

---

## Contenido

Resumen.....	ii
Resum.....	iii
Abstract .....	iv
Agradecimientos .....	v
Contenido.....	vii
Índice de Figuras .....	xiii
Índice de Tablas.....	xix
1. Antecedentes .....	1
2. Introducción .....	4
3. Estado del arte .....	6
3.1 Pavimento para carreteras .....	6
3.2 Mezclas asfálticas en caliente, MAC.....	7
3.2.1 Generalidades.....	7
3.2.2 Clasificación.....	9
3.3 Realidad mundial de los residuos .....	12
3.4 Mezclas asfálticas en caliente modificadas .....	15
3.5 Proceso industrial del residuo cerámico.....	20
3.5.1 Preparación de la pasta.....	22
3.5.2 Preparación de semielaborados.....	23
3.5.3 Líneas de ensamble .....	24
3.5.4 Hornos .....	26
3.5.5 Selección y empaque.....	28
3.5.6 Centro de distribución.....	29
3.6 Diseño de mezclas asfálticas.....	30
3.6.1 Caracterización de los áridos siguiendo la normativa en España.....	31
3.6.2 Caracterización del ligante bituminoso en España.....	36
3.6.3 Caracterización de agregados siguiendo la normativa colombiana.....	39

---

3.6.4	Caracterización del cemento asfáltico en Colombia .....	48
3.6.5	Obtención del porcentaje óptimo de betún en la mezcla asfáltica según normativa en España .....	52
3.6.6	Obtención preliminar del porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla asfáltica según normativa en Colombia.....	54
3.6.7	Verificación y confirmación del porcentaje óptimo de asfalto en una mezcla asfáltica en Colombia .....	60
3.7	Geología y micro caracterización de agregados y triturados de residuos cerámicos ..	66
3.8	Módulos Dinámicos (MD) .....	70
3.8.1	Nomograma de Van der Pöel .....	72
3.8.2	Nomograma de Heukelom. ....	73
3.8.3	Nomograma de Bonnaure (después Shell).....	74
3.8.4	Fórmulas de Bonnaure .....	75
3.8.5	Fórmulas del Instituto del Asfalto. ....	76
3.8.6	Fórmulas de Heukelom y Klomp.....	77
3.8.7	Fórmula de Witczak .....	77
3.8.8	Ensayo del módulo dinámico en probetas de las mezclas asfálticas en caliente..	78
3.8.9	Curva maestra y factor de ajuste.....	82
3.8.10	Ecuación de Arrhenius .....	83
3.8.11	Ecuación William Landel Ferry.....	83
3.8.12	Ecuación Susceptibilidad Viscosidad Temperatura (VTS) .....	83
3.8.13	Visco-elasticidad lineal y las ecuaciones de las curvas maestras .....	84
3.8.14	Construcción de las curvas maestras .....	88
3.9	Conclusiones a cerca del conocimiento actual.....	91
4.	Objetivos e hipótesis .....	94
5.	Metodología .....	95

---

5.1 Selección de tipos de mezcla asfáltica en caliente, MAC .....	97
5.2 Diseño de mezclas asfálticas en caliente, MAC .....	97
5.3 Diseño de mezclas asfálticas en caliente bajo la normativa española .....	98
5.3.1 Caracterización de áridos, triturados cerámicos y construcción de la fórmula de trabajo .....	98
5.3.2 Caracterización microscópica del residuo cerámico y árido .....	98
5.3.3 Verificación técnica del cemento asfáltico.....	99
5.3.4 Ejecución del diseño de mezcla.....	99
5.3.5 Confirmación del diseño de mezcla.....	99
5.4 Diseño de mezclas asfálticas bajo la normativa colombiana.....	100
5.4.1 Caracterización de agregados, triturados cerámicos y construcción de la fórmula de trabajo .....	100
5.4.2 Caracterización microscópica del residuo cerámico y agregado.....	100
5.4.3 Verificación técnica del cemento asfáltico.....	101
5.4.4 Ejecución del diseño marshall .....	101
5.4.5 Confirmación del diseño de mezcla.....	101
5.5 Aplicación de la prueba dinámica.....	101
5.6 Construcción de las curvas maestras de las mezclas de comparación.....	102
6. Desarrollo experimental y resultados en España.....	102
6.1 Línea de partida de la investigación en el laboratorio de Caminos - UPV.....	102
6.2 Diseño de las mezclas asfálticas en caliente en el laboratorio de Caminos - UPV .....	103
6.2.1 Caracterización técnica de los áridos .....	103
6.2.2 Caracterización del betún o asfalto o ligante.....	104
6.2.3 Caracterización de residuo industrial triturado cerámica.....	105
6.2.4 Caracterización micro del árido y del residuo cerámico y geología de las fuentes... .....	106
6.2.5 Construcción de la fórmula de trabajo para la mezcla patrón.....	113

---

6.2.6	Construcción de la fórmula de trabajo para mezcla con triturado de cerámica 30% España .....	116
6.2.7	Construcción de la fórmula de trabajo para mezcla con triturado de cerámica 35% España .....	119
6.2.8	Construcción de la fórmula de trabajo para mezcla con triturado de cerámica 40% .....	122
6.2.9	Construcción de las probetas tamaño Marshall de las mezclas de estudio.....	124
6.2.10	Obtención del porcentaje óptimo de asfalto (España).....	125
6.3	Construcción de las probetas para el ensayo de módulos dinámicos.....	140
6.3.1	Preparación de la muestra y construcción de las probetas en el compactador giratorio de Superpave.....	140
6.3.2	Extracción de núcleos e instalación de los dispositivos .....	141
6.4	Aplicación del ensayo de módulos dinámicos .....	141
6.5	Curvas maestras españolas.....	143
6.5.1	Curva maestra MAC Patrón (España) con temperatura de referencia .....	146
6.5.2	Curvas maestras de MAC 30% cerámica (España) .....	163
6.5.3	Curvas maestras MAC 35% cerámica (España) .....	179
6.6	Pre-dimensionamiento de una estructura de pavimento en España.....	195
6.7	Costos y ahorros de la estructura de pavimento en España .....	214
7.	Diseño experimental y resultados en Colombia .....	222
7.1	Línea de partida de la investigación en el Laboratorio de Ingeniería Civil .....	222
7.2	Diseño de las mezclas asfálticas en caliente en el Laboratorio de Ingeniería Civil, UPB, Colombia .....	222
7.2.1	Caracterización de los agregados.....	222
7.2.2	Caracterización del asfalto o cemento asfáltico.....	226
7.2.3	Caracterización de residuo industrial triturado cerámica.....	227

---

7.2.4	Caracterización micro del agregado y del residuo cerámico y geología de las fuentes .....	228
7.2.5	Construcción de la fórmula de trabajo para mezcla Patrón Colombia .....	235
7.2.6	Construcción de la fórmula de trabajo para mezcla con triturado de cerámica 30% Colombia .....	238
7.2.7	Construcción de la fórmula de trabajo para mezcla con triturado de cerámica 35% Colombia .....	240
7.2.8	Construcción de la fórmula de trabajo para mezcla con triturado de cerámica 40% .....	243
7.2.9	Construcción de las probetas tamaño Marshall de las mezclas de estudio .....	246
7.2.10	Obtención del porcentaje óptimo de asfalto .....	247
7.3	Construcción de las probetas para el ensayo de módulos dinámicos .....	261
7.3.1	Preparación de la muestra y construcción de las probetas en el compactador giratorio de Superpave .....	261
7.3.2	Extracción de núcleos e instalación de los dispositivos .....	262
7.4	Aplicación del ensayo de módulos dinámicos .....	262
7.5	Curvas maestras colombianas .....	263
7.5.1	Curvas maestras MAC Patrón (Colombia) .....	267
7.5.2	Curvas maestras MAC 30% cerámica (Colombia) .....	284
7.5.3	Curvas maestras MAC 35% cerámica (Colombia) .....	299
7.6	Pre-dimensionamiento de una estructura de pavimento en Colombia .....	316
7.7	Costos y ahorros de la estructura de pavimento en Colombia .....	335
8.	Análisis .....	343
8.1	Caso Español – Europa .....	343
8.1.1	Caracterización de los materiales de la mezcla (España) .....	343
8.1.2	Diseño de la mezcla asfáltica (España) .....	343

---

8.1.3	Módulos dinámicos y sus curvas maestras .....	344
8.1.4	Estructura total de pavimento (España).....	346
8.1.5	Costos de producción de MAC .....	348
8.2	Caso Colombiano - Latinoamérica .....	348
8.2.1	Caracterización de los materiales de la mezcla (Colombia) .....	348
8.2.2	Diseño de la mezcla asfáltica (Colombia) .....	348
8.2.3	Módulos dinámicos y sus curvas maestras (Colombia).....	350
8.2.4	Estructura total del pavimento (Colombia).....	351
8.2.5	Costos de producción de MAC .....	353
8.3	Comparación de ambos Casos.....	353
9.	Discusión .....	360
10.	Conclusiones.....	364
11.	Futuras líneas de investigación propuestas .....	369
	Referencias bibliográficas .....	373