ley de fatiga de la mezcla compactada a la temperatura óptima se encuentra por debajo de la ley de fatiga de la mezcla compactada a 40 °C por debajo a la temperatura óptima.

Además, en este caso se puede observar que la pendiente de la ley de fatiga de la mezcla compactada a menor temperatura es mayor, por lo que será más sensible a las variaciones de deformación.

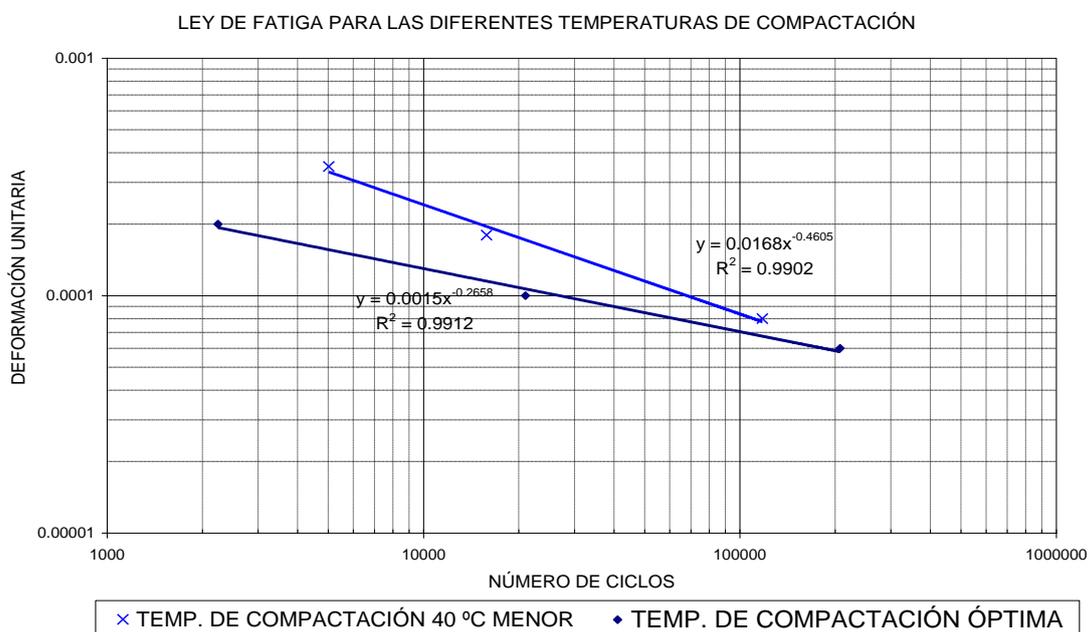


Figura 5.2 Leyes de fatiga para diferentes temperaturas de compactación

5.2.3 Ley de Fatiga para las variables de ejecución del ensayo que más influyen en el módulo resiliente

La variable de ejecución del ensayo que más influye sobre el módulo resiliente, de acuerdo al análisis estadístico que se realizó en el apartado 4.3.2.3, es la temperatura de ejecución. Por lo tanto, se decidió obtener las leyes de fatiga de las mezclas con mayor y menor módulo, que corresponden a las temperaturas de ensayo de 5 y 40 °C respectivamente.

Para estas mezclas, se utilizó un betún PG 70-22, árido basalto, tamaño máximo de árido de 19 mm, granulometría centrada en huso, energía de compactación Marshall de 75 golpes por cara y temperatura de compactación óptima.

En la Tabla 5.4 se presentan los módulos resilientes de las mezclas que se obtuvieron para las dos temperaturas de ensayo, y sobre las que se determinaron las leyes de fatiga.

Temperatura de ensayo (°C)	Módulo resiliente (MPa)
5	12107
40	602

Tabla 5.4 Módulos resilientes de las mezclas consideradas en el estudio de fatiga

En la figura 5.3 se observa que la ley de fatiga de la mezcla ensayada a 5 °C se encuentra por debajo de la ley de fatiga de la mezcla que se ensayó a 40 °C.

Además, en este caso se puede observar que la pendiente de la ley de fatiga de la mezcla ensayada a 5 °C es mayor que la de la mezcla ensayada a 40 °C.

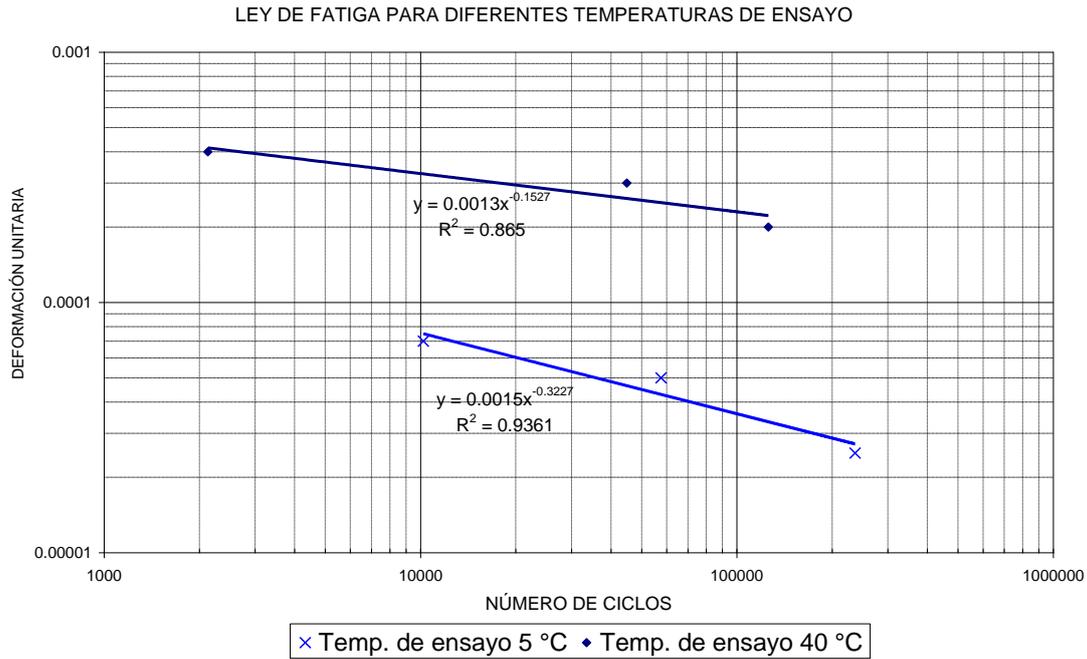


Figura 5.3 Leyes de fatiga para diferentes temperaturas de ensayo

5.2.4 Comparación de las leyes de fatiga para las variables estudiadas en laboratorio

En la figura 5.4, se han representado conjuntamente las leyes de fatiga obtenidas para cada una de las variables consideradas.

Como se puede observar, la ley de fatiga que se encuentra por debajo de todas es la obtenida a la temperatura de ensayo de 5 °C. Por el contrario, la ley de fatiga obtenida a 40 °C se encuentra por encima de todas. Y entre ellas se encuentra el resto de las leyes de fatiga.

Además, la ley de fatiga que tiene mayor pendiente es la correspondiente a la mezcla que se compactó a 40 °C por debajo a la temperatura óptima, siendo ésta la correspondiente a una mala ejecución, que se muestra mucho más sensible a las variaciones de deformación que el resto de las mezclas.

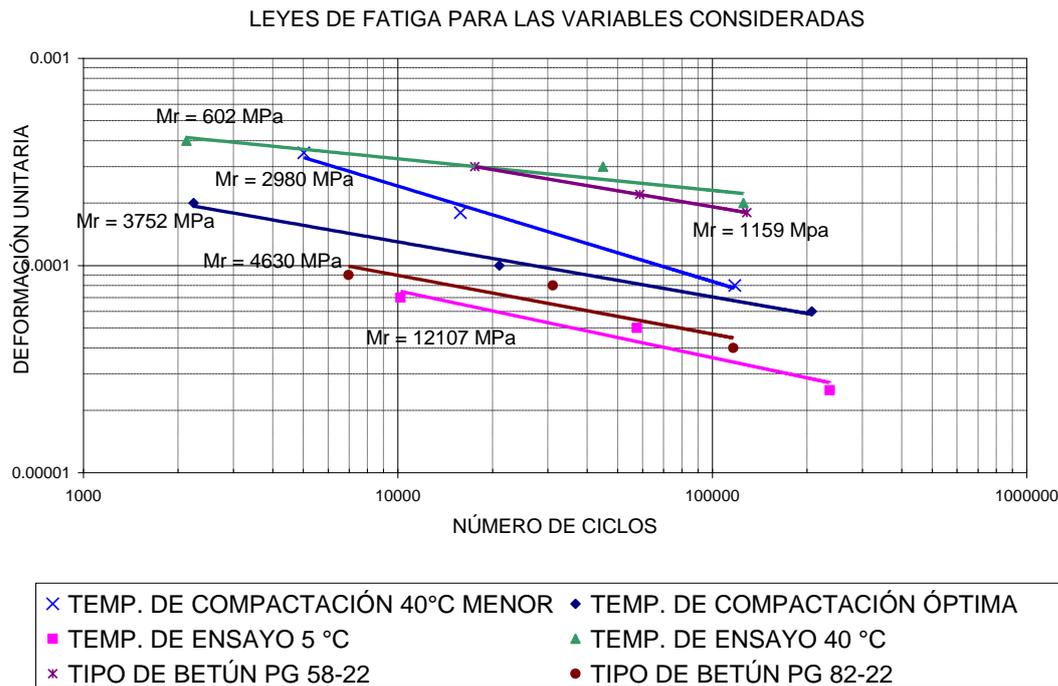


Figura 5.4 Leyes de fatiga para las variables consideradas

5.2.5 Ley de Fatiga de las probetas fabricadas en planta y de los testigos de la obra 3

Para mostrar el efecto de la ejecución real de una mezcla en obra, se han determinado las leyes de fatiga a mezclas de campo sobre probetas fabricadas en planta y testigos de obra. Se ha escogido en primer lugar la obra 3, ya que es la obra que tiene menor diferencia entre los módulos resilientes de probetas y testigos; por tanto, es importante conocer si la adecuada ejecución de la mezcla de obra que se deduce del ensayo de módulo resiliente se corresponde con un adecuado comportamiento en servicio, evaluado a partir del ensayo de fatiga.

Las mezclas de la obra 3 están compuestas por un betún PG 70-22, un árido basalto, tamaño máximo de árido 19 mm y granulometría centrada en huso.

En la Tabla 5.5 se presentan los módulos resilientes de la mezcla que se obtuvieron para las probetas fabricadas en planta y los testigos de obra, y sobre los que se determinaron las leyes de fatiga.

Mezcla	Módulo resiliente (MPa)
Probetas	3594
Testigos	3498

Tabla 5.5 Módulos resilientes de las probetas fabricadas en planta y de los testigos de la obra 3

En la figura 5.5 se observa que la ley de fatiga de las mezclas de probetas fabricadas en planta se encuentra ligeramente por debajo de la ley de fatiga de los testigos de obra, aunque las dos leyes de fatiga se encuentran muy próximas entre sí, lo que pone de manifiesto que el comportamiento de una y otra no difiere excesivamente y que la obra fue, por tanto, ejecutada correctamente, ya que la ley sobre testigos coincide prácticamente con la ley de diseño (sobre probetas).

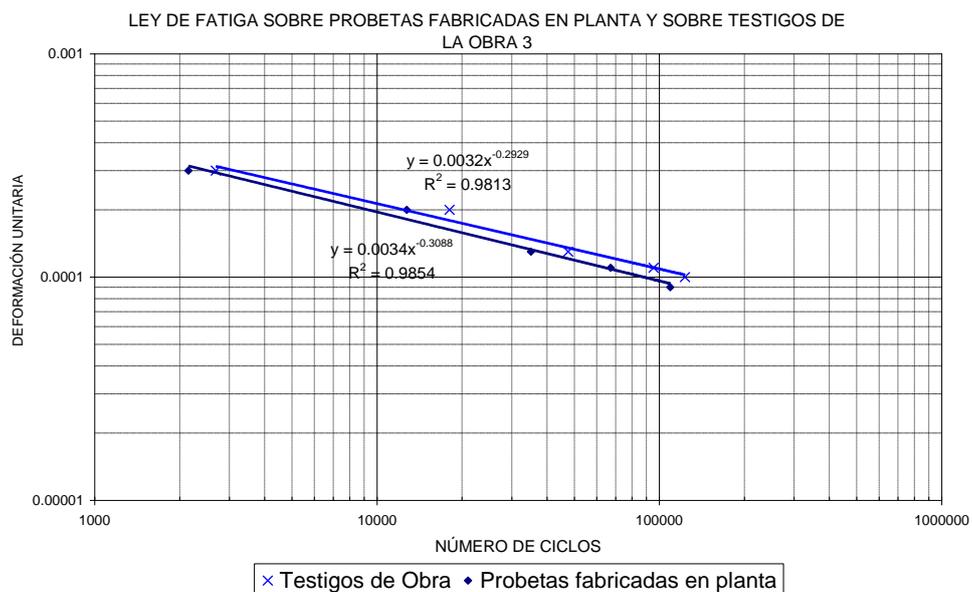


Figura 5.5 Leyes de fatiga sobre probetas fabricadas en planta y sobre testigos de la obra 3

5.2.6 Ley de Fatiga de las probetas fabricadas en planta y de los testigos de la obra 5

Por otra parte, se realizó lo mismo en la obra 5, ya que es la obra que presenta mayor diferencia entre los módulos resilientes de probetas y testigos, y por tanto es importante conocer si esta diferencia entre módulos, se corresponde con los resultados obtenidos en el ensayo a fatiga.

Las mezclas de la obra 5 están compuestas por un betún PG 76-22, un árido basalto, tamaño máximo de árido 25 mm y granulometría ajustada al límite superior.

En la Tabla 5.6 se presentan los módulos resilientes de la mezcla que se obtuvieron para las probetas fabricadas en planta y los testigos de la obra 5, sobre los que se determinaron las leyes de fatiga.

Mezcla	Módulo resiliente (MPa)
Probetas	4827
Testigos	1170

Tabla 5.6 Módulos resilientes de las probetas fabricadas en planta y de los testigos de la obra 5

En la figura 5.6 se observa que la ley de fatiga de las mezclas de probetas fabricadas en planta se encuentra muy por debajo de la ley de fatiga de los testigos de obra, lo que de nuevo pone de manifiesto que la diferencia que se obtuvo en el ensayo de módulo resiliente entre probetas de planta y testigos se sigue presentando en el ensayo de fatiga, siendo esta diferencia debida a una mala ejecución de la mezcla bituminosa.

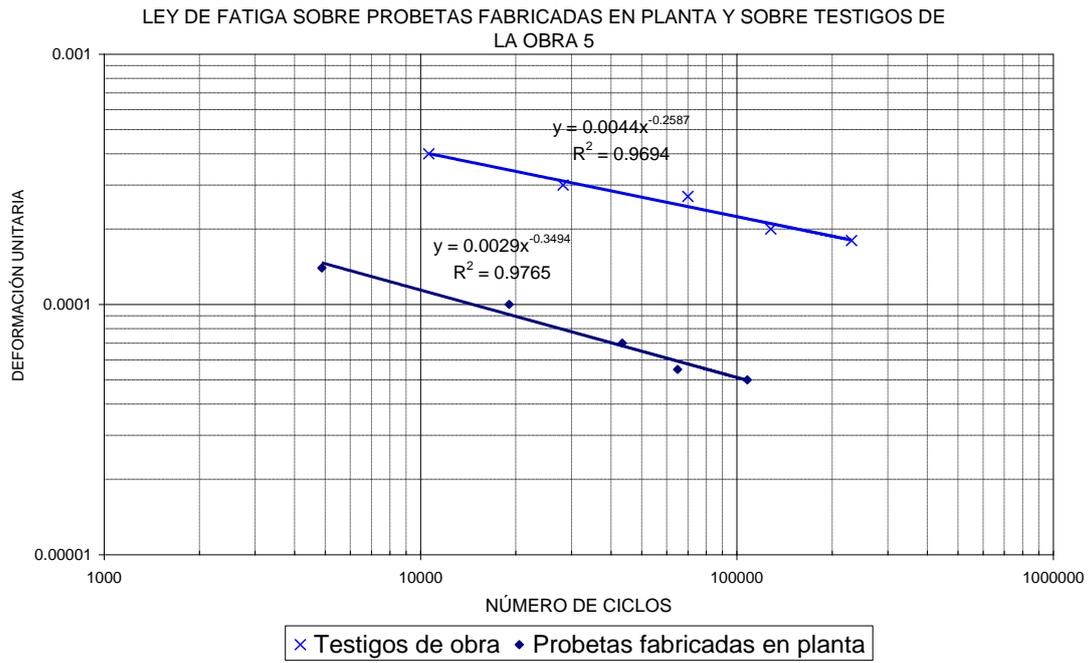


Figura 5.6 Leyes de fatiga sobre las probetas fabricadas en planta y sobre testigos de la obra 5

5.3 CÁLCULO DE LA VIDA DEL FIRME

Mediante el empleo de métodos analíticos se ha obtenido el estado de tensiones y deformaciones que se produce en la sección del firme seleccionado (apartado 5.1) en función del módulo de la mezcla obtenido en las diferentes condiciones consideradas, tanto a función de las variables de elaboración (apartado 5.2.2), como tras su puesta en obra (apartado 5.2.6). En este último caso se ha considerado tanto la obra 3 como la obra 5, representativas de una buena y mala ejecución respectivamente.

Mediante la ayuda del software DISPAV-5 y las leyes de fatiga obtenidas anteriormente se ha determinado la vida del firme en cada caso. Para realizar este análisis se ha considerado que existe adherencia entre capas. Los valores del coeficiente de Poisson fueron otorgados por el software dependiendo del tipo de capa (mezcla bituminosa: 0,35, zahorra artificial: 0,40 y explanada E3: 0,45).

5.3.1 Variable de elaboración de una mezcla bituminosa

Como se mencionó anteriormente, la variable que más influye en la elaboración de una mezcla bituminosa es la temperatura de compactación. Mediante un estudio analítico, se ha obtenido la vida del firme, expresada en ejes equivalentes de 18,000 lbs, variando únicamente el módulo resiliente de las mezclas bituminosas cuando son compactadas a la temperatura óptima y a 40 °C por debajo de la temperatura óptima.

Como se puede observar en la tabla 5.7, la vida del firme disminuye notablemente, cuando disminuye el módulo de la mezcla bituminosa por efecto de compactarla a una temperatura inadecuada.

Temperatura de compactación (°C)	Módulo resiliente (MPa)	Aplicaciones de carga (millones de ejes equivalentes)
105	2980	21,4
145	3752	47,7

Tabla 5.7 Vida de la sección, en millones de ejes equivalentes, al variar la temperatura de compactación de la mezcla

En la figura 5.7 se visualiza el efecto de la pérdida de vida de la sección, expresada en millones de ejes equivalentes, cuando el módulo resiliente de la mezcla bituminosa disminuye por efecto de una mala temperatura de compactación.

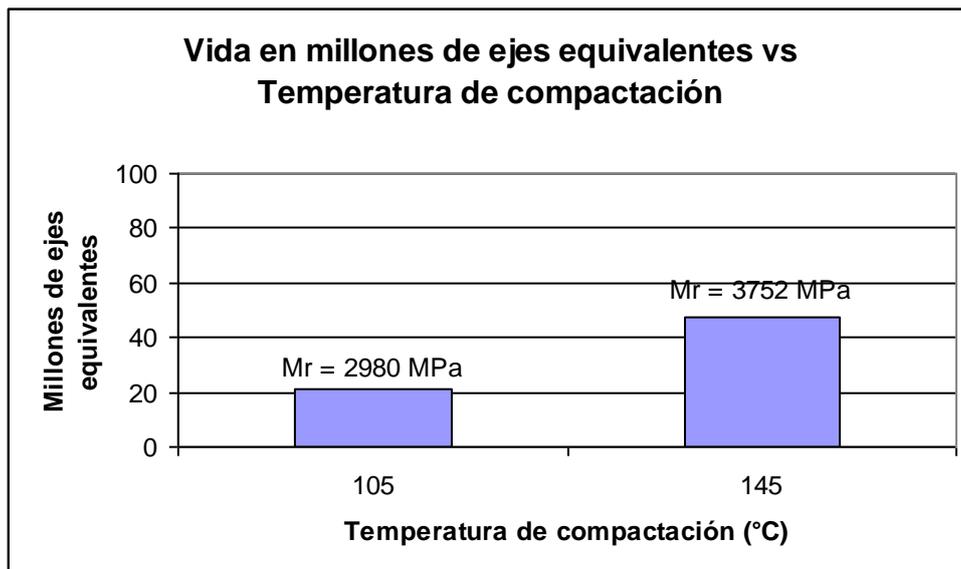


Figura 5.7 Vida de la sección, en millones de ejes equivalentes, al variar la temperatura de compactación de la mezcla

5.3.2 Ejecución en campo

Para analizar lo que puede suceder en campo cuando el módulo resiliente de una mezcla de las probetas de planta y de los testigos de obra es similar o no, se obtuvo la vida del

firme, expresada en ejes equivalentes de 18.000 lbs, considerando el módulo de la mezcla en cada caso y correspondientes leyes de fatiga.

5.3.2.1 Obra 3: buena ejecución

Como se observó en el apartado 5.2.5, las leyes de fatiga entre las mezclas de planta y los testigos de obra son muy similares, lo que pone de manifiesto que la mezcla ha sido bien ejecutada. Para validar esto, se ha determinado la vida, expresada en millones de ejes equivalentes, de la sección antes mencionada.

Como se puede observar en la tabla 5.8, la vida del firme es muy similar tanto a partir de las probetas, como a partir de los testigos.

Mezcla	Módulo resiliente (MPa)	Aplicación de carga (millones de ejes equivalentes)
Probetas	3594	42,4
Testigos	3498	39,8

Tabla 5.8 Vida de la sección, en millones de ejes equivalentes, de la obra 3

En la figura 5.8 se puede visualizar que apenas hay pérdida de vida del firme cuando se evalúa sobre las probetas fabricadas en planta y sobre los testigos de obra.

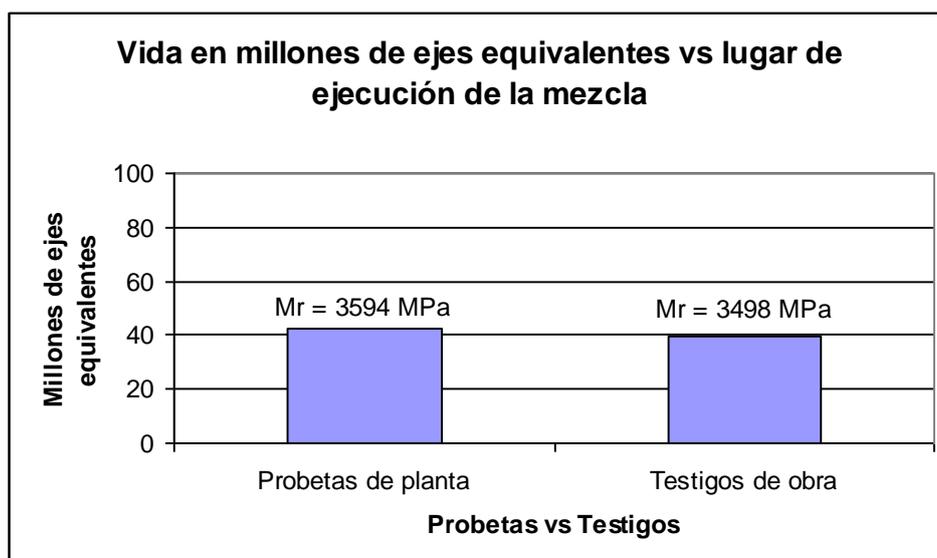


Figura 5.8 Vida de la sección, en millones de ejes equivalentes, de la obra 3

5.3.2.2 Obra 5: mala ejecución

Como se observó en el apartado 5.2.6, las leyes de fatiga entre las mezclas de planta y los testigos de obra son muy diferentes, lo que quiere decir que la mezcla no ha sido bien ejecutada. Para validar esto, se ha determinado la vida, expresada en millones de ejes equivalentes, de la sección antes mencionada.

Como se puede observar en la tabla 5.9, la vida del firme disminuye radicalmente, cuando el módulo de los testigos es muy diferente del obtenido sobre las probetas de planta.

Mezcla	Módulo resiliente (MPa)	Aplicación de carga (millones de ejes equivalentes)
Probetas	4827	86,8
Testigos	1170	1,2

Tabla 5.9 Vida de la sección, en millones de ejes equivalentes, de la obra 5

En la figura 5.9, se visualiza el efecto de la pérdida de vida de la sección, expresada en millones de ejes equivalentes, cuando el módulo resiliente de la mezcla bituminosa disminuye por efecto de una mala ejecución.

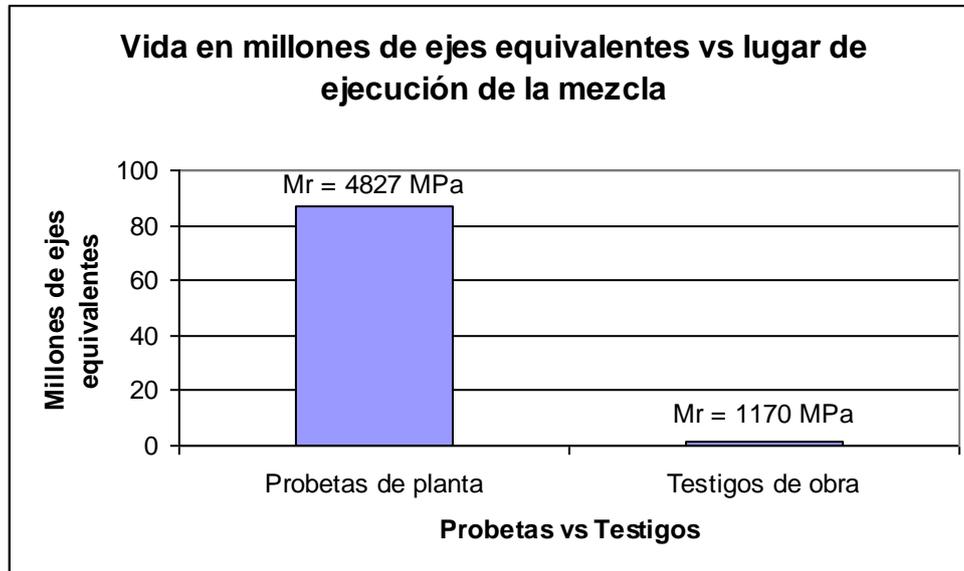


Figura 5.9 Vida de la sección, en millones de ejes equivalentes, de la obra 5

Se puede concluir que el módulo resiliente de una mezcla bituminosa es un buen indicador de la vida que tendrá la sección del firme. En general, cuanto mayor sea el módulo, mayor será su resistencia a la fatiga y, por tanto, mayor será la vida del firme. Por otra parte, cuanto más parecidos sean los módulos de las probetas fabricadas en planta y de los testigos extraídos, mejor ejecutada se estará la mezcla bituminosa, mayor será su resistencia a la fatiga y mayor será la vida del firme.

5.4 CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados de fatiga han permitido comprobar la relación entre módulo obtenido y el comportamiento a fatiga de la mezcla, de forma que cuando se ejecuta mal una mezcla, no sólo se tiene un módulo resiliente bajo, sino también una vida a fatiga menor.

En apartados anteriores se observó la importancia que tienen las variables que más influyen en la composición, elaboración y ejecución de la mezcla, en su comportamiento a fatiga. Las leyes de fatiga se ordenan de acuerdo al módulo obtenido, observándose una mayor pendiente de la ley cuando la mezcla no se ejecuta adecuadamente, lo que supone una menor vida de la sección.

Por otra parte, se observó una pérdida de vida en la sección de un firme, cuando la mezcla está mal ejecutada, respecto a las condiciones de diseño, esto es, cuando el módulo obtenido sobre los testigos es muy diferente (mucho más bajo) que el obtenido sobre las probetas de planta.

Por tanto, un control de calidad a partir de un ensayo mecánico (módulo resiliente) podría asegurar que la mezcla bituminosa, tras su ejecución, conserve las propiedades con las que fue diseñada, ya que como se ha puesto de manifiesto en este estudio, existe una relación directa entre las propiedades mecánicas de la mezcla y su vida.

Por último, cabe mencionar que las propiedades mecánicas de una mezcla dependen no sólo de los componentes, sino también de como se elabora la mezcla, y que en muchas ocasiones a este factor no se le da la atención adecuada, a pesar de su importancia en la durabilidad de una mezcla bituminosa.

CAPÍTULO 6

DETERMINACIÓN DE CRITERIOS PARA EL CONTROL DE CALIDAD A PARTIR DEL MÓDULO RESILIENTE

Uno de los puntos importantes dentro de esta investigación es determinar los criterios de control de calidad de una mezcla bituminosa en el momento de su ejecución a partir del módulo resiliente.

6.1 LIMITACIONES DEL CONTROL DE CALIDAD ACTUAL

Como ya se ha mencionado en los capítulos introductorios, el control de calidad de la mezcla bituminosa, una vez colocada y compactada, se basa en la extracción de testigos para la determinación de su espesor y su densidad. Este valor de densidad es comparado con una densidad de referencia obtenida sobre una probeta elaborada con una muestra proveniente de planta y compactada. Por ejemplo, las especificaciones españolas sobre la unidad terminada indican que deberá alcanzarse una compactación mínima del 98% de la densidad Marshall de referencia para capas de espesor superior a 6 cm y del 97% para capas de menor espesor; por su parte, las especificaciones mexicanas establecen que la compactación mínima debe ser del 95% para capas de cualquier espesor.

Por otra parte, el Asphalt Institute establece que los testigos extraídos de obra deben tener al menos un 8% de huecos, que equivale a una compactación mínima de aproximadamente el 96%.

Es evidente que estas exigencias tienen el propósito de controlar que la mezcla mantenga sus propiedades de diseño después de los procesos de transporte, extendido y compactación, y asegurar así un buen comportamiento en servicio, partiendo de la hipótesis que los parámetros considerados en la etapa de la dosificación de la mezcla mediante método Marshall sean necesarios y suficientes para garantizar este objetivo.

Sin embargo, las experiencias recogidas en el capítulo 4 y 5 han puesto de manifiesto que el control de densidad no resulta el más adecuado por su poca sensibilidad para detectar variaciones en la composición de la mezcla, a diferencia de utilizar los resultados del ensayo de módulo resiliente. Además, el hecho de que una capa presente una alta compactación, no asegura que se haya ejecutado correctamente, ya que no se trata de un parámetro que pueda evaluar directamente la resistencia mecánica de la mezcla bituminosa.

Se ha observado que compactando a una temperatura más baja que la considerada patrón, es posible obtener una densidad adecuada entregando mayor energía a la mezcla, a riesgo de afectar la estructura de la mezcla, pero no es posible alcanzar el mismo módulo resiliente. De modo que se desconoce cuál es el comportamiento de la capa en la estructura del firme.

6.2 CRITERIOS DE CONTROL DE CALIDAD

Como consecuencia de estos dos aspectos conflictivos detectados en el control de calidad empleado habitualmente:

- Poca sensibilidad para detectar variaciones en la composición de la mezcla
- Necesidad para evaluar las propiedades mecánicas y resistentes del producto terminado.

Se propone complementar el control de calidad con la determinación del módulo resiliente a 20 °C.

Para validar la utilización de este ensayo se presenta a continuación un análisis de los valores de confianza de los módulo resiliente retenido (relación módulo/módulo óptimo de cada tipo de mezcla) y porcentajes de compacidad (relación densidad/densidad óptima de cada tipo de mezcla) en función de las variables estudiadas en laboratorio, en particular de las variables de elaboración y composición, con el objeto de establecer un límite mínimo, tanto en módulo resiliente retenido como en porcentaje de compacidad.

Posteriormente, para verificar el criterio de control propuesto, se ha realizado un estudio sobre los valores obtenidos de los testigos extraídos de obra.

En la figura 6.1 se han representado los valores de módulo resiliente y porcentaje de compacidad en función de las variables de elaboración y composición. Cuando se realizó el análisis sobre los tipos de betún, se utilizó un árido de tipo basalto y una granulometría centrada en huso. Por otra parte, cuando se realizó el análisis sobre los áridos, granulometría y tamaño de árido, se utilizó un tipo de betún PG 70-22. En la tabla 6.1 se muestra, en modo de ejemplo, los valores considerados para betún PG 70-22

Variab les	Módulo resiliente (MPa)	Compacidad (%)	Módulo retenido (%)
Temp. de compactación 145 °C 75 golpes por cara y altura de probeta de 6,5 cm	3752	100	100
Temp. de compactación 145 °C 75 golpes por cara y altura de probeta de 4,0 cm	3443	99,2	91,7
Temp. de compactación 145 °C Ángulo de giro de compactación 2,0° y altura de probeta de 6,5 cm	3402	98,1	90,6
Temp. de compactación 125 °C 75 golpes por cara y altura de probeta de 6,5 cm	3182	97,3	84,8
Temp. de compactación 145 °C Ángulo de giro de compactación 1,25° y altura de probeta de 6,5 cm	3136	96,8	83,5
Temp. de compactación 145 °C 50 golpes por cara y altura de probeta de 6,5 cm	3134	97,6	83,5
Temp. de compactación 125 °C 50 golpes por cara y altura de probeta de 6,5 cm	3098	95,4	82,5
Temp. de compactación 105 °C 100 golpes por cara y altura de probeta de 6,5 cm	2986	98,0	79,5
Temp. de compactación 105 °C 75 golpes por cara y altura de probeta de 6,5 cm	2980	97,3	79,0
Temp. de compactación 145 °C 35 golpes por cara y altura de probeta de 6,5 cm	2886	94,3	76,9

Temp. de compactación 145 °C 75 golpes por cara y altura de probeta de 2,5 cm	2870	96,7	76,4
Temp. de compactación 125 °C 35 golpes por cara y altura de probeta de 6,5 cm	2694	94,8	71,0
Temp. de compactación 145 °C Ángulo de giro de compactación 1,0° y altura de probeta de 6,5 cm	2694	92,9	71,8
Temp. de compactación 105 °C 50 golpes por cara y altura de probeta de 6,5 cm	2535	93,6	67,0
Temp. de compactación 105 °C 35 golpes por cara y altura de probeta de 6,5 cm	2243	92,4	59,0
Temp. de compactación 145 °C Ángulo de giro de compactación 0,5° y altura de probeta de 6,5 cm	2074	88,8	55,2

Tabla 6.1 Valores de módulo resiliente, porcentaje de compacidad y módulo retenido, para las diferentes variables de elaboración, cuando se utiliza un betún PG 70-22

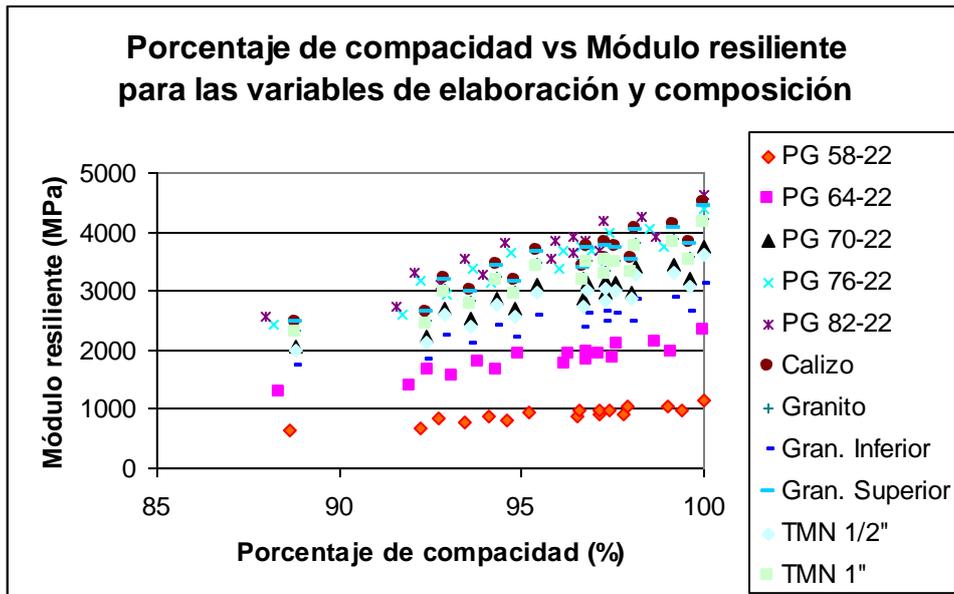


Figura 6.1 Módulo resiliente vs Porcentaje de compacidad para las variables de elaboración y composición

Para cada variable considerada, a partir de la figura 6.1 se ha obtenido el porcentaje de módulo resiliente retenido, como la relación entre el módulo resiliente para cada variable y el módulo resiliente óptimo, siendo éste último el obtenido cuando la mezcla con esa variable está bien ejecutada.

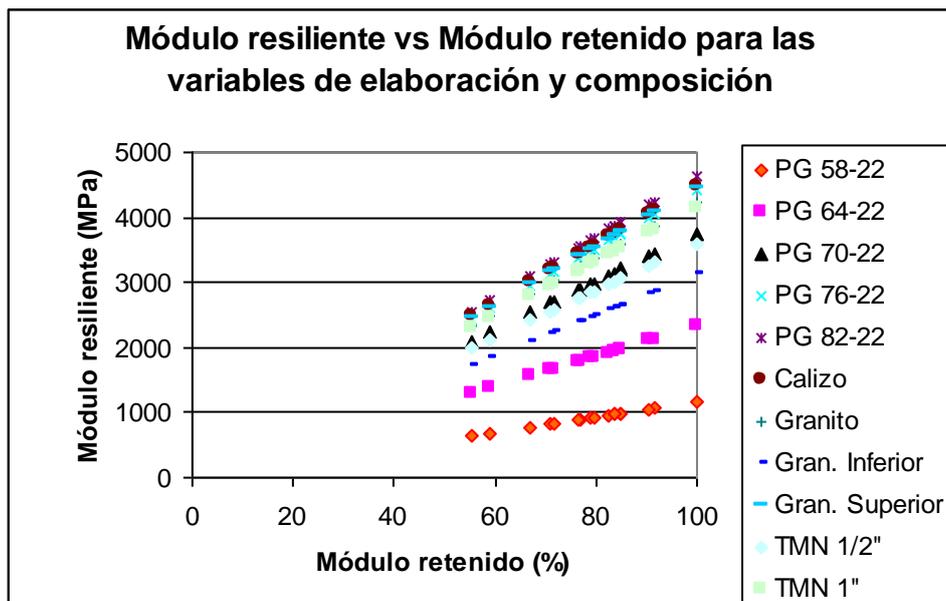


Figura 6.2 Módulo resiliente vs Módulo retenido para las variables de elaboración y composición

En el gráfico 6.3 se ha representado la relación entre porcentaje de compacidad y el promedio del módulo retenido de todas las variables de composición. Este último valor se ha obtenido como la media de los módulos retenidos de todas las variables, al porcentaje de compacidad correspondiente.

En la tabla 6.2 se muestra, en modo de ejemplo, los valores considerados para obtener el punto más bajo de la figura 6.3. Este punto es el promedio del módulo retenido para todas las variables de elaboración, cuando la mezcla bituminosa es compactada con un ángulo de giro de 0,5°.

Variable de elaboración	Módulo retenido (%)	Compacidad (%)
PG 58-22	58,8	88,6
PG 64-22	59,2	88,3
PG 70-22	55,2	88,8
PG 76-22	57,2	87,7
PG 82-22	56,6	87,5
Calizo	60,1	88,6
Granito	59,7	88,6
Gran. Inferior	60,1	88,2
Gran. Superior	59,3	87,2
TMN ½"	59,4	88,5
TMN 1"	60,2	87,4
Valor medio	58,7	88,1

Tabla 6.2 Obtención del valor medio de módulo retenido para el punto más bajo de la figura 6.3

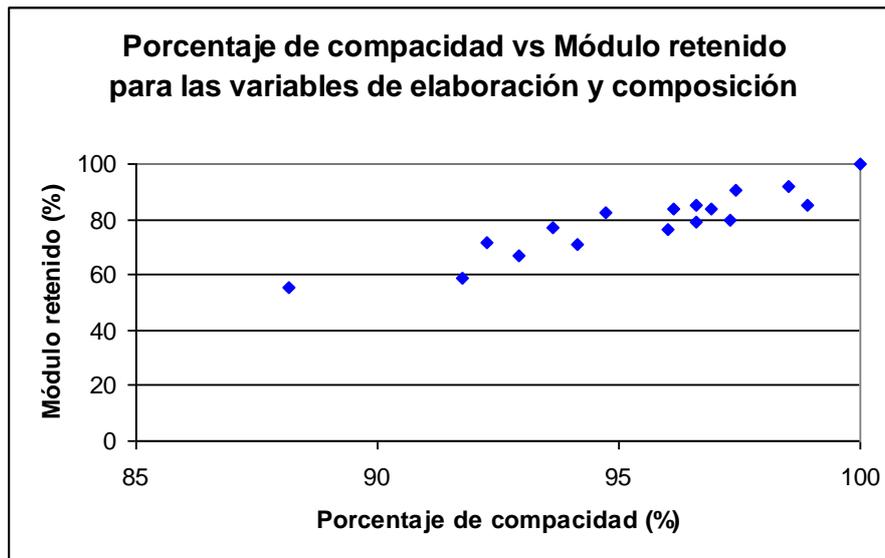


Figura 6.3 Módulo retenido vs Porcentaje de compacidad para las variables de elaboración y composición

Posteriormente, se han establecido diferentes límites de calidad a partir de la media aritmética y la desviación estándar de los datos recogidos en la figura 6.3.

- Media aritmética del módulo retenido = 80%
- Desviación estándar del módulo retenido = 15%
- Media aritmética del módulo retenido + desviación estándar del módulo retenido = 95%
- Media aritmética del módulo retenido – desviación estándar del módulo retenido = 65%
- Media aritmética del porcentaje de compacidad = 96%
- Desviación estándar del porcentaje de compacidad = 2%
- Media aritmética del porcentaje de compacidad + desviación estándar de porcentaje de compacidad = 98%
- Media aritmética del porcentaje de compacidad – desviación estándar del porcentaje de compacidad = 94%

A partir de estos límites se han establecido diferentes zonas de calidad, representadas en la figura 6.4. Los rangos establecidos en el gráfico de control servirán para determinar si una mezcla ha sido mal ejecutada, si sus componentes no son los adecuados o si se produce una combinación de malos componentes y mala ejecución.

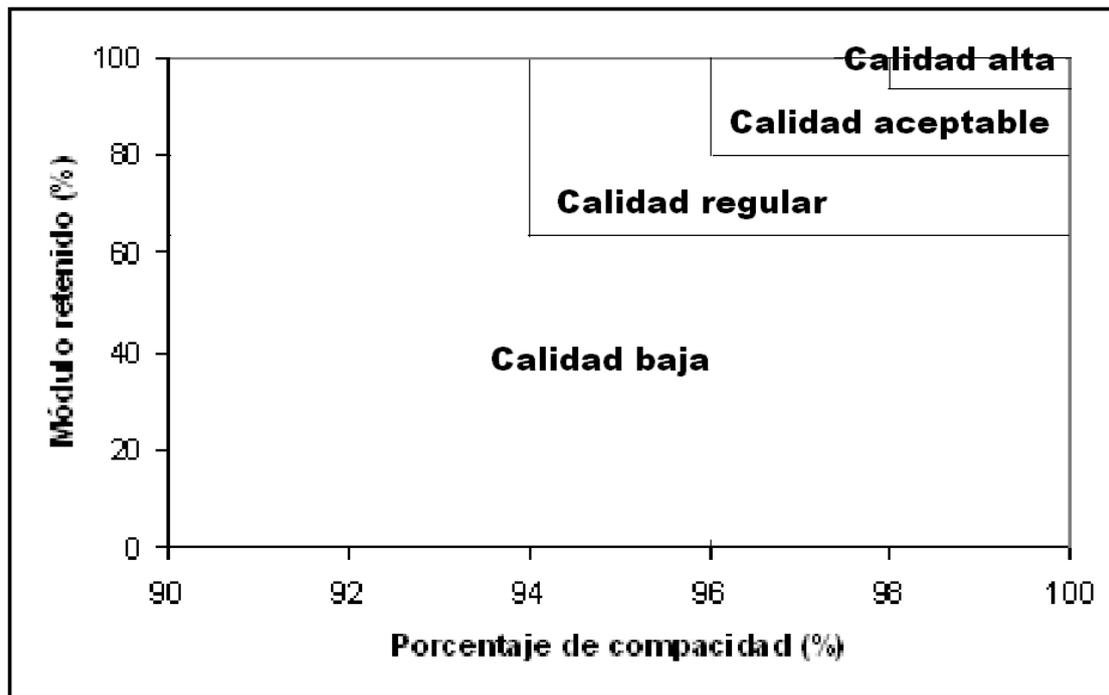


Figura 6.4 Gráfico de control de calidad de una mezcla bituminosa a partir del porcentaje de compacidad y módulo retenido

Cada uno de los rangos establecidos corresponde a un nivel de calidad:

- Calidad alta: mezcla bituminosa con compacidad alta y módulo retenido alto
- Calidad aceptable: mezcla bituminosa con compacidad aceptable y módulo retenido aceptable (por encima de la media)
- Calidad regular: mezcla bituminosa con compacidad regular y módulo retenido regular (por debajo de la media)
- Calidad baja: mezcla bituminosa con compacidad baja y módulo retenido bajo

Este gráfico de control permite complementar el criterio del porcentaje de compacidad usado actualmente como parámetro de control de calidad de ejecución de la mezcla.

6.2.1 Determinación de valores mínimos de aceptación y rechazo

Aunque los límites de la figura 6.4 se han obtenido a partir de mezclas fabricadas en laboratorio, cuando se ensayan testigos extraídos de las capas ejecutadas, es necesario verificar si las mezclas fabricadas en campo se adecuan a estos límites. Para ello, se ha decidido establecer unos niveles mínimos a exigir para una mezcla bituminosa en caliente de granulometría densa.

6.2.1.1 Intervalo de confianza

Hay que mencionar que las propiedades de las mezclas evaluadas a partir de los testigos extraídos de las capas ejecutadas, generalmente tienen valores inferiores respecto a cuando se evalúan sobre probetas fabricadas en laboratorio, debido a los factores que intervienen en el proceso de ejecución de las capas e incluso en el de extracción de testigos. Por ello, algunos investigadores proponen introducir un factor de pérdida de resistencia cuando ésta se evalúa directamente sobre testigos.

Por tal motivo, se ha decidido establecer un intervalo de confianza en módulo retenido. El intervalo se ha obtenido a partir de los valores de la obra 3, ya que es la que tiene los módulos resilientes más semejantes entre probetas de planta y testigos extraídos de campo, Tabla 6.3.

N° Ensayo	Módulo retenido (%)
1	98,6
2	95,5
3	100
4	97,1
5	97,9
6	98,9
7	99,1
8	96,2
9	95,8
10	96,1
11	96,5
12	96,3
Media (X)	97,3

Tabla 6.3 Valores de porcentaje de módulo retenido de la Obra 3

El intervalo de confianza se ha obtenido de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$X - 1.96 (\sigma/n)^{1/2} \leq \mu \leq X + 1.96 (\sigma/n)^{1/2} \quad (6.1)$$

donde:

X = media de los módulos retenidos

1.96 = coeficiente para una estimación de confianza del 95%

σ = desviación estándar de los módulos retenidos

n = número total de ensayos

Por tanto, el intervalo de confianza es el siguiente:

$$96.45 \leq \mu \leq 98.15$$

Expresado de otros términos, el intervalo de confianza es de 97.3 con una precisión de estimación de ± 0.85 .

Entonces, la relación de módulo resiliente de testigo de obra/intervalo de confianza a su precisión de estimación menor se llamará módulo de campo corregido.

$$\text{Módulo de campo corregido} = \text{Módulo resiliente de testigo de obra}/96.45 \quad (6.2)$$

6.2.1.2 Valores mínimos

Estos valores mínimos se han determinado a partir de los estadísticos del módulo retenido, en particular de su desviación estándar:

- Relación mínima entre valores medios de módulo resiliente corregido de testigos de obra y de probetas de mezcla fabricada en planta para aceptación: 80%
- Relación mínima entre valores medios de módulo resiliente corregido de testigos de obra y de probetas de mezcla fabricada en planta para no levantar la mezcla y reponerla por una nueva, pero aplicando una sanción económica: 65%

Podría establecerse una gratificación, cuando la calidad obtenida fuera muy buena. Esta gratificación podría aplicarse cuando la relación de valores medios de módulo resiliente corregido de testigos de obra y de las probetas de mezcla fabricada en planta sea mayor del 95%.

Los valores mínimos de porcentaje de compacidad permitidos para el control de calidad de una mezcla bituminosa después de que ésta ha sido colocada y compactada, de acuerdo a la figura 6.4 es de 96% para no generar sanción y 94% para que la mezcla no sea levantada y repuesta por una mezcla nueva por parte cliente.

Así, las especificaciones españolas sobre la unidad terminada que establecen que debe existir una compactación mínima del 98% para capas superiores a 6 cm y del 97% para capas de menor espesor, encajarían en el gráfico de control propuesto. En cambio, la relación mínima exigida actualmente en México del 95% estaría fuera del gráfico, dando a entender que es insuficiente.

6.3 VERIFICACIÓN DEL CONTROL DE CALIDAD PROPUESTO

Para saber si el método de control y los rangos propuestos son los adecuados para asegurar que una mezcla es ejecutada de manera correcta, se ha procedido a aplicar lo visto en el apartado 6.2.1 a los testigos extraídos de obra.

6.3.1 Relación (módulo testigo/módulo probeta) vs Porcentaje de compacidad

En la tabla 6.4, se presentan los valores de módulo resiliente obtenido sobre las probetas de mezcla fabricadas en planta, los módulos resilientes de los testigos de obra, los módulos resilientes corregidos de testigos de obra, los porcentajes de módulo retenido y los porcentajes de compacidad de las obras estudiadas.

Mezcla	Densidad (g/cm³)	Compacidad (%)	Módulo Resiliente (MPa)	Módulo Resiliente corregido (MPa)	Módulo Retenido (%)
Obra 1 (Probetas)	2,317	98,7	1963	1963	77,1
Obra 1 (Testigos)	2,288		1460	1514	
Obra 2 (Probetas)	2,367	99,1	4153	4153	94,4
Obra 2 (Testigos)	2,346		3784	3923	
Obra 3 (Probetas)	2,275	99,8	3594	3594	100
Obra 3 (Testigos)	2,272		3498	3594	
Obra 4 (Probetas)	2,133	99,2	3806	3806	90,0
Obra 4 (Testigos)	2,116		3305	3427	
Obra 5 (Probetas)	2,378	94,6	4827	4827	25,1
Obra 5 (Testigos)	2,250		1170	1213	
Obra 6 (Probetas)	2,238	99,5	3152	3152	75,7
Obra 6 (Testigos)	2,228		2304	2388	
Obra 7 (Probetas)	2,123	95,7	4380	4380	51,4
Obra 7 (Testigos)	2,033		2173	2252	

Obra 8 (Probetas)	2,239	97,7	2964	2964	82,8
Obra 8 (Testigos)	2,188		2368	2455	
Obra 9 (Probetas)	2,185	94,8	4261	4261	75,2
Obra 9 (Testigos)	2,073		3089	3203	
Obra 10 (Probetas)	2,290	99,7	3856	3856	90,1
Obra 10 (Testigos)	2,285		3353	3476	
Obra 11 (Probetas)	2,390	98,8	4511	4511	89,9
Obra 11 (Testigos)	2,363		3913	4057	

Tabla 6.4 Valores de módulos, porcentaje de módulo retenido y porcentaje de compacidad de las obras estudiadas

En la figura 6.5, se ha representado la relación entre el cociente entre el módulo corregido de los testigos y de las probetas de las obras estudiadas y el porcentaje de compacidad obtenido. Se puede observar que existe una obra con bonificación, cinco obras que están en el rango de aceptación, otras tres obras que se encuentran en el rango de penalización y, por último, dos obras que se encuentran en el rango de rechazo.

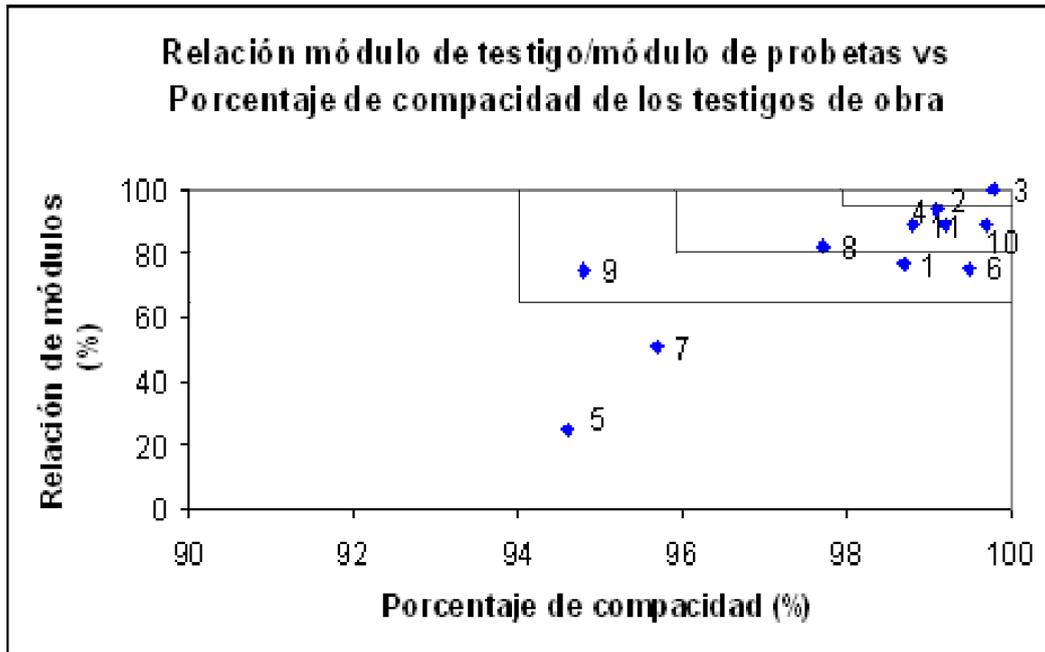


Figura 6.5 Gráfico de control de calidad de obra a partir del porcentaje de compactación y la relación entre módulos de testigos y probetas

Los valores de la figura 6.5 se han comparado con los valores mínimos propuestos para la relación entre módulos, vistos en el apartado 6.2.1.

Control de calidad a partir de los valores mínimos de relación entre módulos

Si se aplican los valores mínimos de relación entre módulos después de su colocación y compactación, para su bonificación, aceptación, penalización y rechazo, se obtendría:

Bonificación: obra 3

Aceptación: obras 2, 4, 8, 10 y 11

Penalización: obras 1, 6 y 9

Rechazo: obras 5 y 7

Control de calidad a partir de los valores mínimos de compactación de acuerdo a la Normativa Española

Si se aplica el porcentaje de compactación exigido en la Normativa Española, (apartados 2.8.5.6 y 2.8.5.8), se obtendría:

Aceptación: obras 1, 2, 3, 4, 6, 10 y 11

Penalización: obra 7 y 8

Rechazo: obras 5 y 9

Control de calidad a partir de los valores mínimos de compacidad de acuerdo a la Normativa Mexicana

Si se aplica el actual criterio de control de calidad en México, (apartado 2.8.3.1), se obtendría:

Aceptación: obras 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10 y 11

No Aceptación (*): obras 5 y 9

De acuerdo a este análisis, se pueden observar las diferencias que existen entre el método de control de calidad propuesto, encaminado a asegurar las propiedades mecánicas de la mezcla, y el método de control de calidad actual, basado solo en la densidad y no en las propiedades mecánicas: éste último acepta casi todas las obras, mientras que a partir del porcentaje de módulo resiliente retenido, casi la mitad de las obras se rechazan ó penalizan.

Por ello, un control de calidad basado en las propiedades mecánicas que la mezcla bituminosa alcanza después de su colocación y compactación es de suma importancia para asegurar el adecuado comportamiento de la mezcla.

() No se menciona "Penalización" porque la actual Normativa Mexicana no considera este concepto cuando una mezcla bituminosa no alcanza los valores mínimos establecidos de porcentaje de compacidad.*

6.4 CONSIDERACIONES FINALES

La investigación ha demostrado la importancia que tiene el realizar un ensayo mecánico a la mezcla bituminosa después de su colocación y compactación, para decidir la aceptación, penalización o rechazo de la capa. Como se ha visto, los actuales criterios de control basados en la compactación de una mezcla son poco sensibles ante cualquier cambio en sus propiedades. La determinación del módulo resiliente ha resultado ser un ensayo contundente, útil y práctico, para conocer si una mezcla bituminosa ha sido ejecutada adecuadamente.

En el apartado 6.2, se puso de manifiesto que era necesario utilizar criterios de control en los cuales estuviera involucrado tanto módulo resiliente como la densidad de referencia (compactación). Así, en el apartado 6.3, se ha presentado un gráfico complementario a utilizar en el control de calidad de mezclas bituminosas después de su colocación y compactación. Además, se han establecido diferentes rangos que ayudarán a la Dirección de Obra a “premiar” o “castigar” a un constructor, y aunque las obras analizadas se acomodan bien a estos rangos, es necesario seguir ajustándolos con las mezclas de diferente composición.

En conclusión, el módulo resiliente puede ser usado como método de control de calidad, confiable y práctico; a partir de los rangos propuestos, es posible determinar la calidad que ha alcanzado una mezcla bituminosa. El ensayo de módulo resiliente complementaría al actual método de control de calidad, que no considera la evaluación de las propiedades mecánicas de las mezclas.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

El control de calidad utilizado actualmente después de la puesta en obra y compactación de una mezcla bituminosa no garantiza su durabilidad durante el periodo de diseño, ya que este control sólo se basa en determinar la densidad de testigos extraídos de la capa ejecutada y compararla con la densidad Marshall de referencia, dejando a un lado las propiedades mecánicas de la mezcla ligadas a la durabilidad de la misma.

Por ello, se ha llevado a cabo una investigación sobre la aplicación de un ensayo mecánico que permita determinar si una mezcla bituminosa está bien ejecutada. El ensayo seleccionado ha sido el ensayo de módulo resiliente, que ha sido aplicado sobre probetas fabricadas en laboratorio con objeto de evaluar la sensibilidad del mismo frente a las variables más significativas de composición y elaboración de la mezcla, así como de ejecución del ensayo, y también sobre testigos extraídos durante el control de ejecución de diferentes obras, con objeto de comparar los resultados con los obtenidos a partir de las probetas fabricadas con la mezcla de planta.

Como resultado de esta Tesis se ha propuesto un criterio de calidad basado en la relación entre el módulo resiliente de los testigos extraídos de obra y el módulo resiliente de probetas fabricadas en planta (módulo retenido), así como en el porcentaje de compactación, ya que se pretende asegurar la calidad para la que ha sido diseñada a partir de la evaluación de una propiedad mecánica de la mezcla, al mismo tiempo que se complementa el actual método de control basado en la determinación de densidades.

7.1 CONCLUSIONES

Las conclusiones de este estudio son:

1.- La determinación del módulo resiliente de las mezclas bituminosas permite determinar un parámetro relacionado con su cohesión. El módulo depende de la granulometría de la mezcla y de su compacidad, del tipo de árido y del tipo y contenido de betún, siendo estos factores los que determinan la calidad de la mezcla.

2.- El ensayo para la determinación del módulo resiliente, a 20 °C, es suficientemente sensible para detectar variaciones en el módulo de las mezclas cuando se modifican las proporciones de sus componentes.

3.- Con respecto a las condiciones de ejecución, se ha evaluado el efecto de una compactación a bajas temperaturas, habiéndose observado que en esas condiciones, es posible conseguir una adecuada compacidad, aumentando suficientemente la energía de compactación, pero provocando a su vez una importante disminución en el valor de módulo resiliente, lo que supone una reducción de la calidad de la mezcla.

4.- Los resultados obtenidos sobre testigos obtenidos de las diferentes obras analizadas han demostrado que el módulo resiliente está relacionado con la compacidad de la mezcla, permitiendo de este modo conocer la calidad de una mezcla no sólo a través de sus propiedades volumétricas, sino también de sus propiedades mecánicas. Por ello, el actual método de control debe ser complementado con un ensayo que evalúe alguna propiedad mecánica, como es el módulo resiliente.

5.- El módulo resiliente está relacionado con la resistencia a fatiga de la mezcla. A partir de los módulos y de las leyes de fatiga obtenidas sobre testigos, y bajo determinadas hipótesis de cálculo, ha sido posible evaluar el efecto producido por la disminución del módulo en la vida del firme.

6.- Es posible mejorar el control de calidad habitualmente empleado, mediante el ensayo de módulo resiliente, ya que el actual parámetro de control de calidad, la densidad de referencia, no otorga una información concreta sobre el comportamiento de una mezcla bituminosa después de su colocación y compactación.

Como se observó en el capítulo 6, la calidad de las mezclas tras su ejecución depende de la relación entre el módulo resiliente de los testigos extraídos de obra y el módulo resiliente de probetas fabricadas en planta, denominado en este trabajo “módulo retenido”.

En la figura 7.1 se muestra el gráfico de calidad propuesto, en el que se observa que a mayor relación de módulos y mayor porcentaje de compacidad, la calidad de la mezcla bituminosa después de su ejecución es mejor.

Las zonas de calidad del gráfico se determinaron a partir de la media aritmética y desviación estándar del módulo retenido y del porcentaje de compacidad de las distintas variables de composición y elaboración. Dichos valores se muestran a continuación y se representan en la figura 7.1

- Media aritmética del módulo retenido = 80%
- Desviación estándar del módulo retenido = 15%
- Media aritmética del módulo retenido + desviación estándar del módulo retenido = 95%
- Media aritmética del módulo retenido – desviación estándar del módulo retenido = 65%
- Media aritmética del porcentaje de compacidad = 96%
- Desviación estándar del porcentaje de compacidad = 2%
- Media aritmética del porcentaje de compacidad + desviación estándar de porcentaje de compacidad = 98%
- Media aritmética del porcentaje de compacidad – desviación estándar del porcentaje de compacidad = 94%

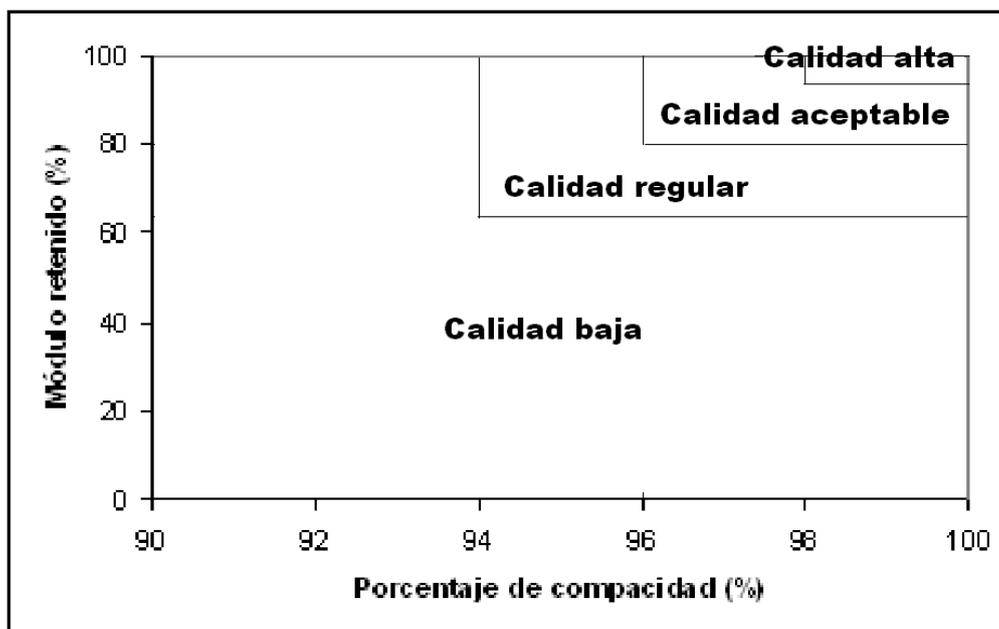


Figura 7.1 Gráfico de control de calidad de una mezcla bituminosa a partir del porcentaje de compacidad y módulo retenido

Estos valores mínimos se han determinado a partir de los estadísticos del módulo retenido y porcentaje de compacidad, en particular de su desviación estándar:

- Relación mínima entre valores medios de módulo resiliente corregido de testigos de obra y de probetas de mezcla fabricada en planta para aceptación: 80%
- Relación mínima entre valores medios de módulo resiliente corregido de testigos de obra y de probetas de mezcla fabricada en planta para no levantar la mezcla y reponerla por una nueva, pero aplicando una sanción económica: 65%

Podría establecerse una gratificación, cuando la calidad obtenida fuera muy buena. Esta gratificación podría aplicarse cuando la relación de valores medios de módulo resiliente corregido de testigos de obra y de las probetas de mezcla fabricada en planta sea mayor del 95%.

Los valores mínimos de porcentaje de compacidad permitidos para el control de calidad de una mezcla bituminosa después de que ésta ha sido colocada y compactada, de acuerdo a la figura 7.1 es de 96% para no generar sanción y 94% para que la mezcla no sea levantada y repuesta por una mezcla nueva por parte cliente.

7.2 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Las líneas futuras de investigación son:

- 1.- Realizar un análisis más detallado del efecto de las variables de composición de las mezclas bituminosas sobre el módulo resiliente, ya que sólo se han estudiado betunes y áridos de la Republica Mexicana.
- 2.- Llevar a cabo un estudio más amplio de la aplicación del ensayo de módulo resiliente en el control de la ejecución de las mezclas bituminosas a través de los criterios propuestos para comprobar si los rangos establecidos en este estudio son los adecuados para aceptar o rechazar una obra, ya que hasta el momento sólo se han estudiado mezclas utilizadas en la Republica Mexicana.
- 3.- Corroborar con mayor número de mezclas, tanto de laboratorio como de campo, la relación entre el módulo resiliente y el desempeño a fatiga, especialmente a distintas temperaturas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abularach, B. Analysis of the quality control in asphalt pavements. Federal Highway Administration, USA, 2005.
2. Abdulshafi, O. Laboratory optimization of asphalt concrete intermedie course mixes to improve flexible pavements performance. Transportation Research Record, 1999, pp. 69-75.
3. AFNOR (Asociación Francesa de Normalización). Normativa para el control de calidad de mezclas bituminosas, 2007.
4. Almundaheen, J. A. y Al-Sugari, F. Effect of loading magnitude on measured resilient modulus of asphalt concrete mixes. Transportation Research Record, 1991, pp. 139-144.
5. Asphalt Institute. Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Serie de manuales N° 22 (MS-22), Asphalt Institute, Lexington, 1991.
6. Baldai, C. y Kattar, F. Asphalt mix design and the indirect test: a new horizon. Asphalt concrete mix design: development of more rational approaches. ASTM STP 1041, W. Gartner Ed., American Society for Resting and Materials, 1989, pp. 86-105.
7. Ball, J. Training and commitment for contractors process control. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist, Volume 63, The Association of Asphalt Paving Technologist, Ann Arbor, 1994, pp. 633-635.

8. Bambang, I. Workability and resilient modulus of asphalt concrete mixture containing flaky aggregates shape. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, 2005, pp. 1302-1312.
9. Bonvino, U. Evaluation of the cohesion of the bitumen mixtures by means of the indirect traction resistance test. *Mechanical tests for bituminous mixes, Characterization, design and quality control. Proceedings of the fourth international symposium held by RILEM, Budapest, Fritz, Chapman and Hall, Cambridge, 1990*, pp.85-104.
10. Boudreau R. y Hicks, R. Effects of test parameters on resilient modulus of laboratory-compacted asphalt concrete specimen. *Transportation Research Record*, 1992, pp. 46-52.
11. Carswell, W. y Cruz, J. Misión y ventajas de los betunes modificados con polímeros. *Asociación Técnica de las Carreteras de España*, 1997.
12. CEDEX Centro de estudios y experimentación de obras públicas. *Normas españolas NLT, Ensayos de carreteras*. Madrid, 1996.
13. Cochran, G. y Furber, B. Experience with laboratory MR testing. *Proceedings of workshop on resilient modulus testing. Minnesota Department of Transportation Oregon State University*. 1989.
14. Decker, D. S. Field management of hot mix asphalt. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 63, The Association of Asphalt Paving Technologist, Ann Arbor, 1994*, pp. 636-643.
15. Elliot, R. Effect of aggregate gradation variation on asphalt concrete mix properties. *Transportation Research Record, National Research Council. Washington D.C., 1992*.

16. Goetz, W. The evolution of asphalt concrete mix design. Asphalt concrete mix design: development of more rational approaches. ASTM STP 1041, W. Gartner Ed., American Society for Testing and Materials, 1989, pp. 5-14.
17. Gupta, P. K. y Van Bramer, T. F. Resilient and tensile properties of New Cork State Asphalt Concrete Mixes. Final Report on Research Project 184-1, conducted in cooperation with the U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Research Report 152, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 1990.
18. Huang, Y. Pavement analysis and design. Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1993.
19. Hveem, F. y Carmany, R. The factors underlying the rational design of pavements. Material and Research Department of California, 1948.
20. Kamel, N. y Millar, T. Comparative performance of pavement mixes containing conventional and engineering asphalts. Transportation Research Record, 1994, pp. 172-180.
21. Kennedy, T., White, T. y Epps, J. Use of material tests and pavement design procedures to evaluate new paving binders. Properties of flexible pavement materials. ASTM STP 807, J.J. Emery, Ed., American Society for Testing and Materials, 1983, pp. 5-45.
22. Kennedy, T., Roberts, F. y McGennis, R. Effects of compaction temperature and effort on the engineering properties of asphalt concrete mixtures. Placement and compaction of asphalt mixtures. ASTM STP 829, F.T. Wagner, Ed., American Society for Testing and Materials, 1984, pp. 48-66.
23. Kennedy, T., Von Quintus, H. y Mitchell, T. Pavement performance as affected by materials testing program. Transportation Research Record 1034, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., 1985, pp. 153-158.

24. Kennedy, T. y Ping, V. Comparison study of moisture damage test method for evaluating antistripping treatments in asphalt mixtures. Transportation Research Record 1323, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., 1991, pp. 94-111.
25. Kennedy, T. Ensayos y especificaciones de los ligantes bituminosos en el sistema Superpave. Carreteras N° 82, Asociación Española de la Carretera, Madrid, marzo-abril 1996, pp. 15-28.
26. Kennedy, T. Sistema Superpave de dosificación de mezclas. Carreteras N° 82, Asociación Española de la Carretera, Madrid, marzo-abril 1996, pp. 29-43.
27. Khosla, P. y Omer, M. Characterization of asphalt mixtures for prediction of pavement performance. Transportation Research Record 1034, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., 1985, pp. 47-55.
28. Lord, B. El programa estratégico de investigación en carreteras (SHRP) en Estados Unidos. Carreteras N° 82, Asociación Española de la Carretera, Madrid, marzo-abril 1996, pp. 9-14.
29. Lottman, R. Laboratory test method for predicting moisture-induced damage to asphalt concrete. Transportation Research Record 843, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., 1982, pp. 88-94.
- 30.- Martínez, A. Aseguramiento de la calidad de mezclas bituminosas mediante la aplicación del ensayo de tracción indirecta en el control de su ejecución. Tesis doctoral, Tutor: Félix Pérez Jiménez, Barcelona, España, 2000.
31. Maupin, G. W. Jr. Implementation of stripping test for asphalt concrete. Transportation Research Record 712, Transportation Research Board, National Academy of Science, Washington D.C., 1979, pp. 8-12.

32. Meor, O. H. Effects of temperature on resilient modulus of dense asphalt mixture incorporating steel slag subjected to short term oven ageing. Proceeding of Work Academy of Science Engineering and Technology, Volume 36, 2008.
33. Merchan, F. Manual de control de calidad total en la construcción con normas de la unión europea y normas americanas. 2º edición revisada y aumentada, Dossat 2000, Madrid, 1995.
34. Mirza, W., Graul, R., Greoger, J. y López, A. Theoretical evaluation of Poissons ratio and elastic modulus using indirect tensile with emphasis on bituminous mixtures. Transportation Research Record 1590, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., 1997, pp. 34-52.
35. Monismith, C., Finn, F. y Vallerga, B. A Comprehensive asphalt concrete mixture design system. Asphalt concrete mix design: development of more rational approaches, ASTM STP 1041, W. Gartner Jr., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989, pp. 39-71.
36. Montgomery, E. Diseño de análisis de experimentos, Limusa Wiley, 2º edición, 2005.
37. Moreno, R. Efecto del equipo y procedimiento de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a tracción indirecta de las mezclas bituminosas. Tesina de especialidad, Tutor: Adriana Martínez, Barcelona, España, 2005.
38. Normas UNE, 2006.
39. Normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2008.
40. Paul, C. y Mohammad, L. RILEM interlaboratory tests on stiffness properties of bituminous mixtures, Mechanical tests for bituminous materials. Recent improvements and future prospects. Proceedings of the fifth international RILEM symposium, Lyon, Di Benedetto and Francken, Balkema/Rotterdam/Brookfield, 1997, pp. 66-74.

41. Pérez Jiménez, F., Kraemer, C. y Lacleta, A. Mezclas bituminosas porosas. Nota Técnica, Dirección General de Carreteras, MOPU, Madrid, 1982.
42. Radha, A. Quality control and quality assurance of hot mix asphalt construction in Delaware. University Delaware, 2006.
43. Read, J. y Collop, A. Practical fatigue characterization of bituminous paving mixture. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 66, The Association of Asphalt Paving Technologist, Ann Arbor, 1997, pp. 74-108
44. Rico, A. Manual para diseño de pavimentos flexibles. Publicación Técnica del Instituto Mexicano del Transporte. México, 1998.
45. Roque, R. y Buttlar, W. The development of measurement and analysis system to accurately determine asphalt concrete properties using the indirect tensile mode. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 63, The association of Asphalt Paving Technologists, Ann Arbor, 1992, pp. 305-332.
46. Said, S.F. y Vallerga, B. Resilient Modulus by indirect tensile test, Mechanical tests for bituminous mixes. Characterization, design and quality control. Proceedings of the fourth international symposium held by RILEM, Budapest, Chapman and Hall, Cambridge, 1990, pp. 590-606.
47. Said, S. y Johansson, S. Mechanical properties of bitumen road base mixes, Mechanical tests for bituminous materials. Recent improvements and future prospects. Proceedings of the fifth international RILEM symposium, Lyon, Di Benedetto and Francken Balkema/Rotterdam/ Brookfield, 1997, pp. 211-215.
48. Saleh, M. Factors affecting resilient modulus. University of Canteburg, Christchurch, New Zeland, 2005.
49. Seed, H. Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures. Prot. Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements. Ann Arbor, Michigan, 1962, pp. 615-636.

50. Tayelabi, C. Effects of the modulus on resilient type on asphalt mixture. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist, Volume 66, The Association of Asphalt Paving Technologists, Ann Arbor, 1997, pp. 633-665.

51. Tunncliff, D. G. Quality control of bituminous paving from the beginning. Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 42, The Association of Asphalt Paving Technologists, Ann Arbor, 1973, pp. 441-481.

52. Wagner, F. T. Placement and compaction of asphalt mixtures. ASTM STP 829, Ed., American Society for Testing and Materials, 1984.

53. Yoder, E. y Witzack, E. Principles of pavement design. John Wiley and Sons Inc., Second Edition, USA, 1975.