

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCUELA DE DOCTORADO

Programa de Doctorado en Infraestructuras de Transporte
y Territorio



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**EFFECTO EN EL MÓDULO DINÁMICO DE LA MEZCLA
ASFÁLTICA MODIFICADA CON AÑADIDO DE
RESIDUOS TRITURADOS DE LA INDUSTRIA
CERÁMICA**

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

NORMA CRISTINA SOLARTE VANEGAS

Dirigida por:

Prof. Dr. ALFREDO GARCÍA GARCÍA

Prof. Dr. MARÍA FERNANDA SERRANO GUZMÁN

julio 2022

Tribunal

Dr. Ricardo Insa Franco, Presidente del Tribunal

Dra. Adriana Haydée Martínez – Reguero, Secretario del Tribunal

Dra. María José Martínez – Echevarría Romero, Vocal del Tribunal

Resumen

EFFECTO EN EL MÓDULO DINÁMICO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON AÑADIDO DE RESIDUOS TRITURADOS DE LA INDUSTRIA CERÁMICA

El uso y reúso de residuos es una de las mayores preocupaciones de la sociedad actual. De hecho, en el mundo se producen más de 6,5 mil millones de toneladas de residuos de construcción y demolición (RCD) cada año, de las cuales entre 2,6 y 3 mil millones de toneladas corresponden a residuos inertes de la construcción y de la demolición, dentro de los cuáles está el residuo cerámico.

Entre los diferentes factores que están presentes en la falta de manejo de los residuos cabe destacar el desbordamiento de la producción de los mismos, la no aplicación de la política de los 3R, reciclar, reparar y reusar, y la falta de proyectos investigativos que incluyan experimentación con residuos inertes que puedan validar el uso de dichos materiales en diferentes producciones industriales.

En ese sentido, construir concretos asfálticos con inclusión de residuos industriales como la cerámica triturada sin respaldo científico podría llevar a los gobiernos a realizar un detrimento patrimonial.

Sin embargo, una investigación experimental que incluya el uso de residuos cerámicos en la elaboración de una mezcla de concreto asfáltico que permita conocer su desempeño por medio de ensayos de laboratorio de última tecnología, puede lograr disminuir la brecha de incertidumbre para que los gobiernos puedan tomar decisiones con soluciones económicas y competitivas en zonas con bajos y medianos niveles de tránsito.

En esta tesis se desarrollan ensayos de módulos dinámicos en probetas de concreto asfáltico convencional y con inclusión de 30% y 35% de residuo triturado cerámico, tanto en España como en Colombia, lo cual permite analizar, comparar y evaluar internacionalmente el comportamiento de estas mezclas considerando diferentes temperaturas y confirmando su uso en vías de bajos y medianos volúmenes de tránsito.

Finalmente, se propone el uso de mezclas asfálticas con inclusión de residuo triturado de cerámica al 30% para ofrecer una opción de reúso, que proporcione un respaldo científico que permita la implementación en carreteras y la integración de instrumentos regulatorios, económicos, educativos e informativos. De esta manera se ayuda a mitigar el problema de los residuos y se amplía la cobertura de la red pavimentada ofreciendo accesibilidad y movilidad a comunidades que de otra forma no podrían conectarse.

Resum

EFFECTE EN EL MODUL DINAMIC DE LA MESCLA ASFALTICA MODIFICADA EN AFEGIT DE RESIDUS TRITS DE L'INDUSTRIA CERAMICA

L'ús i reus de residus és una de les majors preocupacions de la societat actual. De fet, en el món es produeixen més de 6,5 mil milions de tones de residus de construcció i demolició (RCD) cada any, de les quals entre 2,6 i 3 mil milions de tones corresponen a residus inerts de la construcció i de la demolició, dins dels quals està el residu ceràmic. Entre els diferents factors que estan presents en la falta de maneig dels residus cal destacar el desbordament de la producció dels mateixos, la no aplicació de la política de les 3R, reciclar, reparar i reusar, i la falta de projectes investigatius que incloguen experimentació amb residus inerts que puguin validar l'ús dels dits materials en diferents produccions industrials.

En eixe sentit, construir concrets asfàtics incloent-hi residus industrials com la ceràmica triturada sense respaldar científic podria portar als governs a realitzar un detriment patrimonial. No obstant això, una investigació experimental que incloga l'ús de residus ceràmics en l'elaboració d'una mescla de concret asfàtic que permeta conèixer el seu exercici per mitjà d'assajos de laboratori d'última tecnologia, pot aconseguir disminuir la bretxa d'incertesa perquè els governs puguin prendre decisions amb solucions econòmiques i competitives en zones amb baixos i mitjans nivells de trànsit.

En esta tesi es desenrotllen assajos de mòduls dinàmics en provetes de concret asfàtic convencional i incloent-hi 30% i 35% de residu triturat ceràmic, tant a Espanya com a Colòmbia, la qual cosa permet analitzar, comparar i avaluar internacionalment el comportament d'estes mescles considerant diferents temperatures i confirmant el seu ús en via de baixos i mitjans volums de trànsit.

Finalment, es proposa l'ús de mescles asfàtiques incloent-hi residu triturat de ceràmica al 30% per a oferir una opció de reus, que proporcione un respaldar científic que permeta la implementació en carreteres i la integració d'instruments reguladors, econòmics, educatius i informatius. D'esta manera s'ajuda a mitigar el problema dels residus i s'amplia la cobertura de la xarxa pavimentada oferint accessibilitat i mobilitat a comunitats que d'una altra forma no podrien connectara.

Abstract

EFFECT ON THE DYNAMIC MODULE OF THE MODIFIED ASPHALT MIX WITH THE ADDED CRUSHED WASTE FROM THE CERAMICS INDUSTRY

The use and reuse of waste is one of the greatest concerns of today's society. In fact, more than 6.5 billion tons of construction and demolition waste (CDW) are produced in the world each year, of which between 2.6 and 3 billion tons correspond to inert construction and demolition waste. demolition, among which is the ceramic waste.

Among the different factors that are present in the lack of waste management, it is worth highlighting the overflow of their production, the non-application of the 3R policy, recycling, repairing and reusing, and the lack of research projects that include experimentation with inert waste that can validate the use of these materials in different industrial productions.

In this sense, building asphalt concrete with the inclusion of industrial waste such as crushed ceramics without scientific support could lead governments to carry out a patrimonial detriment.

However, an experimental investigation that includes the use of ceramic residues in the elaboration of an asphalt concrete mixture that allows knowing its performance through state-of-the-art laboratory tests, can reduce the uncertainty gap so that governments can take decisions with economic and competitive solutions in areas with low and medium levels of traffic.

In this thesis, tests of dynamic modules are developed in conventional asphalt concrete specimens and with the inclusion of 30% and 35% of crushed ceramic residue, both in Spain and in Colombia, which allows the behavior of these mixtures to be analyzed, compared and evaluated internationally. Considering different temperatures and confirming its use in roads with low and medium volumes of traffic.

Finally, the use of asphalt mixtures including 30% crushed ceramic waste is proposed to offer a reuse option that provides scientific support that allows implementation on roads and the integration of regulatory, economic, educational and informational instruments. In this way, it helps to mitigate the waste problem and expands the coverage of the paved network, offering accessibility and mobility to communities that otherwise would not be able to connect.

Agradecimientos

En primer lugar, a Dios por darme la vida y la oportunidad de llegar a este momento de disciplina y dedicación en la ingeniería.

Agradezco el apoyo incondicional del Dr. Alfredo García García, por su ejemplo integral de ser humano, su calidad como persona, que me ofreció la oportunidad de transformar un proyecto de investigación en la presente tesis doctoral, y por facilitarme todos los recursos disponibles del Laboratorio de Caminos para la realización de los ensayos y su gestión con las empresas PAVASAL EMPRESA CONSTRUCTORA, S.A. para el uso del Laboratorio de Asfaltos y Mezclas en Cheste, el suministro de los áridos y el betún y BECSA, S.A.U. en el suministro de material de residuo industrial cerámico triturado, su gestión para la consecución de un becario para el laboratorio, así como también en la dotación económica para la adquisición de nuevas herramientas necesarios para abordar la campaña de investigación. También, quiero agradecer el gran aporte de la Dra. María Fernanda Serrano Guzmán, quien estuvo siempre atenta a impulsar y aportar para el desarrollo de la tesis doctoral desde el comienzo, siendo ella la revisora de las pasantías desarrolladas fuera de España.

A Carlos Alonso Troyano, quien en todo momento estuvo con la absoluta disposición de apoyar y ayudar todo el proceso de experimentación en el Laboratorio de Caminos en la Universidad Politécnica de Valencia, aún en épocas de pandemia, junto con la Becaria Alejandra Fonseca, asumieron el reto, a pesar de que solo autorizaban a ingresar al campus los apoyos operativos en las investigaciones.

A los amigos en España, Carlos Hidalgo Signes, Elvira Garrido de la Torre, M. Ángel Morilla Rubio y su esposa Claudia, que desde el primer día en la UPV me estuvieron apoyando y aconsejando en todo momento.

Agradezco a la empresa PAVASAL, al Profesional José Berbis, por recibirme en el laboratorio de Asfaltos y Mezclas en Cheste en el desarrollo de una campaña de ensayos experimentales y suministrarme el árido y betún y a la empresa BECSA por suministrarme el material triturado cerámico y compartirnos el proceso industrial en España.

Agradezco y dedico a la Universidad Pontificia Bolivariana, UPB, al Pbro. Gustavo Méndez Paredes, a la Dra. Ana Fernanda Uribe Rodríguez, por apoyar el desarrollo de dos pasantías de investigación para el desarrollo de la tesis doctoral, y por todo el respaldo que en silencio siempre me dieron esperando este momento, al Laboratorio de Ingeniería Civil de la UPB, a la Ing. MSc. Nohora Emma Monsalve Peña, al laboratorista Vicente Páez, al analista Edwin Alexander Rangel Ardila, al laboratorio de nanociencia y nanotecnología, al coordinador Ing. Víctor Hugo Cuellar Carreño, su apoyo fue indispensable para la terminación de la campaña de ensayos en la UPB, Colombia.

Agradezco a la empresa Asfaltart S.A. que me suministró el asfalto y a la empresa Sánchez Construcciones S.A que nos suministró el agregado pétreo, a la empresa Cerámica Italia S.A, al ingeniero de producción German Augusto Ortega Angel, que nos explicó y compartió el proceso industrial y material en la planta industrial de San Jose de Cúcuta, Colombia.

A los amigos en Colombia, Luz Marina Torrado Gómez, Martha Liliana Núñez López, María Eugenia Camacho Torrado y todo el grupo de Jardineritas y a Ricardo José Lozano Picón, amigo del alma, quienes me han animado a terminar.

A mis estudiantes, que ya hoy son profesionales pero que asumieron con gran dedicación el reto de aprender a usar los equipos de ensayos y trabajar incesantemente en el laboratorio desarrollando a la par sus proyectos de grado: Adriana Del Pilar Patarroyo Monroy, Claudia Ximena Ramírez Palacio, Silvia Juliana Triana Nigrinis, David Alonso Grandas Castillo, Brayan Jesús Duarte Mesa (QEPD) y finalmente el maestrante Jorge Iván Arias Flórez, un apoyo invaluable.

Esta tesis doctoral se la dedico a mis padres, Alvaro (QEPD) y Esperanza (QEPD), que en todo momento me animaron y depositaron toda su confianza en mí, ellos sembraron los cimientos en mi corazón para perseverar hasta el fin, a mis hijos Juan (QEPD), Juan Pablo y Juan Andrés, al padre de mis hijos Juan Antonio, motores de salvación y en especial, a mis hermanos Nancy Amparo, Alvaro Mauricio (QEPD) y Claudia Liliam, a quienes he admirado por su integridad y su sabiduría y nunca dejaron de ayudarme y apoyarme, desde el cielo y desde la tierra, también lo dedico a mis sobrinos Sergio Nicolás, Natalia Andrea, Alvaro Augusto y Paula Alejandra, junto con mis hijos encargados de continuar el legado de la familia Solarte Vanegas. A Gonzalo y a José gracias por el apoyo de siempre.

Contenido

Resumen.....	iii
Resum.....	iv
Abstract	v
Agradecimientos	vi
Contenido.....	viii
Índice de Figuras	xiv
Índice de Tablas.....	xx
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	16
3.5 Proceso industrial del residuo cerámico.....	21
3.5.1 Preparación de la pasta.....	23
3.5.2 Preparación de semielaborados	24
3.5.3 Líneas de ensamble	25
3.5.4 Hornos	27
3.5.5 Selección y empaque	29
3.5.6 Centro de distribución	30
3.6 Diseño de mezclas asfálticas.....	31
3.6.1 Caracterización de los áridos siguiendo la normativa en España.....	32
3.6.2 Caracterización del ligante bituminoso en España.....	37
3.6.3 Caracterización de agregados siguiendo la normativa colombiana	40

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	51
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	61
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	218
7.1	Línea de partida de la investigación en el Laboratorio de Ingeniería Civil	218
7.2	Diseño de las mezclas asfálticas en caliente en el Laboratorio de Ingeniería Civil, UPB, Colombia	218
7.2.1	Caracterización de los agregados	218
7.2.2	Caracterización del asfalto o cemento asfáltico.....	221
7.2.3	Caracterización de residuo industrial triturado cerámica	221

7.2.4	Caracterización micro del agregado y del residuo cerámico y geología de las fuentes	223
7.2.5	Construcción de la fórmula de trabajo para mezcla Patrón Colombia	230
7.2.6	Construcción de la fórmula de trabajo para mezcla con triturado de cerámica 30% Colombia	233
7.2.7	Construcción de la fórmula de trabajo para mezcla con triturado de cerámica 35% Colombia	236
7.2.8	Construcción de la fórmula de trabajo para mezcla con triturado de cerámica 40%	239
7.2.9	Construcción de las probetas tamaño Marshall de las mezclas de estudio.....	241
7.2.10	Obtención del porcentaje óptimo de asfalto.....	242
7.3	Construcción de las probetas para el ensayo de módulos dinámicos.....	256
7.3.1	Preparación de la muestra y construcción de las probetas en el compactador giratorio de Superpave.....	256
7.3.2	Extracción de núcleos e instalación de los dispositivos	257
7.4	Aplicación del ensayo de módulos dinámicos	257
7.5	Curvas maestras colombianas	258
7.5.1	Curvas maestras MAC Patrón (Colombia)	262
7.5.2	Curvas maestras MAC 30% cerámica (Colombia).....	279
7.5.3	Curvas maestras MAC 35% cerámica (Colombia).....	296
7.6	Pre-dimensionamiento de una estructura de pavimento en Colombia	312
7.7	Costos y ahorros de la estructura de pavimento en Colombia	331
8.	Análisis.....	336
8.1	Caso Español – Europa.....	336
8.1.1	Caracterización de los materiales de la mezcla (España)	336
8.1.2	Diseño de la mezcla asfáltica (España)	336

8.1.3	Módulos dinámicos y sus curvas maestras	337
8.1.4	Estructura total de pavimento (España).....	340
8.1.5	Costos de producción de MAC	342
8.2	Caso Colombiano - Latinoamérica	342
8.2.1	Caracterización de los materiales de la mezcla (Colombia)	342
8.2.2	Diseño de la mezcla asfáltica (Colombia)	343
8.2.3	Módulos dinámicos y sus curvas maestras (Colombia).....	344
8.2.4	Estructura total del pavimento (Colombia).....	346
8.2.5	Costos de producción de MAC	348
8.3	Comparación de ambos Casos.....	349
9.	Discusión	361
10.	Conclusiones.....	365
11.	Futuras líneas de investigación	370
	Referencias bibliográficas	374

Índice de Figuras

Figura 1 Estructura de Pavimento Flexible.....	7
Figura 2. Tipos de Mezcla según la Gradación	10
Figura 3. Estructura de la Megatextura.....	11
Figura 4. Economía Circular para la mitigación del cambio climático.....	13
Figura 5. Infografía What a Waste 2.0	15
Figura 6. Objetivos de Desarrollo Sostenible ONU.....	16
Figura 7. Esquema del Proceso de Elaboración de la Cerámica.....	22
Figura 8. Proceso de Fabricación de los Materiales Cerámicos	23
Figura 9. Preparación de la Pasta	24
Figura 10. Preparación de Semielaborados	25
Figura 11. Líneas de Ensamble	27
Figura 12. Hornos	28
Figura 13. Selección y Empaque.....	30
Figura 14. Centro de Distribución	30
Figura 15. Visita a Industria Cerámica en Colombia.....	31
Figura 16. Esquema de la mezcla asfáltica	58
Figura 17. Montaje ensayo leyes de fatiga.	65
Figura 18. Escala de tamaños	68
Figura 19. Eras geológicas de la tierra.....	69
Figura 20. Deformaciones bajo cargas repetidas	70
Figura 21 Módulo dinámico (ángulo o tiempo de desfase)	72
Figura 22. Nomograma de Van der Pöel.	73
Figura 23. Nomograma de Heukelom y gráfico de alargamiento a la rotura	74
Figura 24. Nomograma de Bonnaure (Shell).....	75
Figura 25. Esquema general del ensayo del módulo dinámico.....	80
Figura 26. Ejemplo de construcción de curvas maestras	82
Figura 27. Pulso de Tiempo vs Espesor Pavimento.....	88
Figura 28. Diagrama Black.....	89
Figura 29. Diagrama cole-cole.....	89
Figura 30. Shift factor ejemplo.....	90

Figura 31. Parámetros de Solver en microsoft excel.....	90
Figura 32. Ejemplo de curva maestra.....	91
Figura 33. Metodología.....	96
Figura 34. Ubicación de Valencia en mapa de España.....	106
Figura 35. Ubicación cartográfica de la cantera.....	107
Figura 36. Mapa Geológico Liria Hoja 695 España.....	108
Figura 37. Mapa Geológico Planta Castellón cerámica.....	109
Figura 38. Micro imágenes árido español.....	110
Figura 39. Espectro de rayos MEB en árido de España.....	111
Figura 40. Micro imágenes Residuo Cerámico de España.....	112
Figura 41. Espectro de Rayos en el MEB Cerámica Española.....	113
Figura 42. Formula del trabajo mezcla asfáltica Patrón.....	115
Figura 43. Representación de la gráfica de Fuller fórmula de trabajo MAC Patrón (España) ..	116
Figura 44. Fórmula de trabajo MAC con 30% cerámica.....	118
Figura 45. Representación de la Gráfica de Fuller.....	119
Figura 46. Fórmula de trabajo de MAC con inclusión de 35% de cerámica (España).....	121
Figura 47. Representación de la Gráfica de Fuller.....	122
Figura 48. Fórmula de Trabajo MAC con inclusión de 40% cerámica (España).....	124
Figura 49. Huecos Mezcla vs Ligante de la MAC Patrón.....	127
Figura 50. Densidad vs Ligante de la MAC Patrón.....	127
Figura 51. Relación Llenante/Ligante vs Ligante MAC Patrón.....	128
Figura 52. Huecos en Áridos vs Ligante MAC Patrón.....	128
Figura 53. Estabilidad vs Ligante MAC Patrón.....	129
Figura 54. Deformación o Flujo vs Ligante MAC Patrón.....	129
Figura 55. Densidad vs Ligante de la MAC 30% cerámica.....	131
Figura 56. Huecos Mezcla % vs Ligante MAC 30% cerámica.....	132
Figura 57. Relación Filler/Betún vs Ligante MAC 30% cerámica.....	132
Figura 58. Huecos en Áridos % vs Ligante MAC 30% cerámica.....	133
Figura 59. Estabilidad Marsahll vs Ligante MAC 30% cerámica.....	133
Figura 60. Deformación vs Ligante MAC 30% cerámica.....	134
Figura 61. Densidad vs Ligante MAC 35% cerámica.....	136
Figura 62. Huecos Mezcla % vs Ligante MAC 35% cerámica.....	136

Figura 63. Relación Filler/Betún vs MAC 35% cerámica.....	137
Figura 64. Huecos áridos % vs Ligante MAC 35% cerámica	137
Figura 65. Estabilidad Marshall vs Ligante MAC 35% cerámica	138
Figura 66. Deformación vs Ligante MAC 35% Cerámica	138
Figura 67. Curvas de módulos dinámicos vs Temperaturas MAC Patrón España	143
Figura 68. Curvas de módulos dinámicos vs Temperaturas MAC 30% cerámica.....	144
Figura 69. Curvas de Módulos Dinámicos vs Frecuencias o Temperaturas MAC 35% cerámica	145
Figura 70. Gráficas de comprobación de la construcción de las curvas maestras MAC Patrón (España).....	150
Figura 71. Curva maestra MAC Patrón 10°C España	156
Figura 72 Curva maestra MAC Patrón 20°C (España).....	158
Figura 73. Curva maestra MAC Patrón 30°C (España).....	160
Figura 74. Curva maestra MAC Patrón 40°C (España).....	162
Figura 75. Gráficas de comprobación de la construcción de las curvas maestras MAC 30% cerámica (España)	166
Figura 76. Curva maestra MAC 30% cerámica 10°C (España)	172
Figura 77. Curva maestra MAC 30% cerámica 20°C (España)	174
Figura 78. Curva maestra MAC 30% cerámica 30°C (España)	176
Figura 79. Curva maestra MAC 30% cerámica 40°C (España)	178
Figura 80. Gráficas de comprobación de la construcción de las curvas maestras MAC 35% cerámica (España)	182
Figura 81. Curva maestra MAC 35% cerámica 10°C (España)	188
Figura 82. Curva maestra MAC 35% cerámica 20°C (España)	190
Figura 83. Curva maestra MAC 35% cerámica 30°C (España)	192
Figura 84. Curva maestra MAC 35% cerámica 40°C (España)	194
Figura 85. Coeficiente a1, en función del módulo de elasticidad del concreto asfáltico	197
Figura 86. Variación del Coeficiente a2, con diferentes parámetros de resistencia de la base granular	199
Figura 87. Nomograma de diseño para Pavimentos Flexibles	201
Figura 88. Ubicación de Bucaramanga en Santander Colombia	223
Figura 89. Ubicación cartográfica de la cantera Pescadero construcciones Sánchez SA.....	223
Figura 90. Geología fuente Pescadero en Santander, Colombia (Agregado).....	225

Figura 91. Geología de Cúcuta, Norte de Santander, Colombia (Ubicación de Arcilla)	226
Figura 92. Micro-imagen agregado de Pescadero (Colombia)	227
Figura 93. Espectro de rayos MEB agregado de Colombia	228
Figura 94. Micro-imágenes residuos de cerámica triturada colombiana	229
Figura 95. Espectro de rayos MEB de cerámica colombiana	230
Figura 96. Formula del trabajo mezcla asfáltica Patrón (Colombia)	232
Figura 97. Representación de la gráfica de Fuller fórmula de Trabajo (Colombia)	232
Figura 98. Fórmula de trabajo MAC con 30% Cerámica (Colombia)	235
Figura 99. Gráfica de Fuller fórmula de trabajo MAC 30% cerámica (Colombia)	235
Figura 100. Fórmula de Trabajo de MAC con inclusión de 35% de cerámica	238
Figura 101. Gráfica de Fuller Fórmula de Trabajo MAC 35% Cerámica	238
Figura 102. Fórmula de Trabajo MAC con reemplazo de 40% de triturado de cerámica	241
Figura 103. Densidad vs Asfalto de la MAC Patrón	243
Figura 104. Vacíos de Aire vs Asfalto de la MAC Patrón	244
Figura 105. Relación llenante/asfalto vs Asfalto MAC Patrón	244
Figura 106. Vacíos de Agregado Mineral vs Asfalto MAC Patrón	245
Figura 107. Estabilidad vs Asfalto MAC Patrón	245
Figura 108. Deformación o Flujo vs Ligante MAC Patrón.....	246
Figura 109. Densidad vs Asfalto de la MAC 30% cerámica	247
Figura 110. Vacíos Mezcla % vs Asfalto MAC 30% cerámica.....	248
Figura 111. Relación Filler/Betún vs asfalto MAC 30% cerámica.....	248
Figura 112. Vacíos en agregado mineral % vs asfalto MAC 30% cerámica	249
Figura 113. Estabilidad Marshall vs asfalto MAC 30% cerámica.....	249
Figura 114. Flujo vs asfalto MAC 30% cerámica.....	250
Figura 115. Densidad vs Ligante MAC 35 cerámica.....	252
Figura 116. Vacíos de aire mezcla % vs asfalto MAC 35% cerámica	252
Figura 117. Relación Filler/Betún vs MAC 35% cerámica.....	253
Figura 118. Vacíos de agregado mineral % vs asfalto MAC 35% cerámica	253
Figura 119. Estabilidad Marshall vs asfalto MAC 35% cerámica	254
Figura 120. Deformación vs ligante MAC 35% cerámica.....	254
Figura 121. Curvas de Módulos Dinámicos vs Frecuencias y Temperaturas MAC Patrón.....	259
Figura 122. Módulo dinámico vs Frecuencias y Temperatura MAC 30% cerámica (Colombia)	260

Figura 123. Curvas de Módulos Dinámicos vs Frecuencias y Temperaturas MAC 35% Cerámica	261
Figura 124. Gráficas de comprobación para construcción de la curva maestra (Colombia)	266
Figura 125. Curva maestra MAC Patrón 10°C (Colombia).....	272
Figura 126. Curva maestra MAC Patrón 20°C (Colombia).....	274
Figura 127. Curva Maestra MAC Patrón 30°C (Colombia)	276
Figura 128. Curva maestra MAC Patrón 40°C (Colombia).....	278
Figura 129. Gráficas de comprobación de la construcción de las curvas maestras MAC 30% cerámica (Colombia)	283
Figura 130. Curva maestra MAC 30% cerámica 10°C (Colombia)	289
Figura 131. Curva maestra MAC 30% cerámica 20°C (Colombia)	291
Figura 132. Curva maestra MAC 30% cerámica 30°C (Colombia)	293
Figura 133. Curva maestra MAC 30% cerámica 40°C (Colombia)	295
Figura 134. Gráficas de comprobación de la construcción de las curvas maestras MAC 35% cerámica (Colombia)	299
Figura 135. Curva maestra MAC 35% cerámica 10°C (Colombia)	305
Figura 136. Curva maestra MAC 35% cerámica 20°C (Colombia)	307
Figura 137. Curva maestra 30°C MAC 35% cerámica (Colombia)	309
Figura 138. Curva maestra MAC 35% cerámica 40°C (Colombia)	311
Figura 139. Coeficiente a1, en función del módulo resiliente o dinámico del concreto asfáltico	314
Figura 140. Variación del Coeficiente a2, con diferentes parámetros de resistencia de la base granular	316
Figura 141. Variación del Coeficiente a3 con diferentes parámetros de resistencia de la subbase granular	316
Figura 142. Nomograma de diseño para Pavimentos Flexibles	318
Figura 143. Comparación Sensibilidad al agua MAC España.....	337
Figura 144. Comparativo entre Módulos Dinámicos en diferentes tipos de mezclas, temperaturas y frecuencias España.	339
Figura 145. Variaciones de los Espesores de las Estructuras con relación a la Patrón (España)	342
Figura 146. Comparación Sensibilidad al agua MAC Colombia.....	344
Figura 147. Comparación del Módulo Dinámico MAC de Colombia.....	345
Figura 148. Variación del espesor Total con MAC modificadas vs MAC Patrón	348

Figura 149. Masa normalizada de los elementos químicos del MEB.....	349
Figura 150. Comparación Módulos MAC Patrón España-Colombia.....	352
Figura 151. Comparación Módulos MAC 30% Cerámica España-Colombia.....	355
Figura 152. Comparación de Módulos MAC 35% Cerámica España-Colombia.....	358
Figura 153. Tendencias módulos dinámicos de las diferentes MAC.....	360
Figura 154. Línea de tiempo residuo cerámico incluido en MAC	364
Figura 155. Carretera CV-170 cerca de Atzeneta, España	370

Índice de Tablas

Tabla 1. Categoría de Tráfico Pesado de acuerdo con el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG3)	32
Tabla 2. Husos Granulométricos Cernido Acumulado (% en masa).....	34
Tabla 3. Partículas Trituradas en árido grueso.....	35
Tabla 4. Partículas Redondeadas en árido grueso	35
Tabla 5. Índice de lajas de árido grueso	36
Tabla 6. Coeficiente de Los Ángeles en el árido grueso.....	36
Tabla 7. Coeficiente de Los Ángeles en el árido fino.....	37
Tabla 8. Tipo de Betún en capa de Rodadura y siguientes	38
Tabla 9. Categoría de Tráfico Pesado En Capa de Base bajo otras Dos	39
Tabla 10. Tipos de Mezcla Categoría de Tráfico Pesado	39
Tabla 11. Dotación mínima del betún en porcentaje en masa incluido el llenante.....	40
Tabla 12. Niveles de Tránsito para Carreteras	40
Tabla 13. Requisitos de los Agregados para Mezclas Asfálticas en Caliente de Gradación Continua	41
Tabla 14. Franja Granulométrica para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua en estudio.....	42
Tabla 15. Clasificación del cemento asfáltico de acuerdo con índice de penetración.....	49
Tabla 16. Especificaciones requeridas para el cemento asfáltico.....	51
Tabla 17. Contenido de Huecos en Mezcla	53
Tabla 18. Pendiente media de deformación en pista (WTS Aire) y profundidad media (expresado en %) de la rodadura (PRDAIRE) en el intervalo de 5 000 a 10 000 ciclos para capas de rodadura e intermedia.	53
Tabla 19. Criterios para el diseño preliminar de mezclas asfálticas en caliente de gradación continua método Marshall.....	60
Tabla 20. Requisitos de la verificación del diseño Marshall.....	61
Tabla 21. Tiempo estabilización de la muestra	81
Tabla 22. Frecuencias y número de ciclos.....	82
Tabla 23. Modelos para Construcción de Curvas Maestras.....	86
Tabla 24. Nomenclatura para mezclas semidensas en España y Colombia.....	97
Tabla 25. Caracterización de áridos de la fuente Cheste	103

Tabla 26. Granulometría de árido Cheste (% que Pasa)	104
Tabla 27. Husos granulométricos AC22S.....	104
Tabla 28. Caracterización del Betún.....	104
Tabla 29. Caracterización del residuo cerámico triturado proveniente de Castellón, España .	105
Tabla 30. Granulometría Triturado Cerámico (% que Pasa).....	106
Tabla 31. Resumen de la Fórmula de Trabajo AC 22 BIN 35/50 S.....	114
Tabla 32. Fórmula de Trabajo MAC con inclusión de 30% de triturado de cerámica	117
Tabla 33. Fórmula de trabajo de MAC con inclusión de 35% de triturado de cerámica.....	120
Tabla 34. Fórmula de trabajo de MAC con inclusión de 40% de triturado de cerámica.....	123
Tabla 35. Resultados Diseño MAC Patrón.....	126
Tabla 36. Parámetros del Diseño MAC Patrón Mercado CE	130
Tabla 37. Parámetros del Diseño MAC Patrón Confirmación Marshall	130
Tabla 38. Resultados diseño MAC 30% cerámica.....	131
Tabla 39. Parámetros del diseño AC 22 Bin S 30% cerámica – Mercado “CE”	134
Tabla 40. Parámetros AC 22 Bin S 30% cerámica – Confirmación Marshall	135
Tabla 41. Resultados diseño MAC 35% cerámica.....	135
Tabla 42. Parámetros del Diseño AC 22 Bin S 35% Cerámica – Mercado “CE”	139
Tabla 43. Parámetros AC 22 Bin S 35% Cerámica – Confirmación Marshall.....	139
Tabla 44. Datos de ensayo de módulos dinámicos MAC Patrón (España).....	146
Tabla 45. Coeficientes para construcción de la curva maestra con diferentes temperaturas de referencia	148
Tabla 46. Módulos calculados MAC Patrón 10°C (España)	151
Tabla 47. Módulos calculados MAC Patrón 20°C (España)	152
Tabla 48. Módulos calculados MAC Patrón 30°C (España)	153
Tabla 49 Módulos calculados MAC Patrón 40°C (España)	154
Tabla 50. Módulo dinámico calculado MAC Patrón 10°C España	155
Tabla 51. Módulo dinámico calculado MAC Patrón 20°C (España).....	157
Tabla 52. Módulos dinámico MAC Patrón 30°C.....	159
Tabla 53. Módulo dinámico calculado MAC Patrón 40°C	161
Tabla 54. Datos del ensayo de módulo dinámico MAC 30% cerámica (España)	163
Tabla 55. Coeficientes para construcción de la curva maestra con diferentes temperaturas de referencia	164

Tabla 56. Módulos calculados MAC 30% cerámica 10°C (España).....	167
Tabla 57. Módulos calculados MAC 30% cerámica 20°C (España).....	168
Tabla 58. Módulos calculados MAC 30% cerámica 30°C (España).....	169
Tabla 59. Módulos calculados MAC 30% cerámica 40°C (España).....	170
Tabla 60. Módulo dinámico calculado MAC 30% cerámica 10°C (España).....	171
Tabla 61. Módulo dinámico calculado MAC 30% cerámica 20°C (España).....	173
Tabla 62. Módulo dinámico calculado MAC 30% cerámica 30°C (España).....	175
Tabla 63. Módulo dinámico calculado MAC 30% cerámica 40°C (España).....	177
Tabla 64. Datos de ensayo módulos dinámicos MAC 35% cerámica (España).....	179
Tabla 65. Coeficientes para construcción de la curva maestra con diferentes temperaturas de referencia MAC 35% cerámica (España).....	180
Tabla 66. Módulos calculados MAC 35% cerámica 10°C (España).....	183
Tabla 67. Módulos calculados MAC 35% cerámica 20°C (España).....	184
Tabla 68. Módulos calculados MAC 35% cerámica 30°C (España).....	185
Tabla 69. Módulos calculados MAC 35% cerámica 40°C (España).....	186
Tabla 70. Módulo dinámico calculado MAC 35% cerámica 10°C (España).....	187
Tabla 71. Módulo dinámico calculado MAC 35% cerámica 20°C (España).....	189
Tabla 72. Módulo dinámico calculado MAC 35% cerámica 30°C (España).....	191
Tabla 73. Módulo dinámico calculado MAC 35% cerámica 40°C (España).....	193
Tabla 74. Parámetros de Diseño Estructura de Pavimento en España.....	195
Tabla 75. Resumen generación del coeficiente a1 MAC España.....	198
Tabla 76. Frecuencia vs Velocidad.....	200
Tabla 77. Diseño de la estructura de pavimento con MAC ACBIN 22 S Patrón temperatura de 10°C (España).....	202
Tabla 78. Diseño estructural de pavimento con MAC Patrón temperatura de 20°C (España) .	203
Tabla 79. Diseño Estructura de Pavimento con MAC Patrón Temperatura de 30°C (España) .	204
Tabla 80. Diseño Estructura de Pavimento con MAC Patrón Temperatura de 40°C (España) .	205
Tabla 81. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 30% cerámica Temperatura de 10°C (España).....	206
Tabla 82. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 30% cerámica Temperatura de 20°C (España).....	207
Tabla 83. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 30% cerámica Temperatura de 30°C (España).....	208

Tabla 84. Diseño estructural de pavimento con MAC 30% cerámica temperatura de 40°C(España)	209
Tabla 85. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 35% cerámica Temperatura de 10°C(España)	210
Tabla 86. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 35% cerámica Temperatura de 20°C(España)	211
Tabla 87. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 35% cerámica Temperatura de 30°C(España)	212
Tabla 88. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 35% cerámica Temperatura de 40°C (España)	213
Tabla 89. Análisis de precio unitario MAC Patrón (España)	215
Tabla 90. Análisis de Precios Unitarios para MAC 30% Cerámica (España)	216
Tabla 91. Análisis de Precios Unitarios para MAC 35% Cerámica (España)	217
Tabla 92. Caracterización de los agregados de la fuente Pescadero	219
Tabla 93. Granulometría del agregado de Pescadero (% que Pasa)	220
Tabla 94. Franjas Granulométricos MSC25	220
Tabla 95. Caracterización del cemento asfáltico	221
Tabla 96. Caracterización del residuo de cerámica proveniente de Cúcuta, Colombia	222
Tabla 97. Resumen de la fórmula de trabajo MSC-25 Patrón (Colombia)	231
Tabla 98. Fórmula de Trabajo MAC con inclusión de 30% de triturado de cerámica (Colombia)	234
Tabla 99. Fórmula de Trabajo de MAC con inclusión de 35% de triturado cerámica	237
Tabla 100. Fórmula de trabajo para MAC con triturado cerámica al 40%	240
Tabla 101. Resultados Diseño MAC Patrón	243
Tabla 102. Diseño MAC MSC25 Patrón - INVIAS	246
Tabla 103. Verificación MAC MSC Patrón INVIAS	246
Tabla 104. Resultados Diseño MAC 30% Cerámica	247
Tabla 105. Parámetros MSC25 30% cerámica – Confirmación Marshall	250
Tabla 106. Verificación MAC MSC 30% Cerámica INVIAS	251
Tabla 107. Resultados Diseño MAC 35% cerámica (Colombia)	251
Tabla 108. Diseño MAC MSC25 35% cerámica - INVIAS	255
Tabla 109. Verificación MAC MSC 35% Cerámica INVIAS	255
Tabla 110. Datos del Ensayo Módulo Dinámico MAC Patrón (Colombia)	263

Tabla 111. Coeficientes para Construcción de la Curva Maestra con diferentes temperaturas de referencia	264
Tabla 112. Módulo dinámico calculado para curva maestra MAC Patrón temperatura de referencia 10°C (Colombia)	267
Tabla 113. Módulo dinámico calculado para curva maestra MAC Patrón temperatura de referencia 20°C (Colombia)	268
Tabla 114. Módulo dinámico calculado para curva maestra MAC Patrón temperatura de referencia 30°C (Colombia)	269
Tabla 115. Módulo dinámico calculado para curva maestra MAC Patrón temperatura de referencia 30°C (Colombia)	270
Tabla 116. Datos Curva Maestra MAC Patrón 10°C (Colombia)	271
Tabla 117. Datos Curva Maestra MAC Patrón 20°C (Colombia)	273
Tabla 118. Datos curva maestra MAC Patrón 30°C (Colombia)	275
Tabla 119. Datos curva maestra MAC Patrón 40°C (Colombia)	277
Tabla 120. Datos del ensayo módulo dinámico MAC 30% cerámica (Colombia).....	280
Tabla 121. Coeficientes para construcción de curvas maestras MAC 30% cerámica para diferentes temperaturas de ensayo (Colombia)	281
Tabla 122. Módulo dinámico calculado para curva maestra MAC 30% cerámica temperatura de referencia 10°C (Colombia)	284
Tabla 123. Módulo dinámico calculado para curva maestra MAC 30% cerámica temperatura de referencia 20°C (Colombia)	285
Tabla 124. Módulo dinámico calculado para curva maestra MAC 30% cerámica temperatura de referencia 30°C (Colombia)	286
Tabla 125. Módulo dinámico calculado para curva maestra MAC 30% cerámica temperatura de referencia 40°C (Colombia)	287
Tabla 126. Datos curva maestra MAC 30% cerámica 10°C (Colombia).....	288
Tabla 127. Datos curva maestra MAC 30% cerámica 20°C (Colombia).....	290
Tabla 128. Datos curva maestra MAC 30% cerámica 30°C (Colombia).....	292
Tabla 129. Datos Curva maestra MAC 30% cerámica 40°C (Colombia)	294
Tabla 130. Datos ensayo de módulo dinámico MAC 35% cerámica (Colombia)	296
Tabla 131. Shift Factor y Coeficientes MAC 35% Cerámica para diferentes temperaturas (Colombia).....	297
Tabla 132. Módulo dinámico calculado para curva maestra MAC 35% cerámica temperatura de referencia 10°C (Colombia)	300

Tabla 133. Módulo dinámico calculado para curva maestra MAC 35% cerámica temperatura de referencia 20°C (Colombia)	301
Tabla 134. Módulo dinámico calculado para curva maestra MAC 35% cerámica temperatura de referencia 30°C (Colombia)	302
Tabla 135. Módulo dinámico calculado para curva maestra MAC 35% cerámica temperatura de referencia 40°C (Colombia)	303
Tabla 136. Datos curva maestra MAC 35% cerámica 10°C (Colombia).....	304
Tabla 137. Datos Curva maestra MAC 35% cerámica 20°C (Colombia)	306
Tabla 138. Datos Curva maestra MAC 35% cerámica 30°C (Colombia)	308
Tabla 139. Datos Curva maestra 40°C MAC 35% cerámica (Colombia)	310
Tabla 140. Parámetros de diseño estructural de pavimento en Colombia	312
Tabla 141. Resumen generación del coeficiente a1 MAC Colombia.....	315
Tabla 142. Frecuencia vs Velocidad	317
Tabla 143. Diseño estructural de pavimento con MAC Patrón Temperatura de 10°C (Colombia)	319
Tabla 144. Diseño estructural de pavimento con MAC Patrón temperatura de 20°C (Colombia)	320
Tabla 145. Diseño estructural de pavimento con MAC Patrón temperatura de 30°C (Colombia)	321
Tabla 146. Diseño estructural de pavimento con MAC Patrón temperatura de 40°C (Colombia)	322
Tabla 147. Diseño estructural de pavimento con MAC 30% cerámica temperatura de 10°C (Colombia).....	323
Tabla 148. Diseño estructural de pavimento con MAC 30% cerámica temperatura de 20°C (Colombia).....	324
Tabla 149. Diseño estructural de pavimento con MAC 30% cerámica temperatura de 30°C (Colombia).....	325
Tabla 150. Diseño estructural de pavimento con MAC 30% cerámica temperatura de 40°C (Colombia).....	326
Tabla 151. Diseño estructural de pavimento con MAC 35% cerámica temperatura de 10°C (Colombia).....	327
Tabla 152. Diseño estructural de pavimento con MAC 35% cerámica temperatura de 20°C (Colombia).....	328
Tabla 153. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 35% cerámica Temperatura de 30°C (Colombia).....	329

Tabla 154. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 35% cerámica Temperatura de 40°C (Colombia).....	330
Tabla 155. Análisis de precios unitarios MAC Patrón (Colombia).....	333
Tabla 156. Análisis de Precios Unitarios para MAC 30% Cerámica (Colombia)	334
Tabla 157. Análisis de Precios Unitarios para MAC 35% Cerámica (Colombia)	335
Tabla 158. Comparación MAC de España	337
Tabla 159. Disminución Módulo Dinámico entre 10°C y 40°C	340
Tabla 160. . Espesores totales de la estructura y sus variaciones (España).....	340
Tabla 161. Variaciones de los espesores con respecto a MAC Patrón (España).....	341
Tabla 162. Comparación MAC de Colombia.....	344
Tabla 163. Variación de Módulo Dinámico entre 10°C y 40°C (Colombia)	346
Tabla 164. Espesores de las Capas de las Estructuras de Pavimento diseñadas para cada MAC	347
Tabla 165. Espesores Totales de la Estructura y sus Variaciones (Colombia).....	347
Tabla 166. Disminución de los Módulos entre 10C° y 40°C de España y Colombia	358

1. Antecedentes

El presente trabajo de investigación se presenta como Tesis Doctoral de la alumna Norma Cristina Solarte Vanegas y está dirigida por el Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos y Catedrático de Universidad, Prof. Dr. Alfredo García García, de la Universitat Politècnica de València (UPV), España, líder del Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC), y por la Doctora Ingeniera Civil, Docente titular Dra. María Fernanda Serrano Guzmán, de la Pontificia Universidad Javeriana (PUJ), Colombia, Docente ocasional de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), Colombia, y líder del Grupo de Investigación en Detección y Remedación de Contaminantes (DeCoR), interinstitucional entre la UPB y la PUJ.

El título de la investigación es *“Efecto en el módulo dinámico de la mezcla asfáltica modificada con añadido de residuos triturados de la industria cerámica”*. Este responde al principal objetivo de la Tesis Doctoral y proporciona una importante contribución a la literatura existente en el campo del reciclado de residuo cerámico en las mezclas asfálticas para carreteras y la evaluación del comportamiento del esfuerzo y deformación a varias temperaturas.

Este trabajo ha sido realizado en colaboración directa con el Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC), perteneciente al Instituto del Transporte y Territorio de la UPV y el laboratorio de Caminos de la UPV, con el Grupo de Investigación en Detección y Remedación de Contaminantes (DeCoR), perteneciente a la UPB y la PUJ, al cual el doctorando pertenece desde mayo de 2010.

En febrero de 2017, se firmó un Convenio de Cooperación para Cotutela de tesis Doctoral entre la UPV y UPB, por medio de la cual el doctorando realizó:

- Estancia de Investigación, por tres (3) meses, entre noviembre de 2017 y enero de 2018.
- Estancia de Investigación, por tres (3) meses, entre noviembre de 2019 y enero de 2020 desarrolladas principalmente en el laboratorio de Caminos de la UPV, España.
- Estancia de Investigación, por seis (6) meses, entre septiembre de 2018 y mayo de 2019, en la UPB.

Las dos primeras estancias se llevaron a cabo principalmente en el laboratorio de Caminos de la UPV, España, bajo la tutela del Prof. Dr. Alfredo García García. En la primera se elaboraron los diseños de mezcla asfáltica en caliente (MAC) convencional y modificada con el triturado cerámico y en la segunda se construyeron las probetas y se realizaron los ensayos de módulos dinámicos de las diferentes mezclas, todo cumpliendo los Pliegos de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) de España.

La tercera estancia se realizó en la ciudad de Bucaramanga, en el laboratorio de Ingeniería Civil de la UPB, Colombia, bajo la tutela de la Dra. María Fernanda Serrano Guzmán. El objetivo de esta estancia fue desarrollar el mismo diseño experimental realizado en España, pero bajo las Especificaciones Técnicas de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) de Colombia.

La necesidad de buscar soluciones reales para la mitigación del volumen de los desechos industriales ha ido ganando relevancia a través del tiempo. Particularmente, el

aprovechamiento de los residuos industriales cerámicos de gres y porcelánico de forma parcial como áridos dentro de una MAC empezó a estudiarse hace más de 12 años en el GIIC de la UPV.

Con el proyecto *“Investigación aplicada al diseño y caracterización de mezcla bituminosa en caliente con material cerámico como árido fino y grueso”*, financiado con la ayuda del IMPIVA (nº de expediente IMIDTF/2009/22), la empresa BECSA S.A., con la colaboración del GIIC de la UPV, estudió que la aportación de árido cerámico en una MAC intermedia podría llegar al 50% del total.

Ya en el año 2010, el Grupo de investigación en Ingeniería de Carreteras, GIIC, del Instituto de Transporte y Territorio, ITRAT, de la Universidad Politécnica de Valencia, fue contratado por BECSA S.A. para desarrollar el proyecto *“Aprovechamiento de residuos cerámicos en las mezclas bituminosas en caliente como sustitutivo parcial de los áridos naturales, de origen calizo en capas de base e intermedias, y de los áridos de origen silíceo en capas de rodadura”*, proyecto que posteriormente recibió subvención para BECSA con el expediente IMIDTF/2011/56. Este estudio reveló que un MAC con una aportación de residuo cerámico de 30%, tenía valores favorables para su uso en carreteras con categoría de tráfico pesado T3 y T4 o en arcenes de acuerdo al Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) (Ministerio de Fomento, 2015). En ese mismo año, la empresa BECSA construyó un tramo experimental en la carretera CV-170, cerca de la población de Atzeneta, España, con una capa de rodadura, denominada AC16Surf, con materiales cerámicos reciclados en un tramo de 1200 m, y se abrió al tráfico el 28 de abril de 2010. Después, en febrero del 2011, la empresa BECSA realizó una campaña de auscultación para determinar la afección del tráfico sobre la misma. Aunque *“a priori”* los resultados de los valores de Coeficiente de Pulimento Acelerado, CPA, para las mezclas de áridos estudiadas no cumplen el criterio establecido en el PG-3 sobre valores de CPA para capas de rodadura con niveles de tráfico T1 a T31, los coeficientes obtenidos en las mezclas tipo 2 (15% árido cerámico reciclado) y tipo 3 (31% árido cerámico reciclado) no alcanzan los valores satisfactorios.

Ya en el año 2014, se realizó un trabajo fin de máster, TFM, por parte de Esther Medel, denominado *“Aplicación del análisis del ciclo de vida, ACV, de las mezclas bituminosas en caliente con áridos cerámicos”* en la UPV. En este caso se aplicó solo a mezclas de rodadura y el análisis del ciclo de vida, ACV, permitió determinar que los costes de administración de la mezcla con cerámico son muy inferiores a los de la mezcla convencional. También, se encontró que se hace necesario aumentar el estudio experimental y profundizar en el comportamiento real de las mezclas, estudiar sobre su durabilidad, reciclabilidad y determinar la categoría de tráfico para la cual sería empleada. El estudio muestra que las emisiones producidas por la colocación de una mezcla con reemplazo de cerámicos arrojan un 6,5% menos emisiones que las mezclas convencionales.

Esta Tesis de doctorado implica una continuidad y una consolidación de esta línea investigación, el aprovechamiento de residuos industriales de tipo cerámico incluidos en MAC para mitigar la problemática de la gestión de residuos, así como también profundizar en el estudio de desempeño de las mezclas.

De igual manera en la República de Colombia, en la Universidad Pontificia Bolivariana, se inició en el año 2016, una serie de proyectos de grado desarrollados por estudiantes de la Facultad de

Ingeniería Civil con el fin de verificar como pruebas piloto la posibilidad de uso del residuo de cerámica producido en el departamento de Norte de Santander y aprender el manejo de los equipos. En estos proyectos se pretendían establecer su viabilidad técnica, por medio de ensayos de laboratorio básicos. Surge entonces el desarrollo de una tesis de maestría denominada *“Factibilidad técnica de una mezcla asfáltica en caliente modificada con residuo cerámico”*, encontrando que puede ser recomendable el uso de residuo cerámico como reemplazo de agregado natural.

2. Introducció

Para la Ingeniería de Carreteras es muy importante consolidarse en construcciones sostenibles, mediante la reincorporación de materiales que pueden ser aprovechados de procesos industriales e incentiven el reuso y reciclado para la disminución de costos en la construcción de facilidades viales. Con este concepto se logra disminuir el consumo de materias primas vírgenes, la reducción de impactos ambientales y en la salud, hechos que se constituyen en el reto verdadero de las empresas y gobiernos: fomentar con soporte técnico la aplicación de las innovaciones.

Esto logrará un crecimiento económico, una mayor competitividad y la incursión en nuevos mercados. Así, se favorece la economía circular y el consumo sostenible, además que se hace un uso eficiente de los recursos, pues hay mayor beneficio en el flujo de materiales, hay una reducción de costos y se generan oportunidades económicas al mismo tiempo que se logra una reducción de gases de efecto invernadero, GEI.

Esto es motivo para que se desarrollen investigaciones que estudien los fundamentos que permitan validar el uso de los nuevos materiales en la construcción de las carreteras.

La industria de la construcción tanto en Europa como en América produce grandes cantidades de Residuos generados en las actividades de construcción y demolición – RCD. En España, el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, y tiene por objeto *establecer el régimen jurídico de la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, con el fin de fomentar, por este orden, su prevención, reutilización, reciclado y otras formas de valorización, asegurando que los destinados a operaciones de eliminación reciban un tratamiento adecuado, y contribuir a un desarrollo sostenible de la actividad de construcción*. El decreto contempla el uso de residuos en plantas de fabricación de mezclas bituminosas. La federación española de gestores de residuos de construcción y demolición indicó que, en el año 2011, España produjo 13.463.609 toneladas de RCD. Así mismo, de acuerdo a la Resolución No. 0472 del 28 de febrero del 2017, expedido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible informa que en Colombia en el año 2011 se produjeron 22.270.338 toneladas de RCD lo cual motivó a que el Gobierno de Colombia reglamentara sobre la gestión integral de residuos generados por la industria de la construcción. El Estado busca proteger, prevenir, controlar y planificar la diversidad, integridad y aprovechamiento de los recursos naturales con el fin de conservarlos, para garantizar el derecho que todas las personas a gozar de un ambiente sano mediante el reciclaje que permite que los RCD se transformen en materia prima o insumos para la producción de nuevos materiales de construcción o la reutilización de los mismos, que es la prolongación de la vida útil de los RCD recuperados, sin que para ellos se requiera un proceso de transformación.

El residuo que se utilizó en esta investigación fue el cerámico, producto del proceso de control de calidad llevado a cabo en los centros de producción. Si bien el cerámico industrial triturado es prácticamente el mismo obtenido en el proceso de construcción y demolición, obtenido en procesos de desperdicio. Lo que si debe tenerse cuidado es realizar la separación del residuo y no mezclar con otros desperdicios de construcción o demolición, con el fin de incorporarse en una MAC.

La tesis doctoral se ha organizado en once capítulos entre los que se cuentan los siguientes: El capítulo 1 tiene que ver con los antecedentes. Y el capítulo 2 corresponde a la introducción.

En el capítulo 3 se presenta la revisión y recopilación de los conocimientos existentes relacionados con el proceso industrial de obtención del residuo cerámico, las mezclas asfálticas en caliente y sus modificaciones, las normas de ensayo y especificaciones técnicas de construcción de carreteras relacionadas, especialmente en cuanto a ensayos especializados de módulos dinámicos de MAC y construcción de las curvas maestras de MAC.

Se hace un resumen de los diferentes estudios que se han realizado y qué resultados han obtenido hasta el momento, así como también se presenta los estudios relacionados con el uso del residuo cerámico en diferentes partes del mundo adicionados a mezclas asfálticas y mezclas hidráulicas, principalmente.

En el capítulo 4 se introducen el objetivo principal de la investigación y los objetivos técnicos asociados al objetivo principal. También se incluye en este capítulo las hipótesis que se rechazarán o se validarán con la Tesis doctoral. El capítulo 5 describe la metodología que se siguió en la ejecución de este trabajo de doctorado considerando los diseños de mezcla con las diferentes proporciones de cerámica incluidos, tanto en España como en Colombia, y posteriormente lo relacionado con los ensayos de módulo dinámico y la elaboración de curvas maestras. El capítulo 6 y el capítulo 7 explican el desarrollo de la investigación con los resultados obtenidos, los cuáles se comparan con las especificaciones técnicas de cada uno de los países. Ya el capítulo 8 se concentra en el análisis de cada uno de los resultados con el fin de confirmar o rechazar la posibilidad de usarlo de modo industrial en la construcción de pavimentos de carreteras. Los capítulos 9, 10 y 11 se enfocan en la discusión, conclusiones que se llegaron a obtener con base en el desarrollo de la tesis y se plasman las recomendaciones de nuevas tesis, nuevas investigaciones, nuevos proyectos de empresa–administración. Finalmente, se han insertado todas las referencias bibliográficas que se han consultado en el desarrollo de la presente tesis, la última parte se dedica a las oportunidades de visibilizar el desarrollo y resultados de la presente tesis doctoral.

3. Estado del arte

3.1 Pavimento para carreteras

El pavimento es una estructura compuesta por capas subyacentes superpuestas entre sí que van aumentando en calidad a medida que se acercan a la superficie. Estas capas son diseñadas con materiales apropiados y construidas con especificaciones técnicas establecidas dependiendo de las cargas de tránsito que deben soportar y de la vida útil para la cual se contempla su servicio.

Todas las estructuras de pavimento deben cumplir unas características para ofrecer satisfacción al usuario. Esas características son: resistente a los cambios climáticos, resistente a las cargas de tránsito, resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de los neumáticos, ser durable, ser económico en construcción y mantenimiento, poseer el color adecuado para evitar deslumbramientos y reflejos, poseer una textura adecuada de acuerdo con la velocidad del proyecto para ofrecer seguridad vial a los vehículos que circulan, entre otras.

Existen varios tipos de pavimentos, dependiendo de los materiales que lo constituyen, siendo los más usados los pavimentos flexibles, rígidos o de concreto hidráulico, semiflexibles o semirrígidos y los articulados.

El pavimento flexible, estudiado en esta tesis, obedece el nombre porque la estructura se acomoda a las deflexiones que se presenta en el terreno por el paso de los vehículos. La primera capa del pavimento se llama subrasante, que es el terreno de fundación, y sobre ella descansan las demás capas. De su calidad, depende el espesor de las capas superiores. Su deterioro se transmite progresivamente a las capas superiores ocasionando fallas de alta severidad.

La siguiente capa que descansa sobre la subrasante es la subbase granular, la cual es superior en calidad a la subrasante, y generalmente está en todos los tipos de pavimentos. Su función principal es constituirse en una capa de transición que impide la penetración de materiales que constituyen la base con los de la subrasante, actúa como filtro para evitar que la subrasante contamine la base. De esta manera también disminuye las deformaciones asociadas a los cambios de humedad de la subrasante, que pueden ser absorbidas por esta capa para evitar que afecten las capas superiores. Además, como los materiales empleados son de calidades medias y grandes espesores, la función económica es innegable.

Encima de la subbase se coloca la base granular, que tiene una calidad superior a esta y tiene varias alternativas, puede ser granular o estabilizada con la adición de materiales que le ayudan a aumentar su resistencia ocasionando la disminución del espesor a usar. Su resistencia debe ser tal que transmita a la subbase los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada. Los materiales son de mejor calidad que aquellos empleados en la subbase, pero de menor calidad que la carpeta. Y la capa superior corresponde al concreto asfáltico, el cual, dependiendo del tránsito, del clima, el tipo de mezcla y los criterios de diseño de mezcla serán diferentes. Su diseño dependerá de las pruebas de sensibilidad a la humedad y pruebas de rendimiento para mejorar el diseño de la mezcla. Su función principal es ofrecer una superficie de rodamiento, uniforme y estable al tránsito, de textura y color conveniente, resistente a los efectos de las cargas, y hasta donde sea posible debe impedir el paso del agua al interior del pavimento. Desde luego, la resistencia a la tensión es una variable determinante, entre otras. A

continuación, se observa el perfil de una estructura de pavimento flexible. Ver Figura 1 Estructura de Pavimento Flexible.



Figura 1 Estructura de Pavimento Flexible

Fuente: Propia

Por otro lado, los pavimentos de concreto hidráulico o rígidos están constituidos por la subrasante, la subbase granular y la losa de concreto, mientras que los semiflexibles o semirrígidos son una combinación de los dos tipos de pavimentos mencionados, generalmente, capas bituminosas sobre capas de concreto hidráulico o bases estabilizadas con cemento, inclusive pueden presentarse estructuras inversas en donde se construyen capas con materiales granulares sobre bases estabilizadas con cemento. Finalmente, los pavimentos articulados, son aquellos que en lugar de una losa de concreto o en lugar del concreto asfáltico y la base granular consideran una capa de arena que cumple ciertas especificaciones técnicas y de rodadura una capa de adoquines que deben colocarse siguiendo una configuración establecida por el diseñador.

Como se mencionó, es motivo de estudio el pavimento flexible y específicamente la capa correspondiente al concreto asfáltico, de ahí el contenido del siguiente apartado que corresponde a la mezcla asfáltica en caliente con el fin de conocer sus vertientes y características posibles que son básicas, pero que deben considerarse en nuestro caso del reciclaje del residuo cerámico.

3.2 Mezclas asfálticas en caliente, MAC

Para el estudio de las mezclas en caliente es indispensable consultar referencias bibliográficas que resumen los conceptos básicos que tienen que ver con el diseño de mezclas o concreto asfáltico. La primera de ellas es “Asphalt Mix Design Methods” del Asphalt Institute. A continuación, algunos extractos de esta.

3.2.1 Generalidades

Una mezcla asfáltica es la combinación de materiales pétreos, cemento asfáltico y otros que bajo ciertas cantidades y condiciones forman un concreto asfáltico que responde a unas especificaciones técnicas basadas en propiedades volumétricas, mecánicas e hidráulicas. Las cantidades de los materiales deben mantener una relación conveniente de costos para entrega de la mezcla en planta.

En esta tesis, el término “asfalto” se empleará para referirse al ligante asfáltico o al betún. Mientras que la mezcla de árido o agregado y ligante corresponde a la Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC), también conocida como Hot Mix Asphalt (HMA) o Asphalt Concrete (AC) en la literatura en inglés o firme como se usa en España.

La mezcla asfáltica como ya se mencionó está compuesta por gravas, agregado pétreo o áridos, de diferentes tamaños lo cual corresponde aproximadamente al 95% del total de la mezcla con un aproximado de 5% cemento asfáltico, el cual tiene la función de aglutinar los agregados para mantenerlos cohesionados transformando la mezcla en un concreto asfáltico cuando llega a temperatura ambiente. Además de estos materiales, de ser necesario, se pueden agregar aditivos para hacer un concreto con características especiales, por ejemplo, más resistente o menos susceptibles a los cambios de temperatura, adicionando fibras y logrando de esta forma un mejor comportamiento en cuestiones de viscosidad o también, si se requiere, es posible mejorar el comportamiento de conjunto de todos los materiales. En esta mezcla también se tiene muy en cuenta los vacíos de la mezcla que son llenados por el ligante asfáltico. Cuando el pavimento es sometido a las cargas de tránsito, el bajo porcentaje de vacíos ocasiona el rompimiento del concreto asfáltico y el exceso de vacíos ocasiona la oxidación por la penetración de agua y oxígeno.

Una mezcla asfáltica tiene como base el diseño volumétrico. Algunas de las funciones de la mezcla son (Roadtec, 2020):

- Proteger la subrasante, el terreno de apoyo o cimiento de la carretera,
- Soportar la carga vehicular, intensidad, frecuencia, composición del tránsito que usa las vías mediante el control del parámetro de estabilidad y flujo,
- Ofrecer seguridad al usuario, de modo que el conductor pueda transitar de forma segura con un diseño geométrico adecuado, sin baches y con fricción superficial suficiente para que no se deslice en una temporada de lluvias o de nieve,
- Ofrecer confort al usuario, facilidad con que se puede manejar en la carretera,
- Garantizar la durabilidad del pavimento, al establecer la cantidad de asfalto apropiada, por medio del control del contenido de vacíos máxima y así limitar la permeabilidad de aire y humedad,
- Ofrecer una mezcla trabajable para evitar la segregación.

Una vez se cuenta con el diseño de la mezcla asfáltica, esta se elabora en planta, se construye en carretera con una extendidora o con una terminadora de asfalto o pavimentadora. Dependiendo de la temperatura de la mezcla, si es tibia, caliente o fría, se mantienen las temperaturas de tendido y luego la de compactación que se hace con un rodillo, según patrón de compactación, hasta el espesor definido de densificación establecido en el proyecto, que va siendo controlada en su espesor y densidad, y lisura de su superficie.

Cuando se endurece, se enfría como un geomaterial constituyendo la capa superior de la estructura de un pavimento.

Cuando esta mezcla asfáltica es llamada de alto desempeño o de alto módulo presenta alguna de las siguientes condiciones:

- Resistente a las deformaciones plásticas: la mezcla se diseña para evitar el tema de las roderas o ahuellamiento.
- Resistente al fenómeno de la fatiga: resiste repeticiones de carga sin presentar una falla importante por agrietamiento o un compromiso estructural importante.
- Resistente al daño por humedad: cuando una mezcla se humedece con temperaturas altas hay una disminución de resistencia de la mezcla y no debe ser superior a un determinado porcentaje.

No existe una mezcla que tenga comportamiento óptimo en todas las variables o con resultados satisfactorios en todas las condiciones, sino que una mezcla asfáltica tendrá unas características de resistencia a la fatiga o resistente a la humedad y otra será resistente a la deformación plástica, etc. Con esta premisa, cuando se diseña un pavimento se busca la combinación de capas en donde cada una aporta a la estructura dependiendo de su grado de desempeño en determinado parámetro.

Resulta relevante conocer que una MAC tiene una respuesta cuando las cargas del tránsito actúan sobre ella, y se producen los siguientes esfuerzos:

- tensión de compresión vertical, en la parte superior
- tensión de corte dentro de la capa de asfalto y
- tensión horizontal en el fondo de la capa de asfalto. Para prevenir el agrietamiento por fatiga
- tensión en la parte superior de la capa de asfalto hacia abajo. Puede producirse por neumáticos radiales.

Es por eso que la mezcla debe tener una gran cohesión y ser resistente a las cargas de tránsito, para contrarrestar los esfuerzos de compresión y de cortante con el fin de prevenir la deformación permanente dentro de la mezcla.

La resistencia a la deformación permanente depende principalmente en la fricción interna proporcionada por los agregados y en menor medida por la cohesión proporcionada por el ligante asfáltico. La fricción entre los agregados está relacionada con la forma y textura superficial de tanto el agregado fino como el grueso y la gradación. La cohesión resulta de la capacidad de unión y la rigidez que posee el cementante asfáltico.

El grado de fricción y cohesión entre partículas en una mezcla evita que los agregados sean movidos unos a otros por las fuerzas ejercidas por el tráfico. El grado de fricción interna y la cohesión influye en la resistencia de una mezcla a la deformación permanente. Si el agregado es más angular las partículas con textura superficial más rugosa mejorarán la estabilidad de la mezcla. La cohesión aumenta a medida que aumenta la rigidez de la carpeta asfáltica o cuando la temperatura del pavimento disminuye.

3.2.2 Clasificación

La mezcla asfáltica se clasifica con base en varios factores, siendo la gradación de los agregados uno de ellos. La curva granulométrica incide en alto grado en el desempeño de la mezcla, tal vez es el factor más importante junto con el ligante, que es otra de las variables que permitirá una clasificación de la mezcla dependiendo de su dureza, y va a incidir principalmente en la resistencia de las MAC. Hay muchas otras divisiones como por ejemplo la temperatura, mezclas

en frío y mezclas en caliente o las ahora llamadas mezclas asfálticas sostenibles o verdes, que buscan reemplazar agregados por un residuo reciclado o reusar algún material, como la que se está estudiando en esta tesis. A continuación, se detallan las clasificaciones para mezclas asfálticas en caliente con base en los tamaños de los agregados (Asphalt Institute, 2014).

Según la gradación

Una mezcla asfáltica tiene agregados de tamaños grandes o gruesos, medios y finos, y dependiendo de la predominancia de estos tamaños, se considera una identificación para la mezcla:

- De granulometría continua o las simplemente llamadas, Hot Mix Asphalt, HMA, por sus siglas en inglés o mezclas bituminosas en caliente, MAC: incluyen partículas gruesas, intermedias y finas aproximadamente en la misma proporción. Bien gradada, es decir con todos los tamaños de agregados o material pétreo.
- Discontinua o de Salto, Stone Mastic Asphalt, SMA: construidas con partículas gruesas y finas, en los extremos de la curva granulométrica. No existen agregados de algunos tamaños en el centro. Así hay contacto entre todos los materiales gruesos y finos, ya que en los espacios vacíos que produce el material grueso se alojan partículas finas que al unirse con el cemento asfáltico producen un sello en sí que permite alcanzar la más alta resistencia.
- Abiertas, mezclas porosas o sonoreductoras con vacíos, o mezclas bituminosas para capas de rodadura o mezclas drenantes, OGFC, con gradación de agregado grueso y medio o intermedio, sin tamaños de gradación fina, seleccionado para conseguir, por ejemplo, un drenaje inmediato en las lluvias. En estos casos, se recomienda el uso de cal y/o fibras de celulosa para garantizar los vacíos requeridos, para garantizar que el cemento asfáltico no se escurra de la matriz de la mezcla asfáltica. En estas mezclas también es usual utilizar cementos asfálticos modificados con el fin de conseguir una mayor cohesión y resistencia en la mezcla.

En la Figura 2 se observa un corte transversal de la distribución de los agregados de acuerdo con los tamaños incluidos en la mezcla según el requerimiento.

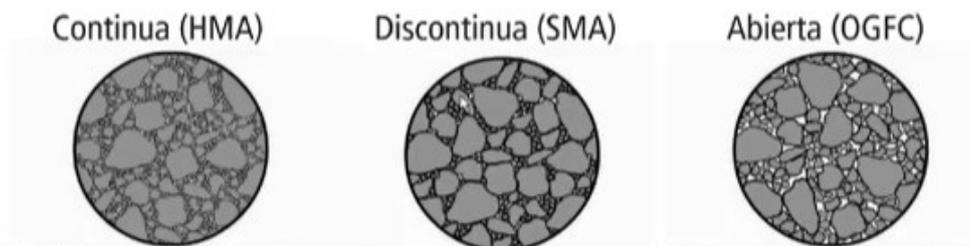


Figura 2. Tipos de Mezcla según la Gradación

Fuente: tomado textual de (Asphalt Institute, 2014)

Según la textura

Desde luego hay muchas variaciones, pero una clasificación es la que depende de la regularidad superficial, a continuación, se describen las diferentes alternativas:

Megatextura

En esta superficie la comodidad está afectada totalmente, se presenta altos niveles de ruido al paso de los vehículos y por ende los costos de operación de los vehículos, así como el mantenimiento de la vía también son altos. Las dimensiones horizontales de las irregularidades horizontales en la superficie estarán comprendidas entre 50 y 500 mm y de las verticales serán entre 10 y 50 mm. Esta estructura reduce la formación de charcos de agua y es menos exigente para las suspensiones, especialmente durante el frenado y la conducción (Rectisol Rectificado de Soleras, 2018). En la Figura 3 se puede apreciar la megatextura típica con estructura positiva y negativa.

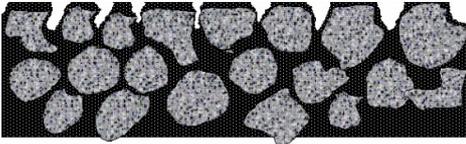
<p style="text-align: center;">Estructura Positiva</p> 	<p>Se forma por los vacíos existentes entre las partículas grandes que forman la matriz y que sobresalen por encima de una línea horizontal imaginaria.</p>
<p style="text-align: center;">Estructura Negativa</p> 	<p>Se forma por los vacíos existentes entre las partículas que forman la matriz y que están por debajo de una línea horizontal imaginaria.</p>

Figura 3. Estructura de la Megatextura

Fuente: tomado textual de. (Rectisol Rectificado de Soleras, 2018)

Macrotextura

Se usa en vías de altas velocidades, especialmente donde prevalece el pavimento mojado, ya que se afecta la superficie por el frenado. Con este último, existen dos procesos relacionados uno es la histéresis, que es la deformación mecánica de la rueda, en donde se libera energía en forma de calor y el otro es el drenaje, con cuya estructura superficial prima la profundidad y el espacio entre las partículas del conglomerado logrando prevenir la acumulación de agua sobre la superficie, o el llamado “acquaplaning”. Las irregularidades superficiales horizontales oscilan entre 0.5 y 50 mm mientras que las verticales oscilan entre 0.2 y 10 mm (Asociación Mundial de la Carretera, PIARC, 2021).

Microtextura

Para este caso los componentes finos de la estructura forman huecos diminutos en la superficie de la matriz asfáltica. Es crítico en las velocidades bajas por la posibilidad del derrapaje de las

llantas. Las irregularidades horizontales de la microestructura están comprendidas entre 0 y 0.5 mm y las verticales están entre 0 y 0.2 mm.

Según la subcapa dentro de la capa de concreto asfáltico

Adicionalmente a la distribución por gradación del tamaño del agregado, también el diseño tiene varios niveles que permiten ofrecer mayor desempeño de la mezcla dependiendo de las necesidades viarias. Existe la opción de considerar mezclas bituminosas diferentes para la parte superior o de rodadura, la cual tiene unas especificaciones relacionadas con la comodidad y el confort que se le debe ofrecer al usuario; o en la parte intermedia, si así lo establece el diseñador, para ofrecer mayor resistencia por un volumen de tránsito alto, o en la parte de abajo o denominada base en algunos países, también para ofrecer mayor soporte.

A pesar de los avances que se han tenido en cuanto a las MAC, se encuentra que los procesos de deterioro o fallas del pavimento se siguen dando de forma temprana y las gestiones de mantenimiento siguen siendo escasas especialmente en países emergentes, principalmente por los costos que esto conlleva.

En la actualidad, el mundo está girando su visión hacia el reúso de residuos, que, aunque aparentemente han terminado su ciclo de vida útil, se conoce que pueden ser insertados de nuevo en la cadena de utilidad específicamente como reemplazo de agregados, o incluidos dentro de la mezcla asfáltica.

A continuación, se presenta un panorama del estado de los residuos en el mundo y posteriormente se presentará las opciones que en la actualidad se tienen sobre la modificación de mezclas asfálticas con diferentes materiales.

3.3 Realidad mundial de los residuos

Recientemente, el Banco Mundial desarrolló un documento denominado “What a waste 2.0 A global snapshot of Solid Waste Management to 2050”, en donde explica los efectos de la generación de basura en el mundo, además de todas las variables relacionadas como lo son la gestión de los gobiernos, los problemas que trae el desarrollo económico y el crecimiento de la población, el tratamiento y disposición de las basuras, los modelos operacionales y de financiamiento, el impacto ambiental y social (World Bank Group, 2018).

De acuerdo al estudio, el Banco Mundial, estima un incremento de 1.39 billones de toneladas de residuos entre el 2016 y el 2050, es decir que un 69% se producirá más en estos 34 años. Desde luego, los gobiernos han empezado a establecer mejoras e innovaciones en el manejo de los desechos sólidos, pues se necesita una urgente acción; sin embargo, estas acciones no alcanzan a suprimir los efectos negativos derivados del procesamiento de las basuras sólidas que emiten gases de Dióxido de Carbono, CO₂, cuya producción se incrementa año a año a tal punto que se estima un aumento a 2.6 billones de toneladas de CO₂ (1 millón más que en el 2016) (World Bank Group, 2018).

Lo anterior indica que existe una desafortunada gestión de los residuos sólidos, situación que afecta a menudo a los más pobres, perjudica la salud humana y el medio ambiente local. Los recursos deben ser utilizados y reutilizados continuamente para que no resulten en los vertederos. Los sistemas de gestión de residuos exitosos en el mundo constituyen

esencialmente una economía circular (ver Figura 4) donde los productos están diseñados y optimizados para su reutilización y reciclaje. Es muy conveniente que los gobiernos nacionales y locales adopten las formas inteligentes y sostenibles de gestionar los desechos por medio de la economía circular, ya que así se promueve el crecimiento económico eficiente y se minimiza el impacto ambiental, además que se minimiza el impacto importante sobre la salud de las personas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). Tanto el Ministerio del Medio Ambiente de España como el Ministerio de Desarrollo Sostenible de Colombia contemplan una política basada en el concepto de economía circular, que involucra la gestión integral de Residuos Sólidos que mitigue el cambio climático.



Figura 4. Economía Circular para la mitigación del cambio climático

Fuente: (Minambiente, 2017)

Por lo anterior, el Banco Mundial desde el año 2000, ha comprometido más de 4.7 billones de dólares, en más de 340 programas de gestión de residuos sólidos en todo el mundo para ayudar a los países.

En la Infografía, Figura 5, hay un resumen del panorama mundial de la producción de residuos por continentes. Como es lógico los países o continentes que más población tienen y los más industrializados son los que más producen desechos. La mayor producción de desechos en el mundo corresponde a Asia oriental y Pacífico con un 23% seguida de Europa y Asia Central, con 20%, Latinoamérica y el Caribe, produce un 11%, y con un 6% los que menos producen, Norte y Centro Oriente de África. Además, en la actualidad un 36.7 % de los desechos tienen una disposición final en un relleno de tierras, un 5.5% tiene un tratamiento de compostaje y solo un 13.5% se recicla y vuelve a hacer parte de la cadena de producción, mientras que un 33% permanece depositada libremente y un 11% se incinera. Los países con ingreso económico alto tienen tan solo un 2% de disposición a cielo abierto, mientras que los de bajo ingreso el porcentaje asciende a 93% (World Bank Group, 2018).

Los residuos que se generan como producto de las diferentes actividades antrópicas se identifican según su origen como hospitalarios, domiciliarios o industriales, estos últimos provienen de procesos de producción, transformación, fabricación, utilización, consumo o limpieza. Los residuos industriales pueden ser sólidos, aunque también hay líquidos o en emisiones atmosféricas.

Todo lo generado de un proceso industrial que no será utilizado en la misma empresa, se le llama residuo. Hay algunos residuos que son valorizables, cuando este tiene un valor económico

para terceros, por lo que es reciclable y/o reutilizable y existen los que no tienen valor económico pues su destino final es la disposición en una zona de botadero (Universidad de Antofagasta, 2015).

Los residuos de tipo industrial se caracterizan dependiendo del proceso del que es producido, como por ejemplo de tipo biológico, químico y físico. Los residuos industriales sólidos pueden generarse de procesos que no emplean completamente la materia prima o procesos que generan residuos no utilizables en la operación, pero hay otros residuos o productos que son los rechazados que surgen del control de calidad y no cumplen las especificaciones técnicas de aceptación (Universidad de Antofagasta, 2015).



Figura 5. Infografía What a Waste 2.0

Fuente: tomado textual de (World Bank Group, 2018)

De igual manera es conocida la postura de la Organización de las Naciones Unidas, ONU, desde la reunión de septiembre del año 2015, en la que alrededor de 150 presidentes de las naciones se reunieron en la Cumbre del Desarrollo Sostenible y aprobaron la agenda 2030, la cual cuenta

con 17 objetivos, Figura 6, cuyo cumplimiento se espera para que se logre un mundo sostenible en el año 2030.



Figura 6. Objetivos de Desarrollo Sostenible ONU

Fuente: <https://tinyurl.com/2a553jd4>, 2022

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son herederos de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) y buscan ampliar los éxitos alcanzados con ellos, así como lograr aquellas metas que no fueron conseguidas. El objetivo 12 Producción y Consumo responsable está alineado directamente con lo que tiene que ver con el aprovechamiento de residuos industriales que pueden ser reciclados y/o usados, como es el caso del residuo cerámico.

3.4 Mezclas asfálticas en caliente modificadas

Como ya se mencionó, las obras viales presentan calidades y características insuficientes para satisfacer las necesidades y requerimientos de las demandas de tránsito, por lo cual desde hace años se están investigando alternativas de solución empezando desde la modificación de los asfaltos hasta la incorporación de materiales de distinta naturaleza. En este estudio adelantado por Romero et al se plantea que los asfaltos modificados con polímeros plastómeros o elastómeros disponibles en el mercado cumplen con creces un mejor comportamiento frente a la deformación permanente y al desgaste, son más resistentes a las cargas de tránsito, disminuyen el envejecimiento, dan un mejor comportamiento térmico a la mezcla con mayores gradientes de servicio, disminuyen las fallas a la fatiga y adquieren mejor adherencia y cohesión. También señalan que la utilización de aditivos modificadores en forma de granos aporta ventajas adicionales, como, brindar mayor flexibilidad debido a que no se requieren centrales de modificación del asfalto, simplifican la tarea de almacenamiento y de falta de homogenización debido al transporte del asfalto modificado, facilitan la modificación de mezclas asfálticas en cualquier lugar, en cualquier momento y con cualquier tipo de planta asfáltica, continua o discontinua, reduciendo de esta manera el consumo energético y de emisiones a la atmósfera por trabajar con temperaturas de asfaltos convencionales (Romero Flores, Bonifaz García, & Revelo Corella, 2014). Sin embargo, se está experimentando con neumáticos de caucho, tanto

fibra como polvo de llanta, desperdicios plásticos, deshecho de látex, deshecho de Polivinilo de Cloruro, PVC, de botellas plásticas tipo Tereftalato de Polietileno, PET, fibras de vidrio y acero, cenizas producto de procesos industriales, así como también los residuos de demolición y construcción, RDC, de obras civiles dentro de los cuales se tienen triturados de concreto bituminoso y asfáltico, este último denominado RAP, por sus siglas en inglés Recycled Asphalt Pavement, también triturados de cerámica, baldosas, ladrillos, con miras a obtener aceptables o mejoras en su desempeño y comportamiento dentro de las mezclas asfálticas.

La producción e inadecuada disposición de desechos y residuos plásticos generan una afectación ambiental situación que justifica el adecuado manejo conllevando a las opciones de reutilización y/o reciclaje, por eso estos residuos plantean alternativas para su aprovechamiento como modificador en las mezclas asfálticas (Forigua Orjuela & Pedraza Díaz, 2014).

Los residuos inertes de los cerámicos también hacen parte de los desechos que deben ser dispuestos y en lo posible reincorporados a la cadena productiva. Como ejemplo de ello, en España el uso de cerámicos en mezclas asfálticas surgió hacia 2008 cuando se emplearon estos residuos y se comprobó la efectividad de estos materiales mediante pruebas de resistencia (Vea Folch, et al, 2008). Kara y Karacasu mostraron la confirmación de uso de 30% de reciclado cerámico en un análisis mecánico de MAC siguiendo las especificaciones técnicas turcas (Kara & Karacasu, 2015). También, se demostró la conveniencia de la sustitución de material natural por residuos cerámicos en razón a la respuesta del adecuado rendimiento del ligante en carreteras de bajo volumen (Silvestre, R., Medel, E., García, A., & Navas, J., 2013). Particularmente, mezclas asfálticas semi-densas en caliente preparadas con reemplazo de 20% y 30% en tramos con tráfico bajo, menos de 600 vehículos por día, tuvieron alrededor de 9.8% menos deformación que una mezcla convencional (Silvestre, R., Medel, E., García, A., & Navas, J., 2013), es decir, mejor resistencia a la deformación y valores dinámicos de rigidez (Kara, Ç., & Karacasu, M., 2017).

A pesar de estos resultados, es relevante considerar que se deben continuar los estudios para confirmar el efecto que tienen estas sustituciones en el módulo rigidez pudiendo determinar la cantidad óptima de sustitución de material.

Así mismo, sustituciones desde 20% con incrementos de 20% hasta llegar al 100% de reemplazo de agregados de granito permitieron determinar que en asfalto mezclado en caliente (MAC), la proporción óptima se lograba con el 20% en donde el módulo elástico mejoró con relación a la mezcla testigo. Así mismo, 25% de sustitución arrojó mejoras en la respuesta de la mezcla por el método Marshall. Muniandy et al. investigaron el remplazo de residuo cerámico como agregado en mezcla asfáltica en caliente, en muestras que se remplazaron proporcionalmente con 0, 20, 40, 60, 80 y 100% en peso de agregados de granito, hasta lograr una dosificación óptima, como lo mencionan. El resultado del estudio demostró que el rendimiento de los agregados cerámicos reciclados en el asfalto mezclado en caliente (MAC) se alcanzó empleando un reemplazo óptimo aproximado del 20%, la resistencia del módulo elástico mejoró en un 13,5% en comparación con la muestra base de control (Muniandy, Ismail, & Hassim, 2018). También mostró una mejora en la estabilidad de la mezcla por el método Marshall de 25%. Así mismo se encontró que el aprovechamiento de 2,5% de residuo cerámico en el relleno mineral de una mezcla asfáltica en caliente mejoró la respuesta a tracción indirecta, el número de flujo

y el módulo dinámico (Huang, Dong, & Burdette, 2009). Así mismo, se ha comprobado que residuos de construcción empleados como sustituciones del material natural hasta el 50% han resultado en valores de estabilidad mayores al esperado por normas de calidad en Turquía, en donde se aplicó el material y arrojó un comportamiento adecuado en condiciones extremas de temperatura (Kofteci & Nazary, 2018).

Por otro lado, los residuos cerámicos en forma de fibras mostraron un resultado positivo en el refuerzo del asfalto, confiriéndole mayor rigidez (Wan, Xiao, Liu, & Schlangen, 2016).

Otro tipo de modificaciones se ha logrado con polímeros empleando materiales como PVC (0.7%) añadido a asfalto 60/70 aumentando la capacidad mecánica y dinámica ante el aumento de temperatura (Quintana Rondón, Reyes Lizcano, & Figueroa Infante, 2012).

Arabani et al. han ensayado con escoria de alto horno encontrando que aumenta la capacidad de fatiga en 100 y 150% cuando se usa en porcentajes de 8 y 12% de polvo de hierro (Arabani & Mirabdolazimi, 2011). Así mismo, en Bogotá, Colombia, se cuenta con especificaciones particulares relacionadas con el uso de materiales reciclados como grano de caucho y polímeros. El Instituto de Desarrollo Urbano, IDU y el Instituto Nacional de Vías de Colombia, INVIAS ha reglamentado para carreteras incluir nuevas especificaciones para el uso de Residuos de Construcción, RDC (Instituto Nacional de Vías, INVIAS, 2013) (Instituto de Desarrollo Urbano, 2018).

Como se refiere en este apartado, se han realizado diferentes investigaciones y procedimientos para buscar la reutilización de residuos sólidos con el fin de incorporarlos en mezclas asfálticas y así mejorar o igualar las propiedades o aumentar su vida útil, además y lo más importante buscar una solución para todos los residuos que se generan alrededor del mundo disminuyan su afectación al medio ambiente. Por esta razón, se encuentran los resultados de estudios de Andrzejuk et al. que describen un método de diseño y producción de mezclas innovadoras de minerales y asfaltos, que utilizan residuos del reciclaje de cerámicas sanitarias. Las mezclas que se realizaron tuvieron un agregado compuesto de granodiorita y dolomita, estas se examinaron para determinar el contenido de aglutinante soluble, la densidad aparente de las muestras, la presencia de huecos, el espacio lleno de aglomerante, y la susceptibilidad a la corrosión por agua y heladas. Los resultados obtenidos fueron comparados con los requisitos estándar. Se demostró que el agregado cerámico no era adecuado de utilizar para todas las mezclas de mineral-asfalto, pero para algunas mezclas si ayudaba a mejorar algunas propiedades, razón por la cual sí se podría incorporar estos residuos cerámicos a la mezcla (Andrzejuk, W., Barnat-Hunek, D., Siddique, R., Zegardło, B., & Grzegorz, Ł., 2018).

Mientras, Gonzalez et al. buscaron incorporar los residuos de cerámica en ligantes bituminosos 60/70 usando nuevas técnicas de reciclaje, lo cual contempla el estudio de características físicas y químicas de un asfalto convencional, y su modificación, cuando se analizaron los mismos con diferentes porcentajes de residuos de cerámica. En este caso, se estudiaron las características físicas y reológicas de un asfalto 60/70 modificado con RCD en porcentaje del 7%, 10%, 13% y 20% respecto al ligante, demostrando que un asfalto modificado con residuo de cerámica aplicado en caliente por vía húmeda alcanzaba un mayor rendimiento rigidizando el asfalto, directamente proporcional a los porcentajes, convirtiéndose en una nueva innovación de

considerar el residuo cerámico dentro de un ligante bituminoso (Gonzalez Gonzalez, T. A., & Beleño Durán, M. F., 2018).

Huang et al. utilizaron chatarra de material quemado, un material de residuos de cerámica de la fabricación de automóviles y donde se agregaron estos restos triturados a una mezcla asfáltica en caliente y también a un concreto hidráulico, reemplazando el agregado fino. Los resultados del estudio mostraron que los desperdicios de cerámica cocidos que reemplazan el agregado fino se pueden usar potencialmente en el concreto hidráulico y en la mezcla asfáltica en caliente. En cuanto a la mezcla de asfalto en caliente, los resultados de las pruebas a las que se sometieron las muestras indicaron que agregar 15% de chatarra molida mejoró la resistencia total a la deformación del ligante. El módulo dinámico, el número de flujo y la resistencia a la tracción indirecta de la mezcla de asfáltica en caliente mejoró con respecto al convencional (Huang, B., Dong, Q., & Burdette, E., 2009).

Las anteriores evidencias académicas comprueban que se han realizado diferentes investigaciones y se han definido metodologías y procedimientos para buscar la reutilización de residuos sólidos con el fin de incorporarlos en mezclas asfálticas y así mejorar o igualar las propiedades o aumentar su vida útil; además y lo más importante buscar una solución para la disposición de todos los residuos que se generan alrededor del mundo disminuyendo así la afectación al medio ambiente.

Como se mencionó en apartados anteriores, se indagó la viabilidad técnica del uso de agregados cerámicos reciclados como un reemplazo parcial de los agregados naturales en el asfalto de mezcla en caliente. En estos casos, para crear y formar los agregados cerámicos, se trituraron los desperdicios de gres y gres porcelánico de la industria cerámica. Se realizaron pruebas y ensayos con muestras tanto de agregados naturales como con muestras con agregados reciclados para verificar su factibilidad de uso en mezclas bituminosas. Las mezclas preparadas en el laboratorio y en una planta productora de asfalto se diseñaron a través del método Marshall siguiendo las normas europeas de marcado CE. En los resultados obtenidos de las pruebas se observó que la adición de agregados cerámicos reciclados incrementó los contenidos de aglutinante, relleno y vacío de aire, así como la resistencia a la deformación plástica y la resistencia a la tracción indirecta retenida después de la inmersión. Sin embargo, se observó un aumento en la susceptibilidad a la humedad con resistencia a la compresión y menores valores de estabilidad Marshall y deformación. Hasta el 30% de los agregados naturales fueron reemplazados por agregados cerámicos reciclados con buenas condiciones mecánicas según las especificaciones españolas utilizadas para el análisis de los resultados (Silvestre, R., Medel, E., García, A., & Navas, J., 2013). Establecieron que este diseño de mezcla con agregados cerámicos es adecuado para carreteras de volumen de tránsito medio a bajo, aunque se recomienda realizar más investigaciones para evaluar la viabilidad técnica y económica (Silvestre, R., Medel, E., García, A., & Navas, J., 2013).

Lo anterior, muestra la posibilidad de usar residuos cerámicos para reemplazar los agregados en una mezcla asfáltica modificada y continuar indagando si esos resultados pueden ser aplicados a otras localidades, continentes o en el mundo entero.

Por otro lado, Kofteci et al. buscaron determinar la usabilidad de varios residuos de construcción como agregado fino en mezcla asfáltica. Investigaron las propiedades de la mezcla de asfalto

desarrollada con diferentes contenidos de cerámica, mármol y ladrillos rojos como materiales de desecho reciclados. En este caso, estos residuos sólidos fueron utilizados como agregado fino y relleno. Durante la realización del estudio se hicieron pruebas como análisis de la susceptibilidad a la humedad, la estabilidad Marshall, la composición mecánica, la composición mineral y la prueba de propiedades físicas. Además, se determinaron el punto de reblandecimiento y las propiedades de penetración de la mezcla asfáltica modificada a la cual se le agregaron los diferentes residuos sólidos que previamente se trituraron y se convirtieron en polvo simulando o reemplazando el agregado fino de la mezcla. Los resultados indicaron que la mezcla asfáltica a la cual se le agregaron desechos de mármol presentó un mejor desempeño que otras mezclas, especialmente en un reemplazo de 25%; y, en general, las pruebas de todas las muestras realizadas con los diferentes porcentajes de los distintos residuos sólidos de mezcla asfáltica en la que se agregó residuos provenientes de la cerámica mostraron la superioridad de las propiedades a alta y baja temperatura (Kofteci, S., & Nazary, M., 2018).

También Los residuos cerámicos se pueden utilizar como agregado grueso para la construcción de mezclas de concreto hidráulico. Por ejemplo, Medina et al. analizaron la microestructura y propiedades de los hormigones hidráulicos que utilizan residuos de la industria de la cerámica sanitaria como agregado grueso. El estudio analizó el comportamiento del concreto con diferentes porcentajes de agregado de residuos cerámicos, y para ello trabajaron con los porcentajes de 15%, 20%, 25% sustituyendo el agregado grueso convencional. Después de realizar una serie de pruebas y ensayos los resultados obtenidos en la investigación muestran que los residuos cerámicos no interfieren ni en el proceso de hidratación ni en la morfología de los productos hidratados. La microestructura presente en la zona de transición interfacial (ZTI) de la mezcla de agregados reciclada es más compacta y estable que la de la mezcla con agregados naturales o convencionales. Además, analizando el comportamiento y las propiedades mecánicas de la mezcla ensayada, se observó que a medida que se aumentaba el porcentaje de sustitución del 15% al 25%, mejoraba la resistencia a la compresión de estos hormigones (Medina, C., Frías, M., & Sánchez de Rojas, M., 2012).

Huang et al. estudiaron una mezcla SMA, con 10, 20, 30, 40 y 50% por volumen de reemplazo de reciclado de cerámica con ensayos de laboratorio de fatiga, de deformación plástica, coeficiente al deslizamiento y de susceptibilidad, entre otros, encontrando como porcentaje óptimo para la mezcla un 40% de sustitución (Huang, Qian, Hu, & Zheng, 2020). Pero, a diferencia de otros proyectos expuestos anteriormente, este estudio se basó en el aprovechamiento de diferentes residuos sólidos, como por ejemplo los residuos de vidrio, escoria de acero, neumáticos y plásticos. Para lograr este reúso de revisaron los estándares y la literatura existente sobre los requisitos técnicos, así como el rendimiento de los pavimentos de asfalto construidos con dichos materiales reciclados. Se encontró que, si bien existe un gran potencial para el suministro de materiales secundarios, algunos factores han deprimido efectivamente estas actividades de reciclaje (Huang, Y., Bird, R., & Heidrich, O, 2007). Pero, a diferencia de otros proyectos expuestos anteriormente, este estudio se basó en el aprovechamiento de diferentes residuos sólidos como, por ejemplo, los residuos de vidrio, escoria de acero, neumáticos y plásticos. Para lograr este reúso se revisaron los estándares y la literatura existente sobre los requisitos técnicos, así como el rendimiento de los pavimentos de asfalto construidos con dichos materiales reciclados. Se encontró que, si bien existe un gran

potencial para el suministro de materiales secundarios, algunos factores han deprimido efectivamente estas actividades de reciclaje (Huang, Y., Bird, R., & Heidrich, O, 2007) .

Por otro lado, es relevante destacar que cada vez más los gobiernos están atentos a ofrecer estímulos a los contratistas de obras viales por el uso de materiales que promuevan la sostenibilidad. En España, por ejemplo, desde hace años la legislación estimula a las empresas a organizar un departamento de investigaciones de tal manera que le permita beneficios tributarios por sus resultados. Recientemente entró en vigencia la Orden PCI/169/2019, de 22 de febrero del 2019, por la que se crea el Consejo de Desarrollo Sostenible, en donde se le da prioridad a la Agenda 2030 con sus objetivos de desarrollo sostenible anunciados por las Naciones Unidas. Así mismo, en Colombia, mediante la ley 1955 de mayo 25 de 2019 se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022. “Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad” en donde se ha incluido el objetivo del pacto por la sostenibilidad: producir conservando y conservar produciendo para estimular a los empresarios en el uso de materiales reciclados entre otros.

Por las razones académicas y científicas anteriormente expuestas es que se decidió con esta tesis evaluar el comportamiento de la rigidez de la mezcla asfáltica con inclusión de cerámica originaria de las mismas regiones geográficas del agregado o cercanas, para realizar una comparación entre los resultados obtenidos en Valencia (España) y en Bucaramanga (Colombia), usando agregado de cada una de estas localizaciones. La experimentación realizada en esta tesis amplía la generalización de usar la mezcla asfáltica modificada con residuo cerámico a más partes del mundo y con un sustento científico. Permite profundizar sobre el desempeño de la mezcla asfáltica bajo el parámetro de resistencia con el ensayo de módulo dinámico para ofrecer elementos adicionales de valoración sobre la factibilidad del uso del triturado cerámico.

Inicialmente se presenta el resumen del proceso de producción de la cerámica, con el fin de profundizar los pasos de producción de este material, cuyo proceso industrial genera una densificación que le permite alcanzar una resistencia que puede ser aprovechada en el material que no cumple los requisitos de calidad para los que fue elaborado, y que por lo tanto puede ser reusado dentro de la construcción de la mezcla asfáltica.

3.5 Proceso industrial del residuo cerámico

Con el fin de conocer las características del proceso del cual resulta el residuo cerámico se presenta un resumen del proceso de producción de la cerámica en la industria (Figura 7 y Figura 8). En el mes de junio del año 2018, se llevó a cabo una visita a la Planta de cerámica Italia, en la ciudad de San José de Cúcuta (Colombia), considerada la planta más grande del nororiente colombiano, con producción para uso nacional e internacional. Este proceso también está descrito en (Flórez- Vargas, Sánchez-Molina, & Blanco-Meneses, 2018) y fue facilitado y explicado por la empresa por medio de su ingeniero de producción, German Augusto Ortega Angel.

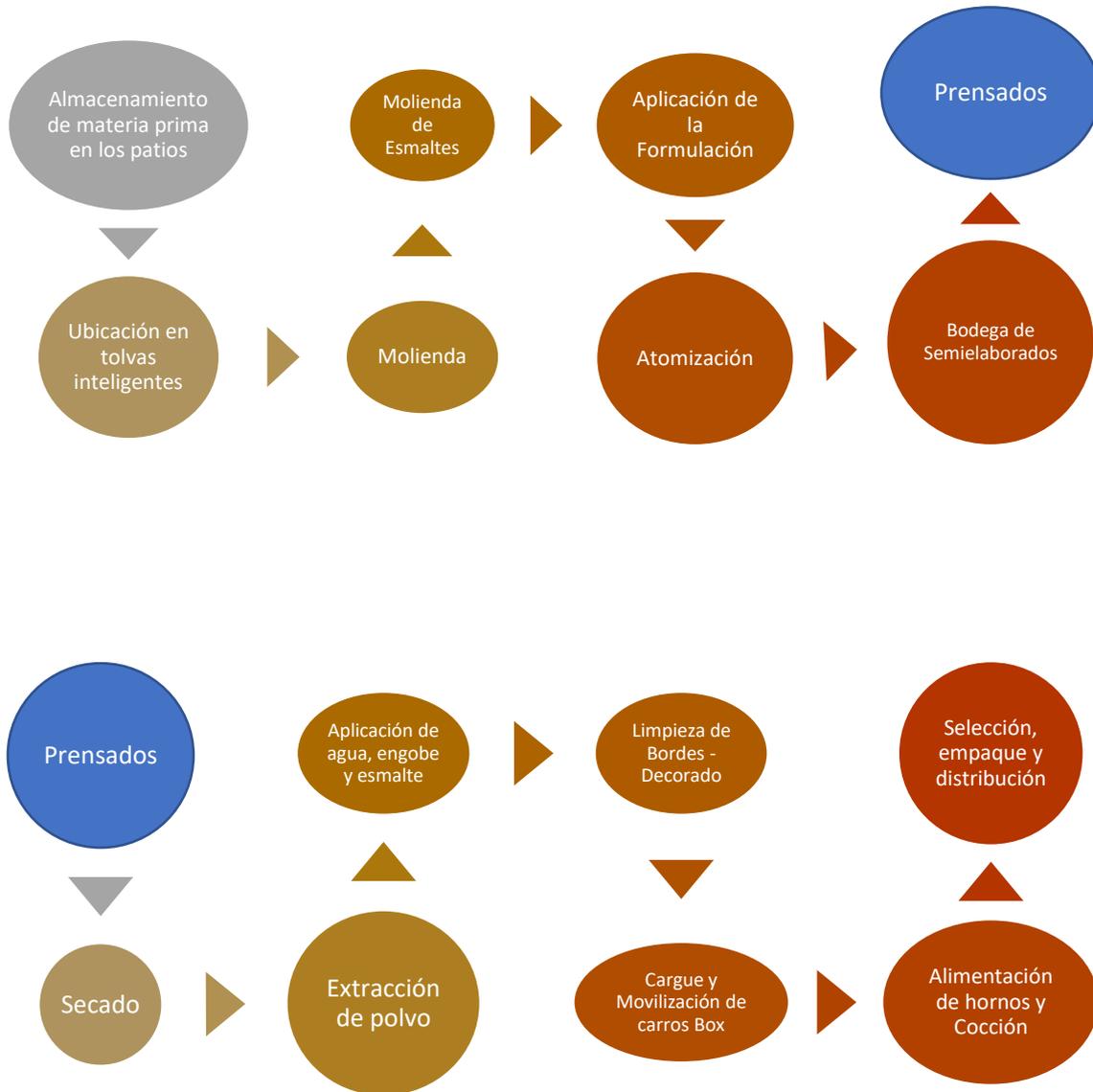


Figura 7. Esquema del Proceso de Elaboración de la Cerámica

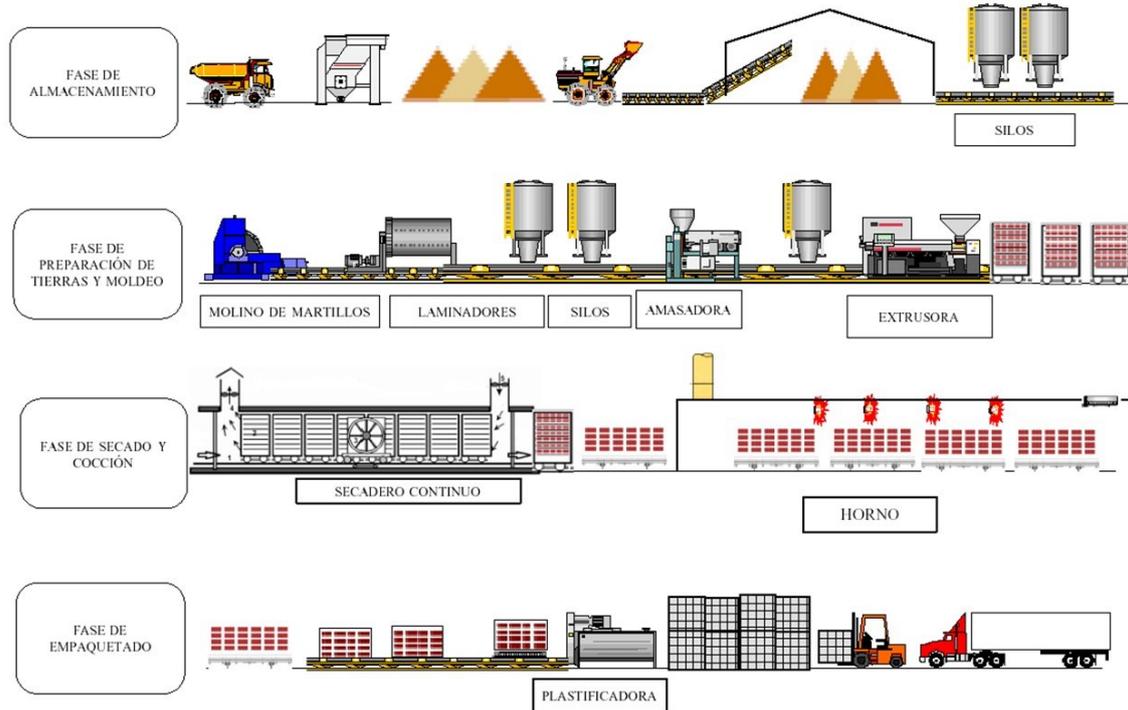


Figura 8. Proceso de Fabricación de los Materiales Cerámicos

Fuente: Tomado textual (Asociación de fabricantes de ladrillos y tejas de la Comunidad Valenciana, 2020)

Y a continuación, en forma más detallada el proceso industrial, facilitado por empresa Cerámica Italia (Ortega, 2017).

3.5.1 Preparación de la pasta

Acopio en patios de materia prima. El proceso inicia con el almacenamiento de la materia prima de suelos y agregados seleccionados compuestos por arcillas, feldespato, arena y caliza (ver Figura 9).

Uso de Tolva y Báscula. La materia prima recolectada es transportada por cargadores hasta zonas de stop para posteriormente ubicarla en las tolvas inteligentes tipo báscula para su respectivo cargue en determinadas proporciones y movilizarla por medio de bandas de acuerdo con la formulación de la pasta indicada en los diseños técnicos, en cumplimiento con los estándares nacionales e internacionales (Ortega, 2017).

Proceso de Molienda. Cuando la materia prima se encuentra en la tolva del molino se procede a adicionar agua y defloculantes, mientras se hace el cargue. La molienda se obtiene por medio de elementos moledores de alúmina que, al generar fricción entre ellos en efecto de cascada, logran mezclar homogéneamente el material obteniendo lo que se denomina barbotina (mezcla de arcilla y agua). Posteriormente la barbotina es descargada a presión y almacenada en cisternas, de allí es bombeada a tamices y luego transportada a una cisterna de consumo del atomizador (Ortega, 2017).

Atomización. La barbotina es bombeada a la corona del atomizador e inyectada a través de unas boquillas de diferentes diámetros en el interior del equipo. Así mismo por medio de un

quemador ingresa una corriente de aire caliente, que al chocar con la barbotina evapora el agua, obteniendo como resultado pasta pulverizada. La pasta es tamizada para separar el residuo y el material que no cumpla con la granulometría requerida. El producto resultante de este proceso es sometido a pruebas y análisis para determinar la conformidad con los requisitos exigidos en las normas técnicas. Posteriormente la pasta es transportada por medio de bandas y elevadores de cangilones (acarreo de material a granel verticalmente) hacia los silos de almacenamiento para su respectivo añejamiento. Alcanzada la madurez esperada, la pasta es llevada hacia las tolvas de las prensas, para el siguiente proceso (Ortega, 2017).

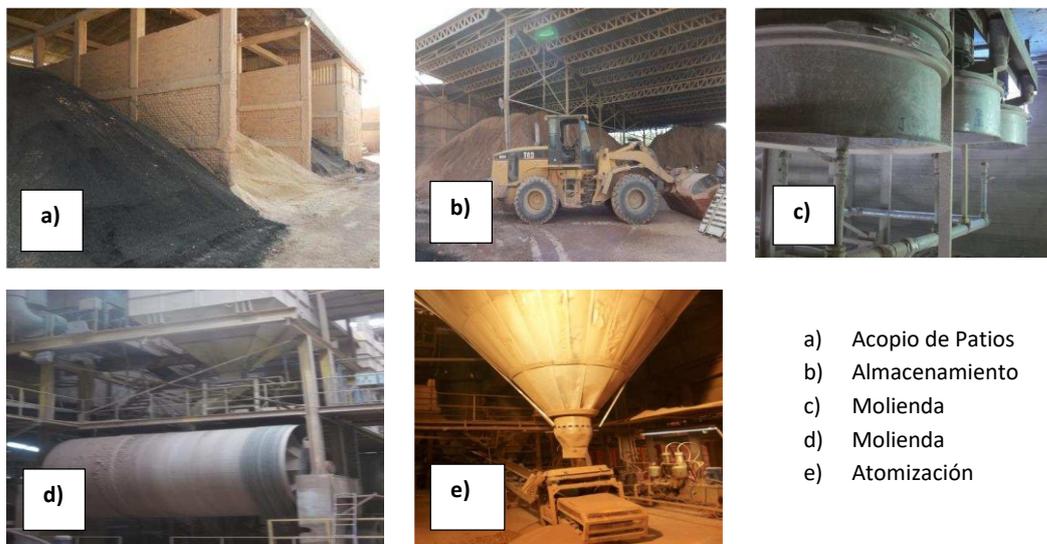


Figura 9. Preparación de la Pasta

Fuente: Tomado textual (Ortega, 2017)

3.5.2 Preparación de semielaborados

Alistamiento de materia prima. De acuerdo a las fichas técnicas para cada semielaborado se alista la materia prima, pesando cada una de ellas con base en la formulación. Todas las materias primas utilizadas en el proceso deben someterse a pruebas de aseguramiento de la calidad en cumplimiento con las normas técnicas, para avalar el consumo de las mismas. Una vez completa la formulación, los materiales son transportados a la plataforma de los molinos para realizar el cargue (ver Figura 10).

Molienda de esmaltes. Se realiza el cargue del molino, adicionando agua y floculantes, de acuerdo a la formulación establecida. Para serigrafías se adiciona un elemento vehículo serigráfico en lugar de agua. Cumplido el ciclo de molienda el producto obtenido (semielaborado) se somete a pruebas realizadas en laboratorio para comparar con los patrones preestablecidos, determinado el cumplimiento de los requisitos esperados, se realiza el descargue del molino para permitir la entrada al siguiente paso del proceso (Ortega, 2017).

Bodega de Semielaborados. Una vez aprobado se descarga el molino, pasando por un tamiz donde se separa el residuo. Posteriormente es llevado a las balsas de almacenamiento que cuentan con un agitador para evitar su aglomeración. Para serigrafías el material es

transportado y almacenado en la bodega de materias primas de esmaltes, en tanques plásticos identificados con un código y su respectiva aprobación que le autoriza su entrada al proceso (Ortega, 2017).

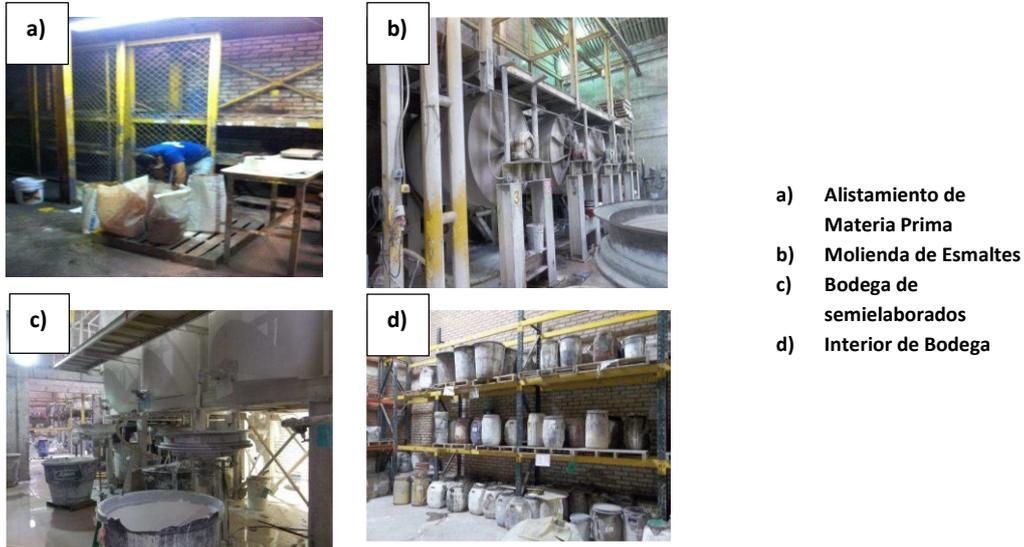


Figura 10. Preparación de Semielaborados

Fuente: Tomado textual (Ortega, 2017)

3.5.3 Líneas de ensamble

Prensado. El proceso de prensado tiene como objetivo la conformación de la baldosa a partir de la pasta atomizada (ver Figura 11).

Inicia con la carga de la pasta en el molde a través del carro alimentador, se cierran los moldes y se efectúa un primer prensado con el propósito de expulsar el aire comprimido obtenido en los procesos anteriores. Posteriormente existen dos ciclos de prensado con diferentes fuerzas de presión, con el objetivo de obtener suficiente resistencia mecánica y compactación de la baldosa. Terminado el proceso de prensado el carro alimentador expulsa la baldosa hasta posicionarla en los rodillos para ser transportada al proceso de secado (Ortega, 2017).

Secado. El proceso de secado se efectúa con el fin de eliminar la humedad aún presente en la pasta y proporcionar de esta forma resistencia mecánica a la baldosa. Se cuentan con dos clases de secaderos: el horizontal que es alimentado por rodillos móviles y el vertical que es alimentado por canastas. Una vez prensadas las baldosas ingresan al secadero a través de bandas transportadoras, ubicándola en la cámara central donde se movilizan en las siguientes etapas de secado. La primera etapa es el precalentamiento, aplicación de aire caliente y húmedo para aclimatar la baldosa. La segunda etapa es el secado, aplicación de aire caliente y seco, para eliminar la humedad de la pasta. Y por último la tercera fase: Enfriamiento, aplicación de aire frío preparando la superficie de la baldosa para el paso hacia las líneas de ensamble (Ortega, 2017).

Extracción de Polvo. El proceso de limpieza de baldosas está compuesto de un sistema de cepillos conformado por dos rodillos giratorios con cerdas que retiran las partículas de polvo y

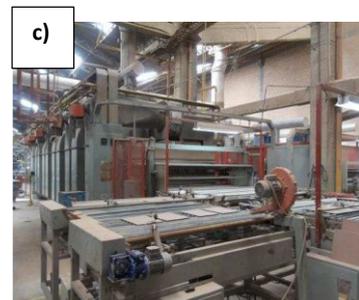
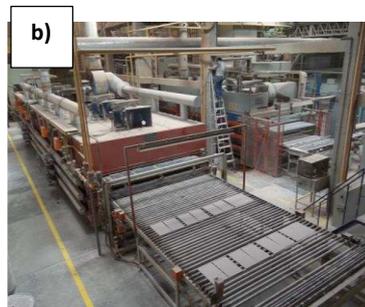
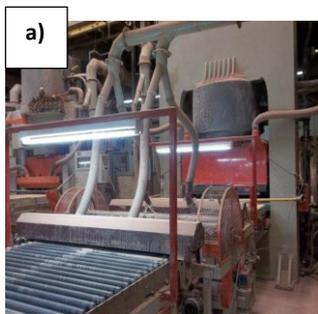
otros residuos de las caras superior e inferior de la baldosa. Y un sistema de ventilador que inyecta una corriente de aire sobre ambas caras de la baldosa retirando las partículas aún presentes, facilitando la adherencia del engobe (barbotina coloreada) y el esmalte. Después se aplica agua a las baldosas antes de iniciar proceso de ensamblado, para bajar la temperatura, mejorar condiciones de adherencia y tapar poros (Ortega, 2017).

Aplicación de engobe y esmalte. Para la aplicación del engobe y esmalte se emplean las técnicas de campana y disco, dependiendo de la tipología del producto. Las baldosas son transportadas por medio de correas móviles pasando por una campana donde se le aplica una capa uniforme de engobe en efecto de cascada o ingresa a la cabina de disco donde cae el esmalte por medio de rocío, dependiendo del tipo de aplicación a utilizar. El engobe es utilizado para preparar la superficie de la baldosa, tapando los poros y facilitando la adherencia del esmalte. El esmalte es aplicado de la misma forma que el engobe proporcionando a la pieza el color y brillo requerido, así como las características de dureza y resistencia al rayado. La baldosa es transportada por las correas móviles pasando por unos discos de cauchos humedecidos con agua, con el objetivo de eliminar el residuo de engobe y esmalte presente en los bordes de la pieza, garantizando la estética del producto (Ortega, 2017)

Decorado.

-Máquina Plana: Consiste en adherir tinta serigráfica a la cara superior de la baldosa esmaltada, ejerciendo una presión mediante un barrido de las espátulas sobre la pantalla dejando así impreso el diseño sobre la pieza. Las pantallas se elaboran en el laboratorio serigráfico teniendo en cuenta condiciones de conformidad en sus componentes (marco metálico y malla serigráfica), los cuales están expuestos a altas tensiones y a ataques químicos.

-Rotocolor: Utiliza una tecnología de Cilindro de silicona inciso. En esta etapa la decoración se realiza con cilindro y azulejo moviéndose exactamente a la misma velocidad, así pues, el azulejo no se detiene durante la impresión; haciendo el proceso de decoración más rápido, evita roturas de esquinas, y se logran una mayor profundidad en la decoración, además se minimiza el efecto de recuadro que se tiene con la decoración plana. La tecnología INKJET consiste en la impresión mediante la aplicación de tinta gota a gota. Esta tecnología se convierte en una potente herramienta que permite hacer cosas que hasta hace poco tiempo no se podría imaginar es la decoración digital (Ortega, 2017)



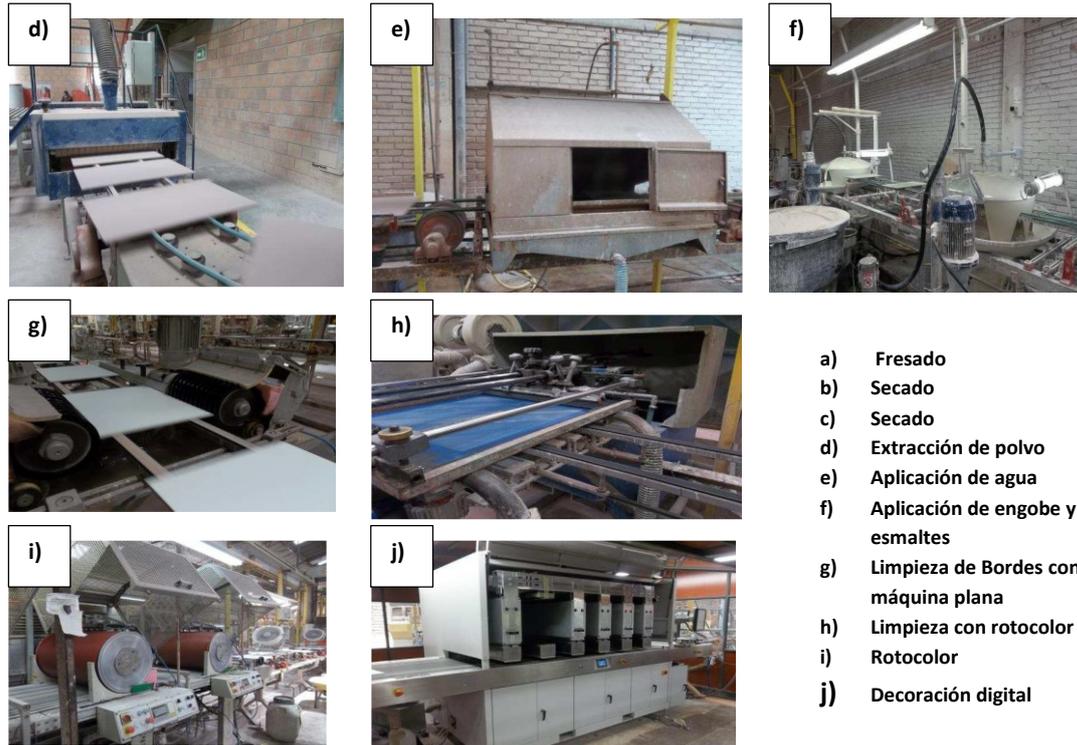


Figura 11. Líneas de Ensamble

Fuente: Tomado textual (Ortega, 2017)

3.5.4 Hornos

Cargue de Carros Box

Las baldosas decoradas son almacenadas provisionalmente en vehículos de movilización (carros box). El proceso de cargue de los carros está dividido en tres etapas. La primera etapa está compuesta de un compensador que permite la acumulación de las baldosas en un elevador en casos de sobrecargue en la mesa, también en casos de faltantes en la línea, el equipo se encarga de alimentarla con las baldosas acumuladas anteriormente. La segunda etapa está compuesta de una mesa de distribución que permite desplazar cierta cantidad de baldosas por sección en cada nivel del carro, ubicadas con el brazo extensor. Y la última etapa consiste en un robot de brazos extensivos que ubican las baldosas decoradas en las secciones de cada nivel del carro obteniendo el cargue total (ver Figura 12) (Ortega, 2017)

Movilización de Carros Box

Se verifica el estado de cargue de los carros antes de retirarlos de su sitio, al obtener la conformidad del cargue se ubican en el vagón de desplazamiento para ubicarlos en los pre-secaderos de acuerdo al orden de producción, de allí es ubicado nuevamente en otro vagón, este almacenamiento se hace necesario cuando hay las líneas que no son directas (4 y 5). Cuando hay continuidad de las líneas de ensamble éstas van directas hacia los hornos (1,2 y 3) (Ortega, 2017).

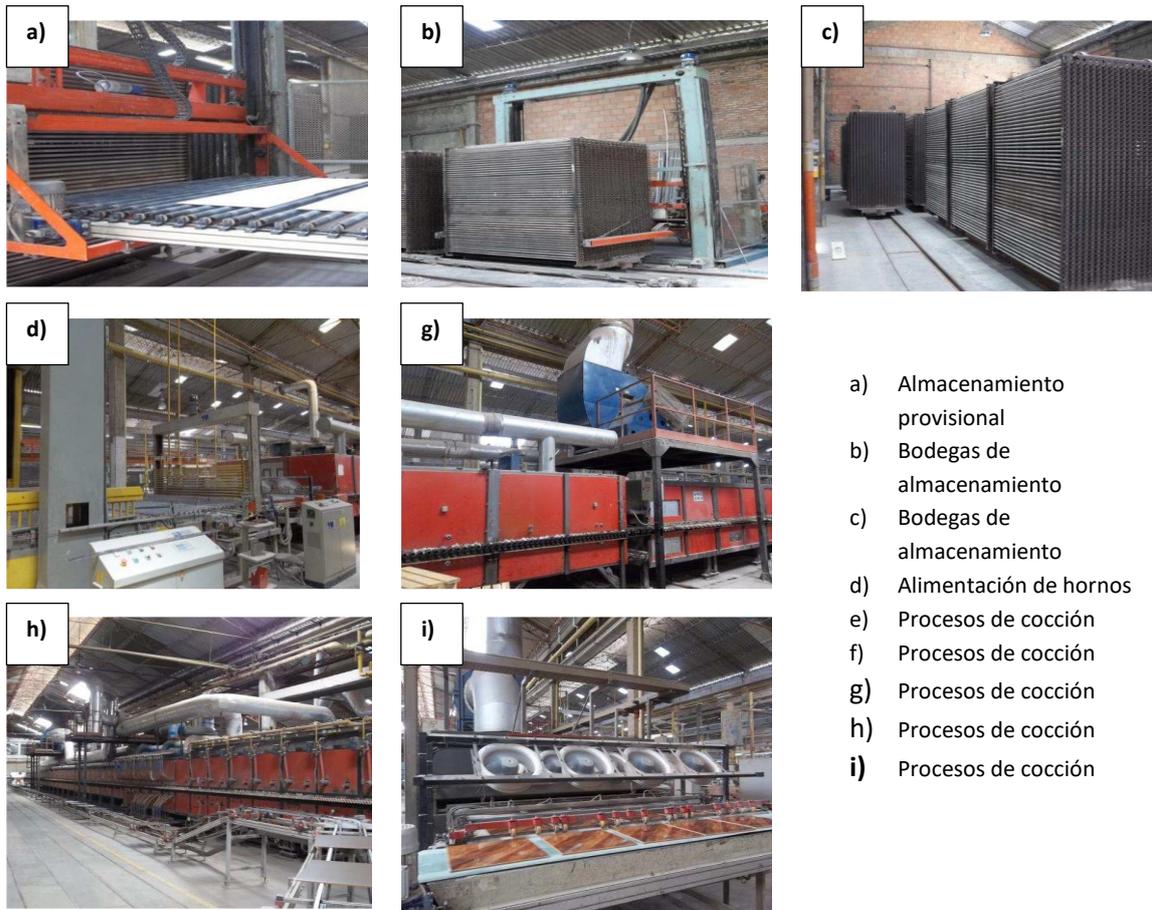
Alimentación de hornos

Posicionados los carros box en la máquina de descargue, las baldosas son ubicadas en la línea de alimentación, allí se desplazan hasta la entrada del horno correspondiente a la línea de producción, posicionándolas de acuerdo con el número de baldosas recibidas en cada horno, este Posicionamiento es controlado por un sistema de foto celdas que regula la cantidad (Ortega, 2017).

Proceso de Cocción

El proceso está dividido en zonas funcionales de acuerdo con la estructura de los hornos. La zona de aspiración de gases, en esta zona un ventilador aspira los humos de la combustión, secando el material, es la primera etapa de calentamiento por convección sin llama. Luego, la zona de precalentamiento gradual con llama, la zona de cocción, en la que el material alcanza la temperatura máxima, se utilizan quemadores directo sobre el material finalizando la cocción. El gradiente térmico en cada fase de la cocción relativa a diversos tipos de pavimentos y revestimientos. Posteriormente, viene la zona de enfriamiento, el material se enfría con corrientes directas de aire, hasta alcanzar una temperatura no critica. Al final se llega a la temperatura critica (Ortega, 2017).

La zona de enfriamiento final es en la que se introducen grandes cantidades de aire a fin de enfriar por convección y turbulencia superficial del material cocido.



- a) Almacenamiento provisional
- b) Bodegas de almacenamiento
- c) Bodegas de almacenamiento
- d) Alimentación de hornos
- e) Procesos de cocción
- f) Procesos de cocción
- g) Procesos de cocción
- h) Procesos de cocción
- i) Procesos de cocción

Figura 12. Hornos

Fuente: Tomado textual (Ortega, 2017)

3.5.5 Selección y empaque

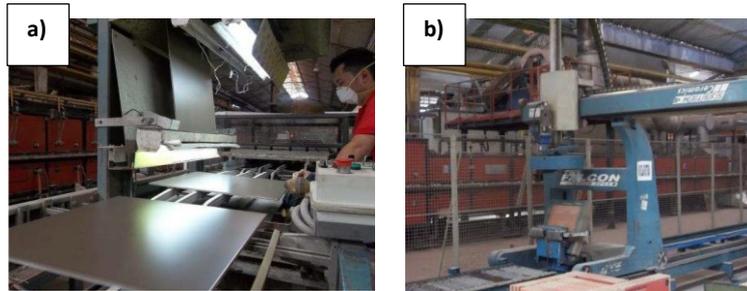
Se desarrolla la selección de los productos terminados tomando muestras de las baldosas esmaltadas a la salida de los hornos para verificar las características físicas (Tonos, tamaños, alabeos) comparándolas con patrones establecidos a cargo de aseguramiento de la calidad; también se verifica la conformidad del empaque (cajas de cartón de acuerdo con la clasificación del producto) y las estibas de los productos aprobándolas para ser entregadas al centro de distribución (ver Figura 13) (Ortega, 2017).

La clasificación del producto terminado obedece a normas internacionales, como producto conforme de "CALIDAD PRIMERA", no presenta defectos visibles observados a un metro de distancia bajo luz día en un ángulo aproximado de 90 grados de inclinación, producto conforme "CALIDAD COMERCIAL", Combinación de calidad primera y segunda en un mismo empaque. No se aceptan reclamos. Después el producto no conforme "CALIDAD SEGUNDA", presenta pequeños defectos observados a un metro de distancia y bajo luz difusa a un ángulo aproximado de 90 grados de incidencia del paso hacia las líneas de ensamble. El tercer producto "CALIDAD TERCERA" presenta defectos visibles a dos metros de distancia bajo luz difusa a un ángulo aproximado de 90 grados de inclinación (Ortega, 2017).

Y finalmente el producto crítico "ROTURA", es aquel que se utiliza para reproceso en cierto porcentaje, por poseer defectos de gran magnitud y gravedad. Personal competente especialmente entrenado para la selección del producto revisa el cumpliendo con los estándares internacionales de calidad, así mismo la tecnología más avanzada del mercado permite la automatización y continuidad del proceso, por lo que se produce una separación.

De acuerdo al Plan de Manejo Ambiental en el caso de Colombia, se producen 1200 ton/mes de producto crítico, parte del cual en la actualidad se usa como material de conformación de vías internas de las minas proveedoras de arcilla (Cerámica Italia S.A, 2014).

Es precisamente este último material el que fue escogido para la experimentación, por no cumplir con los estándares o especificaciones técnicas de material cerámico. Es este el motivo de estudio para plantear una nueva alternativa de uso en esta etapa del proceso: reciclarlo para transformarlo en agregado útil para la elaboración de mezcla asfáltica de carreteras. Una validación a realizarse con material en Sur- América, Colombia con material proveniente de San José de Cúcuta y otra en Europa, España con material proveniente de Castellón. Ambas zonas sobresalientes en producción de arcillas para elaboración de cerámicos. Y como se puede conocer el proceso de construcción de la cerámica conlleva a convertir la materia prima en un material de una gran dureza y durabilidad, cuyo rechazo prácticamente no obedece a cuestiones de resistencia sino de estética y comodidad que no son requeridas en la incorporación en una MAC (Ortega, 2017).



a)-b) Selección de las baldosas y empaque

Figura 13. Selección y Empaque
Fuente: Tomado textual (Ortega, 2017)

3.5.6 Centro de distribución

El producto estibado se ubica en el área de selección donde se verifica la conformidad y cantidad descrita en las etiquetas de código de barras. Allí es recibido por el montacargas del centro de distribución, ubicándolo en la bodega de producto terminado, para su distribución. Una vez el material ubicado en la bodega se procede a realizar la distribución de acuerdo con los requerimientos del cliente. El material es ubicado en plataforma para ser ingresado en el transporte asignado cumpliendo con las políticas de seguridad BASC (Business Alliance for Secure Commerce) para exportaciones y precintado para el cargue nacional (ver Figura 14) (Ortega, 2017).



Figura 14. Centro de Distribución
Fuente: Tomado textual (Ortega, 2017)

El anterior resumen se logró constatar en la visita realizada a la Industria de Cerámica Italia en San José de Cúcuta del Departamento de Norte de Santander en la República de Colombia. En la Figura 15 se aprecia el sitio final de salida de comercialización de las losas de cerámica.



Figura 15. Visita a Industria Cerámica en Colombia

A continuación, se explicará el diseño de mezclas asfálticas con la caracterización de los áridos o agregados y asfaltos o betunes, considerando las especificaciones o reglamentaciones técnicas establecidas de cada uno de los países.

3.6 Diseño de mezclas asfálticas

Para el diseño de las mezclas asfálticas cada país ha adoptado una metodología que permite elegir el porcentaje óptimo de asfalto, basados en el método Marshall. Esa metodología incluye la caracterización del material pétreo y la caracterización del ligante o el asfalto, y se espera que cada uno de ellos cumpla con las especificaciones técnicas correspondientes para que sea aprobado su uso dentro del proceso de construcción de la mezcla asfáltica. Posteriormente, se mezclan los materiales teniendo en cuenta las consideraciones hechas con la reología del asfalto y se realizan las pruebas correspondientes para avalar que la elaboración de la mezcla siguió los derroteros considerados para este tipo de mezclas.

En cuanto a las propiedades que los áridos u agregados tienen, aquellas relacionadas con las propiedades físicas son fundamentales. Por ejemplo, la forma de árido incide en la resistencia mecánica de las partículas, en el esqueleto mineral. De ahí que sea necesario conocer si las partículas son largas o planas, si son cúbicas, si son angulosas, cualificación relevante para su mejor desempeño. También la porosidad va a influir en la textura superficial, en el peso específico aparente, en la absorción, en el tamaño, en la distribución, accesibilidad y continuidad de los vacíos. El peso específico real, por su parte, identifica la composición mineralógica y la naturaleza de la roca, prescindiendo de los poros, es el peso específico del agregado u árido. La textura superficial puede ir desde lisa hasta rugosa, e influye en la trabazón de las partículas. Otra de las propiedades a considerar es la dureza, que se mide indirectamente con el ensayo de desgaste de los ángeles.

Desde luego las propiedades químicas de las partículas, se manifiestan en las reacciones químico – físicas entre los agregados y el asfalto, que se traduce en el parámetro de la adhesividad. Es muy importante que los agregados o áridos se encuentren totalmente secos, para que el betún o el asfalto impregne completamente toda la superficie y quede adherido. Para ese fenómeno también inciden los factores de textura, tensión superficial del asfalto, viscosidad, porosidad y si los agregados tienen cierta humedad tendrán cierta polaridad, según sea básico o ácido.

Los asfaltos o betunes son ligantes hidrocarbonatos constituidos por mezclas complejas de hidrocarburos provenientes del proceso de refinación del petróleo. A elevadas temperaturas el

comportamiento de los betunes es de tipo newtoniano, pues su comportamiento depende de la temperatura y es material termoplástico porque su consistencia también depende de la temperatura.

La viscosidad es inversamente proporcional al cambio de temperatura, por eso dentro de los tipos de asfalto se tienen betunes asfálticos, betunes fluidificados o fluxados (disolución con aceite procedente de la destilación de la hulla), emulsiones bituminosas y ligantes modificados. Las emulsiones asfálticas requieren de agua y un emulgente para que a temperatura ambiente su estado sea líquido de tal manera que permita una mezcla asfáltica muy flexible, las cuales generalmente son de tipo abierto.

A continuación, se presenta los ensayos requeridos para la caracterización de los agregados o áridos y los ligantes o asfaltos siguiendo inicialmente la norma española y posteriormente se expondrá la norma colombiana. Se finaliza con un resumen relacionado con el procedimiento para definir el porcentaje óptimo del ligante en la mezcla siguiendo la normativa española y posteriormente la normativa colombiana.

3.6.1 Caracterización de los áridos siguiendo la normativa en España

El agregado o árido como comúnmente se le denomina en España, se caracteriza teniendo como base varios ensayos, los cuales permiten identificar las fortalezas y debilidades, para conocer su aporte en la mezcla asfáltica. Los numerales siguientes compendian las Normas de Ensayos del Ministerio de Fomento de España, aquellas que deben aplicarse al árido para evaluar su viabilidad de uso (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015).

Generalmente las condiciones están dadas dependiendo del tipo de tránsito pesado, dado por el Ministerio de Fomento, los cuales van desde la categoría T00 y T0, pasando por T0 y T1, T2 y terminando en T3 y arcenes y T4. Se muestra en la siguiente tabla dichas categorías.

Tabla 1. Categoría de Tráfico Pesado de acuerdo con el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG3)

Categoría de Tráfico Pesado	T00	T0	T1	T2
IMDp (Vehículos pesados/día)	>=4000	3999-2000	1999-800	799-200
Categoría de Tráfico Pesado	T31	T32	T41	T42
IMDp (Vehículos pesados/día)	199-100	99-50	49-25	<25

Fuente: Tomado textual (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015)

A continuación, se presenta el resumen de los más importantes controles de calidad que deben aplicarse a los áridos para confirmar su idoneidad en la mezcla asfáltica.

3.6.1.1 **Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de Finos. Ensayo del equivalente de arena (%) (AENOR UNE-EN 933-8, 2012)**

El valor de equivalente de arena de la fracción granulométrica 0/2 mm de los áridos finos o de los áridos todo uno, contenido de finos máximo del 10%: Se utiliza una solución de lavado y floculante, se vierten en una probeta cilíndrica graduada que se agita para soltar los recubrimientos de arcilla. Donde h2 es el nivel de arena y h1 es el nivel de arcilla:

$$SE = \frac{h2}{h1} * 100$$

Los resultados deben ser superiores a 55. Entre las recomendaciones es el Equivalente de arena, SE 0/4 mm debe ser superior a 55, Equivalente de arena, Anexo A de la norma UNE-EN-933-8. El árido obtenido combinando las distintas fracciones (incluido el polvo mineral), según las proporciones fijadas por la fórmula de trabajo, sea superior a cincuenta (50), o en su caso, de no cumplirse esta condición, su valor de azul de metileno, según Anexo A de la norma UNE-EN 933-9, sea inferior a diez (10) y, simultáneamente, el equivalente de arena, según la UNE-EN 933-8, sea superior a cuarenta (40).

3.6.1.2 **Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 10: Ensayo de Granulometría (AENOR UNE-EN 933-10, 2012)**

Teniendo en cuenta la procedencia y naturaleza única de los materiales áridos se clasifican teniendo en cuenta la gradación de los diferentes tamaños de partículas por lo que el ensayo se denomina Granulometría.

En la Tabla 2 se observan los tipos de mezclas de acuerdo con las diferentes gradaciones de los áridos. Esa gradación permite la clasificación en Densas, D, Semidensa, S y Gruesa, G mezclas bituminosas.

Tabla 2. Husos Granulométricos Cernido Acumulado (% en masa)

Tipo de Mezcla		Abertura de los Tamices NORMA UNE-EN-933-2 (mm)									
		45	32	22	16	8	4	2	0.5	0.25	0.063
DENSA	AC16D			100	90-100	64-79	44-59	31-46	16-27	11-20	4-8
	AC22D		100	90-100	73-88	55-70		31-46	16-27	11-20	4-8
SEMI	AC16S			100	90-100	50-66		24-38	11-21	7-15	3-7
DENSA	AC22S		100	90-100	70-88	50-66		24-38	11-21	7-15	3-7
	AC32S	100	90-100		68-82	48-63		24-38	11-21	7-15	3-7
GRUESA	AC22G		100	90-100	65-86	40-60		18-32	7-18	4-12	2-5
	AC32G	100	90-100		58-76	35-54		18-32	7-18	4-12	2-5

Fuente: Tomado textual (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015)

Adicionalmente, es importante la dosificación, de polvo mineral de aportación, la cual debe ser expresada en porcentaje del árido total con aproximación del uno por mil (1 ‰).

Y también, la dosificación, del polvo mineral de recuperación expresada en porcentaje del árido total con aproximación del uno por mil (1 ‰).

3.6.1.3 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 5: Ensayo de Angulosidad y porcentajes de caras de fractura de las partículas de árido grueso (AENOR UNE-EN 933-5, 2012)

A continuación, en la Tabla 3 y la Tabla 4 se presenta la recomendación según las categorías de tráfico pesado en la proporción de partículas trituradas y parcialmente trituradas del árido grueso, porcentaje en masa.

Tabla 3. Partículas Trituradas en árido grueso

Tipo de Capa	Categoría de Tráfico Pesado				
	T00	T0 y T1	T2	T3 y arcenes	T4
Rodadura		100		>=90	>=75
Intermedia				>=75	>=75 (*)
Base	100		>=90	>=75	NA

(*) Vías de servicio

Fuente: Tomado textual (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015)

Tabla 4. Partículas Redondeadas en árido grueso

Tipo de Capa	Categoría de Tráfico Pesado				
	T00	T0 y T1	T2	T3 y arcenes	T4
Rodadura		0		<=1	<=10
Intermedia				>=75	<=10 (*)
Base	0		<=1	<=10	NA

(*) Vías de servicio

Fuente: Tomado textual (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015)

Con base en el numeral 542.2.3.2.3 de las Prescripciones Técnicas de Carreteras en España, se tiene para vías de tránsito T3 y arcenes, se exige mayor o igual a 90% y cuando es T4 el valor es mayor o igual que 70% en capas tipo Rodadura e Intermedia.

3.6.1.4 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Ensayo Índice de Lajas del árido grueso (AENOR UNE-EN 933-3, 2012)

En la Tabla 5 se muestra el valor permitido que deben cumplir los áridos con el índice de lajas, dependiendo del tráfico que se servirá en la vía.

Tabla 5. Índice de lajas de árido grueso

Categoría de Tráfico Pesado			
T00	T0 a T31	T32 y arcenes	T4
<=20	<=25	<=30	

Fuente: Tomado textual (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015)

El índice de lajas (FI) de las distintas fracciones de árido grueso deberá cumplir con valores menores iguales a 30% para tránsitos T32 y T4.

3.6.1.5 Coeficiente de los ángeles, (LA) del árido grueso, método 2 para la determinación de la resistencia a la fragmentación (AENOR UNE-EN 1097-2, 2010)

En cuanto a la resistencia a la fragmentación del árido grueso o coeficiente de los ángeles, se presenta los requisitos para los áridos gruesos en la Tabla 6.

Tabla 6. Coeficiente de Los Ángeles en el árido grueso

Tipo de capa	Categoría de Tráfico				
	T00 y T0	T1	T2	T3 y arcenes	T4
Rodadura	<=20			<=25	
Intermedia		<=25			<=25(*)
Base	<=25		<=30		NA

Fuente: Tomado textual (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015)

Este ensayo empleado para la determinación de la resistencia a la fragmentación de los áridos gruesos en concreto para el control de producción en planta. LA, es el coeficiente de Los Ángeles. En niveles de tránsito T3 y arcenes o T4 el valor debe ser menor o igual a 25%, cuando se tiene una capa intermedia.

$$LA = \frac{5000 - m}{50}$$

Dónde, m: es la masa retenida por el tamiz de 1,6 mm, expresada en gramos. Se registra el resultado redondeado entero más próximo.

Los áridos no deben ser susceptibles a ningún tipo de meteorización o alteración físico – química apreciable bajo las condiciones más desfavorables (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015). Para el caso de agregados finos, el coeficiente recomendado está indicado en la Tabla 7.

Tabla 7. Coeficiente de Los Ángeles en el árido fino

Tipo de capa	Categoría de Tráfico				
	T00 y T0	T1	T2	T3 y arcenes	T4
Rodadura	<=20		<=25		
Intermedia	<=25			<=25(*)	
Base	<=25		<=30		NA

Fuente: Tomado textual (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015)

3.6.1.6 Contenido de Impurezas (AENOR UNE-EN 933-1, 2020)

El árido grueso deberá estar exento de terrones de arcilla, materia vegetal, marga u otras materias extrañas que puedan afectar a la durabilidad de la capa. En cuanto al árido fino, será inferior al cinco por mil (0,5%) en masa.

3.6.2 Caracterización del ligante bituminoso en España

En la Parte 2ª Materiales básicos (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015) se presentan las recomendaciones que debe cumplir los ligantes bituminosos usados en la investigación y se clasifican dentro de los llamados convencionales (Norma UNE-EN 12591, 2009).

Para el caso de España por pertenecer a la Comunidad Europea se han armonizado las condiciones con fines de comercialización. Es por eso que todos los betunes deben tener el marcado CE, para garantizar que cumpla con las disposiciones de calidad exigidas.

Los ligantes hidrocarbonados son aglomerantes constituidos por mezclas complejas de hidrocarburos. A elevadas temperaturas es un fluido newtoniano, ya que tiene carácter termoplástico que hace que su consistencia dependa de la temperatura. Como el betún es un sistema coloidal especialmente tipo gel que es sólido a temperatura ambiente y para ser usado requiere un calentamiento previo. El betún asfáltico es un residuo del proceso de refinación del petróleo. Dependiendo de la zona térmica estival y de la categoría del tráfico pesado, el betún recomendado a usar en diferentes capas de concreto asfáltico se muestra en la Tabla 8. Para tipo de tráfico, tipo de mezcla ver la Tabla 9 y la Tabla 10.

Tabla 8. Tipo de Betún en capa de Rodadura y siguientes

Zona	Categoría de Tráfico Pesado para Capas de Rodadura y Siguietes					
	T00	T0	T1	T2 y T31	T32 y arcenes	T4
Térmica Estival	Cálida	B40/50	B40/50	B40/50	B60/70	B60/70
		BC35/50	B60/70	B60/70	BC50/70	B80/100
		BM-2	BC35/50	BC35/50		BC50/70
		BM-3c	BM-2	BC50/70		
			BM-3b	BM-3b		
			BM-3c			
Media		B40/50		B60/70		
		B60/70		BC50/70		
		BC35/50		BM-3b		
		BC50/70				
		BM-3b			B60/70	
		BM-3c			B80/100	
Templada		B40/50		B60/70	BC50/70	
		B60/70		B80/100		
		BC35/50		BC50/70		
		BC50/70		BM-3b		
		BM-3b				
		BM-3c				

Fuente: Tomado textual (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015)

:

Tabla 9. Categoría de Tráfico Pesado En Capa de Base bajo otras Dos

Zona Térmica	Categoría de Tráfico Pesado En Capa de Base bajo otras Dos			
	T00	T0	T1	T2 yT3
Estival	B40/50		B40/50	B60/70
	B60/70		B60/70	BC50/70
Media	BC35/50		BC35/50	B60/70
	BC50/70		BC50/70	B80/100
	BM-2			BC50/70
Templada		B40/50		B80/100
		B60/70		
		B80/100		
		BC35/50		
		BD50/70		

Fuente: Tomado textual (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015)

Tabla 10. Tipos de Mezcla Categoría de Tráfico Pesado

Tipo de Mezcla	Categoría de Tráfico Pesado				
	T00 y T0	T1	T2(*) y T31	T32 y arcenes	T4
Discontinua	BM-3c	BM-3c	BM-3b	B60/70	
		BM-3b	B60/70	B80/100	
			BC50/70	BC50/70	
Drenante	BM-3c	BM-3c	BM-3 ^a	B60/70	
		BM-3e	BM-3b	B80/100	
		BM-3b	B60/70	BC50/70	
			BC50/70		

Fuente: Tomado textual (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015)

Nota: La letra “c” significa caucho procedente de neumáticos fuera de uso, agente modificador

Si el tráfico es T1 y T2 el betún a usar es el PMB 15/25, mientras tanto para las categorías T00 y T0 el ligante asfáltico a emplear es PMB10/40-70.

Para mejorar el comportamiento de la mezcla asfáltica especialmente a la fatiga o a la adherencia se incorporan materiales modificadores que proporcionan características adicionales para mejorar el comportamiento en la mezcla (ver Tabla 11).

Tabla 11. Dotación mínima del betún en porcentaje en masa incluido el llenante

Tipo de capa	Tipo de Mezcla	Dotación Mínima (%)
Rodadura	Densa y Semidensa	4.50
Intermedia	Densa y Semidensa	4.00
	Alto módulo	4.60
Base	Semidensa y Gruesa	3.65
	Alto Módulo	4.75

Fuente: Tomado textual (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015)

Con la curva reológica del asfalto se determina la temperatura de mezcla y de compactación, generalmente el proveedor o el laboratorio puede comprobar la temperatura de establecida de acuerdo con las propiedades existentes. Para un betún asfáltico de Penetración de 35/50, (Norma UNE-EN 1426, 2015) la temperatura de mezcla a la salida del mezclador debe estar entre 140°C y 180°C y para la temperatura de compactación se tiene entre 130°C y 170°C.

3.6.3 Caracterización de agregados siguiendo la normativa colombiana

El agregado se caracteriza teniendo como base los ensayos que deben aplicarse al agregado para conocer la viabilidad de uso y que están contemplados en las Normas de Ensayos del Ministerio de Transporte de Colombia (Instituto Nacional de Vías, 2013). En el caso colombiano se establece la clasificación de las vías de acuerdo con el número de ejes equivalentes incluidos en el artículo 100 -13 (ver Tabla 12) (Instituto Nacional de Vías, 2013).

En la Tabla 13 del artículo 450 – 13, (Instituto Nacional de Vías, 2013) se resume las condiciones de calidad que debe cumplir el agregado para ser usado en mezcla asfáltica. Se ha resaltado la especificación para la cual se ha escogido en concordancia con los resultados encontrados en España en la fase inicial.

Tabla 12. Niveles de Tránsito para Carreteras

Nivel de Tránsito	Número de ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño, N80kN, millones
NT1	$N80kN \leq 0.5$
NT2	$0.5 < N80kN \leq 5.0$
NT3	$N80kN > 5.0$

Fuente: Tomado textual (Instituto Nacional de Vías, 2013)

A continuación, se presenta la Tabla 13, que resume los requisitos que debe cumplir todo agregado que será usado en la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua.

Tabla 13. Requisitos de los Agregados para Mezclas Asfálticas en Caliente de Gradación Continua

Característica	Norma de ensayo	Nivel de tránsito		
		NT1	NT2	NT3
Dureza, agregado grueso (O)				
Desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%)		25/35/-	25/35/35	
- Capa de: rodadura / intermedia / base, 500 revoluciones	E-218-	5/7/-	5/7/7	25 / 35 / 35
- Capa de: rodadura / intermedia / base, 100 revoluciones				5/7/7
- Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238	-	25/30/30	20/25/25
- Capa de: rodadura / intermedia / base				
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos, capa de: rodadura / intermedia / base		-	-	
- Valor en seco, mínimo (kN)	E-224			110/90/75
Relación húmedo/seco, mínima (%)				75/75/75
Coefficiente de pulimiento acelerado para rodadura, mínimo	E-232	0.45	0.45	0.45
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso, máximo (%)	E-220	18	18	18
Limpieza, agregado grueso (F)				
Impurezas en agregado grueso, máximo (%)	E-237	0.5	0.5	0.5
		NT1	NT2	NT3
Limpieza, gradación combinada (F)				
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	50	50	50
Valor de azul de metileno, máximo	E-235	10	10	10
Geometría de las partículas, agregado grueso (F)				
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	E-240	10	10	10
Caras fracturadas, mínimo (%)				
- Una cara: rodadura / intermedia / base	E-227	75/60/-	75/75/60	85/75/60
Dos caras: rodadura / intermedia / base		-/-/-	60/-/-	70/-/-
Geometría de las partículas, agregado fino (F)				
Angularidad de la fracción fina, método A, mínimo (%)	E-239			
- Capa de: rodadura / intermedia / base		40/35/-	45/40/35	45/40/35

Fuente: Tomado textual (Instituto Nacional de Vías, 2013)

Como se mencionó en apartados anteriores, en esta tesis se ha tomado una mezcla semidensa, para ser usada en vías con volúmenes de tránsito bajo o medios y que cumple lo contemplado en la Tabla 14.

Tabla 14. Franja Granulométrica para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua en estudio

Tipo de Mezcla	TAMIZ (mm / U.S. Standard)									
	37.5"	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.180	0.075
	1½"	1"	¾"	½"	⅜"	No.4	No.10	No.40	No.80	No.200
	% PASA									
Semidensa Msc-25	100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7	
Tolerancias			4%				3%		2%	

Fuente: Tomado textual (Instituto Nacional de Vías, 2013)

3.6.3.1 Caras fracturadas (I.N.V E-227, 2013)

Es muy importante la forma de los agregados o áridos, por eso que en este ensayo se considera la apariencia del agregado con el fin de determinar si hay árido que no haya sido triturado con el fin de maximizar la resistencia al corte, incrementando la fricción y una mayor estabilidad a los agregados usados. Tener en cuenta que puede usarse número de partículas o áridos o la masa de cada uno de los grupos clasificados. Es un ensayo de medición de la geometría de las partículas. De acuerdo a las especificaciones puede desarrollarse para identificación de una o dos caras y para capas de rodadura, intermedia o base.

$$P = \frac{F}{F + N} * 100$$

Dónde:

F: Número de áridos fracturados. Se puede especificar la cantidad de caras como variable de valoración.

N: Número de áridos no fracturados.

P: Porcentaje de áridos con el número especificado de caras fracturadas.

3.6.3.2 Proporción de partículas planas y alargadas en agregados gruesos (I.N.V. E-240, 2013)

Para la construcción de pavimentos, la forma de los agregados es muy importante, por eso dependiendo del tamaño se obtiene una muestra para analizar si predominan las partículas largas y planas. Se obtiene un porcentaje con base en la cantidad de partículas o con base en el peso. Para un pavimento no es muy conveniente los agregados largos ni planos, ya que estos últimos ofrecen baja resistencia. Es un ensayo de medición de la geometría de las partículas. De acuerdo a las especificaciones puede desarrollarse para identificación de una o dos caras y para capas de rodadura, intermedia o base.

$$P = \frac{N}{T} * 100$$

Dónde:

P: Porcentaje de partículas con el número especificado de partículas planas o alargadas.

N: Número de partículas planas o alargadas.

N: Total de partículas

3.6.3.3 Desgaste de la máquina de los ángeles (I.N.V E-218, 2013)

Una de las propiedades más importante que debe medirse en los áridos es la dureza. En el ensayo de desgaste se simula el tránsito, la acción de sus cargas repetitivas y sus efectos abrasivos internos sobre los materiales. Con la diferencia del peso de las muestras antes y después de ser sometidas a las revoluciones que pueden ser 100 o 500 en el tambor destinado para la degradación con ayuda de esferas metálicas de abrasión. El ensayo se realiza en seco, se calcula la dureza de los agregados o áridos. En la normativa se identifica diferente especificación para agregados para rodadura, intermedia y base, según la posición de la capa dentro del concreto asfáltico completo.

$$P = \frac{P1 - P2}{P1} * 100$$

Dónde:

P: Porcentaje de pérdida por desgaste

P2: Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre tamiz de abertura aproximada a 1.70 mm (N° 12) en g.

P1: Masa de la muestra seca antes del ensayo, en g

3.6.3.4 Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval (I.N.V. E-238, 2013)

Este ensayo consiste en obtener la resistencia y durabilidad de los agregados gruesos a la abrasión y fricción entre el material en estado de saturación y su carga abrasiva, debido que su desempeño mecánico es más crítico que cuando se encuentra seco. También existe diferencia en la especificación para capas de rodadura, intermedia o base.

$$\text{Porcentaje de pérdidas} = \frac{A - B}{A} * 100$$

Donde: **A** = Masa seca antes del ensayo **B** = Masa seca después del ensayo

3.6.3.5 Resistencia mecánica por el método del 10% de finos (I.N.V. E-224, 2013)

Para conocer la degradación mecánica del agregado o árido se utiliza el aplastamiento mediante un esfuerzo de compresión para producir 10% de finos. Este laboratorio radica su importancia debido a que los pavimentos soportan altas cargas de tránsito. Puede hacerse en condición seca

y/o húmeda. Se clasifica el resultado por capa de rodadura, intermedia o de base. Este ensayo pertenece a los que miden la dureza de los materiales.

$$m = \frac{m2}{m1} * 100$$

$$F = \frac{14f}{m + 4}$$

Dónde:

m: Porcentaje del material que pasa por el tamiz #8

m1: Muestra seca antes del ensayo

m2: Masa de la muestra pasante del tamiz #8

F: Fuerza requerida para producir 10% de finos

Se debe tener en cuenta la relación húmeda seca, que consiste en:

$$R = \frac{F_H}{F_S} * 100$$

Dónde:

R: Es la relación húmeda/seca

FH: Fuerza en condición húmeda

FS: Fuerza en condición seca

3.6.3.6 **Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso (%) (I.N.V. E-220, 2013)**

Por medio del pesado, lavado y secado se simula efectos de la humedad y el clima en el agregado por medio de la acción del sulfato de sodio o magnesio durante cinco (5) ciclos de aproximadamente 18 horas. Este ensayo mide la durabilidad de los agregados.

$$\text{Perdida Total: } \frac{\text{Peso de la fracción} - \text{Peso retenido después del ciclo}}{\text{Peso de la fracción}} * 100$$

3.6.3.7 **Impurezas en agregado grueso (%) (I.N.V E-237, 2013)**

Otro de los ensayos de caracterización, que sirve para medir las partículas presentes de arcillas y limos en el agregado, debido a que son nocivas, principalmente en la adherencia, de la mezcla asfáltica. Es un ensayo que mide la limpieza de los materiales.

$$W = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

Dónde:

M_h : Masa húmeda

M_s : Masa seca de la fracción húmeda

W : Humedad

$$M_{se} = \frac{M_{he}}{1 + W}$$

Dónde:

M_{se} : Masa seca para determinar la impureza superficial

M_{he} : Masa húmeda para determinar la impureza superficial

W : Humedad

$$I = M_{se} - m$$

Dónde:

I : Impurezas

M_{se} : Masa seca para determinar la impureza superficial

m : Masa secada al horno

$$\text{Coeficiente de limpieza superficial} = \frac{I}{M_{se}} * 100$$

Dónde:

I : Impurezas

M_{se} : Masa seca para determinar la impureza superficial

3.6.3.8 Índice de plasticidad (%) (I.N.V E-125 y E-126, 2013)

El índice plástico es la diferencia entre Límite Líquido y Límite Plástico. Cuando el comportamiento de un suelo cambia de frágil a plástico, se dice que esa cantidad de agua corresponde a cuando el suelo se encuentra en el límite plástico. El límite líquido es el contenido de agua en la que el suelo se hace menos viscoso logrando que fluya por su propio peso pasando por el estado plástico. A continuación, el cálculo para el límite líquido.

$$\text{Contenido de agua} = \frac{\text{Masa del agua}}{\text{Masa del suelo pesado al horno}} * 100$$

$$LL = W_N * \left[\frac{N}{25} \right]^{0.121}$$

Donde:

LL = Límite líquido

W_N = Contenido de agua

N = Número de golpes para que la ranura cierre

3.6.3.9 Equivalente de arena (%) (I.N.V E-133, 2013)

Está dentro de los llamados ensayos de limpieza, de gradación combinada, ya que se evalúa el exceso de partículas finas (arcilla) encontradas en el agregado fino, pues son indeseables por alterar la granulometría y provocan la pérdida de adherencia entre el agregado y el asfalto, lo cual repercute en el contenido óptimo de ligante. El ensayo azul de metileno confirma el resultado del equivalente de arena cuando hay dudas en los resultados del mismo. La forma de calcular el valor de equivalente de arena es:

$$EA = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} * 100$$

3.6.3.10 Angularidad de la fracción fina (%) (I.N.V E-239, 2013)

La porción fina de los agregados este ensayo de laboratorio proporciona el porcentaje de vacíos, el cual sirve de indicador para evitar fallas de ahuellamiento y deformaciones plásticas en el pavimento. Con este experimento se evalúa la geometría de las partículas finas.

$$V = \pi * R^2 * H$$

Donde

R: Es el radio

H: Es la altura

$$U = \frac{V - \left(\frac{F}{G}\right)}{V} * 100$$

Donde

V: Volumen del medidor cilíndrico, ml

F: Masa neta del agregado fino en el medidor, g (masa bruta menos la masa del recipiente vacío)

G: Densidad relativa seca (gravedad específica) del agregado fino

U: Porcentaje de vacíos en el agregado fino sin compactar.

$$U_s = \frac{U_1 + U_2}{2}$$

Donde:

U_s = Promedio de los ensayos

U_1 = Ensayo 1

U_2 = Ensayo 2

3.6.3.11 Densidad relativa de agregado fino y grueso SH, con su respectivo porcentaje de absorción. (I.N.V E-222, 2013) (I.N.V E-223, 2013)

La densidad es una propiedad física que determina cuando los poros de las partículas están saturados o no y dependiendo de su permeabilidad se pueden encontrar vacíos parcialmente saturados o totalmente llenos de agua. El porcentaje de absorción que se calcula con el aumento en el peso de los agregados debido al agua en los poros del material con superficie seca exterior de las partículas. Se muestra en la ecuación el cálculo de las densidades por el método gravimétrico en agregados finos.

Símbolos:

A: Masa al aire de la muestra seca al horno, g.

B: Masa del picnómetro aforado lleno de agua.

C: Masa total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua, g.

S: Masa de la muestra saturada y superficialmente seca (usada para hallar la densidad y densidad relativa en el procedimiento gravimétrico o la absorción en ambos procedimientos, g.

S1: Masa de la muestra saturada y superficialmente seca añadida al frasco (usada para hallar la densidad y la densidad relativa en el procedimiento volumétrico).

La siguiente fórmula permite conocer las densidades por el método gravimétrico en agregados finos.

$$SH = \frac{997,5 A}{(B + S - C)}; \frac{Kg}{m^3}$$

$$SSS = \frac{997,5 S}{(B + S - C)}; \frac{Kg}{m^3} \quad \text{Densidad aparente} = \frac{997,5 A}{(B + A - C)}; \frac{Kg}{m^3}$$

$$\text{Absorción, \%} = \frac{S - A}{A} \times 100$$

Y con esto se conoce las densidades en agregados gruesos

$$SH: \frac{997,5 A}{(B - C)} ; kg/m^3$$

$$SSS: \frac{997,5 B}{(B - C)} ; kg/m^3$$

$$Densidad aparente = \frac{997,5 A}{(A - C)} ; Kg/m^3$$

$$Arbsorción, \% = \frac{B - A}{A} \times 100$$

3.6.3.12 Análisis Granulométrico de los agregados grueso y fino (I.N.V E-213, 2013)

Con este ensayo se determina la distribución de tamaños de las partículas de un material por medio de un procedimiento de tamizado. Siguiendo la normativa establecida, cuando ya el material ha sido preparado se hace pasar por los tamices y a continuación se presenta la forma de calcular los diferentes porcentajes necesario para la ejecución de la curva granulométrica. La Tabla 14. Franja Granulométrica para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua en estudio, numeral 3.6.1, establece los porcentajes límites para cada tipo de mezcla según la presencia de estos tamaños en el material, muestra los rangos en donde debe estar enmarcada la fórmula de trabajo o la línea granulométrica que se ha formado del material ensayado, el cual no debe estar por fuera de los rangos establecidos.

Porcentaje retenido en cada fracción

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Masa retenida}}{\text{Masa total de la muestra ensayada}}$$

Porcentaje retenido acumulado

$$\begin{aligned} \% \text{ Retenido Acumulado}_{\text{Inicial}} &= \% \text{ Retenido en el primer tamiz que retuvo material} \\ \% \text{ Retenido Acumulado} &= \% \text{ Retenido tamiz anterior} + \% \text{ Retenido en el tamiz} \end{aligned}$$

Porcentaje que pasa

$$\% \text{ Pasa} = 100 - \% \text{ Retenido Acumulado}$$

3.6.4 Caracterización del cemento asfáltico en Colombia

Teniendo en cuenta el capítulo 4 de las especificaciones técnicas de construcción de Colombia (Instituto Nacional de Vías, 2013) se presenta a continuación los diferentes ensayos que se requieren para que el ligante pueda ser utilizado en la mezcla asfáltica en caliente.

3.6.4.1 Penetración (I.N.V. E-706, 2013)

El ensayo de penetración se usa para medir la consistencia de los materiales bituminosos. Se expresa como la distancia, en decimas de milímetro, en la cual una aguja penetra verticalmente el material. Normalmente este ensayo se realiza a 25° C (77°F), durante un tiempo de 5 segundos. El valor alto indica que es blando el asfalto.

3.6.4.2 Punto de ablandamiento °C (I.N.V E-712, 2013)

Es la temperatura en que el asfalto pierde dureza, es decir, con un aumento de temperatura adquiere consistencia blanda. El punto de ablandamiento se considera como el valor medio de las temperaturas a las cuales el material bituminoso que envuelve dos discos con su correspondiente esfera se ablanda lo suficiente para que cada bola envuelta en material bituminoso caiga una distancia de 25 mm.

3.6.4.3 Índice de penetración (I.N.V E-724, 2013)

El fundamento de este método va enlazado con la temperatura del punto de ablandamiento, considera que la penetración de un cemento asfáltico es 800 (0.1mm), los valores de la penetración deben estar en función de la temperatura y se presentan por una línea recta. El índice de penetración es fundamental para la clasificación del asfalto (verTabla 15).

El valor de índice de penetración se obtiene mediante la expresión:

$$IP = \frac{20 - 10f}{1 + f}$$

Siendo:

$$f = \frac{50 * \log \frac{800}{P}}{T - 25}$$

Dónde:

T : Punto de ablandamiento, °C

P : Penetración en 0,1 mm a 25°C

<u>Rango de valores</u>	<u>Características</u>
IP > 1	Poca susceptibilidad a la temperatura presenta cierta elasticidad. Se denomina tipo gel o soplado
IP < -1	Alta susceptibilidad a la temperatura, ricos en resinas y con comportamientos viscosos
1 > IP > -1	Características intermedias entre los dos tipos anteriores, son los que generalmente se utilizan para los proyectos relacionados con la construcción de carretera

Tabla 15. Clasificación del cemento asfáltico de acuerdo con índice de penetración.

Fuente: Tomado textual (Instituto Nacional de Vías, 2013)

3.6.4.4 **Viscosidad (I.N.V E-717, 2013)**

El coeficiente de viscosidad se define entre la división entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte, es una medida de la resistencia a fluir.

Para el cálculo de la viscosidad del asfalto se usa el promedio de las tres (3) mediciones a una temperatura de 60°C con el viscosímetro rotacional contemplando los parámetros de velocidad, torque y su respectiva temperatura.

El asfalto o betún es un material viscoelástico que requiere la construcción de las curvas reológicas. Se determina la temperatura de mezclado en laboratorio y en campo correspondiente a una viscosidad de 150 a 190 cSt (0.15 a 0.19 Pa·s) aproximadamente (145°C – 150°C) y para la temperatura de compactación en laboratorio se toma la viscosidad de 25 a 31 cSt (0.25 a 0.31 Pa·s) aproximadamente 133°C y 137°C.

Puede haber modificantes para mejor comportamiento para la viscosidad, aditivos para retener el cemento asfáltico en la matriz de la mezcla mientras ella endurece.

3.6.4.5 **Ductilidad (I.N.V E-702, 2013)**

Consiste en someter una probeta del material asfáltico a un ensayo de tracción, en condiciones normalizadas de velocidad y temperatura, en un baño de agua, definiéndose la ductilidad como una longitud máxima, en cm, que se estira la probeta hasta el instante de su rotura. Este ensayo permite medir las propiedades a tensión de material bituminoso y se usa para establecer si el producto cumple con las especificaciones correspondientes.

Por ejemplo, con el grado de penetración correspondiente a 60/70, se tiene el criterio que su ductilidad no reporte valores menores a 100 cm.

3.6.4.6 **Punto de inflamación, mediante copa abierta de Cleveland (I.N.V E-709, 2013)**

Se hace bajo incrementos de temperatura paulatinos, en donde se toma como punto o temperatura a la cual el ligante empieza el proceso de chispa y por lo tanto el inicio de su posible combustión.

3.6.4.7 **Densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos (método del picnómetro) (I.N.V E-707, 2013)**

Es la relación entre el peso del material y el volumen del agua, se usa como criterio para determinar el porcentaje de vacío de una mezcla asfáltica.

$$Densidad = \frac{M}{\Delta V}$$

Dónde:

M: Masa

ΔV : Volumen

$$\text{Densidad Relativa} = \frac{(C - A)}{[(B - A) - (D - C)]}$$

Donde:

A: Masa del picnómetro

B: Masa del picnómetro lleno de agua

C: Masa del picnómetro parcialmente lleno con asfalto

D: Masa del picnómetro con asfalto y agua

$$\text{Densidad} = \text{Densidad Relativa} * W_T$$

Donde:

W_T: Densidad del agua

Finalmente se presenta la Tabla 16 que resume los ensayos y las especificaciones técnicas de construcción del cemento asfáltico.

Tabla 16. Especificaciones requeridas para el cemento asfáltico

Característica	Norma de ensayo INV	Grado de penetración					
		40-50		60-70		80-100	
		MÍN	MÁX	MÍN	MÁX	MÍN	MÁX
Penetración (25° C, 100 g, 5 s), 0.1 mm	E-706	440	550	660	770	880	1100
Punto de ablandamiento °C	E-712	552	558	448	554	445	552
Índice de penetración	E-724	--1,2	+0,6	--1,2	+0,	--1,2	+0,6
Viscosidad absoluta (60°C), P	E-716 o E-717	220000		115000		110000	
Ductilidad (25° C, 5cm/min), cm	E-702	880	-	1100	-	1100	-
Solubilidad en tricloroetileno, %	E-713	999	-	999	-	999	-
Contenido de agua, %	E-704	-	00,2	-	00,2	-	00,2
Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland, °C	E-709	2240	-	2230	-	2230	-
Contenido de parafinas, %	E-718	-	33	-	33	-	33

Fuente: Tomado textual (Instituto Nacional de Vías, 2013)

3.6.5 Obtención del porcentaje óptimo de betún en la mezcla asfáltica según normativa en España

Para el diseño de la mezcla bituminosa se ha considerado el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015). Para ello se debe obtener la fórmula de trabajo en el laboratorio y debe verificarse en planta teniendo previamente las siguientes consideraciones:

- Alistamiento de los áridos en caliente
- Alistamiento de acuerdo en la granulometría de los áridos combinados

- Control de la dosificación del polvo mineral tanto en aportación como en recuperación expresada con aproximación de uno por mil
- Dosificación adecuada del ligante hidrocarbonado
- Definición de las temperaturas de calentamiento previo de áridos y ligante. Con una diferencia de calentamiento no mayor a 15°C. La temperatura del ligante no podrá ser mayor a 165°C.

El tipo y composición de la mezcla teniendo como base la diferenciación de las mezclas con el tamaño máximo de árido con los husos granulométricos designados. Dependiendo del tipo de granulometría será una mezcla Densa, se identificará con la letra D, si la mezcla es Semidensa, se identificará con la letra S, o si es Gruesa, con la letra G, y las mezclas de alto módulo, con las letras MAM.

La mezcla también se identificará con AC, porque es una mezcla de hormigón bituminoso y tendrá los números correspondientes al tamaño máximo del árido, expresado como la abertura del tamiz que deja pasar entre el 90-100% del total del árido.

Por otro lado, se usa las abreviaturas surf/bin/base relativas al tipo de capa de empleo del concreto asfáltico, superficie de rodadura, surf, intermedia, bin, base, base.

Por último, el tipo de ligante también está incluido en la nomenclatura a usar en la mezcla por lo que debe especificarse.

La fórmula de trabajo se fijará con la proporción de cada fracción del árido, después de la clasificación en caliente. La granulometría tendrá en cuenta la Tabla 2 la cual considera la abertura de los tamices y la dosificación del ligante será referida a la masa de la mezcla total. Se establecerán las temperaturas máxima y mínima. La mezcla se realizará con una diferencia de 15°C máximo entre el ligante y el árido, siendo el ligante el de mayor temperatura. La temperatura de mezclado será la que coincide con una viscosidad de 150-300 cps. La mínima temperatura de la mezcla no será inferior a 130°C.

Con la fórmula de trabajo debe cumplir con las propiedades de los siguientes numerales para obtener el porcentaje óptimo de betún.

3.6.5.1 **Contenido de huecos, y densidad aparente asociada a ese valor**

Las probetas de las mezclas con tamaño nominal D inferior o igual a veintidós milímetros ($D \leq 22$ mm), se pueden construir con compactación consistente en impactos de 75 golpes por cara con martillo.

De acuerdo con la (Norma UNE - EN - 12697 - 8, 2012) se define el rango dentro del cual es válido cumplir el parámetro de contenido de huecos en probetas construidas por impactos.

Tabla 17. Contenido de Huecos en Mezcla

CARACTERÍSTICAS		CARACTERÍSTICA DE TRÁFICO PESADO			
		T00 Y T0	T1 Y t2	T3 y ARCENES	T4
HUECOS EN MEZCLA (%)	CAPA DE RODADURA	4 - 6		3 - 6	
	CAPA INTERMEDIA	4 - 6	4 - 7	4 - 7	4 - 7
	CAPA DE BASE	4 - 7	4 - 8	4 - 8	

Fuente: Tomado textual (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015)

En el mismo numeral (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015) el contenido de huecos en áridos en mezclas de tamaño máximo 22 mm debe ser mayor o igual al catorce por ciento (14 %).

3.6.5.2 Resistencia a la deformación permanente

Para la determinación de la resistencia a la deformación plástica mediante ensayo de pista de laboratorio sigue la norma UNE (UNE - EN 12697 - 22, 2011) con el procedimiento B en aire, a una temperatura de sesenta grados Celsius (60°C) con una duración de diez mil (10000) ciclos y con probetas construidas mediante el compactador de placa con el dispositivo de rodillo de acero, con una densidad superior al noventa y ocho por ciento (>98%) de la obtenida en probetas cilíndricas compactadas por impacto. Ver Tabla 18. Este ensayo debe aplicarse cuando la mezcla es producida en una central industrial de fabricación de aglomerado bituminoso.

Tabla 18. Pendiente media de deformación en pista (WTS Aire) y profundidad media (expresado en %) de la rodera (PRDAIRE) en el intervalo de 5 000 a 10 000 ciclos para capas de rodadura e intermedia.

Zona	Característica De Tráfico Pesado				
	T00 Y T0	T1	T2	T3 y arcenes	T4
Térmica Estival					
Cálida	≤ 0,07		≤ 0,07	≤ 0,10	
Media	≤ 0,07	≤ 0,07	≤ 0,10	≤ 0,15	
Templada	≤ 0,10		≤ 0,10		

Fuente: Tomado textual (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015)

3.6.5.3 Sensibilidad al agua

Este ensayo permite evaluar la adhesividad árido – ligante mediante la caracterización de la acción del agua. La resistencia de tracción indirecta tras inmersión, realizado a 15°C, tendrá un valor mínimo del ochenta por ciento (ITSR ≥ 80%) para capas de base e intermedia. En mezclas de tamaño máximo no mayor de veintidós milímetros, 22 mm, la ejecución de las probetas se hará usando 50 golpes por cara (norma UNE - EN 12697 - 12, 2019). Con los anteriores ensayos de laboratorio se determina el porcentaje óptimo cumpliendo en calidad con cada una de las condiciones mencionadas, inicialmente con el porcentaje en huecos de la mezcla, luego con el porcentaje en huecos de los áridos y finalmente con la sensibilidad al agua.

3.6.6 Obtención preliminar del porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla asfáltica según normativa en Colombia

El objetivo del diseño de la mezcla asfáltica es la selección del contenido óptimo de aglutinante que se requiere dependiendo del tráfico, el clima y la competencia de los materiales locales utilizados.

Una vez se consigue la gradación del material de acuerdo con el tipo de mezcla, se prueban varios contenidos de asfalto diferentes para varios criterios volumétricos y de resistencia para seleccionar el contenido óptimo de ligante. Los resultados de la prueba siempre deben informarse como el promedio de tres muestras compactas.

El procedimiento para el método Marshall comienza con la preparación de muestras de prueba. Los pasos preliminares para la preparación de muestras son:

- las combinaciones de mezclas agregadas deben cumplir con los requisitos de gradación de las especificaciones del proyecto;
- todos los materiales propuestos para su uso deben cumplir con los requisitos físicos de las especificaciones del proyecto; y
- con el propósito de realizar análisis de densidad y vacíos, la gravedad específica a granel de todos los agregados utilizados en la mezcla y el peso específico deben haberse desarrollado. Se determina la gravedad del cemento asfáltico.

Las dos características principales del método Marshall de diseño de mezclas son un análisis de huecos o vacíos, de densidad y una prueba de estabilidad, de flujo de las muestras de prueba compactadas. El método Marshall utiliza probeta de prueba estándar de 63.5 mm (2 ½ in) de altura por un diámetro de 101.6 mm (4 in). Estos se preparan usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar la mezcla de asfalto-agregado.

El valor del flujo es la deformación total, en unidades de 0.25 mm (1/100 in.) que ocurre en la muestra sin carga y llevada al punto de carga máxima durante la prueba de estabilidad. La estabilidad de la muestra de prueba es la resistencia de carga máxima en Newton (N) que la muestra de prueba estándar desarrollará a 60 ° C (140 ° F).

Para que las curvas de datos de prueba muestren relaciones bien definidas las pruebas deben planificarse sobre la base de incrementos de 0.5 por ciento del contenido de asfalto.

El contenido de asfalto de diseño esperado, en porcentaje del peso total de la mezcla, se podría estimar que es aproximadamente equivalente al porcentaje de agregado en la gradación final que pasa el tamiz de 75 µm (No. 200).

3.6.6.1 Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos (I.N.V E-733, 2013)

Este ensayo determina de la gravedad específica Bulk y la densidad de especímenes de mezclas asfálticas compactadas. Con la muestra seca y fría se determina su masa, registrándola como masa seca del espécimen en el aire (A).

Posteriormente, para determinar la masa del espécimen saturado, se sumerge en agua a 25 °C durante 3 minutos. Al final del tiempo anteriormente mencionado, se toma el dato de la masa del espécimen sumergido y se registra como masa del espécimen sumergido (C). En seguida, se saca la muestra del agua y se seca rápidamente su superficie con una toalla. Se realiza la determinación de la masa y se registra como la masa del espécimen en condición saturada superficialmente seca (SSS).

$$\text{Gravedad específica Bulk} = \frac{A}{B - C}$$

Donde:

A: Masa del espécimen seco en el aire, [g]

B – C: Masa del volumen de agua correspondiente al volumen del espécimen a 25°C, [g]

B: Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco (SSS), [g]

C: Masa del espécimen sumergido en agua, [g].

997.0 =Densidad del agua a 25° C en kg/m³ (0.9970 g/cm³). Densidad = Gravedad específica Bulk * 997.0

3.6.6.2 Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos (I.N.V E-735, 2013)

El objetivo de este ensayo es determinar la gravedad específica máxima para mezclas asfálticas a 25°C. En primer lugar, se calibra el matraz a utilizar en el ensayo. Este procedimiento se lleva a cabo llenando con agua a 25°C, masa que se registra como masa del matraz lleno con agua a 25°C (D).

Posteriormente, se ubica la mezcla en el horno para que se separe. Cuando adquiera una temperatura que permita la separación de las partículas de la mezcla esta se comienza a separar, teniendo cuidado de que no queden grumos de material fino o de fracturar las partículas gruesas de la mezcla asfáltica.

Cuando se tiene la muestra separada y lista para el procedimiento del ensayo, se introduce en el matraz anteriormente calibrado. Cabe resaltar que este debe estar totalmente seco, y se debe tener su masa o tener la balanza tarada con su peso para poder obtener el registro de la masa exacta de mezcla asfáltica que va a utilizarse para realizar el ensayo. Esta masa se registra como masa en el aire de la muestra seca (A).

Luego, se agrega agua al matraz de forma que la muestra quede totalmente sumergida. A partir de esto, se comienza el procedimiento de la remoción del aire que queda atrapado dentro de las partículas de la muestra de la mezcla asfáltica por medio de la aplicación de vacío y la agitación del matraz.

Por último, se agrega el agua necesaria para dejar el matraz lleno a la misma medida que se realiza la calibración, teniendo cuidado de mantener la temperatura del matraz en 25°C. En el momento que se encuentre a 25°C se toma la masa, la cual se registra como masa del matraz con agua y muestra (E).

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

Donde:

G_{mm} : Gravedad específica máxima de la muestra

A : Masa en el aire de la muestra seca [g]

D : Masa del frasco lleno con agua a 25°C [g]

E : Masa del frasco con agua y muestra a 25°C [g]

3.6.6.3 Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas (I.N.V E-736, 2013)

El objetivo de este ensayo es determinar el porcentaje de vacíos ocupados por el aire en mezclas asfálticas densas y abiertas compactadas.

En primer lugar, se determina la gravedad específica bulk de la mezcla compactada, mediante el procedimiento descrito en la norma INV E- 733 (I.N.V E-733, 2013).

En seguida, se determina la gravedad específica máxima sobre la mezcla asfáltica por medio del procedimiento enunciado en la INV E-735 (I.N.V E-735, 2013).

A partir de los datos mencionados anteriormente, se procede a realizar los cálculos correspondientes a esta norma.

$$V_a = \left[1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right] * 100$$

Donde:

V_a : Porcentaje de vacíos con aire en la mezcla compactada [%].

G_{mm} : Gravedad específica máxima [g/cm³].

G_{mb} : Gravedad específica bulk de espécimen compactado [g/cm³].

3.6.6.4 Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente (I.N.V E-799, 2013)

Esta norma provee los métodos para realizar el análisis volumétrico de muestras compactadas en caliente. Se hallan las masas del cemento asfáltico y agregados empleados con sus debidos porcentajes, cuyos valores sumados deben corresponder al 100%. Posteriormente se hallan las gravedades específicas Bulk del agregado fino y grueso que son utilizadas para la realización de la mezcla asfáltica. También se halla la gravedad específica del asfalto. Finalmente se calcula la gravedad específica Bulk, de la mezcla combinada con el agregado (G_{sb}).

Después, se mide la gravedad específica máxima y la gravedad específica Bulk de la mezcla. A partir de esto, se calcula la gravedad específica efectiva del agregado pétreo (G_{se}). Luego, se halla el peso absorbido como porcentaje de la masa de la mezcla (P_{ba}). De igual forma, se calcula el contenido de asfalto efectivo en porcentaje (P_{be}). También, se calcula el porcentaje de vacíos entre las partículas de agregado mineral respecto al volumen total del espécimen compactado (VAM). Por otra parte, se calcula el porcentaje de vacíos de aire respecto al volumen total del espécimen compactado (V_a). Después, se realiza el cálculo del porcentaje de vacíos llenos de ligante asfáltico (VFA). Finalmente, se halla la relación de llenante sobre ligante efectivo.

- G_{sb} : Gravedad específica bulk del agregado combinado

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

Donde:

G_{sb} : Gravedad específica Bulk del agregado combinado

P_1, P_2, P_n : Porcentajes individuales de distintos agregados que intervienen en el agregado combinado.

G_1, G_2, G_n : Gravedades específicas Bulk de las fracciones del agregado.

- G_{se} : Gravedad específica efectiva del agregado combinado.

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

Donde:

G_{se} : Gravedad específica efectiva del agregado combinado.

G_{mm} : Gravedad específica máxima de la mezcla.

P_{mm} : Porcentaje de masa de la mezcla total suelta =100.

G_b : Gravedad específica del cemento asfáltico.

P_b : Porcentaje del cemento asfáltico en la mezcla

- P_{ba} : Peso absorbido como porcentaje de la masa de la mezcla

$$P_{ba} = 100 \left[\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} \right] * G_b$$

- P_{be} : Contenido de asfalto efectivo en porcentaje

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} * P_s$$

- VAM : Vacíos entre las partículas de agregado mineral respecto al volumen

total del espécimen compactado

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} * P_s$$

G_{mb} : Gravedad específica bulk de la mezcla compactada.

G_{sb} : Gravedad específica bulk del agregado combinado.

P_s : Porcentaje de agregado en la mezcla.

- V_a : Vacíos con aire

$$V_a = 100 * \left[\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right]$$

Donde:

G_{mm} : Gravedad específica máxima de la mezcla.

G_{mb} : Gravedad específica bulk de la mezcla compactada.

- VFA: Porcentaje de vacíos llenos de ligante asfáltico

$$VFA = 100 * \left[\frac{VAM - V_a}{VAM} \right]$$

Donde:

VAM : Vacíos en el agregado mineral en la probeta compactada.

V_a : Vacíos con aire en la probeta compactada.

- Relación llenante sobre ligante efectivo

$$\frac{\text{Llenante}}{\text{Ligante efectivo}} = \frac{P_{0.075}}{P_{be}}$$

Donde:

P_{be} : Contenido de asfalto efectivo en porcentaje

$P_{0.075}$: Porcentaje del agregado que pasa el tamiz #200

Una forma gráfica de visualizar los parámetros de los Vacíos de aire, V_a , Vacíos de agregado mineral, VMA, y los Vacíos llenos de asfalto, VFA, (ver Figura 16. Esquema de la mezcla asfáltica).

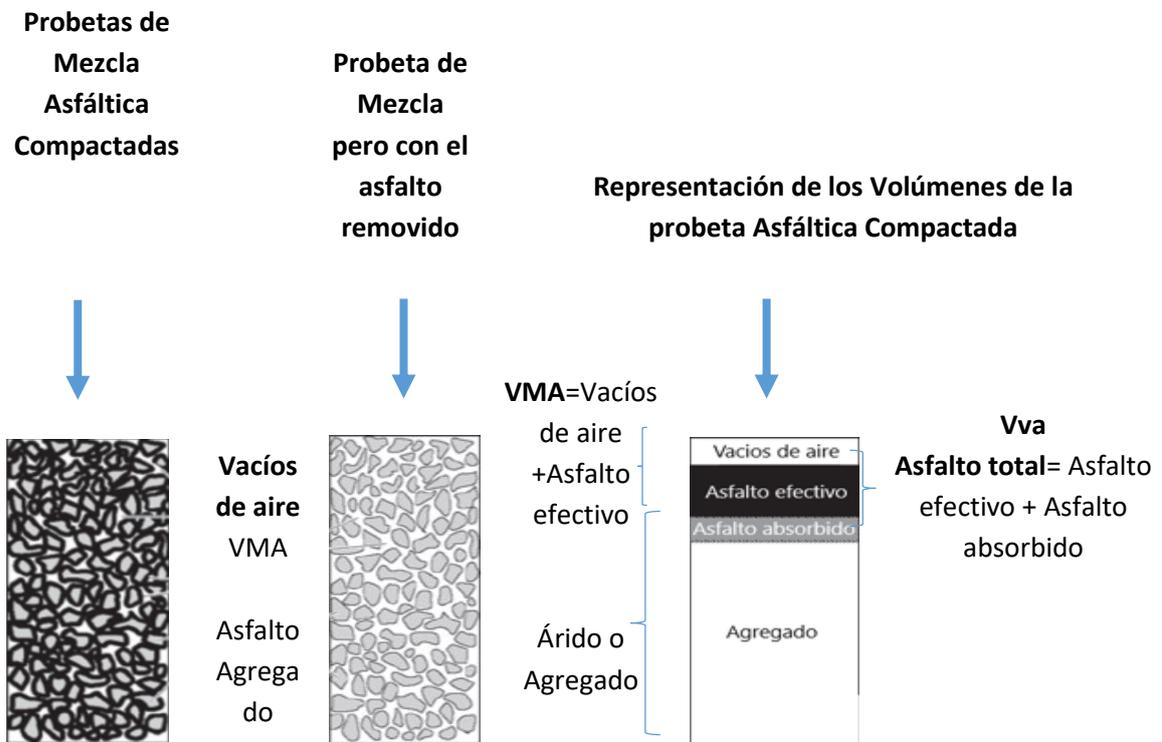


Figura 16. Esquema de la mezcla asfáltica

Fuente: Tomado textual (Asphalt Institute, 2014)

3.6.6.5 **Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall (I.N.V E-748, 2013)**

Describe el procedimiento para determinar la resistencia a la deformación plástica de especímenes en el aparato Marshall. Este ensayo aporta datos relacionados con la elaboración y comprobación de la mezcla asfáltica tales como como la estabilidad y el flujo.

Se preparan probetas con diferentes contenidos de asfalto que varían entre sí, intervalos de 0.5%. A partir de esto, se pueden realizar curvas que indican el contenido óptimo de asfalto. Se realizan tres (3) probetas por cada contenido de asfalto, las cuales deben tener un peso aproximado de 1200 g cada una.

Antes de realizar la mezcla, los agregados se dejan secando a una temperatura de 110°C por un lapso de 24 horas. El cemento asfáltico debe estar a una temperatura de aproximadamente 150°C donde presenta una viscosidad óptima para el mezclado, y de aproximadamente 140°C para el proceso de compactación.

Las probetas se elaboran cada una por separado, atendiendo las indicaciones y sugerencias propuestas por la norma. Los moldes de las probetas se calientan a una temperatura de 150°C, después se ensamblan y se coloca en su fondo un papel filtro para evitar que la muestra se desperdicie durante el proceso de compactación.

Luego de vaciar la mezcla en el molde, se pasa al proceso de compactación, para el cual se coloca el conjunto de mezcla-molde en el pedestal de compactación del martillo mecánico. Se le dan 75 golpes por cada cara a la muestra para compactarla.

Se retira el collar y la placa del molde. Luego se espera hasta el otro día mientras la muestra se enfría para poder pasar a retirarla del molde y de allí a una superficie lisa. Luego de cumplir como mínimo con las 24 horas después de compactada, se mide la altura y diámetro de cada una de las probetas, se determina la gravedad específica Bulk, se coloca la muestra al baño maría a una temperatura de 60°C durante aproximadamente 35 minutos.

Se retira la muestra del agua y se coloca en estado superficialmente seco en la máquina de ensayo de forma centrada. A partir de esto, se aplica la carga a la probeta con la prensa a una rata de deformación constante de 50mm/min hasta que alcanza la carga máxima y cuando comienza a bajar la carga indica que se presentó la falla. Se consignan los valores correspondientes al flujo y a la estabilidad.

A continuación, se presenta el resumen de las especificaciones técnicas de construcción para el diseño preliminar por el método Marshall (ver Tabla 19).

Tabla 19. Criterios para el diseño preliminar de mezclas asfálticas en caliente de gradación continua método Marshall

Especificaciones INVIAS (artículo 450-13)						
Característica	Norma Ensayo INVIAS	Mezclas Densas, Semidensas y Gruesas			Mezcla De Alto Módulo	
		Categoría De Tránsito				
		T1	NT2	NT3		
Compactación (golpes/cara)		50	75 (112)	75 (112)	75	
Estabilidad mínima (N)		5,000	7,500 (16,875)	9,000 (33,750)	15,000	
Flujo(mm) (Nota 2)	E-748 (E-800) (Nota 1)	2.0 a 4.0	2.0 a 4.0 (3.0 a 6.0)	2.0 a 3.5 (3.0 a 5.3)	2.0 a 3.0	
Relación Estabilidad / Flujo (kN/mm)		2.0 a 4.0	3.0 a 5.0 (4.5 a 7.5)	3.0 a 6.0 (4.5 a 9.0)	-	
Vacíos con aire (Va), % (Nota 3)	Rodadura	E-736	3.0 a 5.0	3.0 a 5.0 4.0 a 6.0	NA	
	Intermedia	O E-799	4.0 a 8.0	4.0 a 7.0 4.0 a 7.0	4.0 a 6.0	
	Base		NA	5.0 a 8.0 5.0 a 8.0	4.0 a 6.0	
Vacíos en los agregados minerales (VAM), % Mínimo	T. Máx. 38 mm			13.0	-	
	T. Máx. 25 mm	E-799		14.0	14.0	
	T. Máx. 19 mm			15.0	-	
	T. Máx. 10 mm			16.0	-	
Vacíos llenos de asfalto (VFA), %		E-799	65 a 80	65 a 78 65 a 75	63 a 75	
Relación Llenante / Ligante efectivo, en peso		E-799		0.8 a 1.2	1.2 a 1.4	

Fuente: Tomado textual (Instituto Nacional de Vías, 2013)

3.6.7 Verificación y confirmación del porcentaje óptimo de asfalto en una mezcla asfáltica en Colombia

De acuerdo con lo estipulado en la Especificación General para la Construcción de Carreteras 450 (INVIAS, 2013), son las calidades de aceptación para el diseño de una mezcla asfáltica por medio del método de Marshall. En la Tabla 20 se pueden visualizar los ensayos que se requieren para confirmar el diseño de mezcla que se ha obtenido con los pasos anteriores, es decir confirmar el porcentaje óptimo de asfalto y la fórmula de trabajo de los agregados.

Tabla 20. Requisitos de la verificación del diseño Marshall

Propiedad	Norma de Ensayo INVIAS	valor	aplicabilidad
Adherencia: Resistencia retenida, % mínimo	E-725	80	Todas las mezclas
Resistencia a la deformación plástica: velocidad máxima de deformación en el intervalo de 105 a 120 minutos, $\mu\text{m}/\text{min}$.		15	Tránsito NT3: para capas de rodadura e intermedia
- Temperatura media anual del aire $> 24^{\circ}\text{C}$	E-756	20	- Mezclas de alto módulo
- Temperatura media anual del aire $< 24^{\circ}\text{C}$			
Módulo resiliente, MPa	E-749	10,000	Mezclas de alto módulo compactadas con 75 golpes por cara, valor mínimo a 20°C Opcional para otras mezclas, según documentos del proyecto

Fuente: Tomado textual (Instituto Nacional de Vías, 2013)

Como se observa el requerimiento establecido para confirmar el diseño de cualquier tipo de mezclas es el ensayo de sensibilidad al agua o de adherencia E-125-13, los demás ensayos de deformación plástica y de rigidez son requeridos si la mezcla tiene condiciones especiales como de alto módulo o es usada para vías troncales o principales que posean un tránsito de tipo NT3. A continuación, se explican cada uno de los ensayos relacionados en la Tabla 20, empezando con el de susceptibilidad al agua, continuando con el de deformación plástica y terminado con el de rigidez o módulo de resiliente.

3.6.7.1 Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (I.N.V E-725, 2013)

Establecer un procedimiento para preparar y probar especímenes de concreto asfáltico para realizar la medición de su resistencia a la tracción indirecta con el fin de evaluar su comportamiento en condiciones de humedad.

Para llevar a cabo este ensayo se realizan ocho (8) probetas tipo Marshall, las cuales deben cumplir con un porcentaje de vacíos con aire entre el 6% y el 8%. Después de verificar las condiciones de vacíos con aire correspondientes a lo indicado en la norma, las probetas se dividen en dos grupos cuyos valores promedio de vacíos con aire son similares.

Acondicionamiento para el grupo húmedo:

El subgrupo es saturado, llega a un porcentaje de saturación que entre 55% y 80%. Después de haber llegado a este porcentaje de saturación, se pasa el grupo de especímenes a un baño maría a 60°C durante aproximadamente 24 horas.

Al finalizar el tiempo del baño mencionado anteriormente, se ajusta la temperatura a los especímenes colocándolos en un baño de agua a aproximadamente 25°C durante 1 hora. Se determina el grado de saturación de los especímenes y el cambio volumétrico al terminar el periodo de acondicionamiento de la temperatura.

Acondicionamiento para el grupo seco:

Para poder realizar el ensayo al grupo seco, se ajusta la temperatura en un baño de agua a 25°C durante aproximadamente 20 minutos.

Para realizar la aplicación de la carga a los especímenes se utiliza el mismo equipo utilizado en el ensayo de estabilidad y flujo de Marshall. La única diferencia es que la aplicación de la carga es indirecta, como si se tuviera un corte de forma transversal en las probetas. Se registra la carga máxima aplicada por el equipo para realizar los cálculos correspondientes al ensayo.

Volumen de agua absorbida (V_{wa})

$$V_{wa} = \text{Masa SSS} - \text{Masa seca al aire}$$

Donde:

Masa SSS: Masa del espécimen saurado y superficialmente seco

Masa seca al aire: Masa del espécimen seco al aire (INV E – 733 – 13)

Volumen de vacíos con aire del espécimen (V_A)

$$V_A = \frac{\% \text{ Vacíos con aire} * \text{Volumen del espécimen}}{100}$$

Grado de saturación

$$\% \text{ Saturación} = \frac{V_{wa}}{V_A} * 100$$

Resistencia a la tensión (R_t)

$$R_T = \frac{2000 * P}{\pi * t * D}$$

Donde

R_T : Resistencia a la tensión [kPa]

P : Carga máxima [P]

t : Altura del espécimen inmediatamente antes de la prueba [mm]

D : Diámetro del espécimen [mm]

Relación de resistencias a tensión (RRT)

$$RRT = \left[\frac{R_{TH}}{R_{TS}} \right] * 100$$

Donde:

RRT : Relación de resistencias a la tensión [%]

R_{TH} : Resistencia promedio a la tensión grupo humedo

R_{TS} : Resistencia promedio a la tensión grupo seco

3.6.7.2 Resistencia a la Deformación Plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio (INV 756-13, 2013)

Este ensayo tiene como objetivo evaluar aspectos tales como la estructura, la rigidez y el daño por humedad del pavimento. Esto anterior, dado a partir de la medición de la deformación en condiciones determinadas de temperatura, a lo largo de las pasadas realizadas por la máquina de ensayo.

Para la realización de este ensayo se utilizan muestras compactadas en el compactador giratorio, con una masa de aproximadamente 5800 g. Una vez la muestra 30 cmx30cm x5cm se encuentra lista, con sus debidos cortes, se ubica en el molde teniendo cuidado de que quede bien nivelada y totalmente dentro del mismo molde.

La muestra se somete a una temperatura constante de 60°C, haciendo pasar una llanta de caucho macizo que ejerce una presión de contacto sobre la superficie de la probeta de 900 kN/m². Durante el ensayo, se determinan deformaciones en los minutos 1, 3 y 5 y cada 5 minutos hasta completar los primeros 45 minutos y cada 15 minutos hasta finalizar los 120 minutos de duración del ensayo.

El ensayo evalúa la resistencia a la deformación permanente de las mezclas asfálticas. Sin embargo, existen otros ensayos para medir la deformación, las cuales se traducen en el futuro en ahuellamiento que afecta la seguridad y el confort de los usuarios. Existe por ejemplo el equipo de la Rueda de Hamburgo en el cual se logra determinar la susceptibilidad a la deformación permanente y el daño por humedad de mezclas asfálticas siguiendo la norma UNE 12697-22 y AASHTO T324-14 convirtiéndose en otro ensayo para estudiar este tipo de deterioros en el hormigón asfáltico. De acuerdo con la norma colombiana este ensayo debe usarse principalmente en vías de Nivel de Tránsito 3, NT3 o el más alto y en mezclas de alto módulo.

3.6.7.3 Módulo resiliente (INVIAS 749, 2013)

El objeto de esta norma es tener una guía en lo relacionado con el comportamiento de la rigidez de las mezclas asfálticas en un rango de diferentes temperaturas.

Para la realización de este ensayo se prepararán muestras con un espesor de aproximadamente 50 mm, y con un diámetro aproximado de 100 mm. Estos se fabrican en el compactador giratorio y posteriormente se cortan con la ayuda de una sierra especializada para este tipo de cortes.

Posteriormente, se toman las dimensiones de cada una de las muestras obtenidas a partir del procedimiento anterior y se les dibujaron dos diámetros distanciados 90° entre sí.

Luego de esto, se pasa al procedimiento de acondicionamiento de las muestras de ensayo. Para este fin, se dejan las muestras como mínimo cuatro (4) horas dentro de la cámara de un equipo de ensayo Dinámico de Pavimentos a la temperatura de ensayo estimada. Las temperaturas recomendadas por INVIAS son 5°C, 25°C y 40°C (Instituto Nacional de Vías, 2013).

Al terminar el acondicionamiento de las muestras de ensayo, se pasa al montaje de la muestra en el equipo y los sensores de medición de deformaciones.

En lo que concierne al ensayo de medición de la rigidez, luego de tener la muestra montada y a la temperatura de ensayo determinada se le aplican los impulsos de carga para acondicionar la muestra. Al finalizar los impulsos de acondicionamiento se aplican cinco (5) ciclos de carga para la realización del ensayo. Este procedimiento se realiza para cada uno de los diámetros de las muestras ensayadas, es decir, dos ensayos por muestra. Para el cálculo del Módulo de rigidez, se usa la siguiente expresión:

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

Donde:

$$S_m = \text{Módulo de Rigidez medido [MPa]}$$

$$F = \text{Valor máximo de carga aplicada [N]}$$

$$z = \text{Amplitud de la deformación horizontal [mm]}$$

$$h = \text{Espesor medio de la probeta [mm]}$$

$$v = \text{Coeficiente de Poisson}$$

Ajuste del módulo de rigidez de acuerdo con el factor de forma

$$S'_m = S_m * (1 - 0,322 * (\log(S_m) - 1,82) * (0,60 - k))$$

Donde:

$$S_m = \text{Módulo de Rigidez medido [MPa]}$$

$$S'_m = \text{Módulo de Rigidez ajustado a un factor de forma de 0,60 [MPa]}$$

$$k = \text{Factor de superficie de carga medido}$$

De acuerdo con la norma colombiana este ensayo debe usarse principalmente en vías de Nivel de Tránsito 3, NT3 o el más alto y en mezclas de alto módulo. El ensayo de módulo dinámico estaba incluido en la norma INVIAS del año 2007, pero fue excluida en la actualización del año 2013 de la misma norma.

3.6.7.4 Leyes de Fatiga (INVIAS 784, 2013)

Este ensayo tiene que ver con la Determinación de las leyes de fatiga y energía de mezclas asfálticas en caliente, compactadas y sometidas a cargas de forma sinusoidal con un rango de 5

a 10 Hz de tipo flexión dinámica hasta llegar a la falla. Para esto deben hacerse especímenes en forma de viga, con longitud de 380 mm, un ancho de 63 mm y una altura de 50 mm. La aplicación dinámica de carga sobre la probeta llegará a su punto de falla cuando se complete el 50% de reducción con relación a la rigidez inicial o se cumplan 10.000 repeticiones. La probeta se instala en un dispositivo que permita la aplicación de las cargas en cuatro puntos, dos de ellos serán los apoyos de la vigueta y el dispositivo y la viga se introducen en una cámara aproximadamente a 20° C durante dos horas previamente a la aplicación del ensayo (ver Figura 17).

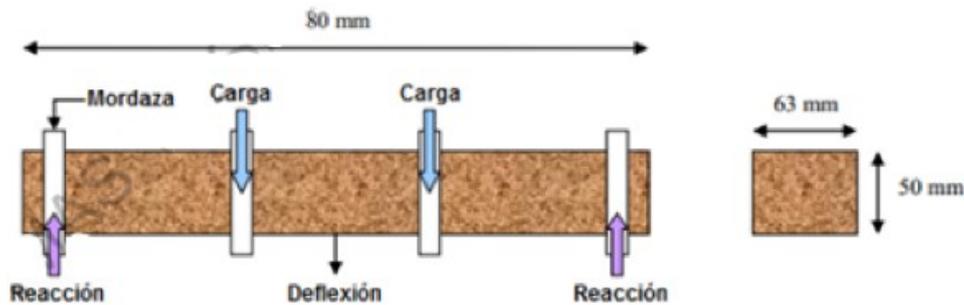


Figura 17. Montaje ensayo leyes de fatiga.

Fuente: Tomado textual (Instituto Nacional de Vias, INVIAS, 2013)

Esfuerzo máximo de tensión (Pa):

$$\sigma_t = \frac{0,375 P}{bh^2}$$

Donde:

P: Carga aplicada [N]

b: Ancho del espécimen [m]

h: Altura del espécimen [m]

Deformación máxima de tensión (m/m):

$$\varepsilon_t = \frac{12 * \delta * h}{(3l^2 - 4a^2)}$$

Donde:

δ: Deflexión en el centro de la viga [m]

a: espacio entre las mordazas interiores (0,357/3= 0,199 m)

L: longitud del espécimen entre las mordazas extremas (0,357 m).

Rigidez a la Flexión (Pa):

$$s = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t}$$

Ángulo de fase (grados):

$$\Phi = 360 * f * s$$

Donde:

F: Frecuencia de carga [Hz]

s: El tiempo referenciado entre *Pmax* y *δmax* [s].

Energía disipada por ciclo (J/m³):

$$D = \pi * \sigma_t * \varepsilon_t * \text{sen}(\Phi)$$

Energía disipada acumulada (J/m³):

$$\sum_{i=1}^{i=n} D_i$$

D_i: *D* para el ciclo de carga “*i*”

Este ensayo también es principalmente importante en vías con alto volúmenes de tránsito que produzcan la fatiga de los pavimentos y este ensayo sería de útil comprobación para el concreto asfáltico. En el caso colombiano, vías con niveles de tránsito de NT3.

3.7 Geología y micro caracterización de agregados y triturados de residuos cerámicos

A pesar de ser una ciencia de hace varios años (S.XX), la nanociencia está proliferando en los últimos años para ser más usada por los científicos en todo el mundo. Con los objetivos de comparar y conocer la morfología de los materiales y de analizar sus componentes químicos, se convierte en una oportunidad para estudiar, profundizar y poder predecir el comportamiento de aquellos materiales que hasta ahora estamos tomando conciencia de reuso o reciclaje.

En Estados Unidos, la Federal Highway Administration (FHWA) ya hace algunos años empezó a fijar su mirada en investigaciones relacionadas con la búsqueda de materiales más duros, más duraderos de tal manera que se pueda llegar disminuir la sensibilidad ante los impactos en las vías. Esto implicó centrar en la nanoescala los desafíos investigativos de las carreteras, buscando inicialmente por ejemplo los concretos hidráulico autorreparables.

No solo la FHWA ha reorientado sus investigaciones, también organizaciones como ICAP - www.asphalt.org, PIARC - www.PIARC.com, y conferencias como Research Board annual meeting TRB - www.trb.org, Conference on Asphalt Pavements in Southern Africa, CAPSA - www.capsa-events.co.za, South African Transportation Conference han incluido como principales necesidades actuales de la ingeniería en el campo del pavimento y el transporte.

Desde luego el uso de nanosensores es otra de las atracciones que se desarrollan alrededor de ofrecer condiciones de movilidad más seguras, disminuir la contaminación del aire, o hacer las capas de pavimento más resistentes a la acción del medio ambiente y sus acciones químicas o físicas. Pero definitivamente el mundo está buscando aplicar en elementos estructurales y no estructurales los residuos industriales para que no aumenten las zonas de depósito y produzca un mayor impacto ambiental en la calidad de vida de los seres humanos.

La nanotecnología ha permitido empezar a desarrollar una caracterización mejorada de materiales existentes, nuevos o reciclados lo que llevará a encontrar un uso óptimo de los mismos. Se vislumbra para las carreteras investigaciones a futuro relacionada principalmente con los siguientes aspectos:

- Mejor fricción entre las llantas y las carreteras, así como una mejor interacción vehículo carretera
- Con relación a la energía también hay desarrollos buscando generar y transmitir energía a la estructura de pavimento
- Desarrollo de nuevos materiales que soporten cargas de tránsito y las inclemencias ambientales.
- Nano-caracterización de materiales reciclados para uso en carreteras

Este proceso es un llamado urgente a consolidar cada vez más el estudio de la química y la física en la ingeniería de los pavimentos. Estudiar la composición, estructura y propiedades de la materia y relacionarla con el comportamiento de la fuerza, energía y la masa es poder comprender el mundo para aplicarlo en el mejoramiento de las carreteras para la Sociedad. La ingeniería depende de los principios desarrollados en las ciencias y se centra en la aplicación de estos principios en mejoramiento para la humanidad. Es aquí donde la brecha entre la ciencia y la ingeniería deben disminuirse para comprender el desempeño de los materiales y proponer nuevos desarrollos. Es también, aquí, donde la acción del científico es relacionar los resultados de las dimensiones de escala, minimizar la diferencia de la comprensión a nanoescala (ciencias) a la comprensión a macroescala (ingeniería). En la Figura 18 se observa en negrilla la ubicación del agregado o del árido en la escala de tamaños, siempre será posible desagregar los materiales para que puedan ser estudiados a diferentes escalas de tal manera que se obtengan micrografías que permitan el estudio, análisis y deducción del comportamiento ante posibles factores, es por eso que un microscopio electrónico de barrido, MEB se convierte en una herramienta fundamental en el estudio de los materiales de pavimentos, ahora en escala antes no disponibles (Mantilla Rosas, 2012).

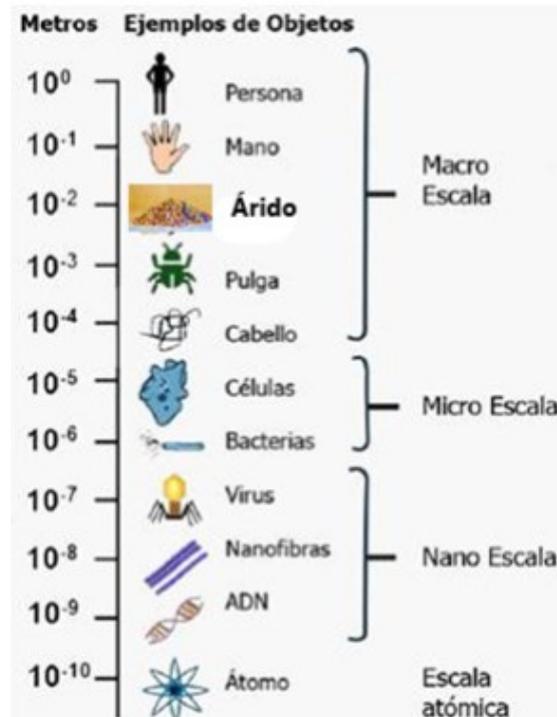


Figura 18. Escala de tamaños

Fuente: Adaptado (Padilla-Vaca, y otros, 2018)

Todas las etapas relacionadas con el desarrollo de los pavimentos serán impactadas por los avances y estudios a nivel nanotecnológico, desde la concepción del diseño hasta la etapa de mantenimiento. Desde luego, se requerirá la ejecución de pruebas piloto a nivel práctico para evaluar directamente a futuro las opciones de auto reparación, rejuvenecimiento o envejecimiento u oxidación, nocividad o no para la salud con dichos avances y el ahorro o reducción de emisiones durante la construcción de los pavimentos, así como también el mejoramiento del cubrimiento asfalto – agregado o su relacionamiento en la búsqueda la sostenibilidad.

En una estructura de pavimento flexible los componentes son los agregados o áridos y los materiales bituminosos. Cada uno de estos materiales tienen funciones específicas y es importante apreciar los diferentes roles de estos materiales en la estructura del pavimento. En el caso de los materiales bituminosos la sensibilidad a la temperatura y la dureza son los factores de mayor atracción para estudio. En el caso de los agregados la caracterización nanotecnológica para identificar las propiedades que permiten a estos materiales conformar el esqueleto mineral, revisar similitudes o diferencias con otros, hacer comparaciones para evaluar el comportamiento frente a los diferentes orígenes geológicos o geográficos por ejemplo o simplemente observar, para comprender su desempeño son los aspectos de mayor interés por parte de los investigadores frente a la escasez de materiales naturales (Mantilla Rosas, 2012).

Dentro de la caracterización de los materiales componentes de una mezcla asfáltica es importante conocer el análisis geológico de los mismos. Para ello las eras geológicas que son periodos de tiempo en donde el hombre ha clasificado por épocas los procesos biológicos que se han producido en la estratificación de los suelos, de la naturaleza, ofrecen a los científicos

elementos que le permiten correlacionar y conocer el comportamiento de dichos materiales cuando se mezclan. De igual manera para los ingenieros el estudio geológico le permitirá cada vez profundizar en los suelos que espera encontrar y su desempeño en la infraestructura del país (Lobo Guerrero , 1987). Las eras geológicas de la Tierra son estudios que le permiten al geólogo interactuar con el ingeniero para revisar la conveniencia de trazados por ciertas zonas, de uso de materiales (ver Figura 19. Eras geológicas de la tierra).

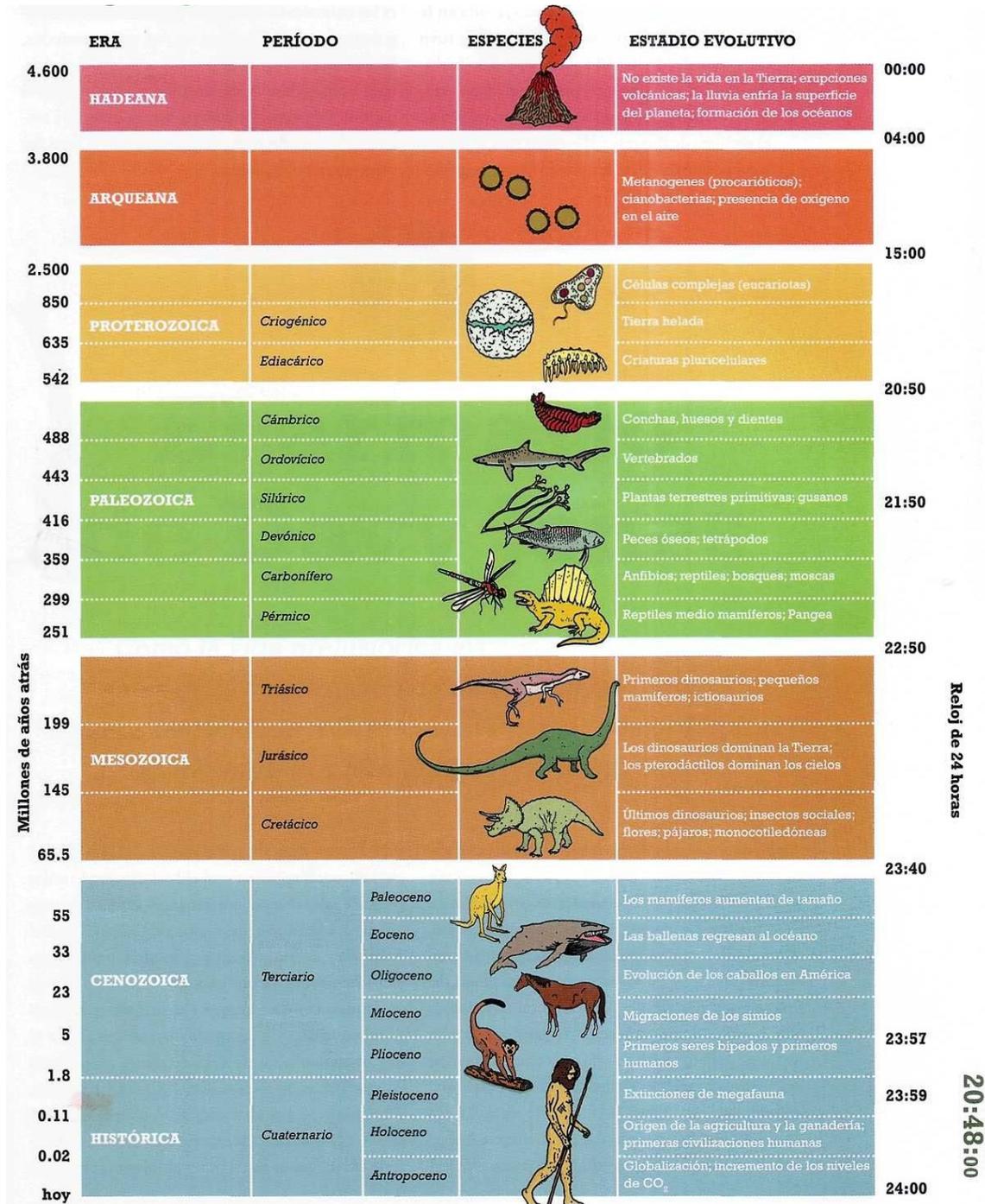


Figura 19. Eras geológicas de la tierra

Fuente: Tomado textual (<https://tinyurl.com/mvn86nav>, 2022)

En la actualidad es posible caracterizar los materiales desde un nivel microscópico pasando por el comportamiento mecánico en los ensayos físicos hasta terminar en el análisis geológico de los materiales, lo cual permite un conocimiento a mayor profundidad del desempeño.

3.8 Módulos Dinámicos (MD)

Uno de los ensayos más representativos para evaluar la rigidez de los concretos asfálticos es el módulo dinámico. En la actualidad es muy importante cuantificar las características no solo mecánicas sino también dinámicas, ya que permiten el diseño de la estructura de pavimento, en cualquier etapa diseño, rehabilitación o reforzamiento. Es por eso por lo que, en aras de optimizar los costos de la construcción de una estructura de pavimento flexible, siempre será adecuado desarrollar primero los ensayos de laboratorio que soportarán esas decisiones y entre ellos está indiscutiblemente el ensayo de módulos dinámicos. Una probeta que se somete a una carga repetida tiene unas deformaciones iniciales de tipo plástico, que se acumulan y se mantienen, pero a medida que aumentan los ciclos de carga, aparece la deformación elástica y la deformación plástica disminuye (ver Figura 20). Los aglomerados bituminosos tienen variabilidad ante la temperatura y las cargas, por lo tanto, el módulo dinámico también variará con estas dos unidades (Higuera Sandoval , 2011) (Yang, 2004).

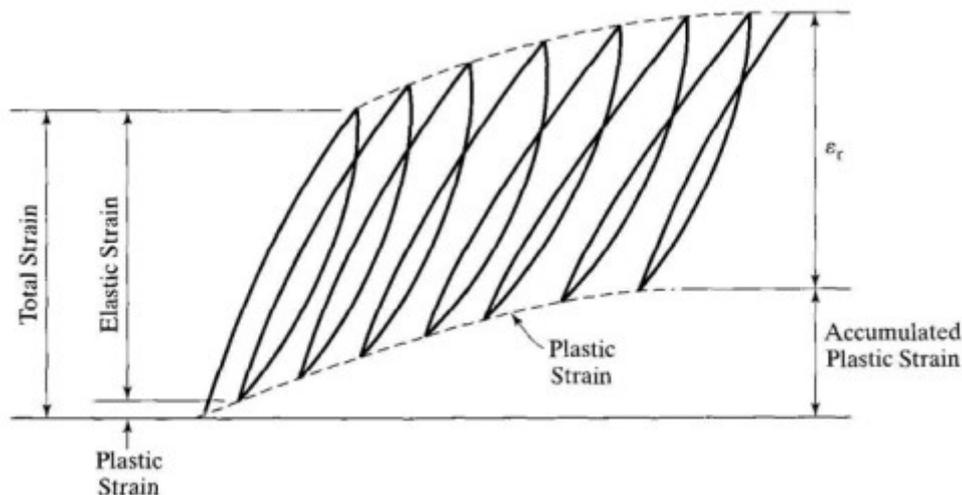


Figura 20. Deformaciones bajo cargas repetidas.

Fuente: Tomado textual (Yang, 2004)

En las metodologías modernas de diseño de la estructura de pavimento se incluyen generalmente el ensayo de módulo resiliente como valor de resistencia. Pero ¿cuál es la diferencia entre un experimento de módulo resiliente y un ensayo de módulo complejo para aglomerados bituminosos? el primero utiliza cargas de cualquier forma de onda con un período de descanso determinado, el segundo aplica una carga sinusoidal o haversine sin período de descanso. El módulo dinámico varía con la frecuencia de carga. Debe seleccionarse para la prueba la frecuencia que mejor simule la carga de tráfico real, de modo que el módulo dinámico así determinado sea equivalente al módulo resiliente a efectos de diseño. El módulo complejo

es un método para describir la relación tensión-deformación de los materiales visco elásticos. El módulo es una cantidad compleja, de la cual la parte real representa la rigidez elástica y la parte imaginaria caracteriza el amortiguamiento interno de los materiales. La teoría del módulo complejo y el comportamiento de la fluencia se representa por las transformadas de Fourier y el uso de las transformadas de Laplace permite representar la aplicación de los principios de la teoría visco elástica (Huang Y. H., 2004).

El módulo dinámico es el módulo viscoelástico del material, representado por E^* . Es el valor absoluto del módulo complejo $|E^*|$, que define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal el cual es sometido a una carga sinusoidal (Leiva, 2009).

Con base en los conceptos de la visco elasticidad lineal se logra la evaluación del módulo complejo (Ferry, 1980; Timothy, Xinjun, Mihai, & Eugene, 2003). La siguiente ecuación representa el esfuerzo para el caso unidimensional de una carga sinusoidal:

$$\sigma = \sigma_0 * \text{seno}(\omega t)$$

En donde σ_0 es la amplitud del esfuerzo y ω es la velocidad angular, que está relacionada con la frecuencia f por:

$$\omega = 2 * \pi * f$$

En un estado estacionario la deformación se puede escribir como:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 * \text{seno}(\omega t - \delta)$$

Donde ε_0 es la amplitud de la deformación y δ es el ángulo de fase relacionado con el tiempo del esfuerzo retrasado ante la deformación (ver Figura 21 Módulo dinámico (ángulo o tiempo de desfase)). El ángulo de fase es un indicador de las propiedades viscosas o elásticas del material. Cuando el material es elástico puro, $\delta = 0^\circ$, y cuando el material es viscoso puro, $\delta = 90^\circ$.

La relación del esfuerzo a la amplitud de deformación define el valor absoluto del módulo dinámico. La fase de entrada y salida de componentes se utiliza para definir el módulo de almacenamiento:

$$E' = \frac{\sigma_0 * \cos(\delta)}{\varepsilon_0}$$

Y el módulo de pérdida:

$$E'' = \frac{\sigma_0 * \text{sen}(\delta)}{\varepsilon_0}$$

Fuente: (Huang Y. H., 2004)

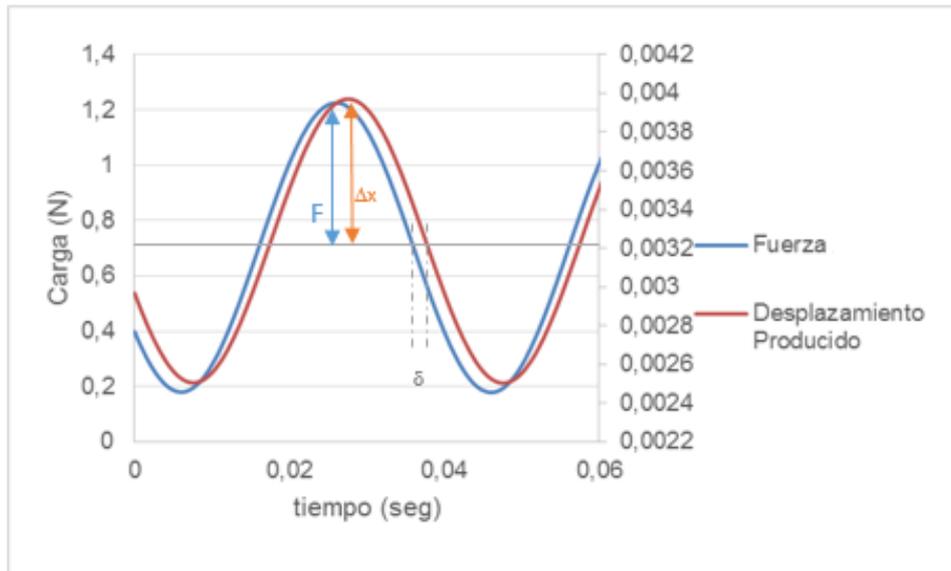


Figura 21 Módulo dinámico (ángulo o tiempo de desfase)

Fuente: (Leiva, 2009)

La parte real del módulo complejo es el módulo de almacenamiento y la parte imaginaria es el módulo de pérdida. El módulo complejo dinámico es el valor absoluto del módulo complejo:

$$|E^*| = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o}$$

Fuente: (Huang Y. H., 2004)

No en todos los casos es posible desarrollar ensayos de laboratorio, y en muchos momentos de la historia se han empleado nomogramas, y modelos matemáticos que son alternativos para calcular la rigidez de las mezclas asfálticas.

La utilización de métodos manuales, basados en una configuración gráfica, hace que el procedimiento sea minucioso y cuidadoso, hecho que genera que se pueda incurrir en errores. Estas configuraciones gráficas son nomogramas que fueron desarrollados por autores como: Van der Pöel, Bonnaure y Heukelom. Existen diferentes nomogramas y modelos que han surgido en diferentes investigaciones, por ejemplo Nomograma de Van der Pöel, Nomograma de Heukelom, de Bonnaure (Shell) que iniciaron el proceso, siguiendo la combinación de Heukelom y Klomp, entre otros, posteriormente Hwang y Witczack (Instituto del Asfalto), generaron un modelo matemático de cálculo del módulo dinámico, que con el avance de los computadores se logró aplicar el principio de superposición para finalmente construir las curvas maestras que pueden ser usadas para conocer el módulo dinámico de los aglomerados bituminosos en cualquier lugar con conocer la temperatura típica del lugar. En el caso de los nomogramas se usa el término de módulo de rigidez en lugar de módulo dinámico.

3.8.1 Nomograma de Van der Pöel

Este método involucra el uso de la temperatura del punto de ablandamiento, penetraciones a dos temperaturas y el índice de penetración (IP) del asfalto (Castro-Estevés, Quispe-González, & Colóssio, 2016). Al buscar la temperatura correspondiente a la cual ocurre el fisuramiento, se

establece así el módulo de rigidez máximo admisible para el asfalto (ver Figura 22. Nomograma de Van der Pöel.

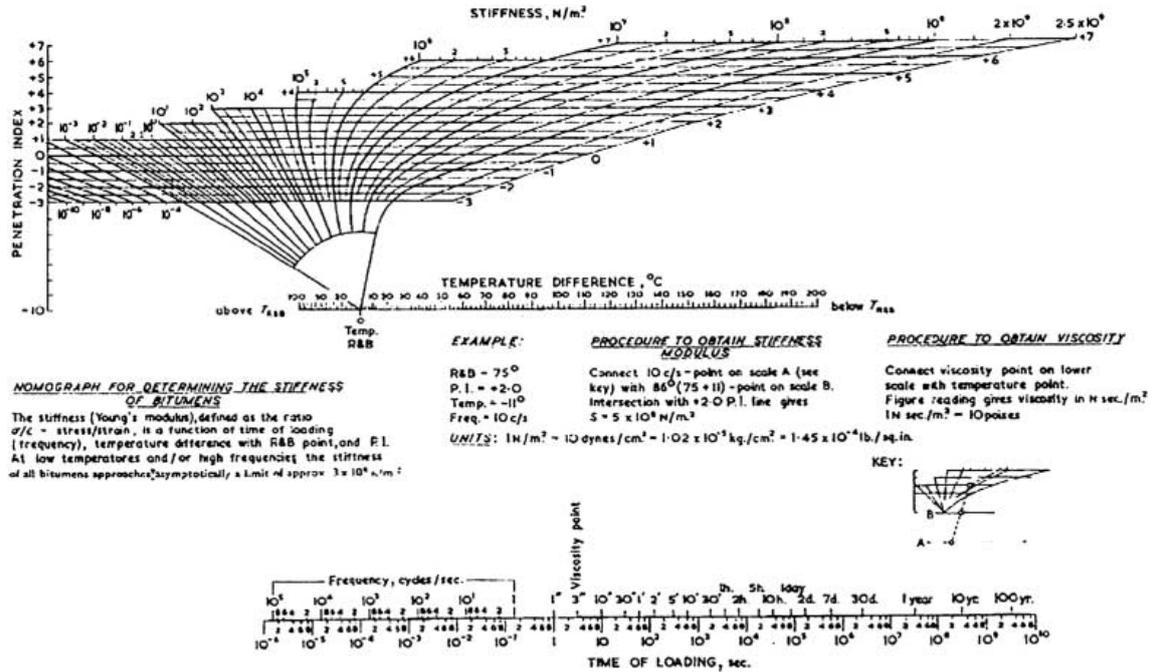


Figura 22. Nomograma de Van der Pöel.

Fuente: tomado textual de (Al-Mosawe, 2016)

3.8.2 Nomograma de Heukelom

Este nomograma sirve para caracterizar los cementos asfálticos desde el punto de vista reológico (ver Figura 23. Nomograma de Heukelom). También con sus avances se conoció cómo controlar la fragilidad de los ligantes asfálticos a la temperatura mínima del pavimento y el alargamiento a la rotura estimado, basado en el Índice de penetración para lo cual desarrolló el gráfico que está en la misma figura.

**NOMOGRAMA DE HEUKELOM
DETERMINACIÓN DE LAS TEMPERATURAS DE TRABAJO**

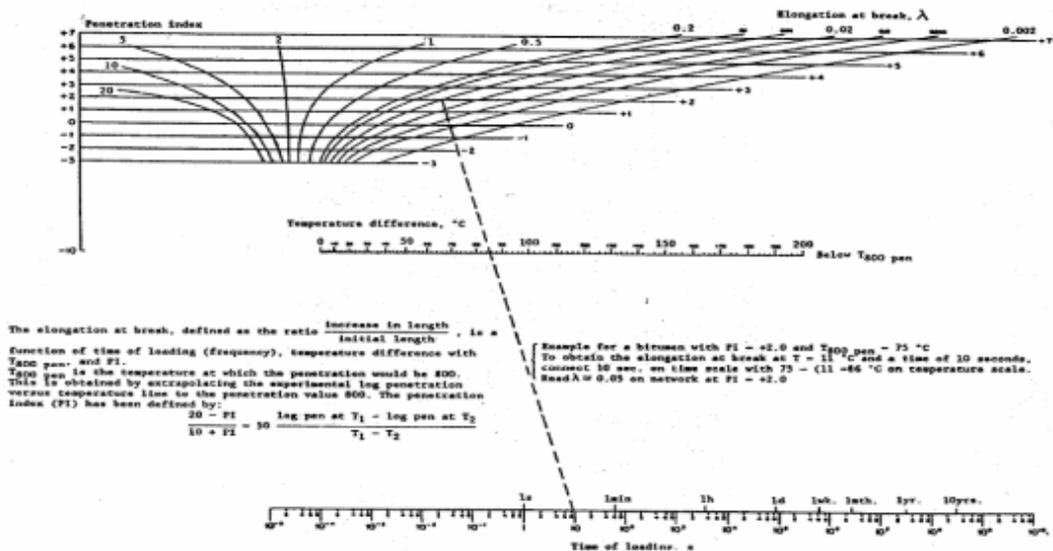
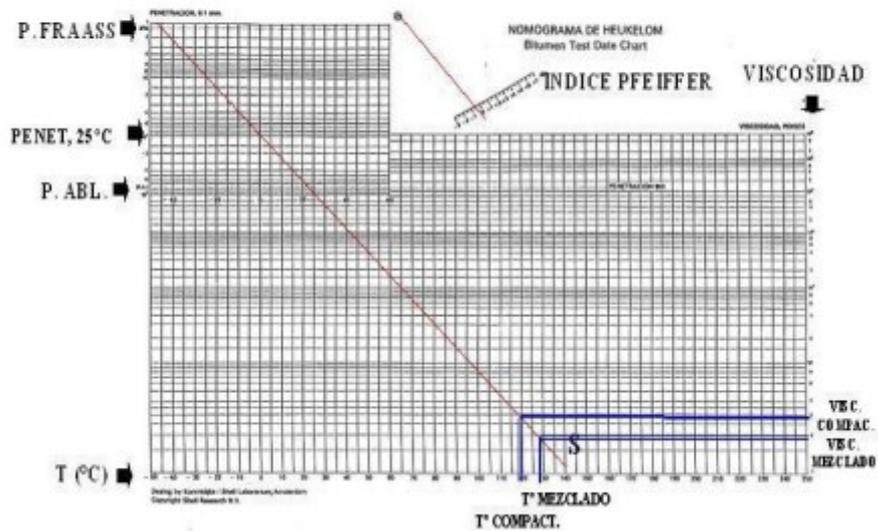


Figura 23. Nomograma de Heukelom y gráfico de alargamiento a la rotura

Fuente: tomado de: (Subiaga, 2016)

3.8.3 Nomograma de Bonnaure (después Shell)

Este método trabaja con el módulo de rigidez máximo para el asfalto y calcula la temperatura correspondiente, Además este método trabaja con la rigidez máxima de la mezcla y calcula la temperatura correspondiente. Una ventaja de este método es que involucra el contenido de asfalto de la mezcla, así como el volumen de agregado (Castro-Estevés, Quispe-González, & Colóssio, 2016). En la Figura 24. Nomograma de Bonnaure se observa el nomograma de Bonnaure.

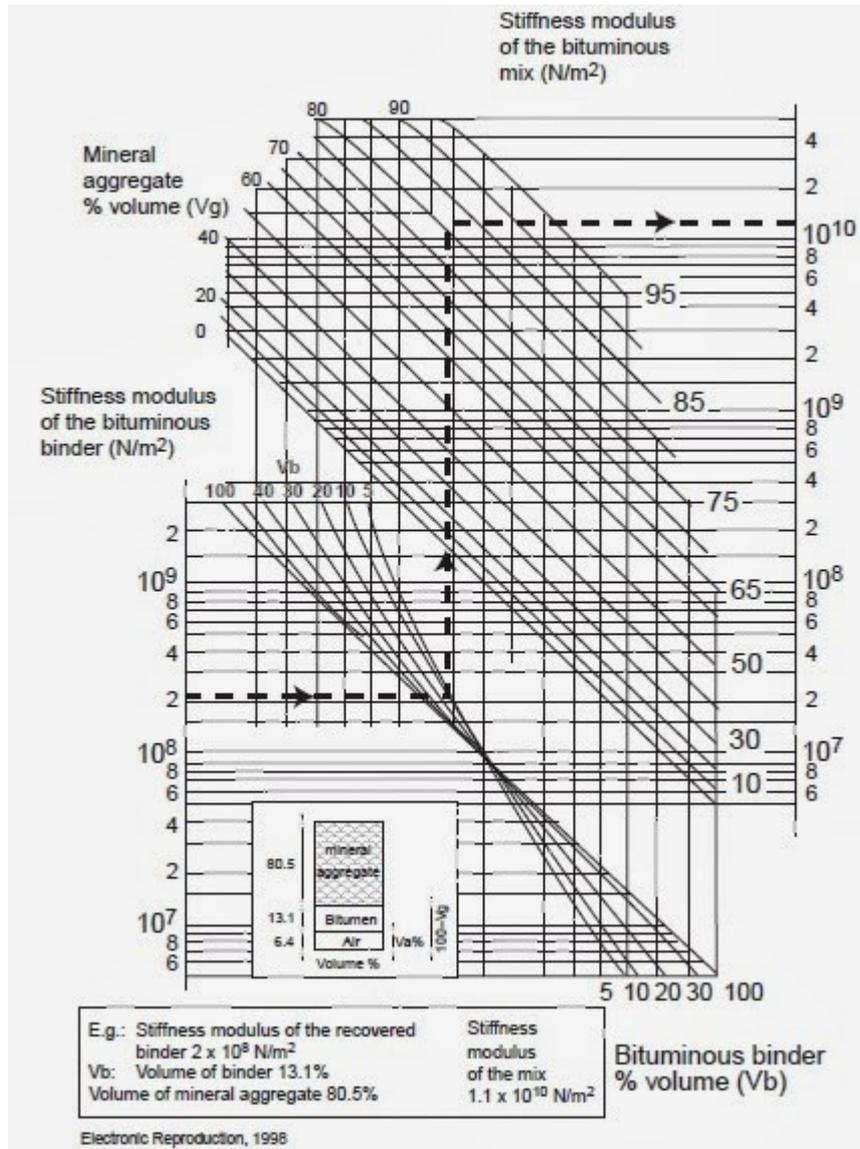


Figura 24. Nomograma de Bonnaure (Shell)

Fuente: tomado de (Castro-Estevés, Quispe-González, & Colóssio, 2016)

Dentro de esta metodología se encuentran cuatro métodos, que mediante la aplicación de ciertas expresiones matemáticas permiten conocer el valor del módulo dinámico. Este método hace que determinar el módulo dinámico de las mezclas asfálticas sea un proceso más preciso.

Los modelos encontrados en su momento fueron las fórmulas de Bonnaure, fórmulas del instituto de asfalto, fórmulas de Heukelom y Klomp y la fórmula de Witczak.

3.8.4 Fórmulas de Bonnaure

Se calcula el módulo dinámico de la mezcla del asfáltica con base en cuatro (4) coeficientes, β_1 , β_2 , β_3 y β_4 basados en porcentajes de volúmenes de asfalto y agregado y en la determinación del módulo dinámico del asfalto.

$$\beta_1 = 10,82 - \frac{1,342 * (100 - V_g)}{V_g + V_b}$$

$$\beta_2 = 8,0 + 0,00568 v_g + 0,0002135 v_g^2$$

$$\beta_3 = 0,6 * \log \frac{1.37 v_b^2 - 1}{1.33 v_b - 1}$$

$$\beta_4 = 0,7582(\beta_1 - \beta_2)$$

$$\text{Para: } 5 \times 10^6 \text{ N/m}^2 < s_b < 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$\text{Log} S_m = \beta_2 + \beta_4 + 2,0959(\beta_1 - \beta_2 - \beta_4) * (\text{Log} S_b - 8)$$

$$\text{Para: } 10 \times 10^9 \text{ N/m}^2 < s_b < 3 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$\text{Log} S_m = \frac{\beta_4 + \beta_3}{2} * \text{Log} S_b - 8 + \frac{\beta_4 - \beta_3}{2} * \text{Log} S_b - 8 + \beta_2$$

Dónde:

S_m : Módulo dinámico de la mezcla asfáltica, N/m^2

V_g : Porcentaje en volumen de agregados de la mezcla, %

V_b : Porcentaje en volumen de asfalto de la mezcla, %

S_b : Módulo dinámico del asfalto, N/m^2

El modelo matemático obtenido es, Si S_m y S_b se dan en lb/pulg^2 , :

$$\text{Para: } 725 \text{ Psi} < s_b < 145.000 \text{ Psi}$$

$$\text{Log} S_m = \frac{\beta_4 + \beta_3}{2} * \text{Log} S_b - 4,1612 + \frac{\beta_4 - \beta_3}{2} * \text{Log} S_b - 4,1612 + \beta_2 - 3,8383$$

$$\text{Para: } 145.000 \text{ Psi} > s_b$$

$$\text{Log} S_m = \beta_2 + \beta_4 + 2,0959(\beta_1 - \beta_2 - \beta_4) * (\text{Log} S_b - 5,1612 - 3,8388)$$

Fuente: Tomado textualmente (Huang Y. H., 2004)

3.8.5 Fórmulas del Instituto del Asfalto

Varía del anterior este método ya que en este se utiliza la viscosidad del asfalto como variable dentro de las expresiones matemáticas que se presentan a continuación:

$$E^* = 100.000 * 10^{\beta_1}$$

$$\beta_1 = \beta_3 + 0,000005 \beta_2 - 0,00189 \beta_2 f^{-1.1}$$

$$\beta_2 = \beta_4^{0,5} T^{\beta_5}$$

$$\beta_3 = 0,553833 + 0,028829 * p_{200} f^{-0,1703} - 0,03476 V_a + 0,070377 \lambda + 0,931757 f^{-0,02774}$$

$$\beta_4 = 0,483 V_b$$

$$\beta_5 = 1,3 + 0,49825 * \text{Log}(f)$$

Dónde β_1 a β_5 son constantes temporales, f es la frecuencia de carga en Hertz, T es la temperatura de la mezcla en °F, p_{200} es el porcentaje de agregado que pasa el tamiz No. 200, V_a es el volumen de vacíos de aire en %, λ es la viscosidad del asfalto a 70 °F (106 poises) y V_b es

el volumen del asfalto en %. Si no hay suficientes datos de viscosidad, o no están disponibles para estimar la viscosidad a 70°F, se puede emplear la siguiente ecuación:

$$\lambda = 29508,2(P_{77^{\circ}\text{F}})^{-2,1939}$$

Dónde $P_{77^{\circ}\text{F}}$ es la penetración del asfalto a 77 ° F (25 ° C)

Fuente: Tomado textualmente (Huang Y. H., 2004)

3.8.6 Fórmulas de Heukelom y Klomp

A partir del módulo dinámico del asfalto y de los porcentajes en volumen de los constitutivos de la mezcla bituminosa, este método permite conocer el valor del módulo dinámico de la mezcla asfáltica. Las expresiones matemáticas son las siguientes:

$$Sm = Sb \left[1 + \left(\frac{2,5}{n} \right) \left(\frac{Cv}{1-Cv} \right) \right]^n$$

$$n = 0,83 \text{ Log} \left(\frac{4 \cdot 10^{10}}{Sb} \right)$$

Dónde Sm y Sb en MPa, Esta fórmula solo aplica si Sb es superior a 10 MPa, y para valores de $0,7 < Cv < 0,9$. Cv es la concentración volumétrica de la mezcla, calculada por la fórmula:

$$Cv = \frac{Vg}{Vg+Vb} = \frac{\text{volumen de los granulares}}{\text{volumen (granular bitumen)}}$$

Para mezclas con más de 3,0% de vacíos, la concentración volumétrica debe ser calculada por la siguiente fórmula:

$$Cv = \frac{100Cv}{100+\%V_v-3,0}$$

Donde:

Vb : Porcentaje en volumen de bitumen o de asfalto

Vg : Porcentaje en volumen de agregados de la mezcla asfáltica

V_v : Porcentaje en volumen de vacíos

Fuente: tomado de (Castro-Estevés, Quispe-González, & Colóssio, 2016)

3.8.7 Fórmula de Witczak

A diferencia de los otros, este método, condensa en una única expresión matemática el cálculo, contempla la composición de la mezcla asfáltica, y se, escribe a continuación:

$$\begin{aligned} & \text{Log}(E') \\ & = 3,750063 + 0,02932p_{200} - 0,001767p_{200}^2 - 0,002841p_4 - 0,058097V_a \\ & - 0,802208 \frac{V_{beff}}{V_{beff} V_a} \\ & + \frac{3,871977 - 0,0021p_4 + 0,003958p_{38} - 0,000017p_{38}^2 + 0,00547p_{34}}{1 + e^{-0,603313-0,313351\text{Log}(f)-0,393532\text{Log}(\eta)}} \end{aligned}$$

Fuente: Tomado textual (Witczak & Bari, 2004)

Dónde:

E: Módulo dinámico de la mezcla asfáltica (lb/pulg²)

η : Viscosidad de ligante (10^6 poises)

F: Frecuencia de carga (Hertz)

V_a : Porcentaje en volumen de aire (%)

V_{beff} : Porcentaje en volumen efectivo de ligante (%)

P_{34} : Porcentaje retenido en el tamiz $3/4$ "

P_{38} : Porcentaje retenido en el tamiz $3/8$ "

P_4 : Porcentaje retenido en el tamiz #4

P_{200} : Porcentaje pasa en el tamiz #200

3.8.8 Ensayo del módulo dinámico en probetas de las mezclas asfálticas en caliente

Con este ensayo se miden las deformaciones recuperables, pues se desarrolla en el rango elástico, se determinan los esfuerzos y deformaciones máximas para calcular el módulo dinámico y el ángulo de desfase de la mezcla asfáltica. El módulo dinámico es el valor absoluto del módulo complejo, el cual define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal que ha sido sometido a una carga tipo sinusoidal.

En el método ASTM, se aplica una tensión de compresión haversine al espécimen durante un mínimo de 30 s y que no exceda los 45 s a temperaturas de 41, 77 y 104 °F (5, 25 y 40 °C) y frecuencias de carga de 1, 4 y 16 Hz para cada temperatura. Las deformaciones axiales se miden uniendo dos galgas extensiométricas de alambre a la mitad de la altura de la muestra, uno frente al otro. La relación entre la tensión axial y la deformación axial recuperable es el módulo dinámico (Huang Y. H., 2004).

La mayoría de las pruebas de módulos complejos se realizan aplicando una carga de compresión haversine a las muestras. Si los especímenes son realmente visco elástico, cualquier otro modo de prueba debería arrojar los mismos resultados. Se han hecho pruebas con el módulo complejo de MAC bajo una carga haversine de tensión y una carga senoidal completa de tensión-compresión. El módulo dinámico y el ángulo de fase en tensión y tensión-compresión se compararon con los de compresión. Se extrajeron las siguientes conclusiones para HMA de grado denso con contenido de vacíos de aire y asfalto dentro de los rangos admitidos (Huang Y. H., 2004):

- Las diferencias en el módulo dinámico son generalmente insignificantes o relativamente pequeñas entre las pruebas de tensión, tensión-compresión y compresión para temperaturas que oscilan entre 40 y 70 °F (4 y 21 °C) y frecuencias de carga entre 1 y 16 Hz.
- Las diferencias en el módulo dinámico son significativas entre la prueba de tensión o tensión-compresión y la prueba de compresión a una frecuencia de 1 Hz y temperaturas que oscilan entre 70 y 100 °F (21 y 38 °C). Bajo estas condiciones, el módulo dinámico en tensión o tensión-compresión tiene un promedio de aproximadamente la mitad a dos tercios del de compresión.

- Las diferencias en el ángulo de fase son pronunciadas entre tensión y compresión y son menos pronunciadas entre tensión-compresión y compresión.
- El ángulo de fase es mayor en tensión, menor en compresión e intermedio en tensión—compresión. En promedio, el ángulo de fase en tensión supera al de compresión en aproximadamente un 50 %, y el ángulo de fase en tensión-compresión supera al de compresión en aproximadamente un 25 %.

Las conclusiones anteriores podrían indicar que, si un diseño se basa en la teoría elástica con un módulo dinámico dado para el MAC, se puede utilizar cualquiera de los tres modos de prueba anteriores. Sin embargo, si el diseño se basa en la teoría visco elástica con el módulo dinámico y el ángulo de fase como variables de diseño, se debe usar un modo de prueba consistente con las condiciones de carga reales. Esta será probablemente una prueba de tensión-compresión. (Huang Y. H., 2004)

Existen varios tipos de ensayos que calculan la rigidez en un concreto asfáltico, entre ellos, el ensayo de flexión en una viga con tres o cuatro puntos de aplicación, o una viga trapezoidal o cilíndrica. Sin embargo, se profundizará en el ensayo con probeta cilíndrica. Se aplican una serie de cargas a un espécimen de concreto asfáltico o probeta de 100mm de diámetro y 150mm de altura (ver Figura 25), para una temperatura y frecuencia de carga dadas, en este caso un espécimen cilíndrico. (Barajas & Pineda, 2010) (AASHTO T342-11, 2015) que para el caso europeo se recomiendan las temperaturas de ensayo de 10°C, 20°C, 30°C y 40°C (AENOR UNE-EN 12697-26 , 2006).

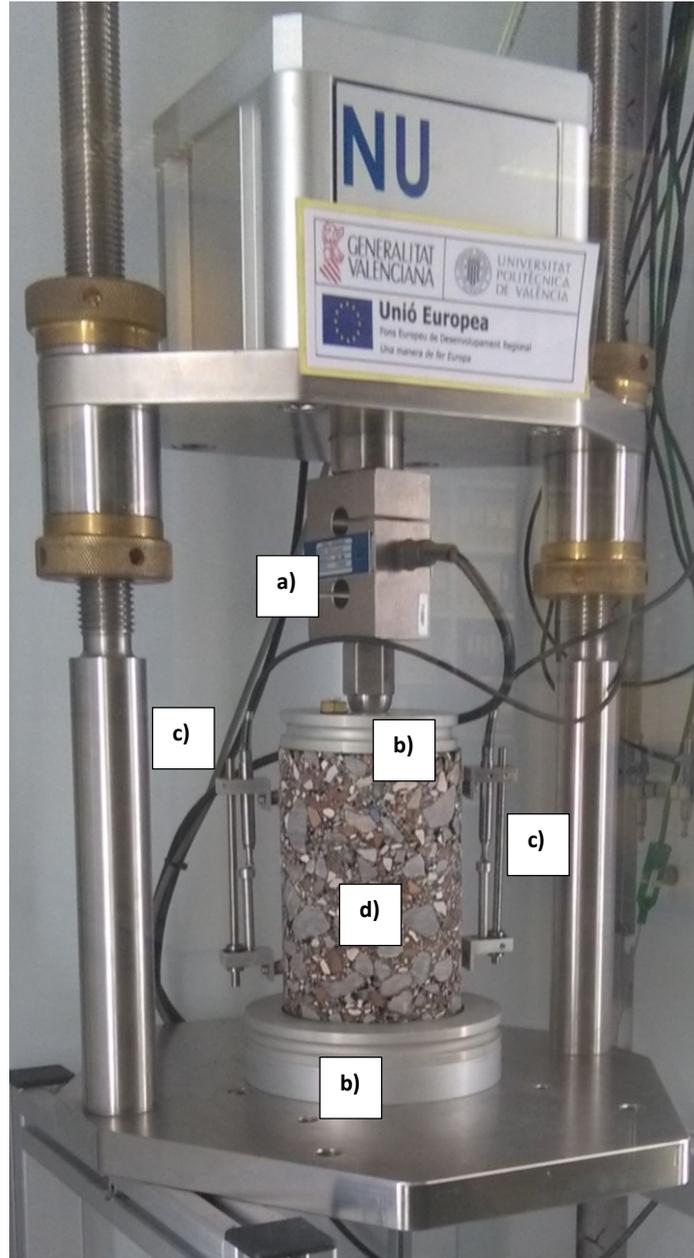


Figura 25. Esquema general del ensayo del módulo dinámico

a) Celda de carga b) disco de acero c) LVDT axial sensor d) espécimen

Fuente: Propia. Laboratorio de Caminos UPV, 2018

En el ensayo de módulo dinámico se requieren especímenes cilíndricos de diámetro entre 100 y 104 mm y una altura que oscile entre 147,5 y 152,5. Se preparan cuatro especímenes y se ensayan tres, dejando el restante para validación de resultados. La compactación se puede realizar con una máquina giratoria o con una máquina de compactación como el Roller Compactor. La finalidad del ensayo es evaluar la capacidad de un material bajo sollicitación del tráfico midiendo para ello las deformaciones recuperables plásticas.

La temperatura y la frecuencia son dos variables que se controlan en este ensayo bajo la consideración que el módulo dinámico de rigidez se puede afectar por aumentos o descenso de los valores de estas variables. Se emplean cinco temperaturas (-10°C, 4.4°C, 21.1°C, 37.8°C y

54.4°C) buscando aproximarse a las condiciones climáticas de las regiones y seis frecuencias (25Hz, 10Hz, 5Hz, 1Hz, 0.5Hz y 0.1Hz) con las cuales se reproducen las diferentes cargas a las cuales se podría someter la carpeta asfáltica según los vehículos que circulen por esta y las correspondientes velocidades (Clyne, Li, Marasteanu, & Skok, 2003) (Lasso & Marin, 2010) (Sandoval, Barrera, & Acuña, 2011) (INVIAS-E-745, 2007) (AASHTO T342-11, 2015). En España la propuesta es el uso de temperaturas (10°C, 20°C, 30°C, 40°C) las cuales son más usuales tanto en España como en Colombia (AENOR UNE-EN 12697-26 , 2006).

El módulo dinámico arroja información para la toma de decisiones en mezclas MDC por cuanto la incidencia de variaciones en temperatura y frecuencia repercute en la vida útil de la carpeta de rodadura (Gonzalez & Duran, 2010) (Clyne, Li, Marasteanu, & Skok, 2003) (Villacorta, 2003) (INVIAS-E-745, 2007) (AASHTO T342-11, 2015).

Factores que influyen en el módulo dinámico:

Tomando en consideración que tanto la temperatura como la frecuencia pueden afectar sensiblemente el comportamiento de la mezcla asfáltica, la norma propone un acondicionamiento previo para la realización del ensayo (AASHTO T342-11, 2015) (Villacorta, 2003) (Clyne, Li, Marasteanu, & Skok, 2003).

En la Tabla 21 se presenta las temperaturas del ensayo, y el tiempo que debe tener la muestra de acondicionamiento para la realización del ensayo.

Tabla 21. Tiempo estabilización de la muestra

Temperatura ° C	Tiempo desde la temperatura ambiente, horas	Tiempo desde la anterior temperatura, horas
-10	Toda la noche	-
4.4	Toda la noche	4 o toda la noche
21.1	1	3
37.8	2	2
54.4	2	1

Fuente: tomado textual: (AASHTO T342-11, 2015)

La recomendación es dejar una mezcla testigo, como se mencionó previamente, para validación de resultados. Con relación a las frecuencias, en Tabla 22. se plantean los rangos y el número de ciclos recomendados para el ensayo.

Tabla 22. Frecuencias y número de ciclos

Frecuencia (Hz)	número de ciclos
25	200
10	200
5	100
1	20
0.5	15
0.1	15

Fuente: tomado de textual (AASHTO T342-11, 2015)

Otra de las condiciones importantes a tener en cuenta en el desarrollo del ensayo es que la aplicación de la cara sinusoidal debe producir una deformación entre 50 y 150 microstrains.

3.8.9 Curva maestra y factor de ajuste

La curva maestra de una mezcla asfáltica permite conocer el módulo dentro de diferentes frecuencias o temperaturas. El análisis de datos del ensayo de módulo complejo implica la generación de curvas maestras (Timothy, Xinjun, Mihai, & Eugene, 2003). Las curvas maestras son generadas utilizando el principio de superposición de tiempo-temperatura. Este principio permite que los datos obtenidos a diferentes temperaturas y frecuencias sean desplazados horizontalmente con respecto a una temperatura de referencia o la frecuencia, alineando de este modo las diferentes curvas para formar una única curva maestra. La Figura 26. Ejemplo de construcción de curvas maestras muestra una curva de una mezcla asfáltica en proceso de construcción. (AENOR UNE-EN 12697-26 , 2006)

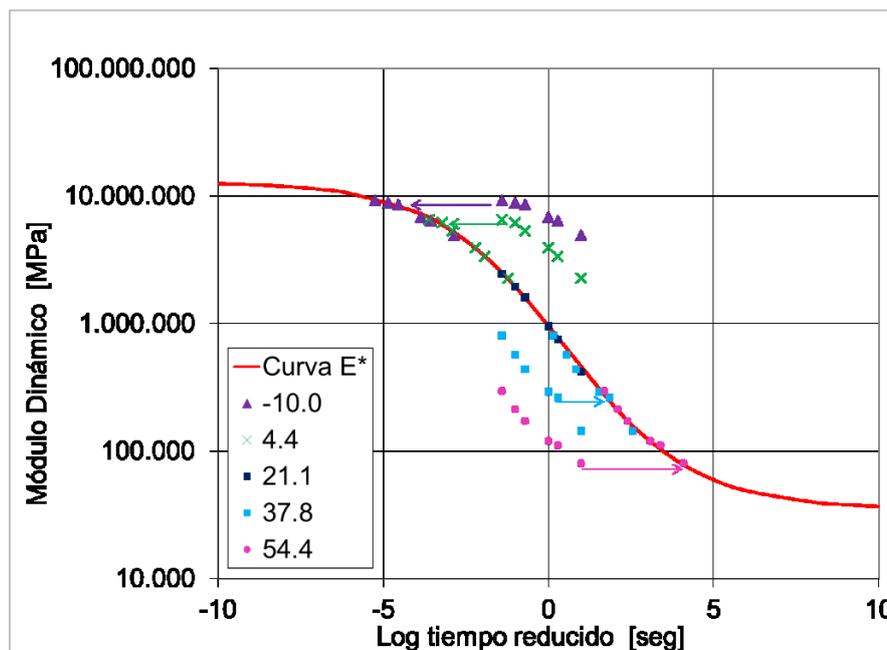


Figura 26. Ejemplo de construcción de curvas maestras

Fuente: Tomado textual (Leiva, 2009)

La curva maestra para un concreto se puede construir usando la temperatura ambiente como temperatura de referencia o la temperatura más cercana a la temperatura ambiente. El factor de desplazamiento para la temperatura de referencia es igual a uno. Existen diferentes ecuaciones para el cálculo de los factores de ajuste, entre los cuales se encuentran las funciones de Arrhenius, William Landel Ferry y Log-Lineal (Leiva Padilla, Loría Salazar, & Leiva Villacorta, 2013).

3.8.10 Ecuación de Arrhenius

La fórmula generalizada de la ecuación utilizada para ajuste es la siguiente:

$$\eta = Ae^{\frac{E_a}{RT}}$$

Que puede transformarse luego de una serie de procesos matemáticos en la siguiente ecuación:

$$\log(aT) = \frac{\Delta E_a}{19,14714} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)$$

Fuente: (Huang Y. H., 2004)

Dónde:

η : Viscosidad del ligante.

A: Constante del modelo.

R: Constante universal de los gases ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

aT: Factor de ajuste horizontal.

ΔE_a : Energía de activación.

T: Temperatura del ensayo, °F

T_r : Temperatura de referencia, °F

3.8.11 Ecuación William Landel Ferry

La fórmula generada para la ecuación de William Landel Ferry se presenta a continuación.

$$\log(aT) = \frac{C_1 (T - T_r)}{C_2 (T - T_r)}$$

Dónde:

aT: factor de ajuste horizontal.

C1 y C2: constantes del modelo.

T: Temperatura del ensayo, °F

T_r : Temperatura de referencia, °F

3.8.12 Ecuación Susceptibilidad Viscosidad Temperatura (VTS)

La fórmula generada para la ecuación de susceptibilidad viscosidad temperatura se presenta a continuación.

$$\log(\eta) = A + VTS \log T_R$$

Dónde:

η : Viscosidad, centiPoise.

T_R : temperatura, °Rankine.

A: intercepto de la regresión.

VTS (Susceptibilidad Viscosidad – Temperatura): Pendiente de la curva de regresión.

Una vez obtenido los datos de laboratorio, se puede desarrollar la curva maestra para la mezcla asfáltica. Esta curva (maestra) puede ser calculada por alguna de las siguientes ecuaciones.

3.8.13 Visco-elasticidad lineal y las ecuaciones de las curvas maestras

Los conceptos de visco-elasticidad se basan en la definición de que un esfuerzo es proporcional a la velocidad de la deformación, según la ley de Newton, que es lo que se muestra como el comportamiento viscoso de un líquido y que la deformación es proporcional al esfuerzo que se aplique, según la ley de Hooke, que es lo que se muestra como el comportamiento elástico de un sólido. Esto quiere decir que cuando un fluido viscoso recibe un esfuerzo se deforma, pero no se recupera. Mientras que un sólido elástico se deforma con la aplicación de una fuerza y cuando esta deja de actuar vuelve a su posición inicial. (Garcia Quesada, 2008)

El número Débora es el parámetro encargado de caracterizar el comportamiento visco-elástico, elástico o viscoso de un material.

$$De = \frac{T}{t}$$

En donde $De=1$, comportamiento visco-elástico, $De > 1$, comportamiento elástico y $De < 1$, comportamiento viscoso; estos comportamientos dependen de la linealidad presente entre esfuerzo/deformación y esfuerzo/velocidad de deformación o entre sólidos elásticos y fluidos viscosos (Garcia Quesada, 2008).

Si la deformación es muy baja, casi infinitesimal, entonces el comportamiento lineal está cercano, por lo que es posible considerar la visco-elasticidad lineal en el comportamiento de los materiales. Cuando la deformación es alta, el comportamiento se aleja de la linealidad y predomina la visco-elasticidad no lineal. Matemáticamente, la visco-elasticidad lineal se modela con la relación directamente proporcional entre la deformación y el esfuerzo aplicado, expresado como una constante. Los ensayos de laboratorio que modelan mejor la visco-elasticidad son el ensayo de fluencia, el ensayo de recuperación elástica, de relajación de esfuerzos y ensayos dinámicos. Estos últimos usan parámetros que varían sinusoidalmente como la deformación que está en función del tiempo y el esfuerzo que varía sinusoidalmente con la misma frecuencia, pero tiene un ángulo de desfase con relación a la deformación. De esta manera es posible obtener el módulo de almacenamiento o módulo elástico asociado a la energía almacenada en el material y el módulo de pérdidas o módulo viscoso asociado a la energía disipada por el material. Las contribuciones del módulo elástico y del módulo viscoso conforman el módulo complejo o módulo dinámico (Garcia Quesada, 2008).

A una temperatura, los módulos elásticos y los módulos viscosos obtenidos de un material pueden ser comparados con otros módulos obtenidos a otra temperatura del mismo material, sin embargo, un desplazamiento en la frecuencia a cierta temperatura, produce que se calculen nuevos módulos, lo cual se puede explicar con el principio de superposición tiempo – temperatura – frecuencia, usado en la construcción de las curvas maestras (García Quesada, 2008).

Para modelar la respuesta de las mezclas bituminosas, se han utilizado principalmente dos funciones una la potencial y otra la polinomial. Sin embargo, debido a que para valores altos y bajos de módulo estas funciones tienden a predecir valores irracionales cuando se usa extrapolación, se ha optado por usar la función sigmoïdal para el ajuste de los datos de módulo dinámico obtenidos de ensayos a temperaturas que van desde los -10°C hasta los 55°C.

En el caso de los ligantes asfálticos, Christensen en 1992 desarrolló un modelo para la construcción de las curvas maestras, el cual también ha sido utilizado para asfaltos modificados. Este modelo inicial fue denominado Christensen-Anderson (CA), y posteriormente fue modificado como Christensen-Anderson-Marasteanu (CAM) y luego Christensen-Anderson-Sharrock. A continuación, se escriben dichos modelos (ver Tabla 23) (Leiva Padilla, Loría Salazar, & Leiva Villacorta, 2013).

Tabla 23. Modelos para Construcción de Curvas Maestras

Ecuación	Modelo matemático	Consideraciones	Observaciones
General sigmoidal	$\log E^* = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(fr)}}$	<p>Dónde:</p> <p>E^*: Módulo Dinámico.</p> <p>fr: Frecuencia de carga a la temperatura de referencia.</p> <p>δ: Valor del Módulo Dinámico.</p> <p>$\beta + \alpha$: Valor del Módulo máximo.</p> <p>$\beta + \gamma$: parámetros que describen la forma de la curva sigmoidal.</p>	<i>Ecuación general sigmoidal</i>
Christensen Anderson	$ G^*(\omega) = G_g \left[1 + \left(\frac{\omega c}{\omega} \right)^{\frac{\log 2}{R}} \right]^{\frac{R}{\log 2}}$	<p>Dónde:</p> <p>$G^*(\omega)$: Módulo complejo a corte Pa.</p> <p>ωc: Frecuencia de corte, rad/s</p> <p>R: Índice reológico.</p>	<i>Ecuación Christensen Anderson</i>

Ecuación	Modelo matemático	Consideraciones	Observaciones
Christensen Anderson Marasteanu	$G^*(\omega) = G_o \left[1 + \left(\frac{\omega_o}{\omega} \right)^\beta \right]^{-k/\beta}$ $\beta = \frac{\ln\left(\frac{G_o}{2^k}\right)}{\ln G^*(\omega)}$	<p>Dónde:</p> <p>G^*: Módulo complejo a corte.</p> <p>G_o: Módulo cortante vitrio.</p> <p>ω: Frecuencia reducida (rad/s)</p> <p>ω_o: Frecuencia croosover, (rad/s)</p> <p>β y k: Parámetros del modelo.</p>	<p><i>Ecuación Christensen Anderson Marasteanu</i></p> <p>Este modelo se utiliza en la norma ASTM 6816 AASTHO PP42, para la construcción de las curvas maestras en ligantes asfálticos, y se ajustan las variables ω, β y k, asumiendo un valor de G_o constante (3×10^3 MPa).</p>
Christensen Anderson Sharrock	$G^*(\omega) = G_o \left[1 + \left(\frac{\omega_o}{\omega} \right)^\beta \right]^{-k/\beta}$ $\beta = \frac{\ln\left(\frac{G_o}{2^k}\right)}{\ln G^*(\omega)}$	<p>Dónde:</p> <p>G^*: Módulo complejo a corte.</p> <p>G_o: Módulo cortante vitrio.</p> <p>ω: Frecuencia reducida (rad/s)</p> <p>ω_o: Frecuencia croosover, (rad/s)</p> <p>β y k: Parámetros del modelo.</p>	<p><i>Ecuación Christensen Anderson Sharrock</i></p>

Fuente: (Huang Y. H., 2004) (Leiva Padilla, Loría Salazar, & Leiva Villacorta, 2013)

3.8.14 Construcción de las curvas maestras

Las curvas maestras son calculadas a partir de los valores de módulo dinámico obtenidos en el ensayo de laboratorio, controlado por la norma AASHTO T-342. Esta representación gráfica sintetiza el comportamiento reológico o viscoelástico del material a una temperatura de referencia usando el módulo dinámico o el ángulo de fase. Con el ensayo se determina el aporte de la mezcla asfáltica en su componente viscosa y su componente elástica.

Adicionalmente, para la determinación de las curvas maestras, en el caso de la tesis, se tuvo en cuenta la versión anterior de la normativa mencionada, TP-62 de la AASHTO, en la cual se describe brevemente la definición de las curvas maestras y los pasos de su construcción.

El principio de superposición tiempo temperatura, establece el mismo valor de módulo para diferentes condiciones de frecuencia y temperatura.

Las curvas maestras se pueden construir empíricamente usando una hoja de Excel o ajustando la curva a una función con forma conocida minimizando la suma de los errores cuadrados, entre el valor estimado y el valor real del módulo dinámico, encontrando el mejor ajuste.

Las curvas maestras indican el valor del módulo dinámico para la frecuencia (o inverso de tiempo) dado, a determinada temperatura. Dichos valores se calculan con la ecuación sigmoideal, la cual se obtiene a partir del ajuste de los datos reales determinados en el laboratorio. Con base en la deducción gráfica que desarrolló Barksdale en el año 1971 se relaciona el espesor del pavimento, el tiempo del pulso y la velocidad del vehículo (ver Figura 27).

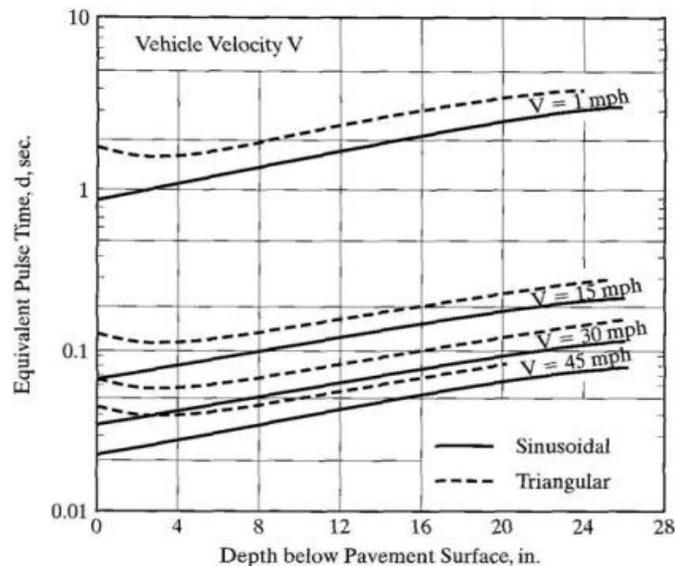


Figura 27. Pulso de Tiempo vs Espesor Pavimento.

Fuente: Tomado textual (Huang Y. H., 2004)

Antes de realizar un ajuste, se hace una revisión de los datos obtenidos desarrollando los diagramas de Black space y Cole-cole (Plano complejo), el primero indica la relación entre el ángulo de desfase obtenido y el logaritmo del módulo, y el segundo indica la relación entre la componente real y la componente imaginaria del módulo. Ambos deben tener un R^2 significativo

para un ajuste cuadrático. Estos diagramas permiten confirmar que la mezcla es reológicamente simple, por lo que ensayos a diferentes temperaturas forman una única curva.

Para diferentes frecuencias y temperaturas todas generan una única curva para una misma temperatura y el material respeta su respuesta reológica para una misma temperatura. La Figura 28. Diagrama Black y Figura 29. Diagrama cole-cole, se presentan ejemplos de diagramas obtenidos de revisión para la mezcla estudiada.

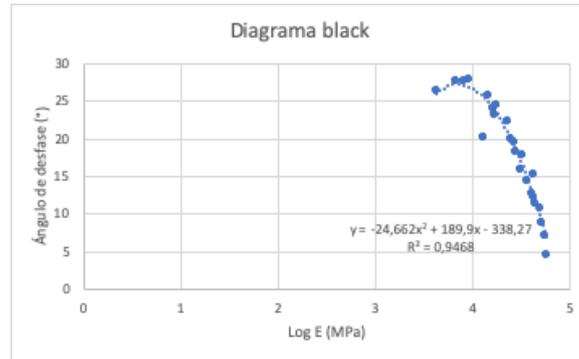


Figura 28. Diagrama Black

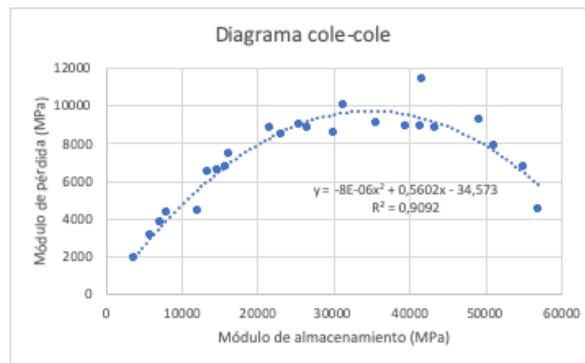


Figura 29. Diagrama cole-cole

Siguiendo con la ecuación sigmoideal:

$$\text{Log } |E'| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log tr)}}$$

Donde:

$$tr = \frac{t}{\alpha t}$$

Donde:

$$t = \frac{1}{f}$$

$f = \text{frecuencia del ensayo}$

Y:

$$\alpha t = \frac{C1(T - T_R)}{C2 + T - T_R}$$

$$T = \text{Temperatura}$$

$$T_R = \text{Temperatura de referencia}$$

El factor at (shift factor) es aquel que produce el ajuste de las curvas por el principio de superposición, teniendo en cuenta el efecto de reducción causado por la variación de temperatura y de frecuencia. El logaritmo de at debe tener un ajuste lineal con respecto a la temperatura (ver Figura 30).

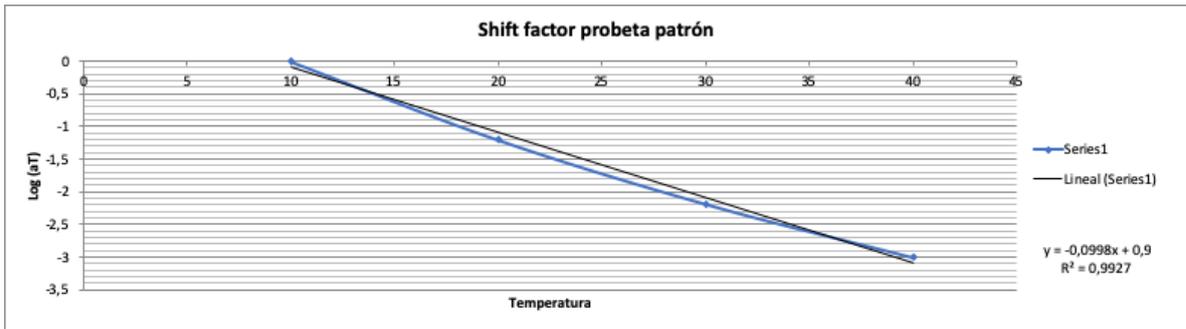


Figura 30. Shift factor ejemplo

En el caso de esta tesis, la obtención de las curvas se realizó con Microsoft Excel, con el uso de la herramienta solver, minimizando el error cuadrático del valor del módulo real con el módulo calculado con la ecuación sigmoideal, para los datos reales (ver Figura 30. Shift factor ejemplo y Figura 31. Parámetros de Solver en microsoft excel)

El comando solver se utilizó con método de resolución evolutionary, y se fijaron restricciones para cada uno de los parámetros alfa, delta, gamma y beta, con el fin de evitar obtener el cero como solución.

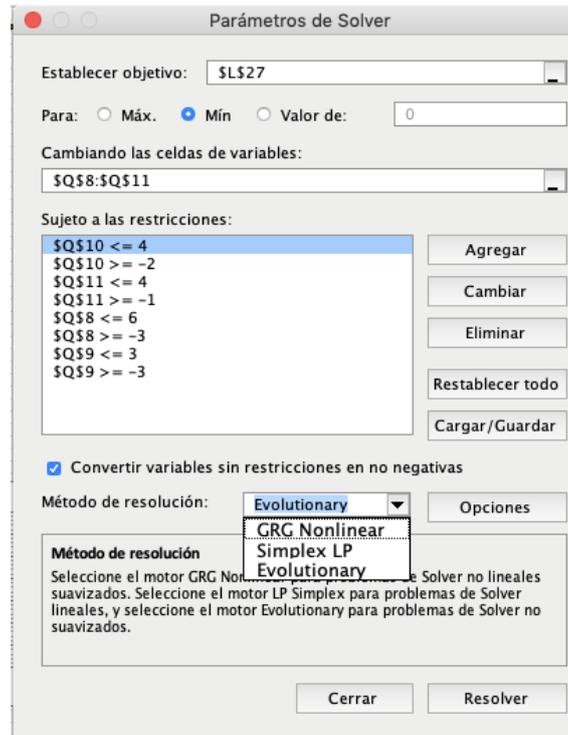


Figura 31. Parámetros de Solver en microsoft excel

Una vez minimizado el error, se reemplazó el término “tr” con el fin de tener un rango suficiente de valores para generar la curva maestra. Este proceso se realizó para cada una de las temperaturas con las que se llevó a cabo el ensayo del módulo dinámico.

Un ejemplo de los resultados obtenidos es el siguiente, tomando como Temperatura 10°C (ver Figura 32):

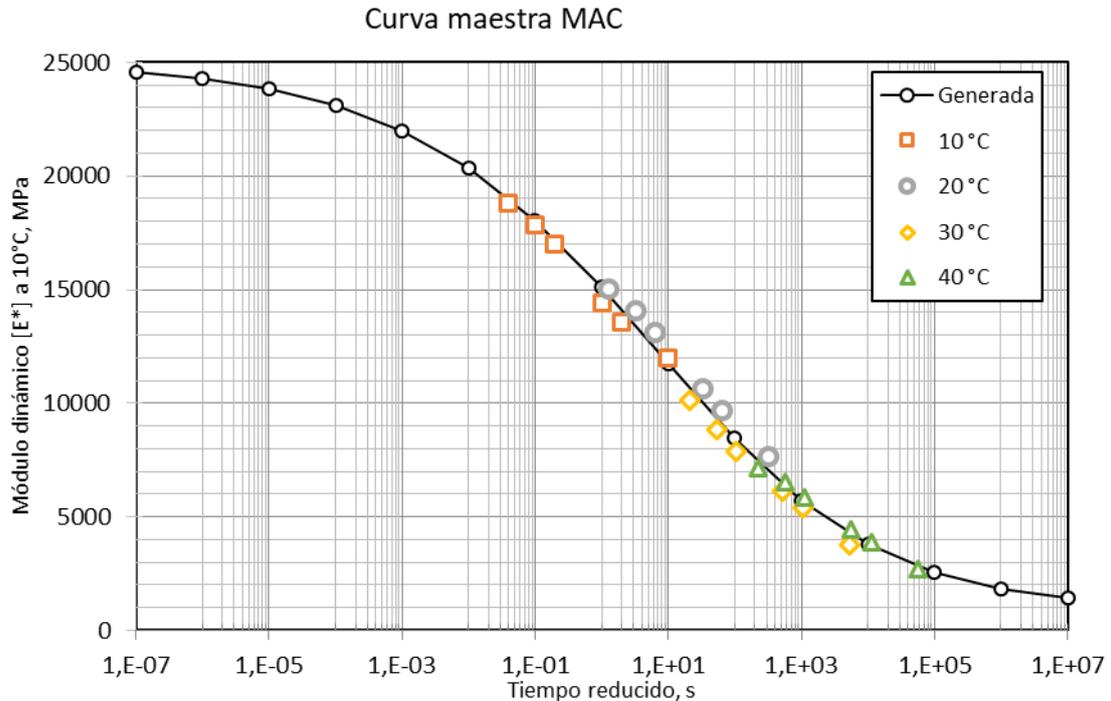


Figura 32. Ejemplo de curva maestra

Fuente: Propia

En estos se encuentran los resultados de laboratorio del ensayo del módulo dinámico, el ajuste de la curva maestra para las temperaturas de ensayo 10, 20, 30 y 40 °C.

3.9 Conclusiones a cerca del conocimiento actual

Actualmente, el estudio de los concretos asfálticos ha avanzado sin que los ensayos tradicionales pierdan relevancia. El método Marshall ideado en el año 1930 sigue utilizándose principalmente para obtener el porcentaje óptimo de asfalto, y después de más de 90 años, sigue siendo de gran actualidad, entre otras razones, por la facilidad técnica y económica de acceso al mismo y su popularidad. Inclusive la metodología Marshall continúa siendo fundamento de innovadoras tecnologías, por ejemplo, se hacen ensayos con equipos innovadores de tecnología punta, pero se siguen usando las probetas tipo Marshall. Por lo tanto, para obtener el porcentaje óptimo de una MAC, se sigue usando el método Marshall completo o algunos de sus parámetros, principalmente en algunos estados de Estados Unidos, toda Latinoamérica y en parte de países de Asia.

En Europa se ha seleccionado el porcentaje de huecos en las mezclas como el parámetro más importante para determinar el porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla. Desde luego tanto en Europa como en Estados Unidos y todo el mundo han empezado a combinar los ensayos de

carga monotónica con los ensayos de cargas dinámicas, que no solo permiten la evaluación de la mezcla a diferentes frecuencias, sino que la posibilidad de hacer los ensayos a diferentes temperaturas es una de las mayores ventajas para conocer el desempeño de los materiales ante las condiciones climáticas a las que va a estar sometido. Es conocido que los módulos dinámicos son ensayos importantes en carreteras de altos volúmenes. Esto resulta de importancia porque permite conocer el comportamiento de una mezcla especial, como lo es una mezcla con residuo cerámico. Al ser el residuo cerámico un material desconocido para el estudio de las mezclas asfálticas, estudiarlo en el comportamiento en módulos dinámicos, ofrece nuevos elementos para tomar decisiones en el momento de incorporarlo. Desde luego el cerámico se ha estudiado intensamente con otras orientaciones y ahora que se considera ser usado como parte del esqueleto mineral, es de vital importancia conocer su incidencia ante diferentes factores, como lo son la frecuencia, el tiempo de aplicación de la carga y la temperatura.

Además, es relevante tomar en consideración los ensayos de caracterización de los materiales, conocer a nivel microscópico las propiedades, los elementos químicos que contienen, los orígenes de estos materiales, identificar sus características actuales para predecir su comportamiento futuro, lo cual es totalmente válido para evaluar el desempeño de los materiales involucrados en la infraestructura vial. En esta área todavía hace falta profundizar el estudio por parte de los investigadores de la ingeniería de caminos para que la caracterización a ese nivel tenga aportes relevantes que permitan tomar decisiones en cuanto al uso de aditivos para el mejoramiento de los mismos o la optimización de los recursos.

Adicionalmente, se identifica que los objetivos sostenibles de las Naciones Unidas, ONU, son un reflejo de la necesidad que tienen las comunidades por alcanzar mejores indicadores en sus calidades de vida. Por dicha razón, se ha impulsado la estrategia de las tres R de Green Peace, Reciclar, Reusar y Reparar. El problema de la disposición de los residuos ha permitido empezar a revisar cómo se puede disponer de los residuos industriales de una forma más eficiente y promover su reuso en un proceso industrial nuevo y diferente.

En Estados Unidos y Europa se inició mitigando el impacto ambiental ocasionado por los neumáticos en desuso, por medio de diferentes metodologías, entre ellas la incorporación en la mezcla asfáltica y hoy en día en todo el mundo se tienen infraestructuras construidas con concretos asfálticos modificados o con incorporación de neumático molido. El neumático no es el único material que puede reusarse. Ya desde hace unos años se ha empezado en Europa, específicamente en España, Valencia, y en Asia se han desarrollado líneas de investigación en donde usan el reciclado de material de residuo cerámico con diferentes porcentajes para incorporarse en la mezcla asfáltica. Inclusive, como se pudo ver en España, se ha construido una vía con carpeta de rodadura con varios porcentajes de reemplazo de árido por cerámica triturada, siendo esta hasta la fecha la única carretera construida en el mundo con fines de investigación con este material.

En Asia, también se han hecho investigaciones en donde se ha incluido cerámica molida en reemplazo de llenante mineral, y cuyos concretos asfálticos se han sometido a ensayos de módulos dinámicos con resultados satisfactorios, recomendando que el porcentaje de reemplazo de la llenante sea alrededor de 2.5% y en Turquía, específicamente, se encontró un

porcentaje recomendado del 40% en volumen para mezclas SMA. También, en Asia una investigación recomendó usar 20% de residuo cerámico en MAC.

En América el proceso de incorporación de residuo industrial reciclado está fortaleciéndose. Por ejemplo, en Colombia, México y Brasil es posible encontrar carreteras construidas con cemento asfáltico con grano de caucho, pero todavía no es común encontrar publicaciones o investigaciones de concreto asfáltico construidas con inclusión de residuo cerámico, no hay carreteras construidas y en forma mínima se encuentran publicaciones o proyectos de grado desarrollados con estos temas. Lo anterior, muestra la necesidad de profundizar sobre esta línea de investigación con experimentación en laboratorio y con pruebas pilotos que pudieran conllevar a la implementación generalizada del residuo cerámico en MAC.

En los últimos años, se ha evidenciado que las metodologías especialmente de ingeniería de los pavimentos deben desarrollarse con ensayos aplicados en los materiales que se usarán en la zona que se está estudiando. Hay un llamado de los investigadores a no incrementar las correlaciones o a inferir datos sino por el contrario a ejecutar los ensayos de laboratorio con los mismos materiales con que se construiría la carretera. Es por eso que el desarrollar la experimentación con materiales propios es casi como tener dos investigaciones paralelas que permitirán abonar ese vacío experimental en cuanto a la ejecución de ensayos de módulos dinámicos con materiales típicos de la zona. La ventaja de trabajar con experimentación de ensayos dinámicos es que se pueden simular las condiciones ambientales por medio del parámetro de la temperatura, construir las probetas con los materiales de cada una de las zonas, y evaluar el comportamiento de las mezclas asfálticas con base a especificaciones o reglamentaciones técnicas establecidas en cada país, lo cual permite ampliar el análisis de validación o rechazo de las consideraciones establecidas, con la correspondiente comparación transversal.

Con la recopilación bibliográfica realizada se confirma la necesidad de hacer esta investigación con el uso de cerámico reciclado dentro de MAC para profundizar sobre su factibilidad y encontrar los porcentajes adecuados de uso.

4. Objetivos e hipótesis

El principal objetivo de esta investigación es confirmar una nueva alternativa de uso del residuo cerámico como agregado en mezcla asfáltica tanto en España como en Colombia. Para ello se desarrollaron dos diseños experimentales, uno en Valencia, España, y otro en Bucaramanga, Colombia, tomando en consideración la diferencia de las fuentes de los materiales a usar en las mezclas, en las especificaciones técnicas de cada nación, para conocer si los resultados en ambos países son similares con el fin de ir generalizando a futuro el comportamiento de la mezcla asfáltica bajo la inclusión del residuo cerámico.

Para lo anterior, se realizaron módulos dinámicos, ensayos de laboratorio que permitieron conocer el comportamiento de las mezclas asfálticas bajo condiciones dinámicas de temperatura, carga y frecuencia, de tal manera que se pudieron construir curvas maestras bajo una temperatura de referencia.

Para la consecución de dicho objetivo, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Confirmar el aprovechamiento de residuos industriales cerámicos como aditivos o modificadores de las características convencionales y dinámicas de una mezcla asfáltica en caliente.
- Comparar los resultados de las experimentaciones convencionales y dinámicas realizadas en España y en Colombia con relación al desempeño de la mezcla asfáltica con inclusión de residuos cerámicos industriales.
- Establecer las variaciones desde el punto de vista convencional y dinámico que las mezclas asfálticas pueden mejorar.

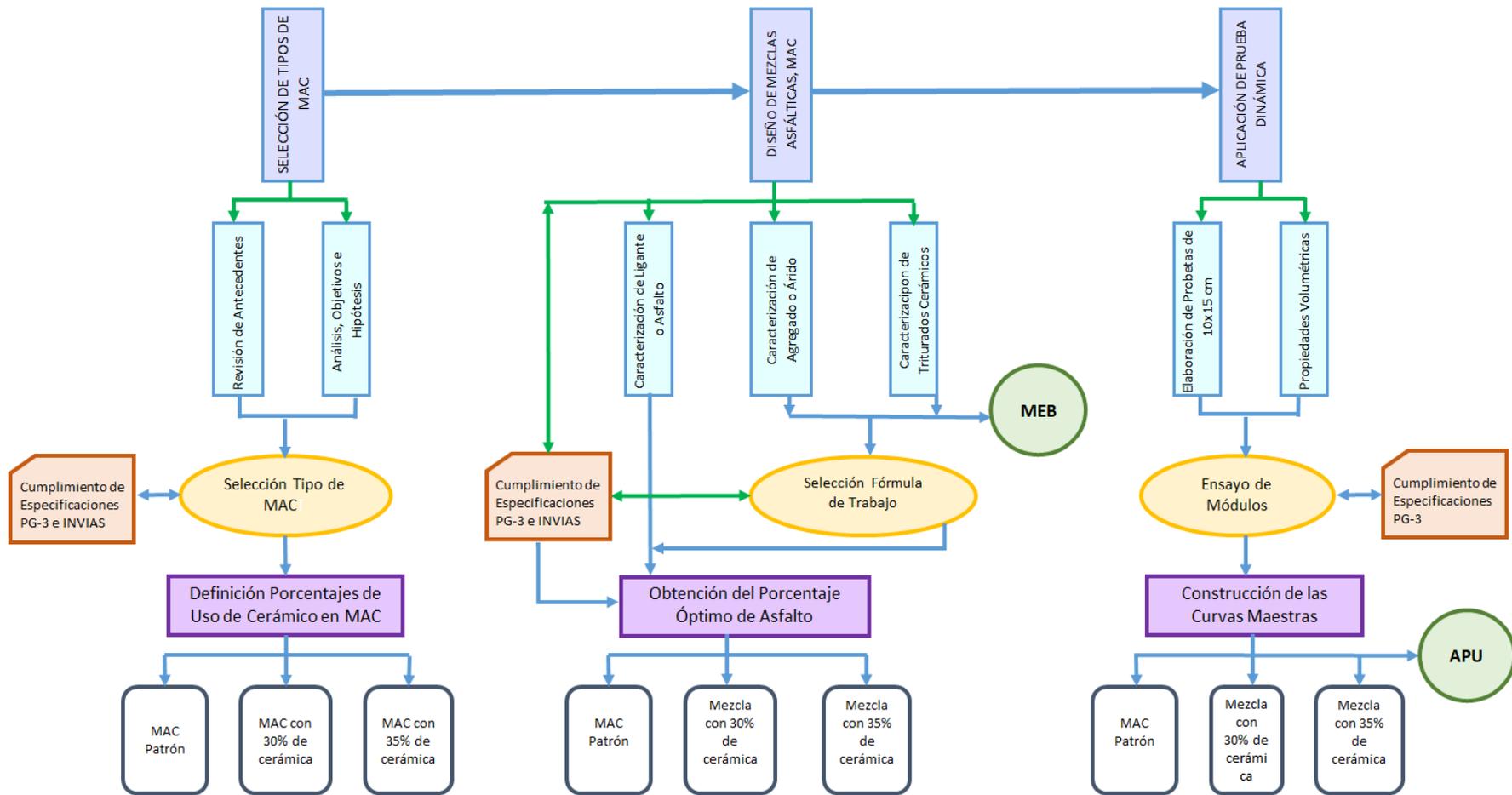
La hipótesis a contrastar es: "Mejorará el comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas convencionales cuando se adicionan residuos provenientes de procesos industriales cerámicos a una mezcla asfáltica en caliente".

5. Metodología

Esta tesis doctoral estudia el comportamiento de las MAC cuando se incluye triturado cerámico industrial en reemplazo del árido o agregado en proporciones de 0% (patrón), 30% y 35% bajo ensayos de módulos dinámicos y el desarrollo de curvas maestras cuyos experimentos iguales se han desarrollado tanto en España como en Colombia para comprobar la factibilidad técnica de su uso en el diseño de estructuras de pavimento.

La primera etapa corresponde a la revisión de antecedentes, selección de artículos para la definición de una línea base, relacionada con los tipos de mezclas seleccionados. Posteriormente para el diseño de las mezclas asfálticas en caliente, MAC, se consideraron la caracterización de los materiales, tanto áridos como triturados cerámicos industriales siguiendo las especificaciones técnicas y seguida de la construcción de las probetas para la aplicación de los ensayos dinámicos, específicamente de los módulos dinámicos. Con dichos módulos se construirán las curvas maestras para escoger bajo estas figuras los módulos a usar en las metodologías de diseño estructural de ambos países, tanto España como Colombia.

La Figura 33, resume las grandes etapas que se siguieron para desarrollar el proyecto, tanto en España como en Colombia. En los numerales siguientes se presenta una descripción detallada de los procedimientos y estrategias usadas en cada etapa.



Nota: MEB: Caracterización con el Microscopio Electrónico de Barrido, APU: Análisis de Precios de las Mezclas Diseñadas.

Figura 33. Metodología

5.1 Selección de tipos de mezcla asfáltica en caliente, MAC

Se llevó a cabo la recopilación de las referencias bibliográficas relacionadas con las mezclas asfálticas modificadas en especial con las que incluyen el uso de residuo industrial cerámico. Se investigó sobre la producción del residuo cerámico, el proceso de producción usado en las industrias que en Colombia y en España se dedican a la generación de baldosas cerámicas. Se investigó sobre la normativa vigente en Colombia y en España relacionada con la posibilidad de reciclar residuos industriales. Se revisó el proyecto que abrió la línea de investigación en España: Estudio Proyecto Impiva, Aprovechamiento de residuos cerámicos en las mezclas bituminosas en caliente como sustitutivo parcial de los áridos naturales, de origen calizo en capas de base e intermedia, y de los áridos de origen silíceo en capas de rodadura.

De igual manera en Colombia se indagó sobre el avance de las líneas de investigación relacionadas con el uso de la cerámica como agregado pétreo en mezclas asfálticas encontrando que esta alternativa sostenible faltaba por explorarse. Sin embargo, se recopiló la información bibliográfica disponible relacionada con el uso del residuo cerámico en ligantes bituminosos.

Con base en lo anterior se tomó como mezclas tipo a continuar en la siguiente fase las siguientes: mezcla asfáltica en caliente para España, AC22 BIN S, y para Colombia MSC 25, cada una de ellas con porcentaje de triturado cerámico, inicialmente 0%, como patrón, 30% de triturado cerámico y 35% de triturado cerámico. En ambos casos, se trata de mezclas semidensas con características similares.

5.2 Diseño de mezclas asfálticas en caliente, MAC

Con base en los resultados obtenidos de la recopilación de referencias se decidió continuar con la experimentación en aquellas mezclas que resultaban con valores favorables en la etapa inicial. Para la experimentación en Valencia se continuó con el diseño de mezclas AC 22 BIN S y para la experimentación en Bucaramanga se definió un tipo de mezcla similar denominada MSC 25 (ver Tabla 24). Son similares en ser semidensas y en el tamaño máximo del árido o agregado. Es importante recordar que la estandarización de aberturas de los husos granulométricos tiene rangos diferentes en Europa que en América. Por eso no coinciden tamaños máximos del agregado y desde luego los nombres son propios de acuerdo a la normativa en cada país.

Tabla 24. Nomenclatura para mezclas semidensas en España y Colombia

AC22 BIN S			
AC	BIN	ligante	S
Mezcla tipo hormigón bituminoso	Capa de empleo de la mezcla Intermedia	Tipo hidrocarbonado utilizado	Tipo de granulometría semidensa, (S)
MSC 25			
M	S	C	25
Mezcla	Semidensa	Caliente	Tipo de granulometría

Fuente: (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015) (Instituto Nacional de Vías, 2013)

De igual manera se decidió emplear áridos/agregados de la fuente de Cheste en Valencia para España, que fueron facilitados por la empresa Pavasal y el ligante tipo 35/50 fue suministrado por la empresa Repsol. En Bucaramanga, Colombia, la empresa Sánchez Constructora S.A suministró los agregados y la empresa Asfaltart S.A suministró el cemento asfáltico tipo 60/70.

En cuanto al residuo cerámico en el caso de España fue suministrado por Becsa, empresa de construcción y servicios integrales de la Comunidad Valenciana en la zona de Castellón, Valencia, y en Colombia por Cerámica Italia, industria especializada en la producción de productos de revestimiento y comercialización para el sector de la construcción y remodelación en la ciudad la San José de Cúcuta, Departamento de Norte de Santander, al oriente de Colombia en frontera con el Departamento de Santander, cuya capital es Bucaramanga.

La experimentación fue desarrollada en España en el laboratorio de Caminos en la Universidad Politécnica de Valencia, en Valencia, y en el laboratorio de Pavimentos de la empresa Pavasal, en Cheste, éste último para construir las probetas en el equipo del compactador giratorio. En Colombia toda la experimentación se desarrolló en el laboratorio de Geotecnia y Pavimentos de la Universidad Pontificia Bolivariana, ubicada en la ciudad de Bucaramanga.

5.3 Diseño de mezclas asfálticas en caliente bajo la normativa española

Para el diseño de las mezclas se siguió en España los protocolos establecidos por el Ministerio de Fomento con el Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3) Parte 5a firmes (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015).

5.3.1 Caracterización de áridos, triturados cerámicos y construcción de la fórmula de trabajo

Para el cumplimiento de las condiciones de calidad en España se realizaron los siguientes ensayos considerando materiales gruesos y finos:

- Angulosidad (porcentaje de caras de fractura).
- Forma (Índice de lajas).
- Resistencia a la fragmentación (coeficiente de Los Ángeles).
- Limpieza (contenido de impurezas).
- Granulometría.
- Finura y actividad: La densidad aparente del polvo mineral.

Una vez desarrollados los ensayos de calidad descritos y habiendo verificado el cumplimiento de los requisitos de calidad, se construyeron las fórmulas de trabajo para la mezcla asfáltica patrón o de 0% de triturado de cerámica, para la mezcla asfáltica con 30% de triturado de cerámica y para la mezcla asfáltica con 35% de triturado de cerámica.

5.3.2 Caracterización microscópica del residuo cerámico y árido

Usando el microscopio electrónico de barrido, MEB, microscopio de última generación marca TESCAN el cual permite obtener imágenes de alta definición hasta 1'000.000 X (o aumentos) del Laboratorio de Nanotecnología y Nanociencia de la Universidad Pontificia Bolivariana se realizó un análisis de micrografía de las cerámicas molidas o trituradas transportadas desde España y

se compararon con las usadas en Colombia. Se definieron los siguientes parámetros de trabajo buscando que quedaran lo más cerca posible para que puedan ser comparadas:

- HV: 5.000 Volts
- beam intensitive: cercano a 3
- detectores de electrones: BSE y SE (retrodispersados y secundarios)
- distancia Z desde la base del pin al lente objetivo: 25 mm
- distancia de trabajo WD: entre 17,5 mm y 21,0 mm

Adicionalmente, se incluyó el estudio geológico de la zona origen de los agregados y de los triturados de cerámica.

5.3.3 Verificación técnica del cemento asfáltico

Considerando las limitaciones, se constató el cumplimiento de requerimientos incluidos en la ficha técnica del cemento asfáltico o betún suministrado por Pavasal, quien a su vez tiene como proveedor a la empresa Repsol.

5.3.4 Ejecución del diseño de mezcla

Se prepararon quince (15) probetas de cada una de las dosificaciones para mezclas convencionales o patrón (testigo), y mezclas con inclusión de 30% y 35% de cerámica triturada:

- Construcción de 15 probetas empezando con 3,5% hasta 5,5%, construidas con 75 golpes por cada cara.
- Ejecución de los ensayos de densidad bulk de la mezcla, peso específico máximo de la mezcla, densidad aparente de la mezcla, estabilidad y flujo de mezcla patrón (testigo).
- Ejecución de los ensayos de densidad bulk, peso específico máximo de la mezcla, densidad aparente de la mezcla, estabilidad y flujo de la mezcla con inclusión de 30% de cerámico.
- Ejecución de los ensayos de densidad bulk, peso específico máximo de la mezcla, densidad aparente de la mezcla, estabilidad y flujo de la mezcla con inclusión de 35% de cerámico.
- Establecimiento del porcentaje óptimo de ligante para cada una de las mezclas desarrolladas patrón (testigo), mezcla asfáltica con inclusión del 30% de residuo cerámico y mezcla asfáltica con inclusión del 35% de residuo cerámico, teniendo como base el porcentaje de huecos de acuerdo al PG-3 como aparece en la Tabla 18

En tal caso, el contenido de huecos en áridos, de mezclas con tamaño máximo de veintidós o de treinta y dos milímetros ($D = 22 \text{ mm}$ o $D = 32 \text{ mm}$) deberá ser mayor o igual al catorce por ciento ($\geq 14 \%$).

5.3.5 Confirmación del diseño de mezcla

Elaboración de seis probetas para cada una de las mezclas con los contenidos óptimos de asfalto resultantes y ejecución del ensayo de sensibilidad al agua para la verificación del diseño de cada una de las mezclas y confirmación del valor óptimo de asfalto o de diseño, siguiendo la norma UNE-EN-12697-12. El ensayo debe dar como resultado $ITSR \geq 80\%$ para capas de base e intermedia, para probar la adherencia de árido – asfalto mediante la comparación de pruebas

de tracción indirecta en probetas sometidas a inmersión y probetas que permanecieron secas a temperatura controlada.

Con esta información se confirma y define el porcentaje óptimo de asfalto de cada una de las MAC, patrón, MAC con 30% y MAC con 35%.

5.4 Diseño de mezclas asfálticas bajo la normativa colombiana

Para el diseño de las mezclas, se siguió en Colombia los protocolos establecidos en las Especificaciones Técnicas de Construcción de Carreteras de 2013.

5.4.1 Caracterización de agregados, triturados cerámicos y construcción de la fórmula de trabajo

Se ejecutaron los siguientes ensayos en los agregados empleados:

- Desgaste en la máquina de los Ángeles.
- Degradación por abrasión en el equipo de Micro-deval.
- Resistencia mecánica por el método del 10% de finos.
- Pérdidas de solidez en sulfato de magnesio, agregados finos y gruesos.
- Impurezas en agregado grueso.
- Índice de plasticidad.
- Equivalente de arena.
- Valor azul de metileno.
- Partículas planas y alargadas.
- Caras fracturadas.
- Angularidad.

Una vez desarrollados los ensayos de calidad descritos y habiendo verificado el cumplimiento de los requisitos de calidad, se construyeron las fórmulas de trabajo para la mezcla asfáltica patrón o de 0% de triturado cerámico, para la mezcla asfáltica con 30% de triturado de cerámica y para la mezcla asfáltica con 35% de triturado de cerámica.

5.4.2 Caracterización microscópica del residuo cerámico y agregado

Usando el Microscopio Electrónico de Barrido, MEB, Microscopio de última generación marca TESCAN el cual permite obtener imágenes de Alta Definición hasta 1'000.000 X (o aumentos) del Laboratorio de Nanotecnología y Nanociencia de la Universidad Pontificia Bolivariana se realizó un análisis de micrografía de las cerámicas molidas o trituradas transportadas desde Norte de Santander y se compararon a su vez con las españolas. Se definieron los siguientes parámetros de trabajo buscando que quedaran lo más cerca posible para que puedan ser comparadas:

- HV: 5.000 Volts
- beam Intensitive: cercano a 3
- detectores de electrones: BSE y SE (retrodispersados y secundarios)
- distancia Z desde la base del pin al lente objetivo: 25 mm
- distancia de trabajo WD: entre 17,5 mm y 21,0 mm

Adicionalmente, se incluyó el estudio geológico de la zona origen de los agregados y de los triturados de cerámica.

5.4.3 Verificación técnica del cemento asfáltico

Considerando las limitaciones, se constató el cumplimiento de requerimientos del cemento asfáltico o betún suministrado por Asfaltart, quien a su vez tiene como proveedor a la Empresa Colombiana de Petróleos.

5.4.4 Ejecución del diseño marshall

Se prepararon quince (15) probetas como mínimo de cada una de las dosificaciones para mezclas convencionales o patrón (testigo), y mezclas con inclusión de 30% y 35% de cerámica triturada:

- Construcción de 15 probetas como mínimo empezando con 3,5% hasta 6.0%, construidas con 75 golpes por cada cara.
- Ejecución de los ensayos de densidad bulk de la mezcla, peso específico máximo de la mezcla, densidad aparente de la mezcla, estabilidad y flujo de mezcla patrón (testigo).
- Ejecución de los ensayos de densidad bulk, peso específico máximo de la mezcla, densidad aparente de la mezcla, estabilidad y flujo de la mezcla con inclusión de 30% de cerámico.
- Ejecución de los ensayos de densidad bulk, peso específico máximo de la mezcla, densidad aparente de la mezcla, estabilidad y flujo de la mezcla con inclusión de 35% de cerámico.
- Establecimiento del porcentaje óptimo de ligante para cada una de las mezclas desarrolladas: patrón o 0 % de residuo cerámico, mezcla asfáltica con inclusión del 30% de residuo cerámico y mezcla asfáltica con inclusión del 35% de residuo cerámico, teniendo como base el INVIAS. Con base en el cumplimiento de las especificaciones 450-13 de INVIAS se escoge un porcentaje óptimo de asfalto siguiendo todos los parámetros de la Tabla 19 del numeral 3.6.6.5.

5.4.5 Confirmación del diseño de mezcla

Elaboración de seis probetas para cada una de las mezclas con los contenidos óptimos de asfalto resultantes y ejecución del ensayo de adherencia para verificación del diseño de cada una de las mezclas y selección del valor de diseño (I.N.V E-725, 2013). El ensayo debe dar como resultado $0.1 \geq 80\%$ para capas de base e intermedia, para probar la adherencia de árido – asfalto mediante la comparación de pruebas de tracción indirecta en probetas sometidas a inmersión y probetas que permanecieron secas a temperatura controlada.

Con esta información se confirma y define el porcentaje óptimo de asfalto de cada una de las MAC, patrón, MAC con 30% y MAC con 35%.

5.5 Aplicación de la prueba dinámica

Construcción de tres probetas por cada tipo de mezcla en el equipo de compactador giratorio de tamaño 6" de diámetro y 6,7" o 17 cm de alto, con el fin de extraer las probetas requeridas para el ensayo de módulo dinámico con dimensiones de diámetro 4" y de altura aproximadamente 15 cm tal como lo indica la norma UNE, teniendo en cuenta la densidad

calculada en el diseño de la mezcla asfáltica y la altura determinada de la probeta, se cuantificó el volumen preparado.

Estos especímenes se almacenaron en una cámara a 25°C para mantenerlos a temperatura controlada, antes de desarrollar los ensayos de módulos dinámicos.

Para los ensayos de módulos dinámicos se trabajó con el equipo Cooper con temperaturas de 10, 20, 30 y 40 °C en España y con el equipo DTS-30 con temperaturas de 10, 20, 30 y 40 °C en Colombia, al igual que con diferentes frecuencias ciñéndose a la norma de ensayo UNE.

5.6 Construcción de las curvas maestras de las mezclas de comparación

Una vez obtenido en cada una de los ensayos de módulos por tipo de mezcla, MAC patrón, MAC con 30% y MAC con 35%, se procedió a organizar la información de tal manera que utilizando la hoja electrónica Excel se construyeron las gráficas usando el principio de superposición y tomando una temperatura de referencia, que fuera común a las dos ciudades tomadas como base, Valencia y Bucaramanga.

Para la construcción de las curvas maestras se seguirá el protocolo establecido en la norma UNE para desarrollar las de ambos países, tanto Colombia como España.

6. Desarrollo experimental y resultados en España

6.1 Línea de partida de la investigación en el laboratorio de Caminos - UPV

Del proyecto Impiva denominado “Aprovechamiento de residuos cerámicos en las mezclas bituminosas en caliente como sustitutivo parcial de los áridos naturales, de origen calizo en capas base e intermedias”, desarrollado en Valencia, se tomaron las siguientes premisas para replicar o tener en cuenta para desarrollar la investigación:

- Tipo de mezcla usada: mezcla asfáltica intermedia semidensa, AC BIN 22 S.
- Tamaños de clasificación del triturado cerámico corresponden a 0-4 mm y 4-11 mm.
- Áridos de cerámica reciclados en un rango entre 30% y valores menores de 50% en peso que reemplazan los áridos de las mezclas asfálticas de acuerdo a las prescripciones del PG-3.
- Porcentaje recomendado de reemplazo de árido por triturado cerámico de 30% en peso.
- No se recomienda el uso de reemplazo de árido por triturado cerámico de 50% en peso.
- Se recomienda usar áridos de fuentes diferentes a la usada en el estudio inicial que fue Castellón – Becca.
- Se recomendó usar en vías secundarias y/o locales, no en vías troncales o primarias.

Partiendo de las premisas identificadas, se decidió establecer un diseño de experimentos que compara una mezcla convencional con una mezcla con reemplazo de 30%, otra mezcla con reemplazo de 35% y otra con 40% de reemplazo. Se gestionó el suministro de áridos por la fuente de Cheste – Pavasal en la Provincia de Valencia.

Con base en los avances experimentales realizados se tomaron decisiones que se irán explicando en cada etapa del desarrollo y resumen de resultados.

6.2 Diseño de las mezclas asfálticas en caliente en el laboratorio de Caminos - UPV

El diseño de mezcla asfáltica se hizo con los siguientes pasos: comprobación de la idoneidad de los agregados o áridos, confirmación del cumplimiento de las especificaciones técnicas del betún o asfalto y posteriormente la obtención del porcentaje óptimo de asfalto por medio del cumplimiento del Pliegos de prescripciones técnicas PG-3, norma 542, para cada una de las mezclas desarrolladas y de la confirmación del mismo con los parámetros de la metodología Marshall. Es importante aclarar que en España la normativa para diseño de mezcla bituminosa no sigue la metodología Marshall, solo exige el cumplimiento de los parámetros de porcentaje de huecos o vacíos de la mezcla y el cumplimiento de la caracterización de los materiales.

6.2.1 Caracterización técnica de los áridos

Los materiales usados tienen como fuente la cantera de Cheste de propiedad de la empresa Pavasal, a los cuales se les han aplicado los ensayos de caracterización y se obtuvieron los siguientes resultados (ver Tabla 25). En la primera columna se encuentra el nombre del ensayo aplicado, en la segunda está consignado el valor obtenido por la muestra y la última columna corresponde a la norma de comparación, en este caso el Pliego de prescripción técnica de carreteras.

Tabla 25. Caracterización de áridos de la fuente Cheste

Ensayo de laboratorio	Resultado	Requisito PG-3	Cumple PG-3
Granulometría	Ver Tabla 26. Granulometría de árido Cheste	Ver Tabla 27. Husos granulométricos AC22S	
Equivalente de arena	56	>40	Si cumple
Desgaste de los ángeles Rodadura/Intermedia/Base	Fracción	Porcentaje	<20/35/30 %
	6/12	22%	
	12/20	22%	Si cumple
Caras de fractura Rodadura/Intermedia/Base	Fracción	Porcentaje	Mínimo 75/60/60
	20/32	100%	
	12/20	100%	
	6/12	100%	
	4/8	100%	Si cumple
Índice de lajas	Fracción	Porcentaje	<20%
	20/32	8%	
	12/20	9%	
	6/12	8%	
	4/8	7%	

Fuente: (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015)

A continuación, la distribución granulométrica del árido en Cheste, en las diferentes tolvas disponibles como lo son 20/32, 12/20, 6/12, 4/8, 0/4 y el filler (llenante) usado en el diseño

experimental. En la Tabla 26 y en la Tabla 27, se encuentra los porcentajes de acuerdo a las aberturas de los tamices vs el porcentaje que pasa.

Tabla 26. Granulometría de árido Cheste (% que Pasa)

Abertura de Tamices	20/32	12/20	6/12	4/8	0/4	Filler Calizo
45	100	100	100	100	100	100
31.5	97	100	100	100	100	100
22.4	97	100	100	100	100	100
16	12	79	100	100	100	100
8	0	1	17	97	100	100
4	0	1	1	11	100	100
2	0	1	1	2	75	100
0.5	0	0	1	1	36	100
0.25	0	0	1	1	23	100
0.063	0.1	0.2	0.3	0.4	12	85.3

Fuente: (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015)

Tabla 27. Husos granulométricos AC22S

Tipo de mezcla	Abertura de los tamices UNE – EN 933-2 (mm) / porcentaje que pasa %								
	45	32	22	16	8	2	0,5	0,25	0,063
AC22S	100	90-100	70-88	50-66	24-38	11-21	7-15	3-7	

Fuente: Tomado textual (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2015)

6.2.2 Caracterización del betún o asfalto o ligante

Los ensayos de laboratorio que respaldan el uso del betún suministrado por Repsol, a través de Pavasal fueron:

Tabla 28. Caracterización del Betún

Ensayo de Laboratorio	Valor	Norma	Cumple PG-3
Penetración a 25°C (0.1mm)	44	UNE EN 1426	35/50
Anillo y Bola °C	54.4	UNE EN 1427	Si
Índice de Penetración	-0.45	UNE EN 12591	Si

Fuente: Hoja técnica Repsol, 2018

6.2.3 Caracterización de residuo industrial triturado cerámica

El material triturado de cerámica se sometió a la mayor cantidad de ensayos posibles. Este material fue suministrado por la empresa Becsa de Castellón. En la Tabla 29, se observan los resultados y la normativa de comparación en la última columna.

Tabla 29. Caracterización del residuo cerámico triturado proveniente de Castellón, España

Ensayo (Unidad)	Límite propuesto por la norma (Rodadura/Intermedia/Base)	Triturado Cerámico	Cumple PG-3
Resistencia a la fragmentación (coeficiente de Los Ángeles (%Pérdidas))	<20/35/30%	27%	SI ambos
Limpieza superficial en el árido	Máximo 0,5%	0,2	SI ambos
Equivalente de arena	> 40 para todos T %	86	SI ambos
Valor Máximo del Índice de Lajas	Máximo 20	0,5%	SI ambos
Caras de fractura (%)	Mínimo 75/60/60	100%	SI ambos
Densidad del polvo mineral	0,5 -0,8 g/cm ³	NA	NA

A continuación, se presentan los porcentajes que pasan de los triturados cerámicos de los tamaños 4/10 y 0/4 mm a los cuales se les realizó el ensayo de gradación. Estos valores se tuvieron en cuenta para el cálculo de la fórmula de trabajo con reemplazo de triturado de cerámica.

Tabla 30. Granulometría Triturado Cerámico (% que Pasa)

Abertura de Tamices	4/10	0/4
45		
31.5		
22.4		
16	100	
8	87,7	100
4	8,3	99,5
2	2,1	67,2
0.5	2	26,6
0.25	2	18,7
0.063	1,9	10,1

6.2.4 Caracterización micro del árido y del residuo cerámico y geología de las fuentes

Se observa la ubicación geográfica de la planta de árido o cantera donde fue extraído el material natural para el diseño de la mezcla asfáltica, en la cantera de Pavasal, en el municipio de Ceste, provincia de Valencia, España (ver Figura 34 y Figura 35).



Figura 34. Ubicación de Valencia en mapa de España.

Fuente: Google Maps

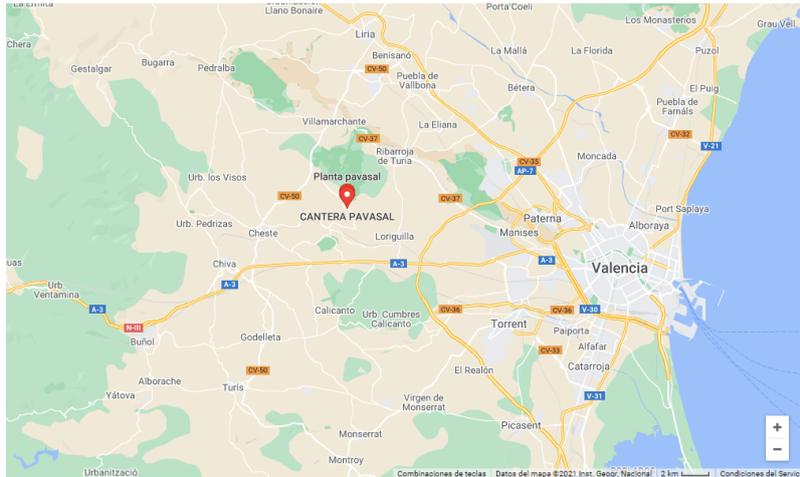


Figura 35. Ubicación cartográfica de la cantera.

Fuente: Google Maps

En la página web del Ministerio de Ciencia e Innovación se encuentran a disposición de la comunidad en general, el mapa Geológico de la zona de la fuente de agregados ubicada en Valencia, denominada la hoja Liria del Mapa Geológico de España, a escala 1:50000, Hoja 695. La ubicación de la cantera de Pavasal está marcada en un círculo negro (ver Figura 36).

Y como resumen de la memoria del Informe Geológico se puede extraer lo siguiente:

La formación es de tipo Triásico y se presentan afloramientos principalmente Bunt-sandstein especialmente bancos de conglomerados rodeados entre los que predominan cemento arcilloso, rojo y pardo, cuarzo y cuarcita. También bancos gruesos de arenisca roja, arcillas rojas y pardo-oscuro. En las capas altas tono rojo, y ocre claro son más frecuentes las areniscas. Bancos de areniscas son duros y resistentes, de composición arcillas y areniscas (Instituto Geológico y Minero de España, 1982).

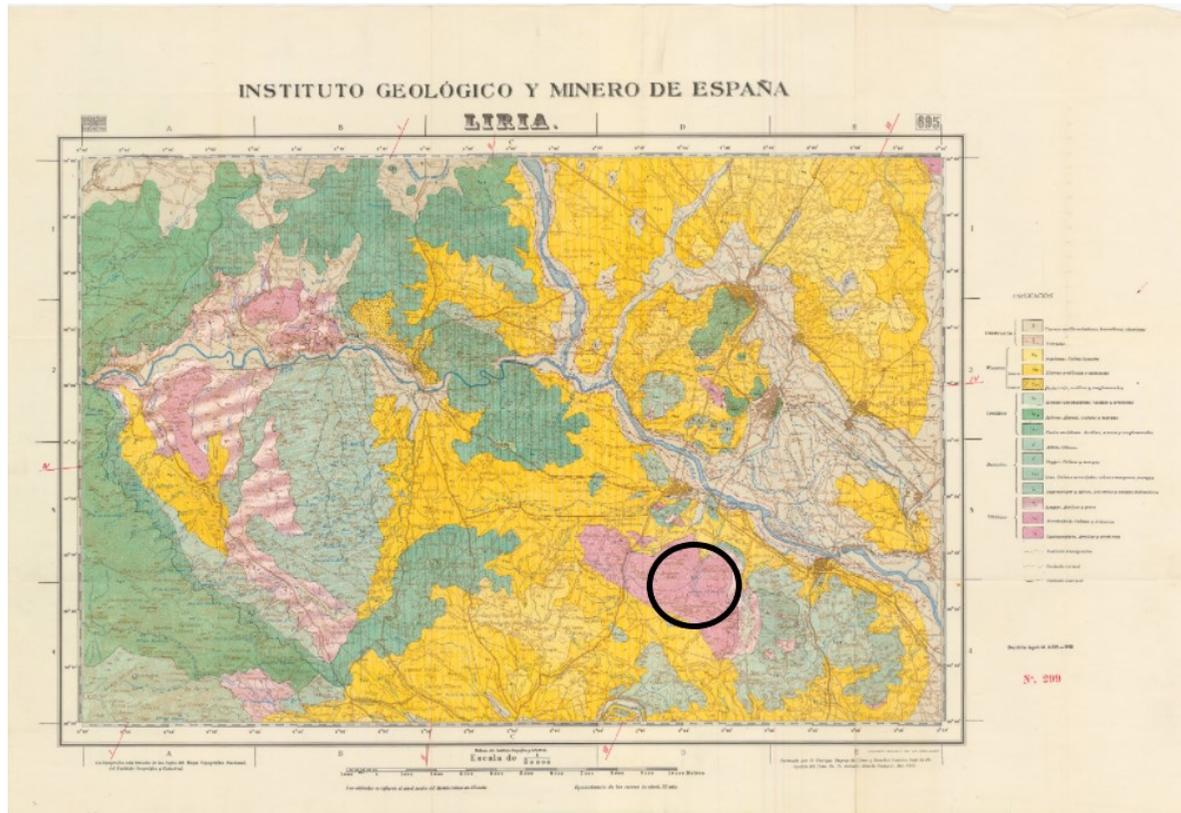


Figura 36. Mapa Geológico Liria Hoja 695 España
Fuente: tomado textual <https://tinyurl.com/2p8p776x>, 1982

En cuanto a la extracción de triturado de cerámica, esta fue donada por la empresa Becsa, cuya planta industrial tiene su domicilio en Castellón, y se muestra la ubicación en círculo de la ubicación aproximada de las plantas de extracción de arcilla para la elaboración de tabletas cerámicas para uso residencial e industrial (ver Figura 37)(Templado Martínez & Meserguer Pardo, 1949).

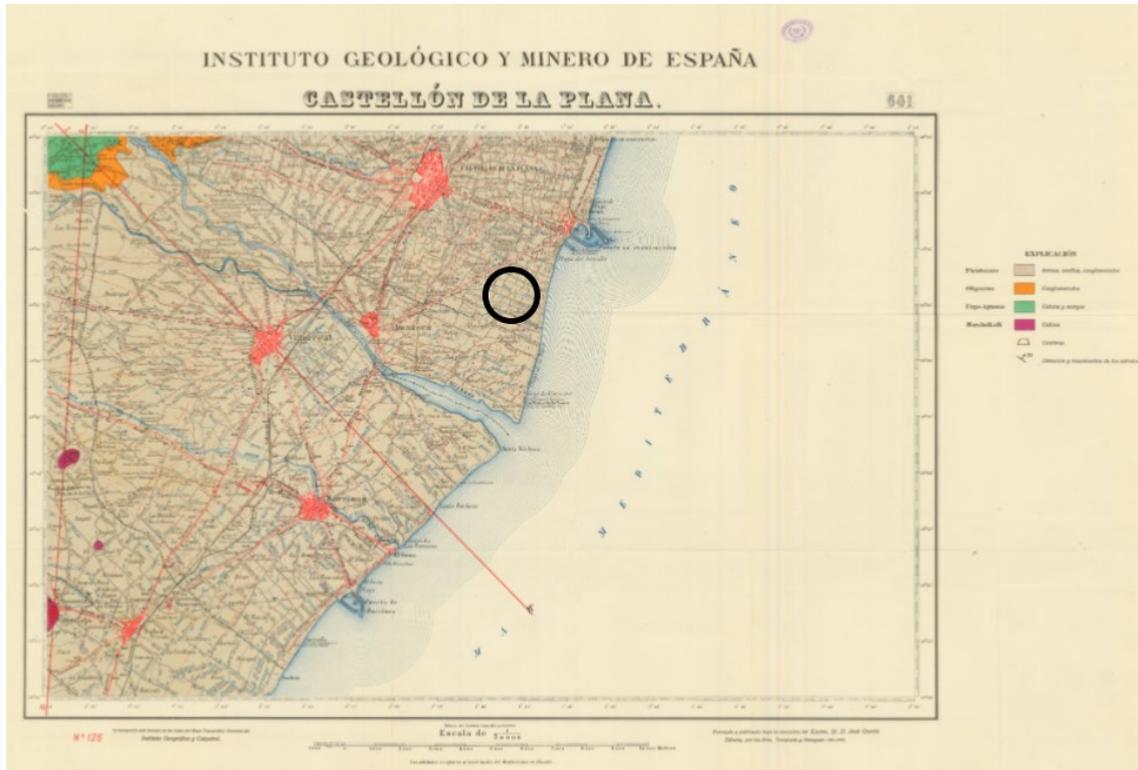


Figura 37. Mapa Geológico Planta Castellón cerámica

Fuente: tomado textual <https://tinyurl.com/d3xcmhfp>, 1949

Y con el fin de caracterizar desde nivel macro a nivel nano, se tiene a continuación la estructura del árido de la cantera de Cheste, donde se observan varios elementos diferenciados que unen a los más grandes con una capa cementante de fondo. La falta de uniformidad también permite predecir que esa irregularidad puede favorecer la fricción y la adhesión con el betún (ver Figura 38).

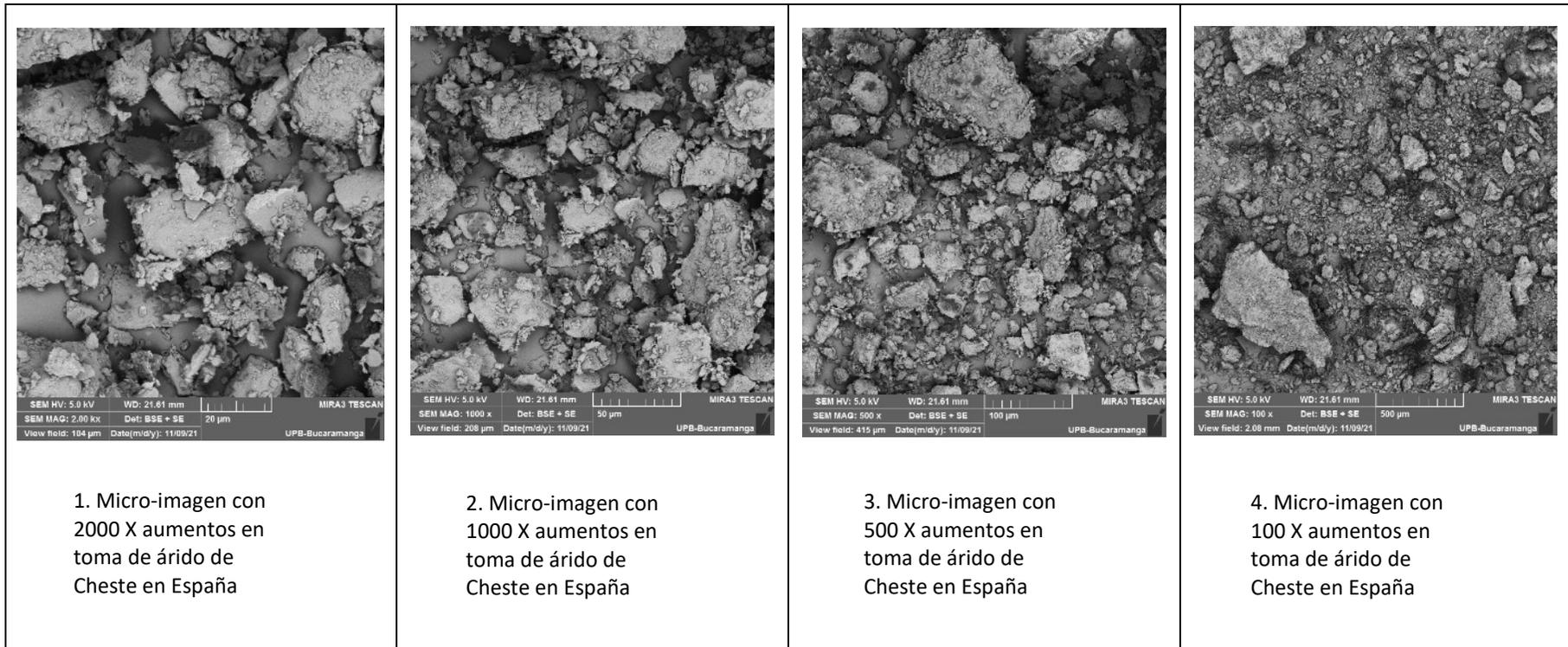
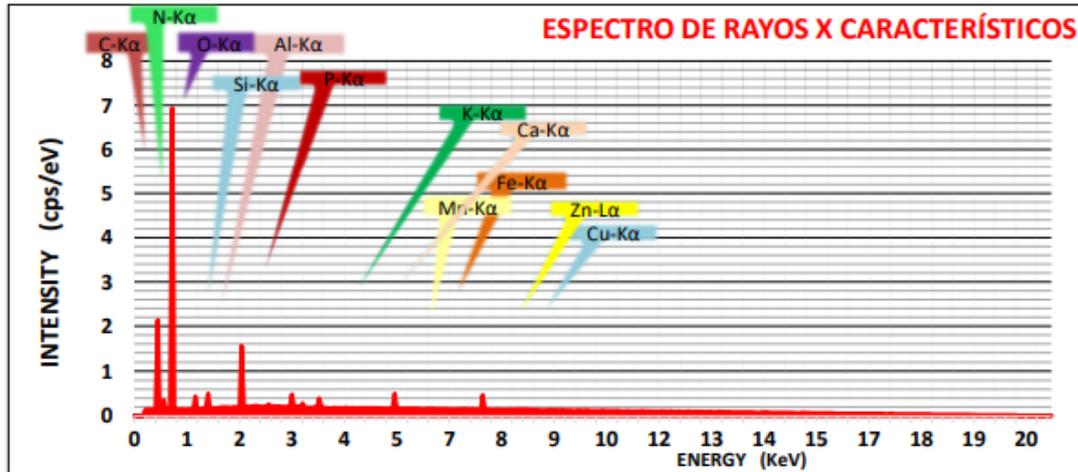


Figura 38. Micro imágenes árido español

Y las características suministradas por el espectro de rayos del microscopio electrónico de barrido, MEB, del árido estudiado proveniente de España. En cuanto a la masa normalizada que predomina se tiene además del oxígeno, silicio, y también aluminio (ver Figura 39).



Element	At. No.	Line S.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	Abs. Error [%] 1 sigma	Abs. Error [%] 2 sigma	Abs. Error [%] 3 sigma
Carbono	6	K-serie	10722	3,15	3,50	4,69	0,35	0,70	1,05
Oxígeno	8	K-serie	6381	44,68	51,36	68,42	6,68	13,35	20,03
Silicio	14	K-serie	1856	10,46	14,14	9,13	3,68	7,35	11,03
Aluminio	13	K-serie	2167	9,75	12,50	10,09	2,75	5,50	8,25
Potasio	19	K-serie	999	1,47	2,02	0,89	0,55	1,09	1,64
Calcio	20	K-serie	807	1,69	2,06	0,67	0,37	0,74	1,11
Hierro	26	K-serie	503	2,76	3,28	1,68	0,52	1,05	1,57
Nitrógeno	7	K-serie	7577	1,59	2,04	1,58	0,45	0,90	1,35
Fósforo	15	K-serie	1692	1,62	2,00	0,85	0,38	0,76	1,14
Zinc	30	L-serie	3281	1,20	1,50	0,23	0,30	0,60	0,90
Cobre	29	L-serie	3168	1,04	1,42	0,11	0,38	0,77	1,15
Manganeso	25	K-serie	504	2,30	2,56	1,11	0,26	0,51	0,77
Mercurio	80	M-serie	1453	1,17	1,62	0,56	0,45	0,91	1,36
				82,88	100,00	100,00			

Figura 39. Espectro de rayos MEB en árido de España

En el caso del triturado de cerámica se observa una base de homogeneidad con inserciones granulares, con menos variabilidad de tamaño, pero con similitudes con el árido. Se observa compuesto por unidades de diferentes tamaños y probablemente muchas fracturas y superficies no lisas (ver Figura 40).

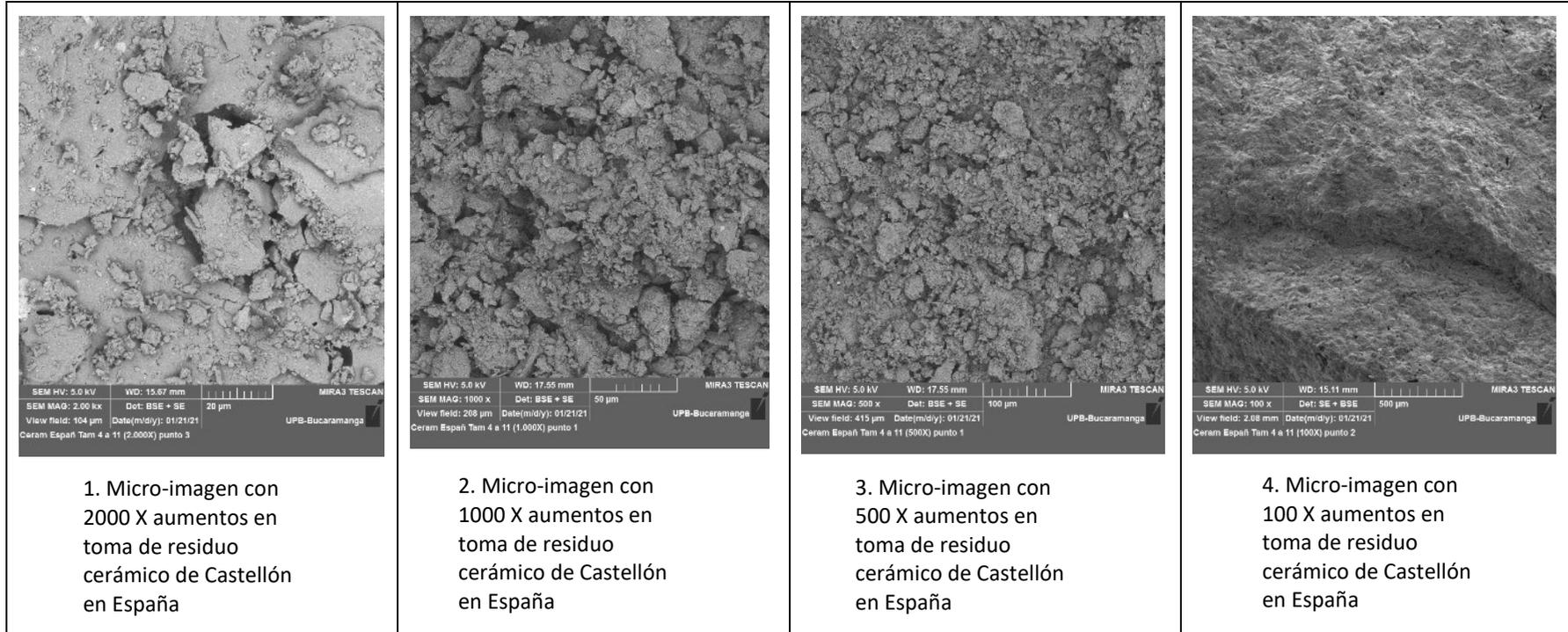
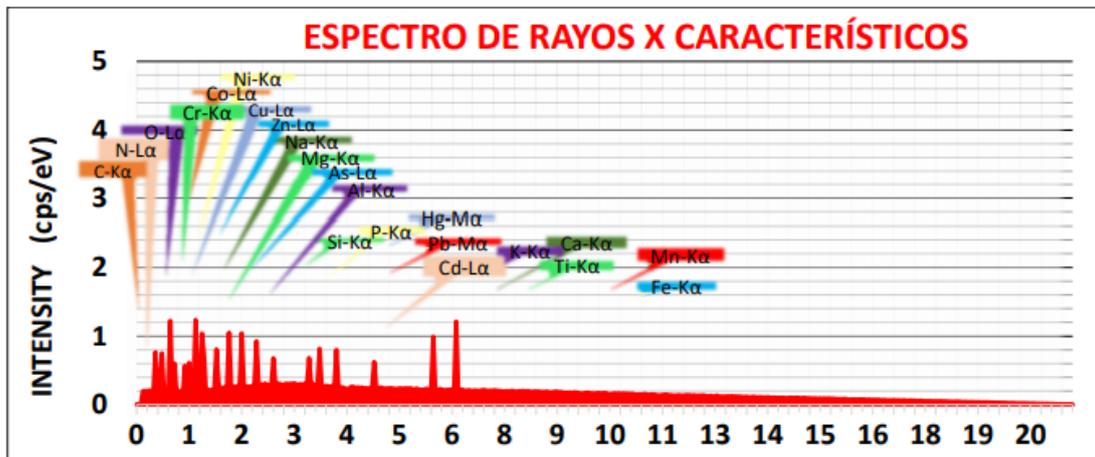


Figura 40. Micro imágenes Residuo Cerámico de España

Y las características suministradas por el espectro de rayos del microscopio electrónico de barrido, MEB, de la cerámica estudiada.



Element	At. No.	Line S.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	Abs. Error [%] 1 sigma	Abs. Error [%] 2 sigma	Abs. Error [%] 3 sigma
Carbono	6	K-serie	5397	4,18	5,35	5,94	1,18	2,36	3,53
Oxígeno	8	K-serie	3086	38,65	51,53	66,59	12,88	25,77	38,65
Silicio	14	K-serie	885	10,69	12,72	10,16	2,04	4,07	6,11
Nitrógeno	7	K-serie	4133	2,37	2,93	3,86	0,56	1,11	1,67
Fósforo	16	k-serie	806	2,75	3,36	1,51	0,60	1,21	1,81
Magnesio	12	K-serie	1348	2,47	2,94	1,09	0,47	0,94	1,41
Calcio	20	K-serie	443	1,63	2,32	0,79	0,70	1,39	2,09
Hierro	26	K-serie	226	2,49	3,51	1,65	1,02	2,04	3,05
Zinc	30	K-serie	188	1,58	2,16	1,06	0,58	1,17	1,75
Cobre	29	K-serie	178	1,29	1,45	0,15	0,16	0,32	0,48
Manganeso	25	K-serie	274	2,00	2,47	1,34	0,47	0,94	1,41
Aluminio	13	K-serie	966	5,73	7,07	5,03	1,34	2,69	4,03
Potasio	19	K-serie	442	1,83	2,18	0,83	0,35	0,70	1,05
				77,65	100,00	100,00			

Figura 41. Espectro de Rayos en el MEB Cerámica Española

Se encuentra una predominancia en los elementos de oxígeno y silicio, de acuerdo a la masa normalizada, columna 6 de la Figura 41, y se confirma la fortaleza de esta unión de silicatos encontrados generalmente en materiales cerámicos de la región, características que los hace fuertes para el uso de actividades de construcción (UPV, 2021).

6.2.5 Construcción de la fórmula de trabajo para la mezcla patrón

Teniendo en cuenta que la Tabla 542.8 - Husos Granulométricos cernido acumulado (% en masa) de la norma 542 del Pliego de prescripciones técnicas para el tipo de mezcla escogido, se aplicó el ensayo de gradación a cinco (5) grupos de áridos clasificados de cada una de las tolvas provenientes de la planta de Cheste de la empresa Pavalas. Los husos granulométricos se encuentran en la Tabla 27 del numeral 6.2.1 de ese tipo de mezcla y en la Tabla 31 se encuentra el resumen de la fórmula de trabajo.

Tabla 31. Resumen de la Fórmula de Trabajo AC 22 BIN 35/50 S

TAMIZ		% En peso que pasa					Cernido Ponderal x % en peso que pasa					Gradación Obtenida
		Tolvas										
UNE	ASTM	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
		0/4(1)	4/10(2)	6/12(3)	12/20(4)	20/32(5)	40,0%	15%	16,0%	15%	14,0%	100%
45	1 3/4"	100	100	100	100,0	100,0	40,0	15,0	16,0	15,0	14,0	100,0
32	1 1/4"	100	100	100	100,0	97	40,0	15,0	16,0	15,0	13,6	99,6
22	7/8"	100	100	100	100	67	40,0	15,0	16,0	15,0	9,4	95,4
16	5/8"	100	100	100	79	12	40,0	15,0	16,0	11,9	1,7	84,5
8	5/16"	100	87	17	1,0	0,0	40,0	13,1	2,7	0,2	0,0	55,9
2	Nº 10	75	2	1,0	1,0	0,0	30,0	0,3	0,2	0,2	0,0	30,6
0,5	Nº 10	36	1,0	1,0	0,0	0,0	14,4	0,2	0,2	0,0	0,0	14,7
0,25	Nº 35	23	1,0	1,0	0,0	0,0	9,2	0,2	0,2	0,0	0,0	9,5
0,063	Nº 230	12	0,4	0,3	0,2	0,1	4,8	0,1	0,0	0,0	0,0	5,0

A continuació, se presenta la Figura 42. Formula del treball mescla asfàltica Patró, en donde se observen los límits superior e inferior dats per PG-3, en color roig i se mostra la combinació resultant de la curva granulomètrica obtinguda en la Taula 31. Resum de la Fórmula de Treball AC 22 BIN 35/50 S

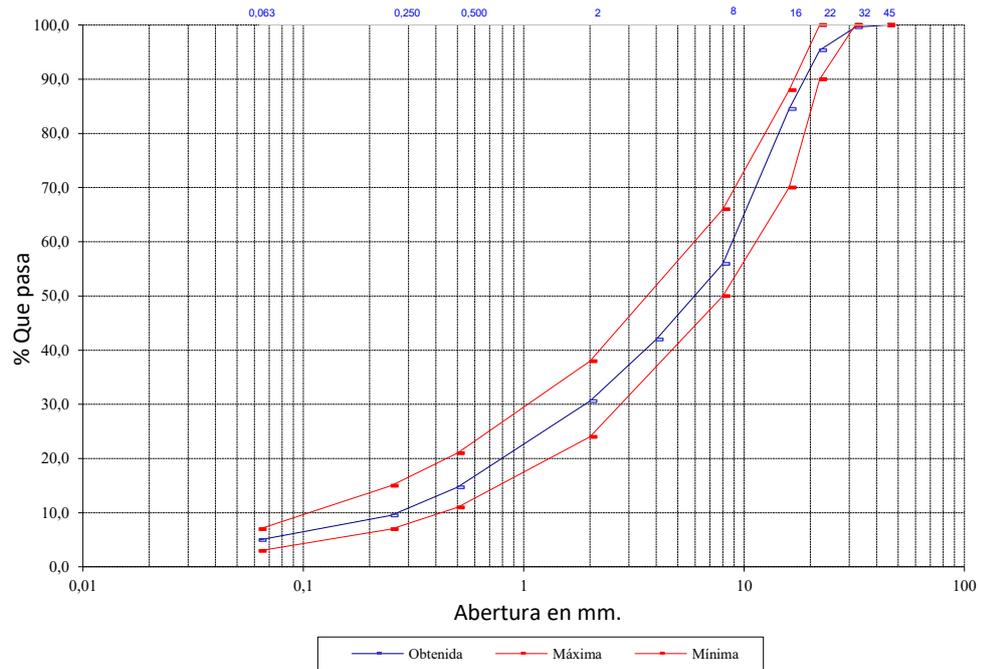


Figura 42. Formula del treball mescla asfàltica Patró

Con lo anterior, se encuentra que tanto la granulometría, como la forma, la textura y la dureza son propiedades que predominan en una adecuada granulometría.

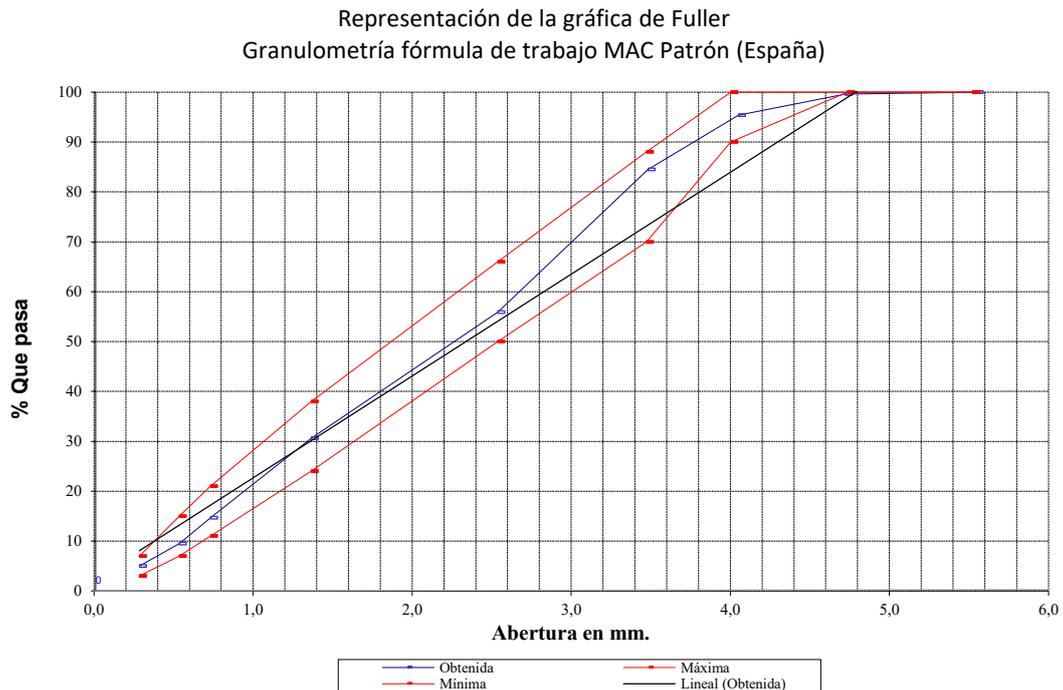


Figura 43. Representación de la gráfica de Fuller fórmula de trabajo MAC Patrón (España)

La representación gráfica (Figura 43) de Fuller muestra la línea de máxima densidad, la cual permite analizar que, para evitar vacíos de agregado mineral bajos, VMA, sobre esta línea no se podrá tener suficiente espacio para mantener una película de asfalto suficientemente gruesa para un buen desempeño de la mezcla. Si bien puede estar cerca no debería estar coincidiendo totalmente.

El tamaño máximo nominal, TMN, tamaño más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% de las partículas de agregado en una serie normal de tamices, en el caso de la AC BIN 22 S, el tamiz de tamaño máximo es el 22.

En este caso los límites y la fórmula de trabajo en la esquina derecha están por encima de la línea de máxima densidad, lo cual es favorable y permite mayor presencia de arena.

6.2.6 Construcción de la fórmula de trabajo para mezcla con triturado de cerámica 30% España

Con los mismos áridos y con los triturados de cerámica se procedió a reemplazar 30% del material, reemplazando las tolvas 2 y 3 que correspondían a las tolvas 4/10 y 6/12 del árido y en su lugar se incluyó triturado cerámico de tamaño 0/4 y 4/11, cuyo aporte granulométrico se incluyó para consolidar el aporte en la fórmula de trabajo que corresponde a la última columna de la Tabla 32.

Tabla 32. Fórmula de Trabajo MAC con inclusión de 30% de triturado de cerámica

TAMIZ		% En peso que pasa						Cernido Ponderal x % en peso que pasa						Granulometría
UNE	ASTM	1 0/4(1)	2 0/4(C)	3 4/11(C)	4 12/20(4)	5 20/32(5)	6 filler(6)	1 35,0%	2 5,0%	3 25,0%	4 24,0%	5 10,0%	6 1,0%	OBTENIDA
														100,0%
45	1 3/4"	100	100	100	100,0	100,0	100	35,0	5,0	25,0	24,0	10,0	1,0	100,0
32	1 1/4"	100	100	100	100,0	97,0	100	35,0	5,0	25,0	24,0	9,7	1,0	100,0
22	7/8"	100	100	100	100,0	67,0	100	35,0	5,0	25,0	24,0	6,7	1,0	96,7
16	5/8"	100	100	100	79,0	12,0	100	35,0	5,0	25,0	19,0	1,2	1,0	86,2
8	5/16"	100,0	100,0	67,2	1,0	0,0	100	35,0	5,0	16,8	0,2	0,0	1,0	58,0
2	Nº 10	75,0	68,1	1,3	1,0	0,0	100	26,3	3,4	0,3	0,2	0,0	1,0	31,2
0,5	Nº 10	36,0	28,1	1,2	0,0	0,0	100	12,6	1,4	0,3	0,0	0,0	1,0	15,3
0,25	Nº 35	23,0	18,5	1,2	0,0	0,0	100	8,1	0,9	0,3	0,0	0,0	1,0	10,3
0,063	Nº 230	12,0	9,0	1,1	0,2	0,1	85,3	4,2	0,5	0,3	0,0	0,0	0,9	5,8

En la Figura 44. Fórmula de trabajo MAC con 30% cerámica, se observa en color azul la curva granulométrica obtenida de la combinación de los aportes de cada una de las tolvas existentes en la planta de Cheste y reemplazando las tolvas 2 y 3 por triturado industrial cerámico en una proporción del 30%.

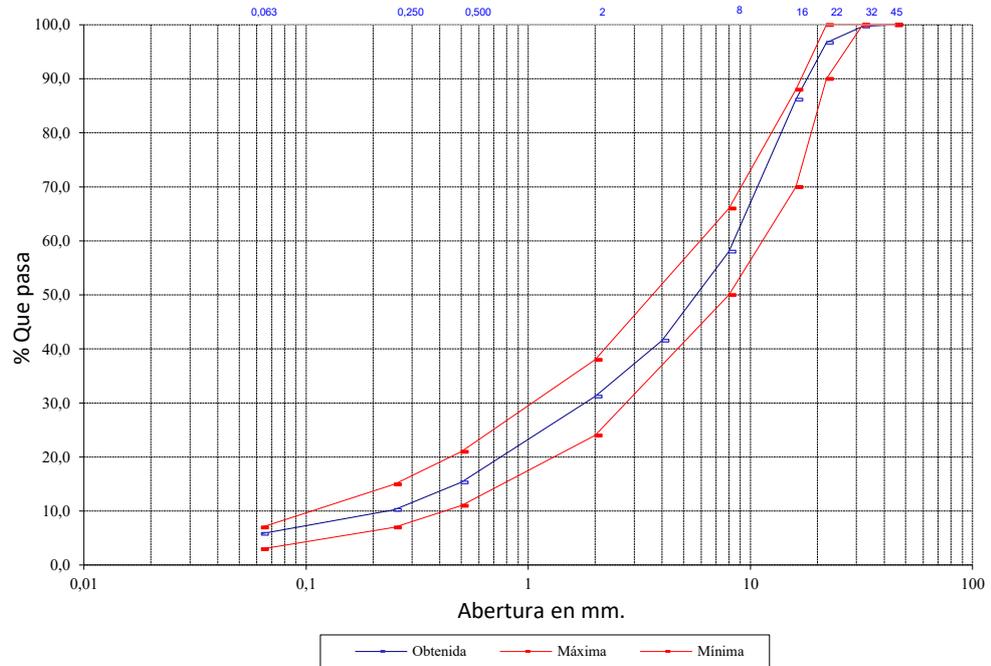


Figura 44. Fórmula de trabajo MAC con 30% cerámica

Al igual que la mezcla MAC Patrón, la MAC 30% cerámica, en la parte superior derecha de la gráfica se aleja de la línea de máxima densidad, debido a que los límites del Pliego de prescripciones también se alejan, de esta manera se garantiza una vez más, adecuada selección del porcentaje óptimo de betún (ver Figura 45).

Representación de la gráfica de Fuller
 Granulometría fórmula de trabajo MAC 30% Cerámica (España)

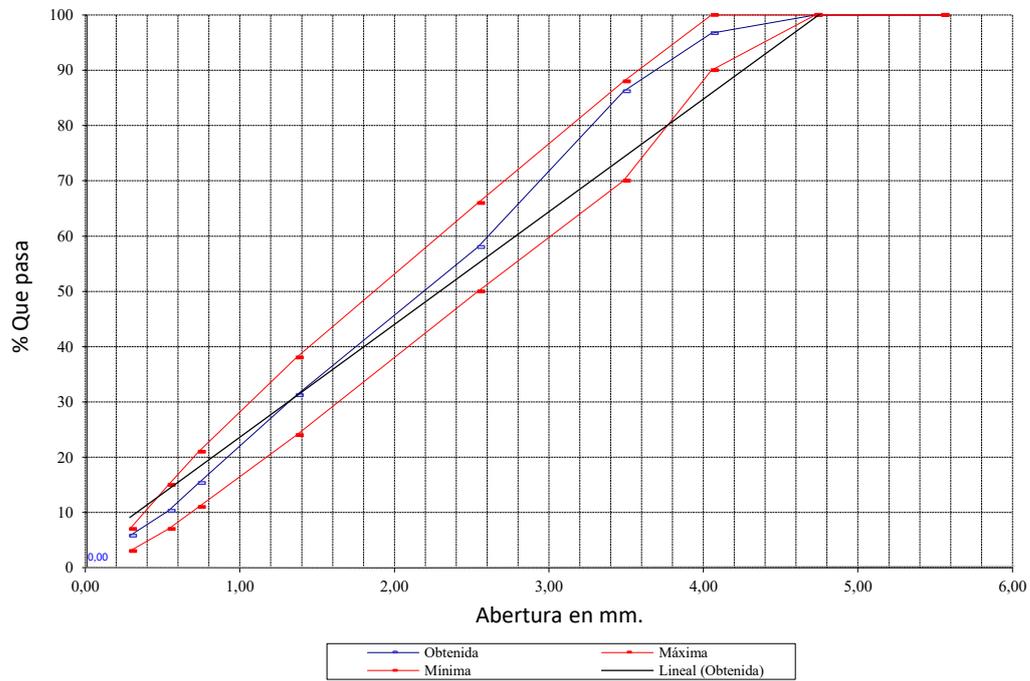


Figura 45. Representación de la Gráfica de Fuller
 Fórmula de trabajo MAC 30% Cerámica (España)

6.2.7 Construcción de la fórmula de trabajo para mezcla con triturado de cerámica 35% España

El reemplazo de árido en proporción de 35% de triturado cerámico, en la Tabla 33, se visualiza la curva granulométrica consolidada de la combinación de la granulometría de todas las tolvas usadas en la generación de una MAC con las especificaciones anotadas.

Tabla 33. Fórmula de trabajo de MAC con inclusión de 35% de triturado de cerámica

TAMIZ		% En peso que pasa						Cernido Ponderal x % en peso que pasa						Granulometría
UNE	ASTM	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	OBTENIDA
		0/4(1)	0/4(C)	4/11(C)	12/20(4)	20/32(5)	filler(6)	24,0%	15,0%	20,0%	30,0%	10,0%	1,0%	100,0%
45	1 3/4"	100	100	100	100,0	100,0	100	24,0	15,0	20,0	30,0	10,0	1,0	100,0
32	1 1/4"	100	100	100	100,0	97,0	100	24,0	15,0	20,0	30,0	9,9	1,0	100,0
22	7/8"	100	100	100	100,0	67,0	100	24,0	15,0	20,0	30,0	6,7	1,0	96,7
16	5/8"	100	100	100	79,0	12,0	100	24,0	15,0	20,0	23,7	1,2	1,0	84,9
8	5/16"	100,0	100,0	67,2	1,0	0,0	100	24,0	15,0	13,4	0,3	0,0	1,0	53,7
2	Nº 10	75,0	68,1	1,3	1,0	0,0	100	18,0	10,2	0,3	0,3	0,0	1,0	29,8
0,5	Nº 10	36,0	28,1	1,2	0,0	0,0	100	8,6	4,2	0,2	0,0	0,0	1,0	14,1
0,25	Nº 35	23,0	18,5	1,2	0,0	0,0	100	5,5	2,8	0,2	0,0	0,0	1,0	9,5
0,063	Nº 230	12,0	9,0	1,1	0,2	0,1	85,3	2,9	1,4	0,2	0,1	0,0	0,9	5,4

Estos mismos valores se presentan en la Figura 46, se observa la curva resultante de la combinación de las tolvas almacenadoras de áridos y en este caso con la inclusión en reemplazo de triturado cerámico al 35% del total del árido.

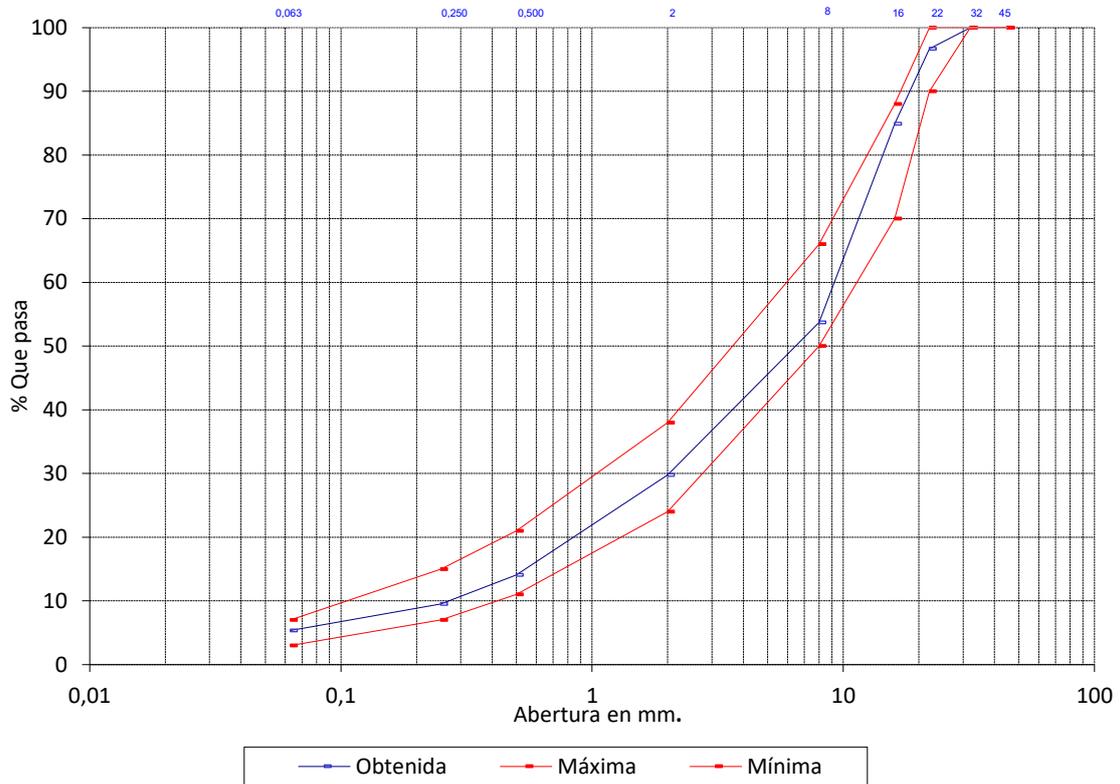


Figura 46. Fórmula de trabajo de MAC con inclusión de 35% de cerámica (España)

Al igual que la mezcla MAC 30% Cerámica, en la parte superior derecha de la gráfica (ver Figura 47) se aleja de la línea de máxima densidad, y los límites del Pliego de Prescripciones también se alejan, de esta manera se garantiza una vez más, adecuada selección del porcentaje óptimo de betún.

Representación de la gráfica de Fuller
 Granulometría fórmula de Trabajo MAC 35% Cerámica (España)

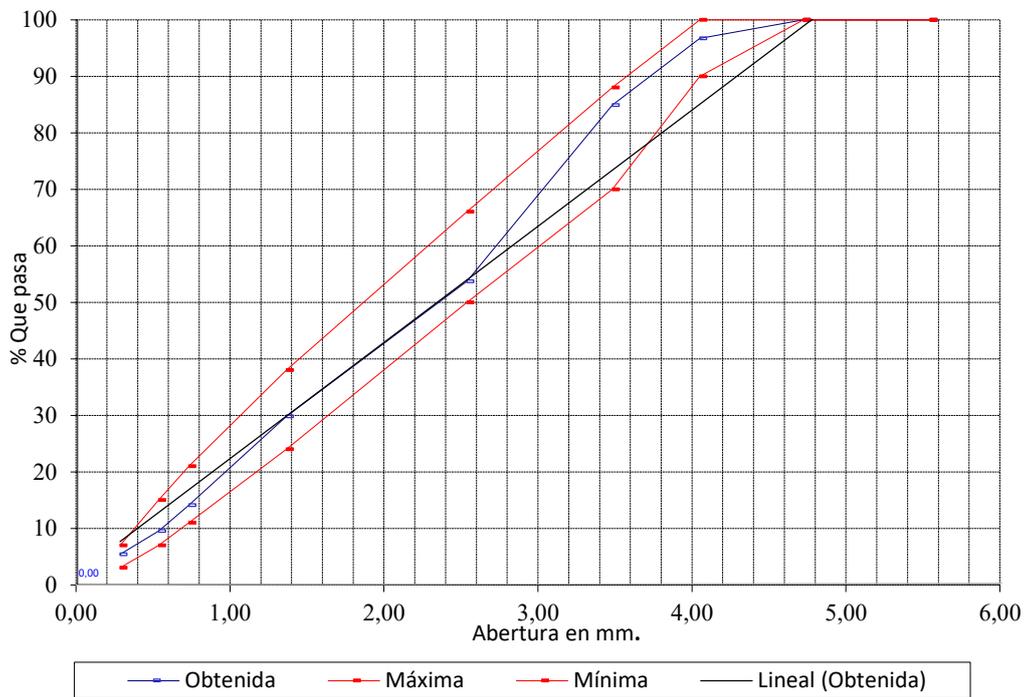


Figura 47. Representación de la Gráfica de Füller
 Fórmula de trabajo MAC 35% Cerámica (España)

6.2.8 Construcción de la fórmula de trabajo para mezcla con triturado de cerámica 40%

También se calculó la fórmula de trabajo con uso de 40% de triturado cerámico encontrando la siguiente combinación, donde se reemplazaron lo correspondiente a los tamaños 0/4 y 6/12 mm de árido por 0/4 y 4/11 mm de cerámico triturado.

Tabla 34. Fórmula de trabajo de MAC con inclusión de 40% de triturado de cerámica

TAMIZ		% En peso que pasa						Cernido Ponderal x % en peso que pasa						Granulometría
UNE	ASTM	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	OBTENIDA
		0/4(1)	0/4(C)	4/11(C)	12/20(4)	20/32(5)	filler(6)	24,0%	15,0%	25,0%	30,0%	6,0%	0,0%	100,0%
45	1 3/4"	100	100	100	100,0	100,0	100	24,0	15,0	25,0	30,0	6,0	0,0	100,0
32	1 1/4"	100	100	100	100,0	97,0	100	24,0	15,0	25,0	30,0	5,8	0,0	99,8
22	7/8"	100	100	100	100,0	67,0	100	24,0	15,0	25,0	30,0	4,0	0,0	98,0
16	5/8"	100	100	100	79,0	12,0	100	24,0	15,0	25,0	23,7	0,7	0,0	88,4
8	5/16"	100,0	100,0	67,2	1,0	0,0	100	24,0	15,0	16,8	0,3	0,0	0,0	56,1
2	Nº 10	75,0	68,1	1,3	1,0	0,0	100	18,0	10,2	0,3	0,3	0,0	0,0	28,8
0,5	Nº 10	36,0	28,1	1,2	0,0	0,0	100	8,6	4,2	0,3	0,0	0,0	0,0	13,2
0,25	Nº 35	23,0	18,5	1,2	0,0	0,0	100	5,5	2,8	0,3	0,0	0,0	0,0	8,6
0,063	Nº 230	12,0	9,0	1,1	0,2	0,1	85,3	2,9	1,4	0,3	0,1	0,0	0,0	4,6

A continuación, la Figura 48, muestra la combinatoria generada para obtener la fórmula de trabajo dentro de la franja granulométrica establecida por el PG-3 para el tipo de mezclas que se está estudiando.

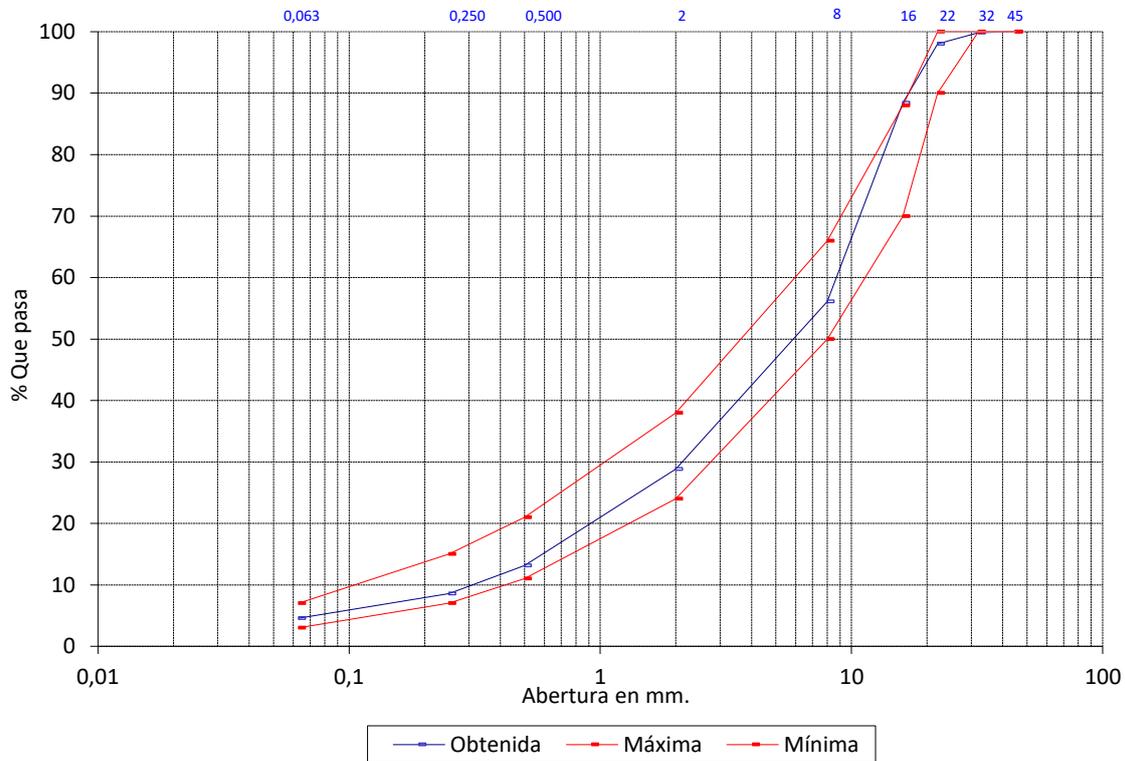


Figura 48. Fórmula de Trabajo MAC con inclusión de 40% cerámica (España)

6.2.9 Construcción de las probetas tamaño Marshall de las mezclas de estudio

Con la fórmula de trabajo se procedió al alistamiento del material, tamizando las cantidades necesarias para lograr probetas de peso aproximado de 1200 gramos y en cada porcentaje de ligante (3.5%, 4%, 4.5%, 5%, 5.5%) o familia conformada por tres probetas de igual porcentaje de ligante, es decir, la mezcla se hizo por un peso de mezcla de aproximadamente 3780 gramos, contemplando un desperdicio de 5% del total. Estas fueron construidas con un control de temperatura de los áridos de 165°C y temperatura del betún de 155°C, y una temperatura de compactación de mezcla de 152°C, usando una mezcladora mecánica con control de temperatura. Se tuvo cuidado de que los áridos estuvieran cubiertos completamente con el betún, en el menor tiempo posible de mezclado, alrededor de un (1) minuto.

Una vez hecha la mezcla, se procedió a dividir en bandejas lo correspondiente a cada probeta, aproximadamente 1260 gramos, y a medida que se construían las demás esperaban su construcción en el horno a temperatura controlada. Para la elaboración de las mismas se utilizó un equipo mecánico de compactación Marshall. Se trabajó a la mayor velocidad posible, manteniendo las condiciones de seguridad industrial. Los moldes extraídos del horno se acomodaron en el anillo del pedestal, encajados adecuadamente con la base, el collar

correspondiente y con el martillo de 4,515 gramos aproximadamente, se colocó papel filtro abajo, se depositó la mezcla caliente, se colocó nuevamente papel filtro y se aplicaron 75 golpes por cada cara; con lo anterior, se logró la construcción de probetas de aproximadamente 63.5 mm de alto y 100 mm de diámetro.

Este procedimiento se repitió tanto para las MAC Patrón como para las MAC con reemplazo de triturado de cerámica. Sin embargo, en estas últimas se evidenció que a medida que aumentaba el porcentaje la altura de estas muestras aumentaba, por lo que tuvo mayor dificultad en el manejo del reemplazo de triturado de cerámica más alto (40%) debido a que la manejabilidad de la mezcla se resultó afectada. Estas probetas, se construyeron, pero se evidenció dificultad para ejecutar la compactación, se observó falta de cohesión de los agregados en la mezcla pues los áridos y triturados cerámicos se soltaban de la matriz asfáltica.

Posteriormente, se usó el equipo establecido para saca probetas Marshall, el cual permitió la extracción de las mismas, en los tiempos exigidos. Estas se dejaron marcadas, sin papel filtro y a temperatura ambiente durante 24 horas.

6.2.10 Obtención del porcentaje óptimo de asfalto (España)

Una vez cumplido el tiempo de reposo de las probetas, se procedió a medir sus dimensiones, alturas y diámetros, cada una con tres mediciones que se promediaron. Posteriormente, se pesaron al aire libre obteniendo el peso seco, W_s . Luego se sumergieron en agua y se permitió que alrededor de (cinco) 5 minutos permaneciera sumergida la probeta, buscando que la saturación fuera adecuada. De esta forma se tomó el peso sumergido, W_{ws} , y posteriormente, con un paño húmedo se eliminó el agua que reposaba en la superficie de la probeta, y se colocó en la báscula para obtener el peso en estado saturado superficialmente seco, W_{sss} . Con dichos pesos y medidas se obtuvo la densidad aparente, la densidad máxima medida usadas en el cálculo del porcentaje óptimo de asfalto, para la obtención del porcentaje de huecos o vacíos en la mezcla bituminosa (Asphalt Institute, 2014) (Ministerio de Fomento, 2015).

Se tuvo en cuenta el porcentaje de huecos de la mezcla para definir el porcentaje óptimo de betún que cumpliera con la norma PG-3. Sin embargo, las probetas se sometieron a la aplicación del ensayo de estabilidad y deformación. Una vez se analizaron los datos, se desarrollaron las figuras de apoyo en la metodología Marshall, y se validaron los demás parámetros considerados en la metodología Marshall.

Posteriormente se realizó el ensayo de susceptibilidad al agua para el que se construyeron seis (6) probetas con el porcentaje óptimo de ligante seleccionado, se sometieron a extracción de aire, se introdujeron tres (3) probetas sumergidas en agua en la cámara de control de temperatura a 25°C y las otras tres (3) probetas se introdujeron en la cámara, pero secas completamente (norma UNE - EN 12697 - 12, 2019). Después de cumplir el tiempo, se procedió a aplicar la fuerza a tracción indirecta para calcular la relación en porcentaje de las fuerzas aplicadas entre las probetas secas y las sumergidas en agua, esto con el fin de confirmar el porcentaje óptimo escogido al compararlo con las exigencias del PG-3.

6.2.10.1 MAC Patrón

En la Tabla 35, se consignaron los parámetros obtenidos en cada una de los promedios de las familias de probetas realizados con cada uno de los porcentajes de ligante y con la fórmula de trabajo obtenida.

Tabla 35. Resultados Diseño MAC Patrón

Familia	Nº	I	II	III	IV	V
Ligante	%	3,5	4	4,5	5	5,5
Densidad	g/cm ³	2,418	2,506	2,490	2,484	2,483
Densidad Máxima	g/cm ³	2,662	2,601	2,589	2,561	2,541
% Huecos Áridos	%	16,02	13,7	14,64	15,32	15,73
% Huecos Mezcla	%	7,8	3,99	3,43	2,89	2,04
Relación F/B	F/B	1,5	1,3	1,1	1,03	0,9
Its _r % Perdida	%			4.2%		
				99.8		
Estabilidad Marshall	kN	19,3	21,08	20,89	19,87	15,437
Deformación Marshall	mm	2,1	2,5	2,8	3,1	5,0

Y con este resumen se generaron las siguientes figuras: Figura 49. Huecos Mezcla vs Ligante de la MAC Patrón, Figura 50. Densidad vs Ligante de la MAC Patrón, Figura 51. Relación Llenante/Ligante vs Ligante MAC Patrón, Figura 52. Huecos en Áridos vs Ligante MAC Patrón, Figura 53. Estabilidad vs Ligante MAC Patrón y Figura 54. Deformación o Flujo vs Ligante MAC Patrón. Una vez obtenidas estas figuras para establecer el valor óptimo de la mezcla, se consideró las especificaciones establecidas en la reglamentación PG-3 “marcado CE”, especialmente los huecos de mezcla atendiendo y se confirmó completando la metodología Marshall, aunque no sea considerada por PG-3.

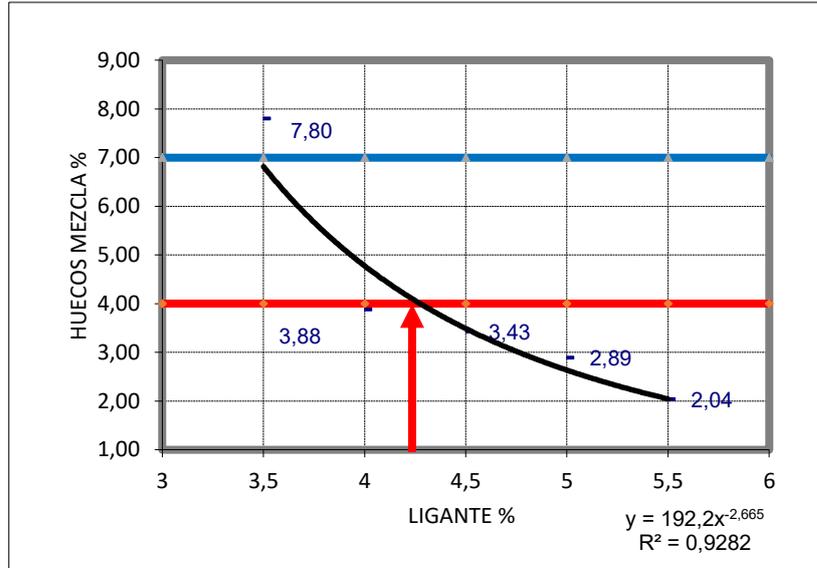


Figura 49. Huecos Mezcla vs Ligante de la MAC Patrón

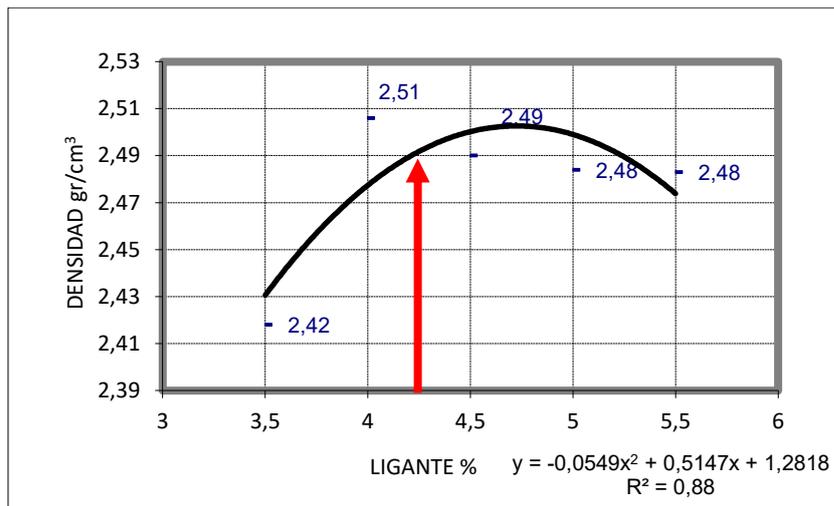


Figura 50. Densidad vs Ligante de la MAC Patrón

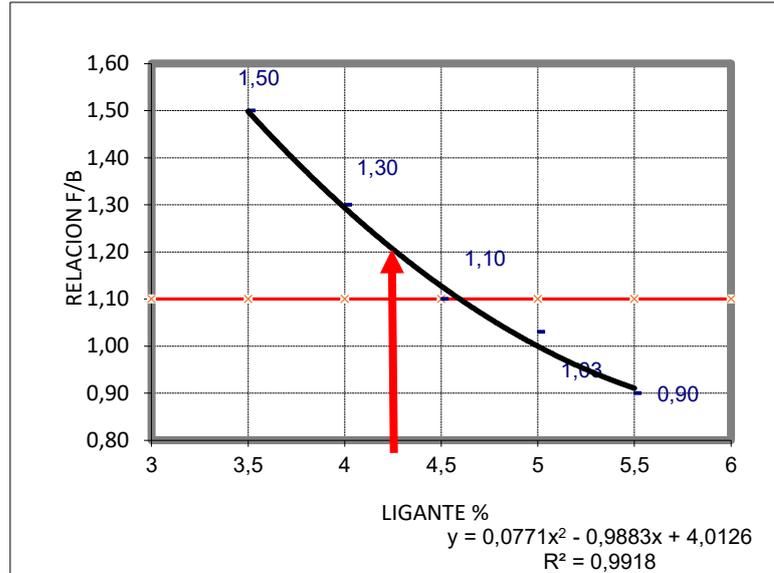


Figura 51. Relación Llenante/Ligante vs Ligante MAC Patrón

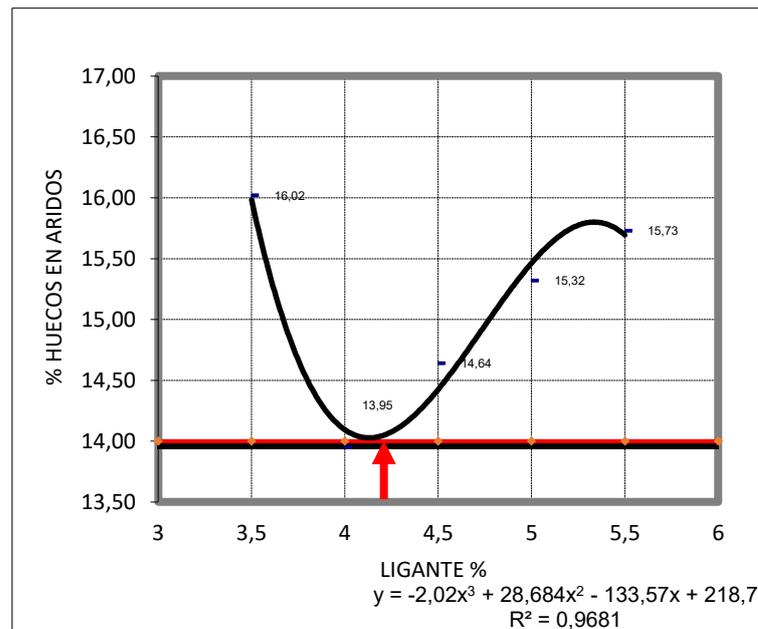


Figura 52. Huecos en Áridos vs Ligante MAC Patrón

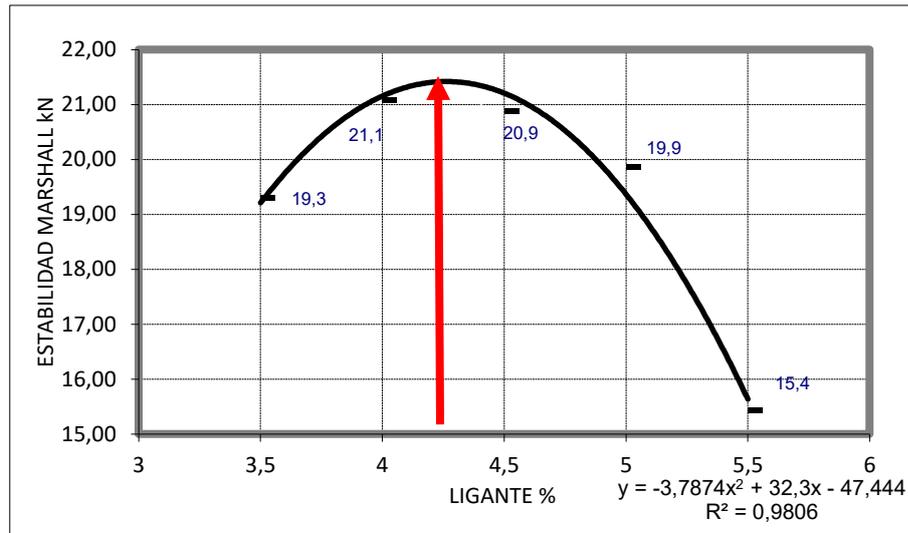


Figura 53. Estabilidad vs Ligante MAC Patrón

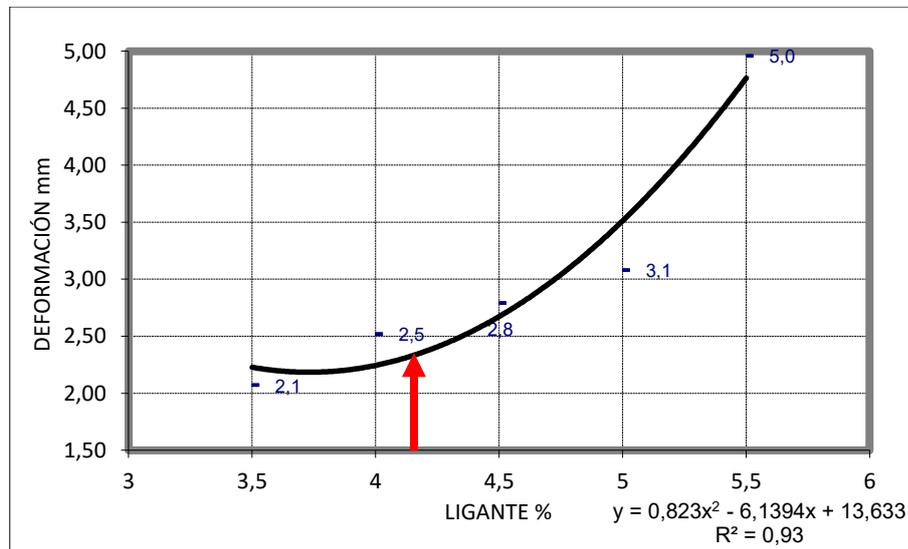


Figura 54. Deformación o Flujo vs Ligante MAC Patrón

Con la construcción de las figuras y con base en las recomendaciones del PG-3 se eligió el porcentaje óptimo de ligante de la MAC Patrón, de tal manera que el valor cumpliera con la totalidad de los parámetros. Sin embargo, se verificó principalmente el cumplimiento de los parámetros de porcentaje de huecos en la mezcla por ser el parámetro indicativo de la PG-3 para controlar en el diseño de mezcla bituminosa. En el caso de la MAC Patrón el valor de 4.2%, es definido como el porcentaje óptimo de ligante. Y se verificaron los parámetros establecidos en el diseño Marshall, que se adicionan

Tabla 36. Parámetros del Diseño MAC Patrón Marcado CE

AC 22 BIN S Patrón – Marcado “CE”		
Parámetros	Límites	Valores
Densidad aparente (kg/m ³)		2475
Densidad máxima (kg/m ³)		2590
%Huecos de mezcla	4 - 7	4,0
%Huecos de áridos	≥14%	14,0
Sensibilidad (%)	> 80%	99.8
Porcentaje Óptimo de Betún	> 4%	4,2%

Nota: No se hizo resistencia a la deformación permanente, WTS_{AIRE} , debido a que UNE-EN 12697-22 y PG- 3 establece que las probetas se preparan con mezcla obtenida en la central de fabricación y no en laboratorio.

Tabla 37. Parámetros del Diseño MAC Patrón Confirmación Marshall

AC 22 BIN S Patrón – Confirmación Marshall		
Parámetros	Límites	Valores
Densidad aparente (kg/m ³)		2475
Densidad máxima (kg/m ³)		2590
%Huecos de mezcla	4 - 7	4,0
%Huecos de áridos	≥14%	14,0
Estabilidad Marshall (KN)	> 12,5-8	21,4
Deformación Marshall (mm)	2 - 4	2,4
Cociente de Filler/Betún	1.1	1,2
Módulo resiliente promedio (MPa)	25°C	8696
Porcentaje Óptimo de Betún	> 4%	4,2%

6.2.10.2 MAC con reemplazo del 30% de triturado de cerámica

En la Tabla 38, se consignaron los parámetros obtenidos en cada una de los promedios de las familias de probetas realizados con cada uno de los porcentajes de ligante y con la fórmula de trabajo obtenida.

Tabla 38. Resultados diseño MAC 30% cerámica

Familia	Nº	I	II	III	IV	V
Ligante	%	3,5	4	4,5	5	5,5
Densidad	g/cm ³	2,21	2,249	2,296	2,3	2,313
Densidad Máxima	g/cm ³	2,539	2,52	2,501	2,483	2,465
% Huecos Áridos	%	20,48	19,75	18,25	18,88	16,11
% Huecos Mezcla	%	11,02	9,146	6,987	6,273	5,236
Relación F/B	F/B	1,485	1,287	1,1187	0,99	0,91
Its _r % Perdida	%			4,6%		
				93,4		
Estabilidad Marshall	kN	20,31	24,46	27,705	16,03	16,11
Deformación Marshall	mm	2,04	1,98	2,07	2,05	2,14

Y con este resumen se generaron las siguientes figuras: Figura 55. Densidad vs Ligante de la MAC 30% cerámica, Figura 56. Huecos Mezcla % vs Ligante MAC 30% cerámica, Figura 57. Relación Filler/Betún vs Ligante MAC 30% cerámica, Figura 58. Huecos en Áridos % vs Ligante MAC 30% cerámica, Figura 59. Estabilidad Marshall vs Ligante MAC 30% cerámica y Figura 60. Deformación vs Ligante MAC 30% cerámica. Una vez obtenidas estas figuras para establecer el valor óptimo de la mezcla, se consideró las especificaciones establecidas en la reglamentación PG-3 “mercado CE” y se confirmó completando la metodología Marshall.

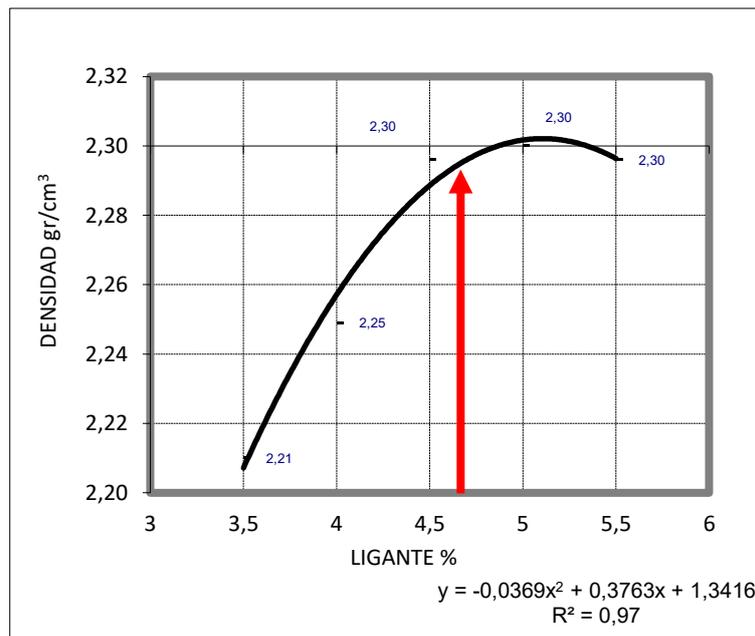


Figura 55. Densidad vs Ligante de la MAC 30% cerámica

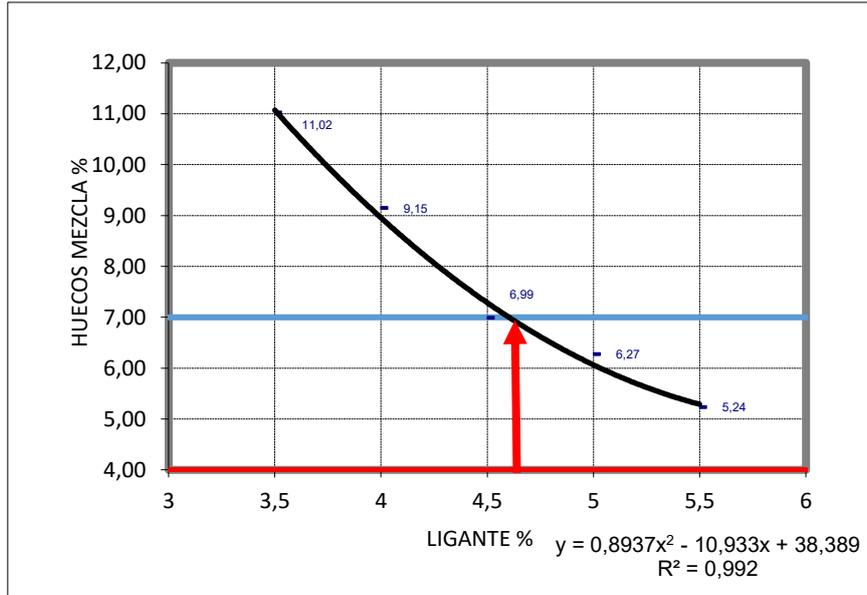


Figura 56. Huecos Mezcla % vs Ligante MAC 30% cerámica

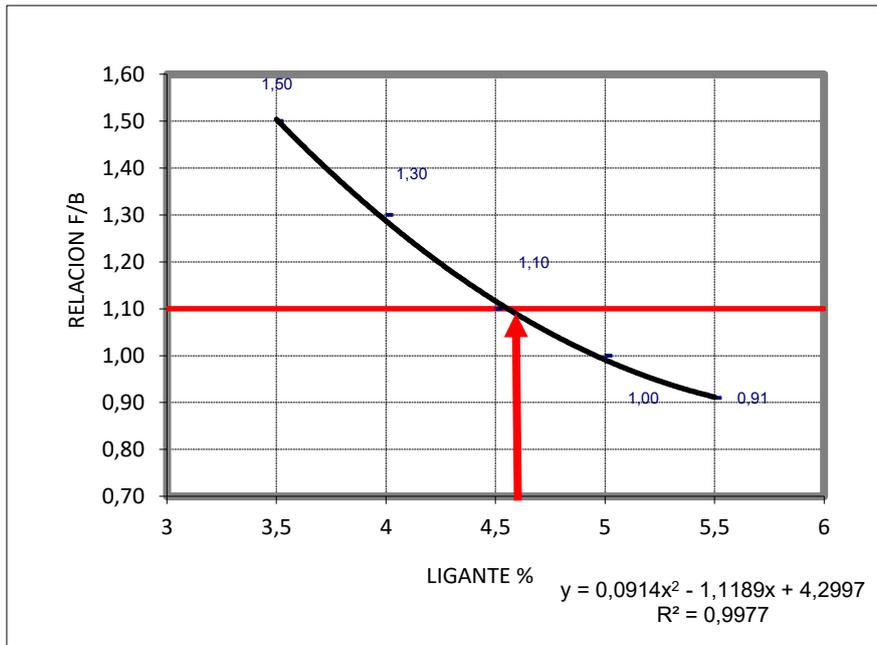


Figura 57. Relación Filler/Betún vs Ligante MAC 30% cerámica

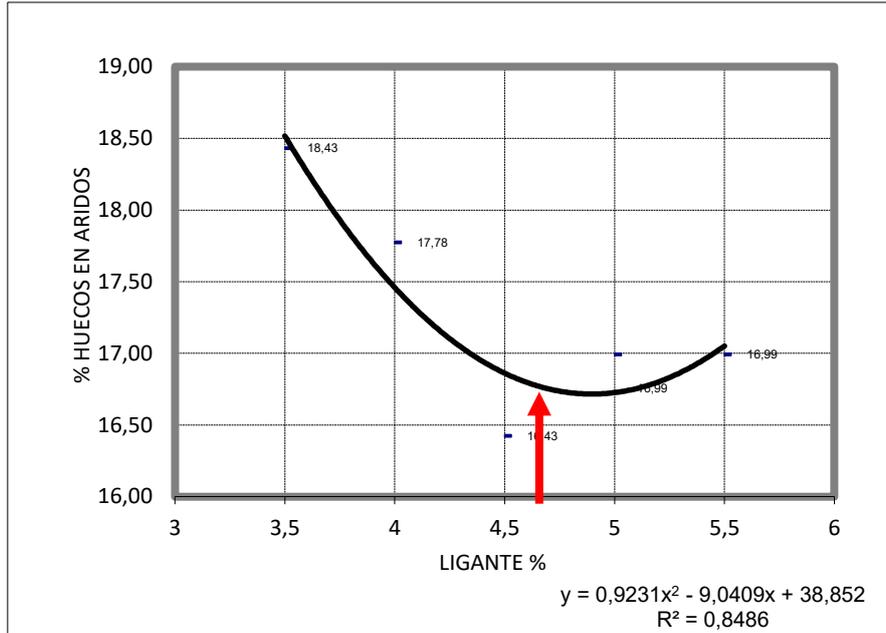


Figura 58. Huecos en Áridos % vs Ligante MAC 30% cerámica

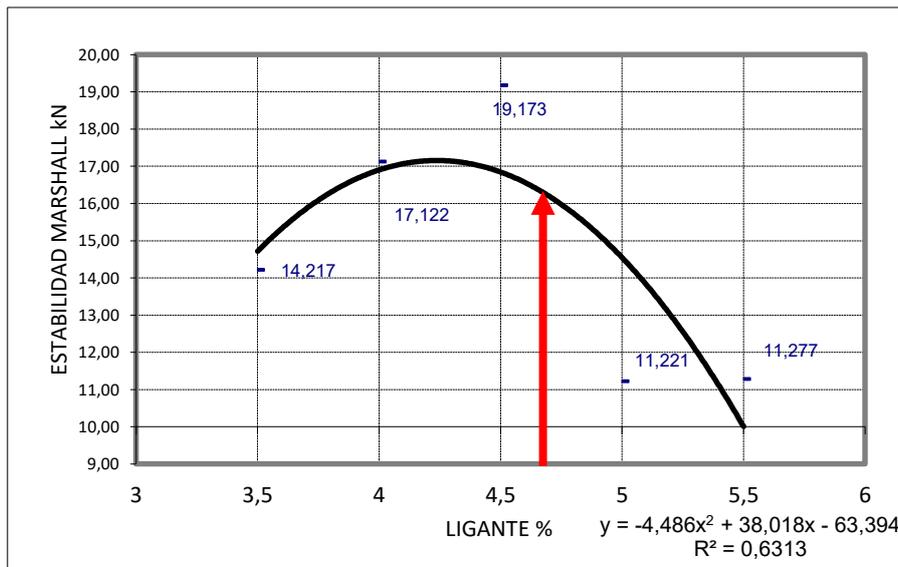


Figura 59. Estabilidad Marshall vs Ligante MAC 30% cerámica

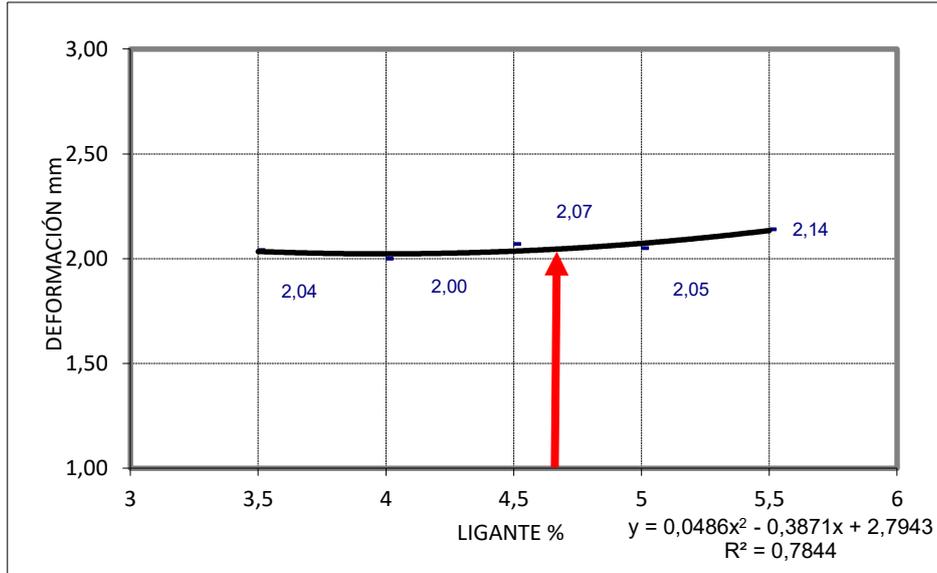


Figura 60. Deformación vs Ligante MAC 30% cerámica

Con los desarrollos gráficos y con base en las recomendaciones del PG-3, se obtuvo el porcentaje óptimo de ligante de la MAC 30% Cerámica y es de 4,6%, por eso todas las figuras tienen marcada con una flecha roja el valor correspondiente, y a continuación se muestran los valores obtenidos en el ligante de 4,6%.

Tabla 39. Parámetros del diseño AC 22 BIN S 30% cerámica – Marcado “CE”

AC 22 BIN S 30% Cerámica – Marcado “CE”		
Parámetros	Valores Límites	Valores
Densidad aparente (kg/m ³)		2291
Densidad máxima (kg/m ³)		2483
%Huecos de mezcla	4 - 7	7,0
%Huecos de áridos	≥14%	16,56
Sensibilidad (%)	> 80%	93,4
Porcentaje Óptimo de Betún	> 4%	4,6%

Tabla 40. Parámetros AC 22 BIN S 30% cerámica – Confirmación Marshall

AC 22 BIN S 30% cerámica – Confirmación Marshall		
Parámetros	Valores Límites	Valores
Densidad aparente (kg/m ³)		2291
Densidad máxima (kg/m ³)		2483
%Huecos de mezcla	4 - 7	7,0
%Huecos de áridos	≥14%	16,56
Estabilidad Marshall (KN)	> 12,5-8	14,88
Deformación Marshall (mm)	2 - 4	2,04
Sensibilidad (%)	> 80%	94
Cociente de Filler/Betún	1,1	1,0
Módulo resiliente promedio (MPa)	25°C	8713
Porcentaje Óptimo de Betún	> 4%	4,6%

6.2.10.3 MAC con reemplazo del 35% de triturado de cerámica

En la Tabla 41. Resultados diseño MAC 35% cerámica, se consignaron los parámetros obtenidos en cada una de los promedios de las familias de probetas realizados con cada uno de los porcentajes de ligante y con la fórmula de trabajo obtenida.

Tabla 41. Resultados diseño MAC 35% cerámica

Familia	Nº	I	II	III	IV	V
Ligante	%	3,5	4	4,5	5	5,5
Densidad	g/cm ³	2,229	2,269	2,272	2,288	2,306
Densidad máxima	g/cm ³	2,52	2,502	2,483	2,569	2,447
% Huecos áridos	%	19,15	18,39	18,72	17,7	18,46
% Huecos mezcla	%	11,58	9,32	8,49	5,58	5,78
Relación F/B	F/B	1,5	1,3	1,14	1,02	0,91
ITSR % Pérdida	%			4,7%		
				92.5		
Estabilidad Marshall	kN	17,95	18,68	17,61	17,09	15,7
Deformación Marshall	mm	2,1	2,52	2,49	3,08	4,96

Y con este resumen se generaron las siguientes figuras: Figura 61. Densidad vs Ligante MAC 35% cerámica, Figura 62. Huecos Mezcla % vs Ligante MAC 35% cerámica, Figura 63. Relación Filler/Betún vs MAC 35% cerámica, Figura 64. Huecos áridos % vs Ligante MAC 35% cerámica, Figura 65. Estabilidad Marshall vs Ligante MAC 35% cerámica y Figura 66. Deformación vs Ligante MAC 35% Cerámica. Una vez obtenidas estas figuras para establecer el valor óptimo de la mezcla, se consideró las especificaciones establecidas en la reglamentación PG-3 “mercado CE” y se confirmó completando la metodología Marshall.

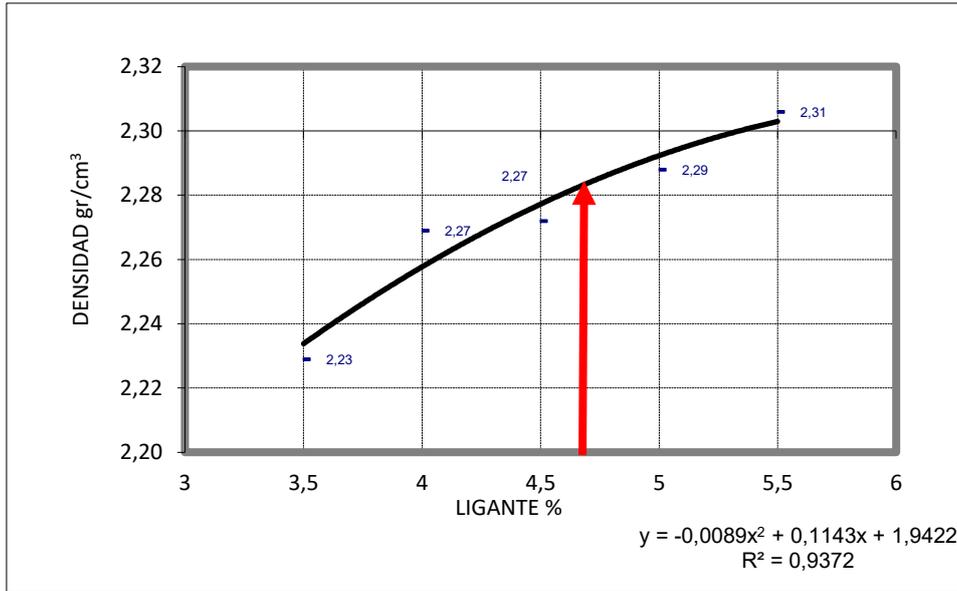


Figura 61. Densidad vs Ligante MAC 35% cerámica

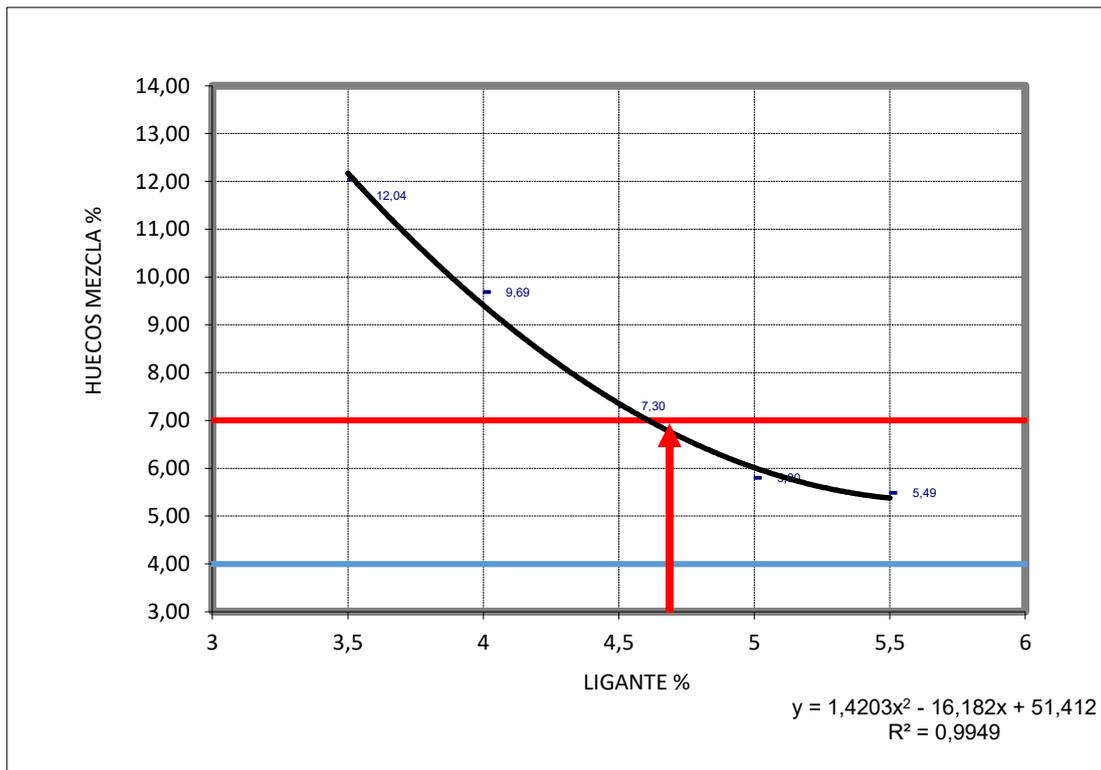


Figura 62. Huecos Mezcla % vs Ligante MAC 35% cerámica

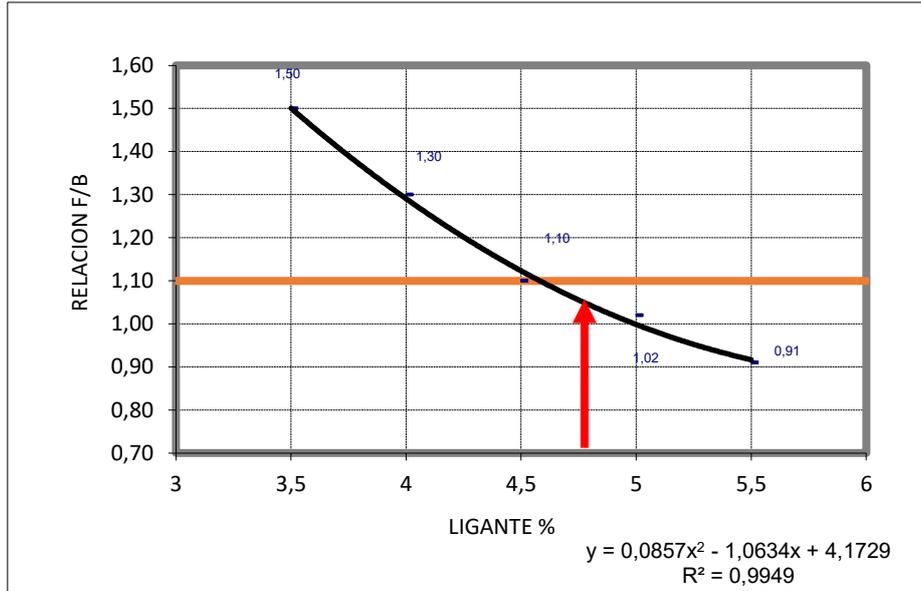


Figura 63. Relación Filler/Betún vs MAC 35% cerámica

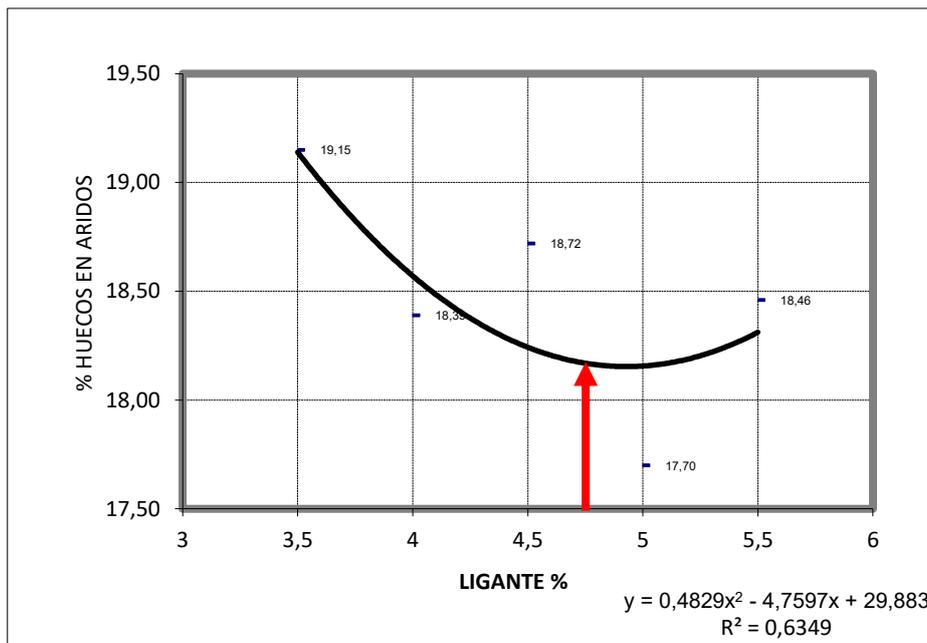


Figura 64. Huecos áridos % vs Ligante MAC 35% cerámica

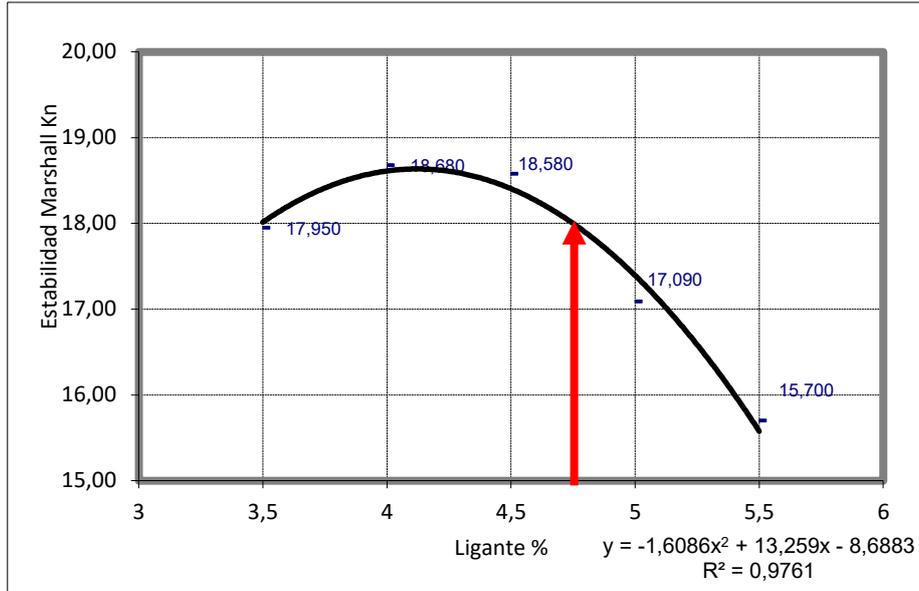


Figura 65. Estabilidad Marshall vs Ligante MAC 35% cerámica

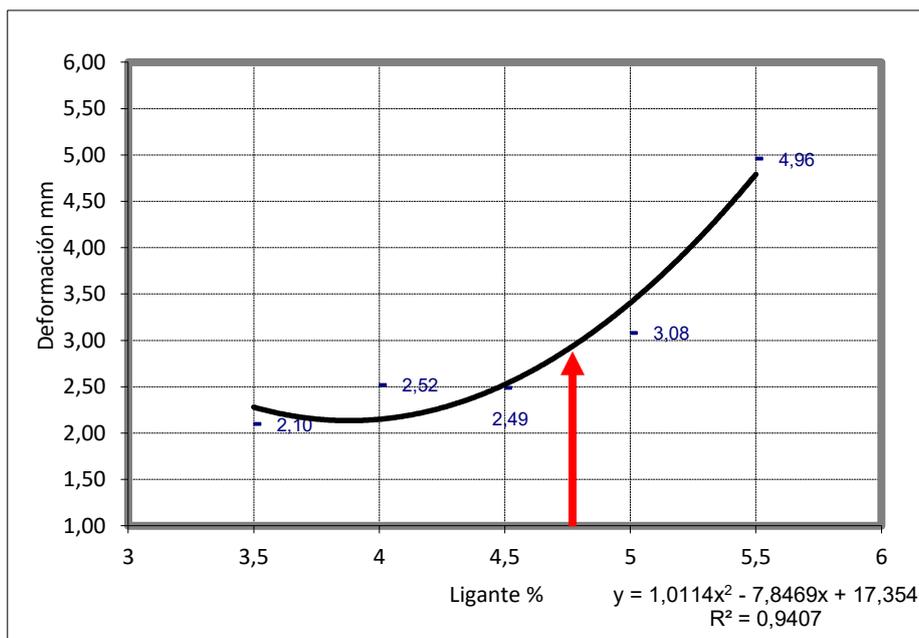


Figura 66. Deformación vs Ligante MAC 35% Cerámica

Con los desarrollos gráficos y con base en las recomendaciones del PG-3 se obtuvo el porcentaje óptimo de ligante de la MAC 35% Cerámica y es de 4,70%, por eso todas las figuras tienen marcada con una flecha roja el valor correspondiente, y a continuación se muestran los valores obtenidos en el ligante de 4,7%

Tabla 42. Parámetros del Diseño AC 22 BIN S 35% Cerámica – Marcado “CE”

AC 22 BIN S 35% Cerámica – Marcado “CE”		
Parámetros	Límites	Valores
Densidad aparente (kg/m ³)		2282
Densidad máxima (kg/m ³)		2560
%Huecos de mezcla	4 - 7	7,03
%Huecos de áridos	≥14%	18.17
Estabilidad Marshall (KN)	> 12,5	18,26
Deformación Marshall (mm)	2 - 4	3,1
Sensibilidad (%)	> 80%	92,4
Cociente de Filler/Betún	1,1	1,11
Porcentaje Óptimo de Betún	> 4%	4,7%

Tabla 43. Parámetros AC 22 BIN S 35% Cerámica – Confirmación Marshall

AC 22 BIN S 35% Cerámica – Marcado “CE”		
Parámetros	Valores Límites	Valores
Densidad aparente (kg/m ³)		2282
Densidad máxima (kg/m ³)		2560
%Huecos de mezcla	4 - 7	7,03
%Huecos de áridos	≥14%	18,17
Estabilidad Marshall (KN)	> 12,5	18,26
Deformación Marshall (mm)	2 - 4	2,8
Sensibilidad (%)	> 80%	92,4
Cociente de Filler/Betún	1,1	1,11
Módulo resiliente promedio (MPa)	25°C	9600
Porcentaje Óptimo de Betún	> 4%	4,7%

6.2.10.4 MAC con reemplazo del 40% de triturado cerámico

Como ya se comentó, se desarrollaron las probetas con el porcentaje de 40% de triturado cerámico, a las cuales se les aplicaron los ensayos correspondientes para obtener los parámetros según el mercado CE y según la confirmación por el método Marshall. Se encontró que los porcentajes de huecos en mezclas, que debían estar entre 4 y 7 %, superaron el 9% así como también el parámetro de deformación, el cual debía estar en el rango de 2 a 4 mm, pero se registraron valores muy superiores a los rangos esperados. Adicionalmente, se observaron

dificultades en su trabajabilidad, esto coincide con lo encontrado por (Silvestre, R., Medel, E., García, A., & Navas, J. , 2013) con relación a las mezclas bituminosas de porcentaje de 50%, las cuales se recomendaron no usar por no cumplir con los requisitos del PG-3. Por ese motivo, estos resultados no se plasman en esta tesina y no se incluyeron para el desarrollo de los ensayos programados.

6.3 Construcción de las probetas para el ensayo de módulos dinámicos

Una vez definido el porcentaje óptimo de ligante se revisó la norma (AASHTO T 312, 2014) para la construcción de las probetas, encontrando que era necesario el uso del equipo Compactador Giratorio, desarrollado por el programa de Programa Estratégico de investigaciones en Carreteras SHRP de los EEUU, Superpave. Con el apoyo del laboratorio de Asfaltos y Mezclas de la compañía Pavasal S.A, se construyeron las probetas de cada MAC, desarrollando cuatro (4) unidades por cada mezcla de la siguiente forma.

6.3.1 Preparación de la muestra y construcción de las probetas en el compactador giratorio de Superpave

Se alistó el material de áridos de cada MAC para ejecutar cuatro (4) probetas de diámetro 15 cm aproximadamente y 17 cm de altura y el ligante necesario de acuerdo al porcentaje óptimo de cada mezcla. Se acordó unas fechas y se gestionaron los permisos de entrada y disponibilidad del laboratorio de Pavasal. Se requirieron dos días para la construcción de las tres probetas de cada MAC. A continuación, se consigna el derrotero usado en la preparación de una probeta y que se replicó para las demás probetas:

- Se colocaron los áridos y el ligante por algo más de cuatro horas de calentamiento en el horno o estufa a temperatura controlada de 155°C y constante, esta labor se desarrolló a las siete (7) horas de la mañana.
- Una vez se alcanzó la temperatura se procedió a construir la mezcla usando una mezcladora mecánica con control de temperatura (160 °C) y con capacidad para mezclas hasta 25 kilogramos. Esta actividad se controló en tiempo aproximadamente cinco (5) minutos de ejecución, alrededor de las once (11) horas de la mañana.
- Una vez se verificó el cumplimiento de la temperatura de mezcla y el cubrimiento de todos los áridos se prosiguió el cuarteo de la misma usando cuatro (4) recipientes para una distribución equitativa y su posterior regreso a la estufa para homogenización de temperatura. Allí también se colocaron los moldes y elementos de apoyo necesarios para la construcción posterior. Esta labor se terminó alrededor de las 11:30 de la mañana.
- Posteriormente, alrededor de las 11:45 am se empezó a elaborar la probeta colocando papel filtro y luego la mezcla dentro del molde, con una acomodación de 15 golpes con varilla en la mezcla y cinco (5) golpes al molde por la parte exterior. Y con el molde colocado dentro del equipo de Compactador Giratorio el proceso de compactación y elaboración de la probeta tarde menos de 15 minutos. Los datos suministrados en cada MAC fueron identificación, fecha, densidad esperada y cantidad de ciclos.

- Finalmente, se extrajeron las probetas de los moldes, una vez habían alcanzado una temperatura de alrededor de $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ se procedió a usar un gato hidráulico que empujara la probeta al exterior, con el fin de continuar con la producción.
- Las probetas se dispusieron en un mesón para su enfriamiento completo y al día siguiente se trasladaron al laboratorio de caminos de la UPV, teniendo cuidado, que estuvieran custodiadas adecuadamente de posibles golpes o condiciones adversas de clima, etc.
- Al preparar las mezclas se determinó el Contenido de Vacíos de aire (Va). Se revisó que los núcleos resultantes hubieran disminuido la cantidad de vacíos de aire aproximadamente entre 1,5% a 2,5%. Adicionalmente, se controló que la diferencia estuviera máxima en un rango de menos de 0,5 % respecto al contenido de Vacíos de Aire (Va) determinado en el diseño realizado de la MAC.

6.3.2 Extracción de núcleos e instalación de los dispositivos

Las probetas se construyeron más grandes (150 mm de diámetro y 170 mm de altura), con el objetivo de extraer un núcleo de las dimensiones adecuadas (entre 100 y 104 mm de diámetro y entre 147.5 y 152.5 mm de altura) y con las paredes lisas de tal manera que permitieran la instalación adecuada de los porta-sensores a usar en el ensayo de módulos dinámicos. Con el apoyo del laboratorio de Geotecnia de la UPV, se usó el equipo de perforación y de aserrado de tal manera que todas las probetas quedaron con las dimensiones establecidas.

Para esta labor se adquirió una broca hueca de dimensiones 104 mm de diámetro punta de tungsteno y se sujetó la probeta para controlar su movimiento en el momento de la extracción del núcleo, posteriormente se aserraron las superficies transversales en cada uno de los extremos de la probeta, cuidando que la altura final estuviera dentro del rango permitido de 150 mm \pm 2 mm y de tal manera que se ofreciera una superficie lisa y horizontal para instalar el plato que recibe la fuerza que el pistón aplica cuando se hace el ensayo de módulo dinámico.

Las probetas ajustadas se sometieron a un ensayo de densidad bulk para conocer su densidad y vacíos. Para este ensayo se pesaron al aire, se pesaron sumergidas y se pesaron saturadas superficialmente secas, una vez secadas con el paño húmedo, y finalmente al otro día se pesaron al aire después de que habían quedado secando toda la noche.

Finalmente, las probetas después de dejarlas secar se almacenaron en una cámara de control de temperatura a 25°C y humedad para que no estuvieran sometidas a cambios bruscos, mientras llegaba el momento de su alistamiento para el ensayo.

6.4 Aplicación del ensayo de módulos dinámicos

El ensayo consiste en aplicar una carga cíclica en modo compresión (carga y descarga) o compresión (carga y descarga) y tensión (carga y descarga) y medir la deformación vertical del espécimen, el cual se debe mantener dentro de 50 y 150 ($1\mu\epsilon = 10^{-6}$ m/m, es decir una deformación de una micra respecto a un metro, adimensional). Existen principalmente dos normas, la estadounidense, AASHTO T342-11, y la europea, UNE EN 12697-26, las dos consideran carga sinusoidal.

El módulo dinámico es el módulo complejo, que relaciona el esfuerzo con la deformación bajo condiciones cíclicas en el dominio de la frecuencia, para decidir el valor de la rigidez del material en el diseño de los materiales según el clima, tránsito, subrasante y definir el espesor que se requiere.

La principal característica de este ensayo es el uso de carga vertical axial, sobre especímenes cilíndricos. No se utiliza torsión como en el betún, el resultado es E^* , por ser un módulo axial y no G^* , módulo cortante. Este ensayo es equivalente al reómetro de corte dinámico, DSR, de betunes, pues se obtiene módulo y ángulo de fase, módulo, E^* y ángulo de fase, Φ . Se reporta también el ángulo de fase porque tiene la señal de entrada y salida del esfuerzo que son cíclicas, el desfase entre las dos señales es el ángulo de fase. Así se determina la rigidez del material bajo distintas condiciones de carga, ya que tiene un componente viscoso, que lo hace sensible a la carga y a la temperatura, pues toda MAC es termo-dependiente, por el porcentaje de betún que se adiciona para construir el hormigón asfáltico (Caro Spinel, 2020).

El método usado para determinar el módulo es la aplicación de una carga cíclica a través del tiempo, sometiendo el espécimen a una carga a compresión, sinusoidal, es decir se aplica la carga y se descarga, repetidamente, cambiando temperatura y frecuencia. Se mide así la deformación unitaria recuperable del espécimen, como consecuencia de ese esfuerzo aplicado.

Es importante indicar que la deformación plástica se alcanza a presentar en mínimos valores, por lo que se ignora y se ajusta para definir la amplitud de la señal. La amplitud es la relación entre el esfuerzo y la deformación, que es el módulo. Para la ejecución del ensayo, se usa un equipo compuesto con una prensa de carga, un dispositivo de control de temperatura, y un dispositivo de aplicación de carga y sensores de medición de carga y deformación.

Se requiere que el espécimen tenga una dimensión 2 a 1, en Estados Unidos los especímenes usados son más pequeños y lo importante es obtener un elemento volumétrico representativo. Si es muy pequeño, entonces va a tener una influencia de los agregados grandes y eso no es adecuado. En el caso de esta tesis los especímenes de ensayo se acondicionaron aproximadamente a 10 cm de diámetro y 15 cm de altura, que son las dimensiones más usadas en la bibliografía existente y atendiendo la norma (AASHTO T342-11, 2015).

Los dispositivos porta-sensores se adhirieron a las paredes de las probetas para que los sensores de deformaciones puedan colocarse sobre ellos. En el caso del laboratorio de Caminos el equipo dinámico de pavimentos de marca Cooper permitió la colocación de dos sensores por probeta.

Para la ejecución del ensayo dinámico, se acondicionaron las probetas a la temperatura de 10°C, 20°C, 30°C y 40°C según temperaturas recomendadas por la norma UNE-UN-12967-26. La parte demorada del ensayo es el acondicionamiento de las probetas. En el caso de las probetas que se estudiaron se acondicionaron durante un tiempo aproximado de cuatro (4) horas en cada temperatura de tal manera que cuando se realizó el ensayo el espécimen se encontraba realmente a la temperatura indicada.

El software usado en el equipo fue el TP-62, y con dicha programación se aplicó la carga y se revisó que esta estuviera dentro de los parámetros de deformación indicados (50-150 $\mu\epsilon$). La verificación del cumplimiento fue importante ya que cuando los parámetros no cumplían se

debía programar la repetición del ensayo, para lo cual se tuvo en cuenta que no fuera a acumularse la deformación a $1500 \mu\epsilon$ (Dougan, Stephens, Mahoney, & Hansen, 2003).

6.5 Curvas maestras españolas

Se muestran las curvas de las MAC Patrón desarrolladas entre los módulos dinámicos vs frecuencia a diferentes temperaturas, entre los módulos dinámicos vs temperaturas a diferentes frecuencias (ver Figura 67). Las curvas maestras permiten conocer el comportamiento de la mezcla con respecto a las variables.

Con relación a las probetas ensayadas se debe aclarar que no se tuvieron en cuenta valores que no cumplieran con el reporte de deformación entre 50 y $150 \mu\epsilon$, aquellos valores cuyo comportamiento revelara un error de ensayo, como por ejemplo saltos inesperados en las curvas, no consistentes con los demás valores, o ensayos incompletos, errores de experimentación, entre otros. Es decir, se escogió la probeta que cumplía con el control de calidad, cuyas curvas desarrollaban un comportamiento coherente y promedio.

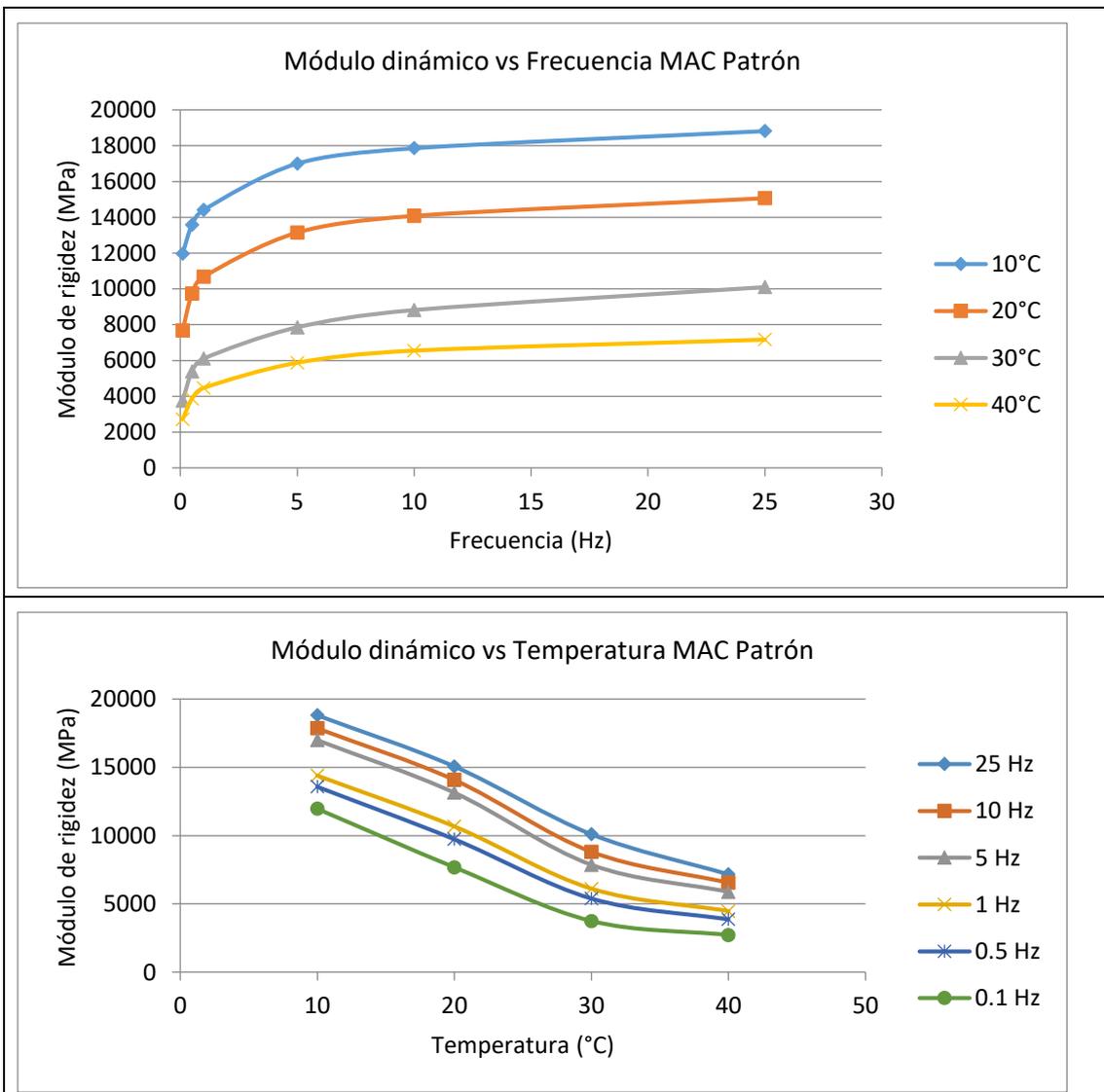


Figura 67. Curvas de módulos dinámicos vs Temperaturas MAC Patrón España

La probeta de MAC Patrón de módulo dinámico vs frecuencia muestra un comportamiento uniforme y esperado. El módulo dinámico más alto corresponde a la temperatura más baja, mientras el módulo más bajo corresponde a la temperatura más alta. A menor frecuencia menor módulo dinámico o viceversa.

El comportamiento de las curvas módulo dinámico vs temperatura tiene una pendiente uniforme confirmando que los módulos más altos se dan a las temperaturas bajas y los módulos bajos están en las temperaturas altas. Esto es consistente con el comportamiento visco-elástico lineal.

A continuación, las curvas resultantes del ensayo de módulo dinámico para MAC 30% cerámica.

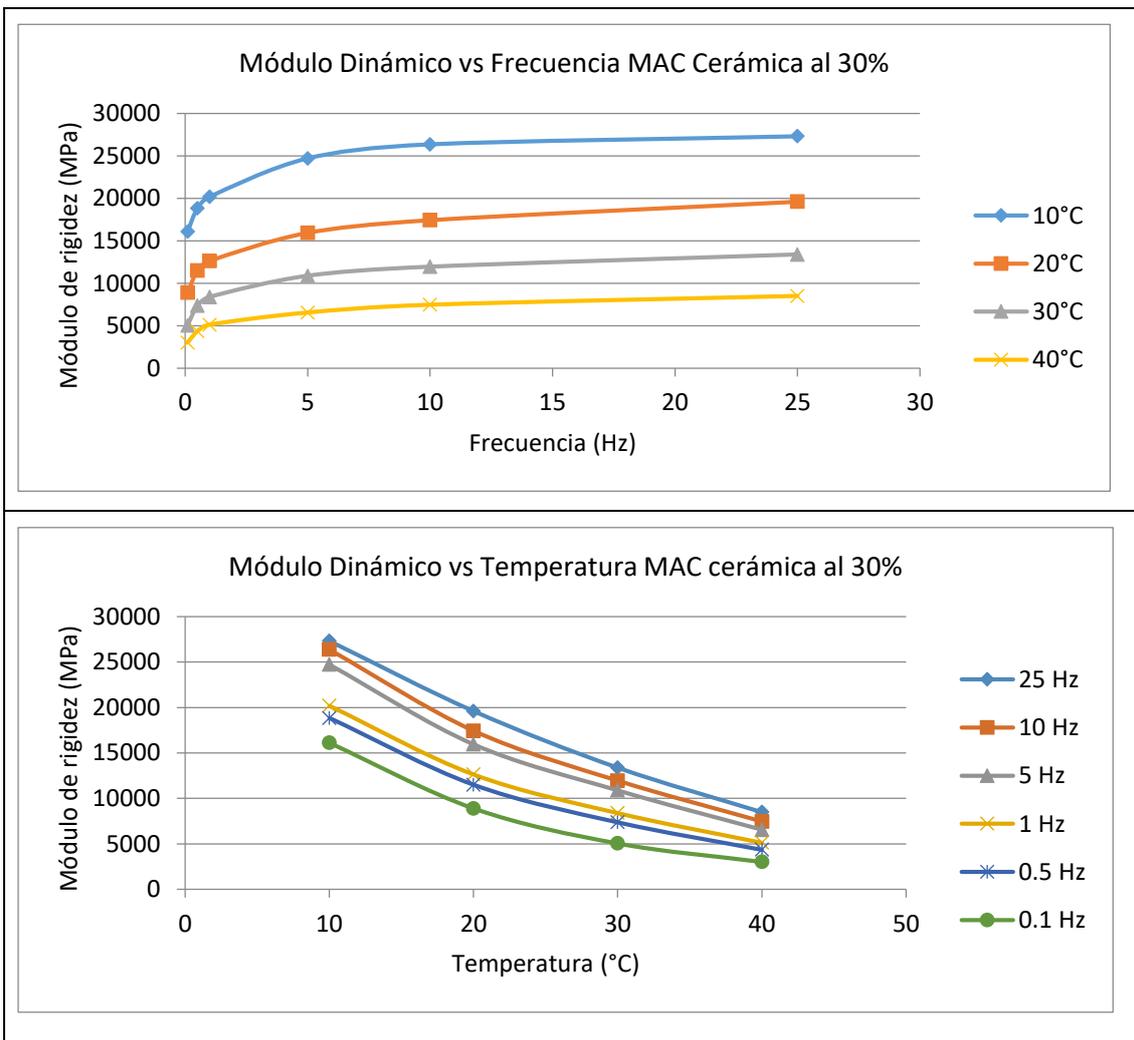


Figura 68. Curvas de módulos dinámicos vs Temperaturas MAC 30% cerámica

El comportamiento de las curvas Módulo Dinámico vs Frecuencia cerámico al 30% a todas las temperaturas es coherente y lógico, a mayor frecuencia mayor módulo dinámico y a menor temperatura mayor módulo dinámico. La tendencia de cada una de las curvas es lógica y tiene diferencias equidistantes.

El comportamiento de las curvas es muy uniforme, coherente y lógico. Las curvas son prácticamente paralelas y mantienen una distancia similar la una de la otra. Eso muestra la uniformidad del comportamiento.

A continuación, las curvas desarrolladas por módulo dinámico de las MAC con 35% de triturado de cerámica.

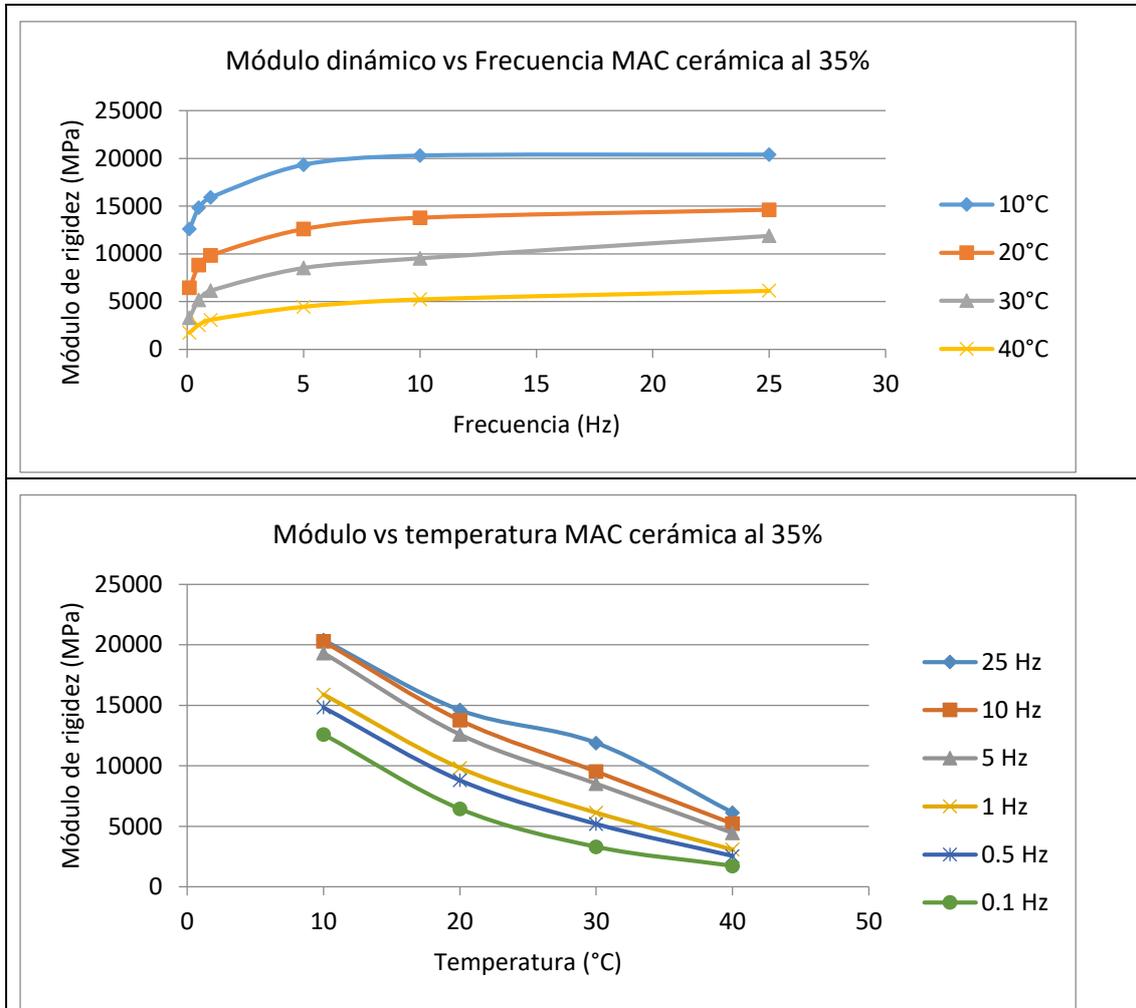


Figura 69. Curvas de Módulos Dinámicos vs Frecuencias o Temperaturas MAC 35% cerámica

El comportamiento de las curvas de módulo dinámico vs frecuencia de las probetas con inclusión de cerámica al 35% es lógico, es consistente. Las curvas son prácticamente paralelas, equidistantes, tienen un comportamiento homogéneo. A mayor frecuencia mayor módulo dinámico, a mayor temperatura menor módulo dinámico.

El comportamiento de las curvas es muy uniforme, coherente y lógico. Las curvas son prácticamente paralelas y mantienen una distancia similar la una de la otra. Eso muestra la uniformidad del comportamiento.

De las curvas mostradas anteriormente se han desarrollado las curvas maestras módulo dinámicos vs tiempo reducido, aportando información para el diseño del espesor de la capa de pavimento asfáltico.

6.5.1 Curva maestra MAC Patrón (España) con temperatura de referencia

Con el fin de construir las curvas maestras previamente se muestran las tablas que soportan dicho cálculo. La

Tabla 44, muestra el resumen de los datos obtenidos del ensayo de módulo dinámico, relacionados con el valor del módulo y el ángulo de fase.

Tabla 44. Datos de ensayo de módulos dinámicos MAC Patrón (España)

Frecuencia [Hz]	Temperatura [°C]	Módulo dinámico [MPa]	Ángulo de fase [°deg]
25,0	10	18818,8	0,99
25,0	20	15071,12	7,87
25,0	30	10104,11	12,88
25,0	40	7165,48	17,73
10,0	10	17861,15	7,65
10,0	20	14084,38	13,93
10,0	30	8820,73	15,35
10,0	40	6552,62	19,22
5,0	10	17001,09	10,12
5,0	20	13149,02	15,79
5,0	30	7856,05	17,19
5,0	40	5875,55	20,38
1,0	10	14407,67	12,25
1,0	20	10679,69	19,51
1,0	30	6111,92	21,71
1,0	40	4465,94	23,98
0,5	10	13578,81	13
0,5	20	9734,38	20,77
0,5	30	5392,97	22,06
0,5	40	3862,12	24,37
0,1	10	11967,2	16,01
0,1	20	7681,42	23,3
0,1	30	3744,2	24,09
0,1	40	2716,48	23,9

El principio de superposición de tiempo – temperatura permite transformar el módulo con diferentes frecuencias y ángulos de fase en una curva de una sola temperatura, aprovechando

el fundamento de la viscoelasticidad lineal que se basa en la característica termo-reológica simple de la mezcla asfáltica, en donde un mismo valor de módulo se puede obtener para diferentes combinaciones de frecuencia y temperatura.

Los materiales reológicamente simples cumplen con los diagramas llamados negros, (black space o cole-cole, shift factor, entre otras) pues presentan una correlación adecuada grado 2 o 3 entre el módulo y el ángulo de fase. Con el ángulo de fase se calcula el módulo de pérdida y un módulo de almacenamiento. Estos diagramas ayudan a identificar los datos no adecuados, en donde se presentaron errores, con el fin de tomar decisiones con respecto a valores aislados, para que se presente la correlación (ver Figura 70. Con la representación matemática de Shift Factor) es importante calcular los coeficientes que permitirán conocer el valor de desplazamiento. Los coeficientes se deben calcular con la mayor precisión posible.

Usando la ecuación de William Landel Ferry presentada a continuación se calculan los coeficientes C1 y C2, tal como se comenta en el numeral 3.8.11.

$$\log(aT) = \frac{C1 (T - Tr)}{C2 (T - Tr)}$$

Fuente: tomado de (Leiva Padilla, Loría Salazar, & Leiva Villacorta, 2013)

El logaritmo de factor de aproximación a todas las temperaturas se hace con base a la temperatura de referencia, Tr. La figura de Shift Factor se construye con el logaritmo de factor de aproximación en el eje horizontal y con las temperaturas en el eje vertical.

Después de verificar que los coeficientes se ajustan de manera adecuada (Ver Tabla 45, se calcula la frecuencia reducida, estimando el logaritmo de la frecuencia original más el logaritmo del factor de aproximación,

$$\log(fred) = \log(aT) + \log f$$

Fuente: tomado de (Leiva Padilla, Loría Salazar, & Leiva Villacorta, 2013)

Una de las gráficas intermedias que se genera es módulo dinámico vs frecuencia reducida.

Se revisan los valores de correlación, que deben ser altos. De esta manera se determinan los coeficientes de manera definitiva. Luego se hace un chequeo del diagrama logaritmo módulo dinámico vs el ángulo de fase, que es el mismo diagrama black space o diagrama negro, (ver Figura 70. el cual debe tener una correlación adecuada o de lo contrario se eliminan los datos incoherentes o que tienen respuesta errada a la tendencia que está predominando. Después se hace el diagrama de cole-cole módulo por el coseno del ángulo de fase, E' vs módulo por el seno del ángulo de fase, E'' donde el ángulo de fase estará en radianes. Y con la correlación se confirma que los valores son consistentes.

Finalmente, se elabora la curva maestra con la con la ecuación sigmoideal:

$$\text{Log } |E'| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log tr)}}$$

Donde:

$$tr = \frac{t}{at}, t = \frac{1}{f} \quad f = \text{frecuencia del ensayo}, \text{ Fuente: (Huang Y. H., 2004)}$$

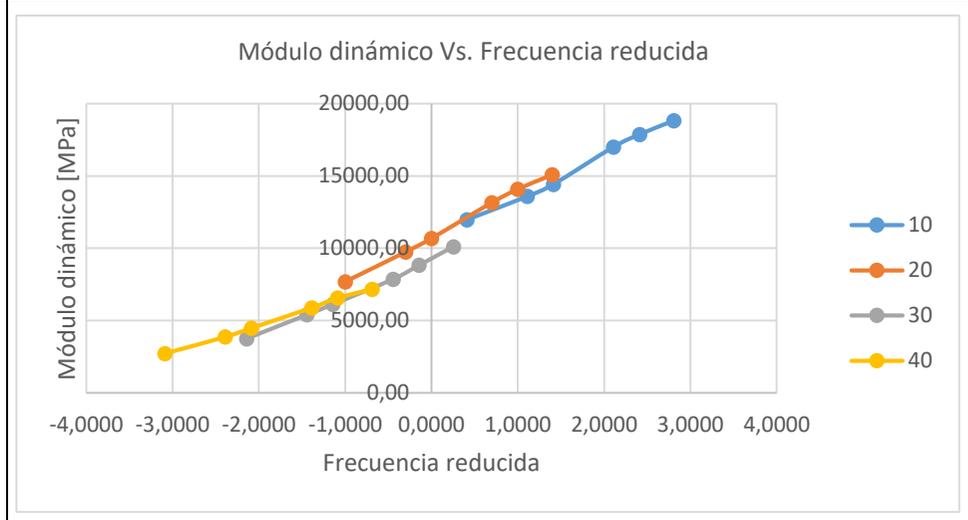
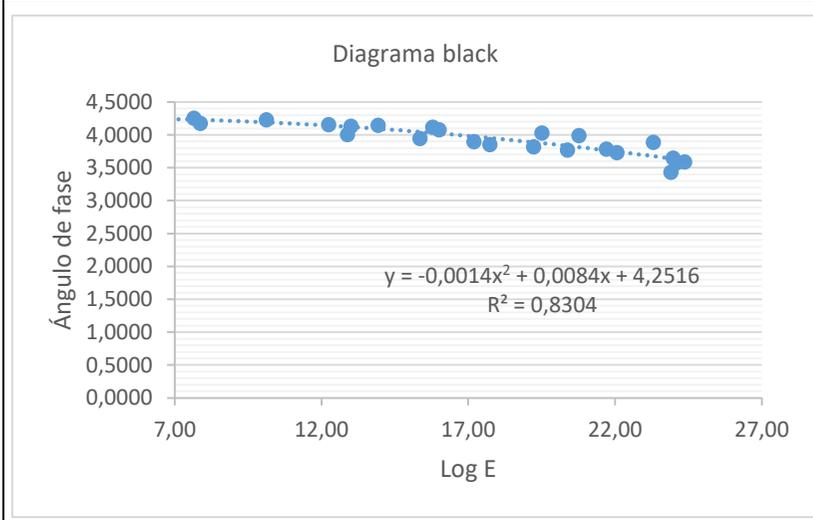
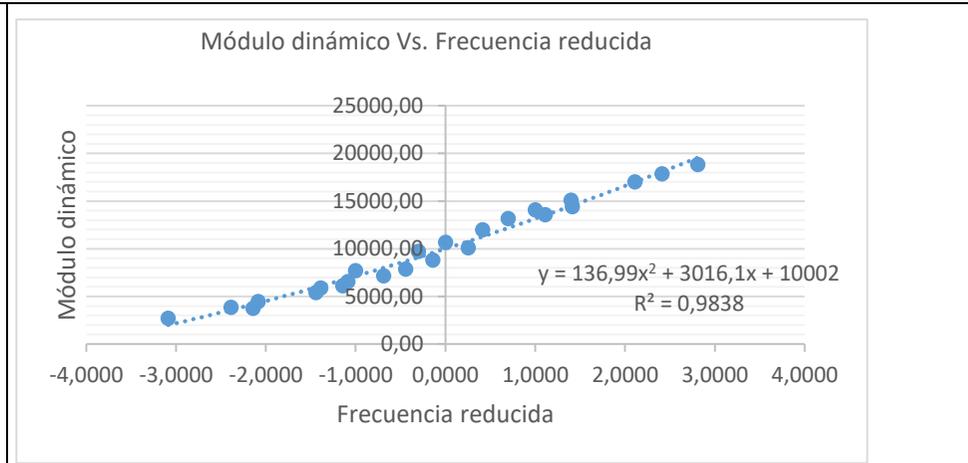
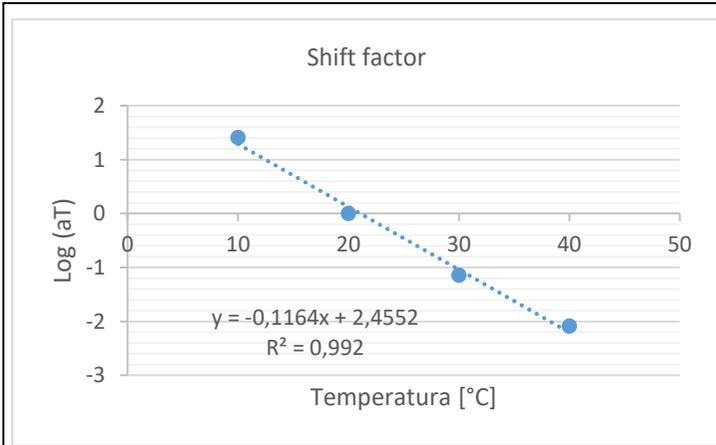
Se calcula el logaritmo de E' y se va generando la ecuación con las variables que se mantienen y la frecuencia reducida va variando con los cálculos ya realizados. De tal manera que el logaritmo

del módulo del ensayo sea muy cercano al logaritmo del módulo calculado de la curva maestra y esos coeficientes o variables ayuden a acercarse bastante. Finalmente se calcula el módulo dinámico calculado, transformado con la potencia 10 del logaritmo para obtener el módulo dinámico (ver ejemplo Figura 70 y Tabla 46 hasta Tabla 49). Con el fin de que el valor del módulo dinámico calculado, se ajuste lo más cercano al módulo dinámico obtenido del ensayo, se utiliza la función Solver de Microsoft Excel, haciendo iteraciones que permitan un mejor dato. Se gráfica el módulo y la frecuencia reducida y esa es la curva maestra.

La anterior explicación es aplicable a la construcción de las curvas maestras hechas para las mezclas colombianas.

Tabla 45. Coeficientes para construcción de la curva maestra con diferentes temperaturas de referencia

MAC Patrón (España)						
Temperatura	Shift Factor			Coeficientes		
10°C	T	Log (aT)	aT	C1	15	
	10	0	1	C2	90	
	20	-1,5	0,03162278	α	1,44998773	
	30	-2,72727273	0,00187382	β	-1,72962388	
	40	-3,75	0,00017783	γ	0,49918868	
				δ	2,94786212	
20°C	T	Log (aT)	aT	C1	12	
	10	1,41176471	25,8086154	C2	95	
	20	0	1	α	2,63502514	
	30	-1,14285714	0,07196857	β	-1,45442081	
	40	-2,08695652	0,00818547	γ	0,35405587	
				δ	1,86042221	
30°C	T	Log (aT)	aT	C1	10	
	10	2,85714286	719,685673	C2	90	
	20	1,25	17,7827941	α	2,59406164	
	30	0	1	β	-1,15641716	
	40	-1	0,1	γ	0,36529032	
				δ	1,84081725	
40°C	T	Log (aT)	aT	C1	9	
	10	3,85714286	7196,85673	C2	100	
	20	2,25	177,827941	α	2,30986077	
	30	1	10	β	-0,58782113	
	40	0	1	γ	0,3697995	
				δ	2,1411486	



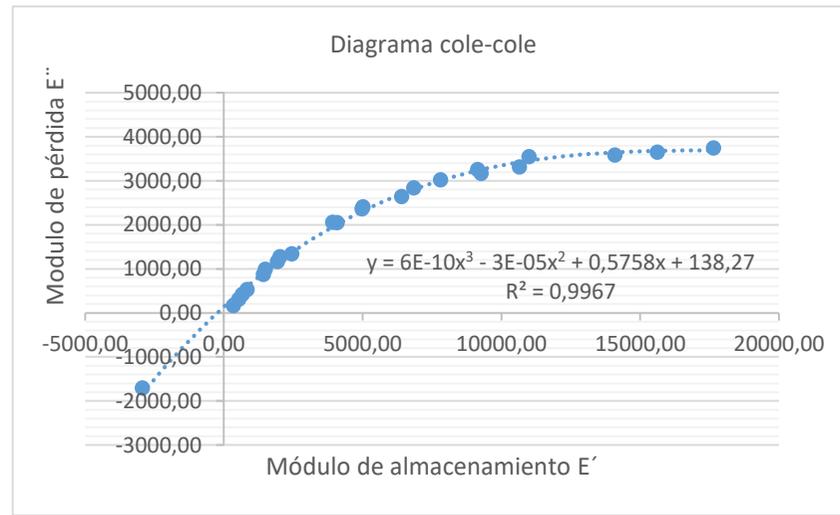


Figura 70. Gráficas de comprobación de la construcción de las curvas maestras MAC Patrón (España)

Tabla 46. Módulos calculados MAC Patrón 10°C (España)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	Módulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	Módulo de almacenamiento (E')	Módulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,04000	-1,39794	18818,80	0,99	1,3979	4,2746	18815,97	326,42	4,2803	0,0000	19065,67
10	10,0	0,10	0,10000	-1,00000	17861,15	7,65	1,0000	4,2519	17702,24	2377,33	4,2569	0,0000	18068,48
10	5,0	0,20	0,20000	-0,69900	17001,09	10,12	0,6990	4,2305	16736,78	2986,16	4,2366	0,0000	17242,94
10	1,0	1,00	1,00000	0,00000	14407,67	12,25	0,0000	4,1586	14079,79	3056,22	4,1794	0,0004	15115,76
10	0,5	2,00	2,00000	0,30100	13578,81	13,00	-0,3010	4,1329	13230,88	3054,15	4,1501	0,0003	14127,51
10	0,1	10,00	10,00000	1,00000	11967,20	16,01	-1,0000	4,0780	11503,19	3300,06	4,0700	0,0001	11748,98
20	25,0	0,04	1,2649	0,1021	15071,12	7,87	-0,1021	4,1781	14929,06	2064,40	4,1698	0,0001	14784,59
20	10,0	0,10	3,1623	0,5000	14084,38	13,93	-0,5000	4,1487	13670,28	3390,18	4,1290	0,0004	13458,26
20	5,0	0,20	6,3246	0,8010	13149,02	15,79	-0,8010	4,1189	12652,77	3578,29	4,0945	0,0006	12431,21
20	1,0	1,00	31,6228	1,5000	10679,69	19,51	-1,5000	4,0286	10066,79	3565,87	4,0024	0,0007	10055,46
20	0,5	2,00	63,2456	1,8010	9734,38	20,77	-1,8010	3,9883	9101,64	3452,28	3,9577	0,0009	9072,83
20	0,1	10,00	316,2278	2,5000	7681,42	23,30	-2,5000	3,8854	7054,79	3038,78	3,8442	0,0017	6984,81
30	25,0	0,04	21,3468	1,3293	10104,11	12,88	-1,3293	4,0045	9849,76	2252,84	4,0264	0,0005	10627,34
30	10,0	0,10	53,3670	1,7273	8820,73	15,35	-1,7273	3,9455	8505,89	2335,60	3,9689	0,0005	9309,93
30	5,0	0,20	106,7340	2,0283	7856,05	17,19	-2,0283	3,8952	7505,06	2321,97	3,9222	0,0007	8360,14
30	1,0	1,00	533,6699	2,7273	6111,92	21,71	-2,7273	3,7862	5678,53	2260,50	3,8048	0,0003	6380,28
30	0,5	2,00	1067,3398	3,0283	5392,97	22,06	-3,0283	3,7318	4998,08	2025,68	3,7515	0,0004	5643,44
30	0,1	10,00	5336,6992	3,7273	3744,20	24,09	-3,7273	3,5734	3418,12	1528,22	3,6254	0,0027	4221,25
40	25,0	0,04	224,9365	2,3521	7165,48	17,73	-2,3521	3,8552	6824,98	2182,59	3,8692	0,0002	7399,47
40	10,0	0,10	562,3413	2,7500	6552,62	19,22	-2,7500	3,8164	6187,25	2157,49	3,8009	0,0002	6322,07
40	5,0	0,20	1124,6827	3,0510	5875,55	20,38	-3,0510	3,7690	5507,87	2045,86	3,7475	0,0005	5590,84
40	1,0	1,00	5623,4133	3,7500	4465,94	23,98	-3,7500	3,6499	4080,43	1815,13	3,6213	0,0008	4181,65
40	0,5	2,00	11246,8265	4,0510	3862,12	24,37	-4,0510	3,5868	3517,99	1593,65	3,5675	0,0004	3694,35
40	0,1	10,00	56234,1325	4,7500	2716,48	23,90	-4,7500	3,4340	2483,57	1100,52	3,4480	0,0002	2805,22

El cálculo de los módulos dinámicos se desarrolló para todas las temperaturas de ensayo. A continuación, se registran en tablas cada una de las mezclas desarrolladas.

Tabla 47. Módulos calculados MAC Patrón 20°C (España)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	Módulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	Módulo de almacenamiento (E')	Módulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,00155	-2,80970	18818,80	0,99	2,8097	4,2746	18815,97	326,42	4,2860	0,0001	19318,49
10	10,0	0,10	0,0039	-2,4118	17861,15	7,65	2,4118	4,2519	17702,24	2377,33	4,2571	0,0000	18077,80
10	5,0	0,20	0,0077	-2,1107	17001,09	10,12	2,1107	4,2305	16736,78	2986,16	4,2330	0,0000	17100,68
10	1,0	1,00	0,0387	-1,4118	14407,67	12,25	1,4118	4,1586	14079,79	3056,22	4,1685	0,0001	14739,05
10	0,5	2,00	0,0775	-1,1107	13578,81	13,00	1,1107	4,1329	13230,88	3054,15	4,1367	0,0000	13699,40
10	0,1	10,00	0,3875	-0,4118	11967,20	16,01	0,4118	4,0780	11503,19	3300,06	4,0529	0,0006	11295,06
20	25,0	0,04	0,0400	-1,3979	15071,12	7,87	1,3979	4,1781	14929,06	2064,40	4,1671	0,0001	14691,46
20	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	14084,38	13,93	1,0000	4,1487	13670,28	3390,18	4,1244	0,0006	13316,10
20	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	13149,02	15,79	0,6990	4,1189	12652,77	3578,29	4,0891	0,0009	12276,63
20	1,0	1,00	1,0000	0,0000	10679,69	19,51	0,0000	4,0286	10066,79	3565,87	3,9966	0,0010	9921,53
20	0,5	2,00	2,0000	0,3010	9734,38	20,77	-0,3010	3,9883	9101,64	3452,28	3,9520	0,0013	8954,52
20	0,1	10,00	10,0000	1,0000	7681,42	23,30	-1,0000	3,8854	7054,79	3038,78	3,8376	0,0023	6879,50
30	25,0	0,04	0,5558	-0,2551	10104,11	12,88	0,2551	4,0045	9849,76	2252,84	4,0321	0,0008	10766,72
30	10,0	0,10	1,3895	0,1429	8820,73	15,35	-0,1429	3,9455	8505,89	2335,60	3,9758	0,0009	9458,04
30	5,0	0,20	2,7790	0,4439	7856,05	17,19	-0,4439	3,8952	7505,06	2321,97	3,9299	0,0012	8509,44
30	1,0	1,00	13,8950	1,1429	6111,92	21,71	-1,1429	3,7862	5678,53	2260,50	3,8123	0,0007	6490,44
30	0,5	2,00	27,7899	1,4439	5392,97	22,06	-1,4439	3,7318	4998,08	2025,68	3,7570	0,0006	5714,42
30	0,1	10,00	138,9495	2,1429	3744,20	24,09	-2,1429	3,5734	3418,12	1528,22	3,6186	0,0020	4155,44
40	25,0	0,04	4,8867	0,6890	7165,48	17,73	-0,6890	3,8552	6824,98	2182,59	3,8904	0,0012	7769,60
40	10,0	0,10	12,2168	1,0870	6552,62	19,22	-1,0870	3,8164	6187,25	2157,49	3,8222	0,0000	6641,13
40	5,0	0,20	24,4335	1,3880	5875,55	20,38	-1,3880	3,7690	5507,87	2045,86	3,7674	0,0000	5853,91
40	1,0	1,00	122,1677	2,0870	4465,94	23,98	-2,0870	3,6499	4080,43	1815,13	3,6302	0,0004	4267,35
40	0,5	2,00	244,3355	2,3880	3862,12	24,37	-2,3880	3,5868	3517,99	1593,65	3,5671	0,0004	3690,84
40	0,1	10,00	1221,6773	3,0870	2716,48	23,90	-3,0870	3,4340	2483,57	1100,52	3,4135	0,0004	2591,15

Tabla 48. Módulos calculados MAC Patrón 30°C (España)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	Módulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	Módulo de almacenamiento (E')	Módulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,00006	-4,25508	18818,80	0,99	4,2551	4,2746	18815,99	325,15	4,2732	0,0000	18756,90
10	10,0	0,10	0,0001	-3,8571	17861,15	7,65	3,8571	4,2519	17702,18	2377,70	4,2497	0,0000	17769,09
10	5,0	0,20	0,0003	-3,5561	17001,09	10,12	3,5561	4,2305	16736,59	2987,27	4,2298	0,0000	16976,11
10	1,0	1,00	0,0014	-2,8571	14407,67	12,25	2,8571	4,1586	14079,62	3056,99	4,1761	0,0003	15001,83
10	0,5	2,00	0,0028	-2,5561	13578,81	13,00	2,5561	4,1329	13230,79	3054,57	4,1494	0,0003	14105,21
10	0,1	10,00	0,0139	-1,8571	11967,20	16,01	1,8571	4,0780	11503,04	3300,62	4,0778	0,0000	11960,94
20	25,0	0,04	0,0022	-2,6479	15071,12	7,87	2,6479	4,1781	14929,17	2063,63	4,1578	0,0004	14381,08
20	10,0	0,10	0,0056	-2,2500	14084,38	13,93	2,2500	4,1487	13670,17	3390,62	4,1197	0,0008	13173,63
20	5,0	0,20	0,0112	-1,9490	13149,02	15,79	1,9490	4,1189	12652,85	3578,01	4,0880	0,0010	12245,32
20	1,0	1,00	0,0562	-1,2500	10679,69	19,51	1,2500	4,0286	10066,50	3566,71	4,0038	0,0006	10088,53
20	0,5	2,00	0,1125	-0,9490	9734,38	20,77	0,9490	3,9883	9101,76	3451,98	3,9628	0,0006	9179,97
20	0,1	10,00	0,5623	-0,2500	7681,42	23,30	0,2500	3,8854	7054,97	3038,35	3,8562	0,0009	7180,68
30	25,0	0,04	0,0400	-1,3979	10104,11	12,88	1,3979	4,0045	9849,88	2252,31	4,0229	0,0003	10541,51
30	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	8820,73	15,35	1,0000	3,9455	8506,07	2334,98	3,9700	0,0006	9332,47
30	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	7856,05	17,19	0,6990	3,8952	7505,12	2321,79	3,9265	0,0010	8444,01
30	1,0	1,00	1,0000	0,0000	6111,92	21,71	0,0000	3,7862	5678,39	2260,85	3,8141	0,0008	6517,35
30	0,5	2,00	2,0000	0,3010	5392,97	22,06	-0,3010	3,7318	4998,16	2025,48	3,7607	0,0008	5763,22
30	0,1	10,00	10,0000	1,0000	3744,20	24,09	-1,0000	3,5734	3418,10	1528,27	3,6257	0,0027	4223,98
40	25,0	0,04	0,4000	-0,3979	7165,48	17,73	0,3979	3,8552	6825,14	2182,12	3,8801	0,0006	7587,50
40	10,0	0,10	1,0000	0,0000	6552,62	19,22	0,0000	3,8164	6187,39	2157,10	3,8141	0,0000	6517,35
40	5,0	0,20	2,0000	0,3010	5875,55	20,38	-0,3010	3,7690	5507,76	2046,13	3,7607	0,0001	5763,22
40	1,0	1,00	10,0000	1,0000	4465,94	23,98	-1,0000	3,6499	4080,47	1815,04	3,6257	0,0006	4223,98
40	0,5	2,00	20,0000	1,3010	3862,12	24,37	-1,3010	3,5868	3518,00	1593,62	3,5633	0,0006	3658,22
40	0,1	10,00	100,0000	2,0000	2716,48	23,90	-2,0000	3,4340	2483,55	1100,56	3,4099	0,0006	2569,87

Tabla 49 Módulos calculados MAC Patrón 40°C (España)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	Módulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	Módulo de almacenamiento (E')	Módulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,00001	-5,25508	18818,80	0,99	5,2551	4,2746	18815,99	325,15	4,2808	0,0000	19088,21
10	10,0	0,10	0,0000	-4,8571	17861,15	7,65	4,8571	4,2519	17702,18	2377,70	4,2561	0,0000	18032,39
10	5,0	0,20	0,0000	-4,5561	17001,09	10,12	4,5561	4,2305	16736,59	2987,27	4,2352	0,0000	17188,61
10	1,0	1,00	0,0001	-3,8571	14407,67	12,25	3,8571	4,1586	14079,62	3056,99	4,1791	0,0004	15103,94
10	0,5	2,00	0,0003	-3,5561	13578,81	13,00	3,5561	4,1329	13230,79	3054,57	4,1512	0,0003	14165,32
10	0,1	10,00	0,0014	-2,8571	11967,20	16,01	2,8571	4,0780	11503,04	3300,62	4,0771	0,0000	11943,06
20	25,0	0,04	0,0002	-3,6479	15071,12	7,87	3,6479	4,1781	14929,17	2063,63	4,1600	0,0003	14453,54
20	10,0	0,10	0,0006	-3,2500	14084,38	13,93	3,2500	4,1487	13670,17	3390,62	4,1204	0,0008	13195,86
20	5,0	0,20	0,0011	-2,9490	13149,02	15,79	2,9490	4,1189	12652,85	3578,01	4,0876	0,0010	12235,88
20	1,0	1,00	0,0056	-2,2500	10679,69	19,51	2,2500	4,0286	10066,50	3566,71	4,0013	0,0007	10030,47
20	0,5	2,00	0,0112	-1,9490	9734,38	20,77	1,9490	3,9883	9101,76	3451,98	3,9596	0,0008	9112,41
20	0,1	10,00	0,0562	-1,2500	7681,42	23,30	1,2500	3,8854	7054,97	3038,35	3,8523	0,0011	7116,50
30	25,0	0,04	0,0040	-2,3979	10104,11	12,88	2,3979	4,0045	9849,88	2252,31	4,0208	0,0003	10490,66
30	10,0	0,10	0,0100	-2,0000	8820,73	15,35	2,0000	3,9455	8506,07	2334,98	3,9669	0,0005	9266,03
30	5,0	0,20	0,0200	-1,6990	7856,05	17,19	1,6990	3,8952	7505,12	2321,79	3,9229	0,0008	8373,76
30	1,0	1,00	0,1000	-1,0000	6111,92	21,71	1,0000	3,7862	5678,39	2260,85	3,8104	0,0006	6461,87
30	0,5	2,00	0,2000	-0,6990	5392,97	22,06	0,6990	3,7318	4998,16	2025,48	3,7576	0,0007	5722,25
30	0,1	10,00	1,0000	0,0000	3744,20	24,09	0,0000	3,5734	3418,10	1528,27	3,6261	0,0028	4227,44
40	25,0	0,04	0,0400	-1,3979	7165,48	17,73	1,3979	3,8552	6825,14	2182,12	3,8762	0,0004	7519,88
40	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	6552,62	19,22	1,0000	3,8164	6187,39	2157,10	3,8104	0,0000	6461,87
40	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	5875,55	20,38	0,6990	3,7690	5507,76	2046,13	3,7576	0,0001	5722,25
40	1,0	1,00	1,0000	0,0000	4465,94	23,98	0,0000	3,6499	4080,47	1815,04	3,6261	0,0006	4227,44
40	0,5	2,00	2,0000	0,3010	3862,12	24,37	-0,3010	3,5868	3518,00	1593,62	3,5662	0,0004	3682,57
40	0,1	10,00	10,0000	1,0000	2716,48	23,90	-1,0000	3,4340	2483,55	1100,56	3,4215	0,0002	2639,26

Tabla 50. Módulo dinámico calculado MAC Patrón 10°C España

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1,00E-20	4,3978	24994,13
-19	1,00E-19	4,3978	24993,69
-18	1,00E-18	4,3978	24992,96
-17	1,00E-17	4,3978	24991,76
-16	1,00E-16	4,3978	24989,78
-15	1,00E-15	4,3977	24986,53
-14	1,00E-14	4,3976	24981,17
-13	1,00E-13	4,3975	24972,34
-12	1,00E-12	4,3972	24957,81
-11	1,00E-11	4,3968	24933,9
-10	1,00E-10	4,3961	24894,6
-9	1E-09	4,395	24830,07
-8	0,00000001	4,3931	24724,34
-7	0,0000001	4,3901	24551,72
-6	0,000001	4,3851	24271,55
-5	0,00001	4,377	23821,04
-4	0,0001	4,3638	23107,62
-3	0,001	4,3425	22005,19
-2	0,01	4,3089	20366,01
-1	0,1	4,2569	18068,48
0	1	4,1794	15115,76
1	10	4,07	11748,98
2	100	3,9267	8447,3
3	1000	3,7566	5709,54
4	10000	3,5766	3772,19
5	100000	3,4079	2558,04
6	1000000	3,2669	1848,84
7	10000000	3,1599	1444,96
8	100000000	3,0844	1214,48
9	1000000000	3,0339	1081,24
10	1E+10	3,0014	1003,11
11	1,00E+11	2,9808	956,77
12	1,00E+12	2,968	929,05
13	1,00E+13	2,9602	912,39
14	1,00E+14	2,9554	902,33
15	1,00E+15	2,9524	896,24
16	1,00E+16	2,9506	892,56
17	1,00E+17	2,9495	890,32
18	1,00E+18	2,9489	888,97
19	1,00E+19	2,9485	888,14
20	1,00E+20	2,9482	887,64

Ya con el tiempo reducido y el módulo calculado se gráfica la curva maestra. Ver en este caso para cada temperatura de ensayo la correspondiente a cada tipo de mezcla, empezando con la de temperatura 10°C y terminando con la de temperatura 40°C (ver Figura 71).

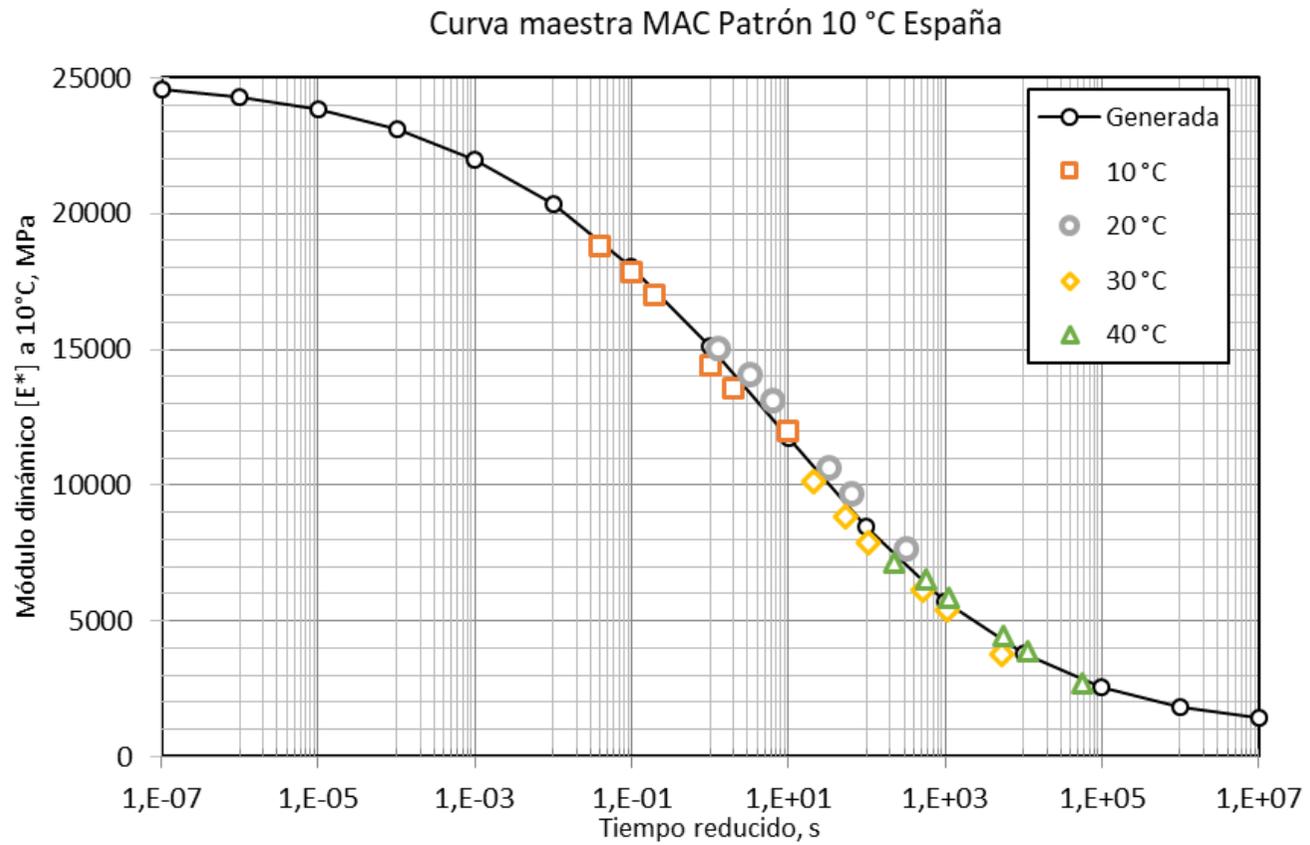


Figura 71. Curva maestra MAC Patrón 10°C España

Tabla 51. Módulo dinámico calculado MAC Patrón 20°C (España)

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1,00E-20	4,4949	31255,76
-19	1,00E-19	4,4947	31239,95
-18	1,00E-18	4,4944	31217,44
-17	1,00E-17	4,494	31185,41
-16	1,00E-16	4,4933	31139,85
-15	1,00E-15	4,4924	31075,08
-14	1,00E-14	4,4911	30983,11
-13	1,00E-13	4,4893	30852,69
-12	1,00E-12	4,4867	30668,12
-11	1,00E-11	4,483	30407,66
-10	1,00E-10	4,4777	30041,62
-9	1E-09	4,4703	29530,14
-8	0,00000001	4,4597	28821,23
-7	0,0000001	4,4448	27849,85
-6	0,000001	4,4239	26539,92
-5	0,00001	4,3947	24812,26
-4	0,0001	4,3541	22602
-3	0,001	4,2986	19888,5
-2	0,01	4,2236	16734,11
-1	0,1	4,1244	13316,1
0	1	3,9966	9921,53
1	10	3,8376	6879,5
2	100	3,648	4445,85
3	1000	3,4331	2710,64
4	10000	3,2031	1596,23
5	100000	2,9716	936,64
6	1000000	2,7524	565,48
7	10000000	2,5567	360,36
8	100000000	2,3909	245,99
9	1000000000	2,2565	180,52
10	1E+10	2,1515	141,73
11	1,00E+11	2,0716	117,93
12	1,00E+12	2,0123	102,87
13	1,00E+13	1,9689	93,08
14	1,00E+14	1,9375	86,59
15	1,00E+15	1,915	82,22
16	1,00E+16	1,899	79,24
17	1,00E+17	1,8876	77,19
18	1,00E+18	1,8795	75,78
19	1,00E+19	1,8739	74,79
20	1,00E+20	1,8699	74,11

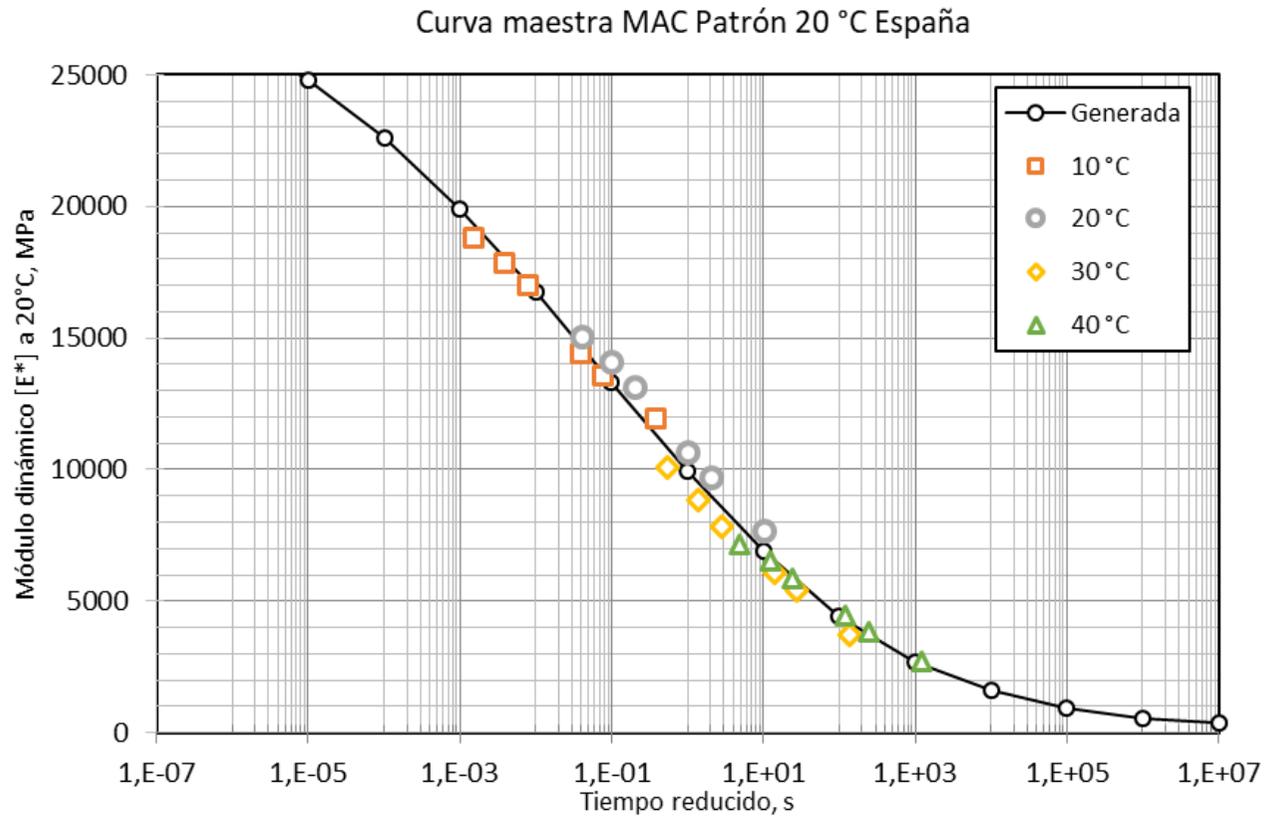


Figura 72 Curva maestra MAC Patrón 20°C (España)

Tabla 52. Módulos dinámico MAC Patrón 30°C

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1,00E-20	4,4343	27185,1
-19	1,00E-19	4,4341	27169,98
-18	1,00E-18	4,4337	27148,22
-17	1,00E-17	4,4332	27116,9
-16	1,00E-16	4,4325	27071,86
-15	1,00E-15	4,4315	27007,13
-14	1,00E-14	4,43	26914,23
-13	1,00E-13	4,4278	26781,11
-12	1,00E-12	4,4247	26590,84
-11	1,00E-11	4,4203	26319,84
-10	1,00E-10	4,4139	25935,79
-9	1E-09	4,4048	25395,48
-8	0,00000001	4,3917	24643,12
-7	0,0000001	4,3731	23610,66
-6	0,000001	4,3468	22222,67
-5	0,00001	4,3098	20409,39
-4	0,0001	4,2584	18131,85
-3	0,001	4,188	15418,71
-2	0,01	4,0935	12403,2
-1	0,1	3,97	9332,47
0	1	3,8141	6517,35
1	10	3,6257	4223,98
2	100	3,4099	2569,87
3	1000	3,1771	1503,49
4	10000	2,9417	874,44
5	100000	2,7189	523,45
6	1000000	2,5206	331,59
7	10000000	2,3537	225,79
8	100000000	2,2197	165,84
9	1000000000	2,1161	130,63
10	1E+10	2,0382	109,2
11	1,00E+11	1,9811	95,74
12	1,00E+12	1,9398	87,06
13	1,00E+13	1,9103	81,34
14	1,00E+14	1,8895	77,53
15	1,00E+15	1,8748	74,95
16	1,00E+16	1,8645	73,19
17	1,00E+17	1,8573	71,99
18	1,00E+18	1,8523	71,16
19	1,00E+19	1,8488	70,59
20	1,00E+20	1,8463	70,2

Curva maestra MAC Patrón 30 °C España

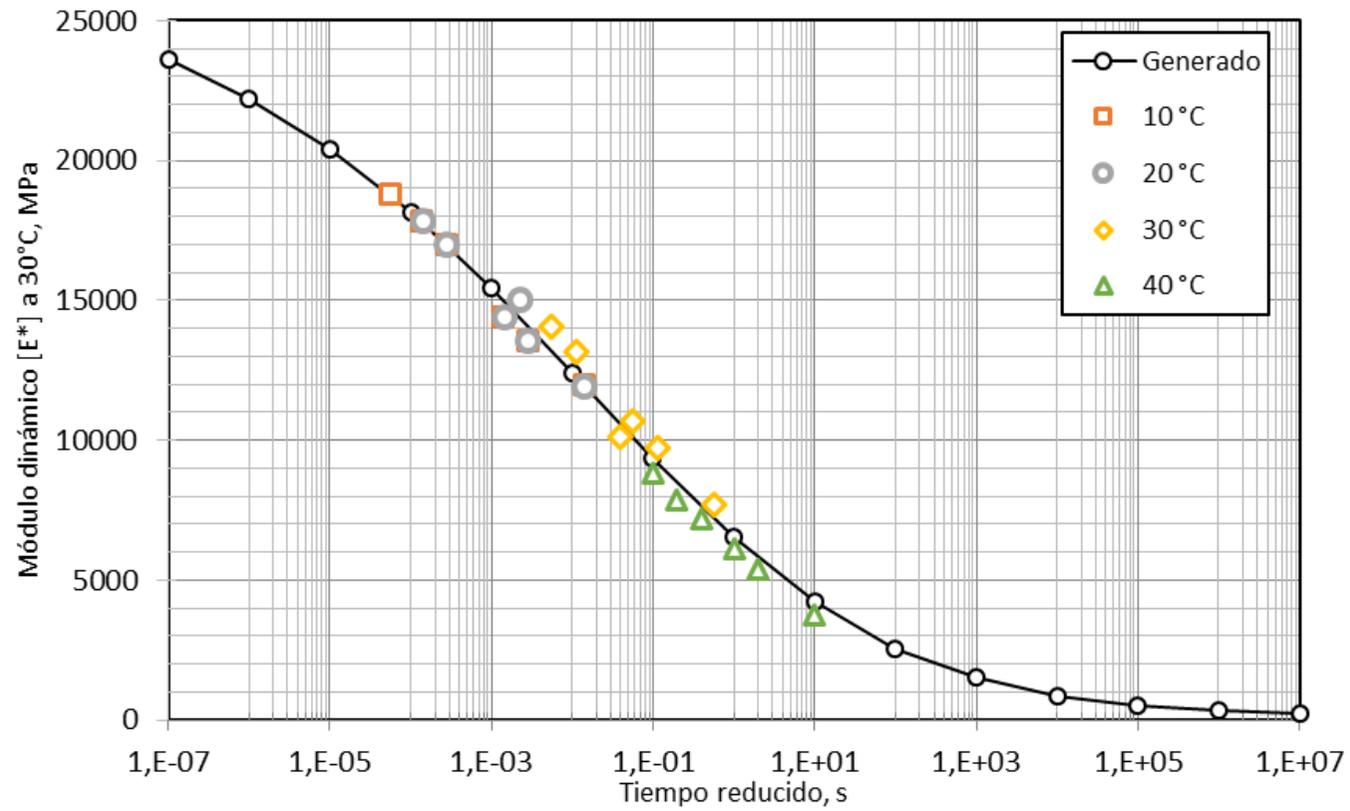


Figura 73. Curva maestra MAC Patrón 30°C (España)

Tabla 53. Módulo dinámico calculado MAC Patrón 40°C

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1,00E-20	4,4502	28198,25
-19	1,00E-19	4,4499	28175,4
-18	1,00E-18	4,4494	28142,37
-17	1,00E-17	4,4486	28094,65
-16	1,00E-16	4,4476	28025,78
-15	1,00E-15	4,446	27926,51
-14	1,00E-14	4,4438	27783,68
-13	1,00E-13	4,4406	27578,71
-12	1,00E-12	4,4359	27285,71
-11	1,00E-11	4,4293	26869,15
-10	1,00E-10	4,4197	26281,6
-9	1E-09	4,4059	25462,14
-8	0,00000001	4,3863	24337,42
-7	0,0000001	4,3585	22828,1
-6	0,000001	4,3194	20865,18
-5	0,00001	4,2653	18419,53
-4	0,0001	4,1915	15542,13
-3	0,001	4,0934	12398,71
-2	0,01	3,9669	9266,03
-1	0,1	3,8104	6461,87
0	1	3,6261	4227,44
1	10	3,4215	2639,26
2	100	3,2086	1616,59
3	1000	3,0015	1003,54
4	10000	2,8129	650
5	100000	2,6511	447,82
6	1000000	2,5193	330,57
7	10000000	2,4163	260,8
8	100000000	2,3385	218,03
9	1000000000	2,2812	191,07
10	1E+10	2,2398	173,68
11	1,00E+11	2,2102	162,25
12	1,00E+12	2,1893	154,63
13	1,00E+13	2,1746	149,49
14	1,00E+14	2,1644	146,01
15	1,00E+15	2,1572	143,63
16	1,00E+16	2,1523	142
17	1,00E+17	2,1489	140,88
18	1,00E+18	2,1465	140,11
19	1,00E+19	2,1448	139,58
20	1,00E+20	2,1437	139,22

Curva maestra MAC Patrón 40 °C España

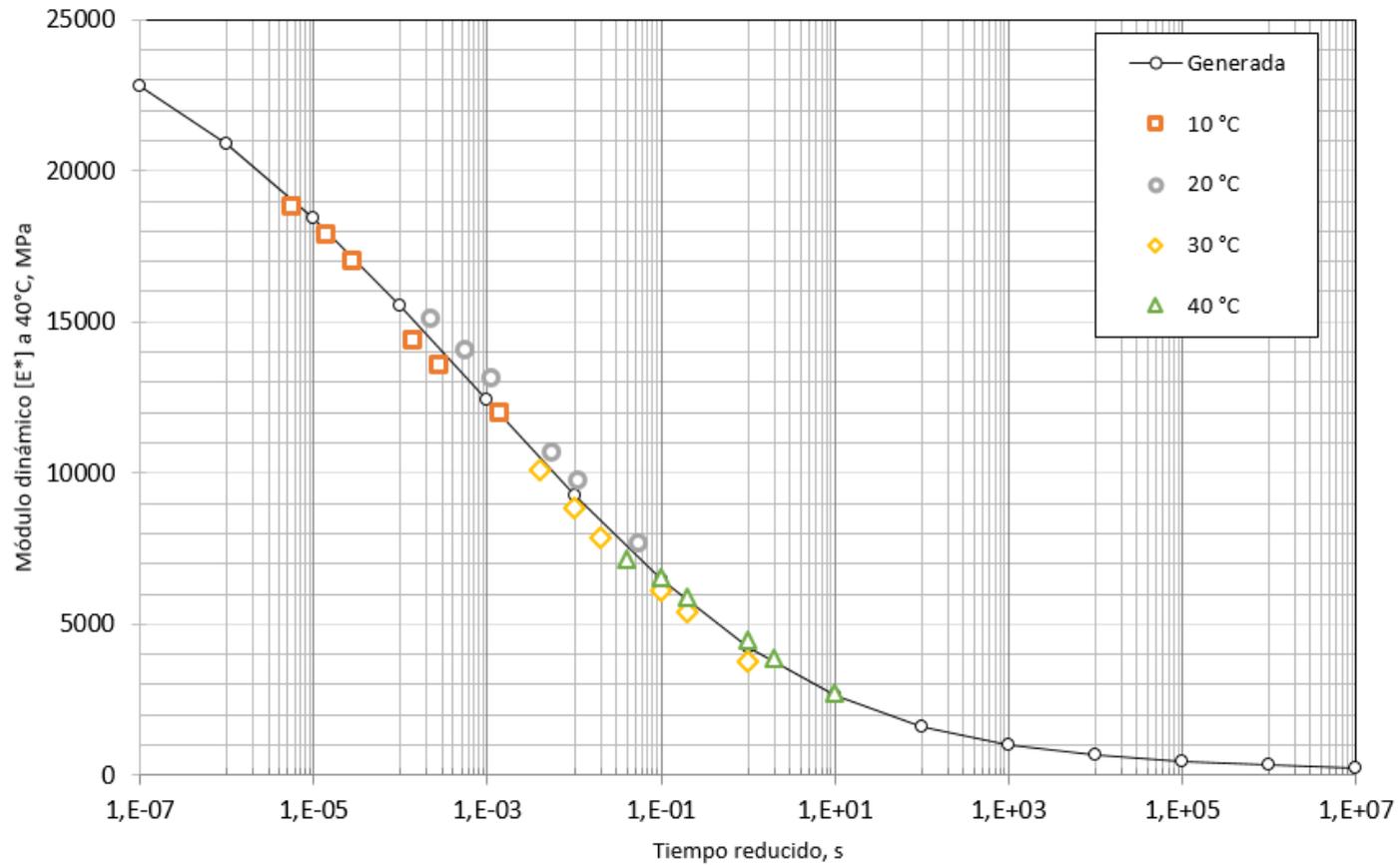


Figura 74. Curva maestra MAC Patrón 40°C (España)

6.5.2 Curvas maestras de MAC 30% cerámica (España)

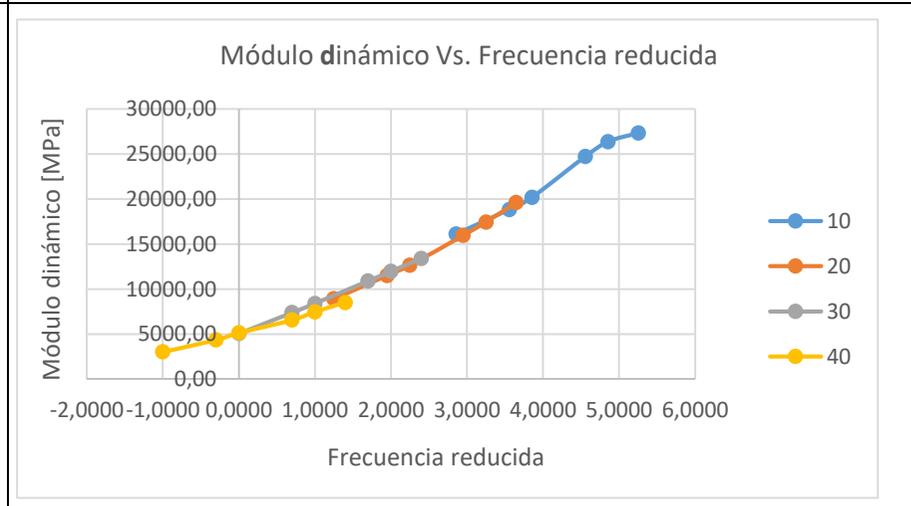
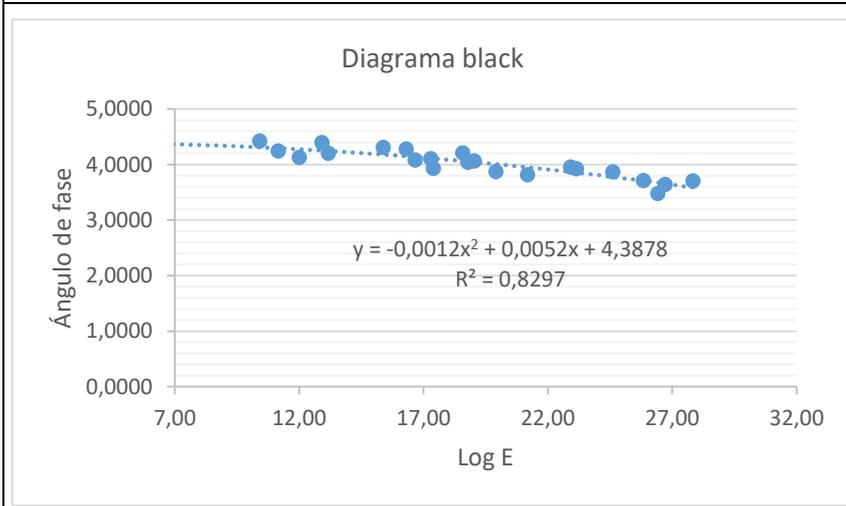
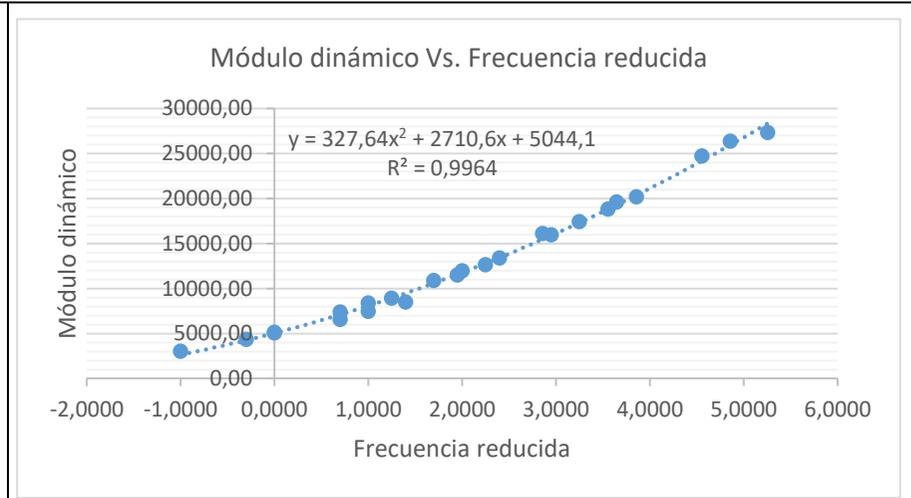
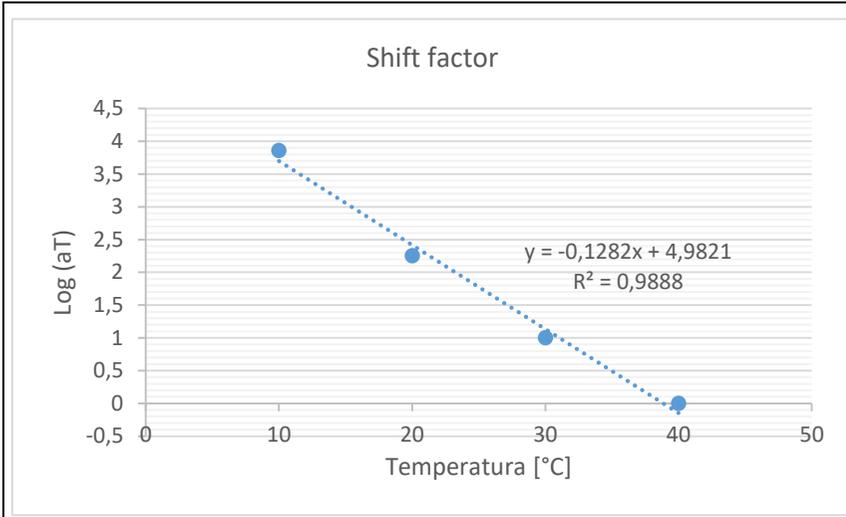
Para las curvas maestras de MAC 30% cerámica se han continuado los mismos pasos descritos en la MAC Patrón.

Tabla 54. Datos del ensayo de módulo dinámico MAC 30% cerámica (España)

Frecuencia [Hz]	Temperatura [°C]	Módulo dinámico [MPa]	Ángulo de fase [°deg]
25,0	10	27324,0594	5,571616077
25,0	20	19612,4906	5,594386101
25,0	30	13388,1219	12,00685167
25,0	40	8494,72083	17,3920723
10,0	10	26373,1087	10,41769981
10,0	20	17439,3119	11,15673428
10,0	30	11948,3137	16,66499729
10,0	40	7458,02527	19,91051388
5,0	10	24720,9627	12,91862698
5,0	20	15947,904	13,17178402
5,0	30	10880,268	18,78052521
5,0	40	6546,89933	21,17838058
1,0	10	20191,2977	15,381674
1,0	20	12639,3507	17,29486504
1,0	30	8391,55227	23,1399128
1,0	40	5120,53762	25,83575592
0,5	10	18831,8386	16,30865669
0,5	20	11497,9563	19,04397125
0,5	30	7369,9794	24,61496353
0,5	40	4342,81287	26,71065636
0,1	10	16107,6728	18,5742794
0,1	20	8900,78014	22,91067123
0,1	30	5048,20027	27,83712006
0,1	40	3013,33772	26,42230263

Tabla 55. Coeficientes para construcción de la curva maestra con diferentes temperaturas de referencia

MAC 30% cerámica (España)						
Temperatura	Shift Factor			Coeficientes		
10°C	T	Log (aT)	aT	C1	15	
	10	0	1	C2	90	
	20	-1,5	0,03162278	α	1,43496788	
	30	-2,72727273	0,00187382	β	-1,75920784	
	40	-3,75	0,00017783	γ	0,55854011	
				δ	3,08999877	
20°C	T	Log (aT)	aT	C1	12	
	10	1,6	39,8107171	C2	85	
	20	0	1	α	2,30899931	
	30	-1,26315789	0,05455595	β	-1,16199512	
	40	-2,28571429	0,00517947	γ	0,36170004	
				δ	2,35114736	
30°C	T	Log (aT)	aT	C1	10	
	10	2,85714286	719,685673	C2	90	
	20	1,25	17,7827941	α	2,78744083	
	30	0	1	β	-0,93031831	
	40	-1	0,1	γ	0,3283091	
				δ	1,8992751	
40°C	T	Log (aT)	aT	C1	9	
	10	3,85714286	7196,85673	C2	100	
	20	2,25	177,827941	α	1,89533132	
	30	1	10	β	-0,09509354	
	40	0	1	γ	0,42746834	
				δ	2,7037105	



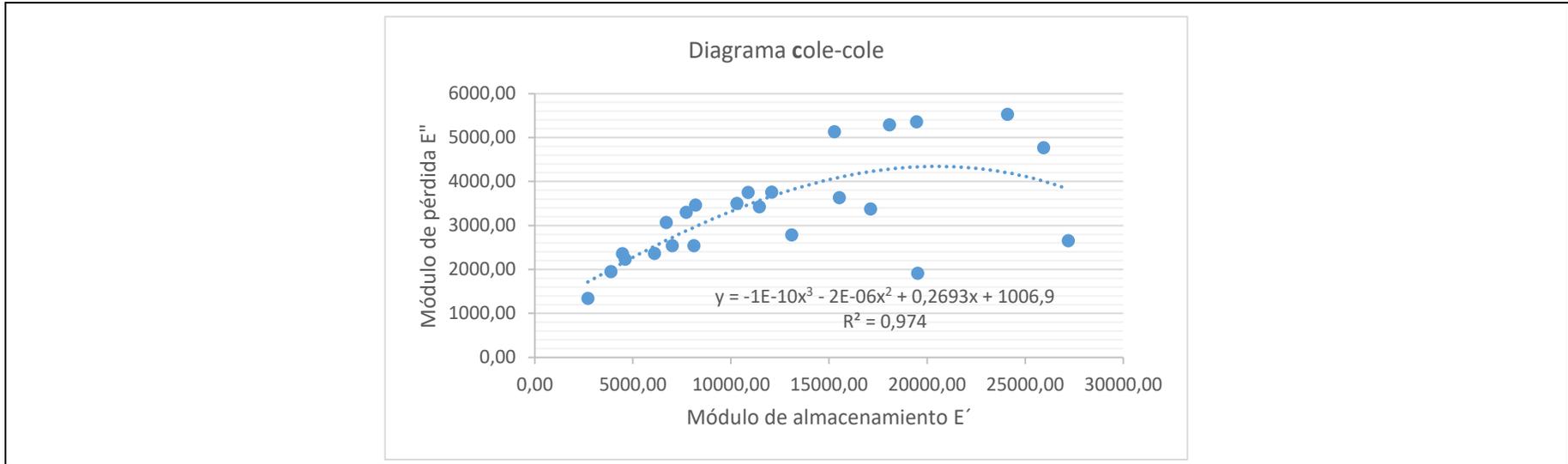


Figura 75. Gráficas de comprobación de la construcción de las curvas maestras MAC 30% cerámica (España)

Tabla 56. Módulos calculados MAC 30% cerámica 10°C (España)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	Módulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	Módulo de almacenamiento (E')	Módulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,04000	-1,39794	27324,06	5,57	1,3979	4,4365	27194,97	2652,89	4,4201	0,0003	26306,93
10	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	26373,11	10,42	1,0000	4,4212	25938,37	4768,86	4,3963	0,0006	24905,89
10	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	24720,96	12,92	0,6990	4,3931	24095,24	5526,79	4,3752	0,0003	23724,79
10	1,0	1,00	1,0000	0,0000	20191,30	15,38	0,0000	4,3052	19468,05	5355,70	4,3142	0,0001	20615,07
10	0,5	2,00	2,0000	0,3010	18831,84	16,31	-0,3010	4,2749	18074,10	5288,20	4,2821	0,0001	19147,95
10	0,1	10,00	10,0000	1,0000	16107,67	18,57	-1,0000	4,2070	15268,65	5130,84	4,1930	0,0002	15594,72
20	25,0	0,04	1,2649	0,1021	19612,49	5,59	-0,1021	4,2925	19519,08	1911,93	4,3037	0,0001	20124,57
20	10,0	0,10	3,1623	0,5000	17439,31	11,16	-0,5000	4,2415	17109,74	3374,39	4,2589	0,0003	18149,75
20	5,0	0,20	6,3246	0,8010	15947,90	13,17	-0,8010	4,2027	15528,33	3634,07	4,2205	0,0003	16614,49
20	1,0	1,00	31,6228	1,5000	12639,35	17,29	-1,5000	4,1017	12067,89	3757,54	4,1165	0,0002	13075,84
20	0,5	2,00	63,2456	1,8010	11497,96	19,04	-1,8010	4,0606	10868,66	3751,71	4,0656	0,0000	11631,00
20	0,1	10,00	316,2278	2,5000	8900,78	22,91	-2,5000	3,9494	8198,62	3465,03	3,9362	0,0002	8634,66
30	25,0	0,04	21,3468	1,3293	13388,12	12,01	-1,3293	4,1267	13095,23	2785,11	4,1437	0,0003	13923,36
30	10,0	0,10	53,3670	1,7273	11948,31	16,66	-1,7273	4,0773	11446,46	3426,48	4,0784	0,0000	11978,07
30	5,0	0,20	106,7340	2,0283	10880,27	18,78	-2,0283	4,0366	10300,99	3502,84	4,0251	0,0001	10595,02
30	1,0	1,00	533,6699	2,7273	8391,55	23,14	-2,7273	3,9238	7716,43	3297,69	3,8917	0,0010	7793,37
30	0,5	2,00	1067,3398	3,0283	7369,98	24,61	-3,0283	3,8675	6700,25	3069,73	3,8318	0,0013	6788,73
30	0,1	10,00	5336,6992	3,7273	5048,20	27,84	-3,7273	3,7031	4464,02	2357,31	3,6927	0,0001	4928,76
40	25,0	0,04	224,9365	2,3521	8494,72	17,39	-2,3521	3,9291	8106,36	2539,15	3,9647	0,0013	9219,48
40	10,0	0,10	562,3413	2,7500	7458,03	19,91	-2,7500	3,8726	7012,23	2539,85	3,8872	0,0002	7713,14
40	5,0	0,20	1124,6827	3,0510	6546,90	21,18	-3,0510	3,8160	6104,72	2365,22	3,8272	0,0001	6717,99
40	1,0	1,00	5623,4133	3,7500	5120,54	25,84	-3,7500	3,7093	4608,72	2231,49	3,6883	0,0004	4878,71
40	0,5	2,00	11246,8265	4,0510	4342,81	26,71	-4,0510	3,6378	3879,38	1952,03	3,6306	0,0001	4271,62
40	0,1	10,00	56234,1325	4,7500	3013,34	26,42	-4,7500	3,4790	2698,56	1340,89	3,5066	0,0008	3210,63

Tabla 57. Módulos calculados MAC 30% cerámica 20°C (España)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	Módulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	Módulo de almacenamiento (E')	Módulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,00100	-2,99794	27324,06	5,57	2,9979	4,4365	27194,97	2652,89	4,4393	0,0000	27495,20
10	10,0	0,10	0,0025	-2,6000	26373,11	10,42	2,6000	4,4212	25938,37	4768,86	4,4088	0,0002	25632,07
10	5,0	0,20	0,0050	-2,2990	24720,96	12,92	2,2990	4,3931	24095,24	5526,79	4,3833	0,0001	24173,27
10	1,0	1,00	0,0251	-1,6000	20191,30	15,38	1,6000	4,3052	19468,05	5355,70	4,3156	0,0001	20682,02
10	0,5	2,00	0,0502	-1,2990	18831,84	16,31	1,2990	4,2749	18074,10	5288,20	4,2824	0,0001	19162,04
10	0,1	10,00	0,2512	-0,6000	16107,67	18,57	0,6000	4,2070	15268,65	5130,84	4,1957	0,0001	15691,04
20	25,0	0,04	0,0400	-1,3979	19612,49	5,59	1,3979	4,2925	19519,08	1911,93	4,2936	0,0000	19661,43
20	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	17439,31	11,16	1,0000	4,2415	17109,74	3374,39	4,2470	0,0000	17661,40
20	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	15947,90	13,17	0,6990	4,2027	15528,33	3634,07	4,2088	0,0000	16173,07
20	1,0	1,00	1,0000	0,0000	12639,35	17,29	0,0000	4,1017	12067,89	3757,54	4,1099	0,0001	12879,55
20	0,5	2,00	2,0000	0,3010	11497,96	19,04	-0,3010	4,0606	10868,66	3751,71	4,0630	0,0000	11560,46
20	0,1	10,00	10,0000	1,0000	8900,78	22,91	-1,0000	3,9494	8198,62	3465,03	3,9444	0,0000	8799,21
30	25,0	0,04	0,7332	-0,1348	13388,12	12,01	0,1348	4,1267	13095,23	2785,11	4,1301	0,0000	13491,86
30	10,0	0,10	1,8330	0,2632	11948,31	16,66	-0,2632	4,0773	11446,46	3426,48	4,0690	0,0001	11722,48
30	5,0	0,20	3,6660	0,5642	10880,27	18,78	-0,5642	4,0366	10300,99	3502,84	4,0199	0,0003	10468,32
30	1,0	1,00	18,3298	1,2632	8391,55	23,14	-1,2632	3,9238	7716,43	3297,69	3,8966	0,0007	7881,46
30	0,5	2,00	36,6596	1,5642	7369,98	24,61	-1,5642	3,8675	6700,25	3069,73	3,8400	0,0008	6917,89
30	0,1	10,00	183,2981	2,2632	5048,20	27,84	-2,2632	3,7031	4464,02	2357,31	3,7020	0,0000	5034,49
40	25,0	0,04	7,7228	0,8878	8494,72	17,39	-0,8878	3,9291	8106,36	2539,15	3,9643	0,0012	9211,59
40	10,0	0,10	19,3070	1,2857	7458,03	19,91	-1,2857	3,8726	7012,23	2539,85	3,8924	0,0004	7806,05
40	5,0	0,20	38,6140	1,5867	6546,90	21,18	-1,5867	3,8160	6104,72	2365,22	3,8357	0,0004	6849,42
40	1,0	1,00	193,0698	2,2857	5120,54	25,84	-2,2857	3,7093	4608,72	2231,49	3,6974	0,0001	4981,71
40	0,5	2,00	386,1395	2,5867	4342,81	26,71	-2,5867	3,6378	3879,38	1952,03	3,6358	0,0000	4322,79
40	0,1	10,00	1930,6977	3,2857	3013,34	26,42	-3,2857	3,4790	2698,56	1340,89	3,4904	0,0001	3093,01

Tabla 58. Módulos calculados MAC 30% cerámica 30°C (España)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	Módulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	Módulo de almacenamiento (E')	Módulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,00006	-4,25508	27324,06	5,57	4,2551	4,4365	27195,05	2652,12	4,4389	0,0000	27475,69
10	10,0	0,10	0,0001	-3,8571	26373,11	10,42	3,8571	4,4212	25938,18	4769,91	4,4078	0,0002	25575,76
10	5,0	0,20	0,0003	-3,5561	24720,96	12,92	3,5561	4,3931	24095,10	5527,37	4,3820	0,0001	24100,42
10	1,0	1,00	0,0014	-2,8571	20191,30	15,38	2,8571	4,3052	19468,21	5355,13	4,3139	0,0001	20603,54
10	0,5	2,00	0,0028	-2,5561	18831,84	16,31	2,5561	4,2749	18073,98	5288,63	4,2809	0,0000	19092,23
10	0,1	10,00	0,0139	-1,8571	16107,67	18,57	1,8571	4,2070	15269,03	5129,70	4,1946	0,0002	15654,84
20	25,0	0,04	0,0022	-2,6479	19612,49	5,59	2,6479	4,2925	19519,22	1910,44	4,2912	0,0000	19552,37
20	10,0	0,10	0,0056	-2,2500	17439,31	11,16	2,2500	4,2415	17109,54	3375,37	4,2448	0,0000	17569,17
20	5,0	0,20	0,0112	-1,9490	15947,90	13,17	1,9490	4,2027	15528,44	3633,59	4,2067	0,0000	16097,02
20	1,0	1,00	0,0562	-1,2500	12639,35	17,29	1,2500	4,1017	12068,21	3756,52	4,1086	0,0000	12841,53
20	0,5	2,00	0,1125	-0,9490	11497,96	19,04	0,9490	4,0606	10868,92	3750,96	4,0620	0,0000	11535,13
20	0,1	10,00	0,5623	-0,2500	8900,78	22,91	0,2500	3,9494	8198,66	3464,94	3,9438	0,0000	8786,81
30	25,0	0,04	0,0400	-1,3979	13388,12	12,01	1,3979	4,1267	13095,07	2785,83	4,1306	0,0000	13506,90
30	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	11948,31	16,66	1,0000	4,0773	11446,75	3425,48	4,0701	0,0001	11751,83
30	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	10880,27	18,78	0,6990	4,0366	10301,02	3502,74	4,0213	0,0002	10503,69
30	1,0	1,00	1,0000	0,0000	8391,55	23,14	0,0000	3,9238	7716,43	3297,70	3,8983	0,0007	7911,52
30	0,5	2,00	2,0000	0,3010	7369,98	24,61	-0,3010	3,8675	6700,52	3069,15	3,8412	0,0007	6937,45
30	0,1	10,00	10,0000	1,0000	5048,20	27,84	-1,0000	3,7031	4463,90	2357,53	3,7003	0,0000	5015,16
40	25,0	0,04	0,4000	-0,3979	8494,72	17,39	0,3979	3,9291	8106,45	2538,85	3,9700	0,0017	9332,44
40	10,0	0,10	1,0000	0,0000	7458,03	19,91	0,0000	3,8726	7012,25	2539,78	3,8983	0,0007	7911,52
40	5,0	0,20	2,0000	0,3010	6546,90	21,18	-0,3010	3,8160	6104,66	2365,39	3,8412	0,0006	6937,45
40	1,0	1,00	10,0000	1,0000	5120,54	25,84	-1,0000	3,7093	4608,56	2231,84	3,7003	0,0001	5015,16
40	0,5	2,00	20,0000	1,3010	4342,81	26,71	-1,3010	3,6378	3879,40	1951,98	3,6364	0,0000	4329,37
40	0,1	10,00	100,0000	2,0000	3013,34	26,42	-2,0000	3,4790	2698,62	1340,78	3,4825	0,0000	3037,70

Tabla 59. Módulos calculados MAC 30% cerámica 40°C (España)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	Módulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	Módulo de almacenamiento (E')	Módulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,00001	-5,25508	27324,06	5,57	5,2551	4,4365	27194,97	2652,89	4,4327	0,0000	27085,35
10	10,0	0,10	0,0000	-4,8571	26373,11	10,42	4,8571	4,4212	25938,37	4768,86	4,4051	0,0003	25412,79
10	5,0	0,20	0,0000	-4,5561	24720,96	12,92	4,5561	4,3931	24095,24	5526,79	4,3815	0,0001	24069,68
10	1,0	1,00	0,0001	-3,8571	20191,30	15,38	3,8571	4,3052	19468,05	5355,70	4,3170	0,0001	20748,27
10	0,5	2,00	0,0003	-3,5561	18831,84	16,31	3,5561	4,2749	18074,10	5288,20	4,2847	0,0001	19260,71
10	0,1	10,00	0,0014	-2,8571	16107,67	18,57	2,8571	4,2070	15268,65	5130,84	4,1983	0,0001	15788,65
20	25,0	0,04	0,0002	-3,6479	19612,49	5,59	3,6479	4,2925	19519,08	1911,93	4,2948	0,0000	19716,55
20	10,0	0,10	0,0006	-3,2500	17439,31	11,16	3,2500	4,2415	17109,74	3374,39	4,2488	0,0001	17735,50
20	5,0	0,20	0,0011	-2,9490	15947,90	13,17	2,9490	4,2027	15528,33	3634,07	4,2106	0,0001	16240,82
20	1,0	1,00	0,0056	-2,2500	12639,35	17,29	2,2500	4,1017	12067,89	3757,54	4,1102	0,0001	12889,34
20	0,5	2,00	0,0112	-1,9490	11497,96	19,04	1,9490	4,0606	10868,66	3751,71	4,0621	0,0000	11537,71
20	0,1	10,00	0,0562	-1,2500	8900,78	22,91	1,2500	3,9494	8198,62	3465,03	3,9401	0,0001	8712,62
30	25,0	0,04	0,0040	-2,3979	13388,12	12,01	2,3979	4,1267	13095,23	2785,11	4,1328	0,0000	13577,41
30	10,0	0,10	0,0100	-2,0000	11948,31	16,66	2,0000	4,0773	11446,46	3426,48	4,0705	0,0000	11761,81
30	5,0	0,20	0,0200	-1,6990	10880,27	18,78	1,6990	4,0366	10300,99	3502,84	4,0201	0,0003	10472,76
30	1,0	1,00	0,1000	-1,0000	8391,55	23,14	1,0000	3,9238	7716,43	3297,69	3,8935	0,0009	7825,25
30	0,5	2,00	0,2000	-0,6990	7369,98	24,61	0,6990	3,8675	6700,25	3069,73	3,8356	0,0010	6849,11
30	0,1	10,00	1,0000	0,0000	5048,20	27,84	0,0000	3,7031	4464,02	2357,31	3,6964	0,0000	4970,51
40	25,0	0,04	0,0400	-1,3979	8494,72	17,39	1,3979	3,9291	8106,36	2539,15	3,9671	0,0014	9269,65
40	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	7458,03	19,91	1,0000	3,8726	7012,23	2539,85	3,8935	0,0004	7825,25
40	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	6546,90	21,18	0,6990	3,8160	6104,72	2365,22	3,8356	0,0004	6849,11
40	1,0	1,00	1,0000	0,0000	5120,54	25,84	0,0000	3,7093	4608,72	2231,49	3,6964	0,0002	4970,51
40	0,5	2,00	2,0000	0,3010	4342,81	26,71	-0,3010	3,6378	3879,38	1952,03	3,6355	0,0000	4319,79
40	0,1	10,00	10,0000	1,0000	3013,34	26,42	-1,0000	3,4790	2698,56	1340,89	3,4953	0,0003	3128,38

Tabla 60. Módulo dinámico calculado MAC 30% cerámica 10°C (España)

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1,00E-20	4,525	33493,7
-19	1,00E-19	4,525	33493,5
-18	1,00E-18	4,525	33493,15
-17	1,00E-17	4,5249	33492,54
-16	1,00E-16	4,5249	33491,47
-15	1,00E-15	4,5249	33489,59
-14	1,00E-14	4,5249	33486,32
-13	1,00E-13	4,5248	33480,59
-12	1,00E-12	4,5247	33470,59
-11	1,00E-11	4,5244	33453,11
-10	1,00E-10	4,524	33422,59
-9	1E-09	4,5233	33369,36
-8	0,00000001	4,5221	33276,61
-7	0,0000001	4,52	33115,48
-6	0,000001	4,5164	32836,8
-5	0,00001	4,51	32358,61
-4	0,0001	4,499	31549,2
-3	0,001	4,4802	30210,67
-2	0,01	4,4484	28082
-1	0,1	4,3963	24905,89
0	1	4,3142	20615,07
1	10	4,193	15594,72
2	100	4,0302	10721,09
3	1000	3,8375	6877,83
4	10000	3,6402	4367,47
5	100000	3,4665	2927,83
6	1000000	3,3326	2151,04
7	10000000	3,2396	1736,34
8	100000000	3,1796	1512,15
9	1000000000	3,1427	1388,86
10	1E+10	3,1206	1320,09
11	1,00E+11	3,1077	1281,35
12	1,00E+12	3,1002	1259,39
13	1,00E+13	3,0958	1246,89
14	1,00E+14	3,0933	1239,77
15	1,00E+15	3,0919	1235,7
16	1,00E+16	3,0911	1233,37
17	1,00E+17	3,0906	1232,04
18	1,00E+18	3,0904	1231,28
19	1,00E+19	3,0902	1230,85
20	1,00E+20	3,0901	1230,6

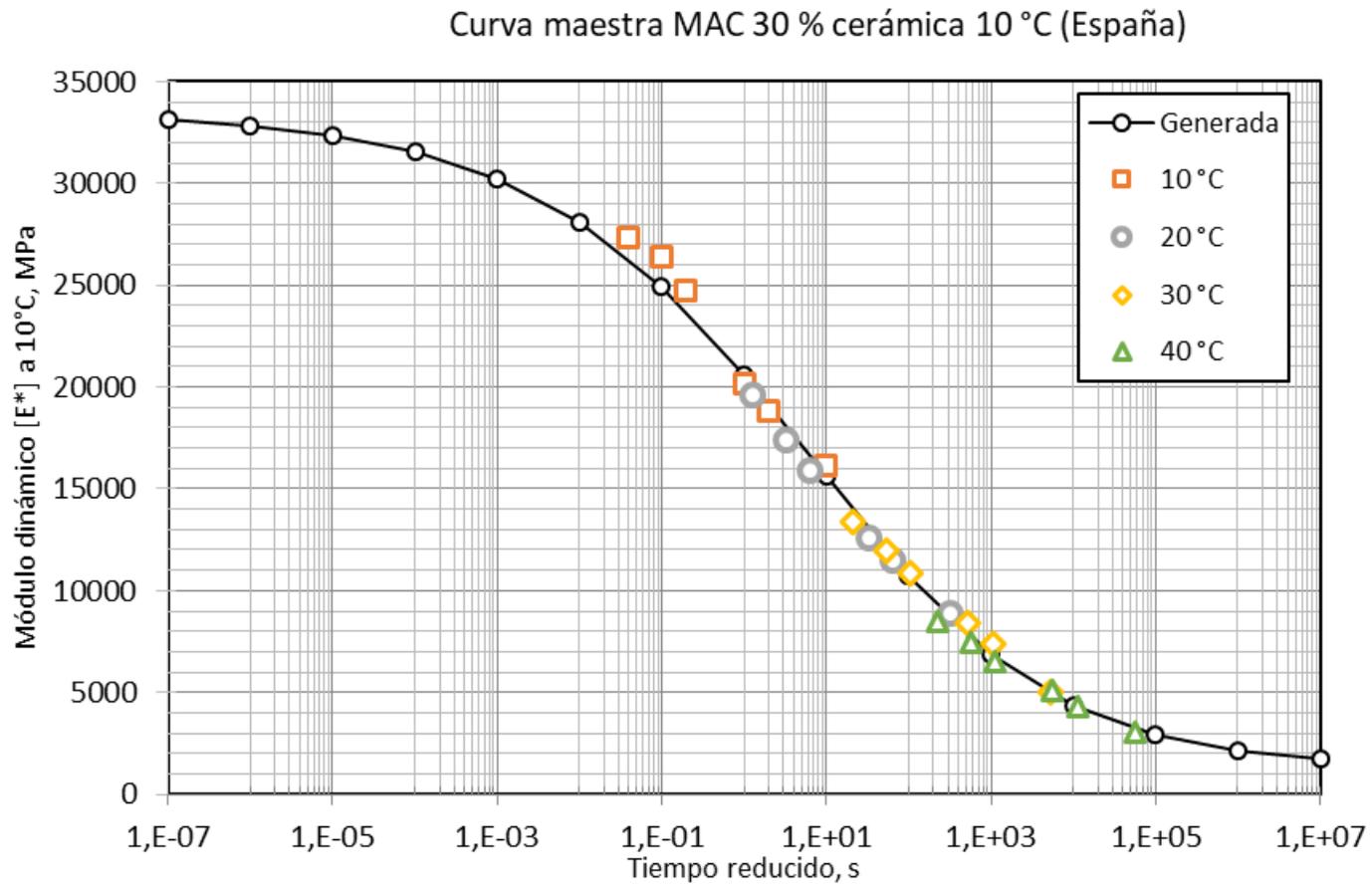


Figura 76. Curva maestra MAC 30% cerámica 10°C (España)

Tabla 61. Módulo dinámico calculado MAC 30% cerámica 20°C (España)

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1,00E-20	4,6596	45669,42
-19	1,00E-19	4,6594	45645,55
-18	1,00E-18	4,6591	45611,31
-17	1,00E-17	4,6586	45562,21
-16	1,00E-16	4,6579	45491,84
-15	1,00E-15	4,657	45391,07
-14	1,00E-14	4,6556	45246,92
-13	1,00E-13	4,6536	45041,06
-12	1,00E-12	4,6508	44747,74
-11	1,00E-11	4,6467	44331,18
-10	1,00E-10	4,6409	43742,4
-9	1E-09	4,6326	42915,74
-8	0,00000001	4,6208	41766,12
-7	0,0000001	4,6041	40188,75
-6	0,000001	4,5805	38064,95
-5	0,00001	4,5475	35279,4
-4	0,0001	4,5018	31754,71
-3	0,001	4,4394	27504,62
-2	0,01	4,3559	22692,84
-1	0,1	4,247	17661,4
0	1	4,1099	12879,55
1	10	3,9444	8799,21
2	100	3,7548	5686,49
3	1000	3,55	3548,24
4	10000	3,3423	2199,61
5	100000	3,1449	1396,14
6	1000000	2,9684	929,85
7	10000000	2,819	659,22
8	100000000	2,6984	499,32
9	1000000000	2,6046	402,31
10	1E+10	2,5337	341,76
11	1,00E+11	2,4814	303
12	1,00E+12	2,4435	277,64
13	1,00E+13	2,4162	260,76
14	1,00E+14	2,3969	249,39
15	1,00E+15	2,3832	241,65
16	1,00E+16	2,3736	236,35
17	1,00E+17	2,3668	232,7
18	1,00E+18	2,3621	230,18
19	1,00E+19	2,3588	228,44
20	1,00E+20	2,3565	227,23

Curva maestra MAC 30 % cerámica 20 °C (España)

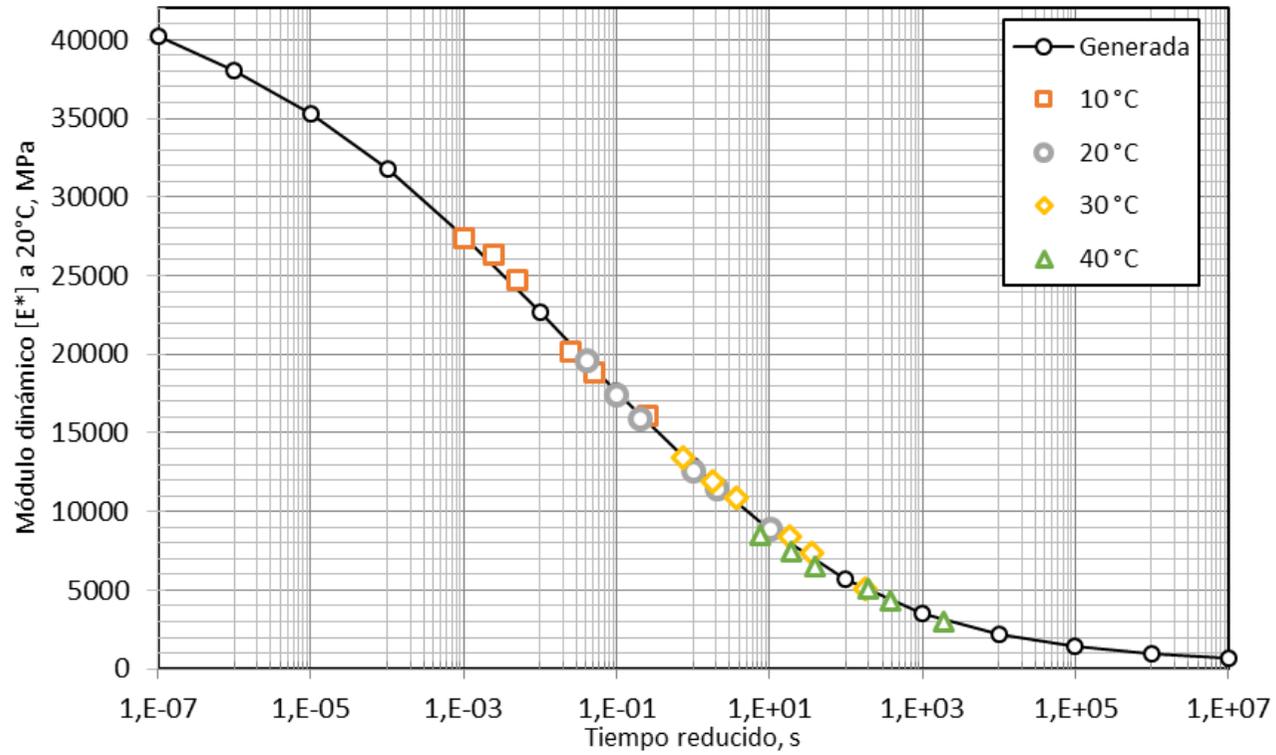


Figura 77. Curva maestra MAC 30% cerámica 20°C (España)

Tabla 62. Módulo dinámico calculado MAC 30% cerámica 30°C (España)

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1,00E-20	4,6852	48436,16
-19	1,00E-19	4,6846	48369,24
-18	1,00E-18	4,6837	48276,51
-17	1,00E-17	4,6826	48148,14
-16	1,00E-16	4,681	47970,63
-15	1,00E-15	4,6788	47725,54
-14	1,00E-14	4,6757	47387,93
-13	1,00E-13	4,6714	46924,31
-12	1,00E-12	4,6655	46290,34
-11	1,00E-11	4,6573	45428,53
-10	1,00E-10	4,6461	44266,45
-9	1E-09	4,6306	42716,81
-8	0,00000001	4,6094	40681,37
-7	0,0000001	4,5805	38062,08
-6	0,000001	4,5414	34782,82
-5	0,00001	4,4889	30823,9
-4	0,0001	4,4194	26265,23
-3	0,001	4,3288	21322,05
-2	0,01	4,2134	16344,28
-1	0,1	4,0701	11751,83
0	1	3,8983	7911,52
1	10	3,7003	5015,16
2	100	3,4825	3037,7
3	1000	3,255	1798,66
4	10000	3,0294	1069,96
5	100000	2,8173	656,53
6	1000000	2,6275	424,1
7	10000000	2,465	291,77
8	100000000	2,3312	214,41
9	1000000000	2,2245	167,67
10	1E+10	2,1414	138,47
11	1,00E+11	2,0779	119,66
12	1,00E+12	2,0303	107,22
13	1,00E+13	1,9949	98,83
14	1,00E+14	1,9688	93,07
15	1,00E+15	1,9497	89,06
16	1,00E+16	1,9358	86,25
17	1,00E+17	1,9257	84,27
18	1,00E+18	1,9183	82,86
19	1,00E+19	1,913	81,85
20	1,00E+20	1,9092	81,13

Curva maestra MAC 30 % cerámica 30 °C (España)

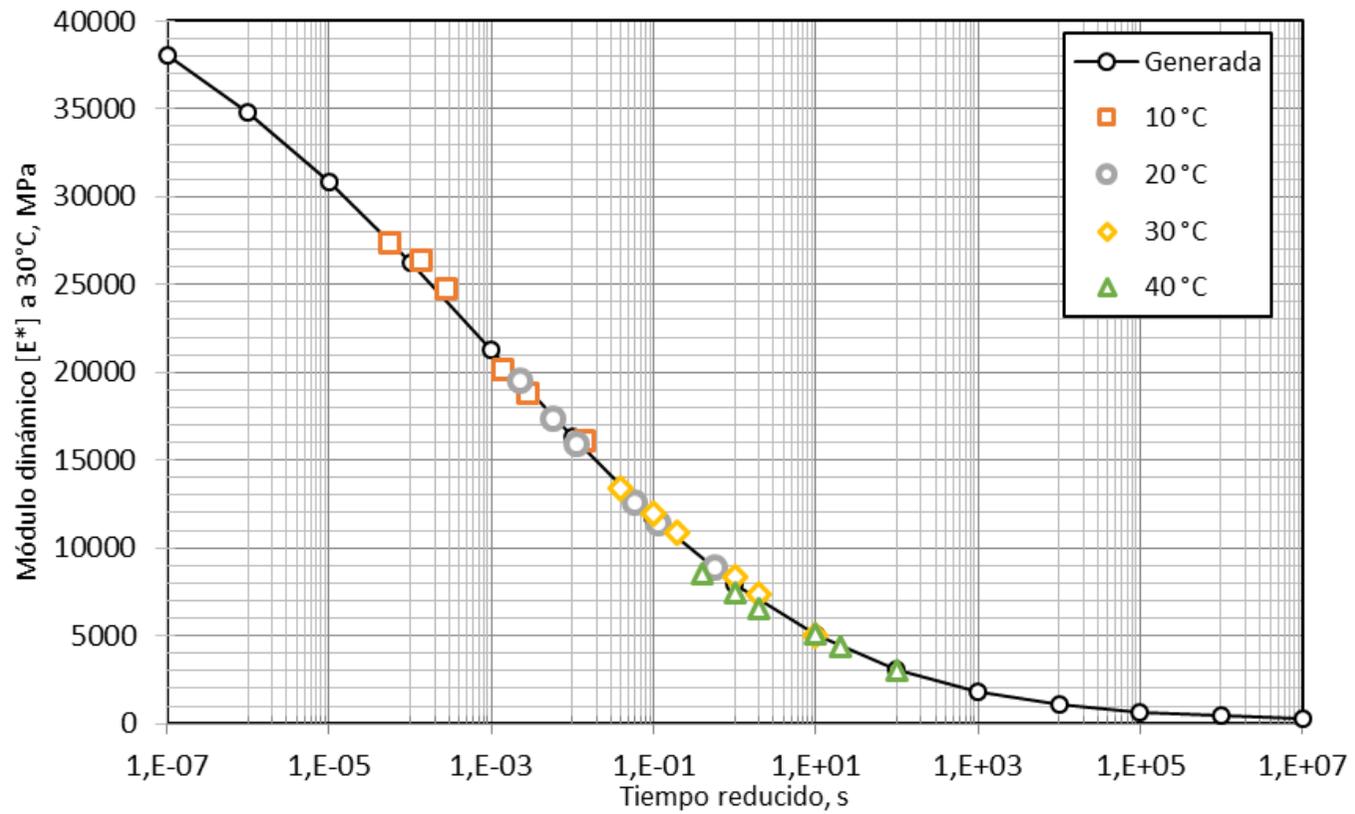


Figura 78. Curva maestra MAC 30% cerámica 30°C (España)

Tabla 63. M3dulo dinámico calculado MAC 30% cerámica 40°C (España)

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	M3dulo dinámico (calculado)
-20	1,00E-20	4,5987	39692,47
-19	1,00E-19	4,5985	39676,21
-18	1,00E-18	4,5983	39651,3
-17	1,00E-17	4,5978	39613,14
-16	1,00E-16	4,5972	39554,73
-15	1,00E-15	4,5962	39465,42
-14	1,00E-14	4,5947	39329,04
-13	1,00E-13	4,5924	39121,25
-12	1,00E-12	4,5889	38805,74
-11	1,00E-11	4,5835	38329,11
-10	1,00E-10	4,5754	37614,72
-9	1E-09	4,563	36556,62
-8	0,00000001	4,5443	35017,1
-7	0,0000001	4,5163	32835,7
-6	0,000001	4,4751	29862,26
-5	0,00001	4,4154	26027,41
-4	0,0001	4,3313	21445,24
-3	0,001	4,2173	16493,06
-2	0,01	4,0705	11761,81
-1	0,1	3,8935	7825,25
0	1	3,6964	4970,51
1	10	3,4953	3128,38
2	100	3,3077	2031,03
3	1000	3,1467	1401,93
4	10000	3,0182	1042,79
5	100000	2,9214	834,39
6	1000000	2,8516	710,5
7	10000000	2,8028	635,07
8	100000000	2,7695	588,23
9	1000000000	2,7472	558,69
10	1E+10	2,7323	539,86
11	1,00E+11	2,7224	527,77
12	1,00E+12	2,716	519,96
13	1,00E+13	2,7117	514,9
14	1,00E+14	2,7089	511,61
15	1,00E+15	2,7071	509,48
16	1,00E+16	2,7059	508,09
17	1,00E+17	2,7052	507,18
18	1,00E+18	2,7047	506,59
19	1,00E+19	2,7043	506,21
20	1,00E+20	2,7041	505,96

Curva maestra MAC 30 % cerámica 40 °C (España)

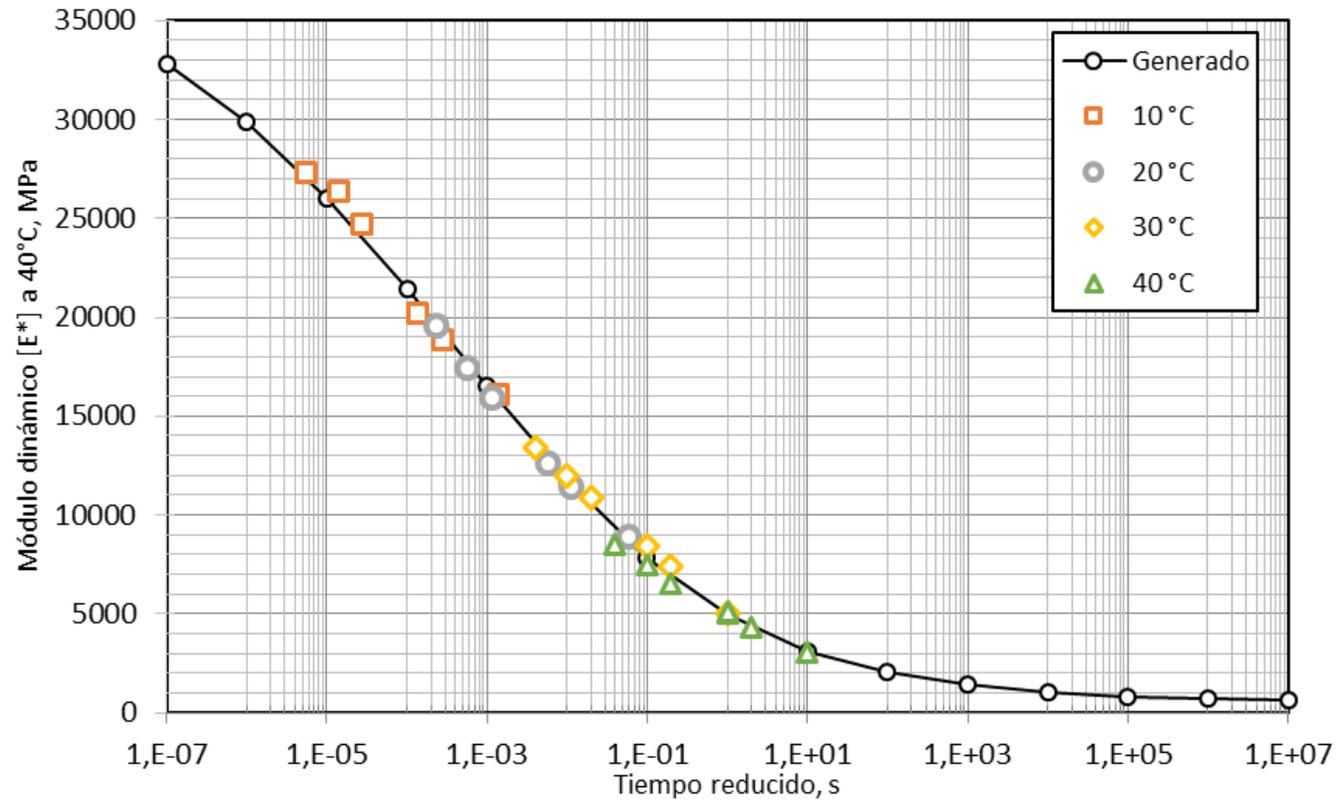


Figura 79. Curva maestra MAC 30% cerámica 40°C (España)

6.5.3 Curvas maestras MAC 35% cerámica (España)

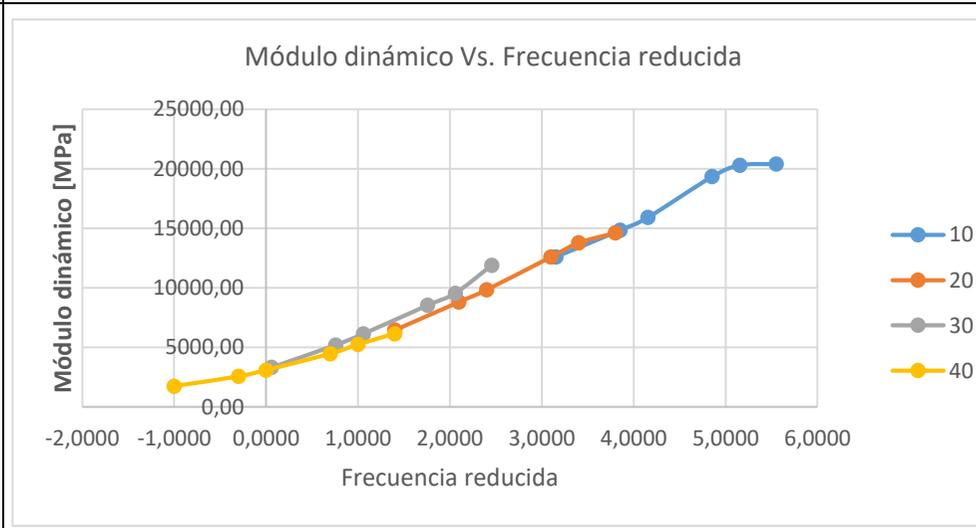
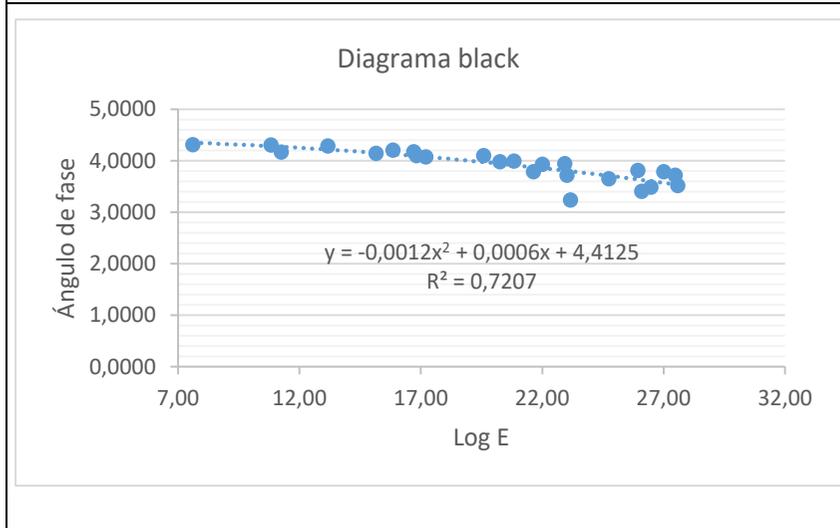
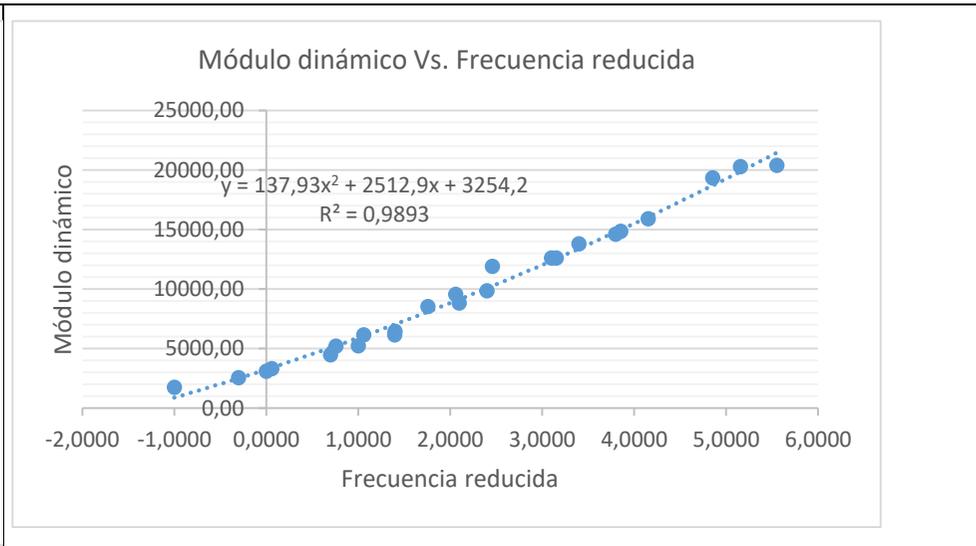
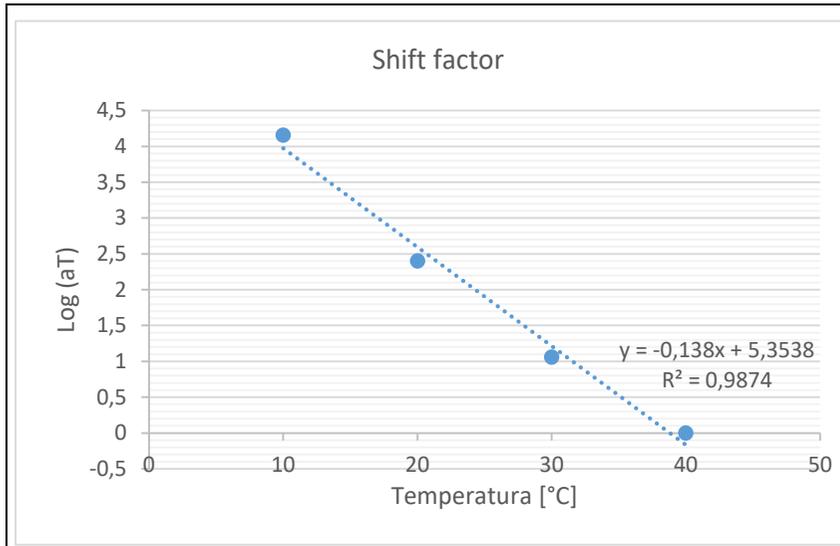
De igual manera con lo descrito anteriormente se procedió con las MAC 35% Cerámica

Tabla 64. Datos de ensayo módulos dinámicos MAC 35% cerámica (España)

Frecuencia [Hz]	Temperatura [°C]	Módulo dinámico [MPa]	Ángulo de fase [°deg]
25,0	10	20390,6923	7,59565897
25,0	20	14612,0865	11,24499073
25,0	30	11886,3735	17,20511246
25,0	40	6133,91657	21,64473152
10,0	10	20288,0449	10,8203743
10,0	20	13779,3008	15,15070343
10,0	30	9534,64341	20,25490646
10,0	40	5230,91393	23,01736212
5,0	10	19329,5088	13,17268829
5,0	20	12593,4984	16,81813965
5,0	30	8520,25402	21,99713097
5,0	40	4454,03173	24,73554955
1,0	10	15900,0545	15,84612389
1,0	20	9833,38086	20,84410248
1,0	30	6132,1386	27,00631676
1,0	40	3082,83144	26,47727509
0,5	10	14832,7103	16,70899086
0,5	20	8810,96333	22,9250042
0,5	30	5194,89615	27,48219528
0,5	40	2551,67502	26,10063515
0,1	10	12599,8696	19,58155556
0,1	20	6444,25274	25,94121513
0,1	30	3308,93575	27,59101753
0,1	40	1735,62917	23,15807419

Tabla 65. Coeficientes para construcción de la curva maestra con diferentes temperaturas de referencia
MAC 35% cerámica (España)

Temperatura	Shift Factor			Coeficientes	
10°C	T	Log (aT)	aT	C1	15
	10	0	1	C2	95
	20	-1,42857143	0,03727594	α	1,36768985
	30	-2,60869565	0,00246209	β	-2,19226084
	40	-3,6	0,00025119	γ	0,75876018
				δ	2,9838039
20°C	T	Log (aT)	aT	C1	12
	10	1,41176471	25,8086154	C2	95
	20	0	1	α	1,64469207
	30	-1,14285714	0,07196857	β	-1,15257662
	40	-2,08695652	0,00818547	γ	0,63481382
				δ	2,74984532
30°C	T	Log (aT)	aT	C1	10
	10	3,07692308	1193,77664	C2	85
	20	1,33333333	21,5443469	α	2,17409121
	30	0	1	β	-0,83178096
	40	-1,05263158	0,08858668	γ	0,48523414
				δ	2,23777793
40°C	T	Log (aT)	aT	C1	9
	10	4,15384615	14251,0267	C2	95
	20	2,4	251,188643	α	2,03414662
	30	1,05882353	11,4504757	β	-0,21767108
	40	0	1	γ	0,50411803
				δ	2,36921298



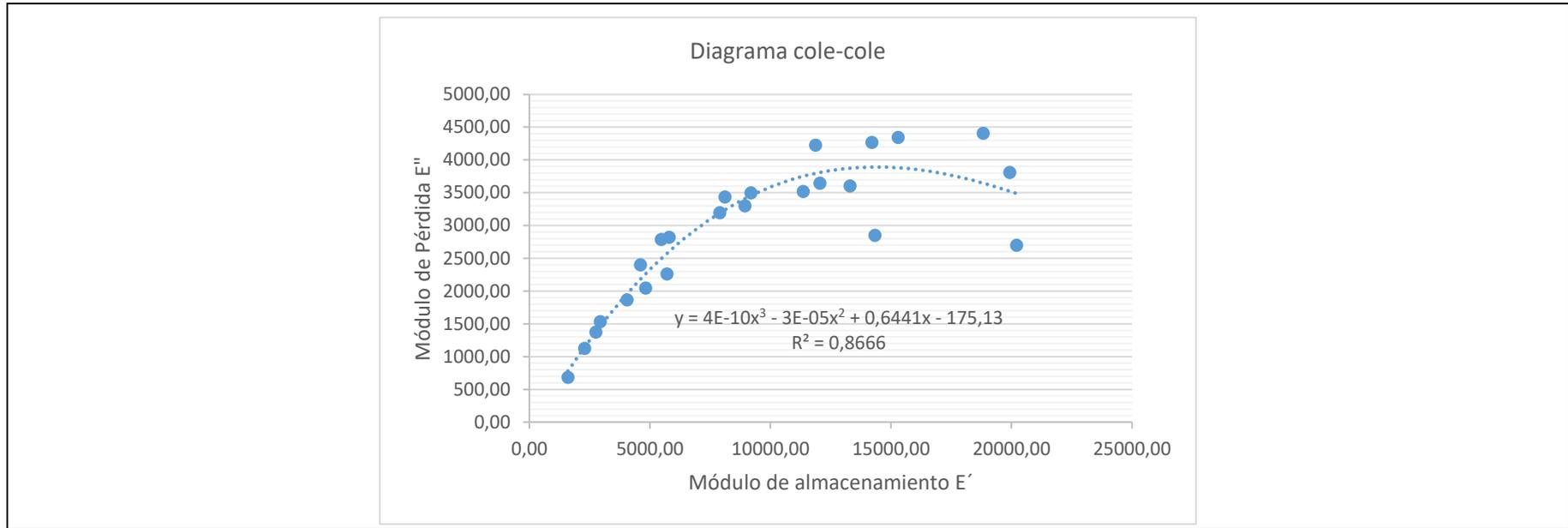


Figura 80. Gráficas de comprobación de la construcción de las curvas maestras MAC 35% cerámica (España)

Tabla 66. Módulos calculados MAC 35% cerámica 10°C (España)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	Módulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	Módulo de almacenamiento (E')	Módulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,04000	-1,39794	20390,69	7,60	1,3979	4,3094	20211,78	2695,27	4,3006	0,0001	19979,63
10	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	20288,04	10,82	1,0000	4,3072	19927,33	3808,69	4,2835	0,0006	19210,36
10	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	19329,51	13,17	0,6990	4,2862	18820,90	4404,94	4,2672	0,0004	18500,04
10	1,0	1,00	1,0000	0,0000	15900,05	15,85	0,0000	4,2014	15295,83	4341,59	4,2141	0,0002	16372,41
10	0,5	2,00	2,0000	0,3010	14832,71	16,71	-0,3010	4,1712	14206,43	4264,56	4,1832	0,0001	15247,49
10	0,1	10,00	10,0000	1,0000	12599,87	19,58	-1,0000	4,1004	11871,16	4222,82	4,0881	0,0001	12250,11
20	25,0	0,04	1,0731	0,0306	14612,09	11,24	-0,0306	4,1647	14331,57	2849,42	4,2112	0,0022	16263,48
20	10,0	0,10	2,6827	0,4286	13779,30	15,15	-0,4286	4,1392	13300,36	3601,34	4,1684	0,0009	14736,26
20	5,0	0,20	5,3654	0,7296	12593,50	16,82	-0,7296	4,1001	12054,85	3643,74	4,1290	0,0008	13459,97
20	1,0	1,00	26,8270	1,4286	9833,38	20,84	-1,4286	3,9927	9189,81	3498,98	4,0121	0,0004	10281,44
20	0,5	2,00	53,6539	1,7296	8810,96	22,93	-1,7296	3,9450	8115,03	3432,10	3,9505	0,0000	8922,60
20	0,1	10,00	268,2696	2,4286	6444,25	25,94	-2,4286	3,8092	5794,95	2819,03	3,7860	0,0005	6108,97
30	25,0	0,04	16,2463	1,2108	11886,37	17,21	-1,2108	4,0750	11354,48	3515,91	4,0525	0,0005	11283,84
30	10,0	0,10	40,6159	1,6087	9534,64	20,25	-1,6087	3,9793	8945,04	3300,87	3,9760	0,0000	9462,18
30	5,0	0,20	81,2317	1,9097	8520,25	22,00	-1,9097	3,9305	7900,00	3191,35	3,9107	0,0004	8141,26
30	1,0	1,00	406,1586	2,6087	6132,14	27,01	-2,6087	3,7876	5463,47	2784,54	3,7402	0,0023	5497,51
30	0,5	2,00	812,3172	2,9097	5194,90	27,48	-2,9097	3,7156	4608,67	2397,30	3,6623	0,0028	4595,59
30	0,1	10,00	4061,5860	3,6087	3308,94	27,59	-3,6087	3,5197	2932,63	1532,56	3,4855	0,0012	3058,46
40	25,0	0,04	159,2429	2,2021	6133,92	21,64	-2,2021	3,7877	5701,41	2262,50	3,8420	0,0029	6950,30
40	10,0	0,10	398,1072	2,6000	5230,91	23,02	-2,6000	3,7186	4814,46	2045,34	3,7424	0,0006	5525,81
40	5,0	0,20	796,2143	2,9010	4454,03	24,74	-2,9010	3,6488	4045,37	1863,70	3,6646	0,0003	4619,52
40	1,0	1,00	3981,0717	3,6000	3082,83	26,48	-3,6000	3,4889	2759,48	1374,46	3,4876	0,0000	3073,27
40	0,5	2,00	7962,1434	3,9010	2551,68	26,10	-3,9010	3,4068	2291,46	1122,61	3,4173	0,0001	2614,17
40	0,1	10,00	39810,7171	4,6000	1735,63	23,16	-4,6000	3,2395	1595,78	682,57	3,2772	0,0014	1893,07

Tabla 67. Módulos calculados MAC 35% cerámica 20°C (España)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	Módulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	Módulo de almacenamiento (E')	Módulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,00155	-2,80970	20390,69	7,60	2,8097	4,3094	20211,78	2695,27	4,3117	0,0000	20495,48
10	10,0	0,10	0,0039	-2,4118	20288,04	10,82	2,4118	4,3072	19927,33	3808,69	4,2894	0,0003	19469,84
10	5,0	0,20	0,0077	-2,1107	19329,51	13,17	2,1107	4,2862	18820,90	4404,94	4,2689	0,0003	18574,05
10	1,0	1,00	0,0387	-1,4118	15900,05	15,85	1,4118	4,2014	15295,83	4341,59	4,2068	0,0000	16097,34
10	0,5	2,00	0,0775	-1,1107	14832,71	16,71	1,1107	4,1712	14206,43	4264,56	4,1725	0,0000	14878,13
10	0,1	10,00	0,3875	-0,4118	12599,87	19,58	0,4118	4,1004	11871,16	4222,82	4,0728	0,0008	11825,56
20	25,0	0,04	0,0400	-1,3979	14612,09	11,24	1,3979	4,1647	14331,57	2849,42	4,2053	0,0016	16043,14
20	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	13779,30	15,15	1,0000	4,1392	13300,36	3601,34	4,1587	0,0004	14411,20
20	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	12593,50	16,82	0,6990	4,1001	12054,85	3643,74	4,1174	0,0003	13104,07
20	1,0	1,00	1,0000	0,0000	9833,38	20,84	0,0000	3,9927	9189,81	3498,98	3,9998	0,0001	9994,95
20	0,5	2,00	2,0000	0,3010	8810,96	22,93	-0,3010	3,9450	8115,03	3432,10	3,9396	0,0000	8702,51
20	0,1	10,00	10,0000	1,0000	6444,25	25,94	-1,0000	3,8092	5794,95	2819,03	3,7804	0,0008	6031,84
30	25,0	0,04	0,5558	-0,2551	11886,37	17,21	0,2551	4,0750	11354,48	3515,91	4,0463	0,0008	11125,02
30	10,0	0,10	1,3895	0,1429	9534,64	20,25	-0,1429	3,9793	8945,04	3300,87	3,9719	0,0001	9374,24
30	5,0	0,20	2,7790	0,4439	8520,25	22,00	-0,4439	3,9305	7900,00	3191,35	3,9092	0,0005	8113,45
30	1,0	1,00	13,8950	1,1429	6132,14	27,01	-1,1429	3,7876	5463,47	2784,54	3,7452	0,0018	5561,24
30	0,5	2,00	27,7899	1,4439	5194,90	27,48	-1,4439	3,7156	4608,67	2397,30	3,6688	0,0022	4664,13
30	0,1	10,00	138,9495	2,1429	3308,94	27,59	-2,1429	3,5197	2932,63	1532,56	3,4871	0,0011	3069,59
40	25,0	0,04	4,8867	0,6890	6133,92	21,64	-0,6890	3,7877	5701,41	2262,50	3,8543	0,0044	7150,38
40	10,0	0,10	12,2168	1,0870	5230,91	23,02	-1,0870	3,7186	4814,46	2045,34	3,7591	0,0016	5742,01
40	5,0	0,20	24,4335	1,3880	4454,03	24,74	-1,3880	3,6488	4045,37	1863,70	3,6831	0,0012	4820,91
40	1,0	1,00	122,1677	2,0870	3082,83	26,48	-2,0870	3,4889	2759,48	1374,46	3,5015	0,0002	3173,51
40	0,5	2,00	244,3355	2,3880	2551,68	26,10	-2,3880	3,4068	2291,46	1122,61	3,4244	0,0003	2657,14
40	0,1	10,00	1221,6773	3,0870	1735,63	23,16	-3,0870	3,2395	1595,78	682,57	3,2573	0,0003	1808,25

Tabla 68. Módulos calculados MAC 35% cerámica 30°C (España)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	Módulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	Módulo de almacenamiento (E')	Módulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,00003	-4,47486	20390,69	7,60	4,4749	4,3094	20211,57	2696,80	4,3091	0,0000	20373,64
10	10,0	0,10	0,0001	-4,0769	20288,04	10,82	4,0769	4,3072	19927,35	3808,56	4,2884	0,0004	19427,45
10	5,0	0,20	0,0002	-3,7759	19329,51	13,17	3,7759	4,2862	18821,11	4404,06	4,2703	0,0003	18632,20
10	1,0	1,00	0,0008	-3,0769	15900,05	15,85	3,0769	4,2014	15295,53	4342,62	4,2182	0,0003	16526,52
10	0,5	2,00	0,0017	-2,7759	14832,71	16,71	2,7759	4,1712	14206,36	4264,81	4,1908	0,0004	15517,30
10	0,1	10,00	0,0084	-2,0769	12599,87	19,58	2,0769	4,1004	11871,28	4222,50	4,1138	0,0002	12995,64
20	25,0	0,04	0,0019	-2,7313	14612,09	11,24	2,7313	4,1647	14331,82	2848,18	4,1865	0,0005	15363,12
20	10,0	0,10	0,0046	-2,3333	13779,30	15,15	2,3333	4,1392	13300,40	3601,18	4,1444	0,0000	13943,73
20	5,0	0,20	0,0093	-2,0323	12593,50	16,82	2,0323	4,1001	12054,73	3644,13	4,1082	0,0001	12828,77
20	1,0	1,00	0,0464	-1,3333	9833,38	20,84	1,3333	3,9927	9190,06	3498,32	4,0083	0,0002	10193,55
20	0,5	2,00	0,0928	-1,0323	8810,96	22,93	1,0323	3,9450	8114,73	3432,80	3,9581	0,0002	9080,38
20	0,1	10,00	0,4642	-0,3333	6444,25	25,94	0,3333	3,8092	5795,01	2818,91	3,8244	0,0002	6674,13
30	25,0	0,04	0,0400	-1,3979	11886,37	17,21	1,3979	4,0750	11354,18	3516,88	4,0185	0,0032	10435,83
30	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	9534,64	20,25	1,0000	3,9793	8945,32	3300,10	3,9525	0,0007	8962,94
30	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	8520,25	22,00	0,6990	3,9305	7899,84	3191,74	3,8973	0,0011	7893,98
30	1,0	1,00	1,0000	0,0000	6132,14	27,01	0,0000	3,7876	5463,29	2784,89	3,7525	0,0012	5656,34
30	0,5	2,00	2,0000	0,3010	5194,90	27,48	-0,3010	3,7156	4608,77	2397,13	3,6836	0,0010	4825,86
30	0,1	10,00	10,0000	1,0000	3308,94	27,59	-1,0000	3,5197	2932,66	1532,51	3,5113	0,0001	3245,76
40	25,0	0,04	0,4515	-0,3453	6133,92	21,64	0,3453	3,7877	5701,60	2262,03	3,8269	0,0015	6712,47
40	10,0	0,10	1,1288	0,0526	5230,91	23,02	-0,0526	3,7186	4814,36	2045,56	3,7407	0,0005	5504,84
40	5,0	0,20	2,2577	0,3537	4454,03	24,74	-0,3537	3,6488	4045,22	1864,02	3,6712	0,0005	4689,80
40	1,0	1,00	11,2884	1,0526	3082,83	26,48	-1,0526	3,4889	2759,41	1374,59	3,4978	0,0001	3146,41
40	0,5	2,00	22,5768	1,3537	2551,68	26,10	-1,3537	3,4068	2291,48	1122,58	3,4197	0,0002	2628,24
40	0,1	10,00	112,8838	2,0526	1735,63	23,16	-2,0526	3,2395	1595,76	682,62	3,2358	0,0000	1720,93

Tabla 69. Módulos calculados MAC 35% cerámica 40°C (España)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	Módulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	Módulo de almacenamiento (E')	Módulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,0000	-5,55179	20390,69	7,60	5,5518	4,3094	20211,57	2696,80	4,3084	0,0000	20341,68
10	10,0	0,10	0,0000	-5,1538	20288,04	10,82	5,1538	4,3072	19927,35	3808,56	4,2885	0,0004	19430,34
10	5,0	0,20	0,0000	-4,8528	19329,51	13,17	4,8528	4,2862	18821,11	4404,06	4,2709	0,0002	18658,67
10	1,0	1,00	0,0001	-4,1538	15900,05	15,85	4,1538	4,2014	15295,53	4342,62	4,2200	0,0003	16594,48
10	0,5	2,00	0,0001	-3,8528	14832,71	16,71	3,8528	4,1712	14206,36	4264,81	4,1930	0,0005	15596,16
10	0,1	10,00	0,0007	-3,1538	12599,87	19,58	3,1538	4,1004	11871,28	4222,50	4,1167	0,0003	13082,36
20	25,0	0,04	0,0002	-3,7979	14612,09	11,24	3,7979	4,1647	14331,82	2848,18	4,1877	0,0005	15407,88
20	10,0	0,10	0,0004	-3,4000	13779,30	15,15	3,4000	4,1392	13300,40	3601,18	4,1459	0,0000	13992,86
20	5,0	0,20	0,0008	-3,0990	12593,50	16,82	3,0990	4,1001	12054,73	3644,13	4,1098	0,0001	12876,72
20	1,0	1,00	0,0040	-2,4000	9833,38	20,84	2,4000	3,9927	9190,06	3498,32	4,0098	0,0003	10228,05
20	0,5	2,00	0,0080	-2,0990	8810,96	22,93	2,0990	3,9450	8114,73	3432,80	3,9594	0,0002	9106,98
20	0,1	10,00	0,0398	-1,4000	6444,25	25,94	1,4000	3,8092	5795,01	2818,91	3,8251	0,0003	6685,54
30	25,0	0,04	0,0035	-2,4568	11886,37	17,21	2,4568	4,0750	11354,18	3516,88	4,0188	0,0032	10442,31
30	10,0	0,10	0,0087	-2,0588	9534,64	20,25	2,0588	3,9793	8945,32	3300,10	3,9523	0,0007	8960,04
30	5,0	0,20	0,0175	-1,7578	8520,25	22,00	1,7578	3,9305	7899,84	3191,74	3,8968	0,0011	7885,00
30	1,0	1,00	0,0873	-1,0588	6132,14	27,01	1,0588	3,7876	5463,29	2784,89	3,7514	0,0013	5641,59
30	0,5	2,00	0,1747	-0,7578	5194,90	27,48	0,7578	3,7156	4608,77	2397,13	3,6824	0,0011	4813,13
30	0,1	10,00	0,8733	-0,0588	3308,94	27,59	0,0588	3,5197	2932,66	1532,51	3,5114	0,0001	3246,56
40	25,0	0,04	0,0400	-1,3979	6133,92	21,64	1,3979	3,7877	5701,60	2262,03	3,8247	0,0014	6678,93
40	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	5230,91	23,02	1,0000	3,7186	4814,36	2045,56	3,7382	0,0004	5472,62
40	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	4454,03	24,74	0,6990	3,6488	4045,22	1864,02	3,6686	0,0004	4661,94
40	1,0	1,00	1,0000	0,0000	3082,83	26,48	0,0000	3,4889	2759,41	1374,59	3,4965	0,0001	3137,22
40	0,5	2,00	2,0000	0,3010	2551,68	26,10	-0,3010	3,4068	2291,48	1122,58	3,4198	0,0002	2629,03
40	0,1	10,00	10,0000	1,0000	1735,63	23,16	-1,0000	3,2395	1595,76	682,62	3,2416	0,0000	1744,24

Tabla 70. Módulo dinámico calculado MAC 35% cerámica 10°C (España)

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1,00E-20	4,3515	22464,34
-19	1,00E-19	4,3515	22464,34
-18	1,00E-18	4,3515	22464,34
-17	1,00E-17	4,3515	22464,32
-16	1,00E-16	4,3515	22464,3
-15	1,00E-15	4,3515	22464,25
-14	1,00E-14	4,3515	22464,15
-13	1,00E-13	4,3515	22463,93
-12	1,00E-12	4,3515	22463,47
-11	1,00E-11	4,3515	22462,47
-10	1,00E-10	4,3514	22460,34
-9	1E-09	4,3513	22455,8
-8	0,00000001	4,3511	22446,1
-7	0,0000001	4,3507	22425,41
-6	0,000001	4,3499	22381,33
-5	0,00001	4,3481	22287,67
-4	0,0001	4,3442	22089,77
-3	0,001	4,336	21676,65
-2	0,01	4,3188	20835,74
-1	0,1	4,2835	19210,36
0	1	4,2141	16372,41
1	10	4,0881	12250,11
2	100	3,89	7762,22
3	1000	3,6389	4354,49
4	10000	3,3954	2485,48
5	100000	3,2133	1634,02
6	1000000	3,1018	1264,06
7	10000000	3,0417	1100,77
8	100000000	3,0115	1026,92
9	1000000000	2,9969	992,96
10	1E+10	2,99	977,2
11	1,00E+11	2,9867	969,85
12	1,00E+12	2,9852	966,41
13	1,00E+13	2,9844	964,81
14	1,00E+14	2,9841	964,06
15	1,00E+15	2,9839	963,7
16	1,00E+16	2,9839	963,54
17	1,00E+17	2,9838	963,46
18	1,00E+18	2,9838	963,43
19	1,00E+19	2,9838	963,41
20	1,00E+20	2,9838	963,4

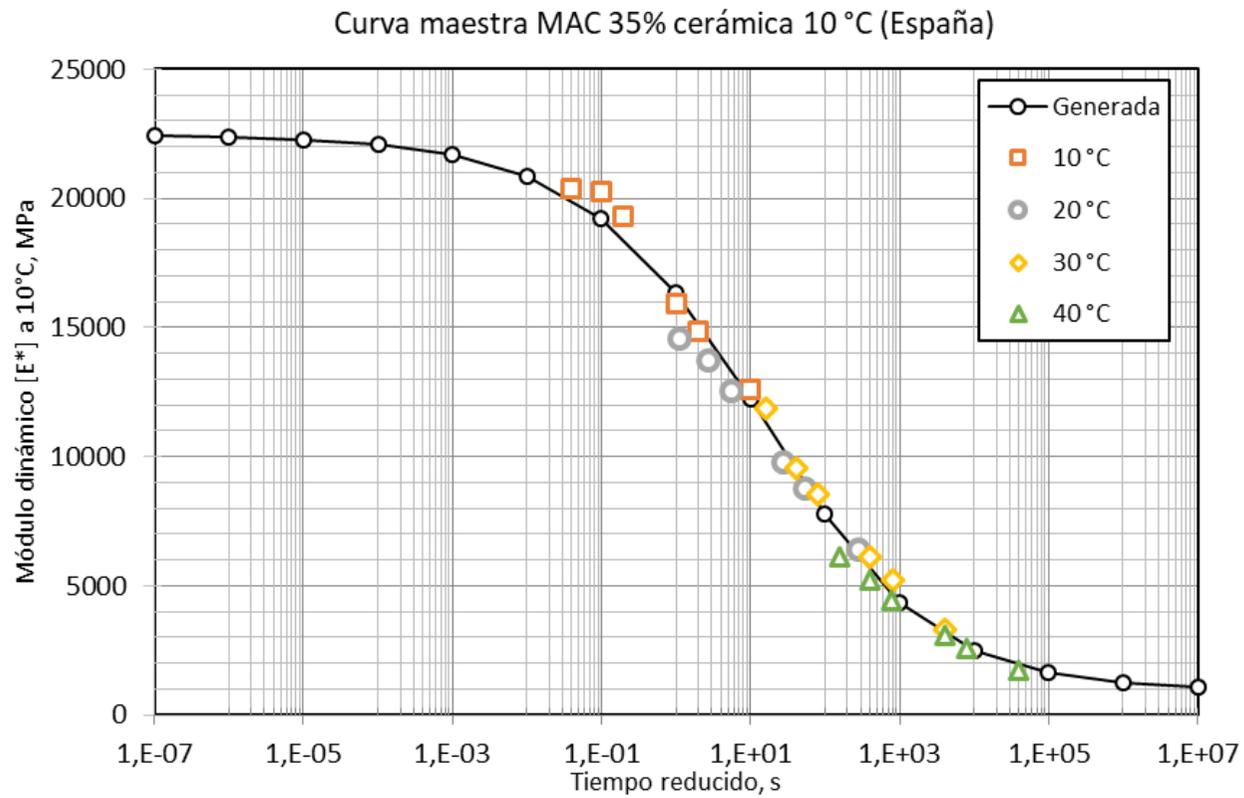


Figura 81. Curva maestra MAC 35% cerámica 10°C (España)

Tabla 71. Módulo dinámico calculado MAC 35% cerámica 20°C (España)

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1,00E-20	4,3945	24804,8
-19	1,00E-19	4,3945	24804,72
-18	1,00E-18	4,3945	24804,57
-17	1,00E-17	4,3945	24804,29
-16	1,00E-16	4,3945	24803,74
-15	1,00E-15	4,3945	24802,72
-14	1,00E-14	4,3945	24800,8
-13	1,00E-13	4,3944	24797,17
-12	1,00E-12	4,3943	24790,32
-11	1,00E-11	4,3941	24777,4
-10	1,00E-10	4,3936	24753,06
-9	1E-09	4,3928	24707,24
-8	0,00000001	4,3913	24621,14
-7	0,0000001	4,3885	24459,94
-6	0,000001	4,3831	24160,18
-5	0,00001	4,3731	23609,75
-4	0,0001	4,3545	22622,38
-3	0,001	4,3207	20924,99
-2	0,01	4,2605	18218,1
-1	0,1	4,1587	14411,2
0	1	3,9998	9994,95
1	10	3,7804	6031,84
2	100	3,5241	3342,86
3	1000	3,2768	1891,6
4	10000	3,0787	1198,62
5	100000	2,9422	875,42
6	1000000	2,8577	720,67
7	10000000	2,8089	643,95
8	100000000	2,7817	604,86
9	1000000000	2,7669	584,6
10	1E+10	2,7589	574
11	1,00E+11	2,7547	568,41
12	1,00E+12	2,7524	565,46
13	1,00E+13	2,7512	563,9
14	1,00E+14	2,7506	563,07
15	1,00E+15	2,7502	562,63
16	1,00E+16	2,75	562,4
17	1,00E+17	2,75	562,28
18	1,00E+18	2,7499	562,21
19	1,00E+19	2,7499	562,18
20	1,00E+20	2,7499	562,16

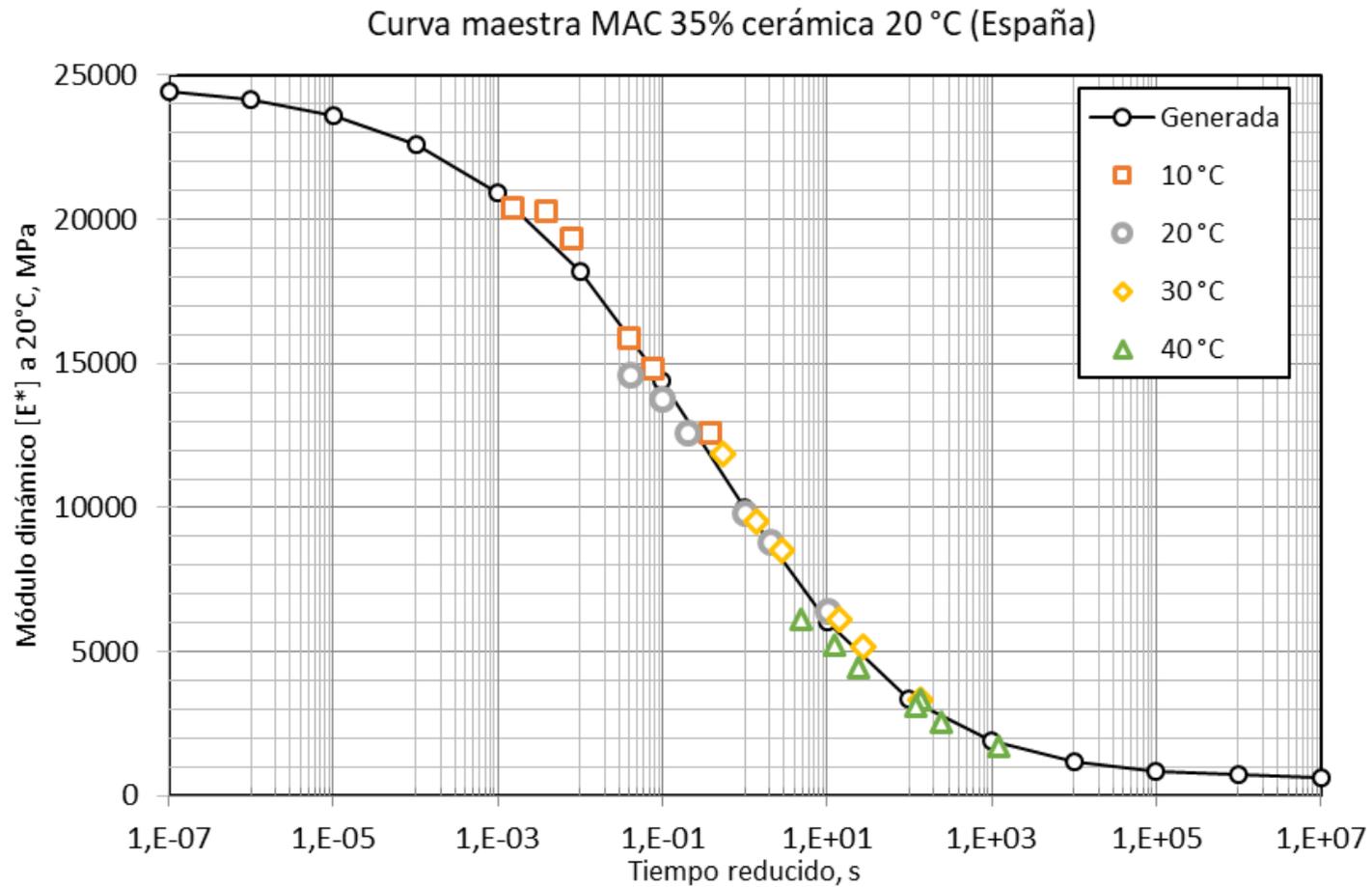


Figura 82. Curva maestra MAC 35% cerámica 20°C (España)

Tabla 72. Módulo dinámico calculado MAC 35% cerámica 30°C (España)

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1,00E-20	4,4118	25811,39
-19	1,00E-19	4,4118	25809,25
-18	1,00E-18	4,4117	25805,77
-17	1,00E-17	4,4116	25800,12
-16	1,00E-16	4,4115	25790,94
-15	1,00E-15	4,4112	25776,04
-14	1,00E-14	4,4108	25751,86
-13	1,00E-13	4,4101	25712,64
-12	1,00E-12	4,4091	25649,11
-11	1,00E-11	4,4073	25546,37
-10	1,00E-10	4,4045	25380,68
-9	1E-09	4,3999	25114,71
-8	0,00000001	4,3925	24690,89
-7	0,0000001	4,3806	24023,49
-6	0,000001	4,3616	22992,2
-5	0,00001	4,3313	21445,49
-4	0,0001	4,284	19230,78
-3	0,001	4,2115	16274
-2	0,01	4,1041	12707,69
-1	0,1	3,9525	8962,94
0	1	3,7525	5656,34
1	10	3,5113	3245,76
2	100	3,2496	1776,5
3	1000	2,9963	991,51
4	10000	2,777	598,43
5	100000	2,6047	402,43
6	1000000	2,4793	301,51
7	10000000	2,3931	247,22
8	100000000	2,3361	216,81
9	1000000000	2,2994	199,23
10	1E+10	2,2761	188,84
11	1,00E+11	2,2615	182,61
12	1,00E+12	2,2525	178,84
13	1,00E+13	2,2468	176,54
14	1,00E+14	2,2434	175,13
15	1,00E+15	2,2412	174,27
16	1,00E+16	2,2399	173,74
17	1,00E+17	2,2391	173,41
18	1,00E+18	2,2386	173,21
19	1,00E+19	2,2383	173,09
20	1,00E+20	2,2381	173,01

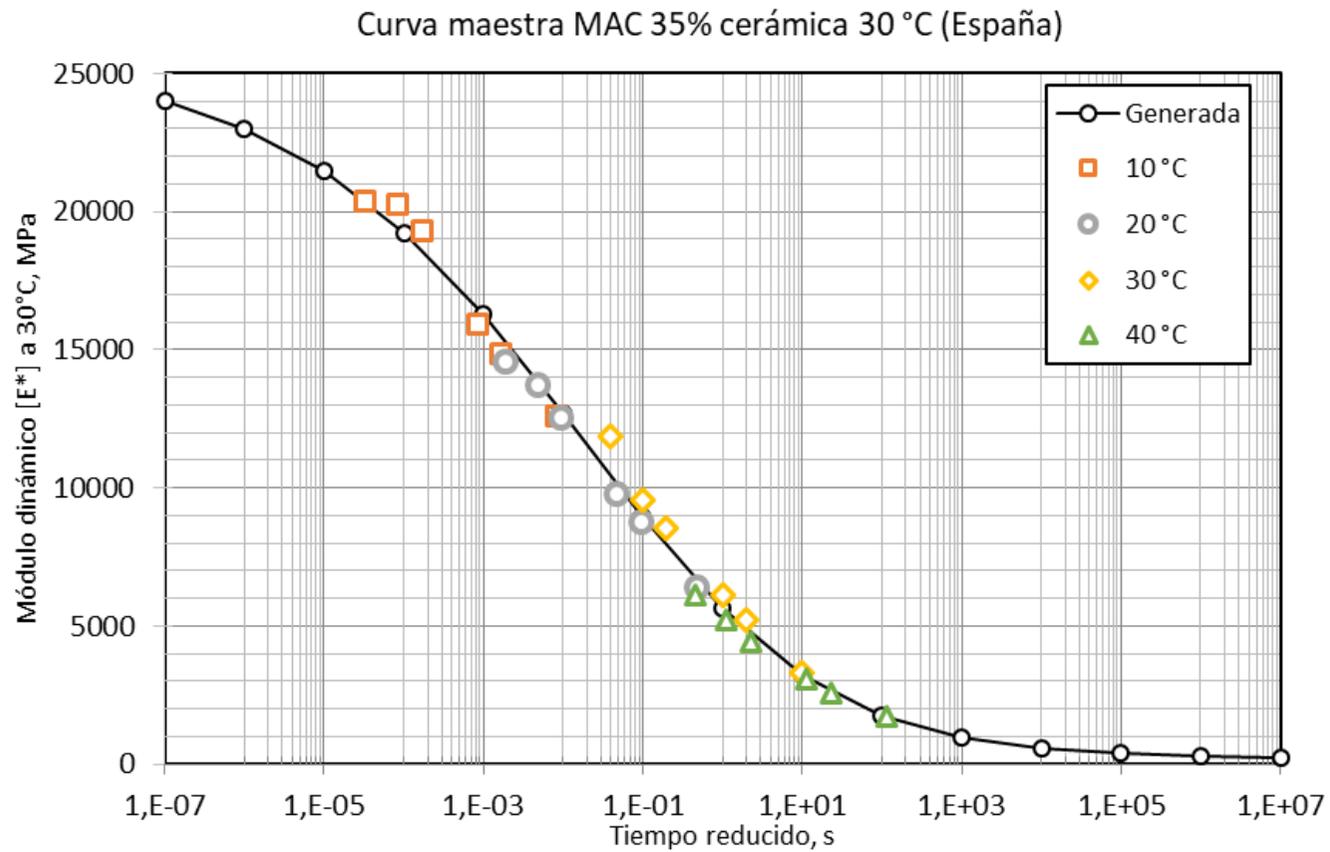


Figura 83. Curva maestra MAC 35% cerámica 30°C (España)

Tabla 73. Módulo dinámico calculado MAC 35% cerámica 40°C (España)

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1,00E-20	4,4033	25309,94
-19	1,00E-19	4,4032	25307,33
-18	1,00E-18	4,4032	25303,01
-17	1,00E-17	4,403	25295,85
-16	1,00E-16	4,4028	25284
-15	1,00E-15	4,4025	25264,41
-14	1,00E-14	4,402	25232,02
-13	1,00E-13	4,401	25178,54
-12	1,00E-12	4,3995	25090,34
-11	1,00E-11	4,397	24945,3
-10	1,00E-10	4,3928	24707,81
-9	1E-09	4,386	24321,67
-8	0,00000001	4,3748	23701,15
-7	0,0000001	4,3565	22722,71
-6	0,000001	4,3269	21226,2
-5	0,00001	4,2798	19044,91
-4	0,0001	4,2066	16091,8
-3	0,001	4,097	12504
-2	0,01	3,9418	8746,1
-1	0,1	3,7382	5472,62
0	1	3,4965	3137,22
1	10	3,2416	1744,24
2	100	3,004	1009,17
3	1000	2,8067	640,74
4	10000	2,6581	455,05
5	100000	2,5541	358,16
6	1000000	2,485	305,53
7	10000000	2,4408	275,93
8	100000000	2,4131	258,86
9	1000000000	2,3959	248,84
10	1E+10	2,3854	242,9
11	1,00E+11	2,379	239,35
12	1,00E+12	2,3752	237,23
13	1,00E+13	2,3728	235,94
14	1,00E+14	2,3714	235,17
15	1,00E+15	2,3705	234,71
16	1,00E+16	2,37	234,43
17	1,00E+17	2,3697	234,26
18	1,00E+18	2,3695	234,15
19	1,00E+19	2,3694	234,09
20	1,00E+20	2,3693	234,06

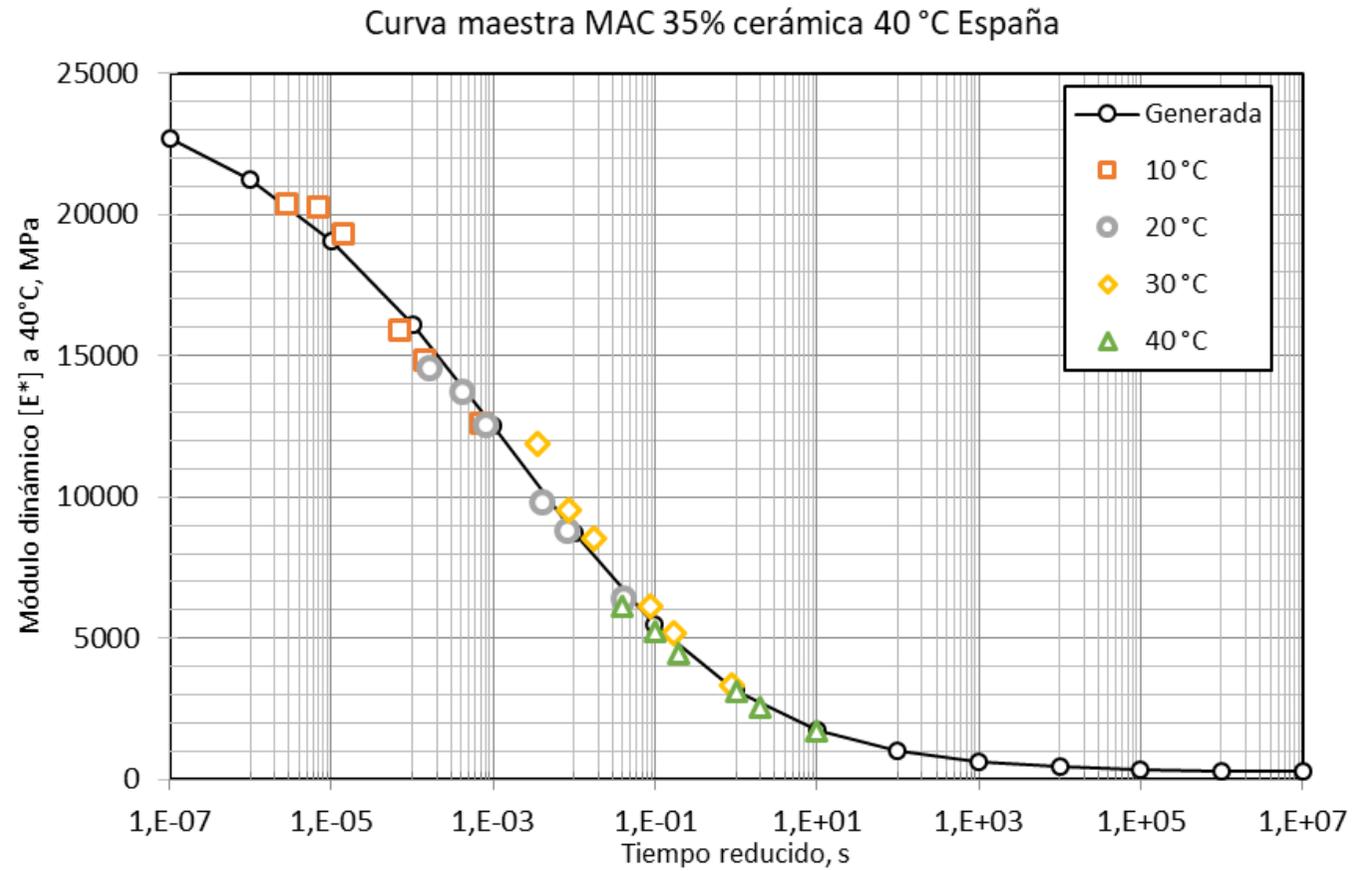


Figura 84. Curva maestra MAC 35% cerámica 40°C (España)

Ya con las curvas maestras se hizo un ejercicio de aplicación en donde leyendo desde la curva maestra el módulo dinámico se calculó un pre-dimensionamiento de una estructura de pavimento.

6.6 Pre-dimensionamiento de una estructura de pavimento en España

Para el desarrollo de un pre-diseño de aplicación a una estructura típica de pavimento, después de evaluar la posibilidad de usar las guías de metodologías existentes en cada país, se llegó a la definición que no iban a ser comparables porque respondían a criterios propios que habían sido ponderados por medio de cartas de diseño a las cuales no era posible realizar una comparación por parámetros, con los rangos de sensibilidad adecuados.

Se buscó una metodología universal que pudiera usarse tanto en España como en Colombia y se condicionó a una aplicación con un contexto igual en todas las opciones.

El método de pre-dimensionamiento escogido fue el método empírico American Association of State Highway Transportation Officials, AASHTO 1993, con los siguientes parámetros de cálculo, (ver Tabla 74), de acuerdo a la guía de diseño de estructuras de pavimento. (AASHTO, 1993)

Tabla 74. Parámetros de Diseño Estructura de Pavimento en España

Variable	Valor	Unidad	
W ₁₈	3.000.000,00	Ejes 8,2 Ton	
So	0,45	(-)	
Pf	2,2	(-)	
Pi	4,2	(-)	
ΔPSI	2,0	(-)	
Confiabilidad, R	90	%	
Zr	-1,282	(-)	
MR SUBR	7.500	psi	
MR SB	14.500	psi	Nivel de tránsito intermedio
a3	0,11	(-)	
MR BG	28.500	psi	Nivel de tránsito intermedio
a2	0,13	(-)	
Coef-m2	0,8	(-)	
Coef-m3	0,8	(-)	

El tránsito, identificado con W₁₈, es el número de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño. Se tomó un valor medio correspondiente al Nivel de Tránsito TP3-TP4 (Intensidad Media Diaria $200 < N \leq 25$, podría estimarse en un valor promedio de 3 millones de ejes equivalentes de 8,2 t). El coeficiente de drenaje tanto para base granular como para subbase granular se estableció con el valor de 0,8, como un valor representativo de la zona de Valencia, en donde se presenta un porcentaje de tiempo entre 5 – 25% que la estructura del pavimento está expuesta a grados de humedad próximos a la saturación y con una calidad de drenaje regular, en donde el tiempo que tarda el agua en ser evacuada es de una

(1) semana. De igual manera, se tomó el nivel de confianza en 90% correspondientes a vías secundarias.

El nivel de serviciabilidad, se seleccionó de acuerdo al recomendado por la AASHTO, para pavimento flexible, serviciabilidad inicial, P_o , 4,2 y para serviciabilidad final, para carreteras entre 2 y 2,5 se tomó 2,2.

Para el módulo resiliente de la subrasante, se consideró tomar valores entre 3% y 15% de la Relación Californiana de soporte, CBR, que para este caso se escogió 5%. Con el modelo 1500xCBR para la subrasante se tomó 7500 psi como módulo resiliente de la misma. En cuanto al error combinado, S_o , que tiene en cuenta las variaciones que se dan en la construcción del pavimento, las estimaciones en cuanto al tránsito y al drenaje, las variaciones que se pueden dar en la subrasante y en los materiales de las demás capas de pavimento, que tiene en cuenta la desviación estándar, recomendada por la guía AASHTO entre 0,40 y 0,50, se seleccionó 0,45.

Los otros parámetros como el número estructural resultante de la aplicación de la metodología en cada capa se basaron en el módulo resiliente de capas de base y subbase granular cumpliendo la normativa PG-3 para vías con tránsito T3-T4. El módulo dinámico de la capa de concreto asfáltico se tomó del ensayo resultante de acuerdo a cada MAC y a cada temperatura de ensayo y con 5 Hz y 10 Hz, que corresponden a una velocidad de aproximadamente hasta 35 – 80 km/h (ver Tabla 76) (Higuera Sandoval , 2011).

Para el cálculo del Número estructural, SN, que es la base de la guía AASHTO se usa la Figura 87. Nomograma de diseño para Pavimentos Flexibles, en la cual se obtiene esta variable que considera condiciones ambientales, el valor de Índice de Servicio, IS, el valor de resistencia por medio del módulo resiliente de las capas que soportan a la capa a la cual se le está calculando el valor de SN, la confiabilidad, el error combinado, S_o y el tránsito, expresado en número de ejes equivalentes (AASHTO, 1993).

En la Figura 85, se gráfica el coeficiente, a_1 , correspondiente a concreto asfáltico usando como insumo la variación del módulo elástico a una temperatura de 20°C. Con base en la generación de un modelo matemático similar a este se calcularon los valores de a_1 , en las diferentes mezclas de estudio, con los diferentes módulos dinámicos obtenidos (ver Tabla 75. Resumen generación del coeficiente a_1 MAC España).

Continuando con la Figura 86, se modela la variación del coeficiente estructural a_2 , de las bases granulares, la cual se ha desarrollado con base en cuatros ensayos de laboratorio a bases granulares. Finalmente, en la Figura 87, el nomograma calcula el coeficiente a_3 , de la subbase granular tomando como insumo también cuatro diferentes ensayos de laboratorio aplicados a subbases granulares. Para esta figura también hay disponibles los modelos matemáticos generados para el cálculo del coeficiente.

Los modelos matemáticos usados en el cálculo del coeficiente estructural a_1 , a_2 y a_3 (García Morales, 2015) (AASHTO, 1993) son:

$$a_1 = 0,184 * \ln E_1 - 1,9547$$

$$a_2 = 0,249 * \log E_2 - 0,977$$

$$a_3 = 0,227 * \log E_3 - 0,839$$

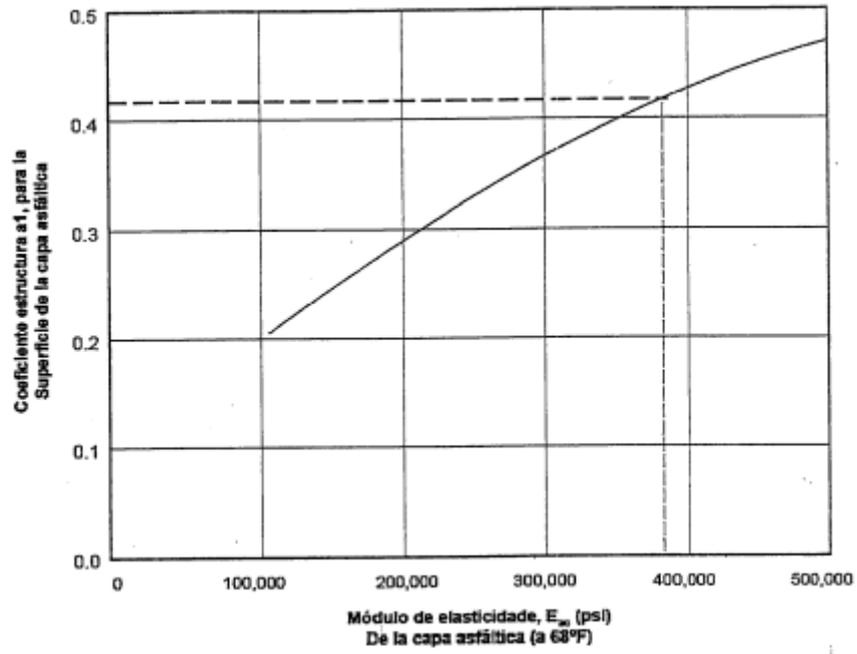


Figura 85. Coeficiente a_1 , en función del módulo de elasticidad del concreto asfáltico

Fuente: (AASHTO, 1993)

Tabla 75. Resumen generación del coeficiente a1 MAC España

Mezcla	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo (MPa)	Módulo (psi)	Coficiente Estructural (a1)
Patrón	10	5	15279	2215455	0,73
		10	18068	2619860	0,76
	20	5	10119	1467255	0,66
		10	13316	1930820	0,71
	30	5	6673	967585	0,58
		10	9332	1353140	0,64
	40	5	4351	630895	0,5
		10	6461	936845	0,58
30 % Cerámica	10	5	20853	3023685	0,79
		10	24905	3611225	0,82
	20	5	13144	1905880	0,71
		10	17661	2560845	0,76
	30	5	8124	1177980	0,62
		10	11751	1703895	0,69
	40	5	5128	743560	0,53
		10	7825	1134625	0,61
35 % Cerámica	10	5	16529	2396705	0,75
		10	19210	2785450	0,78
	20	5	10239	1484655	0,66
		10	14411	2089595	0,72
	30	5	5839	846655	0,56
		10	8962	1299490	0,64
	40	5	5163	748635	0,53
		10	5472	793440	0,54

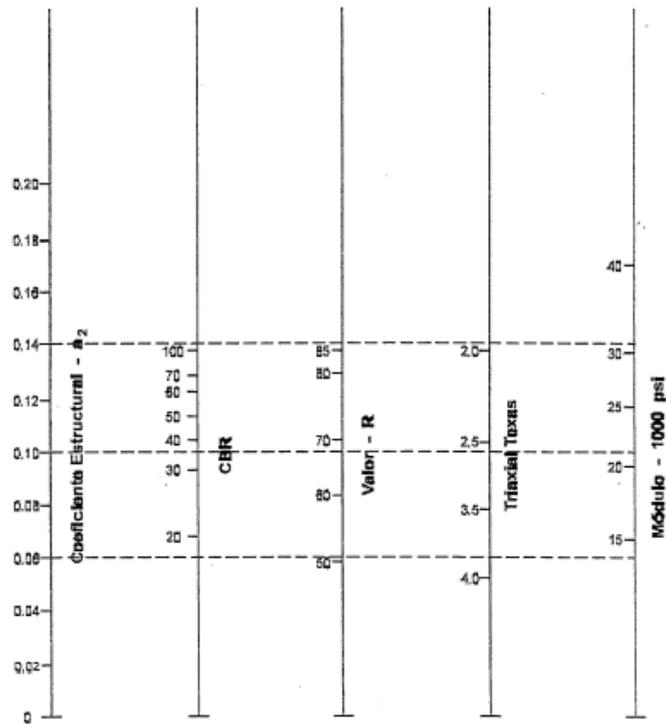
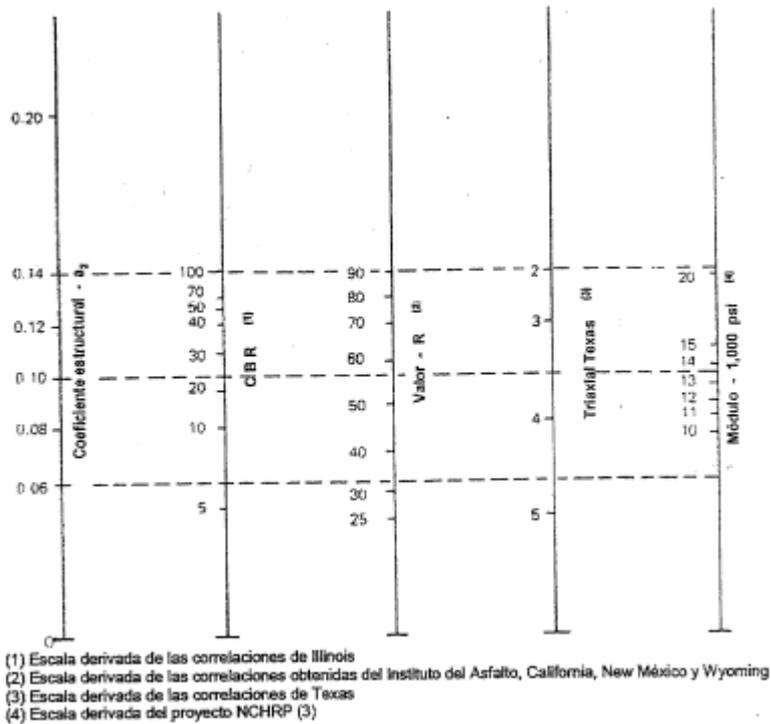


Figura 86. Variación del Coeficiente a_2 , con diferentes parámetros de resistencia de la base granular

Fuente: (AASHTO, 1993)



Considerando que las carreteras a que va dirigida esta investigación corresponden principalmente a las vías intermedias y locales, se decidió hacer un diseño que contemplara este

tipo de vías, de acuerdo a la recomendación de Rondón et al, en donde las velocidades de la Tabla 76, representan las correspondientes a vías de ese tipo.

Tabla 76. Frecuencia vs Velocidad

Frecuencia (Hz)	Velocidad (Kph)
5	35-45
10	70-80

Fuente textual (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015) (Higuera Sandoval , 2011)

Los resultados de los espesores se muestran para mezcla MAC Patrón en las Tabla 143. Diseño estructural de pavimento con MAC Patrón Temperatura de 10°C, corresponden a las estructuras de pavimento arrojadas por el método empírico AASHTO, con los diferentes temperaturas y frecuencias 5 y 10 Hz usando el software DISSAAHTO-93 (García Morales, 2015).

Para mezcla MAC con 30% de cerámica, Tabla 81. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 30% cerámica Temperatura de 10°C (España), Tabla 82. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 30% cerámica Temperatura de 20°C (España), Tabla 83. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 30% cerámica Temperatura de 30°C (España) y Tabla 84. Diseño estructural de pavimento con MAC 30% cerámica temperatura de 40°C(España) corresponden a las estructuras de pavimento arrojadas por el método empírico AASHTO, con los diferentes temperaturas y frecuencias 5 y 10 Hz.

Para MAC 35 % de cerámica Tabla 85. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 35% cerámica Temperatura de 10°C(España), Tabla 86. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 35% cerámica Temperatura de 20°C(España), Tabla 87. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 35% cerámica Temperatura de 30°C(España) y Tabla 88. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 35% cerámica Temperatura de 40°C (España), corresponden a las estructuras de pavimento arrojadas por el método empírico AASHTO, con los diferentes temperaturas y frecuencias 5 y 10 Hz.

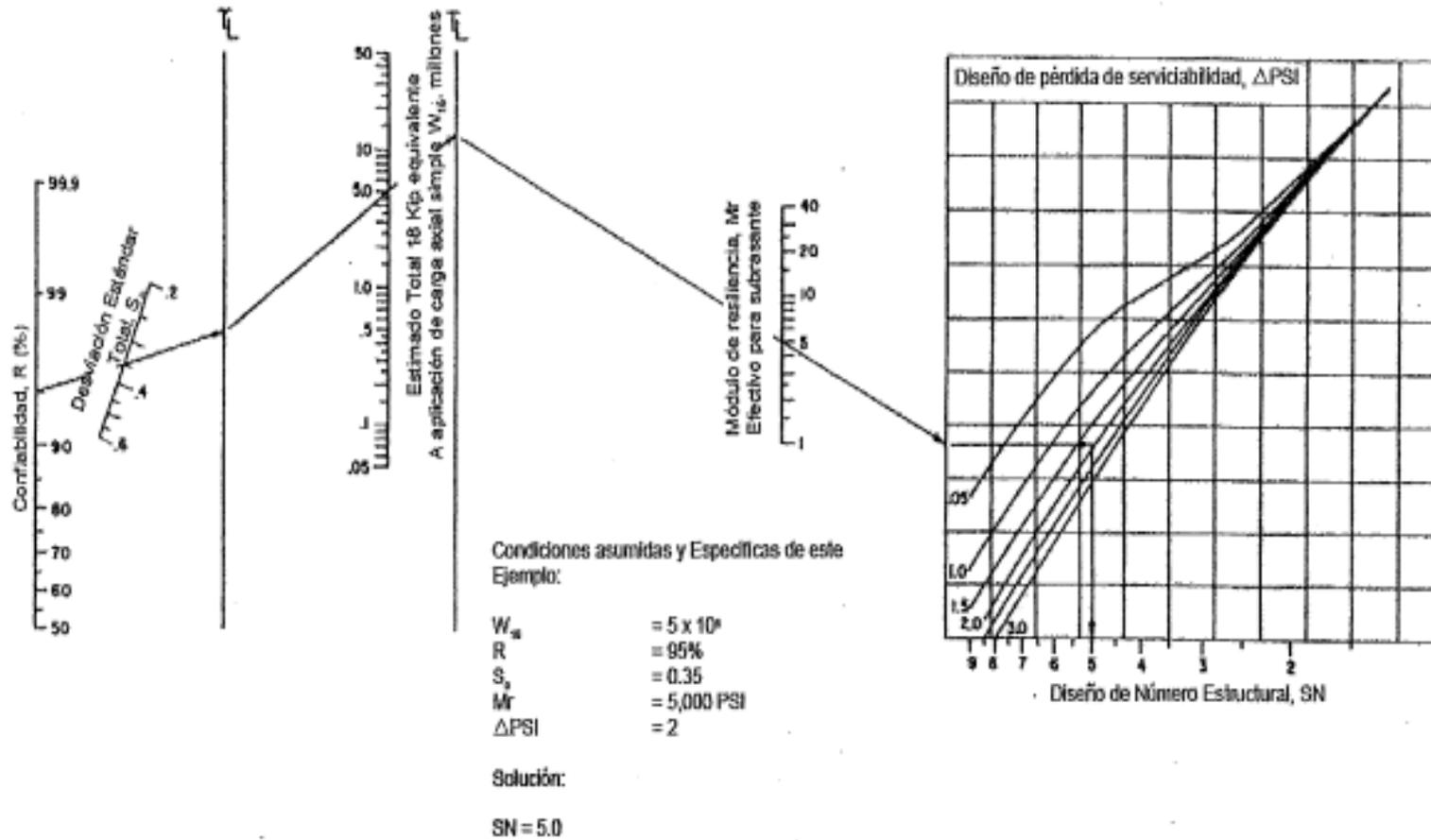


Figura 87. Nomograma de diseño para Pavimentos Flexibles

Fuente: (AASHTO, 1993)

Tabla 77. Diseño de la estructura de pavimento con MAC ACBIN 22 S Patrón temperatura de 10°C (España)

Nivel de tránsito:		T3-T4		Frecuencia:		5 Hz			
Temperatura:		10°C		Mezcla:		MAC Patrón			
Estructura	Espesor inicial		Espesor propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los		
	pulgadas	cm	cm	in	SN dispuesto	SN* propuesto	SN Propuestos		
CA	3,370	8,560	8,60	3,386	2,460	2,92	SN ₁ *>SN1		0,02
Base	2,212	5,618	16,00	2,362	3,15	3,18	(SN ₁ *+SN ₂ *)>SN2		0,01
Subbase	8,864	22,515	23,00	9,055	3,96	3,972	(SN ₁ *+SN ₂ *+SN ₃ *)>SN3		0,01

Nivel de tránsito:		T3-T4		Frecuencia:		10 Hz			
Temperatura:		10°C		Mezcla:		MAC Patrón			
MAC Patrón	Espesor inicial		Espesor propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los		
	pulgadas	cm	cm	in	SN dispuesto	SN* propuesto	SN propuestos		
CA	3,237	8,222	8,50	3,346	2,460	2,542	SN ₁ *>SN1		0,02
Base	4,712	11,968	15,00	5,906	3,15	3,157	(SN ₁ *+SN ₂ *)>SN2		0,02
Subbase	8,864	22,515	23,50	9,252	3,96	3,971	(SN ₁ *+SN ₂ *+SN ₃ *)>SN3		0,01

Tabla 78. Diseño estructural de pavimento con MAC Patrón temperatura de 20°C (España)

Nivel de tránsito:	T3-T4	Frecuencia:	5 Hz					
Temperatura:	20°C	Mezcla:	MAC Patrón					
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC Patrón	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,727	9,467	9,50	3,740	2,460	2,569	$SN_1^* > SN1$	0,09
Base	6,173	15,679	17,00	6,693	3,15	3,163	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN2$	0,02
Subbase	9,123	23,172	23,50	9,252	3,96	3,977	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN3$	0,01

Nivel de tránsito:	T3-T4	Frecuencia:	10 Hz					
Temperatura:	20°C	Mezcla:	MAC Patrón					
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC Patrón	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,465	8,801	9,00	3,543	2,460	2,535	$SN_1^* > SN1$	0,01
Base	6,101	15,497	16,00	6,299	3,15	3,17	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN2$	0,01
Subbase	8,970	22,784	23,00	9,055	3,96	3,967	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN3$	0,00

Tabla 79. Diseño Estructura de Pavimento con MAC Patrón Temperatura de 30°C (España)

Nivel de tránsito:	T3-T4	Frecuencia:	5 Hz					
Temperatura:	30°C	Mezcla:	Patrón					
	Espesor Inicial		Espesor propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC Patrón	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	4,331	11,001	11,00	4,331	2,460	3,15	$SN_1^* > SN_1$	0,09
Base	6,135	15,583	16,00	6,299	3,15	6,102	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN_2$	0,02
Subbase	9,010	22,885	23,00	9,055	3,96	9,252	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN_3$	0,00

Nivel de tránsito:	T3-T4	Frecuencia:	10 Hz					
Temperatura:	30°C	Mezcla:	Patrón					
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC Patrón	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,884	9,865	10,00	3,937	2,460	2,539	$SN_1^* > SN_1$	0,08
Base	6,299	15,999	16,00	6,299	3,15	3,154	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN_2$	0,02
Subbase	8,923	22,664	23,00	9,055	3,96	3,968	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN_3$	0,01

Tabla 80. Diseño Estructura de Pavimento con MAC Patrón Temperatura de 40°C (España)

Nivel de tránsito:	T3-T4	Frecuencia:	5 Hz		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
Temperatura:	40°C	Mezcla:	MAC Patrón		SN dispuesto	SN propuesto		
MAC Patrón	Espesor Inicial		Espesor Propuesto					
	in	cm	cm	in				
CA	4,920	12,497	12,50	4,921	2,460	2,543	$SN_1^* > SN1$	0,05
Base	6,626	16,830	17,00	6,693	3,15	3,157	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN2$	0,02
Subbase	9,130	23,190	23,50	9,252	3,96	3,971	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN3$	0,02

Nivel de tránsito:	T3-T4	Frecuencia:	10 Hz		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
Temperatura:	40°C	Mezcla:	MAC Patrón		SN dispuesto	SN propuesto		
MAC Patrón	Espesor Inicial		Espesor Propuesto					
	in	cm	cm	in				
CA	4,331	11,001	11,00	4,331	2,460	2,576	$SN_1^* > SN1$	0,04
Base	6,135	15,583	16,00	6,299	3,15	3,17	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN2$	0,03
Subbase	9,010	22,885	23,00	9,055	3,96	3,967	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN3$	0,01

Tabla 81. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 30% cerámica Temperatura de 10°C (España)

Nivel de tránsito:	T3-T4	Frecuencia:	5 Hz					
Temperatura:	10°C	Mezcla:	MAC 30% cerámica					
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 30% cerámica	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,114	7,910	8,00	3,150	2,46	2,488	SN ₁ *>SN1	0,12
Base	5,452	13,848	14,00	5,512	3,15	3,164	(SN ₁ *+SN ₂ *)>SN2	0,01
Subbase	9,134	23,200	23,50	9,252	3,96	3,961	(SN ₁ *+SN ₂ *+SN ₃ *)>SN3	0,01

Nivel de tránsito:	T3-T4	FRECUENCIA:	10 Hz					
Temperatura:	10°C	MEZCLA:	MAC 30% cerámica					
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 30% cerámica	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,000	7,620	8,00	3,150	2,46	2,583	SN ₁ *>SN1	0,02
Base	6,557	16,655	14,00	5,512	3,15	3,156	(SN ₁ *+SN ₂ *)>SN2	0,01
Subbase	9,205	23,381	23,50	9,252	3,96	3,970	(SN ₁ *+SN ₂ *+SN ₃ *)>SN3	0,01

Tabla 82. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 30% cerámica Temperatura de 20°C (España)

Nivel de tránsito:	T3-T4	Frecuencia:	5 Hz		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
Temperatura:	20°C	Mezcla:	MAC 30% cerámica		SN dispuesto	SN propuesto		
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto					
MAC 30% cerámica	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,000	7,620	8,00	3,150	2,46	2,583	SN ₁ *>SN1	0,01
Base	6,557	16,655	14,00	5,512	3,15	3,156	(SN ₁ *+SN ₂ *)>SN2	0,00
Subbase	9,205	23,381	23,50	9,252	3,96	3,970	(SN ₁ *+SN ₂ *+SN ₃ *)>SN3	0,01

Nivel de tránsito:	T3-T4	Frecuencia:	10 Hz		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
Temperatura:	20°C	Mezcla:	MAC 30% cerámica		SN dispuesto	SN propuesto		
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto					
MAC 30% cerámica	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,237	8,222	8,50	3,346	2,46	2,476	SN ₁ *>SN1	0,11
Base	5,837	14,826	15,00	5,906	3,15	3,152	(SN ₁ *+SN ₂ *)>SN2	0,02
Subbase	9,123	23,172	23,50	9,252	3,96	3,966	(SN ₁ *+SN ₂ *+SN ₃ *)>SN3	0,01

Tabla 83. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 30% cerámica Temperatura de 30°C (España)

Nivel de tránsito:	T3-T4	Frecuencia:	5 Hz		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
Temperatura:	30°C	Mezcla:	MAC 30% CERÁMICA		SN DISPUESTO	SN PROPUESTO		
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto					
MAC 30% cerámica	in	cm	cm	in				
CA	3,968	10,079	10,50	4,134	2,46	2,521	SN ₁ *>SN1	0,02
Base	5,643	14,333	14,50	5,709	3,15	3,156	(SN ₁ *+SN ₂ *)>SN2	0,02
Subbase	9,127	23,183	23,50	9,252	3,96	3,970	(SN ₁ *+SN ₂ *+SN ₃ *)>SN3	0,01

Nivel de tránsito:	T3-T4	Frecuencia:	10 Hz		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
Temperatura:	30°C	Mezcla:	MAC 30% CERÁMICA		SN DISPUESTO	SN PROPUESTO		
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto					
MAC 30% cerámica	in	cm	cm	in				
CA	3,728	9,469	9,50	3,740	2,46	2,468	SN ₁ *>SN1	0,01
Base	5,475	13,907	14,00	5,512	3,15	3,164	(SN ₁ *+SN ₂ *)>SN2	0,02
Subbase	9,161	23,269	23,50	9,252	3,96	3,961	(SN ₁ *+SN ₂ *+SN ₃ *)>SN3	0,00

Tabla 84. Diseño estructural de pavimento con MAC 30% cerámica temperatura de 40°C(España)

Nivel de tránsito:	T3-T4	Frecuencia:		5 Hz				
Temperatura:	40°C	Mezcla:		30% CERÁMICA				
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN Propuestos	
MAC 30% cerámica	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	4,033	10,244	10,50	4,134	2,46	2,503	$SN_1^* > SN1$	0,05
Base	6,214	15,784	16,00	6,299	3,15	3,159	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN2$	0,02
Subbase	9,104	23,124	23,50	9,252	3,96	3,973	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN3$	0,00

Nivel de tránsito:	T3-T4	Frecuencia:		10 Hz				
Temperatura:	40°C	Mezcla:		30% CERÁMICA				
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 30% cerámica	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	4,033	10,244	10,50	4,134	2,46	2,511	$SN_1^* > SN1$	0,06
Base	6,041	15,344	15,50	6,102	3,15	3,167	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN2$	0,01
Subbase	9,132	23,195	23,50	9,252	3,96	3,964	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN3$	0,01

Tabla 85. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 35% cerámica Temperatura de 10°C(España)

Nivel de tránsito:		T3-T4		Frecuencia:		5 Hz			
Temperatura:		10°C		Mezcla:		35% cerámica			
		Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 35% cerámica		in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA		3,280	8,331	8,50	3,346	2,46	2,583	SN ₁ *>SN1	0,06
Base		6,159	15,644	16,00	6,299	3,15	3,156	(SN ₁ *+SN ₂ *)>SN2	0,00
Subbase		9,039	22,959	23,00	9,055	3,96	3,970	(SN ₁ *+SN ₂ *+SN ₃ *)>SN3	0,00

Nivel de tránsito:		T3-T4		Frecuencia:		10 Hz			
Temperatura:		10°C		Mezcla:		35% cerámica			
		Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 35% cerámica		in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA		3,154	8,011	8,50	3,346	2,46	2,51	SN ₁ *>SN1	0,01
Base		5,193	13,190	13,50	5,315	3,15	3,165	(SN ₁ *+SN ₂ *)>SN2	0,00
Subbase		9,061	23,015	23,50	9,252	3,96	3,962	(SN ₁ *+SN ₂ *+SN ₃ *)>SN3	0,01

Tabla 86. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 35% cerámica Temperatura de 20°C(España)

Nivel de tránsito:	T3-T4	Frecuencia:	5 Hz					
Temperatura:	20°C	Mezcla:	35% CERÁMICA					
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 35% cerámica	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,727	9,467	9,50	3,740	2,46	2,47	SN ₁ *>SN1	0,02
Base	6,554	16,647	17,00	6,693	3,15	3,152	(SN ₁ *+SN ₂ *)>SN2	0,01
Subbase	9,040	22,962	23,00	9,055	3,96	3,966	(SN ₁ *+SN ₂ *+SN ₃ *)>SN3	0,01

Nivel de tránsito:	T3-T4	FRECUENCIA:	10 Hz					
Temperatura:	20°C	MEZCLA:	35% CERÁMICA					
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 35% cerámica	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,417	8,679	9,00	3,543	2,46	2,609	SN ₁ *>SN1	0,01
Base	5,760	14,630	15,00	5,906	3,15	3,183	(SN ₁ *+SN ₂ *)>SN2	0,01
Subbase	9,032	22,941	23,00	9,055	3,96	3,963	(SN ₁ *+SN ₂ *+SN ₃ *)>SN3	0,00

Tabla 87. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 35% cerámica Temperatura de 30°C(España)

Nivel de tránsito:		T3-T4		Frecuencia:		5 Hz			
Temperatura:		30°C		Mezcla:		35% CERÁMICA			
		Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 35% cerámica		in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA		4,393	11,158	11,50	4,528	2,46	2,559	$SN_1^* > SN1$	0,02
Base		5,907	15,004	15,50	6,102	3,15	3,153	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN2$	0,01
Subbase		8,974	22,794	23,00	9,055	3,96	3,967	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN3$	0,01

Nivel de tránsito:		T3-T4		Frecuencia:		10 Hz			
Temperatura:		30°C		Mezcla:		35% CERÁMICA			
		Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 35% cerámica		in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA		3,844	9,764	10,00	3,937	2,46	2,48	$SN_1^* > SN1$	0,03
Base		6,061	15,395	15,50	6,102	3,15	3,156	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN2$	0,02
Subbase		9,156	23,256	23,50	9,252	3,96	3,970	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN3$	0,00

Tabla 88. Diseño Estructura de Pavimento con MAC 35% cerámica Temperatura de 40°C (España)

Nivel de tránsito:	T3-T4	Frecuencia:		5 Hz				
Temperatura:	40°C	Mezcla:		35% cerámica				
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 35% cerámica	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	4,033	10,244	10,50	4,134	2,46	2,535	SN ₁ *>SN1	0,06
Base	6,214	15,784	16,00	6,299	3,15	3,17	(SN ₁ *+SN ₂ *)>SN2	0,00
Subbase	9,104	23,124	23,50	9,252	3,96	3,967	(SN ₁ *+SN ₂ *+SN ₃ *)>SN3	0,01

Nivel de tránsito:	T3-T4	Frecuencia:		10 Hz				
Temperatura:	40°C	Mezcla:		35% cerámica				
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 35% Cerámica	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	4,556	11,572	12,00	4,724	2,46	2,56	SN ₁ *>SN1	0,04
Base	5,760	14,630	15,00	5,906	3,15	3,157	(SN ₁ *+SN ₂ *)>SN2	0,01
Subbase	9,032	22,941	23,00	9,055	3,96	3,971	(SN ₁ *+SN ₂ *+SN ₃ *)>SN3	0,01

6.7 Costos y ahorros de la estructura de pavimento en España

En cuanto a los costos y ahorros de usar MAC con cerámico se presenta un análisis de costos por metro cúbico tanto para la mezcla patrón como para las modificadas con cerámica al 30% y 35%, teniendo como base la información del Banco de precios y condiciones técnicas de la comunidad de Valencia CICCOP, disponible en el enlace (<https://tinyurl.com/2udpatj3>,2022).

En la Tabla 89 se muestra el análisis desarrollado con base en información suministrada por una planta de asfalto de la ciudad y que utiliza las mismas fuentes de materiales. El resumen correspondiente a las MAC con cerámica, (ver Tabla 90. Análisis de Precios Unitarios para MAC 30% Cerámica (España) y Tabla 91. Análisis de Precios Unitarios para MAC 35% Cerámica (España)).

Con base en el cuadro de precios de obras civiles detalladas se realizó el siguiente análisis unitario de precios, APU. Es importante anotar que con el fin de hacer comparables los cálculos se tomó como base el euro tanto para España como para Colombia y se tomó la distancia de transporte como de 60 km para los dos países.

Tabla 89. Análisis de precio unitario MAC Patrón (España)

Análisis de precio unitario	
PROYECTO	Análisis de precio unitario de una mezcla asfáltica en caliente modificada con residuo cerámico
ITEM	Mezcla semi densa en caliente AC 22 BIN S (Patrón)- En Planta

Materiales

Descripción	unidad	cantidad	desperdicio	Vr. Unitario	Vr. Parcial
Cemento Asfáltico 35/50	kg	107,60	5%	0,2991 €	32 €
Árido grueso para mezcla asfáltica	m ³	0,36	5%	9,63 €	3,9 €
Árido arena para mezcla asfáltica	m ³	0,85	5%	3,21 €	2,9 €
SUBTOTAL:					39 €

Equipos

Cant.	Descripción	unidad	rendimiento	tarifa	Vr. Parcial
1	Planta de asfalto en caliente	h	10,000	4,4 €	0,44 €
1	Planta trituradora	h	30,000	0,238 €	0,01 €
1	Cargador potencia 125 hp	h	30,000	24 €	0,81 €
	Herramienta menor			0,178 €	0,18 €
SUBTOTAL:					1,43 €

Transporte

Descripción	unidad	dist. km	cantidad	Vr. Unitario	Vr. Parcial
Transporte de agregado pétreo	m ³ /km	60,00	1,250	0,04800 €	3,60 €
Subtotal:					3,60 €

Mano de obra

cant.	descripción	Jornal	P. Soc.	Jornal + P. Soc.	rendimiento (und/día)	Vr.Parcial
1	Oficial	159 €	0%	159 €	0,00760	2,42 €
1	Ayudante	151 €	0%	151 €	0,01160	3,51 €
Subtotal:						5,94 €

Sub Total:		50 €
Administración	4%	2 €
Imprevistos	1%	0 €
Utilidad	4%	2 €
IVA Sobre Utilidad	19%	0 €
Total		55 €

 Fuente: <https://tinyurl.com/2udpatj3>, 2022

Tabla 90. Análisis de Precios Unitarios para MAC 30% Cerámica (España)

		Análisis de precio unitario				
PROYECTO	Análisis de precio unitario de una mezcla asfáltica en caliente modificada con residuo cerámico					
ITEM	Mezcla semi densa en caliente AC 22 BIN S +30% Residuo Cerámico-En Planta	und	m ³			
Materiales						
descripción	unidad	cantidad	desperdicio	Vr. Unitario	Vr. Parcial	
Cemento Asfáltico 35/50	kg	106,72	5%	0,2991 €	31,93 €	
Árido grueso para mezcla asfáltica	m ³	0,2261	5%	9,63 €	2,66 €	
Arena para mezcla asfáltica	m ³	0,5359	5%	3,21 €	1,88 €	
Residuo cerámico (30%)	m ³	0,3281	5%	0,00 €	0,00 €	
				SUBTOTAL:	36 €	
Equipos						
CANT.	descripción	unidad	rendimiento	tarifa	Vr. Parcial	
1	Planta de asfalto en caliente	h	10,000	4,4 €	0,44 €	
1	Planta trituradora	h	30,000	0,238 €	0,01 €	
1	Cargador potencia 125 hp	h	30,000	24 €	0,81 €	
	Herramienta menor			0,178 €	0,18 €	
				SUBTOTAL:	1 €	
Transporte						
descripción	unidad	dist.km	cantidad	Vr. Unitario	Vr. Parcial	
Transporte de agregado pétreo	m ³ /km	60,00	1,250	0,04800 €	3,60 €	
				SUBTOTAL:	4 €	
Mano de obra						
CANT.	Descripción	Jornal	P. Soc.	Jornal + P. Soc.	Rendimiento (und/Día)	Vr. Parcial
1	Oficial	159 €	0%	159 €	0,00760	2,42 €
1	Ayudante	151 €	0%	151 €	0,01160	3,51 €
				Subtotal:	6 €	
Sub Total:						47 €
				Administración	4%	1,9 €
				Imprevistos	1%	0,5 €
				Utilidad	4%	1,9 €
				IVA Sobre Utilidad	19%	0,4 €
TOTAL						52 €

 Fuente: <https://tinyurl.com/2udpatj3>, 2022

Tabla 91. Análisis de Precios Unitarios para MAC 35% Cerámica (España)

		Análisis de precio unitario	
PROYECTO	Análisis de precio unitario de una mezcla asfáltica en caliente modificada con residuo cerámico		
ITEM	Mezcla semi densa en caliente AC 22 BIN S +35% Residuo Cerámico-En Planta	und	m ³

Materiales

Descripción	Unidad	Cantidad	Desperdicio	Vr. Unitario	Vr. Parcial
Cemento Asfáltico 60/70	kg	110,36	5%	0,2991 €	33,02 €
Agregado para mezcla asfáltica	m ³	0,2068	5%	9,63 €	2,47 €
Arena para mezcla asfáltica	m ³	0,5086	5%	3,21 €	1,79 €
Residuo cerámico (35%)	m ³	0,3870	5%	0,00 €	-
SUBTOTAL:					37 €

Equipos

Cant.	Descripción	Unidad	Rendimiento	Tarifa	Vr. Parcial
1	Planta de asfalto en caliente	h	10,000	4,4 €	0,44 €
1	Planta trituradora	h	30,000	0,238 €	0,01 €
3	Cargador potencia 125 hp	h	30,000	24 €	0,81 €
	Herramienta menor			0,178 €	0,18 €
Subtotal:					1 €

Transporte

Descripción	Unidad	Dist. Km	Cantidad	Vr. Unitario	Vr. Parcial
Transporte de agregado pétreo	m ³ /km	60,00	1,250	0,04800 €	3,60 €
Subtotal:					4 €

Mano de obra

Cant.	Descripción	Jornal	P. Soc.	Jornal + P. Soc.	Rendimiento (und/día)	Vr. Parcial
1	Oficial	159 €	0%	159 €	0,00760	2,42 €
1	Ayudante	151 €	0%	151 €	0,01160	3,51 €
Subtotal:						6€

Sub Total:		47,97 €
Administración	4%	1,92 €
Imprevistos	1%	0,48 €
Utilidad	4%	1,92 €
IVA Sobre Utilidad	19%	0,36 €

Total	53 €
--------------	-------------

 Fuente: <https://tinyurl.com/2udpatj3>, 2022

Se observa una ligera diferencia en los costos de unitarios de las mezclas que ayudan a analizar las recomendaciones de este estudio.

7. Diseño experimental y resultados en Colombia

7.1 Línea de partida de la investigación en el Laboratorio de Ingeniería Civil

Del proyecto Impiva denominado “Aprovechamiento de residuos cerámicos en las mezclas bituminosas en caliente como sustitutivo parcial de los áridos naturales, de origen calizo en capas base e intermedias, desarrollado en Valencia, se tomaron en cuenta las premisas mencionadas en el numeral 6.1 con el fin de atender las recomendaciones y avanzar en el desarrollo de la investigación y teniendo en cuenta la experimentación desarrollada en el Laboratorio de Caminos en España, se seleccionó unas condiciones que fueran comparable.

- Tipo de mezcla elegida en Colombia fue Mezcla asfáltica Intermedia Semidensa MSC-25. Se seleccionó la estandarización de mezcla asfáltica más cercana a la del estudio desarrollado, principalmente en cuanto a tamaño máximo de agregados y a la clasificación de semidensa.
- Los tamaños de gradación estandarizados en los tamices son diferentes entre los europeos y los americanos, por lo cual se buscó las aberturas que correspondían más cercanas a los tamaños de los triturados cerámicos implementados en España. Siendo así las partículas usadas corresponden aproximadamente a tamaños 0.074 mm, 2 mm, 4.76 mm y 9.5 mm.
- Los triturados cerámicos reciclados se aplicaron en un rango entre 30%, 35 y 40% en peso que reemplazan los áridos de las mezclas asfálticas considerando las Especificaciones Técnicas de Construcción del INVIAS.
- Se usó en Colombia la fuente de Pescadero, río Chicamocha, en el departamento de Santander, agregado proveniente de la empresa Sanchez Construcciones S.A.

Finalmente, se gestionó el suministro de todos los materiales requeridos.

7.2 Diseño de las mezclas asfálticas en caliente en el Laboratorio de Ingeniería Civil, UPB, Colombia

El diseño de mezcla asfáltica se hizo con los siguientes pasos, inicialmente la comprobación de la idoneidad de los agregados o áridos, confirmación del cumplimiento de las especificaciones técnicas del betún o asfalto y posteriormente la obtención del porcentaje óptimo de asfalto por medio del cumplimiento de las Especificaciones Técnicas de Carreteras del Instituto Nacional de Vías, específicamente el Capítulo 4, para cada una de las mezclas desarrolladas y de la confirmación del mismo con los parámetros de la metodología Marshall. Es importante aclarar que en Colombia la normativa para diseño de mezcla bituminosa sigue la metodología Marshall, de manera preliminar y ese debe Verificar con ensayos complementarios dependiendo del tipo de mezcla estudiada.

7.2.1 Caracterización de los agregados

Los materiales usados tienen como fuente la cantera de Pescadero, suministrados por la proveniente del río Chicamocha de propiedad de la Empresa Sánchez Construcciones S.A, a los cuales se les han aplicado los ensayos de caracterización y se obtuvieron los siguientes resultados (ver

Tabla 92). En la primera columna se encuentra el nombre del ensayo aplicado, en la segunda está consignado el valor obtenido por la muestra y la última columna corresponde a la norma de comparación, en este caso las Especificaciones Técnicas de Construcción.

Tabla 92. Caracterización de los agregados de la fuente Pescadero

Características	Norma INV	máximo	mínimo	resultado	cumple
Dureza, agregado grueso					
Degaste en la máquina de los ángeles (%)	E-218	35	----	25,38	Si
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval (%)	E-238	30	----	6,91	Si
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos valor en seco (kN)	E-224	----	----	211,201	Si
relación húmedo/seco (%)				64,75	
Durabilidad					
Perdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso (%)	E-220	18	----		Si
Limpieza, agregado grueso					
Impurezas en agregado grueso (%)	E-237	0,5	----	0,41	Si
Limpieza, gradación combinada					
Índice de plasticidad (%)	E-125 y E-126	NP	NP	0	Si
Equivalente de arena (%)	E-133	----	50	64,92	Si
Geometría de las partículas, agregado Grueso					
Partículas planas y alargadas (%)	E-240	10	----	1,25	Si
Caras fracturadas (%)	E-227	----	75	94,67	Si
Geometría de las partículas, Agregado Fino					
Angularidad de la fracción fina (%)	E-239	----	40	42,83	Si
Densidad de los agregados					
Densidad relativa de agregado finos Sh	E-222	----	----	2539,7	
Absorción de agregado fino (%)		----	----	2,9	
Densidad relativa de agregado grueso Sh	E-223	----	----	2583,44	
Absorción de agregado grueso (%)		----	----	0,64	

Fuente: (Instituto Nacional de Vías, INVIAS, 2013)

Se muestra en la Tabla 93 la distribución granulométrica del agregado, en las diferentes tolvas disponibles como lo son de $\frac{3}{4}$ " , $\frac{1}{2}$ " y de arena usado en el diseño experimental. Y en la Tabla 94,

se encuentran los porcentajes de acuerdo a las aberturas de los tamices vs el porcentaje que pasa.

Tabla 93. Granulometría del agregado de Pescadero (% que Pasa)

Tamiz	Abertura [mm]	Tolva	Tolva	Tolva	Limites	
		3/4"	1/2"	Arena	Especificación	
		Pasa [%]	Pasa [%]	Pasa [%]	Inferior	Superior
1"	25	100%	100%	100%	100%	100%
3/4"	19	47,72	99,53	100,00	80%	95%
1/2"	12,5	0,37%	34,59%	100%	65%	80%
3/8"	9,5	0,02%	1,38%	98,14%	55%	70%
No.4	4,75	0,02%	0,04%	74,61%	40%	55%
No.10	2	0,02%	0,04%	51,04%	24%	38%
No.40	0,425	0,02%	0,02%	18,93%	9%	20%
No.80	0,18	0,02%	0,01%	8,98%	6%	12%
No.200	0,075	0,00%	0,00%	4,45%	3%	7%

Fuente: (Instituto Nacional de Vías, 2013)

Tabla 94. Franjas Granulométricos MSC25

Tipo de mezcla	Abertura de los tamices INVIAS-450-13 / Porcentaje Que Pasa %								
	1"	¾"	½"	3/8"	No.4	No.10	No.40	No.80	No.200
MSC25	100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7

Fuente: (Instituto Nacional de Vías, 2013)

7.2.2 Caracterización del asfalto o cemento asfáltico

Los ensayos de laboratorio que respaldan el uso del asfalto suministrado por Asfaltart, son:

Tabla 95. Caracterización del cemento asfáltico

Ensayo de Laboratorio	Valor	Norma	Especificaciones INVIAS
Penetración a 25°C (0.1mm)	63,5	I.N.V. E-706	60/70
Anillo y Bola °C	51	I.N.V. E-712	Si
Índice de Penetración	-0,37	I.N.V. E-724	Si
Viscosidad Pa-S	433,483	I.N.V. E-717	A 60°C
Ductilidad m	1,28	I.N.V. E-702	Min 1 m
Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland °C	230	I.N.V. E-709	Min 280

7.2.3 Caracterización de residuo industrial triturado cerámica

El material triturado de cerámica se sometió a la mayor cantidad de ensayos posibles, este material fue usado residuo de Cerámica Italia S.A. de la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander. En la Tabla 96 se observan los resultados y la normativa de comparación es la última columna.

Tabla 96. Caracterización del residuo de cerámica proveniente de Cúcuta, Colombia

Características	Norma INV	máximo	mínimo	resultado	cumple
Dureza, Agregado Grueso					
Degaste en la máquina de los Ángeles (%)	E-218	35	----	26,98	Si
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval (%)	E-238	30	----	8,00	Si
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos	E-224	----	----	267	Si
Valor en Seco (kN)				107,11	Si
Relación Húmedo/Seco (%)					
Durabilidad					
Perdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso (%)	E-220	18	----		Si
Impurezas en agregado grueso (%)	E-237	0,5	----	0	Si
Limpieza, gradación combinada					
Índice de plasticidad (%)	E-125 y E-126	NP	NP	0	Si
Equivalente de arena (%)	E-133	----	50		Si
Geometría de las partículas, agregado grueso					
Partículas planas y alargadas (%)	E-240	10	----	0,5	Si
Caras fracturadas (%)	E-227	----	75	100	Si
Geometría de las partículas, agregado fino					
Angularidad de la fracción fina (%)	E-239	----	40	36,62	

Fuente: (Instituto Nacional de Vías, INVIAS, 2013)

7.2.4 Caracterización micro del agregado y del residuo cerámico y geología de las fuentes

La planta de agregado o cantera tiene una ubicación geográfica cercana a la ciudad de Bucaramanga, donde fue extraído el material natural para el diseño de la mezcla asfáltica, en la Cantera de Pescadero, de la empresa Sánchez Construcciones S.A en la región del departamento de Santander en la República de Colombia (ver Figura 88. Ubicación de Bucaramanga en Santander Colombia y con más detalle Figura 89).



Figura 88. Ubicación de Bucaramanga en Santander Colombia

Fuente: Google Maps

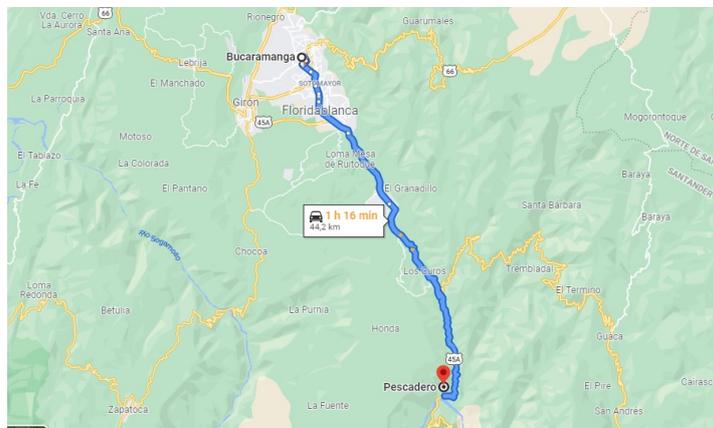


Figura 89. Ubicación cartográfica de la cantera Pescadero construcciones Sánchez SA

Fuente: Google Maps

En el Boletín Geológico, Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, se ubicó la zona de la fuente de agregados en la zona de Pescadero y después se ubicó el sitio de ubicación de las arcillas que se procesan para la industrialización de la cerámica. En la zona fuente de agregados de pescadero, río Chicamocha, las características son las siguientes:

“Suelo granular derivado del granito típico de Pescadero, de color rosado naranja, de grano fino a muy fino, equigranular a ligeramente porfírico, con fenocristales de feldespato potásico sólo ligeramente más grandes que el grano medio de la roca y unos pocos nidos dispersos de minerales máficos. Rocas con cavidades rellenas de cuarzo, pero se cree que están relacionadas con las fallas de la región, como la falla Bucaramanga. La zona se identifica como de rocas ígneas, granito de pescadero, rosado. Los depósitos fluviales inferiores parecen derivarse principalmente de areniscas jurásicas y cretáceas” (Ward, Goldsmith, Cruz B., & Restrepo A, 1973).

El Granito de Pescadero intruye la Formación Silgará de edad paleozoica, y en contacto fallado con el Neis de Bucaramanga, lo cubren inconformemente depósitos cuaternarios. (Servicio Geológico Colombiano, 2016)

La nomenclatura en cuadro rosado con las letras Jgp, corresponde a Granito de Pescadero (ver Figura 90)

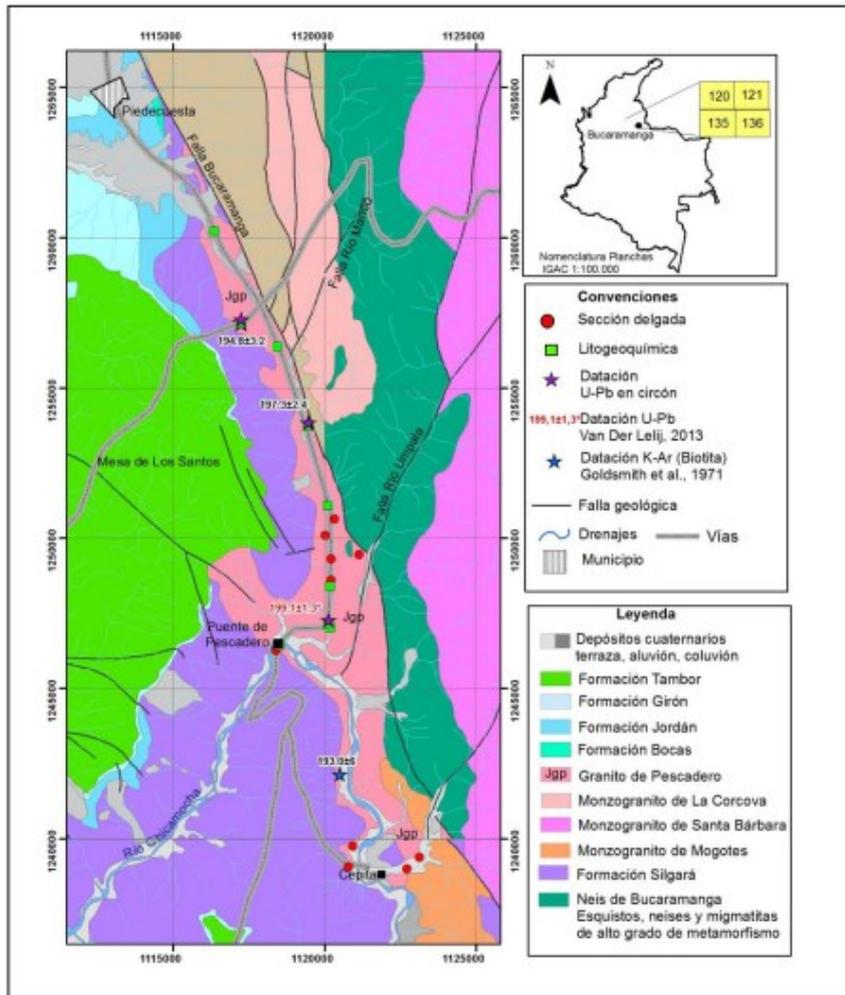


Figura 90. Geología fuente Pescadero en Santander, Colombia (Agregado)

Fuente: <https://tinyurl.com/3kj4n56>, 2022

El granito de pescadero se caracteriza por ser muy resistente y está en inmediaciones de la falla de Bucaramanga, lo que produce en la zona un constante movimiento de placas tectónicas, la cual produce que este material pueda ser arrastrado por el río Chicamocha y se acumule en zonas donde la pendiente del río se suaviza y forma playas de acumulación, lo que permite a los explotadores llamados “areneros” recoger material para ser usado en la industria de los pavimentos y de la construcción en Santander. Esa fuente es reconocida en el departamento por ser una de las que posee las propiedades de cumplir todos los parámetros establecidos por el INVIAS para el uso en concreto asfáltico (Lozano Picón & Romero Rueda, 1993).

De acuerdo a la geología de la zona de Cúcuta se encuentra que las características donde se encuentra la arcilla son: arcillolita marrón amarillenta, de dureza media, en la parte superior hay unas pocas capas de arenisca de grano grueso a muy grueso, arcillosa, feldespática, conglomerática, en capas de 20- 40 cm de grueso, lutitas color gris a verde. Las arcillas están ubicadas en la formación León y Guayabo con características favorables a los procesos de industrialización de la cerámica. Esas rocas se observan de tipo cuaternario como depósitos coluviales o aluviones (ver Figura 91) (Flórez Vargas, Sánchez Molina, & Blanco Meneses, 2018).

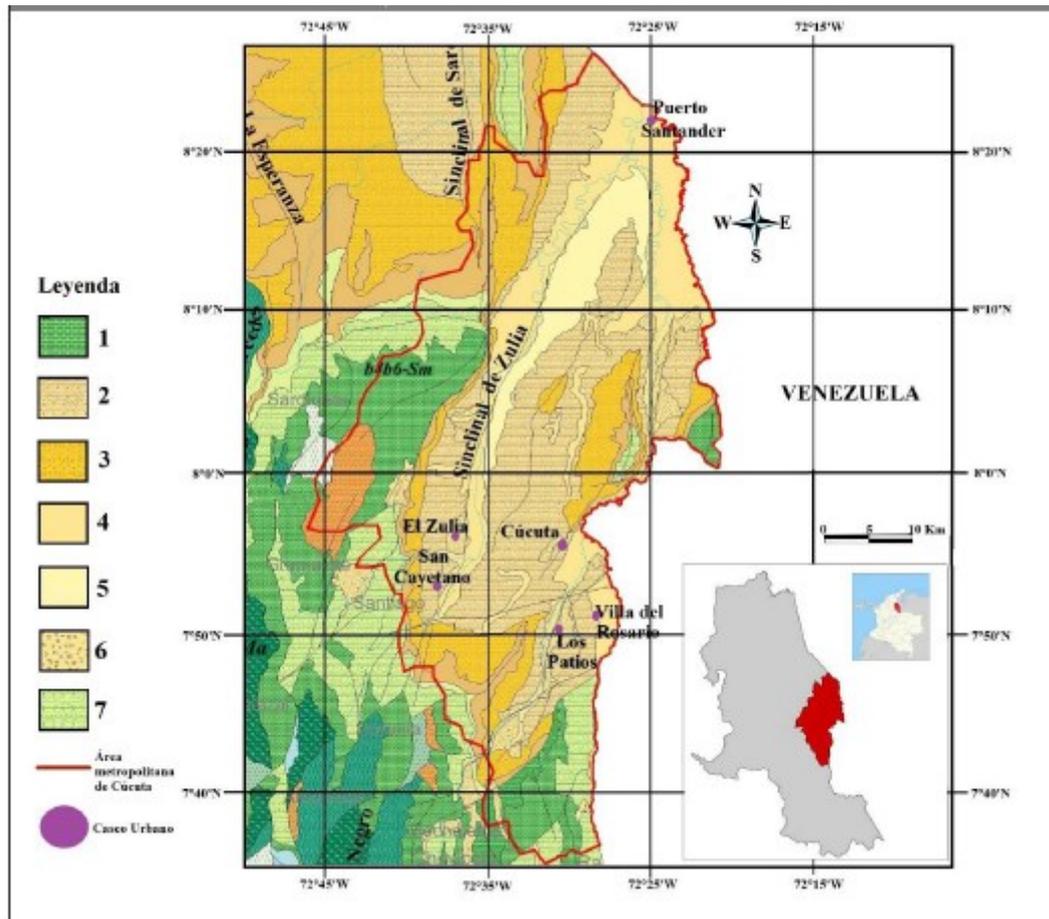


Figura 91. Geología de Cúcuta, Norte de Santander, Colombia (Ubicación de Arcilla)

Fuente: (Flórez Vargas, Sánchez Molina, & Blanco Meneses, 2018)

Para conocer con mayor detalle las Figura 92 y Figura 93, muestran la composición del agregado usado y se observa la variedad de elementos de diferentes tamaños, rugosidades, fracturas y formas.

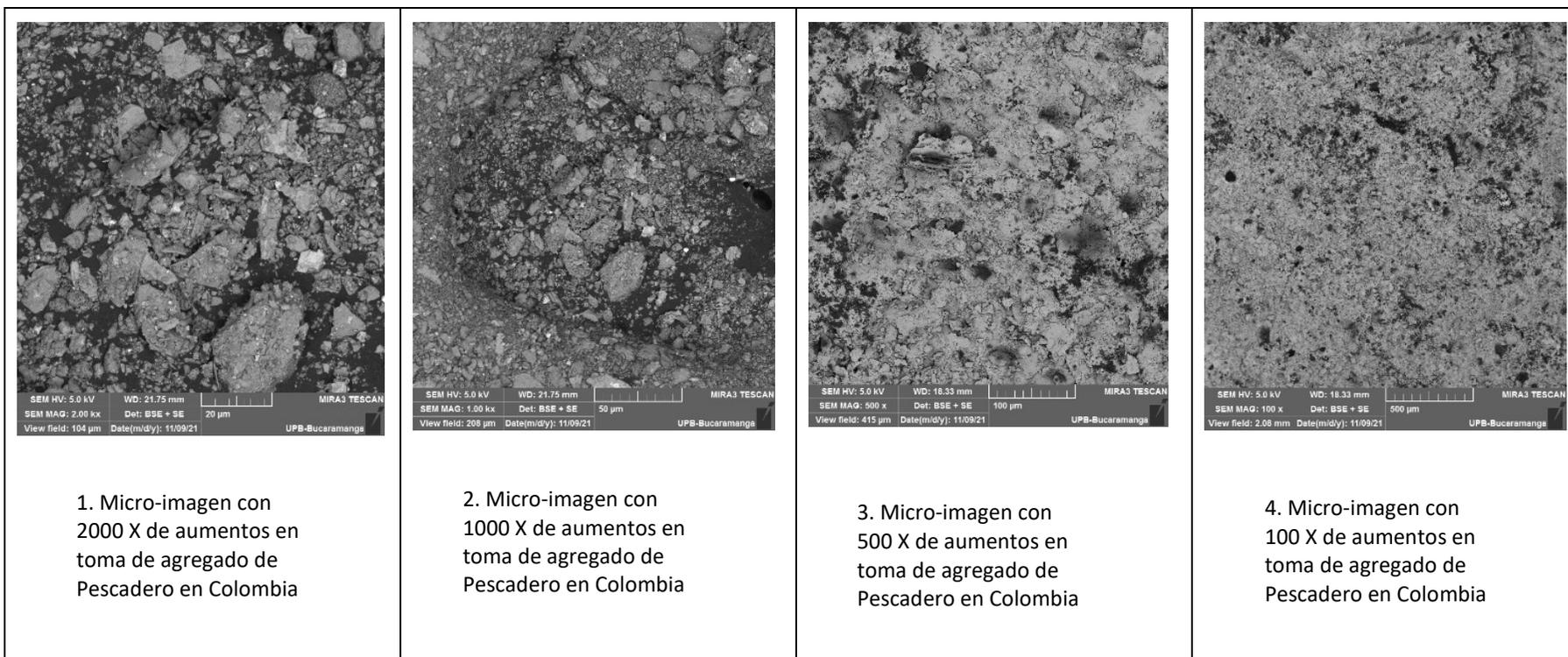
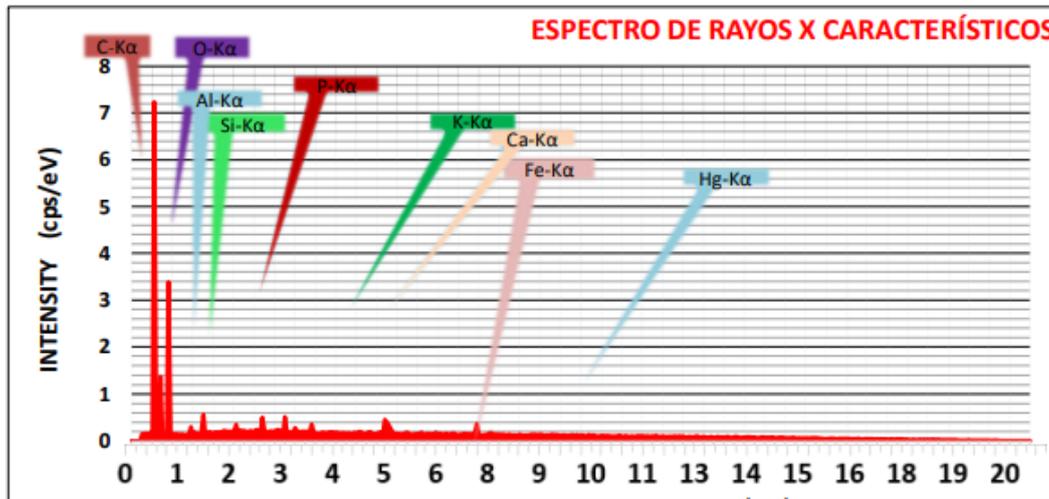


Figura 92. Micro-imagen agregado de Pescadero (Colombia)

Al observar el agregado de la fuente colombiana y generar el espectro de rayos por medio del MEB, se encuentra que predominan oxígeno, silicio y aluminio, los cuales son típicos en la composición mineralógica de los agregados usados en construcción, como compuestos se unen formando los silicatos aluminicos, que predominan en la corteza terrestre y se usan como insumos en la construcción.



Element	At. No.	Line S.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	Abs. Error [%] 1 sigma	Abs. Error [%] 2 sigma	Abs. Error [%] 3 sigma
Carbono	6	K-serie	10542	5,62	6,54	9,63	0,92	1,83	2,75
Oxígeno	8	K-serie	5943	43,33	57,01	68,15	13,68	27,36	41,05
Silicio	14	K-serie	1902	10,21	12,16	7,19	1,95	3,89	5,84
Aluminio	13	K-serie	2066	9,67	13,25	10,56	3,58	7,16	10,73
Potasio	19	K-serie	945	1,40	1,82	0,67	0,42	0,84	1,25
Calcio	20	K-serie	832	1,78	2,14	0,60	0,36	0,73	1,09
Hierro	26	K-serie	470	2,37	3,25	1,66	0,88	1,75	2,63
Fósforo	15	K-serie	1483	1,49	1,86	0,60	0,37	0,74	1,12
Mercurio	80	M-serie	1294	1,54	1,98	0,94	0,43	0,87	1,30
				77,42	100,00	100,00			

Figura 93. Espectro de rayos MEB agregado de Colombia

En este caso las masas normalizadas más predominantes son el oxígeno, silicio y aluminio. Hay presencia de otros elementos en menor cantidad como hierro y fosforo.

Con el MEB se generaron las micro-imágenes de la cerámica industrial triturada proveniente de la región de Norte de Santander, encontrando la Figura 94, la cual muestra diferentes escalas de acercamiento la primera corresponde a aumento de 2000x, pasando por 1000x, por 500x y finalmente por 100x aumentos. En ellas se observa los diferentes patrones de tamaños de grano, en donde el aumento de 2000x muestra que el índice de tamaño de grano es alto, se observan microgranos con una gran densidad, lo cual puede ser conveniente para la cohesión y la fricción entre partículas (UPV, 2021).

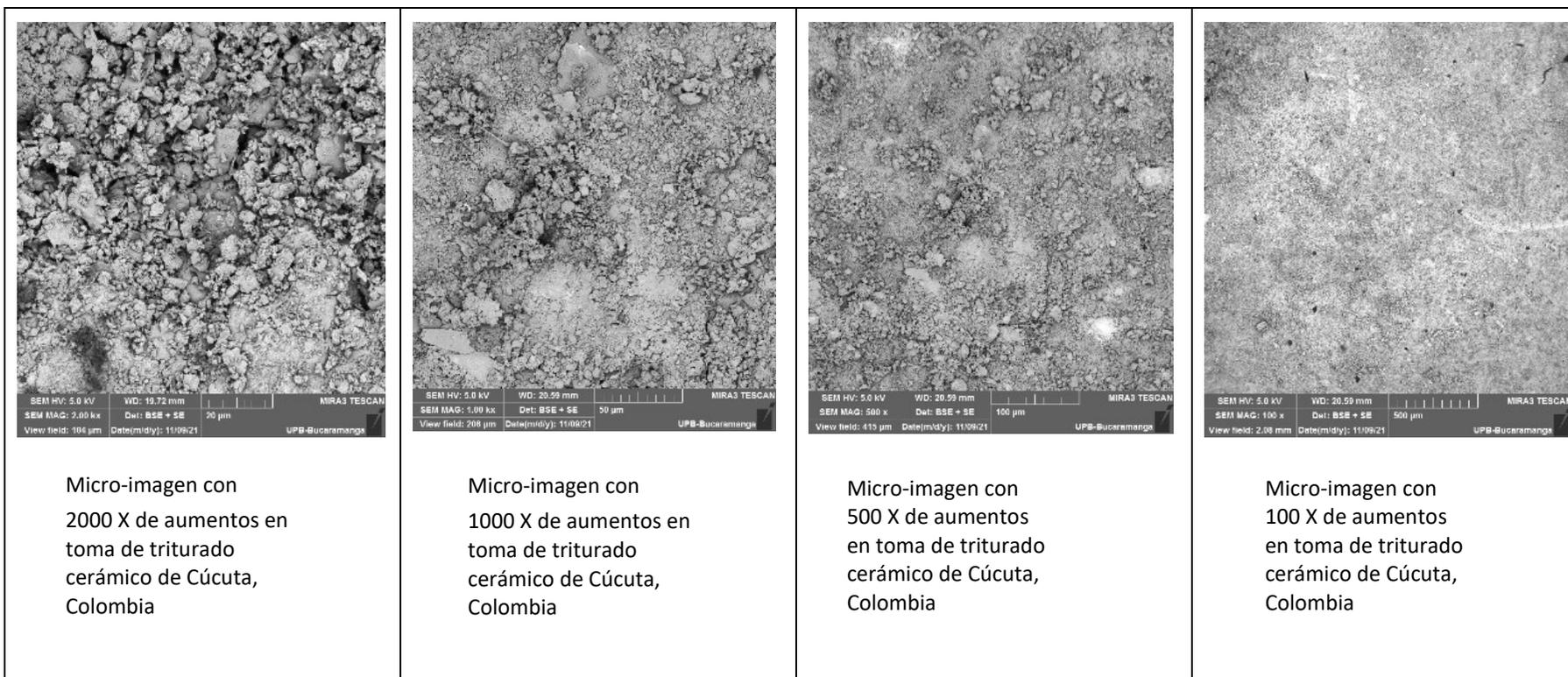


Figura 94. Micro-imágenes residuos de cerámica triturada colombiana

Dentro de los elementos predominantes de la cerámica usada en Colombia se tienen el oxígeno, el silicio y el aluminio, y después le sigue el calcio como elemento de mayor intensidad en el triturado (ver Figura 95).

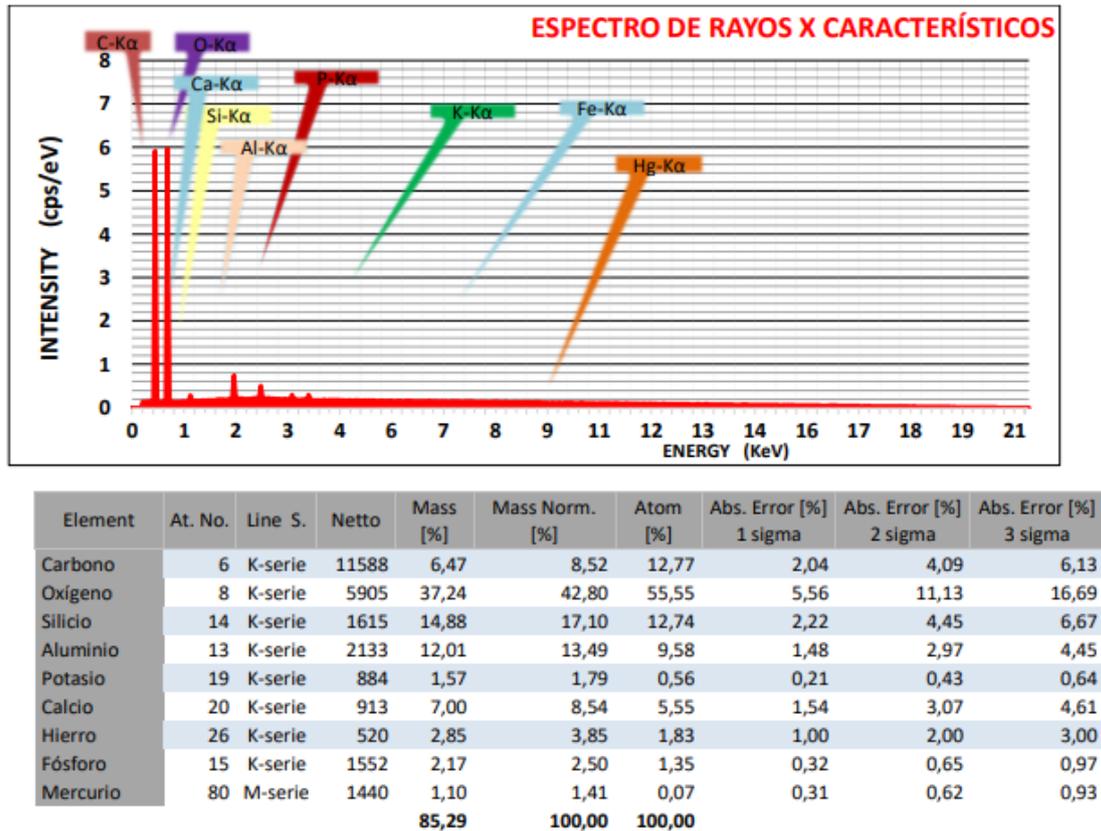


Figura 95. Espectro de rayos MEB de cerámica colombiana

De las microfotografías se observa una similitud en la morfología de los agregados de Pescadero y el triturado cerámico industrial de Cúcuta, siendo esto favorable para la uniformidad de la mezcla asfáltica.

7.2.5 Construcción de la fórmula de trabajo para mezcla Patrón Colombia

Teniendo en cuenta que la Tabla 450-6 – Franjas granulométricas para mezclas asfálticas de gradación continua del capítulo 450 de las Especificaciones Técnicas de Construcción de Carreteras del INVIAS para el tipo de mezcla escogido se aplicó el ensayo de gradación a tres (3) grupos de agregados clasificados de cada una de las tolvas provenientes de la Planta de Pescadero de la empresa Sánchez Construcciones S.A.

Tabla 97. Resumen de la fórmula de trabajo MSC-25 Patrón (Colombia)

Tamiz	Abertura [mm]	Tolva 3/4"	Tolva 1/2"	Tolva Arena	Tolva 3/4"	Tolva 1/2"	Tolva Arena	Formula	Limites Especificación	
		Pasa [%]	Pasa [%]	Pasa [%]	% Participación				Inferior	Superior
					22%	8%	70%			
1"	25	100%	100%	100%	22,0%	8,00%	70,00%	100%	100%	100%
3/4"	19	47,72	99,53	100,00	10,50	7,96%	70,00%	88,46	80%	95%
1/2"	12,5	0,37%	34,59%	100,00%	0,08%	2,77%	70,00%	72,85%	65%	80%
3/8"	9,5	0,02%	1,38%	98,14%	0,01%	0,11%	68,70%	68,82%	55%	70%
No.4	4,75	0,02%	0,04%	74,61%	0,01%	0,00%	52,23%	52,24%	40%	55%
No.10	2	0,02%	0,04%	51,04%	0,00%	0,00%	35,73%	35,73%	24%	38%
No.40	0,425	0,02%	0,02%	18,93%	0,00%	0,00%	13,25%	13,26%	9%	20%
No.80	0,18	0,02%	0,01%	9,80%	0,00%	0,00%	6,37%	6,38%	6%	12%
No.200	0,075	0,00%	0,00%	4,80%	0,00%	0,00%	3,12%	3,12%	3%	7%
Fondo	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

A continuación, se presenta la Figura 96. Fórmula del trabajo mezcla asfáltica Patrón, en donde se observan los límites superior e inferior dados por INVIAS, en color naranja y gris y se muestra la combinación resultante de la curva granulométrica obtenida en la Tabla 97. Resumen de la fórmula de trabajo MSC-25.

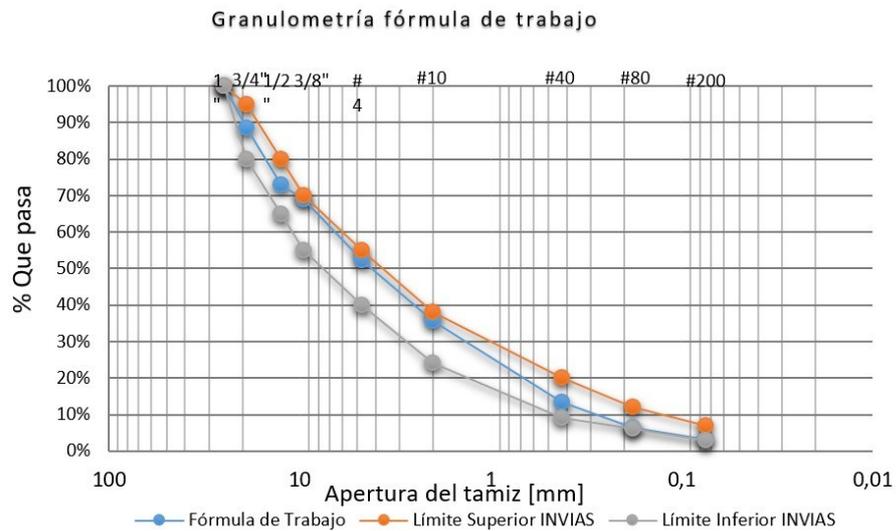


Figura 96. Fórmula del trabajo mezcla asfáltica Patrón (Colombia)

Con el fin de ampliar el análisis de la caracterización del material de agregado, se ha plasmado en la Figura 97, la gráfica de Füller como aporte al análisis del agregado el cual se muestra la fórmula de trabajo cercana a la línea de máxima densidad, pero no coincide en todo su desarrollo.

Gráfica de Füller granulometría fórmula de trabajo

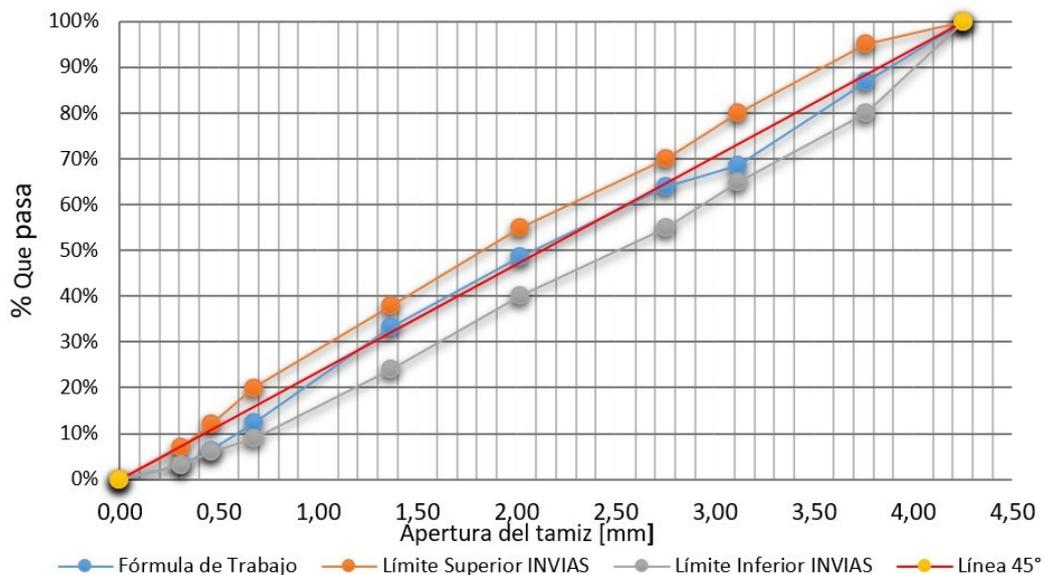


Figura 97. Representación de la gráfica de Füller fórmula de Trabajo (Colombia)

7.2.6 Construcción de la fórmula de trabajo para mezcla con triturado de cerámica 30% Colombia

Con los mismos agregados y con los triturados de cerámica se procedió a reemplazar 30% del material reemplazando las tolvas Arena y en su lugar se incluyó triturado cerámico de los mismos tamaños, cuyo aporte granulométrico se incluyó para consolidar el aporte en la fórmula de trabajo que corresponde a la última columna de la Tabla 98.

Tabla 98. Fórmula de Trabajo MAC con inclusión de 30% de triturado de cerámica (Colombia)

Tamiz	Abertura [mm]	Tolva 3/4"	Tolva 1/2"	Tolva Arena	Tolva Arena	Agregado Natural			Tolva Cerámica			
		Pasa [%]	Pasa [%]	Pasa [%]	Pasa [%]	20,40%	12,60%	37%	30%	Formula	Inferior	Superior
1"	25	100	100	100	100	20,40%	12,60%	37,00%	30,00%	100,00%	100%	100%
3/4"	19	47,72	99,53	100	100	9,73%	12,54%	37,00%	30,00%	89,28%	80%	95%
1/2"	12,5	0,37	34,59	100	100	0,08%	4,36%	37,00%	30,00%	71,43%	65%	80%
3/8"	9,5	0,02	1,38	98,14	100	0,00%	0,17%	36,31%	30,00%	66,49%	55%	70%
No.4	4,75	0,02	0,04	74,61	71,92	0,00%	0,01%	27,61%	21,57%	49,19%	40%	55%
No.10	2	0,02	0,04	51,04	43,03	0,00%	0,01%	18,88%	12,91%	31,80%	24%	38%
No.40	0,425	0,02	0,02	18,93	19,56	0,00%	0,00%	7,00%	5,87%	12,88%	9%	20%
No.80	0,18	0,02	0,01	8,98	14,14	0,00%	0,00%	3,32%	4,24%	7,57%	6%	12%
No.200	0,075	0	0	4,45	5,52	0,00%	0,00%	1,65%	1,65%	3,30%	3%	7%

En la Figura 98, se observa en color azul la curva granulométrica obtenida de la combinación de los aportes de cada una de las tolvas existentes en la planta de Sánchez Construcciones y reemplazando las tolvas de arena por triturado industrial cerámico en una proporción del 30%. También se incluye la curva de Füller para ampliar las consideraciones sobre esta fórmula de trabajo (ver Figura 99). En ambas figuras el agregado está cumpliendo con las especificaciones INVIAS.

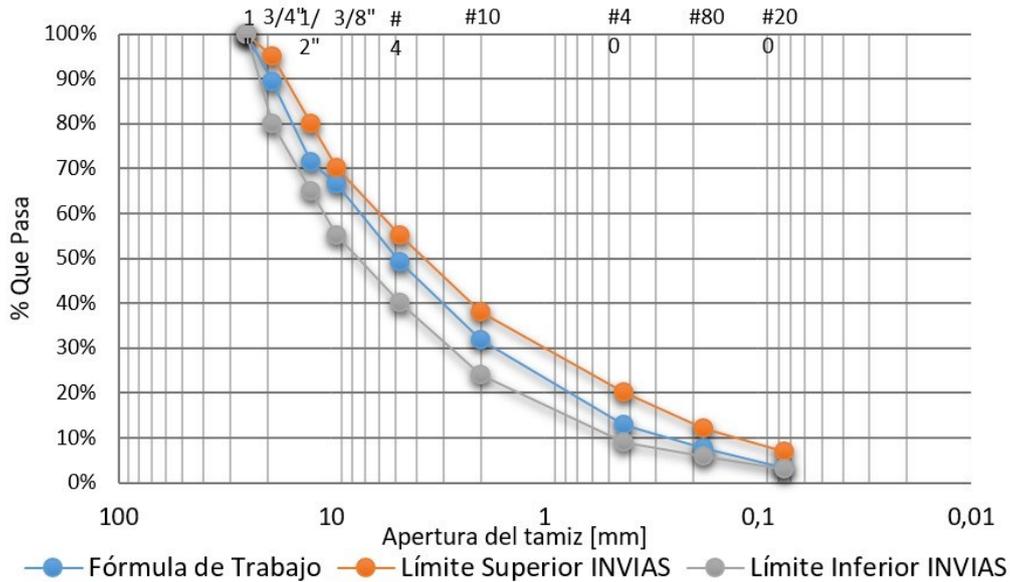


Figura 98. Fórmula de trabajo MAC con 30% Cerámica (Colombia)

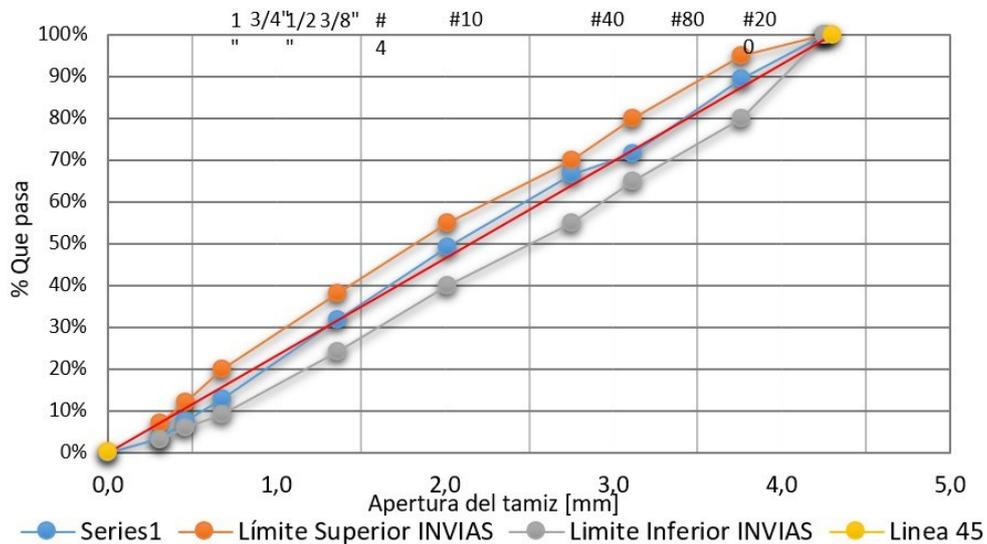


Figura 99. Gráfica de Füller fórmula de trabajo MAC 30% cerámica (Colombia)

7.2.7 Construcción de la fórmula de trabajo para mezcla con triturado de cerámica 35% Colombia

A continuación, el reemplazo de árido en proporción de 35% de triturado cerámico, en la siguiente Tabla 99, se visualiza la curva granulométrica consolidada de la combinación de la granulometría de todas las tolvas usadas en la generación de una MAC con las especificaciones anotadas.

Tabla 99. Fórmula de Trabajo de MAC con inclusión de 35% de triturado cerámica

Tamiz	Abertura [mm]	Tolva 3/4"	Tolva 1/2"	Tolva Arena	Tolva Arena	Agregado Natural			Tolva Cerámica	Formula	Inferior	Superior
		Pasa [%]	Pasa [%]	Pasa [%]	Pasa [%]	20,40%	14,60%	30%	35%			
1"	25	100	100	100	100	20,40%	14,6	30	35	100,00%	100%	100%
3/4"	19	47,72	99,53	100	100	9,73%	6,96712	29,859	35	89,27%	80%	95%
1/2"	12,5	0,37	34,59	100	100	0,08%	0,05402	10,377	35	70,13%	65%	80%
3/8"	9,5	0,02	1,38	98,14	100	0,00%	0,00292	0,414	35	64,65%	55%	70%
No.4	4,75	0,02	0,04	74,61	71,92	0,00%	0,00292	0,012	25,172	47,56%	40%	55%
No.10	2	0,02	0,04	51,04	43,03	0,00%	0,00292	0,012	15,0605	30,38%	24%	38%
No.40	0,425	0,02	0,02	18,93	19,56	0,00%	0,00292	0,006	6,846	12,53%	9%	20%
No.80	0,18	0,02	0,01	8,98	14,14	0,00%	0,00292	0,003	4,949	7,65%	6%	12%
No.200	0,075	0	0	4,45	5,52	0,00%	0	0	1,932	3,27%	3%	7%

Estos mismos valores se presentan en la Figura 100, se observa la curva resultante de la combinación de las tolvas almacenadoras de agregados y en este caso con la inclusión en reemplazo de triturado cerámico al 35% del total del árido o agregados. Al igual que en las otras mezclas se amplió la revisión del cumplimiento de las especificaciones de los materiales con el desarrollo de la curva de Füller (ver Figura 101).

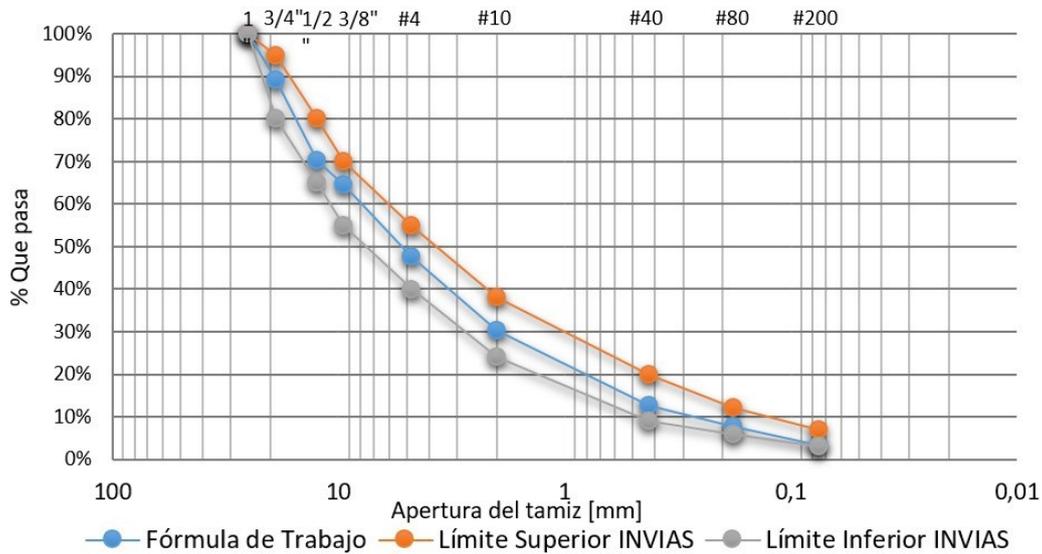


Figura 100. Fórmula de Trabajo de MAC con inclusión de 35% de cerámica

Granulometría Fórmula de Trabajo Gráfica de Fuller Mezcla Modificada

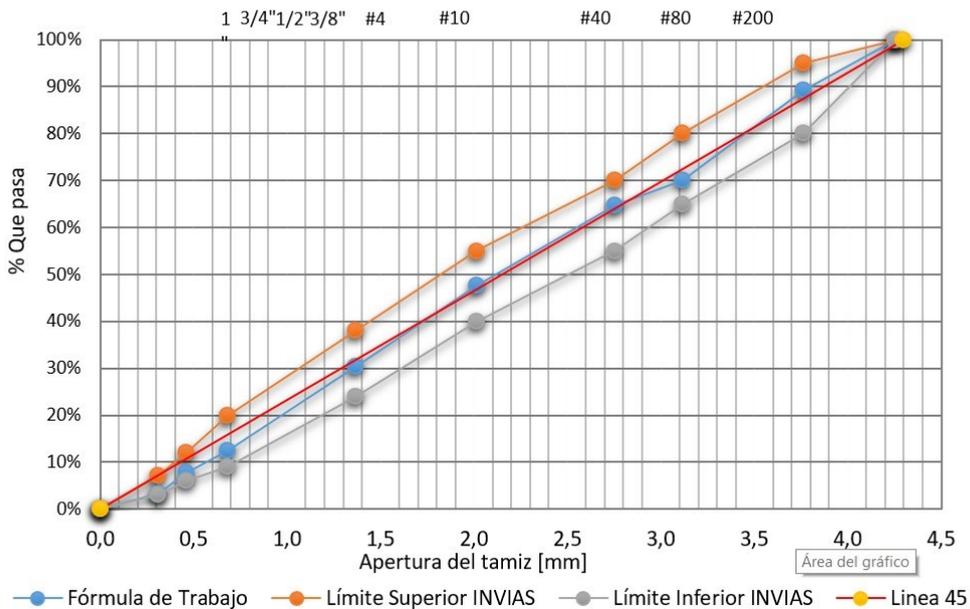


Figura 101. Gráfica de Füller Fórmula de Trabajo MAC 35% Cerámica

7.2.8 Construcción de la fórmula de trabajo para mezcla con triturado de cerámica 40%

También se calculó la fórmula de trabajo con uso de 40% de triturado cerámico encontrando la siguiente combinación, se reemplazaron lo correspondiente a la tolva de arena en un 40% de cerámica triturada.

Tabla 100.Fórmula de trabajo para MAC con triturado cerámica al 40%

Tamiz	Abertura [mm]	Tolva 3/4"	Tolva 1/2"	Tolva Arena	Tolva Arena	Agregado Natural				Tolva Cerámica		
		Pasa [%]	Pasa [%]	Pasa [%]	Pasa [%]	15,40%	14,60%	30%	40%	Formula	Inferior	Superior
1"	25	100	100	100	100	15,40%	14,60%	30,00%	40,00%	100,00%	100%	100%
3/4"	19	47,72	99,53	100	100	7,35%	14,53%	30,00%	40,00%	89,27%	80%	95%
1/2"	12,5	0,37	34,59	100	100	0,06%	5,05%	30,00%	40,00%	70,13%	65%	80%
3/8"	9,5	0,02	1,38	98,14	100	0,00%	0,20%	29,44%	40,00%	64,65%	55%	70%
No.4	4,75	0,02	0,04	74,61	71,92	0,00%	0,01%	22,38%	28,77%	47,56%	40%	55%
No.10	2	0,02	0,04	51,04	43,03	0,00%	0,01%	15,31%	17,21%	30,38%	24%	38%
No.40	0,425	0,02	0,02	18,93	19,56	0,00%	0,00%	5,68%	7,82%	12,53%	9%	20%
No.80	0,18	0,02	0,01	8,98	14,14	0,00%	0,00%	2,69%	5,66%	7,65%	6%	12%
No.200	0,075	0	0	4,45	5,52	0,00%	0,00%	1,34%	2,21%	3,27%	3%	7%

A continuación, la Figura 102, muestra la combinatoria generada para obtener la fórmula de trabajo dentro de la franja granulométrica establecida por el INVIAS para el tipo de mezclas que se está estudiando.

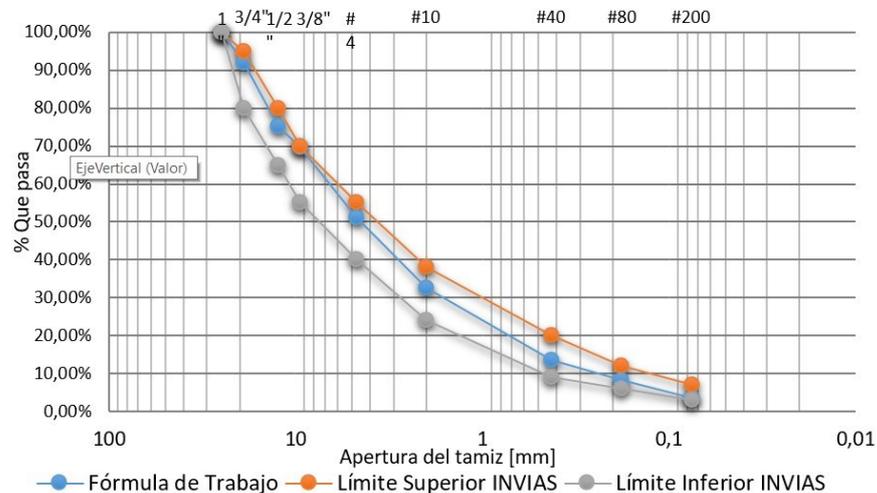


Figura 102. Fórmula de Trabajo MAC con reemplazo de 40% de triturado de cerámica

7.2.9 Construcción de las probetas tamaño Marshall de las mezclas de estudio

Con la fórmula de trabajo se procedió al alistamiento del material, tamizando las cantidades necesarias para lograr probetas de peso aproximado de 1200 gramos y en cada porcentaje de ligante (3.5%, 4%, 5%, 5.5%, 6%) o familia conformada por tres probetas de igual porcentaje de ligante, es decir la mezcla se hizo por un peso de mezcla de aproximadamente 3780 gramos, contemplando un desperdicio de 5% del total. Estas fueron construidas con un control de temperatura de los áridos de 160°C y temperatura del betún de 150°C, y una temperatura de mezcla de 135-145°C, usando un mezclado manual. Se tuvo cuidado de que los áridos o agregados estuvieran cubiertos completamente con el asfalto, en el menor tiempo posible de mezclados.

Una vez hecha la mezcla, se procedió a dividir en bandejas lo correspondiente a cada probeta, aproximadamente 1200 gramos y a medida que se construían las demás esperaban en el horno a temperatura controlada. Para el desarrollo de las probetas se utilizó un equipo mecánico de compactación Marshall. Se trabajó a la mayor velocidad posible, manteniendo las condiciones de seguridad industrial. Los moldes extraídos del horno se acomodaron en el anillo del pedestal, encajados adecuadamente con la base, el collar correspondiente y con el martillo de 4,515 gramos aproximadamente, se colocó papel filtro abajo, se depositó la mezcla caliente, a la cual se le aplicaron golpes de acomodamiento con una varilla, se colocó nuevamente papel filtro y se aplicaron 75 golpes por cada cara, con lo anterior, se logró la construcción de probetas de buscando la medida ideal de 63.5 mm de alto y 100 mm de diámetro.

Posteriormente, se usó el equipo establecido para sacar las probetas Marshall, el cual permitió la extracción de las mismas, en los tiempos exigidos, estas se dejaron marcadas, sin papel filtro y a temperatura ambiente durante 24 horas.

Este procedimiento se repitió tanto para las MAC Patrón como para las MAC con reemplazo de triturado de cerámica. Se evidenció que a medida que aumentaba el porcentaje de cerámica, la altura de estas muestras aumentaba, por lo que tuvo mayor dificultad en el manejo del reemplazo de triturado de cerámica más alto (40%) debido a que la manejabilidad de la mezcla se resultó afectada. Al igual que las probetas de España, estas probetas, se construyeron.

7.2.10 Obtención del porcentaje óptimo de asfalto

Una vez cumplido el tiempo de reposo de las probetas, se procedió a medir sus dimensiones alturas y diámetros, cada una con tres mediciones que se promediaron. Posteriormente, se pesaron al aire libre obteniendo el peso seco, W_s . Luego se sumergieron en agua y se permitió que alrededor de (cinco) 5 minutos permaneciera sumergida la probeta, buscando que la saturación fuera adecuada. De esta forma se tomó el peso sumergido, W_{ws} , y posteriormente, con un paño húmedo se eliminó el agua que reposaba en la superficie de la probeta, y se colocó en la báscula para obtener el peso en estado saturado superficialmente seco, W_{sss} . Con dichos pesos y medidas se obtuvo la densidad aparente, la densidad máxima medida usadas en el cálculo del porcentaje óptimo de asfalto, para la obtención del porcentaje de huecos o vacíos en la mezcla bituminosa.

Sin embargo, se sometieron las probetas a la aplicación del ensayo de estabilidad y deformación. Una vez se analizaron los datos, se desarrollaron las figuras de apoyo en la metodología Marshall, y se eligió un porcentaje óptimo de betún que cumpliera con las especificaciones técnicas de construcción de carreteras del INVIAS.

Posteriormente se realizó el ensayo de susceptibilidad al agua se construyeron seis probetas con el porcentaje óptimo de asfalto seleccionado, se sometieron a extracción de aire, se introdujeron tres (3) probetas sumergidas en agua a la cámara de control de temperatura a 25°C y las otras tres (3) probetas se introdujeron a la cámara, pero secas completamente. (I.N.V E-725, 2013). Después de cumplir el tiempo, se procedió a aplicar la fuerza a tracción indirecta para calcular la relación en porcentaje de las fuerzas aplicadas entre las probetas secas y las sumergidas en agua, esto con el fin de confirmar el porcentaje óptimo escogido al compararlo con las exigencias de las Especificaciones Técnicas de Construcción INVIAS.

7.2.10.1 MAC Patrón

En la Tabla 101. Resultados Diseño MAC Patrón, se consignaron los parámetros obtenidos en cada una de los promedios de las familias de probetas realizados con cada uno de los porcentajes de asfalto y con la fórmula de trabajo obtenida. Esta parte fue desarrollada con el apoyo de estudiantes de la facultad de ingeniería civil de la Universidad Pontificia Bolivariana en el desarrollo de su proyecto de grado (Triana Nigrinis & Grandas Castillo, 2019).

Tabla 101. Resultados Diseño MAC Patrón

Familia	Nº	I	II	III	IV	V	VI	VII
Asfalto	%	3,5	4	4,5	5	5,5	6,0	6,5
Densidad	g/cm ³	2,19	2,20	2,23	2,24	2,27	2,28	2,31
Densidad Máxima	g/cm ³	2,51	2,53	2,47	2,47	2,47	2,4	2,35
% Vacíos Agregado Mineral	%	17,4	17,589	16,96	17,02	16,135	16,187	15,697
% Vacíos con Aire	%	12,69	13,135	9,726	9,241	4,893	2,996	1,89
Relación Llenante/Asfalto	L/A	1,45	1,54	1,25	1,25	1,15	0,90	0,82
Adherencia % Perdida	%			5,0%				
				88,8				
Estabilidad Marshall	kN	12,48	12,51	16,08	16,85	18,21	18,48	12,36
Flujo Marshall	mm	3,3	3,0	3,5	3,3	3,5	3,6	3,78

Y con este resumen se generaron las siguientes figuras: Figura 103. Densidad vs Asfalto de la MAC Patrón, Figura 104. Vacíos de Aire vs Asfalto de la MAC Patrón, Figura 105. Relación llenante/asfalto vs Asfalto MAC Patrón, Figura 106. Vacíos de Agregado Mineral vs Asfalto MAC Patrón, Figura 107. Estabilidad vs Asfalto MAC Patrón y Figura 108. Deformación o Flujo vs Ligante MAC Patrón. Una vez obtenidas estas figuras para establecer el valor óptimo de la mezcla, se consideró las especificaciones establecidas INVIAS y se confirmó con el ensayo de adherencia (I.N.V E-725, 2013).

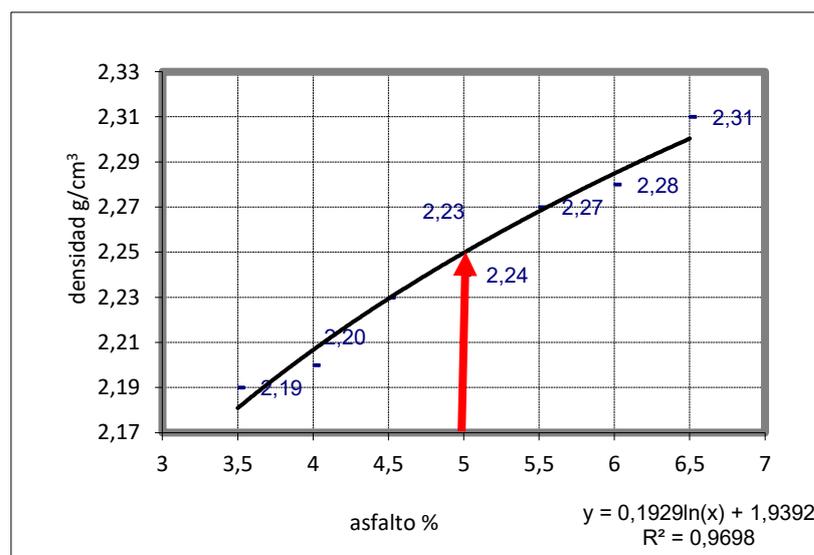


Figura 103. Densidad vs Asfalto de la MAC Patrón

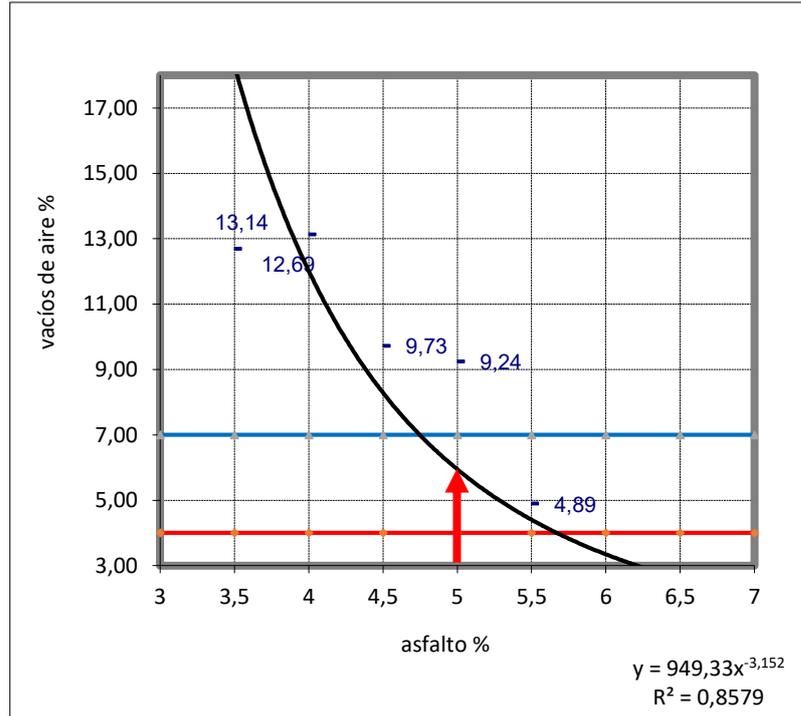


Figura 104. Vacíos de Aire vs Asfalto de la MAC Patrón

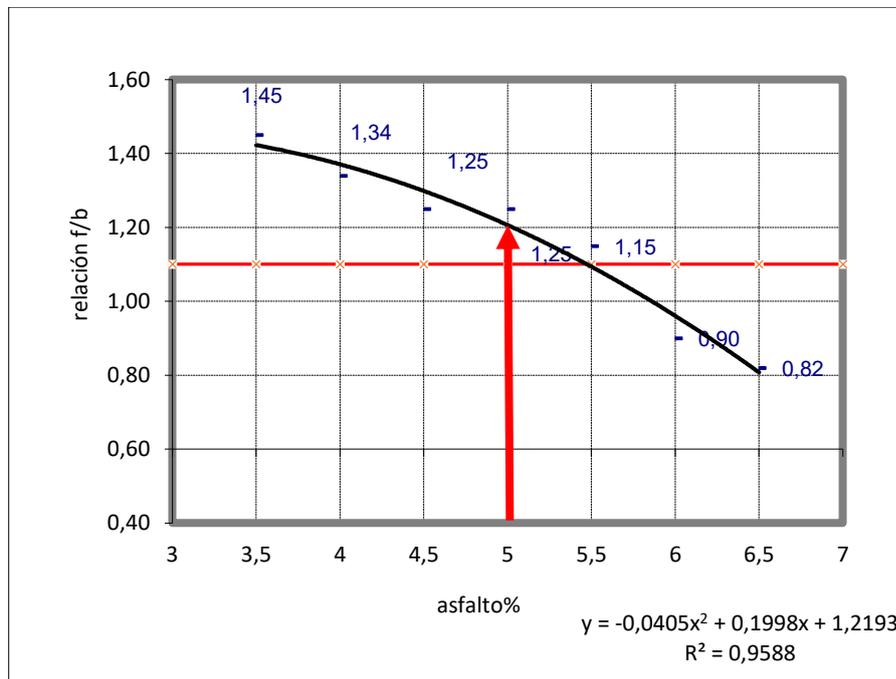


Figura 105. Relación Llenante/asfalto vs Asfalto MAC Patrón

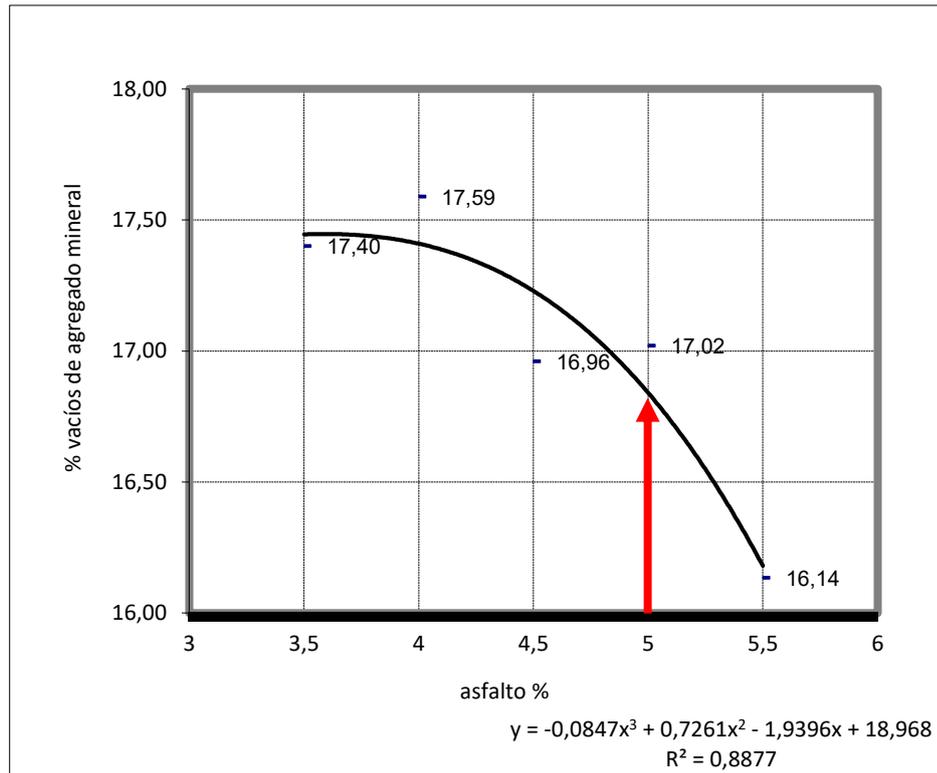


Figura 106. Vacíos de Agregado Mineral vs Asfalto MAC Patrón

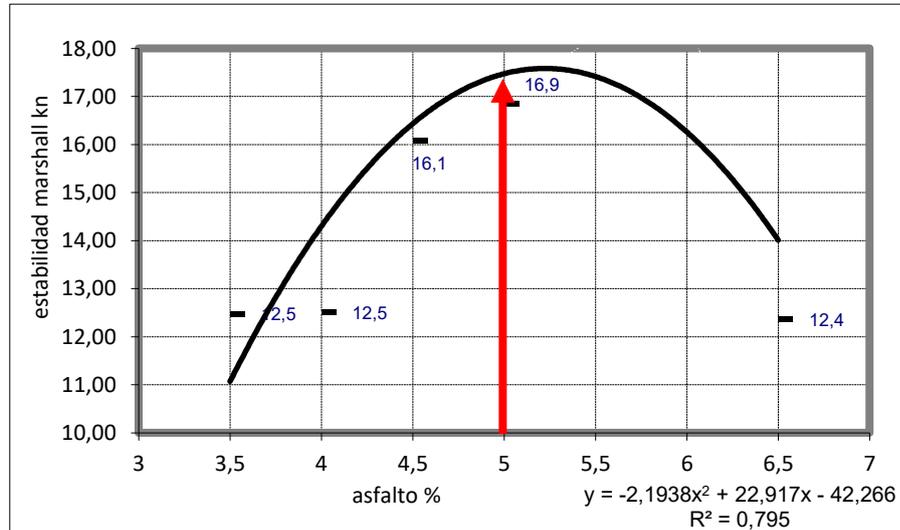


Figura 107. Estabilidad vs Asfalto MAC Patrón

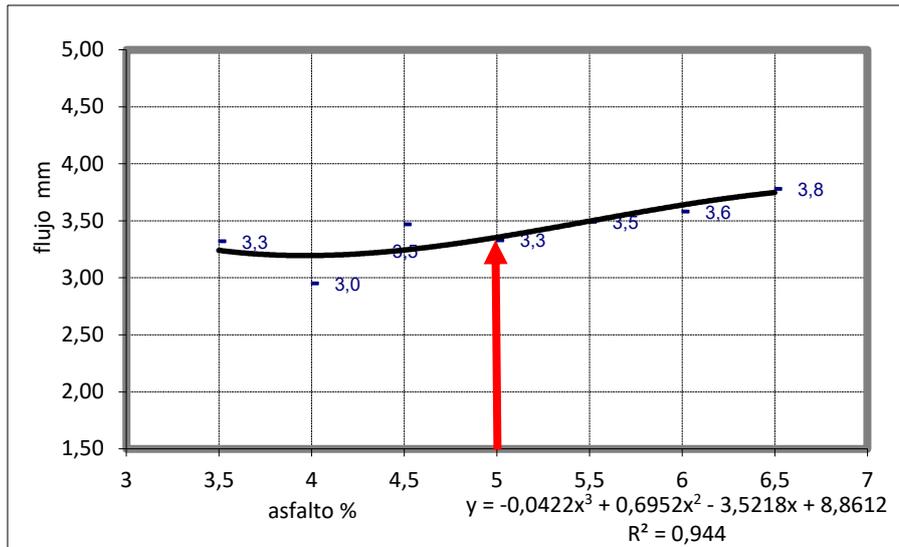


Figura 108. Deformación o Flujo vs Ligante MAC Patrón

Tabla 102. Diseño MAC MSC25 Patrón - INVIAS

MSC25 Patrón – INVIAS		
Parámetros	Límites	Valores
Densidad aparente (kg/m ³)		2250
Densidad máxima (kg/m ³)		2467
%Vacíos de Aire	4 - 7	5,9
%Vacíos de agregado Mineral	≥14%	16,83
Estabilidad Marshall (KN)	> 12,5	16,98
Flujo Marshall (mm)	2 - 4	3,5
Sensibilidad (%)	> 80%	88,8
Cociente de Filler/Asfalto	1,1	1,2
Porcentaje Óptimo de Asfalto	> 4%	5,0%

Tabla 103. Verificación MAC MSC Patrón INVIAS

MSC25 Patrón – Verificación Marshall		
Parámetros	Límites	Valores
Sensibilidad	>80%	88,8%
Módulo resiliente (MPa)	Reportar	19840 - 5°C 6056 - 25°C 2236 - 40°C
Porcentaje Óptimo de Betún	Reportar	5,0%

Con la construcción de las figuras y con base en las recomendaciones de las Especificaciones Técnicas de Carreteras del INVIAS se eligió el porcentaje óptimo de ligante de la MAC Patrón, de

tal manera que el valor cumpliera con la totalidad de los parámetros. Se verificó principalmente el cumplimiento de los parámetros de porcentaje de huecos por ser el parámetro indicativo de la PG-3 para controlar en el diseño de mezcla bituminosa. En el caso de la MAC Patrón el valor de 5,0%, es definido como el porcentaje óptimo de ligante.

7.2.10.2 MAC con reemplazo del 30% de triturado de cerámica

En la Tabla 104, se consignaron los parámetros obtenidos en cada una de los promedios de las familias de probetas realizados con cada uno de los porcentajes de ligante y con la fórmula de trabajo obtenida.

Tabla 104. Resultados Diseño MAC 30% Cerámica

Familia	Nº	I	II	III	IV	V	VI
Ligante	%	3,5	4	4,5	5	5,5	6
Densidad	g/cm ³	2,064	2,107	2,136	2,141	2,177	2,179
Densidad Máxima	g/cm ³	2,397	2,337	2,316	2,318	2,326	2,311
% Huecos Agregado Mineral	%	16,02	14,73	14,01	14,27	14,10	13,66
% Huecos Mezcla	%	13,88	9,86	7,80	7,68	6,51	5,74
Relación F/B	F/B	1,485	1,45	1,15	1,09	1,06	0,92
ITSR % Pérdida	%			5,20%			
				82,6			
Estabilidad Marshall	kN	6,09	11,44	12,82	13,54	14,30	14,85
Deformación Marshall	mm	2,8	3,4	3,6	3,4	3,5	3,0

Y con este resumen se generaron las siguientes figuras: Figura 109. Densidad vs Asfalto de la MAC 30% cerámica, Figura 110. Vacíos Mezcla % vs Asfalto MAC 30% cerámica, Figura 112. Vacíos en agregado mineral % vs asfalto MAC 30% cerámica, Figura 113. Estabilidad Marshall vs asfalto MAC 30% cerámica y Figura 114. Flujo vs asfalto MAC 30% cerámica. Una vez obtenidas estas figuras para establecer el valor óptimo de la mezcla, se consideró las especificaciones técnicas de carreteras del INVIAS confirmándose el valor al completar la metodología Marshall.

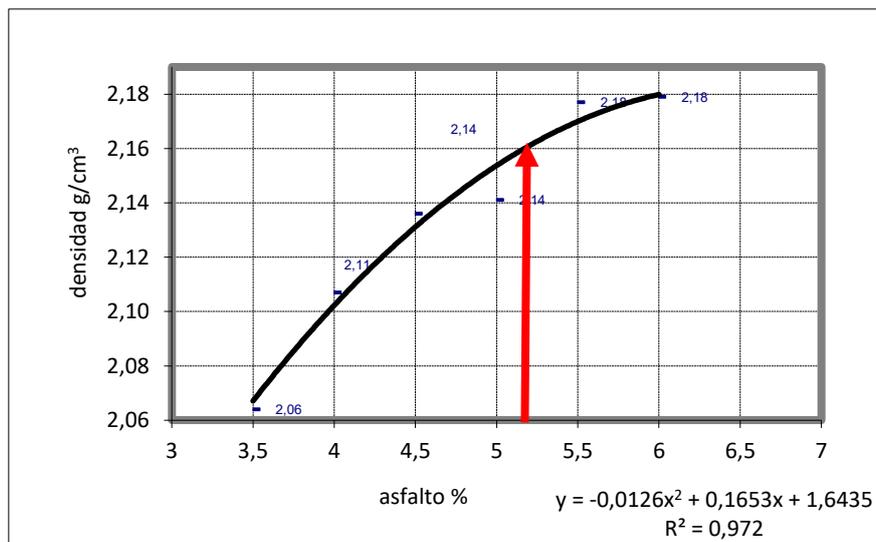


Figura 109. Densidad vs Asfalto de la MAC 30% cerámica

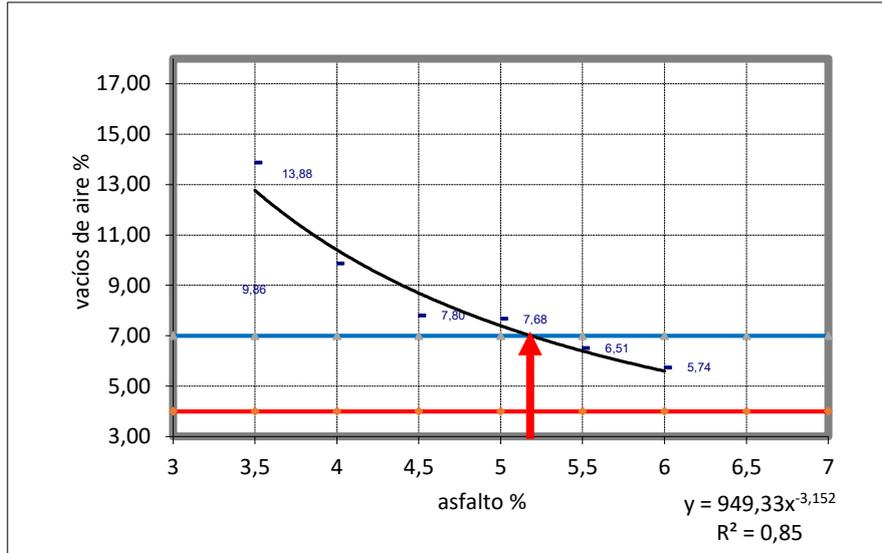


Figura 110. Vacíos Mezcla % vs Asfalto MAC 30% cerámica

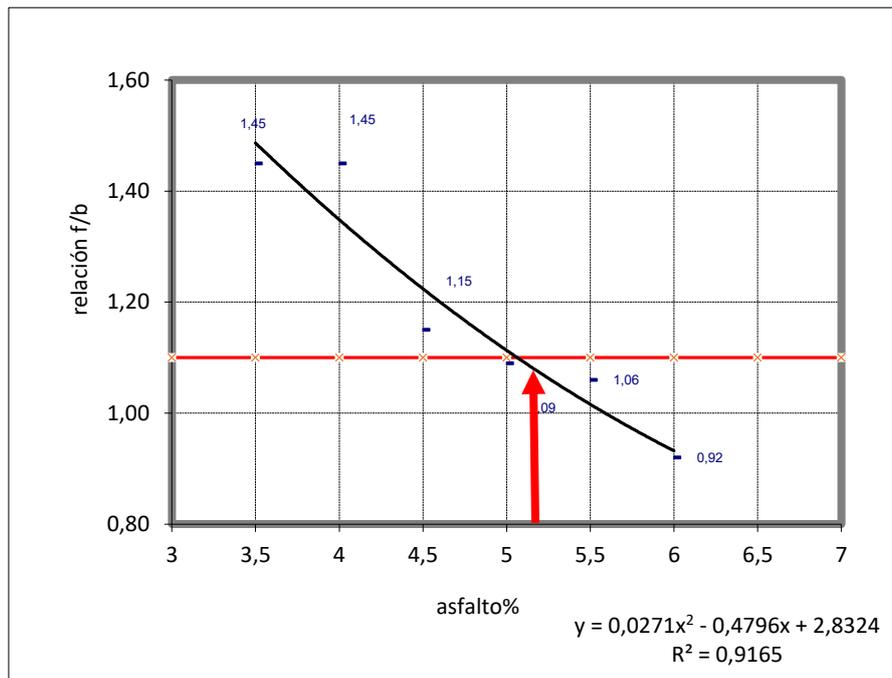


Figura 111. Relación Filler/Betún vs asfalto MAC 30% cerámica

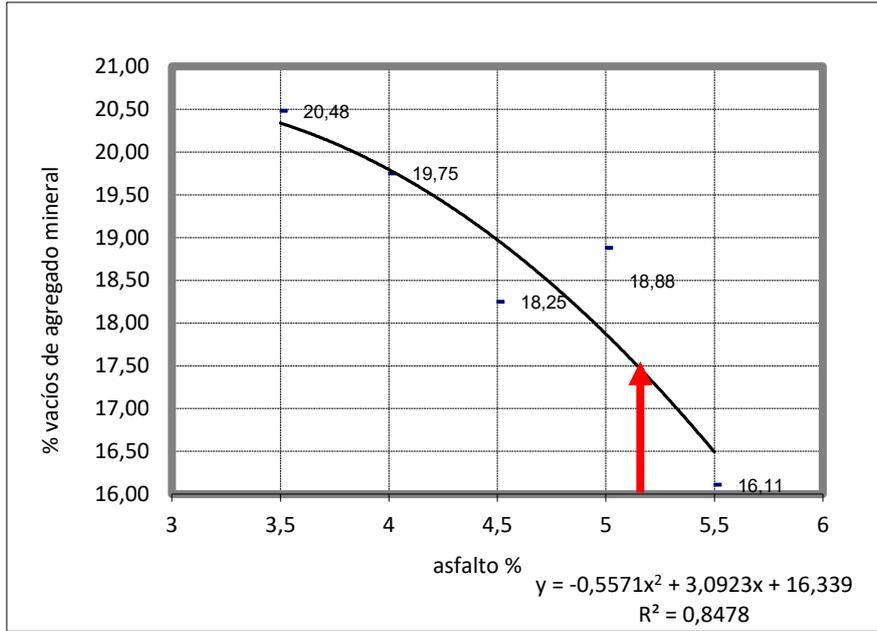


Figura 112. Vacíos en agregado mineral % vs asfalto MAC 30% cerámica

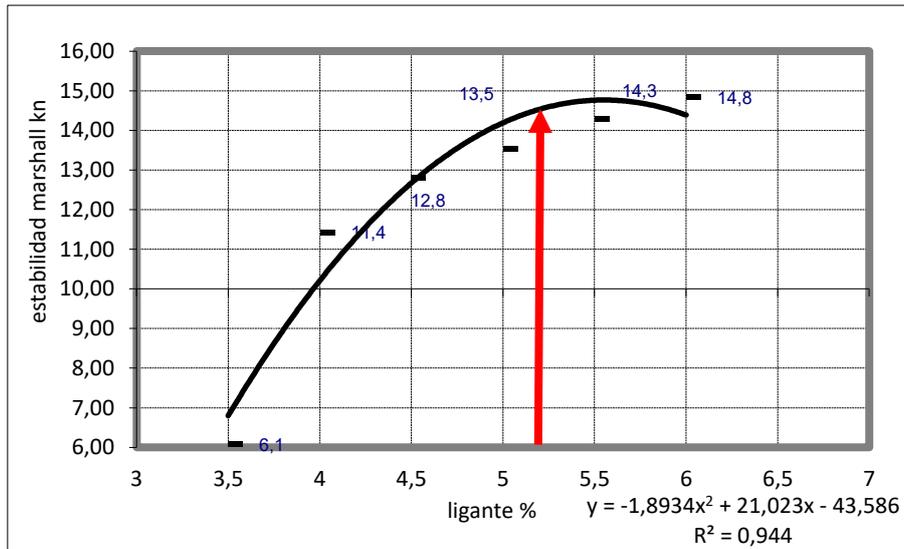


Figura 113. Estabilidad Marshall vs asfalto MAC 30% cerámica

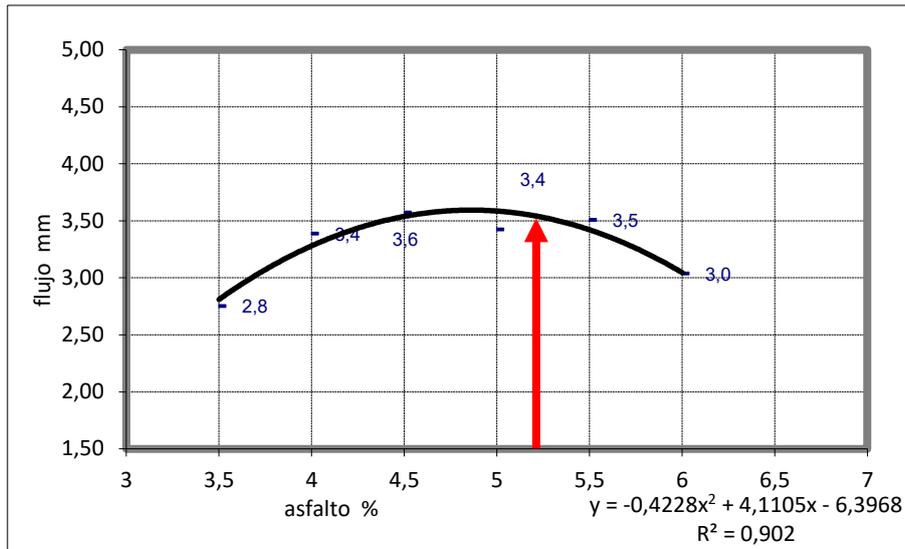


Figura 114. Flujo vs asfalto MAC 30% cerámica

Con los desarrollos gráficos y con base en las recomendaciones del PG-3 se obtuvo el porcentaje óptimo de asfalto de la MAC 30% Cerámica y es de 5.20%, por eso todas las figuras tienen marcada con una flecha roja el valor correspondiente, y a continuación se muestran los valores obtenidos en el asfalto de 5.20%

Tabla 105. Parámetros MSC25 30% cerámica – Confirmación Marshall

MSC25 30% Cerámica – Confirmación Marshall		
Parámetros	Valores Límites	Valores
Densidad aparente (kg/m ³)		2160
Densidad máxima (kg/m ³)		2320
%Vacíos de Aire	4 - 7	7,0
%Vacíos de agregado Mineral	≥14%	14,02
Estabilidad Marshall (KN)	> 12,5	14,53
Flujo Marshall (mm)	2 - 4	3,5
Sensibilidad (%)	> 80%	82,6
Cociente de Filler/Asfalto	1,1	1,1
Porcentaje Óptimo de Asfalto	> 4%	5,2%

Tabla 106. Verificación MAC MSC 30% Cerámica INVIAS

MSC25 30% Cerámica – Verificación Marshall		
Parámetros	Límites	Valores
Sensibilidad	>80%	82,6%
Módulo resiliente (MPa)	Reportar	12729 - 5°C 3310 - 25°C 2096 - 40°C
Porcentaje Óptimo de Betún	Reportar	5,2%

7.2.10.3 MAC con reemplazo del 35% de triturado de cerámica

En la Tabla 107. Resultados Diseño MAC 35% cerámica, se consignaron los parámetros obtenidos en cada una de los promedios de las familias de probetas realizados con cada uno de los porcentajes de asfalto y con la fórmula de trabajo obtenida.

Tabla 107. Resultados Diseño MAC 35% cerámica (Colombia)

Familia	Nº	I	II	III	IV	V	VI
Ligante	%	3,5	4	4,5	5	5,5	6
Densidad	g/cm ³	1,996	2,009	2,051	2,059	2,106	2,053
Densidad Máxima	g/cm ³	2,419	2,328	2,298	2,37	2,328	2,264
% Vacíos de agregado Mineral	%	16,63	16,073	14,765	14,909	15,6	13,86
% Vacíos de mezcla	%	13,92	9,689	6,746	9,124	7,821	2,973
Relación Llenante/Asfalto	LL/A	1,742	1,45	1,15	1,09	1,904	1,073
Itsr % pérdida	%			5,20%			
				81,8			
Estabilidad Marshall	kN	5,493	11,142	13,65	15,503	16,717	15,9
Deformación Marshall	mm	3,1	3,6	3,8	3,8	4,0	4,0

Y con este resumen se generaron las siguientes figuras: Figura 115. Densidad vs Ligante MAC 35 cerámica, Figura 116. Vacíos de aire mezcla % vs asfalto MAC 35% cerámica, Figura 117. Relación Filler/Betún vs MAC 35% cerámica, Figura 118. Vacíos de agregado mineral % vs asfalto MAC 35% cerámica, Figura 119. Estabilidad Marshall vs asfalto MAC 35% cerámica y Figura 120. Deformación vs ligante MAC 35% cerámica. Una vez obtenidas estas figuras para establecer el valor óptimo de la mezcla, se consideró las especificaciones establecidas en la reglamentación PG-3 “marcado CE” y se confirmó completando la metodología Marshall.

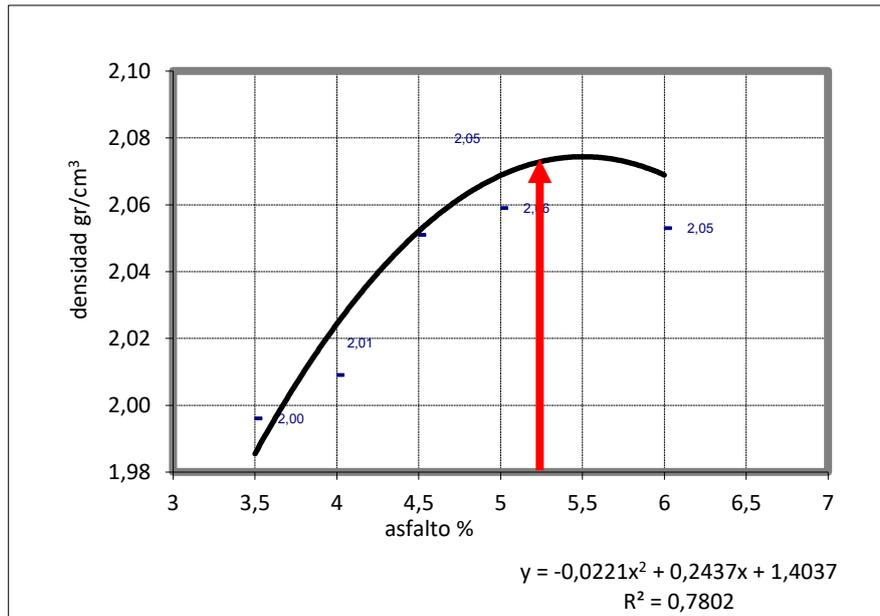


Figura 115. Densidad vs Ligante MAC 35 cerámica

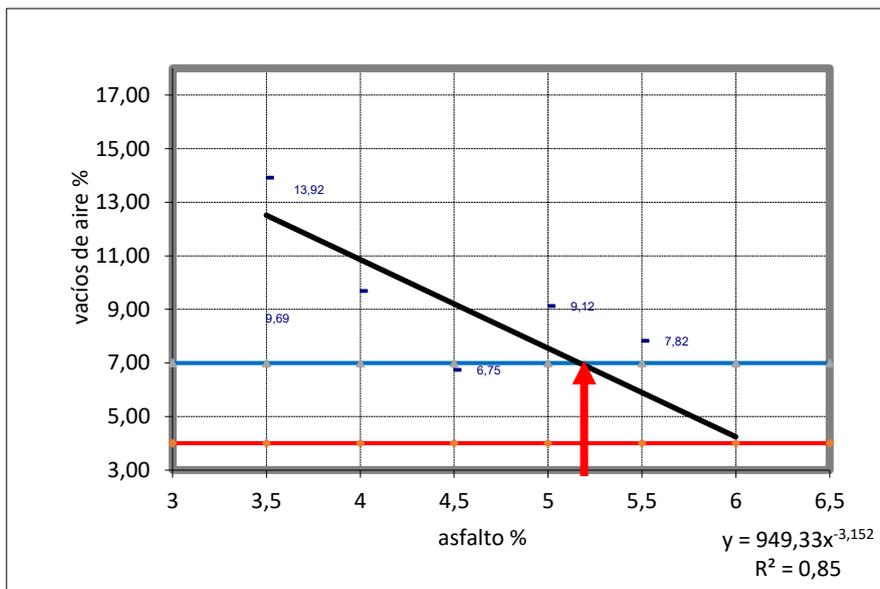


Figura 116. Vacíos de aire mezcla % vs asfalto MAC 35% cerámica

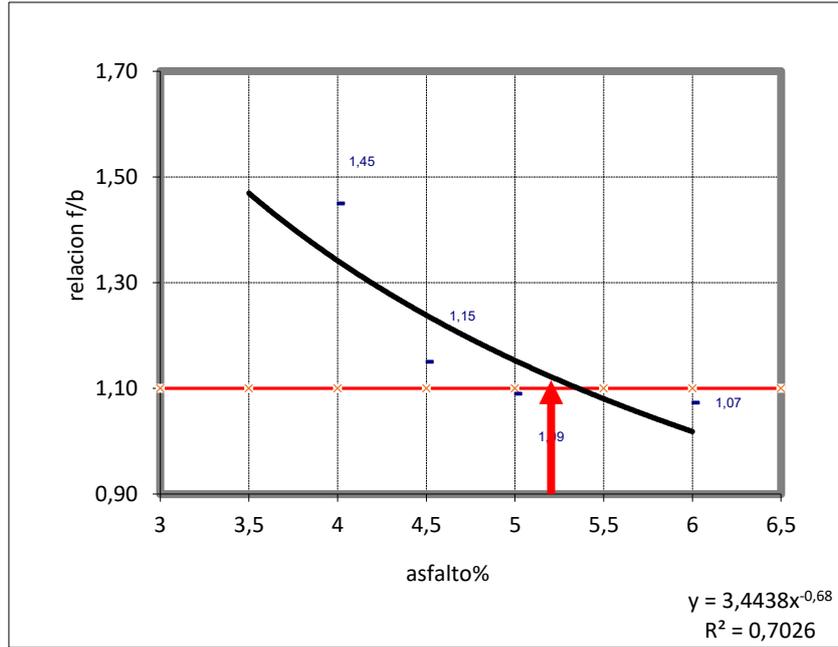


Figura 117. Relación Filler/Betún vs MAC 35% cerámica

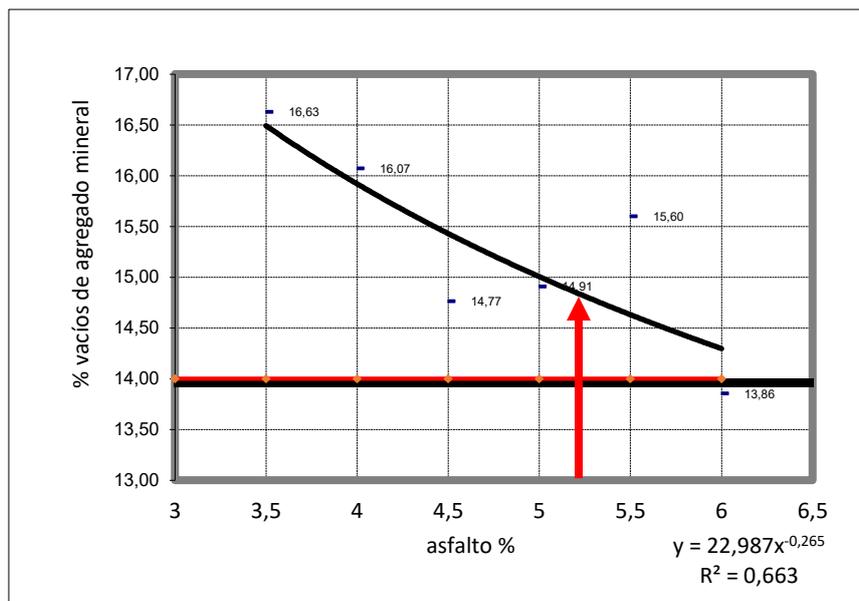


Figura 118. Vacíos de agregado mineral % vs asfalto MAC 35% cerámica

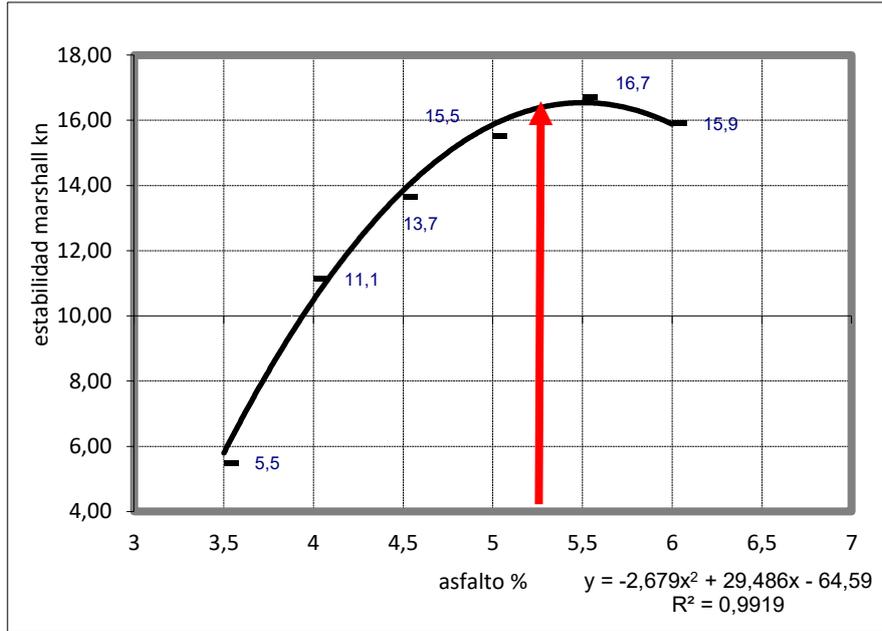


Figura 119. Estabilidad Marshall vs asfalto MAC 35% cerámica

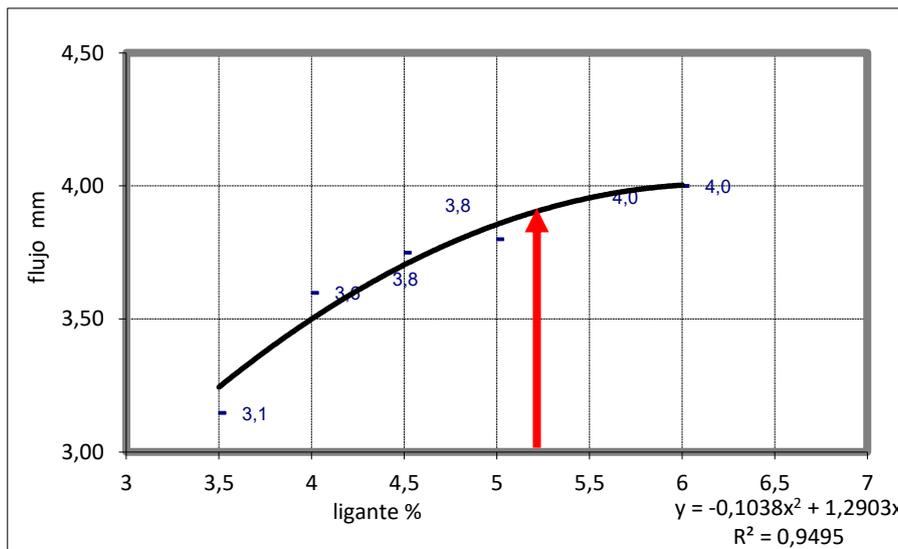


Figura 120. Deformación vs ligante MAC 35% cerámica

Con los desarrollos gráficos y con base en las recomendaciones del INVIAS se obtuvo el porcentaje óptimo de asfalto de la MAC 35% cerámica y es de 5.20%, por eso todas las figuras tienen marcada con una flecha roja el valor correspondiente, y a continuación se muestran los valores obtenidos en el asfalto de 5.20%

Tabla 108. Diseño MAC MSC25 35% cerámica - INVIAS

MSC25 35% cerámica – Confirmación Marshall		
Parámetros	Valores Límites	Valores
Densidad aparente (kg/m ³)		2073
Densidad máxima (kg/m ³)		2340
%Vacíos de Aire	4 - 7	7,0
%Vacíos de agregado Mineral	≥14%	14,84
Estabilidad Marshall (KN)	> 12,5	16,30
Flujo Marshall (mm)	2 - 4	3,0
Sensibilidad (%)	> 80%	81,8
Cociente de Filler/Asfalto	1,1	1,1
Porcentaje Óptimo de Asfalto	> 4%	5,2%

Tabla 109. Verificación MAC MSC 35% Cerámica INVIAS

MSC25 35% cerámica – Verificación Marshall		
Parámetros	Límites	Valores
Sensibilidad	>80%	81,8%
Módulo resiliente (MPa)	Reportar	13032 - 5°C 4066 - 25°C 885 - 40°C
Porcentaje Óptimo de Betún	Reportar	5,2%

7.2.10.4 MAC con reemplazo del 40% de triturado de cerámica

Se desarrollaron las probetas con el porcentaje de 40% de triturado cerámico, a los cuales se les aplicaron los ensayos correspondientes para obtener los parámetros según el INVIAS y con la verificación del método Marshall encontrando que los porcentajes de Vacíos en Mezclas, el cual debía estar entre 4 y 7 %, se calcularon valores superiores a 9% así como también el parámetro de flujo, el cual debía estar en el rango de 2 a 4 mm, pero se registraron valores muy superior a los rangos esperados. Adicionalmente, se observaron dificultades en su trabajabilidad, esto coincide con lo encontrado por (Silvestre, R., Medel, E., García, A., & Navas, J. , 2013) con relación a las mezclas bituminosas de porcentaje de 50% las cuales se recomendaron no usar por no cumplir con los requisitos del PG-3. Por ese motivo, estos resultados no se plasman en esta tesis y no continuaron en el desarrollo de los ensayos programados.

7.3 Construcción de las probetas para el ensayo de módulos dinámicos

Una vez definido el porcentaje óptimo de asfalto se revisó la Norma (AASHTO T 312, 2014) para la construcción de las probetas encontrando que era necesario el uso del equipo Compactador Giratorio, desarrollado por el programa de Programa Estratégico de Investigaciones en Caminos SHRP de los EEUU, Superpave. Con el apoyo del laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga, se construyeron las probetas de cada MAC, desarrollando cuatro (4) unidades por cada mezcla de la siguiente forma.

7.3.1 Preparación de la muestra y construcción de las probetas en el compactador giratorio de Superpave

Se alistó el material de agregados de cada MAC para ejecutar cuatro (4) probetas de diámetro 15 cm aproximadamente y 17 cm de altura y el asfalto necesario de acuerdo al porcentaje óptimo de cada mezcla. Se programaron fechas y se gestionaron los permisos de uso y disponibilidad del laboratorio de Ingeniería Civil y de los técnicos del mismo. Se replicó el diseño de experimentos desarrollado en España, se requirió de dos días para la construcción de cuatro probetas cada MAC. A continuación, se consigna el derrotero usado en la preparación de una probeta y que se replicó para las demás probetas así:

- Se colocaron los agregados y el asfalto por algo más de cuatro horas de calentamiento en el horno o estufa a temperatura controlada de 155°C y constante, esta labor se desarrolló a las siete (7) horas de la mañana.
- Una vez se alcanzó la temperatura se procedió a construir la mezcla usando una mezcladora mecánica con control de temperatura (160 °C) y con capacidad para mezclas hasta 25 kilogramos. Esta actividad se controló en tiempo aproximadamente cinco (5) minutos de ejecución, alrededor de las once (11) horas de la mañana.
- Una vez se verificó el cumplimiento de la temperatura de mezcla y el cubrimiento de todos los agregados se prosiguió el cuarteo de la misma usando cuatro (4) recipientes para una distribución equitativa y su posterior regreso a la estufa para homogenización de temperatura. Allí también se colocaron los moldes y elementos de apoyo necesarios para la construcción posterior. Esta labor se terminó alrededor de las 11:30 de la mañana.
- Posteriormente, alrededor de las 11:45 am se empezó a elaborar la probeta colocando papel filtro y luego la mezcla dentro del molde, con una acomodación de 15 golpes con varilla en la mezcla y cinco (5) golpes al molde por la parte exterior. Y con el molde colocado dentro del equipo de Compactador Giratorio el proceso de compactación y elaboración de la probeta tarde menos de 15 minutos. Los datos suministrados en cada MAC fueron identificación, fecha, densidad esperada y cantidad de ciclos.
- Finalmente, se extrajeron las probetas de los moldes, una vez habían alcanzado una temperatura de alrededor de 50°C+/-5°C se procedió a usar un gato hidráulico que empujara la probeta al exterior, con el fin de continuar con la producción.
- Las probetas se dispusieron en un mesón para su enfriamiento completo, dejándolas marcadas y dispuestas para el ensayo posterior. Al igual que en las probetas de España se controló el porcentaje de vacíos.

7.3.2 Extracción de núcleos e instalación de los dispositivos

Las probetas se construyeron más grandes (150 mm de diámetro y 170 mm de altura), con el objetivo de extraer un núcleo de las dimensiones adecuadas (entre 100 y 104 mm de diámetro y entre 147.5 y 152.5 mm de altura) (AENOR UNE-EN 12697-26 , 2006) (Witczak & Bari, 2004) y con las paredes lisas de tal manera que permitieran la instalación adecuada de porta-sensores a usar en el ensayo de módulos dinámicos. Con el apoyo de la Coordinación del laboratorio de Ingeniería Civil, se usó el equipo de perforación y de aserrado de tal manera que todas las probetas quedaron con las dimensiones establecidas.

Para esta labor se adquirió una broca hueca de dimensiones 104 mm de diámetro punta de tungsteno y se sujetó la probeta para controlar su movimiento en el momento de la extracción del núcleo, posteriormente se aserraron las superficies transversales en cada uno de los extremos de la probeta, cuidando que la altura final estuviera dentro del rango permitido de 150 mm +/-2 mm y de tal manera que se ofreciera una superficie lisa y horizontal para instalar el plato que recibe la fuerza que el pistón aplica cuando se hace el ensayo de módulo dinámico.

Las probetas ajustadas se sometieron a un ensayo de densidad bulk para conocer su densidad y vacíos (I.N.V E-733, 2013). Para este ensayo se pesó al aire, se pesó sumergidas y se pesó saturadas superficialmente secas, una vez secadas con el paño húmedo y finalmente al otro día se comprobó el peso al aire después de que habían quedado secando toda la noche.

Finalmente, las probetas después de dejarlas secar se almacenaron en una cámara de control de temperatura 25°C y humedad para que no estuvieran sometidas a cambios bruscos, mientras llegaba el momento de su alistamiento para el ensayo.

7.4 Aplicación del ensayo de módulos dinámicos

El ensayo consiste en aplicar una carga cíclica en modo compresión (carga y descarga) o compresión (carga y descarga) tensión (carga y descarga) y medir la deformación vertical del espécimen, el cual se debe mantener dentro de 50 y 150 ($1\mu\epsilon = 10^{-6}$ m/m, es decir una deformación de una micra respecto a un metro, adimensional) Existen principalmente dos normas, la estadounidense, (AASHTO T342-11, 2015) y la europea (AENOR UNE-EN 12697-26 , 2006), las dos consideran carga sinusoidal.

El módulo dinámico es el módulo complejo, relaciona el esfuerzo con la deformación bajo condiciones cíclicas en el dominio de la frecuencia, para decidir cuál es la rigidez del material en el diseño de los materiales para el clima, tránsito, subrasante, definir el espesor que se requiere.

La principal característica de este ensayo es el uso de carga vertical axial, sobre especímenes cilíndricos, no se utiliza torsión como en el betún, el resultado es E^* , por ser un módulo axial y no G^* , módulo cortante. Este ensayo es equivalente al reómetro de corte dinámico, DSR, de betunes, pues se obtiene módulo y ángulo de fase, módulo, E^* y ángulo de fase, Φ . Se reporta también el ángulo de fase porque tiene la señal de entrada y salida del esfuerzo que son cíclicas, el desfase entre las dos señales es el ángulo de fase. Así se determina la rigidez del material bajo distintas condiciones de carga, ya que tiene un componente viscoso, que lo hace sensible a la

carga y a la temperatura, pues toda MAC es termo-dependiente, por el porcentaje de betún que se adiciona para construir el hormigón asfáltico. (Caro Spinel, 2020)

El método usado para determinar el módulo es la aplicación de una carga cíclica a través del tiempo, sometiendo el espécimen a una carga a compresión, sinusoidal, es decir se aplica la carga y se descarga, repetidamente, cambiando temperatura y frecuencia. Se mide así la deformación unitaria recuperable del espécimen, como consecuencia de ese esfuerzo aplicado.

Es importante indicar, que la deformación plástica se alcanza a presentar en mínimos valores, por lo que se ignora y se ajusta para definir la amplitud de la señal. La amplitud es la relación entre el esfuerzo y la deformación, que es el módulo. Para la ejecución del ensayo, se usa un equipo compuesto con una prensa de carga, un dispositivo de control de temperatura, y un dispositivo de aplicación de carga y sensores de medición de carga y deformación.

Se requiere que el espécimen tenga una dimensión 2 a 1, en USA los especímenes usados son más pequeños y lo importante es obtener un elemento volumétrico representativo. Si es muy pequeño, entonces va a tener una influencia de los agregados grandes y eso no es adecuado. En el caso de esta tesis los especímenes de ensayo se acondicionaron aproximadamente 10 cm de diámetro y 15 cm de altura, que son las dimensiones más usadas en la bibliografía existente.

Los dispositivos porta-sensores se adhirieron a las paredes de las probetas con el fin de instalar los sensores de deformaciones sobre ellos, en el caso del laboratorio de Ingeniería Civil el equipo dinámico 30 kN Servo-Hydraulic Dynamic Testing System - DTS30 de pavimentos de marca Pavetest permitió la colocación de tres sensores por probeta.

Para la ejecución del ensayo dinámico, se acondicionaron las probetas a la temperatura de 10°C, 20°C, 30°C y 40°C según temperaturas recomendadas por la norma (AENOR UNE-EN 12697-26 , 2006). La parte demorada del ensayo es el acondicionamiento de las probetas, en el caso de las probetas que se estudiaron se acondicionaron durante un tiempo aproximado de cuatro (4) horas en cada temperatura de tal manera que cuando se realizó el ensayo el espécimen se encontraba realmente a la temperatura indicada.

El software usado en el equipo fue de la norma (AENOR UNE-EN 12697-26 , 2006), con dicha programación se aplicó la carga y se revisó que esta estuviera dentro de los parámetros de deformación indicados (50-150 $\mu\epsilon$) y que la carga dinámica estuviera entre 15 y 2800 kPa. La frecuencia se escogió de acuerdo a la recomendación de la norma desde 0.1 Hz hasta 25 Hz, asociado a la cantidad de ciclos (15 hasta 200) para lograr la frecuencia mencionada.

La verificación del cumplimiento fue importante ya que cuando los parámetros no cumplían se debía ajustar la carga dinámica y reprogramar el ensayo. Se consideró como límite 1500 $\mu\epsilon$ el rango de deformación permanente acumulada para descartar una probeta al final del ensayo. Al final se eligieron las probetas que presentaban los resultados más satisfactorios atendiendo las características mencionadas.

7.5 Curvas maestras colombianas

Se muestran las curvas de las MAC Patrón desarrolladas con los módulos dinámicos vs frecuencia a diferentes temperaturas, entre los módulos dinámicos vs temperaturas a diferentes frecuencias (ver Figura 121), la cual muestra el comportamiento consistente de los resultados.

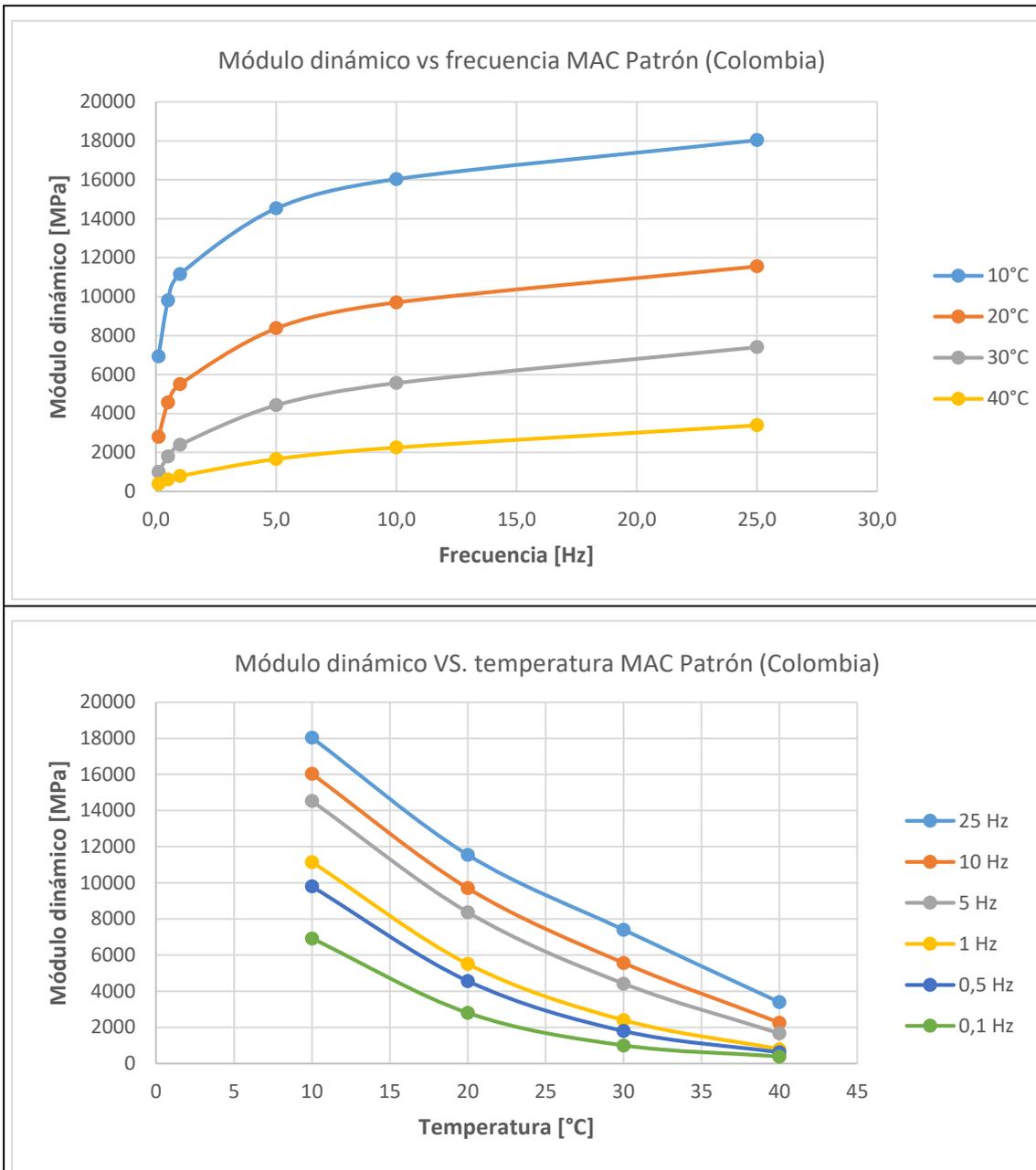


Figura 121. Curvas de Módulos Dinámicos vs Frecuencias y Temperaturas MAC Patrón

La probeta de MAC Patrón de Módulo Dinámico vs Frecuencia muestra un comportamiento uniforme y esperado. El módulo dinámico más alto corresponde a la temperatura más baja, mientras el módulo más bajo corresponde a la temperatura más alta. A menor frecuencia menor módulo dinámico o viceversa.

El comportamiento de las curvas Módulo Dinámico vs Temperatura tiene una pendiente uniforme. En donde los módulos más altos se dan a las temperaturas bajas y los módulos bajos están en las temperaturas altas. Es lógico y consistente con el comportamiento visco-elástico lineal.

A continuación, las Curvas resultantes del ensayo de módulo dinámico de las MAC con cerámica.

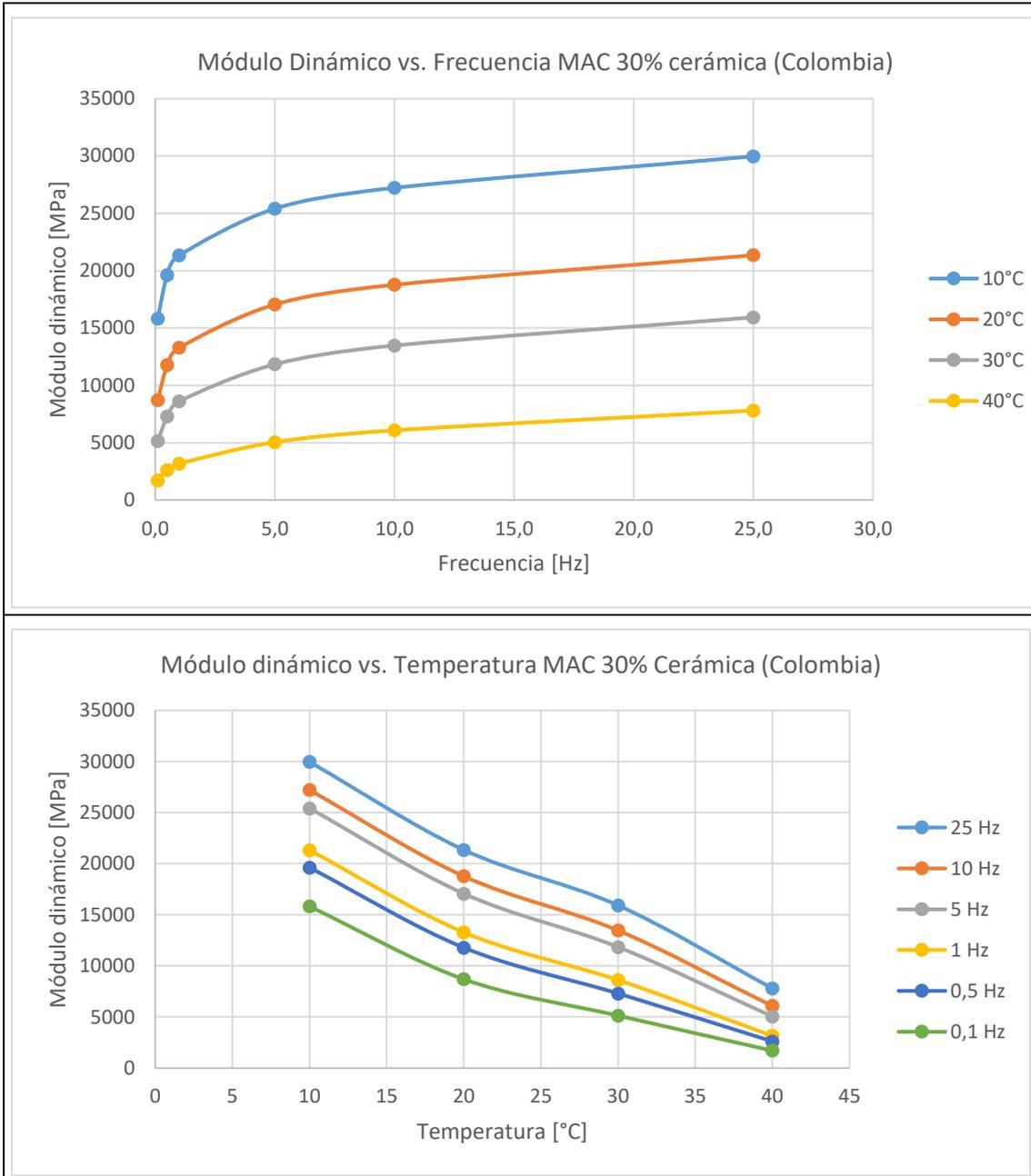


Figura 122. Módulo dinámico vs Frecuencias y Temperatura MAC 30% cerámica (Colombia)

El comportamiento de las curvas Módulo Dinámico vs Frecuencia Cerámica al 30% a todas las temperaturas es coherente y lógico, a mayor frecuencia mayor módulo dinámico y a menor temperatura mayor módulo dinámico. La tendencia de cada una de las curvas es lógica y tiene diferencias equidistantes.

El comportamiento de las curvas es muy uniforme, coherente y lógico. Las curvas son prácticamente paralelas y mantienen una distancia similar la una de la otra. Eso muestra la uniformidad del comportamiento.

A continuación, las curvas desarrolladas por módulo dinámico de las MAC con 35% de triturado de cerámica.

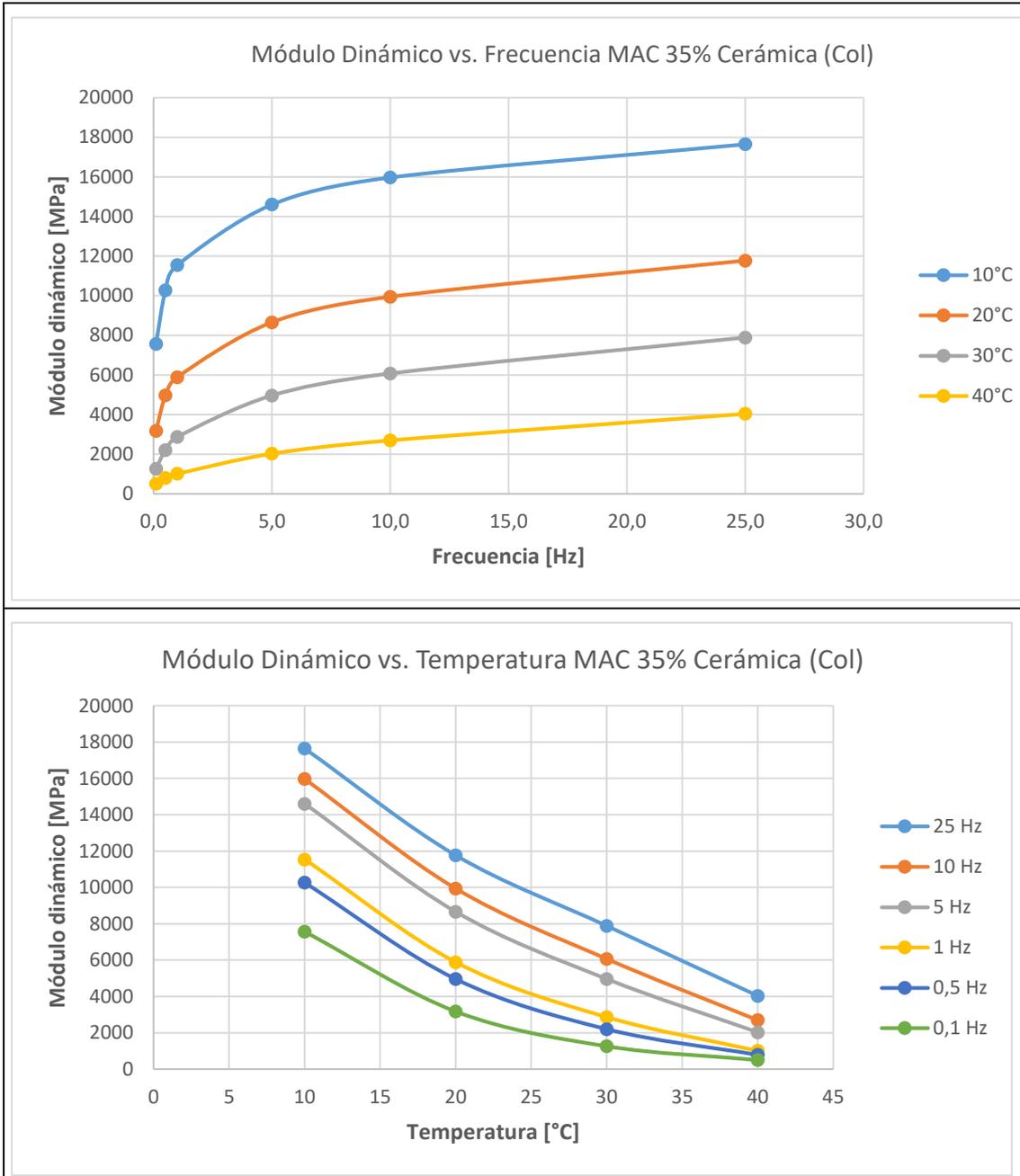


Figura 123. Curvas de Módulos Dinámicos vs Frecuencias y Temperaturas MAC 35% Cerámica

El comportamiento de las curvas de Módulo Dinámico vs frecuencia de las probetas con inclusión de cerámica al 35% es lógico, es consistente. Las curvas son prácticamente paralelas, equidistantes, tienen un comportamiento homogéneo. A mayor frecuencia mayor módulo dinámico, a mayor temperatura menor módulo dinámico.

El comportamiento de las curvas es muy uniforme, coherente y lógico. Las curvas son prácticamente paralelas y mantienen una distancia equidistante la una de la otra. Eso muestra la uniformidad del comportamiento.

Con base en las figuras mostradas anteriormente se han desarrollado las curvas maestras Módulo Dinámicos vs Tiempo Reducido su insumo permitirá el diseño del espesor de la capa de

pavimento asfáltico. En este caso se hicieron curvas maestras con temperatura de referencia para cada temperatura utilizada en el ensayo.

Para el desarrollo de las curvas maestras se generaron y organizaron datos relacionados con el ángulo de fase, la temperatura, el módulo dinámico resultado del ensayo, el tiempo reducido y el módulo dinámico calculado en la curva maestra. Todo lo anterior calculado con base en las comprobaciones como Shift Factor, Módulo dinámico vs Frecuencia reducida, Diagrama Black y diagrama de Cole-Cole para finalmente generar la Curva Maestra con una temperatura de referencia.

7.5.1 Curvas maestras MAC Patrón (Colombia)

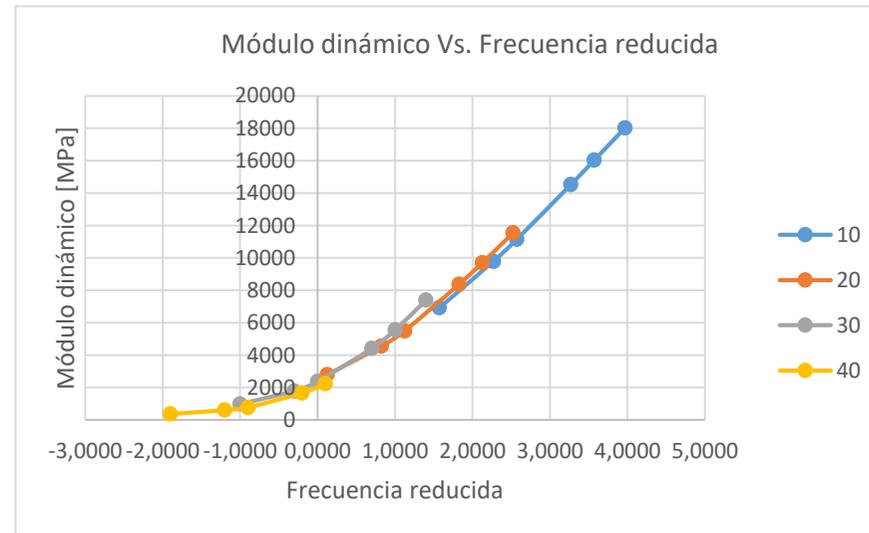
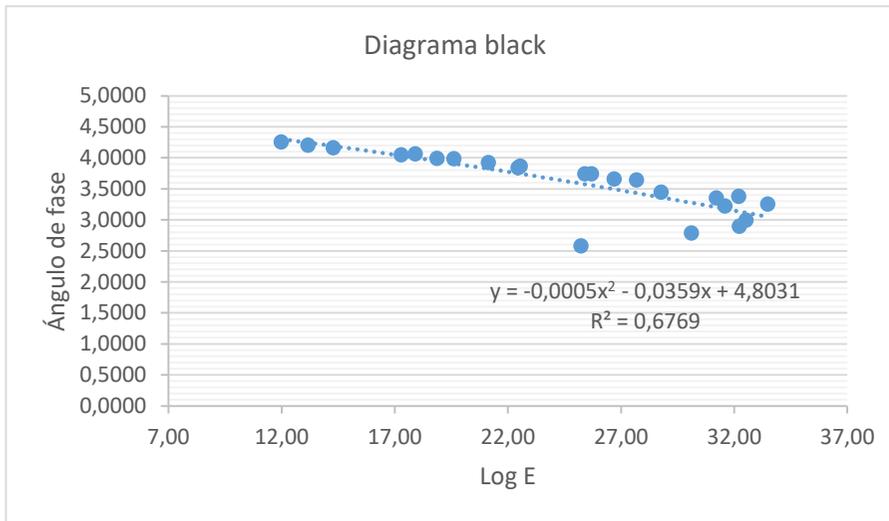
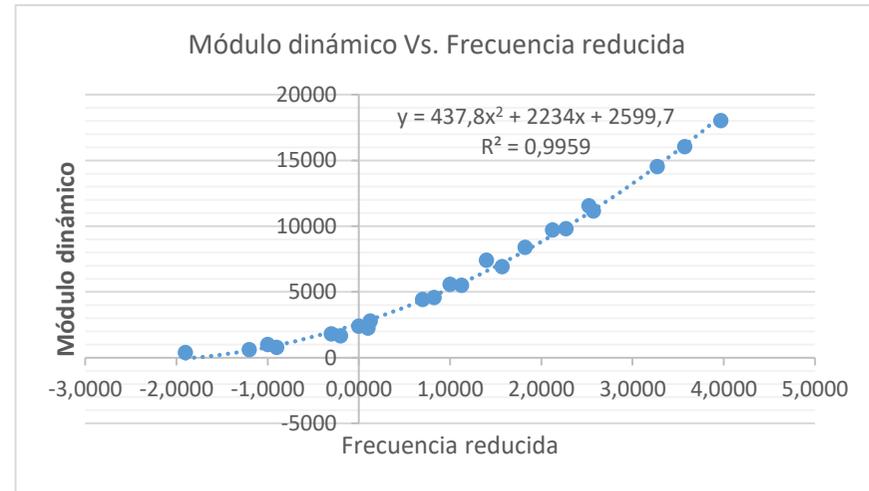
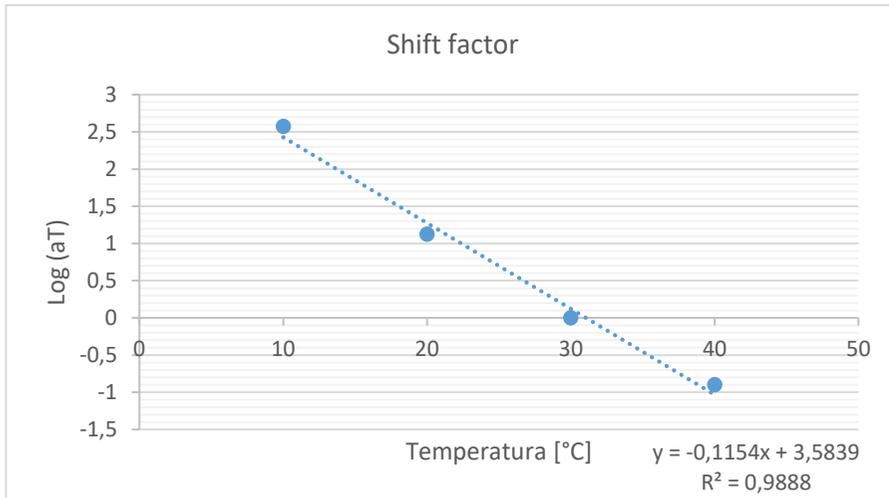
A continuación, se adjuntan las tablas y figuras obtenidas para la construcción de la curva maestra en el caso colombiano, así como en la obtención de las curvas de España, se siguió el mismo derrotero explicado en el numeral 6.5, en donde se cuantifican primero los coeficientes para controlar la correlación de los datos, conocer el desplazamiento de los datos, y finalmente calcular el módulo dinámico, dibujar la curva y en todas las etapas revisar la consistencia de los datos. De esta manera se encontrarán a continuación una serie de figuras y tablas que son los pasos seguidos para conseguir las curvas maestras en este caso de la MAC Patrón. En primer lugar, los datos del ensayo en cada una de los tipos de mezcla (ver Tabla 110) posteriormente el cálculo de los coeficientes de ajuste (ver Tabla 111), luego las gráficas de comprobación (ver Figura 124) Posteriormente viene un resumen del cálculo del módulo dinámico considerando los coeficientes de desplazamiento y cada una de las temperaturas de ensayo (ver Tabla 112, Tabla 113, Tabla 114 y Tabla 115) luego se inserta los datos finales para construcción de la curva maestra (ver Tabla 116, Tabla 117, Tabla 118 y Tabla 119) y las curvas maestras construidas (ver Figura 125, Figura 126, Figura 127 y Figura 128) de acuerdo a cada temperatura de ensayo. En este mismo orden se encuentran las tablas y figuras para las mezclas con inclusión de cerámica tanto del 30% como del 35%.

Tabla 110. Datos del ensayo módulo dinámico MAC Patrón (Colombia)

Frecuencia [Hz]	Temperatura [°C]	Módulo dinámico [MPa]	Ángulo de fase [°deg]
25	10	18036	11,98
25	20	11554	17,9
25	30	7403	22,54
25	40	3394	22,54
10	10	16038	13,16
10	20	9705	19,61
10	30	5562	25,69
10	40	2256	31,21
5	10	14534	14,28
5	20	8376	21,14
5	30	4423	27,68
5	40	1665	31,59
1	10	11153	17,29
1	20	5508	25,39
1	30	2394	32,2
1	40	789	32,22
0,5	10	9800	18,87
0,5	20	4564	26,7
0,5	30	1794	33,48
0,5	40	616	30,11
0,1	10	6925	22,44
0,1	20	2794	28,77
0,1	30	992	32,52
0,1	40	380	25,22

Tabla 111. Coeficientes para construcción de la curva maestra con diferentes temperaturas de referencia
MAC Patrón (Colombia)

Temperatura		Shift factor		Coeficientes	
10°C	T	Log (aT)	aT	C1	11,5
	10	0	1	C2	75
	20	-1,35294118	0,04436687	α	2,40010588
	30	-2,42105263	0,00379269	β	-2,14277052
	40	-3,28571429	0,00051795	γ	0,72946073
				δ	1,92104766
20°C	T	Log (aT)	aT	C1	11
	10	1,375	23,7137371	C2	90
	20	0	1	α	2,57756796
	30	-1,1	0,07943282	β	-1,23329497
	40	-2	0,01	γ	0,67814683
				δ	1,75657261
30°C	T	Log (aT)	aT	C1	9
	10	2,57142857	372,759372	C2	90
	20	1,125	13,3352143	α	2,43510699
	30	0	1	β	-0,42770412
	40	-0,9	0,12589254	γ	0,70728536
				δ	1,87346008
40°C	T	Log (aT)	aT	C1	7,5
	10	3,21428571	1637,89371	C2	100
	20	1,875	74,9894209	α	2,6183382
	30	0,83333333	6,81292069	β	0,09715274
	40	0	1	γ	0,68112226
				δ	1,73464234



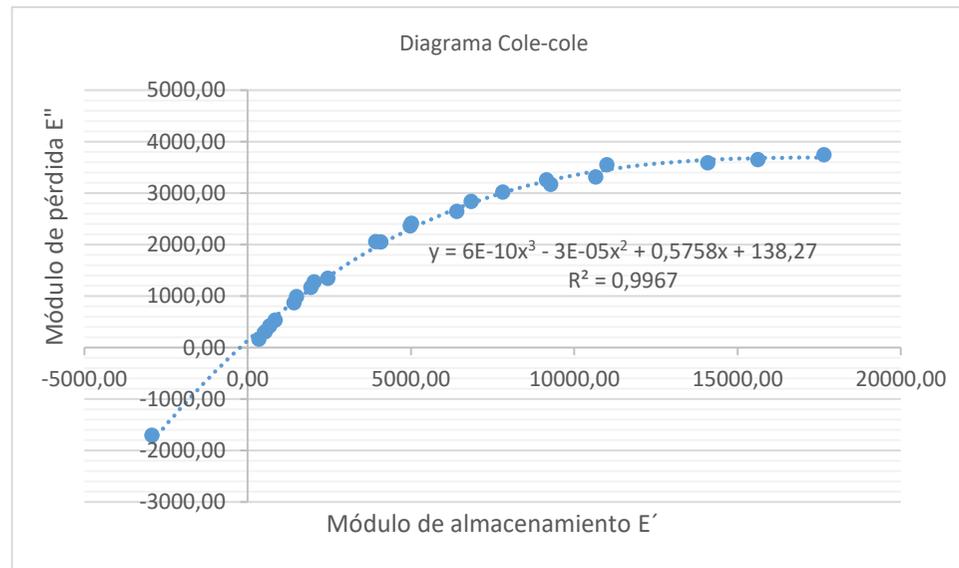


Figura 124. Gráficas de comprobación para construcción de la curva maestra (Colombia)

Tabla 112. M3dulo dinámico calculado para curva maestra MAC Patr3n temperatura de referencia 10°C (Colombia)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	M3dulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	M3dulo de almacenamiento (E')	M3dulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,04000	-1,39794	18036	11,98	1,3979	4,2561	17643,18	3743,74	4,2237	0,0011	16738,12
10	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	16038	13,16	1,0000	4,2052	15616,81	3651,39	4,1926	0,0002	15582,73
10	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	14534	14,28	0,6990	4,1624	14084,93	3584,97	4,1632	0,0000	14560,06
10	1,0	1,00	1,0000	0,0000	11153	17,29	0,0000	4,0474	10649,03	3314,76	4,0691	0,0005	11725,23
10	0,5	2,00	2,0000	0,3010	9800	18,87	-0,3010	3,9912	9273,30	3169,54	4,0151	0,0006	10354,34
10	0,1	10,00	10,0000	1,0000	6925	22,44	-1,0000	3,8404	6400,64	2643,38	3,8514	0,0001	7102,69
20	25,0	0,04	0,9016	-0,0450	11554	17,90	0,0450	4,0627	10994,72	3551,20	4,0764	0,0002	11924,23
20	10,0	0,10	2,2539	0,3529	9705	19,61	-0,3529	3,9870	9142,10	3257,15	4,0049	0,0003	10112,73
20	5,0	0,20	4,5079	0,6540	8376	21,14	-0,6540	3,9230	7812,31	3020,79	3,9395	0,0003	8700,59
20	1,0	1,00	22,5393	1,3529	5508	25,39	-1,3529	3,7410	4975,98	2361,71	3,7465	0,0000	5578,49
20	0,5	2,00	45,0787	1,6540	4564	26,70	-1,6540	3,6593	4077,35	2050,69	3,6451	0,0002	4417,23
20	0,1	10,00	225,3934	2,3529	2794	28,77	-2,3529	3,4462	2449,11	1344,74	3,3731	0,0053	2361,24
30	25,0	0,04	10,5466	1,0231	7403	22,54	-1,0231	3,8694	6837,50	2837,78	3,8450	0,0006	6998,75
30	10,0	0,10	26,3665	1,4211	5562	25,69	-1,4211	3,7452	5012,21	2411,14	3,7245	0,0004	5302,99
30	5,0	0,20	52,7330	1,7221	4423	27,68	-1,7221	3,6457	3916,81	2054,63	3,6208	0,0006	4176,03
30	1,0	1,00	263,6651	2,4211	2394	32,20	-2,4211	3,3791	2025,79	1275,71	3,3445	0,0012	2210,55
30	0,5	2,00	527,3302	2,7221	1794	33,48	-2,7221	3,2538	1496,34	989,65	3,2152	0,0015	1641,28
30	0,1	10,00	2636,6509	3,4211	992	32,52	-3,4211	2,9965	836,46	533,29	2,9116	0,0072	815,84
40	10,0	0,10	193,0698	2,2857	2256	31,21	-2,2857	3,3533	1929,50	1169,01	3,4011	0,0023	2518,36
40	5,0	0,20	386,1395	2,5867	1665	31,59	-2,5867	3,2214	1418,28	872,19	3,2738	0,0027	1878,37
40	1,0	1,00	1930,6977	3,2857	789	32,22	-3,2857	2,8971	667,50	420,67	2,9695	0,0052	932,16
40	0,5	2,00	3861,40	3,5867	616	30,11	-3,5867	2,7896	532,88	309,02	2,8421	0,0028	695,20
40	0,1	10,00	19306,98	4,2857	380	25,22	-4,2857	2,5798	343,78	161,92	2,5744	0,0000	375,28

Tabla 113. Módulo dinámico calculado para curva maestra MAC Patrón temperatura de referencia 20°C (Colombia)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	Módulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	Módulo de almacenamiento (E')	Módulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,00169	-2,77294	18036	11,98	2,7729	4,2561	17643,18	3743,74	4,2245	0,0010	16768,03
10	10,0	0,10	0,0042	-2,3750	16038	13,16	2,3750	4,2052	15616,81	3651,39	4,1924	0,0002	15573,28
10	5,0	0,20	0,0084	-2,0740	14534	14,28	2,0740	4,1624	14084,93	3584,97	4,1624	0,0000	14534,96
10	1,0	1,00	0,0422	-1,3750	11153	17,29	1,3750	4,0474	10649,03	3314,76	4,0690	0,0005	11721,66
10	0,5	2,00	0,0843	-1,0740	9800	18,87	1,0740	3,9912	9273,30	3169,54	4,0163	0,0006	10383,48
10	0,1	10,00	0,4217	-0,3750	6925	22,44	0,3750	3,8404	6400,64	2643,38	3,8591	0,0004	7230,04
20	25,0	0,04	0,0400	-1,3979	11554	17,90	1,3979	4,0627	10994,72	3551,20	4,0727	0,0001	11821,34
20	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	9705	19,61	1,0000	3,9870	9142,10	3257,15	4,0021	0,0002	10048,49
20	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	8376	21,14	0,6990	3,9230	7812,31	3020,79	3,9384	0,0002	8678,55
20	1,0	1,00	1,0000	0,0000	5508	25,39	0,0000	3,7410	4975,98	2361,71	3,7526	0,0001	5657,54
20	0,5	2,00	2,0000	0,3010	4564	26,70	-0,3010	3,6593	4077,35	2050,69	3,6556	0,0000	4524,80
20	0,1	10,00	10,0000	1,0000	2794	28,77	-1,0000	3,4462	2449,11	1344,74	3,3942	0,0027	2478,43
30	25,0	0,04	0,5036	-0,2979	7403	22,54	0,2979	3,8694	6837,50	2837,78	3,8386	0,0010	6895,37
30	10,0	0,10	1,2589	0,1000	5562	25,69	-0,1000	3,7452	5012,21	2411,14	3,7215	0,0006	5266,50
30	5,0	0,20	2,5179	0,4010	4423	27,68	-0,4010	3,6457	3916,81	2054,63	3,6212	0,0006	4179,83
30	1,0	1,00	12,5893	1,1000	2394	32,20	-1,1000	3,3791	2025,79	1275,71	3,3533	0,0007	2255,90
30	0,5	2,00	25,1785	1,4010	1794	33,48	-1,4010	3,2538	1496,34	989,65	3,2266	0,0007	1685,13
30	0,1	10,00	125,8925	2,1000	992	32,52	-2,1000	2,9965	836,46	533,29	2,9228	0,0054	837,09
40	10,0	0,10	10,0000	1,0000	2256	31,21	-1,0000	3,3533	1929,50	1169,01	3,3942	0,0017	2478,43
40	5,0	0,20	20,0000	1,3010	1665	31,59	-1,3010	3,2214	1418,28	872,19	3,2692	0,0023	1858,86
40	1,0	1,00	100,0000	2,0000	789	32,22	-2,0000	2,8971	667,50	420,67	2,9662	0,0048	925,12
40	0,5	2,00	200,0000	2,3010	616	30,11	-2,3010	2,7896	532,88	309,02	2,8364	0,0022	686,14
40	0,1	10,00	1000,0000	3,0000	380	25,22	-3,0000	2,5798	343,78	161,92	2,5551	0,0006	358,97

Tabla 114. Módulo dinámico calculado para curva maestra MAC Patrón temperatura de referencia 30°C (Colombia)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	Módulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	Módulo de almacenamiento (E')	Módulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,00011	-3,96937	18036	11,98	3,9694	4,2561	17643,18	3743,74	4,2164	0,0016	16457,60
10	10,0	0,10	0,0003	-3,5714	16038	13,16	3,5714	4,2052	15616,81	3651,39	4,1879	0,0003	15412,79
10	5,0	0,20	0,0005	-3,2704	14534	14,28	3,2704	4,1624	14084,93	3584,97	4,1610	0,0000	14487,07
10	1,0	1,00	0,0027	-2,5714	11153	17,29	2,5714	4,0474	10649,03	3314,76	4,0756	0,0008	11902,32
10	0,5	2,00	0,0054	-2,2704	9800	18,87	2,2704	3,9912	9273,30	3169,54	4,0268	0,0013	10635,49
10	0,1	10,00	0,0268	-1,5714	6925	22,44	1,5714	3,8404	6400,64	2643,38	3,8784	0,0014	7557,61
20	25,0	0,04	0,0030	-2,5229	11554	17,90	2,5229	4,0627	10994,72	3551,20	4,0683	0,0000	11703,25
20	10,0	0,10	0,0075	-2,1250	9705	19,61	2,1250	3,9870	9142,10	3257,15	4,0001	0,0002	10002,32
20	5,0	0,20	0,0150	-1,8240	8376	21,14	1,8240	3,9230	7812,31	3020,79	3,9380	0,0002	8670,52
20	1,0	1,00	0,0750	-1,1250	5508	25,39	1,1250	3,7410	4975,98	2361,71	3,7550	0,0002	5688,18
20	0,5	2,00	0,1500	-0,8240	4564	26,70	0,8240	3,6593	4077,35	2050,69	3,6587	0,0000	4556,95
20	0,1	10,00	0,7499	-0,1250	2794	28,77	0,1250	3,4462	2449,11	1344,74	3,3984	0,0023	2502,76
30	25,0	0,04	0,0400	-1,3979	7403	22,54	1,3979	3,8694	6837,50	2837,78	3,8332	0,0013	6810,63
30	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	5562	25,69	1,0000	3,7452	5012,21	2411,14	3,7162	0,0008	5202,93
30	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	4423	27,68	0,6990	3,6457	3916,81	2054,63	3,6157	0,0009	4127,56
30	1,0	1,00	1,0000	0,0000	2394	32,20	0,0000	3,3791	2025,79	1275,71	3,3475	0,0010	2225,83
30	0,5	2,00	2,0000	0,3010	1794	33,48	-0,3010	3,2538	1496,34	989,65	3,2213	0,0011	1664,46
30	0,1	10,00	10,0000	1,0000	992	32,52	-1,0000	2,9965	836,46	533,29	2,9219	0,0056	835,43
40	10,0	0,10	0,7943	-0,1000	2256	31,21	0,1000	3,3533	1929,50	1169,01	3,3883	0,0012	2445,22
40	5,0	0,20	1,5887	0,2010	1665	31,59	-0,2010	3,2214	1418,28	872,19	3,2637	0,0018	1835,10
40	1,0	1,00	7,9433	0,9000	789	32,22	-0,9000	2,8971	667,50	420,67	2,9643	0,0045	921,15
40	0,5	2,00	15,8866	1,2010	616	30,11	-1,2010	2,7896	532,88	309,02	2,8380	0,0023	688,64
40	0,1	10,00	79,4328	1,9000	380	25,22	-1,9000	2,5798	343,78	161,92	2,5693	0,0001	370,92

Tabla 115. M3dulo dinámico calculado para curva maestra MAC Patr3n temperatura de referencia 30°C (Colombia)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	M3dulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	M3dulo de almacenamiento (E')	M3dulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,00002	-4,61223	18036	11,98	4,6122	4,2561	17643,18	3743,74	4,2339	0,0005	17137,37
10	10,0	0,10	0,0001	-4,2143	16038	13,16	4,2143	4,2052	15616,81	3651,39	4,1991	0,0000	15814,75
10	5,0	0,20	0,0001	-3,9133	14534	14,28	3,9133	4,1624	14084,93	3584,97	4,1665	0,0000	14673,35
10	1,0	1,00	0,0006	-3,2143	11153	17,29	3,2143	4,0474	10649,03	3314,76	4,0653	0,0003	11623,29
10	0,5	2,00	0,0012	-2,9133	9800	18,87	2,9133	3,9912	9273,30	3169,54	4,0085	0,0003	10197,19
10	0,1	10,00	0,0061	-2,2143	6925	22,44	2,2143	3,8404	6400,64	2643,38	3,8396	0,0000	6912,03
20	25,0	0,04	0,0005	-3,2729	11554	17,90	3,2729	4,0627	10994,72	3551,20	4,0754	0,0002	11895,98
20	10,0	0,10	0,0013	-2,8750	9705	19,61	2,8750	3,9870	9142,10	3257,15	4,0006	0,0002	10014,05
20	5,0	0,20	0,0027	-2,5740	8376	21,14	2,5740	3,9230	7812,31	3020,79	3,9333	0,0001	8575,79
20	1,0	1,00	0,0133	-1,8750	5508	25,39	1,8750	3,7410	4975,98	2361,71	3,7375	0,0000	5464,01
20	0,5	2,00	0,0267	-1,5740	4564	26,70	1,5740	3,6593	4077,35	2050,69	3,6358	0,0006	4323,26
20	0,1	10,00	0,1334	-0,8750	2794	28,77	0,8750	3,4462	2449,11	1344,74	3,3637	0,0068	2310,63
30	25,0	0,04	0,0059	-2,2313	7403	22,54	2,2313	3,8694	6837,50	2837,78	3,8444	0,0006	6988,18
30	10,0	0,10	0,0147	-1,8333	5562	25,69	1,8333	3,7452	5012,21	2411,14	3,7241	0,0004	5297,24
30	5,0	0,20	0,0294	-1,5323	4423	27,68	1,5323	3,6457	3916,81	2054,63	3,6209	0,0006	4177,72
30	1,0	1,00	0,1468	-0,8333	2394	32,20	0,8333	3,3791	2025,79	1275,71	3,3462	0,0011	2219,24
30	0,5	2,00	0,2936	-0,5323	1794	33,48	0,5323	3,2538	1496,34	989,65	3,2165	0,0014	1646,39
30	0,1	10,00	1,4678	0,1667	992	32,52	-0,1667	2,9965	836,46	533,29	2,9064	0,0081	806,15
40	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	2256	31,21	1,0000	3,3533	1929,50	1169,01	3,4156	0,0039	2603,54
40	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	1665	31,59	0,6990	3,2214	1418,28	872,19	3,2889	0,0046	1945,04
40	1,0	1,00	1,0000	0,0000	789	32,22	0,0000	2,8971	667,50	420,67	2,9803	0,0069	955,58
40	0,5	2,00	2,0000	0,3010	616	30,11	-0,3010	2,7896	532,88	309,02	2,8475	0,0034	703,87
40	0,1	10,00	10,0000	1,0000	380	25,22	-1,0000	2,5798	343,78	161,92	2,5586	0,0004	361,92

Tabla 116. Datos curva maestra MAC Patrón 10°C (Colombia)

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1E-20	4,3212	20948,52
-19	1E-19	4,3212	20948,52
-18	1E-18	4,3212	20948,50
-17	1E-17	4,3212	20948,47
-16	1E-16	4,3212	20948,41
-15	1E-15	4,3211	20948,29
-14	1E-14	4,3211	20948,03
-13	1E-13	4,3211	20947,49
-12	1E-12	4,3211	20946,38
-11	1E-11	4,3211	20944,08
-10	1E-10	4,3210	20939,31
-9	0,000000001	4,3208	20929,41
-8	0,000000001	4,3203	20908,90
-7	0,00000001	4,3194	20866,45
-6	0,0000001	4,3176	20778,78
-5	0,000001	4,3138	20598,57
-4	0,0001	4,3060	20231,53
-3	0,001	4,2900	19498,28
-1	0,1	4,1926	15582,73
0	1	4,0691	11725,23
1	10	3,8514	7102,69
2	100	3,5162	3282,10
3	1000	3,0937	1240,90
4	10000	2,6780	476,43
5	100000	2,3573	227,65
6	1000000	2,1532	142,31
7	10000000	2,0389	109,37
8	100000000	1,9794	95,36
9	1000000000	1,9495	89,03
10	10000000000	1,9349	86,07
11	1E+11	1,9277	84,67
12	1E+12	1,9243	84,00
13	1E+13	1,9226	83,68
14	1E+14	1,9218	83,52
15	1E+15	1,9214	83,45
16	1E+16	1,9212	83,41
17	1E+17	1,9211	83,39
18	1E+18	1,9211	83,39
19	1E+19	1,9211	83,38
20	1E+20	1,9211	83,38

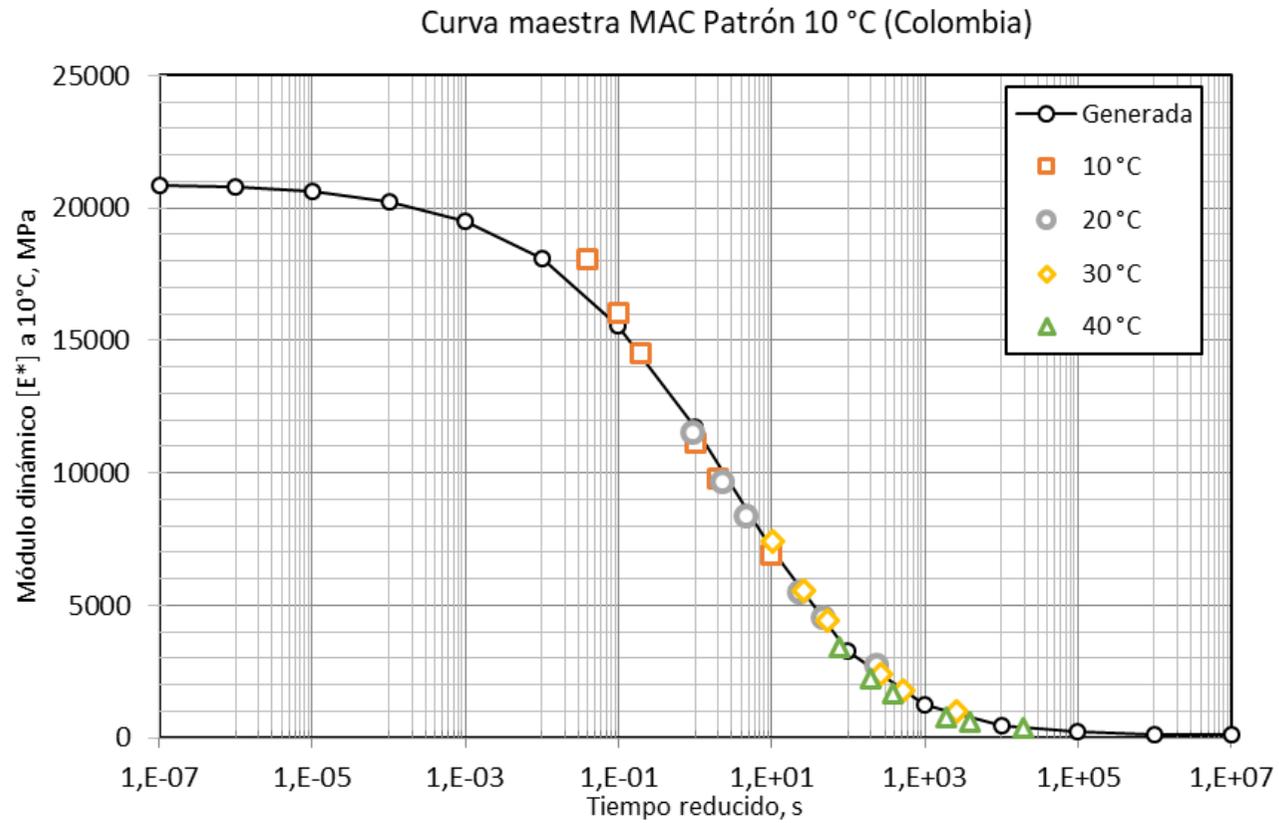


Figura 125. Curva maestra MAC Patr3n 10°C (Colombia)

Tabla 117. Datos curva maestra MAC Patrón 20°C (Colombia)

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1,00E-20	4,3341	21584,38
-19	1,00E-19	4,3341	21584,33
-18	1,00E-18	4,3341	21584,24
-17	1,00E-17	4,3341	21584,06
-16	1,00E-16	4,3341	21583,71
-15	1,00E-15	4,3341	21583
-14	1,00E-14	4,3341	21581,62
-13	1,00E-13	4,334	21578,89
-12	1,00E-12	4,3339	21573,52
-11	1,00E-11	4,3337	21562,95
-10	1,00E-10	4,3333	21542,14
-9	0,000000001	4,3325	21501,22
-8	0,00000001	4,3308	21420,89
-7	0,0000001	4,3276	21263,8
-6	0,000001	4,3214	20958,78
-5	0,00001	4,3091	20374,75
-4	0,0001	4,2853	19286,38
-3	0,001	4,2396	17360,3
-2	0,01	4,1542	14262,53
-1	0,1	4,0021	10048,49
0	1	3,7526	5657,54
1	10	3,3942	2478,43
2	100	2,9662	925,12
3	1000	2,5551	358,97
4	10000	2,2348	171,71
5	100000	2,0237	105,61
6	1000000	1,8995	79,33
7	10000000	1,8311	67,78
8	100000000	1,795	62,37
9	1000000000	1,7762	59,73
10	10000000000	1,7666	58,42
11	1,00E+11	1,7617	57,76
12	1,00E+12	1,7592	57,43
13	1,00E+13	1,7579	57,26
14	1,00E+14	1,7572	57,18
15	1,00E+15	1,7569	57,14
16	1,00E+16	1,7567	57,11
17	1,00E+17	1,7567	57,1
18	1,00E+18	1,7566	57,1
19	1,00E+19	1,7566	57,09
20	1,00E+20	1,7566	57,09

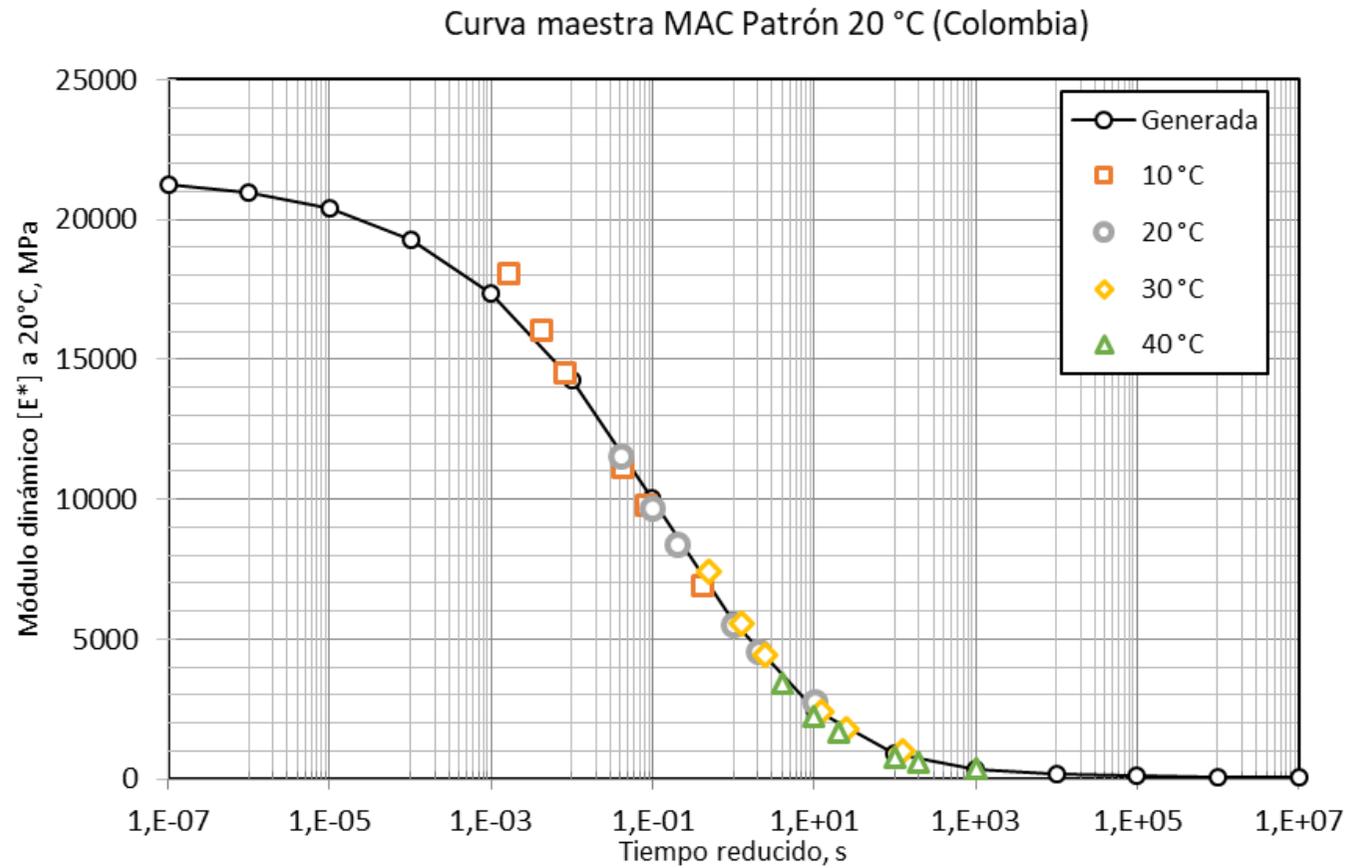


Figura 126. Curva maestra MAC Patrón 20°C (Colombia)

Tabla 118. Datos curva maestra MAC Patrón 30°C (Colombia)

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1E-20	4,3086	20350,07
-19	1E-19	4,3086	20350,02
-18	1E-18	4,3086	20349,90
-17	1E-17	4,3086	20349,68
-16	1E-16	4,3085	20349,22
-15	1E-15	4,3085	20348,29
-14	1E-14	4,3085	20346,40
-13	1E-13	4,3084	20342,57
-12	1E-12	4,3082	20334,80
-11	1E-11	4,3079	20319,06
-10	1E-10	4,3072	20287,18
-9	0,000000001	4,3058	20222,72
-8	0,00000001	4,3030	20092,82
-7	0,0000001	4,2974	19832,78
-6	0,000001	4,2860	19319,16
-5	0,00001	4,2632	18331,54
-4	0,0001	4,2183	16529,86
-3	0,001	4,1321	13555,92
-2	0,01	3,9755	9451,20
-1	0,1	3,7162	5202,93
0	1	3,3475	2225,83
1	10	2,9219	835,43
2	100	2,5347	342,51
3	1000	2,2515	178,43
4	10000	2,0757	119,05
5	100000	1,9776	94,96
6	1000000	1,9259	84,32
7	10000000	1,8996	79,36
8	100000000	1,8864	76,99
9	1000000000	1,8799	75,83
10	10000000000	1,8766	75,27
11	1E+11	1,8750	74,99
12	1E+12	1,8742	74,86
13	1E+13	1,8738	74,79
14	1E+14	1,8736	74,76
15	1E+15	1,8736	74,74
16	1E+16	1,8735	74,73
17	1E+17	1,8735	74,73
18	1E+18	1,8735	74,73
19	1E+19	1,8735	74,72
20	1E+20	1,8735	74,72

)

Curva maestra MAC Patrón 30 °C (Colombia)

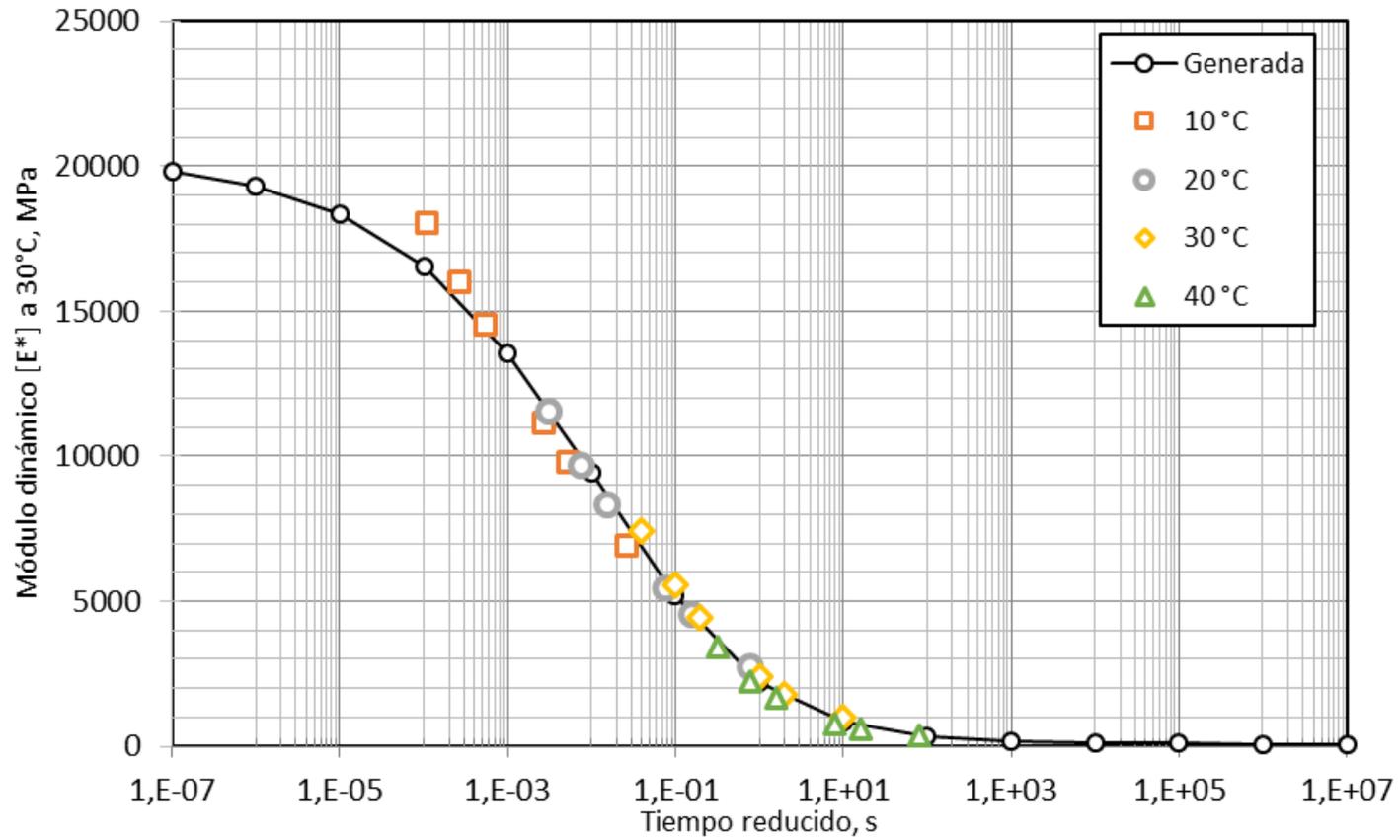


Figura 127. Curva Maestra MAC Patrón 30°C (Colombia)

Tabla 119. Datos curva maestra MAC Patrón 40°C (Colombia)

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1E-20	4,3530	22541,20
-19	1E-19	4,3530	22541,02
-18	1E-18	4,3530	22540,67
-17	1E-17	4,3530	22539,98
-16	1E-16	4,3529	22538,61
-15	1E-15	4,3529	22535,91
-14	1E-14	4,3528	22530,57
-13	1E-13	4,3526	22520,02
-12	1E-12	4,3522	22499,19
-11	1E-11	4,3514	22458,12
-10	1E-10	4,3498	22377,24
-9	0,000000001	4,3467	22218,55
-8	0,00000001	4,3406	21909,35
-7	0,0000001	4,3287	21315,01
-6	0,000001	4,3054	20202,37
-5	0,00001	4,2606	18222,16
-4	0,0001	4,1765	15014,31
-3	0,001	4,0258	10611,46
-2	0,01	3,7767	5979,82
-1	0,1	3,4156	2603,54
0	1	2,9803	955,58
1	10	2,5586	361,92
2	100	2,2284	169,18
3	1000	2,0101	102,36
4	10000	1,8817	76,16
5	100000	1,8112	64,74
6	1000000	1,7739	59,42
7	10000000	1,7547	56,84
8	100000000	1,7448	55,57

Curva maestra MAC Patrón 40 °C Colombia

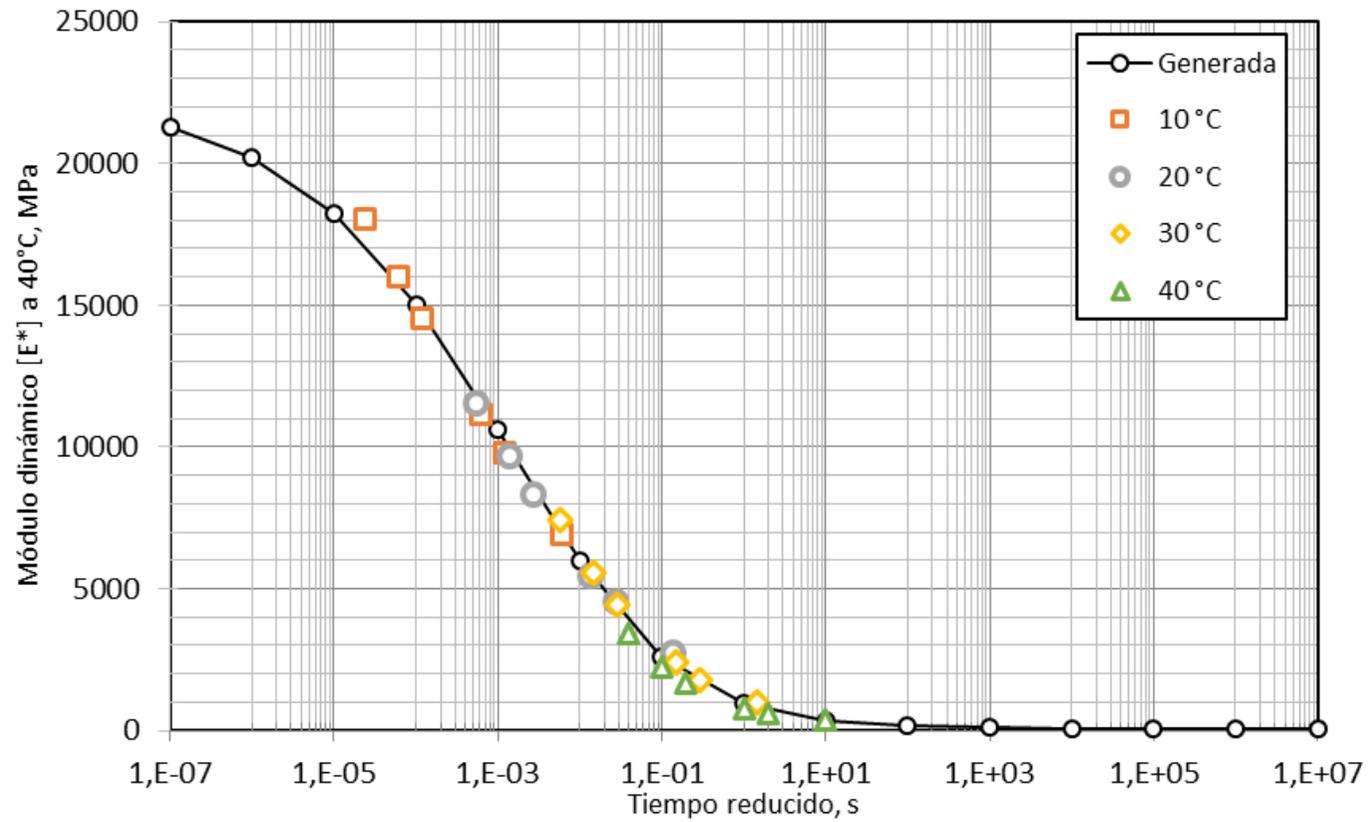


Figura 128. Curva maestra MAC Patrón 40°C (Colombia)

El procedimiento para las MAC 30% Cerámica se repite para cada curva maestra y se resume

7.5.2 Curvas maestras MAC 30% cerámica (Colombia)

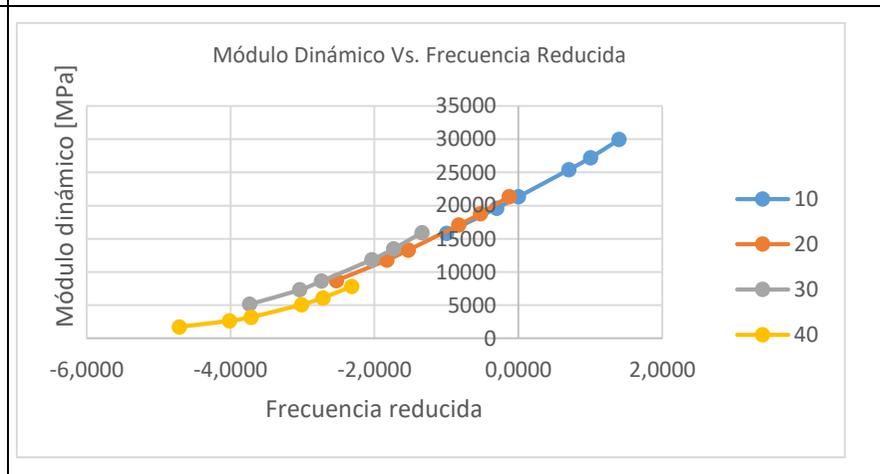
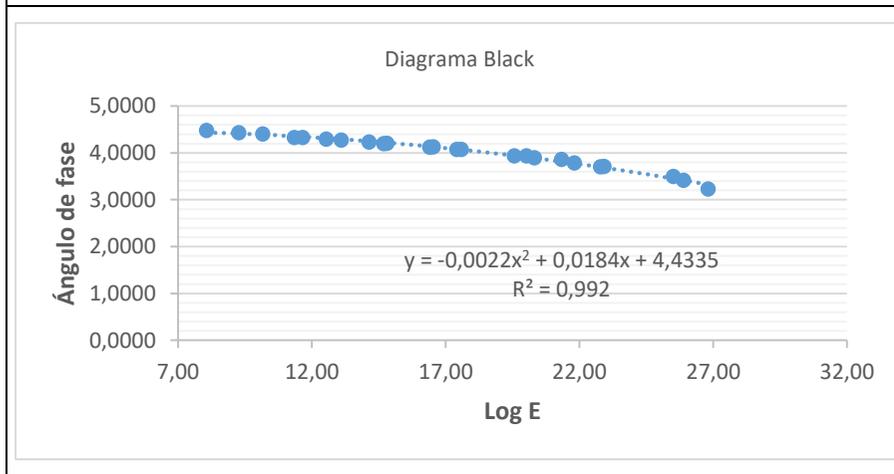
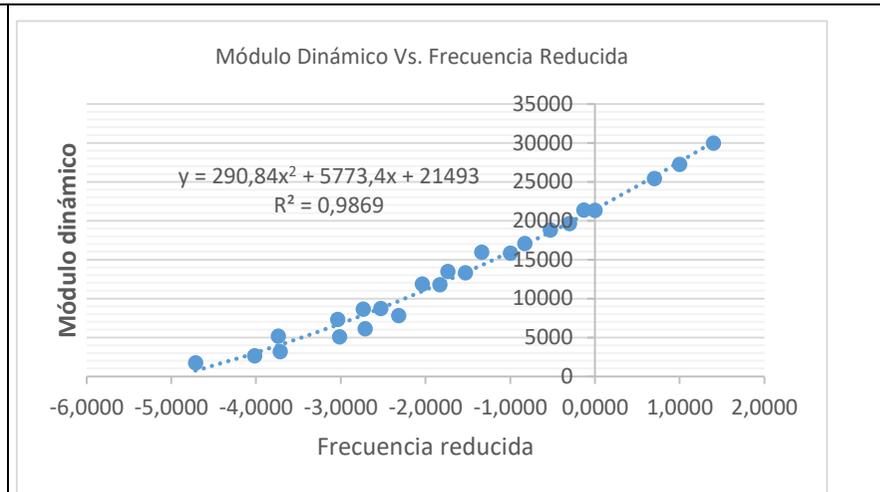
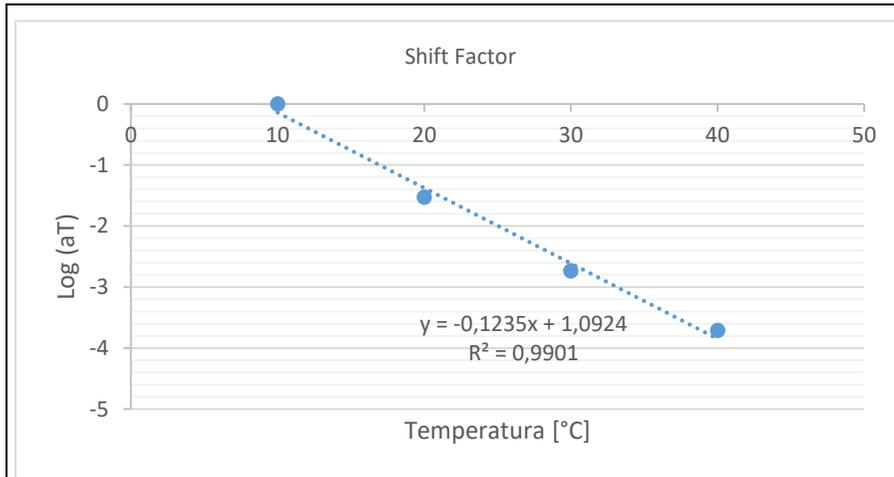
Para la construcción de las curvas maestras del MAC 30% de Cerámica se consignaron en la Tabla 120 los parámetros, extraídos del ensayo de módulos dinámicos, necesarios para la elaboración de las mismas. También se presentan la tabla correspondiente, los coeficientes obtenidos.

Tabla 120. Datos del ensayo módulo dinámico MAC 30% cerámica (Colombia)

Frecuencia [Hz]	Temperatura [°C]	Módulo dinámico [MPa]	Ángulo de fase [°deg]
25,0	10	29960	8,06
25,0	20	21352	11,34
25,0	30	15924	14,8
25,0	40	7810	20,31
10,0	10	27218	9,27
10,0	20	18782	13,1
10,0	30	13475	16,53
10,0	40	6081	21,81
5,0	10	25403	10,16
5,0	20	17062	14,13
5,0	30	11837	17,58
5,0	40	5052	22,79
1,0	10	21326	11,65
1,0	20	13291	16,4
1,0	30	8619	20,01
1,0	40	3167	25,51
0,5	10	19613	12,53
0,5	20	11781	17,41
0,5	30	7298	21,33
0,5	40	2614	25,89
0,1	10	15824	14,68
0,1	20	8699	19,56
0,1	30	5135	22,92
0,1	40	1707	26,81

Tabla 121. Coeficientes para construcción de curvas maestras MAC 30% cerámica para diferentes temperaturas de ensayo (Colombia)

Temperatura		Shift factor		Coeficientes	
10°C	T	Log (aT)	aT	C1	13
	10	0	1	C2	75
	20	-1,52941176	0,02955209	α	2,50213886
	30	-2,73684211	0,00183298	β	-2,32331858
	40	-3,71428571	0,00019307	γ	0,51727502
				δ	2,07206856
20°C	T	Log (aT)	aT	C1	12
	10	1,5	31,6227766	C2	90
	20	0	1	α	3,85756059
	30	-1,2	0,06309573	β	-1,71430316
	40	-2,18181818	0,00657933	γ	0,37736249
				δ	0,84294445
30°C	T	Log (aT)	aT	C1	10
	10	2,85714286	719,685673	C2	90
	20	1,25	17,7827941	α	2,92433567
	30	0	1	β	-1,16314544
	40	-1	0,1	γ	0,48815132
				δ	1,63464213
40°C	T	Log (aT)	aT	C1	9
	10	3,85714286	7196,85673	C2	100
	20	2,25	177,827941	α	2,39909493
	30	1	10	β	-0,41152318
	40	0	1	γ	0,5513498
				δ	2,12494884



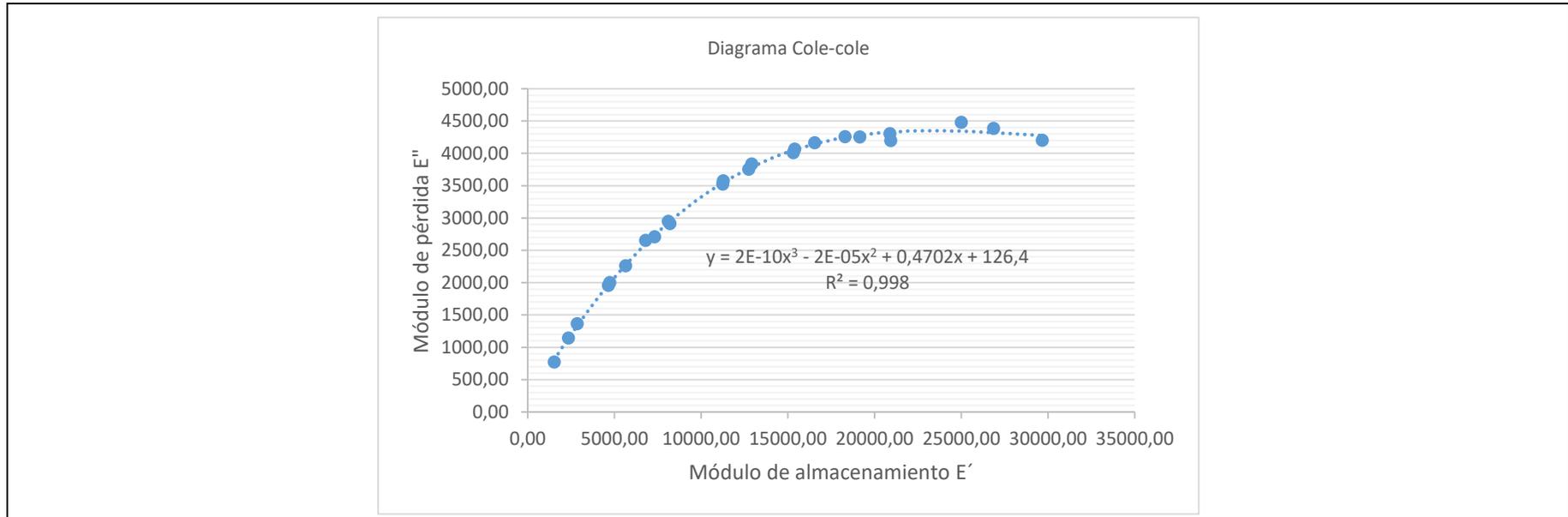


Figura 129. Gráficas de comprobación de la construcción de las curvas maestras MAC 30% cerámica (Colombia)

Tabla 122. M3dulo dinámico calculado para curva maestra MAC 30% cerámica temperatura de referencia 10°C (Colombia)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	M3dulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	M3dulo de almacenamiento (E')	M3dulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,04000	-1,39794	29960	8,06	1,3979	4,4765	29664,05	4200,69	4,4607	0,0003	28885,61
10	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	27218	9,27	1,0000	4,4349	26862,54	4384,47	4,4362	0,0000	27300,18
10	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	25403	10,16	0,6990	4,4049	25004,66	4481,03	4,4144	0,0001	25965,21
10	1,0	1,00	1,0000	0,0000	21326	11,65	0,0000	4,3289	20886,67	4306,42	4,3510	0,0005	22438,38
10	0,5	2,00	2,0000	0,3010	19613	12,53	-0,3010	4,2925	19145,87	4255,06	4,3172	0,0006	20760,77
10	0,1	10,00	10,0000	1,0000	15824	14,68	-1,0000	4,1993	15307,45	4010,12	4,2211	0,0005	16638,46
20	25,0	0,04	1,3535	0,1315	21352	11,34	-0,1315	4,3294	20935,16	4198,46	4,3368	0,0001	21715,70
20	10,0	0,10	3,3839	0,5294	18782	13,10	-0,5294	4,2737	18293,22	4256,96	4,2887	0,0002	19440,07
20	5,0	0,20	6,7677	0,8304	17062	14,13	-0,8304	4,2320	16545,78	4165,22	4,2469	0,0002	17655,68
20	1,0	1,00	33,8386	1,5294	13291	16,40	-1,5294	4,1236	12750,24	3752,60	4,1296	0,0000	13478,59
20	0,5	2,00	67,6771	1,8304	11781	17,41	-1,8304	4,0712	11241,29	3524,96	4,0698	0,0000	11744,58
20	0,1	10,00	338,3855	2,5294	8699	19,56	-2,5294	3,9395	8196,99	2912,37	3,9086	0,0010	8101,99
30	25,0	0,04	21,8224	1,3389	15924	14,80	-1,3389	4,2021	15395,70	4067,72	4,1645	0,0014	14606,09
30	10,0	0,10	54,5559	1,7368	13475	16,53	-1,7368	4,1295	12918,09	3833,87	4,0891	0,0016	12275,91
30	5,0	0,20	109,1119	2,0379	11837	17,58	-2,0379	4,0732	11284,17	3575,21	4,0252	0,0023	10598,47
30	1,0	1,00	545,5595	2,7368	8619	20,01	-2,7368	3,9355	8098,70	2949,29	3,8549	0,0065	7159,36
30	0,5	2,00	1091,1190	3,0379	7298	21,33	-3,0379	3,8632	6798,09	2654,57	3,7725	0,0082	5922,50
30	0,1	10,00	5455,5948	3,7368	5135	22,92	-3,7368	3,7105	4729,59	1999,80	3,5643	0,0214	3666,55
40	25,0	0,04	207,1790	2,3163	7810	20,31	-2,3163	3,8927	7324,44	2710,85	3,9610	0,0047	9141,79
40	10,0	0,10	517,9475	2,7143	6081	21,81	-2,7143	3,7840	5645,73	2259,27	3,8608	0,0059	7258,37
40	5,0	0,20	1035,8949	3,0153	5052	22,79	-3,0153	3,7035	4657,59	1956,92	3,7788	0,0057	6009,65
40	1,0	1,00	5179,4747	3,7143	3167	25,51	-3,7143	3,5006	2858,25	1363,93	3,5713	0,0050	3726,29
40	0,5	2,00	10358,9494	4,0153	2614	25,89	-4,0153	3,4173	2351,64	1141,39	3,4764	0,0035	2995,23
40	0,1	10,00	51794,7468	4,7143	1707	26,81	-4,7143	3,2322	1523,51	769,91	3,2511	0,0004	1782,86

Tabla 123. M3dulo dinámico calculado para curva maestra MAC 30% cerámica temperatura de referencia 20°C (Colombia)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	M3dulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	M3dulo de almacenamiento (E')	M3dulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,00126	-2,89794	17642	12,61	2,8979	4,2465	17216,45	3851,49	4,2101	0,0013	16220,57
10	10,0	0,10	0,0032	-2,5000	15968	14,18	2,5000	4,2033	15481,47	3911,66	4,1841	0,0004	15277,53
10	5,0	0,20	0,0063	-2,1990	14600	14,53	2,1990	4,1644	14133,04	3662,95	4,1599	0,0000	14450,41
10	1,0	1,00	0,0316	-1,5000	11540	16,89	1,5000	4,0622	11042,21	3352,78	4,0849	0,0005	12158,43
10	0,5	2,00	0,0632	-1,1990	10272	18,07	1,1990	4,0117	9765,37	3186,16	4,0427	0,0010	11033,40
10	0,1	10,00	0,3162	-0,5000	7570	21,31	0,5000	3,8791	7052,42	2751,04	3,9166	0,0014	8252,75
20	25,0	0,04	0,0400	-1,3979	11768	16,38	1,3979	4,0707	11290,37	3318,65	4,0713	0,0000	11784,77
20	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	9943	18,58	1,0000	3,9975	9424,77	3168,12	4,0110	0,0002	10257,32
20	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	8655	20,08	0,6990	3,9373	8128,90	2971,54	3,9568	0,0004	9053,90
20	1,0	1,00	1,0000	0,0000	5889	23,95	0,0000	3,7700	5381,96	2390,58	3,7990	0,0008	6294,96
20	0,5	2,00	2,0000	0,3010	4965	25,09	-0,3010	3,6959	4496,52	2105,37	3,7165	0,0004	5206,21
20	0,1	10,00	10,0000	1,0000	3176	27,32	-1,0000	3,5019	2821,74	1457,66	3,4931	0,0001	3112,72
30	25,0	0,04	0,6340	-0,1979	7886	21,87	0,1979	3,8969	7318,46	2937,55	3,8484	0,0023	7053,91
30	10,0	0,10	1,5849	0,2000	6072	24,02	-0,2000	3,7833	5546,19	2471,64	3,7452	0,0015	5561,27
30	5,0	0,20	3,1698	0,5010	4960	25,90	-0,5010	3,6955	4461,81	2166,54	3,6570	0,0015	4539,02
30	1,0	1,00	15,8489	1,2000	2867	30,09	-1,2000	3,4574	2480,64	1437,40	3,4222	0,0012	2643,63
30	0,5	2,00	31,6979	1,5010	2207	31,67	-1,5010	3,3438	1878,35	1158,73	3,3111	0,0011	2047,07
30	0,1	10,00	158,4893	2,2000	1262	32,17	-2,2000	3,1011	1068,25	671,93	3,0436	0,0033	1105,49
40	10,0	0,10	15,1991	1,1818	2699	31,30	-1,1818	3,4312	2306,18	1402,18	3,4288	0,0000	2683,83
40	5,0	0,20	30,3982	1,4828	2029	32,29	-1,4828	3,3073	1715,23	1083,90	3,3180	0,0001	2079,50
40	1,0	1,00	151,9911	2,1818	1010	34,22	-2,1818	3,0043	835,15	568,00	3,0505	0,0021	1123,37
40	0,5	2,00	303,9822	2,4828	792	32,87	-2,4828	2,8987	665,20	429,85	2,9362	0,0014	863,39

Tabla 124. Módulo dinámico calculado para curva maestra MAC 30% cerámica temperatura de referencia 30°C (Colombia)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	Módulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	Módulo de almacenamiento (E')	Módulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,00006	-4,25508	17642	12,61	4,2551	4,2465	17216,45	3851,49	4,1901	0,0032	15490,17
10	10,0	0,10	0,0001	-3,8571	15968	14,18	3,8571	4,2033	15481,47	3911,66	4,1697	0,0011	14780,98
10	5,0	0,20	0,0003	-3,5561	14600	14,53	3,5561	4,1644	14133,04	3662,95	4,1504	0,0002	14138,41
10	1,0	1,00	0,0014	-2,8571	11540	16,89	2,8571	4,0622	11042,21	3352,78	4,0886	0,0007	12263,50
10	0,5	2,00	0,0028	-2,5561	10272	18,07	2,5561	4,0117	9765,37	3186,16	4,0529	0,0017	11294,11
10	0,1	10,00	0,0139	-1,8571	7570	21,31	1,8571	3,8791	7052,42	2751,04	3,9425	0,0040	8760,39
20	25,0	0,04	0,0022	-2,6479	11768	16,38	2,6479	4,0707	11290,37	3318,65	4,0644	0,0000	11599,34
20	10,0	0,10	0,0056	-2,2500	9943	18,58	2,2500	3,9975	9424,77	3168,12	4,0096	0,0001	10223,46
20	5,0	0,20	0,0112	-1,9490	8655	20,08	1,9490	3,9373	8128,90	2971,54	3,9594	0,0005	9108,46
20	1,0	1,00	0,0562	-1,2500	5889	23,95	1,2500	3,7700	5381,96	2390,58	3,8100	0,0016	6456,44
20	0,5	2,00	0,1125	-0,9490	4965	25,09	0,9490	3,6959	4496,52	2105,37	3,7305	0,0012	5376,01
20	0,1	10,00	0,5623	-0,2500	3176	27,32	0,2500	3,5019	2821,74	1457,66	3,5122	0,0001	3252,67
30	25,0	0,04	0,0400	-1,3979	7886	21,87	1,3979	3,8969	7318,46	2937,55	3,8457	0,0026	7009,56
30	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	6072	24,02	1,0000	3,7833	5546,19	2471,64	3,7446	0,0015	5553,79
30	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	4960	25,90	0,6990	3,6955	4461,81	2166,54	3,6575	0,0014	4544,90
30	1,0	1,00	1,0000	0,0000	2867	30,09	0,0000	3,4574	2480,64	1437,40	3,4247	0,0011	2658,77
30	0,5	2,00	2,0000	0,3010	2207	31,67	-0,3010	3,3438	1878,35	1158,73	3,3148	0,0008	2064,31
30	0,1	10,00	10,0000	1,0000	1262	32,17	-1,0000	3,1011	1068,25	671,93	3,0532	0,0023	1130,39
40	10,0	0,10	1,0000	0,0000	2699	31,30	0,0000	3,4312	2306,18	1402,18	3,4247	0,0000	2658,77
40	5,0	0,20	2,0000	0,3010	2029	32,29	-0,3010	3,3073	1715,23	1083,90	3,3148	0,0001	2064,31
40	1,0	1,00	10,0000	1,0000	1010	34,22	-1,0000	3,0043	835,15	568,00	3,0532	0,0024	1130,39
40	0,5	2,00	20,0000	1,3010	792	32,87	-1,3010	2,8987	665,20	429,85	2,9438	0,0020	878,65

Tabla 125. Módulo dinámico calculado para curva maestra MAC 30% cerámica temperatura de referencia 40°C (Colombia)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	Módulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	Módulo de almacenamiento (E')	Módulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,00001	-5,25508	17642	12,61	5,2551	4,2465	17216,45	3851,49	4,1892	0,0033	15459,24
10	10,0	0,10	0,0000	-4,8571	15968	14,18	4,8571	4,2033	15481,47	3911,66	4,1698	0,0011	14785,64
10	5,0	0,20	0,0000	-4,5561	14600	14,53	4,5561	4,1644	14133,04	3662,95	4,1513	0,0002	14169,03
10	1,0	1,00	0,0001	-3,8571	11540	16,89	3,8571	4,0622	11042,21	3352,78	4,0914	0,0009	12342,62
10	0,5	2,00	0,0003	-3,5561	10272	18,07	3,5561	4,0117	9765,37	3186,16	4,0563	0,0020	11385,30
10	0,1	10,00	0,0014	-2,8571	7570	21,31	2,8571	3,8791	7052,42	2751,04	3,9470	0,0046	8851,63
20	25,0	0,04	0,0002	-3,6479	11768	16,38	3,6479	4,0707	11290,37	3318,65	4,0677	0,0000	11687,56
20	10,0	0,10	0,0006	-3,2500	9943	18,58	3,2500	3,9975	9424,77	3168,12	4,0137	0,0003	10319,63
20	5,0	0,20	0,0011	-2,9490	8655	20,08	2,9490	3,9373	8128,90	2971,54	3,9639	0,0007	9201,95
20	1,0	1,00	0,0056	-2,2500	5889	23,95	2,2500	3,7700	5381,96	2390,58	3,8142	0,0020	6519,84
20	0,5	2,00	0,0112	-1,9490	4965	25,09	1,9490	3,6959	4496,52	2105,37	3,7341	0,0015	5421,30
20	0,1	10,00	0,0562	-1,2500	3176	27,32	1,2500	3,5019	2821,74	1457,66	3,5136	0,0001	3262,57
30	25,0	0,04	0,0040	-2,3979	7886	21,87	2,3979	3,8969	7318,46	2937,55	3,8501	0,0022	7081,32
30	10,0	0,10	0,0100	-2,0000	6072	24,02	2,0000	3,7833	5546,19	2471,64	3,7484	0,0012	5602,17
30	5,0	0,20	0,0200	-1,6990	4960	25,90	1,6990	3,6955	4461,81	2166,54	3,6605	0,0012	4575,63
30	1,0	1,00	0,1000	-1,0000	2867	30,09	1,0000	3,4574	2480,64	1437,40	3,4251	0,0010	2661,21
30	0,5	2,00	0,2000	-0,6990	2207	31,67	0,6990	3,3438	1878,35	1158,73	3,3142	0,0009	2061,73
30	0,1	10,00	1,0000	0,0000	1262	32,17	0,0000	3,1011	1068,25	671,93	3,0523	0,0024	1127,94
40	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	2699	31,30	1,0000	3,4312	2306,18	1402,18	3,4251	0,0000	2661,21
40	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	2029	32,29	0,6990	3,3073	1715,23	1083,90	3,3142	0,0000	2061,73
40	1,0	1,00	1,0000	0,0000	1010	34,22	0,0000	3,0043	835,15	568,00	3,0523	0,0023	1127,94
40	0,5	2,00	2,0000	0,3010	792	32,87	-0,3010	2,8987	665,20	429,85	2,9438	0,0020	878,70

Tabla 126. Datos curva maestra MAC 30% cerámica 10°C (Colombia)

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1,00E-20	4,3376	21755,05
-19	1,00E-19	4,3376	21755
-18	1,00E-18	4,3376	21754,92
-17	1,00E-17	4,3376	21754,76
-16	1,00E-16	4,3375	21754,46
-15	1,00E-15	4,3375	21753,91
-14	1,00E-14	4,3375	21752,88
-13	1,00E-13	4,3375	21750,96
-12	1,00E-12	4,3374	21747,37
-11	1,00E-11	4,3373	21740,68
-10	1,00E-10	4,337	21728,2
-9	1E-09	4,3366	21704,93
-8	0,00000001	4,3357	21661,6
-7	0,0000001	4,3341	21581,05
-6	0,000001	4,3311	21431,81
-5	0,00001	4,3255	21157,06
-4	0,0001	4,3151	20657,06
-3	0,001	4,2959	19766,46
-2	0,01	4,261	18240,59
-1	0,1	4,1987	15800,44
0	1	4,091	12330,54
1	10	3,9157	8236,47
2	100	3,6563	4532,36
3	1000	3,3215	2096,55
4	10000	2,9583	908,38
5	100000	2,6315	428,01
6	1000000	2,3834	241,74
7	10000000	2,2182	165,28
8	100000000	2,1177	131,13
9	1000000000	2,0598	114,77
10	1E+10	2,0275	106,55
11	1,00E+11	2,0099	102,3
12	1,00E+12	2,0003	100,06
13	1,00E+13	1,9951	98,88
14	1,00E+14	1,9923	98,25
15	1,00E+15	1,9908	97,91
16	1,00E+16	1,99	97,73
17	1,00E+17	1,9896	97,64
18	1,00E+18	1,9894	97,59
19	1,00E+19	1,9893	97,56
20	1,00E+20	1,9892	97,54

Curva maestra MAC 30 % cerámica 10 °C (Colombia)

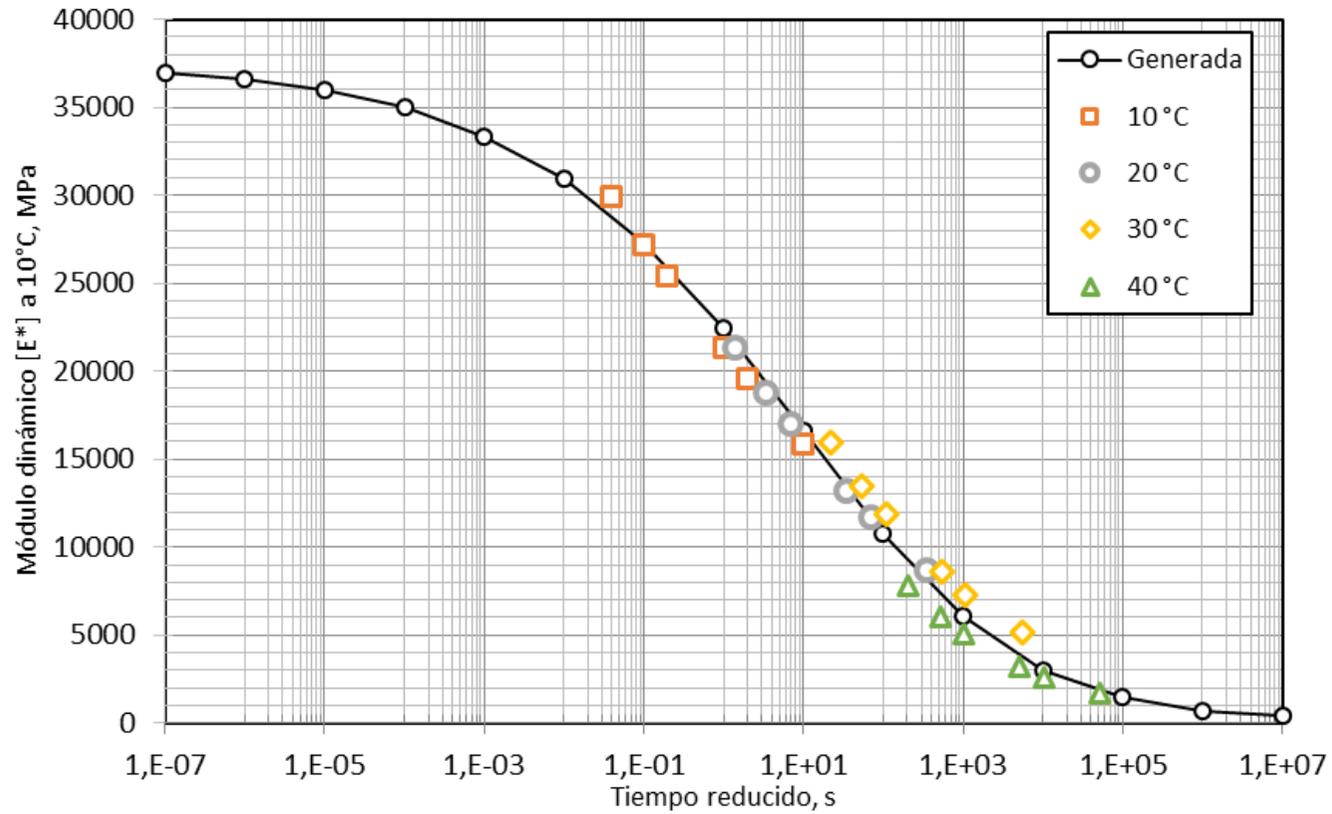


Figura 130. Curva maestra MAC 30% cerámica 10°C (Colombia)

Tabla 127. Datos curva maestra MAC 30% cerámica 20°C (Colombia)

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1,00E-20	4,7001	50134,72
-19	1,00E-19	4,7	50115,33
-18	1,00E-18	4,6997	50087,07
-17	1,00E-17	4,6994	50045,89
-16	1,00E-16	4,6988	49985,91
-15	1,00E-15	4,6981	49898,59
-14	1,00E-14	4,697	49771,58
-13	1,00E-13	4,6954	49587,04
-12	1,00E-12	4,693	49319,41
-11	1,00E-11	4,6896	48932,25
-10	1,00E-10	4,6846	48374,26
-9	1E-09	4,6774	47574,39
-8	0,00000001	4,6669	46436,69
-7	0,0000001	4,6516	44836,66
-6	0,000001	4,6296	42622,65
-5	0,00001	4,598	39629,34
-4	0,0001	4,5528	35713,43
-3	0,001	4,4888	30821,07
-2	0,01	4,3994	25083,67
-1	0,1	4,2765	18902,64
0	1	4,1118	12936,49
1	10	3,8981	7908,24
2	100	3,6321	4286,52
3	1000	3,3179	2079,06
4	10000	2,9686	930,24
5	100000	2,6058	403,43
6	1000000	2,2544	179,64
7	10000000	1,9365	86,4
8	100000000	1,6661	46,36
9	1000000000	1,4479	28,05
10	1E+10	1,2793	19,02
11	1,00E+11	1,1532	14,23
12	1,00E+12	1,0612	11,51
13	1,00E+13	0,9953	9,89
14	1,00E+14	0,9487	8,89
15	1,00E+15	0,9161	8,24
16	1,00E+16	0,8934	7,82
17	1,00E+17	0,8777	7,55
18	1,00E+18	0,8668	7,36
19	1,00E+19	0,8594	7,23
20	1,00E+20	0,8542	7,15

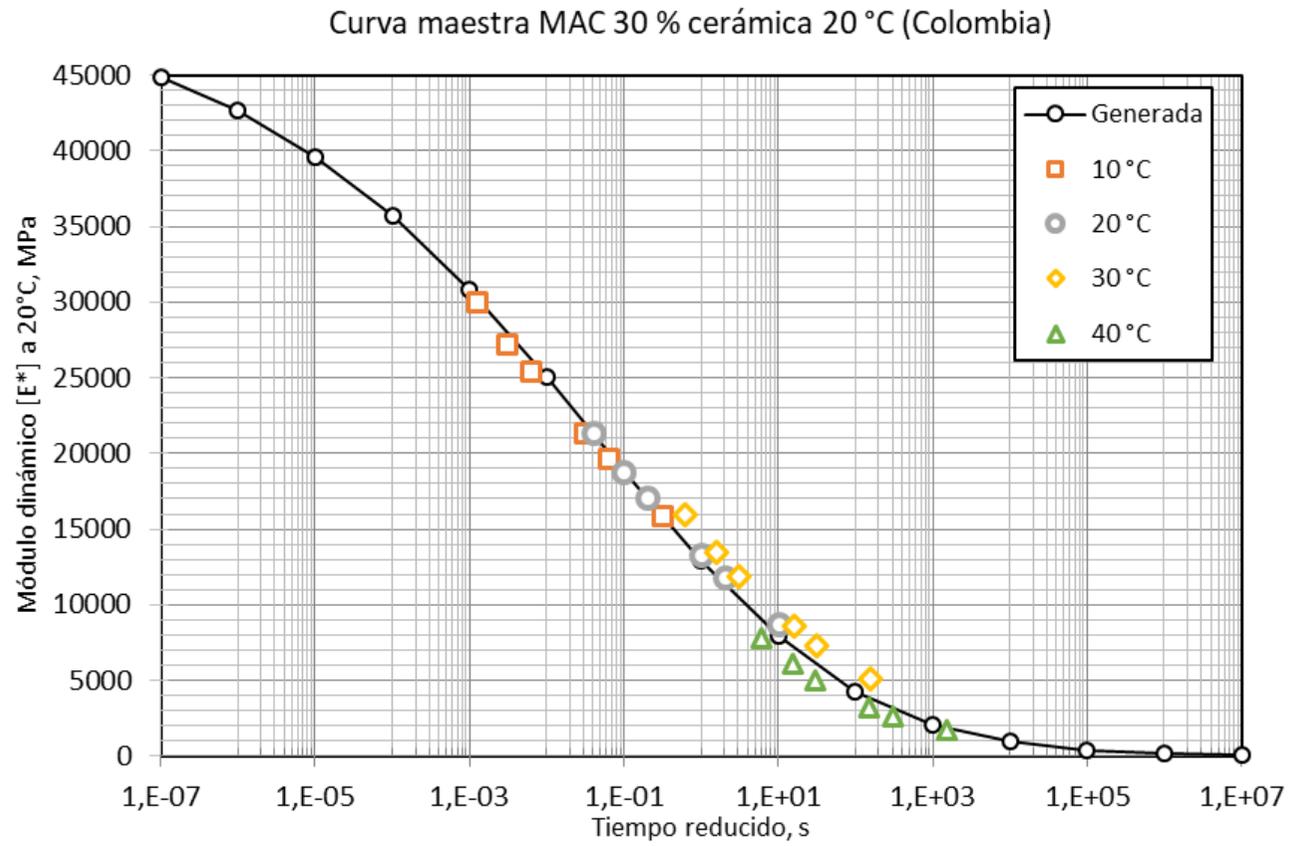


Figura 131. Curva maestra MAC 30% cerámica 20°C (Colombia)

Tabla 128. Datos curva maestra MAC 30% cerámica 30°C (Colombia)

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1,00E-20	4,5589	36218,06
-19	1,00E-19	4,5589	36215,3
-18	1,00E-18	4,5588	36210,81
-17	1,00E-17	4,5588	36203,49
-16	1,00E-16	4,5586	36191,56
-15	1,00E-15	4,5584	36172,14
-14	1,00E-14	4,558	36140,52
-13	1,00E-13	4,5574	36089,09
-12	1,00E-12	4,5564	36005,5
-11	1,00E-11	4,5547	35869,83
-10	1,00E-10	4,5521	35650,21
-9	1E-09	4,5477	35296,1
-8	0,00000001	4,5407	34728,88
-7	0,0000001	4,5293	33829,8
-6	0,000001	4,5109	32428,71
-5	0,00001	4,4815	30303,59
-4	0,0001	4,4348	27214,73
-3	0,001	4,3619	23010,54
-2	0,01	4,251	17823,08
-1	0,1	4,0884	12256,13
0	1	3,8627	7289,61
1	10	3,5724	3735,66
2	100	3,233	1710,06
3	1000	2,8782	755,4
4	10000	2,5479	353,08
5	100000	2,272	187,08
6	1000000	2,0618	115,29
7	10000000	1,9125	81,75
8	100000000	1,8117	64,81
9	1000000000	1,7459	55,71
10	1E+10	1,7039	50,58
11	1,00E+11	1,6776	47,6
12	1,00E+12	1,6611	45,83
13	1,00E+13	1,651	44,77
14	1,00E+14	1,6447	44,12
15	1,00E+15	1,6408	43,73
16	1,00E+16	1,6384	43,49
17	1,00E+17	1,637	43,35
18	1,00E+18	1,6361	43,26
19	1,00E+19	1,6355	43,2
20	1,00E+20	1,6352	43,17

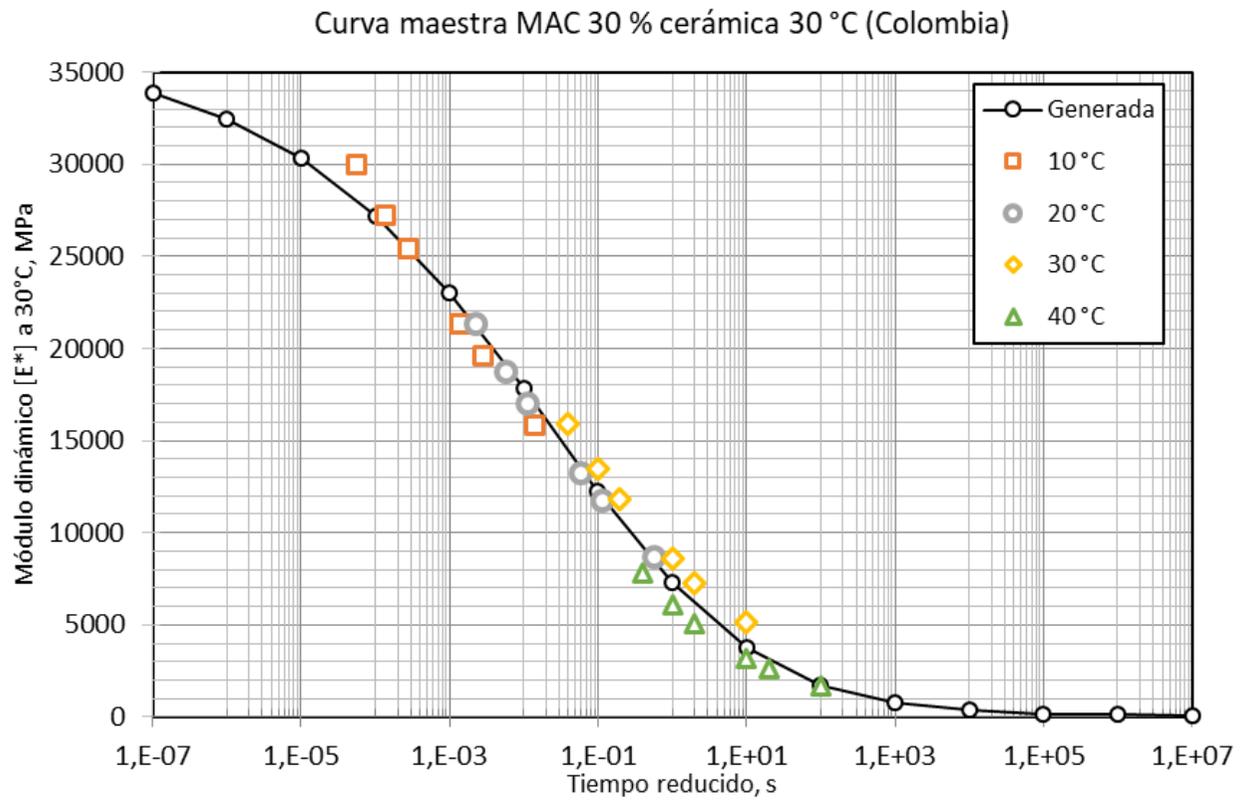


Figura 132. Curva maestra MAC 30% cerámica 30°C (Colombia)

Tabla 129. Datos curva maestra MAC 30% cerámica 40°C (Colombia)

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1,00E-20	4,524	33420,88
-19	1,00E-19	4,524	33419,42
-18	1,00E-18	4,524	33416,88
-17	1,00E-17	4,5239	33412,48
-16	1,00E-16	4,5238	33404,83
-15	1,00E-15	4,5236	33391,57
-14	1,00E-14	4,5233	33368,57
-13	1,00E-13	4,5228	33328,7
-12	1,00E-12	4,5219	33259,66
-11	1,00E-11	4,5204	33140,29
-10	1,00E-10	4,5177	32934,5
-9	1E-09	4,513	32581,44
-8	0,00000001	4,5049	31980,84
-7	0,0000001	4,491	30973,79
-6	0,000001	4,4673	29326,41
-5	0,00001	4,4272	26740,82
-4	0,0001	4,3608	22949,22
-3	0,001	4,2542	17954,52
-2	0,01	4,0915	12343,94
-1	0,1	3,8612	7263,83
0	1	3,5679	3697,36
1	10	3,2408	1740,88
2	100	2,9257	842,75
3	1000	2,6623	459,56
4	10000	2,4671	293,13
5	100000	2,3347	216,14
6	1000000	2,2505	178,02
7	10000000	2,1989	158,09
8	100000000	2,1681	147,28
9	1000000000	2,15	141,26
10	1E+10	2,1395	137,87
11	1,00E+11	2,1333	135,93
12	1,00E+12	2,1298	134,83
13	1,00E+13	2,1277	134,2
14	1,00E+14	2,1266	133,83
15	1,00E+15	2,1259	133,62
16	1,00E+16	2,1255	133,5
17	1,00E+17	2,1253	133,43
18	1,00E+18	2,1251	133,39
19	1,00E+19	2,1251	133,37
20	1,00E+20	2,125	133,35

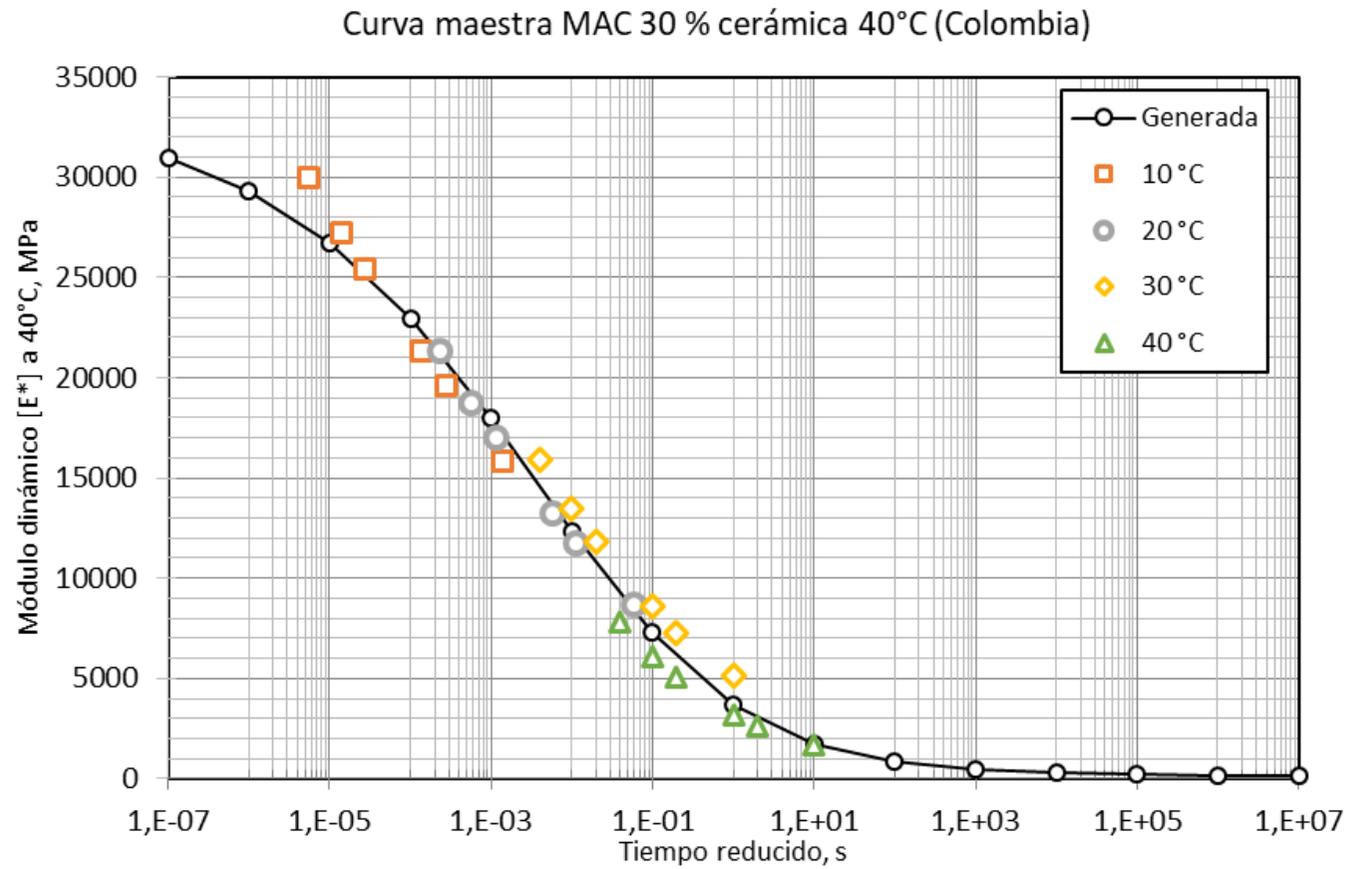


Figura 133. Curva maestra MAC 30% cerámica 40°C (Colombia)

7.5.3 Curvas maestras MAC 35% cerámica (Colombia)

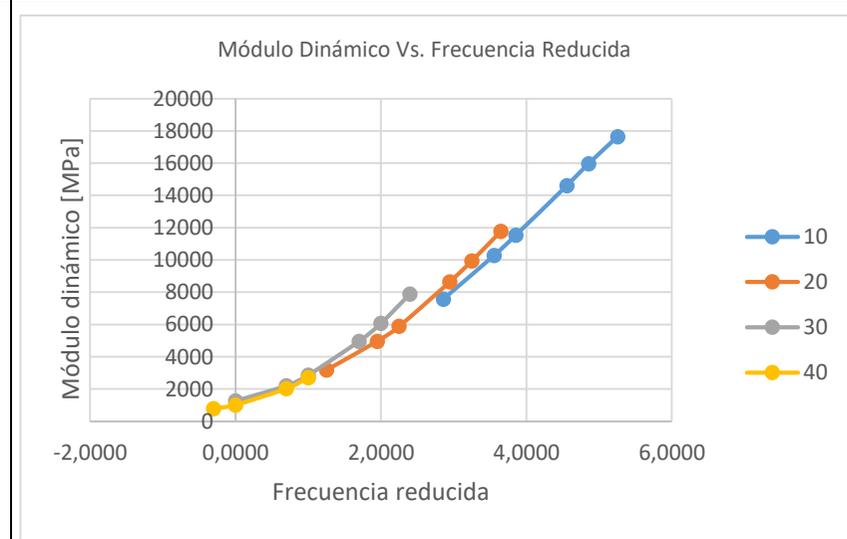
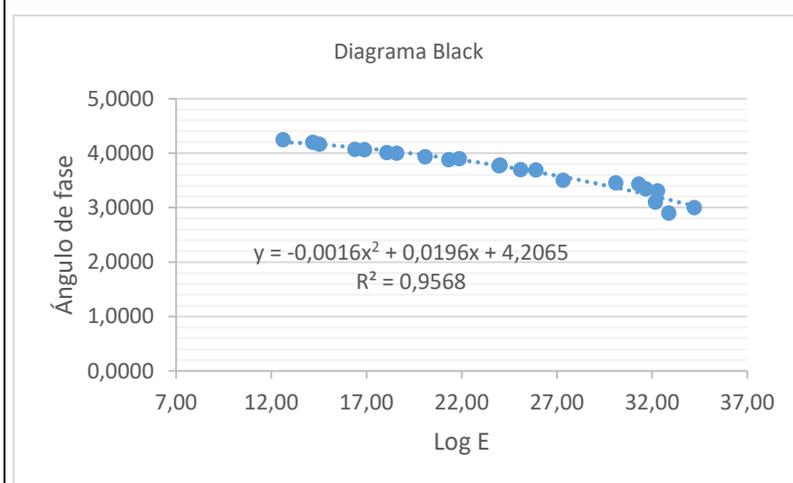
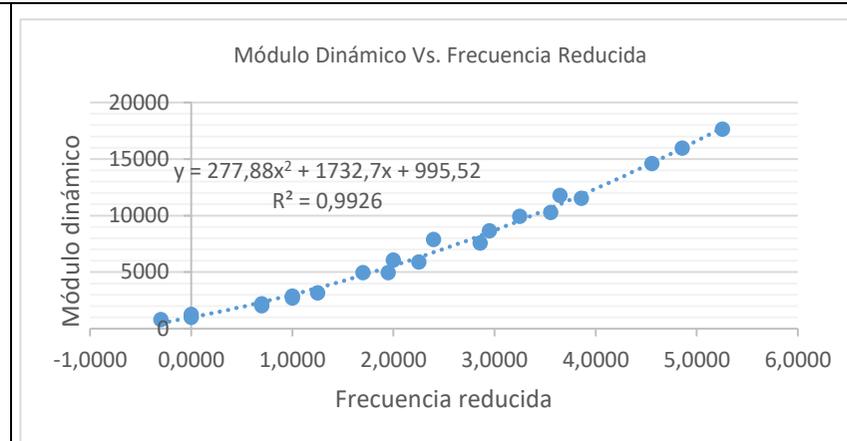
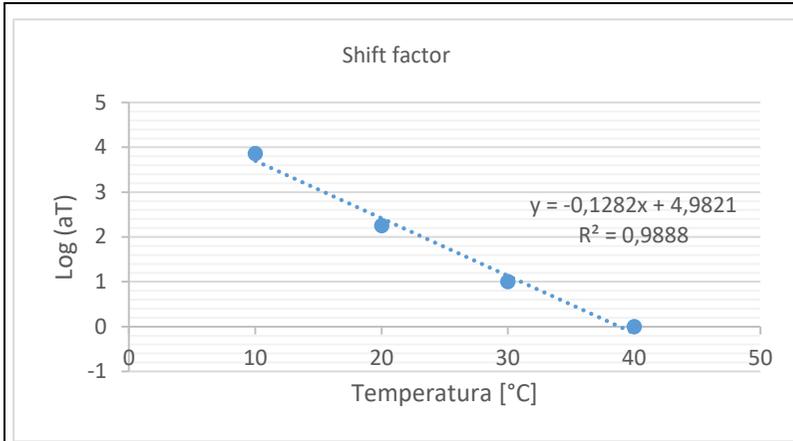
De igual forma que las anteriores MAC se muestra en este caso para la MAC 35% cerámica, todas las tablas y figuras de soporte.

Tabla 130. Datos ensayo de módulo dinámico MAC 35% cerámica (Colombia)

Frecuencia [Hz]	Temperatura [°C]	Módulo dinámico [MPa]	Ángulo de fase [°deg]
25	10	17642	12,61
25	20	11768	16,38
25	30	7886	21,87
25	40	4037	-90,21
10	10	15968	14,18
10	20	9943	18,58
10	30	6072	24,02
10	40	2699	31,3
5	10	14600	14,53
5	20	8655	20,08
5	30	4960	25,9
5	40	2029	32,29
1	10	11540	16,89
1	20	5889	23,95
1	30	2867	30,09
1	40	1010	34,22
0,5	10	10272	18,07
0,5	20	4965	25,09
0,5	30	2207	31,67
0,5	40	792	32,87
0,1	10	7570	21,31
0,1	20	3176	27,32
0,1	30	1262	32,17
0,1	40	503	29

Tabla 131. Shift Factor y Coeficientes MAC 35% Cerámica para diferentes temperaturas (Colombia)

Temperatura		Shift factor		Coeficientes	
10°C	T	Log (aT)	aT	C1	13
	10	0	1	C2	75
	20	-1,52941176	0,02955209	α	2,34843769
	30	-2,73684211	0,00183298	β	-
	40	-3,71428571	0,00019307	γ	2,14289436
				δ	0,62395113
20°C	T	Log (aT)	aT	C1	12
	10	1,5	31,6227766	C2	90
	20	0	1	α	2,34662825
	30	-1,2	0,06309573	β	-
	40	-2,18181818	0,00657933	γ	1,29941303
				δ	0,65655644
30°C	T	Log (aT)	aT	C1	10
	10	2,85714286	719,685673	C2	90
	20	1,25	17,7827941	α	2,12930013
	30	0	1	β	-
	40	-1	0,1	γ	0,44678793
				δ	0,70652913
40°C	T	Log (aT)	aT	C1	9
	10	3,85714286	7196,85673	C2	100
	20	2,25	177,827941	α	2,06937649
	30	1	10	β	0,31571682
	40	0	1	γ	0,7289684
				δ	2,17958861



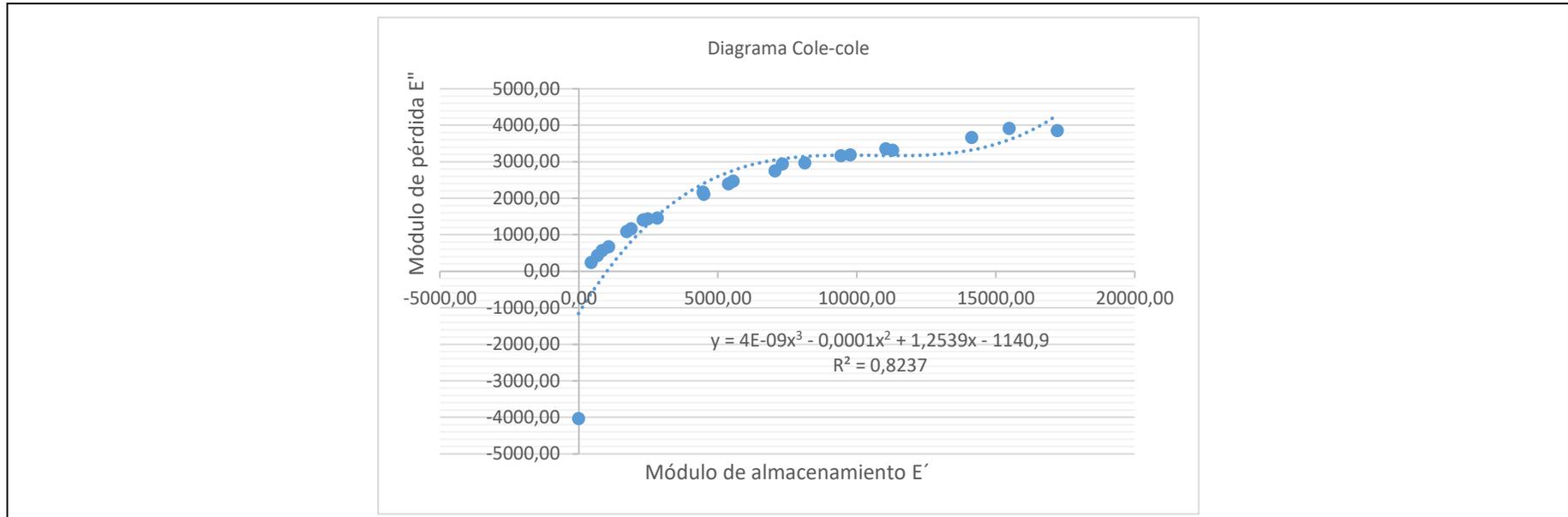


Figura 134. Gráficas de comprobación de la construcción de las curvas maestras MAC 35% cerámica (Colombia)

Tabla 132. M3dulo dinámico calculado para curva maestra MAC 35% cerámica temperatura de referencia 10°C (Colombia)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	M3dulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	M3dulo de almacenamiento (E')	M3dulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,04000	-1,39794	17642	12,61	1,3979	4,2465	17216,45	3851,49	4,2278	0,0004	16895,84
10	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	15968	14,18	1,0000	4,2033	15481,47	3911,66	4,1987	0,0000	15800,44
10	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	14600	14,53	0,6990	4,1644	14133,04	3662,95	4,1720	0,0001	14859,14
10	1,0	1,00	1,0000	0,0000	11540	16,89	0,0000	4,0622	11042,21	3352,78	4,0910	0,0008	12330,54
10	0,5	2,00	2,0000	0,3010	10272	18,07	-0,3010	4,0117	9765,37	3186,16	4,0464	0,0012	11126,28
10	0,1	10,00	10,0000	1,0000	7570	21,31	-1,0000	3,8791	7052,42	2751,04	3,9157	0,0013	8236,47
20	25,0	0,04	1,3535	0,1315	11768	16,38	-0,1315	4,0707	11290,37	3318,65	4,0723	0,0000	11810,90
20	10,0	0,10	3,3839	0,5294	9943	18,58	-0,5294	3,9975	9424,77	3168,12	4,0080	0,0001	10186,13
20	5,0	0,20	6,7677	0,8304	8655	20,08	-0,8304	3,9373	8128,90	2971,54	3,9511	0,0002	8935,53
20	1,0	1,00	33,8386	1,5294	5889	23,95	-1,5294	3,7700	5381,96	2390,58	3,7892	0,0004	6154,40
20	0,5	2,00	67,6771	1,8304	4965	25,09	-1,8304	3,6959	4496,52	2105,37	3,7063	0,0001	5085,49
20	0,1	10,00	338,3855	2,5294	3176	27,32	-2,5294	3,5019	2821,74	1457,66	3,4863	0,0002	3064,26
30	25,0	0,04	21,8224	1,3389	7886	21,87	-1,3389	3,8969	7318,46	2937,55	3,8376	0,0035	6879,55
30	10,0	0,10	54,5559	1,7368	6072	24,02	-1,7368	3,7833	5546,19	2471,64	3,7329	0,0025	5406,57
30	5,0	0,20	109,1119	2,0379	4960	25,90	-2,0379	3,6955	4461,81	2166,54	3,6448	0,0026	4414,08
30	1,0	1,00	545,5595	2,7368	2867	30,09	-2,7368	3,4574	2480,64	1437,40	3,4149	0,0018	2599,66
30	0,5	2,00	1091,1190	3,0379	2207	31,67	-3,0379	3,3438	1878,35	1158,73	3,3079	0,0013	2031,72
30	0,1	10,00	5455,5948	3,7368	1262	32,17	-3,7368	3,1011	1068,25	671,93	3,0529	0,0023	1129,47
40	10,0	0,10	517,9475	2,7143	2699	31,30	-2,7143	3,4312	2306,18	1402,18	3,4228	0,0001	2647,21
40	5,0	0,20	1035,8949	3,0153	2029	32,29	-3,0153	3,3073	1715,23	1083,90	3,3160	0,0001	2070,11
40	1,0	1,00	5179,4747	3,7143	1010	34,22	-3,7143	3,0043	835,15	568,00	3,0611	0,0032	1150,99
40	0,5	2,00	10358,9494	4,0153	792	32,87	-4,0153	2,8987	665,20	429,85	2,9528	0,0029	897,09

Tabla 133. M3dulo dinámico calculado para curva maestra MAC 35% cerámica temperatura de referencia 20°C (Colombia)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	M3dulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	M3dulo de almacenamiento (E')	M3dulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,00126	-2,89794	17642	12,61	2,8979	4,2465	17216,45	3851,49	4,2101	0,0013	16220,57
10	10,0	0,10	0,0032	-2,5000	15968	14,18	2,5000	4,2033	15481,47	3911,66	4,1841	0,0004	15277,53
10	5,0	0,20	0,0063	-2,1990	14600	14,53	2,1990	4,1644	14133,04	3662,95	4,1599	0,0000	14450,41
10	1,0	1,00	0,0316	-1,5000	11540	16,89	1,5000	4,0622	11042,21	3352,78	4,0849	0,0005	12158,43
10	0,5	2,00	0,0632	-1,1990	10272	18,07	1,1990	4,0117	9765,37	3186,16	4,0427	0,0010	11033,40
10	0,1	10,00	0,3162	-0,5000	7570	21,31	0,5000	3,8791	7052,42	2751,04	3,9166	0,0014	8252,75
20	25,0	0,04	0,0400	-1,3979	11768	16,38	1,3979	4,0707	11290,37	3318,65	4,0713	0,0000	11784,77
20	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	9943	18,58	1,0000	3,9975	9424,77	3168,12	4,0110	0,0002	10257,32
20	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	8655	20,08	0,6990	3,9373	8128,90	2971,54	3,9568	0,0004	9053,90
20	1,0	1,00	1,0000	0,0000	5889	23,95	0,0000	3,7700	5381,96	2390,58	3,7990	0,0008	6294,96
20	0,5	2,00	2,0000	0,3010	4965	25,09	-0,3010	3,6959	4496,52	2105,37	3,7165	0,0004	5206,21
20	0,1	10,00	10,0000	1,0000	3176	27,32	-1,0000	3,5019	2821,74	1457,66	3,4931	0,0001	3112,72
30	25,0	0,04	0,6340	-0,1979	7886	21,87	0,1979	3,8969	7318,46	2937,55	3,8484	0,0023	7053,91
30	10,0	0,10	1,5849	0,2000	6072	24,02	-0,2000	3,7833	5546,19	2471,64	3,7452	0,0015	5561,27
30	5,0	0,20	3,1698	0,5010	4960	25,90	-0,5010	3,6955	4461,81	2166,54	3,6570	0,0015	4539,02
30	1,0	1,00	15,8489	1,2000	2867	30,09	-1,2000	3,4574	2480,64	1437,40	3,4222	0,0012	2643,63
30	0,5	2,00	31,6979	1,5010	2207	31,67	-1,5010	3,3438	1878,35	1158,73	3,3111	0,0011	2047,07
30	0,1	10,00	158,4893	2,2000	1262	32,17	-2,2000	3,1011	1068,25	671,93	3,0436	0,0033	1105,49
40	10,0	0,10	15,1991	1,1818	2699	31,30	-1,1818	3,4312	2306,18	1402,18	3,4288	0,0000	2683,83
40	5,0	0,20	30,3982	1,4828	2029	32,29	-1,4828	3,3073	1715,23	1083,90	3,3180	0,0001	2079,50
40	1,0	1,00	151,9911	2,1818	1010	34,22	-2,1818	3,0043	835,15	568,00	3,0505	0,0021	1123,37
40	0,5	2,00	303,9822	2,4828	792	32,87	-2,4828	2,8987	665,20	429,85	2,9362	0,0014	863,39

Tabla 134. M3dulo dinámico calculado para curva maestra MAC 35% cerámica temperatura de referencia 30°C (Colombia)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	M3dulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	M3dulo de almacenamiento (E')	M3dulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,00006	-4,25508	17642	12,61	4,2551	4,2465	17216,45	3851,49	4,1901	0,0032	15490,17
10	10,0	0,10	0,0001	-3,8571	15968	14,18	3,8571	4,2033	15481,47	3911,66	4,1697	0,0011	14780,98
10	5,0	0,20	0,0003	-3,5561	14600	14,53	3,5561	4,1644	14133,04	3662,95	4,1504	0,0002	14138,41
10	1,0	1,00	0,0014	-2,8571	11540	16,89	2,8571	4,0622	11042,21	3352,78	4,0886	0,0007	12263,50
10	0,5	2,00	0,0028	-2,5561	10272	18,07	2,5561	4,0117	9765,37	3186,16	4,0529	0,0017	11294,11
10	0,1	10,00	0,0139	-1,8571	7570	21,31	1,8571	3,8791	7052,42	2751,04	3,9425	0,0040	8760,39
20	25,0	0,04	0,0022	-2,6479	11768	16,38	2,6479	4,0707	11290,37	3318,65	4,0644	0,0000	11599,34
20	10,0	0,10	0,0056	-2,2500	9943	18,58	2,2500	3,9975	9424,77	3168,12	4,0096	0,0001	10223,46
20	5,0	0,20	0,0112	-1,9490	8655	20,08	1,9490	3,9373	8128,90	2971,54	3,9594	0,0005	9108,46
20	1,0	1,00	0,0562	-1,2500	5889	23,95	1,2500	3,7700	5381,96	2390,58	3,8100	0,0016	6456,44
20	0,5	2,00	0,1125	-0,9490	4965	25,09	0,9490	3,6959	4496,52	2105,37	3,7305	0,0012	5376,01
20	0,1	10,00	0,5623	-0,2500	3176	27,32	0,2500	3,5019	2821,74	1457,66	3,5122	0,0001	3252,67
30	25,0	0,04	0,0400	-1,3979	7886	21,87	1,3979	3,8969	7318,46	2937,55	3,8457	0,0026	7009,56
30	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	6072	24,02	1,0000	3,7833	5546,19	2471,64	3,7446	0,0015	5553,79
30	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	4960	25,90	0,6990	3,6955	4461,81	2166,54	3,6575	0,0014	4544,90
30	1,0	1,00	1,0000	0,0000	2867	30,09	0,0000	3,4574	2480,64	1437,40	3,4247	0,0011	2658,77
30	0,5	2,00	2,0000	0,3010	2207	31,67	-0,3010	3,3438	1878,35	1158,73	3,3148	0,0008	2064,31
30	0,1	10,00	10,0000	1,0000	1262	32,17	-1,0000	3,1011	1068,25	671,93	3,0532	0,0023	1130,39
40	10,0	0,10	1,0000	0,0000	2699	31,30	0,0000	3,4312	2306,18	1402,18	3,4247	0,0000	2658,77
40	5,0	0,20	2,0000	0,3010	2029	32,29	-0,3010	3,3073	1715,23	1083,90	3,3148	0,0001	2064,31
40	1,0	1,00	10,0000	1,0000	1010	34,22	-1,0000	3,0043	835,15	568,00	3,0532	0,0024	1130,39
40	0,5	2,00	20,0000	1,3010	792	32,87	-1,3010	2,8987	665,20	429,85	2,9438	0,0020	878,65

Tabla 135. M3dulo dinámico calculado para curva maestra MAC 35% cerámica temperatura de referencia 40°C (Colombia)

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Tiempo reducido (tr) [s]	Log (tr)	M3dulo dinámico [Mpa]	Ángulo de fase [Deg]	Frecuencia reducida [Hz]	LogE	M3dulo de almacenamiento (E')	M3dulo de pérdida (E'')	LogE* (calculado)	Error cuadrado	Modulo dinámico (calculado)
10	25,0	0,04	0,00001	-5,25508	17642	12,61	5,2551	4,2465	17216,45	3851,49	4,1892	0,0033	15459,24
10	10,0	0,10	0,0000	-4,8571	15968	14,18	4,8571	4,2033	15481,47	3911,66	4,1698	0,0011	14785,64
10	5,0	0,20	0,0000	-4,5561	14600	14,53	4,5561	4,1644	14133,04	3662,95	4,1513	0,0002	14169,03
10	1,0	1,00	0,0001	-3,8571	11540	16,89	3,8571	4,0622	11042,21	3352,78	4,0914	0,0009	12342,62
10	0,5	2,00	0,0003	-3,5561	10272	18,07	3,5561	4,0117	9765,37	3186,16	4,0563	0,0020	11385,30
10	0,1	10,00	0,0014	-2,8571	7570	21,31	2,8571	3,8791	7052,42	2751,04	3,9470	0,0046	8851,63
20	25,0	0,04	0,0002	-3,6479	11768	16,38	3,6479	4,0707	11290,37	3318,65	4,0677	0,0000	11687,56
20	10,0	0,10	0,0006	-3,2500	9943	18,58	3,2500	3,9975	9424,77	3168,12	4,0137	0,0003	10319,63
20	5,0	0,20	0,0011	-2,9490	8655	20,08	2,9490	3,9373	8128,90	2971,54	3,9639	0,0007	9201,95
20	1,0	1,00	0,0056	-2,2500	5889	23,95	2,2500	3,7700	5381,96	2390,58	3,8142	0,0020	6519,84
20	0,5	2,00	0,0112	-1,9490	4965	25,09	1,9490	3,6959	4496,52	2105,37	3,7341	0,0015	5421,30
20	0,1	10,00	0,0562	-1,2500	3176	27,32	1,2500	3,5019	2821,74	1457,66	3,5136	0,0001	3262,57
30	25,0	0,04	0,0040	-2,3979	7886	21,87	2,3979	3,8969	7318,46	2937,55	3,8501	0,0022	7081,32
30	10,0	0,10	0,0100	-2,0000	6072	24,02	2,0000	3,7833	5546,19	2471,64	3,7484	0,0012	5602,17
30	5,0	0,20	0,0200	-1,6990	4960	25,90	1,6990	3,6955	4461,81	2166,54	3,6605	0,0012	4575,63
30	1,0	1,00	0,1000	-1,0000	2867	30,09	1,0000	3,4574	2480,64	1437,40	3,4251	0,0010	2661,21
30	0,5	2,00	0,2000	-0,6990	2207	31,67	0,6990	3,3438	1878,35	1158,73	3,3142	0,0009	2061,73
30	0,1	10,00	1,0000	0,0000	1262	32,17	0,0000	3,1011	1068,25	671,93	3,0523	0,0024	1127,94
40	10,0	0,10	0,1000	-1,0000	2699	31,30	1,0000	3,4312	2306,18	1402,18	3,4251	0,0000	2661,21
40	5,0	0,20	0,2000	-0,6990	2029	32,29	0,6990	3,3073	1715,23	1083,90	3,3142	0,0000	2061,73
40	1,0	1,00	1,0000	0,0000	1010	34,22	0,0000	3,0043	835,15	568,00	3,0523	0,0023	1127,94
40	0,5	2,00	2,0000	0,3010	792	32,87	-0,3010	2,8987	665,20	429,85	2,9438	0,0020	878,70

Tabla 136. Datos curva maestra MAC 35% cerámica 10°C (Colombia)

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1,00E-20	4,3376	21755,05
-19	1,00E-19	4,3376	21755
-18	1,00E-18	4,3376	21754,92
-17	1,00E-17	4,3376	21754,76
-16	1,00E-16	4,3375	21754,46
-15	1,00E-15	4,3375	21753,91
-14	1,00E-14	4,3375	21752,88
-13	1,00E-13	4,3375	21750,96
-12	1,00E-12	4,3374	21747,37
-11	1,00E-11	4,3373	21740,68
-10	1,00E-10	4,337	21728,2
-9	1E-09	4,3366	21704,93
-8	0,00000001	4,3357	21661,6
-7	0,0000001	4,3341	21581,05
-6	0,000001	4,3311	21431,81
-5	0,00001	4,3255	21157,06
-4	0,0001	4,3151	20657,06
-3	0,001	4,2959	19766,46
-2	0,01	4,261	18240,59
-1	0,1	4,1987	15800,44
0	1	4,091	12330,54
1	10	3,9157	8236,47
2	100	3,6563	4532,36
3	1000	3,3215	2096,55
4	10000	2,9583	908,38
5	100000	2,6315	428,01
6	1000000	2,3834	241,74
7	10000000	2,2182	165,28
8	100000000	2,1177	131,13
9	1000000000	2,0598	114,77
10	1E+10	2,0275	106,55
11	1,00E+11	2,0099	102,3
12	1,00E+12	2,0003	100,06
13	1,00E+13	1,9951	98,88
14	1,00E+14	1,9923	98,25
15	1,00E+15	1,9908	97,91
16	1,00E+16	1,99	97,73
17	1,00E+17	1,9896	97,64
18	1,00E+18	1,9894	97,59
19	1,00E+19	1,9893	97,56
20	1,00E+20	1,9892	97,54

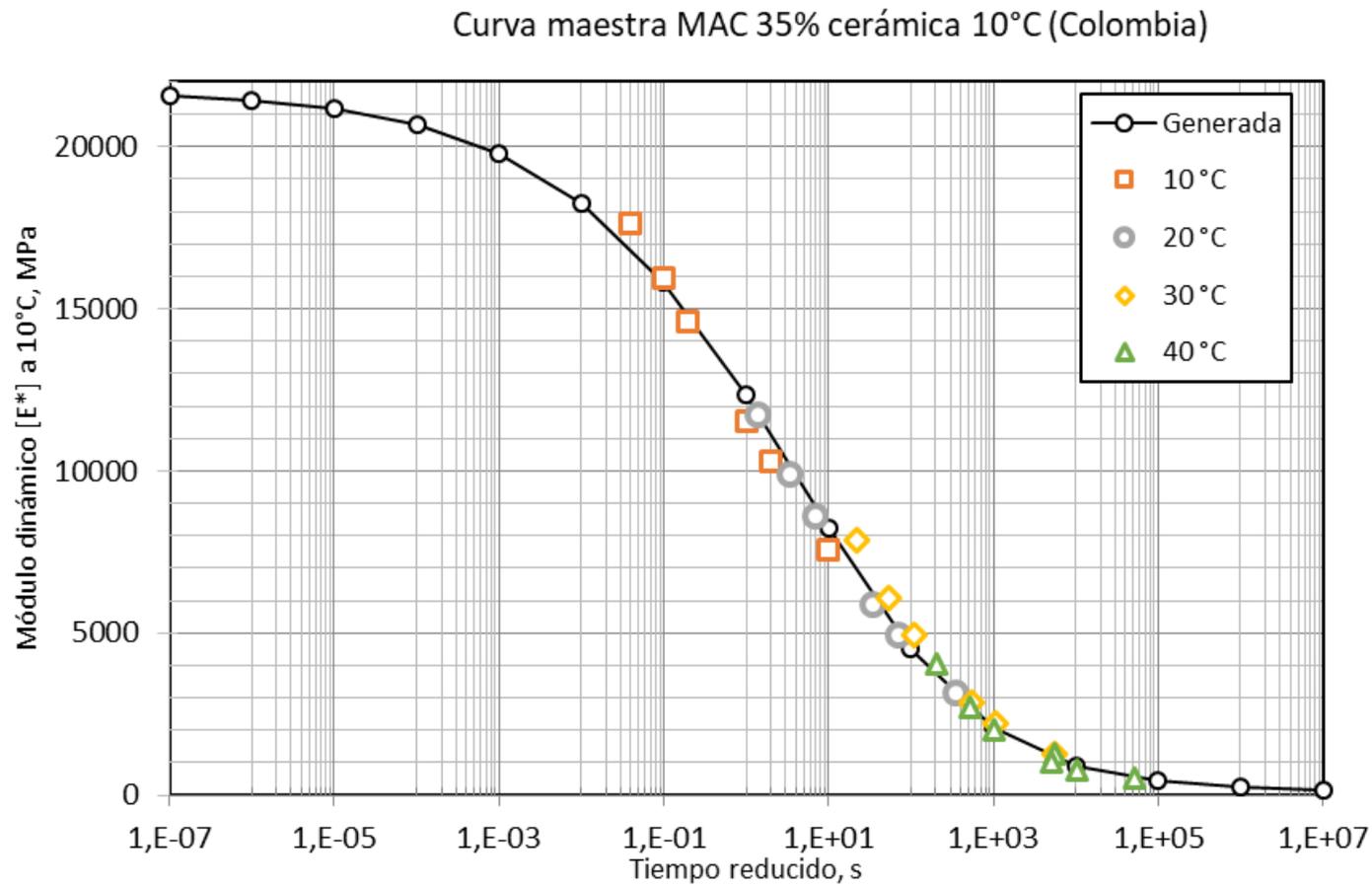


Figura 135. Curva maestra MAC 35% cerámica 10°C (Colombia)

Tabla 137. Datos curva maestra MAC 35% cerámica 20°C (Colombia)

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1,00E-20	4,3018	20034,99
-19	1,00E-19	4,3018	20034,94
-18	1,00E-18	4,3018	20034,83
-17	1,00E-17	4,3018	20034,63
-16	1,00E-16	4,3018	20034,24
-15	1,00E-15	4,3018	20033,49
-14	1,00E-14	4,3017	20032,04
-13	1,00E-13	4,3017	20029,25
-12	1,00E-12	4,3015	20023,87
-11	1,00E-11	4,3013	20013,51
-10	1,00E-10	4,3009	19993,54
-9	1E-09	4,3001	19955,13
-8	0,00000001	4,2984	19881,33
-7	0,0000001	4,2953	19740,11
-6	0,000001	4,2894	19471,66
-5	0,00001	4,278	18968,02
-4	0,0001	4,2564	18046,31
-3	0,001	4,2158	16435,88
-1	0,1	4,011	10257,32
0	1	3,799	6294,96
1	10	3,4931	3112,72
2	100	3,1204	1319,59
4	10000	2,4472	280,04
5	100000	2,239	173,38
6	1000000	2,1115	129,26
7	10000000	2,0389	109,38
8	100000000	1,9994	99,85
9	1000000000	1,9783	95,12
10	1E+10	1,9672	92,73
11	1,00E+11	1,9614	91,5
12	1,00E+12	1,9584	90,87
13	1,00E+13	1,9569	90,54
14	1,00E+14	1,956	90,37
15	1,00E+15	1,9556	90,29
16	1,00E+16	1,9554	90,24
17	1,00E+17	1,9553	90,22
18	1,00E+18	1,9552	90,2
19	1,00E+19	1,9552	90,2
20	1,00E+20	1,9552	90,19

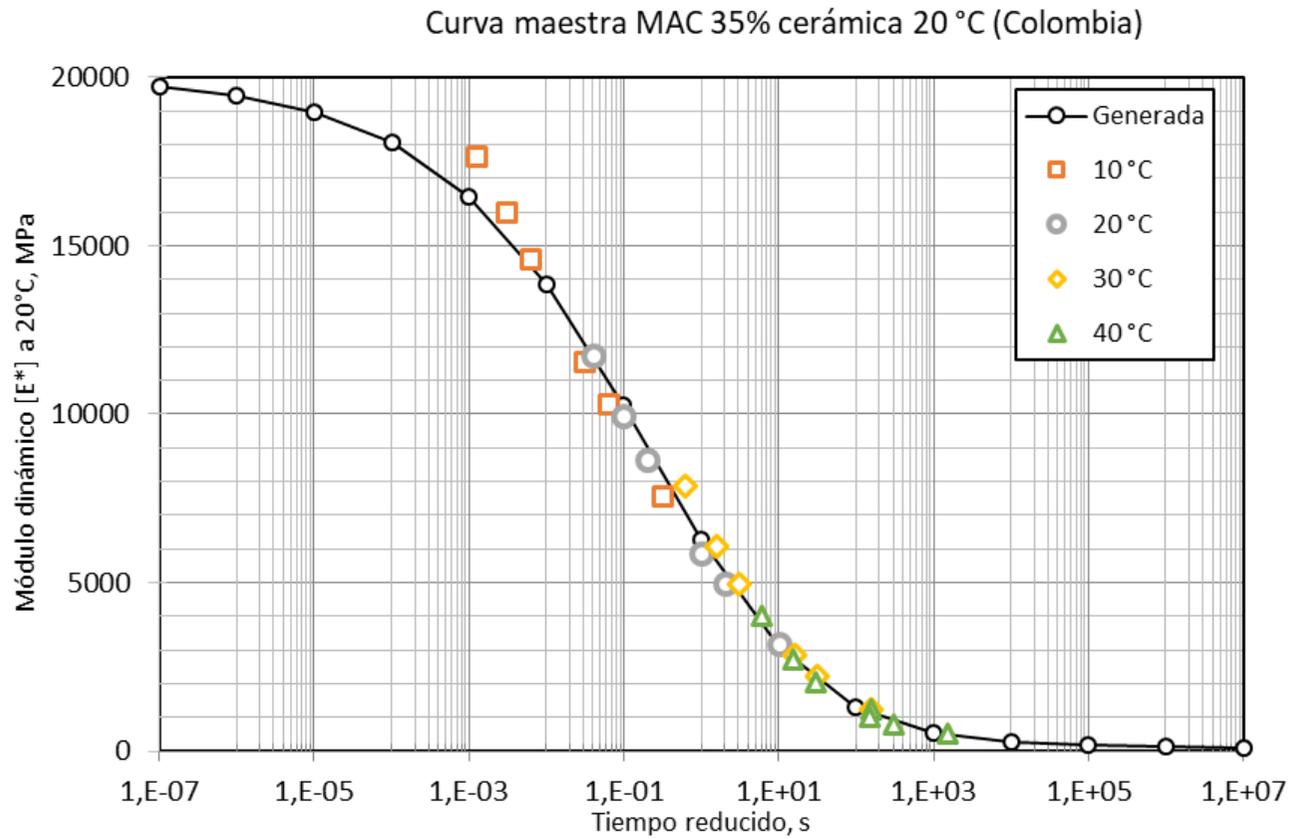


Figura 136. Curva maestra MAC 35% cerámica 20°C (Colombia)

Tabla 138. Datos curva maestra MAC 35% cerámica 30°C (Colombia)

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1,00E-20	4,2554	18004,16
-19	1,00E-19	4,2554	18004,12
-18	1,00E-18	4,2554	18004,03
-17	1,00E-17	4,2554	18003,86
-16	1,00E-16	4,2554	18003,51
-15	1,00E-15	4,2553	18002,79
-14	1,00E-14	4,2553	18001,34
-13	1,00E-13	4,2552	17998,41
-12	1,00E-12	4,2551	17992,47
-11	1,00E-11	4,2548	17980,43
-10	1,00E-10	4,2542	17956,06
-9	1E-09	4,253	17906,8
-8	0,00000001	4,2506	17807,55
-7	0,0000001	4,2457	17608,73
-6	0,000001	4,2359	17215,24
-5	0,00001	4,2163	16454,88
-4	0,0001	4,1776	15053,16
-3	0,001	4,1035	12690,6
-1	0,1	3,7446	5553,79
0	1	3,4247	2658,77
1	10	3,0532	1130,39
2	100	2,713	516,37
4	10000	2,3066	202,56
5	100000	2,2191	165,62
6	1000000	2,173	148,94
7	10000000	2,1495	141,09
8	100000000	2,1377	137,31
9	1000000000	2,1318	135,46
10	1E+10	2,1289	134,56
11	1,00E+11	2,1275	134,11
12	1,00E+12	2,1268	133,9
13	1,00E+13	2,1264	133,79
14	1,00E+14	2,1262	133,73
15	1,00E+15	2,1262	133,71
16	1,00E+16	2,1261	133,69
17	1,00E+17	2,1261	133,69
18	1,00E+18	2,1261	133,69
19	1,00E+19	2,1261	133,68
20	1,00E+20	2,1261	133,68

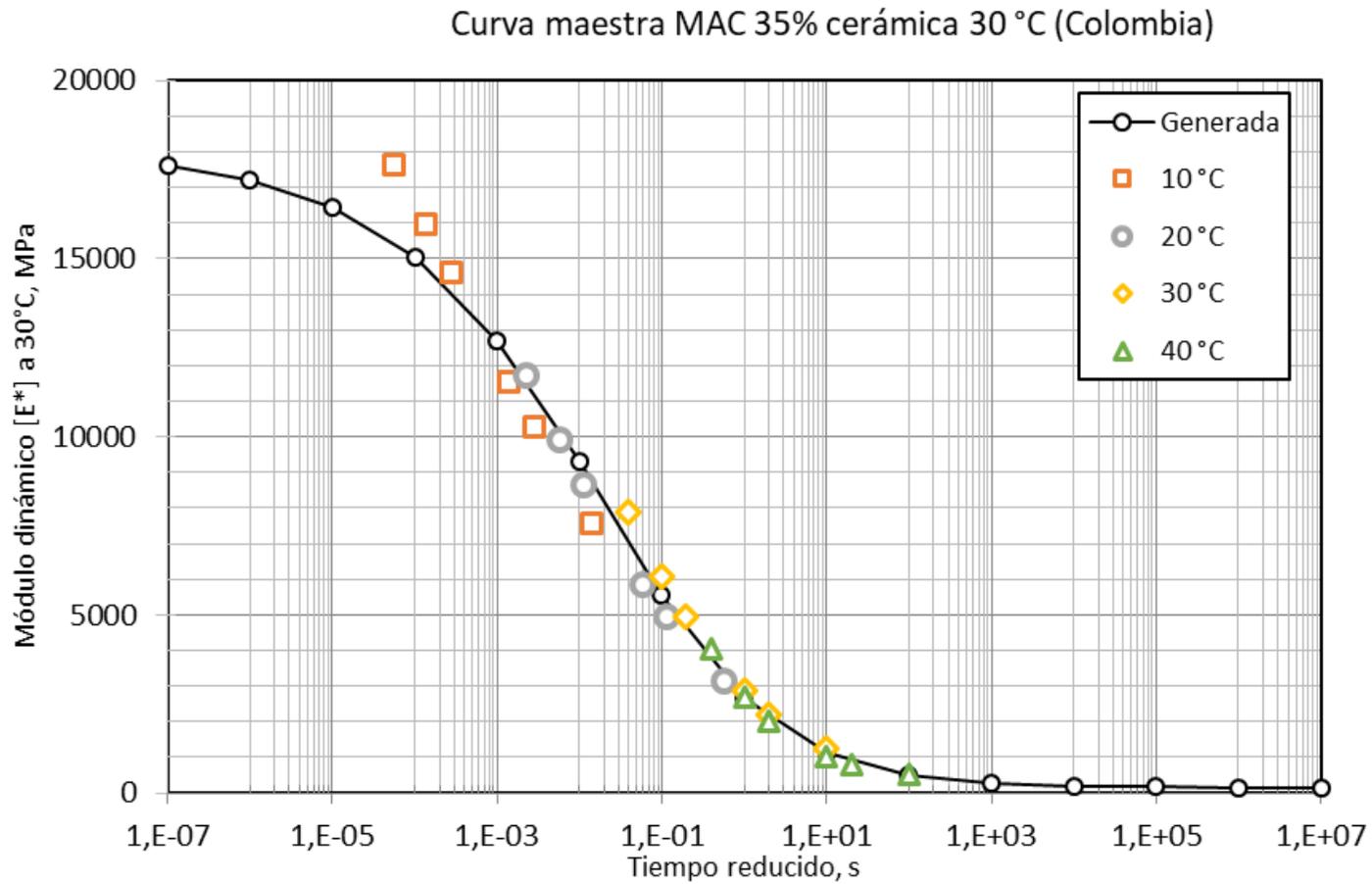


Figura 137. Curva maestra 30°C MAC 35% cerámica (Colombia)

Tabla 139. Datos curva maestra 40°C MAC 35% cerámica (Colombia)

Log(tr)	Tiempo reducido (tr) [s]	Log E* (calculado)	Módulo dinámico (calculado)
-20	1,00E-20	4,249	17740,42
-19	1,00E-19	4,249	17740,36
-18	1,00E-18	4,249	17740,24
-17	1,00E-17	4,249	17739,99
-16	1,00E-16	4,2489	17739,47
-15	1,00E-15	4,2489	17738,4
-14	1,00E-14	4,2489	17736,19
-13	1,00E-13	4,2487	17731,59
-12	1,00E-12	4,2485	17722,07
-11	1,00E-11	4,248	17702,36
-10	1,00E-10	4,247	17661,6
-9	1E-09	4,245	17577,54
-8	0,00000001	4,2407	17405,07
-7	0,0000001	4,2319	17055,15
-6	0,000001	4,2138	16361
-5	0,00001	4,1774	15045,09
-4	0,0001	4,1059	12761,82
-3	0,001	3,9729	9395,1
-1	0,1	3,4251	2661,21
0	1	3,0523	1127,94
1	10	2,7181	522,56
2	100	2,4798	301,88
4	10000	2,2582	181,22
5	100000	2,2183	165,3
6	1000000	2,1984	157,92
7	10000000	2,1887	154,43
8	100000000	2,184	152,76
9	1000000000	2,1817	151,96
10	1E+10	2,1806	151,57
11	1,00E+11	2,1801	151,39
12	1,00E+12	2,1798	151,3
13	1,00E+13	2,1797	151,25
14	1,00E+14	2,1796	151,23
15	1,00E+15	2,1796	151,22
16	1,00E+16	2,1796	151,22
17	1,00E+17	2,1796	151,21
18	1,00E+18	2,1796	151,21
19	1,00E+19	2,1796	151,21
20	1,00E+20	2,1796	151,21

Curva maestra MAC 35% cerámica 40 °C (Colombia)

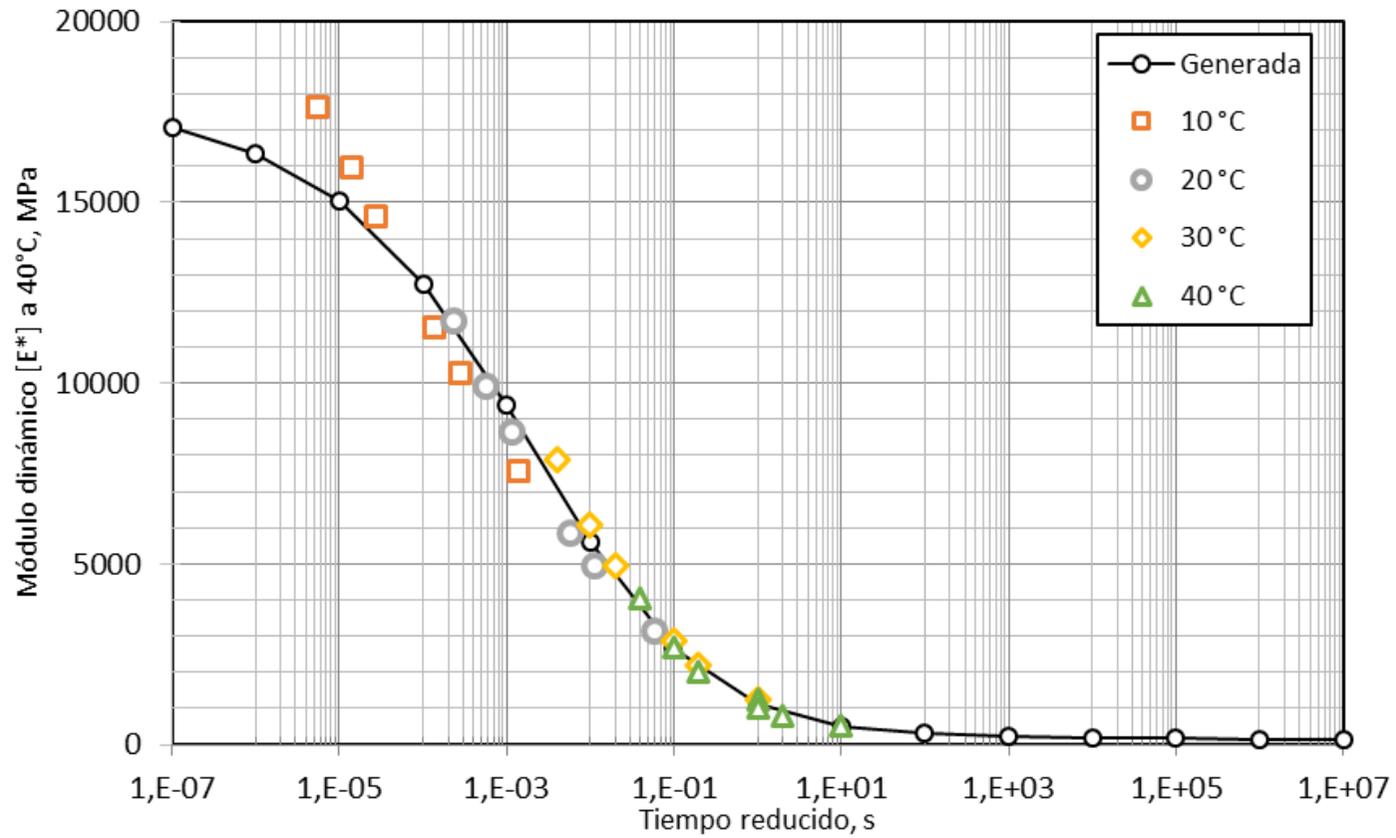


Figura 138. Curva maestra MAC 35% cerámica 40°C (Colombia)

De los resultados obtenidos en las curvas maestras de módulos dinámicos se cuantificó un pre-dimensionamiento con el fin de comparar los resultados prácticos de los valores obtenidos:

7.6 Pre-dimensionamiento de una estructura de pavimento en Colombia

Para el desarrollo del diseño de aplicación a una estructura típica de pavimento, después de evaluar la posibilidad de usar las guías de metodologías existentes en cada país, se llegó a la definición que no iban a ser comparables porque respondían a criterios propios que habían sido ponderados por medio de cartas de diseño a las cuales no era posible realizar una comparación por parámetros.

Se buscó una metodología que pudiera usarse tanto en España como en Colombia y se condicionó a una aplicación con un contexto igual en todas las opciones.

El método de pre-dimensionamiento escogido fue el método empírico American Association of State Highway Transportation Officials, AASHTO, denominado del año 1993, con los siguientes parámetros de cálculo, (ver Tabla 140), de acuerdo a la guía de diseño de estructuras de pavimento (AASHTO, 1993).

Tabla 140. Parámetros de diseño estructural de pavimento en Colombia

Variable	Valor	Unidad	
W_{18}		Ejes 8,2 Ton	
	3.000.000,00		
S_o	0,45	(-)	
P_f	2,2	(-)	
P_i	4,2	(-)	
ΔPSI	2,0	(-)	
Confiabilidad, R	90	%	
Z_r	-1,282	(-)	
MR SUBR		psi	
	7.500		
MR SB		psi	Nivel de Tránsito 2,
	14.500		NT2
a_3	0,11	(-)	
MR BG		psi	Nivel de Tránsito 2,
	28.500		NT2
a_2	0,13	(-)	
Coef-m2	0,8	(-)	
Coef-m3	0,8	(-)	

El tránsito, identificado con W_{18} , es el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño y se tomó un valor medio correspondiente al Nivel de Tránsito 2, NT2 ($0,5 \text{ millones} < W_{18} \leq 5 \times 10^6$). El coeficiente de drenaje tanto para base granular

como para subbase granular se estableció con el valor de 0,8, como un valor representativo de la zona de Bucaramanga, en donde se presenta un porcentaje de tiempo entre 5 – 25% que la estructura del pavimento está expuesta a grados de humedad próximos a la saturación y con una calidad de drenaje regular, en donde el tiempo que tarda el agua en ser evacuada es de una (1) semana. De igual manera, se tomó el nivel de confianza en 90% correspondientes a vías secundarias.

El nivel de serviciabilidad, se seleccionó de acuerdo al recomendado por la AASHTO, para pavimento flexible, serviciabilidad inicial, P_o , 4,2 y para serviciabilidad final, para carreteras entre 2 y 2,5 se tomó 2,2.

Para el módulo resiliente de la subrasante, se ubicó la zona en el mapa de Colombia con los principales suelos del país, encontrando el símbolo rosado como representativo con el número 20, indicando Suelo arcillo-arenoso ubicado en montaña, con valores entre 3% y 15% de la Relación Californiana de soporte, CBR, que para este caso se escogió 5%. Con el modelo $1500 \times \text{CBR}$ para la subrasante se tomó 7500 psi como módulo resiliente de la misma. En cuanto al error combinado, S_o , que tiene en cuenta las variaciones que se dan en la construcción del pavimento, las estimaciones en cuanto al tránsito y al drenaje, las variaciones que se pueden dar en la subrasante y en los materiales de las demás capas de pavimento, que tiene en cuenta la desviación estándar, recomendada por la guía AASHTO entre 0,40 y 0,50, se seleccionó 0,45.

Los otros parámetros como el número estructural resultante de la aplicación de la metodología en cada capa se basaron en el módulo resiliente de capas de base y subbase granular cumpliendo la normativa INVIAS para vías con tránsito NT2. El módulo dinámico de la capa de concreto asfáltico se tomó del ensayo resultante de acuerdo a cada MAC y a cada temperatura de ensayo y con 5 Hz y 10 Hz, que corresponden a una velocidad de aproximadamente 60 – 80 km/h (Higuera Sandoval , 2011) (Quintana Rondón, Reyes Lizcano, & Figueroa Infante, 2012).

Para el cálculo del Número estructural, SN, que es la base de la guía AASHTO se usa la Figura 142. Nomograma de diseño para Pavimentos Flexibles, en la cual se obtiene esta variable que considera condiciones ambientales, el valor de Índice de Servicio, IS, el valor de resistencia por medio del módulo resiliente de las capas que soportan a la capa a la cual se le está calculando el valor de SN, la confiabilidad, el error combinado, S_o y el tránsito, expresado en número de ejes equivalentes (AASHTO, 1993).

En la Figura 139, se gráfica el coeficiente, a_1 , correspondientes a concreto asfáltico usando como insumo la variación del módulo elástico a una temperatura de 20°C. Con base en la generación de un modelo matemático similar a este se calcularon los valores de a_1 , en las diferentes mezclas de estudio, con los diferentes módulos dinámicos obtenidos (ver Tabla 141. Resumen generación del coeficiente a_1 MAC Colombia).

Continuando con la Figura 140, se modela la variación del coeficiente estructural a_2 , de las bases granulares, la cual se ha desarrollado con base en cuatro ensayos de laboratorio a bases granulares.

Finalmente, en la Figura 141, el nomograma calcula el coeficiente a_3 , de la subbase granular tomando como insumo también cuatro diferentes ensayos de laboratorio aplicados a subbases

granulares. Para esta figura también hay disponibles los modelos matemáticos generados para el cálculo del coeficiente.

Los modelos matemáticos usados en el cálculo del coeficiente estructural a_1 , a_2 y a_3 (García Morales, 2015) (AASHTO, 1993) son:

$$a_1 = 0,184 * \ln E_1 - 1,9547$$

$$a_2 = 0,249 * \log E_2 - 0,977$$

$$a_3 = 0,227 * \log E_3 - 0,839$$

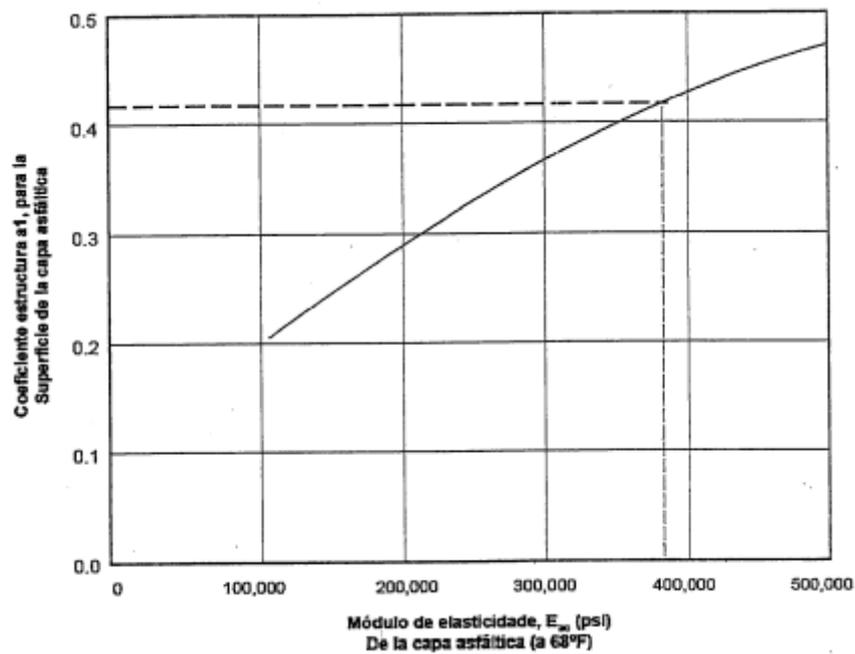


Figura 139. Coeficiente a_1 , en función del módulo resiliente o dinámico del concreto asfáltico

Fuente: (AASHTO, 1993)

Tabla 141. Resumen generación del coeficiente a1 MAC Colombia

Módulo elástico CA						
Mezcla	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo (MPa)	Módulo (psi)	Coeficiente estructural (a1)	
MAC Patrón	10	5	13000	1885000	0,70	
		10	15583	2259535	0,74	
	20	5	7000	1015000	0,59	
		10	10049	1457105	0,66	
	30	5	3400	493000	0,46	
		10	5202	754290	0,54	
	40	5	1380	200100	0,29	
		10	2604	377580	0,41	
MAC 30 % cerámica	10	5	23800	3451000	0,82	
		10	27300	3958500	0,84	
	20	5	15500	2247500	0,74	
		10	18903	2740935	0,77	
	30	5	8800	1276000	0,63	
		10	12256	1777120	0,69	
	40	5	4500	652500	0,51	
		10	7264	1053280	0,60	
	MAC 35 % cerámica	10	5	13150	1906750	0,71
			10	15465	2242425	0,74
20		5	7450	1080250	0,60	
		10	10088	1462760	0,66	
30		5	3200	464000	0,45	
		10	5539	803155	0,55	
40		5	1600	232000	0,32	
		10	2674	387730	0,41	

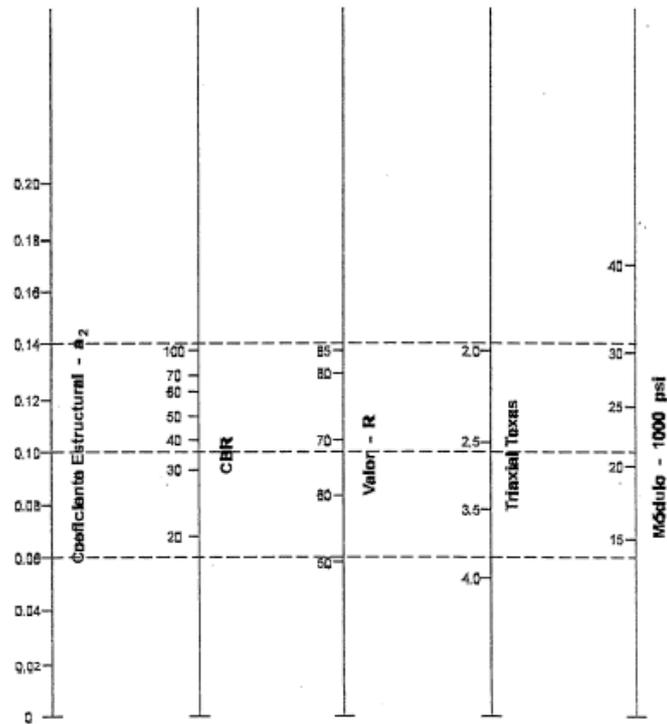


Figura 140. Variación del Coeficiente a_2 , con diferentes parámetros de resistencia de la base granular

Fuente: (AASHTO, 1993)

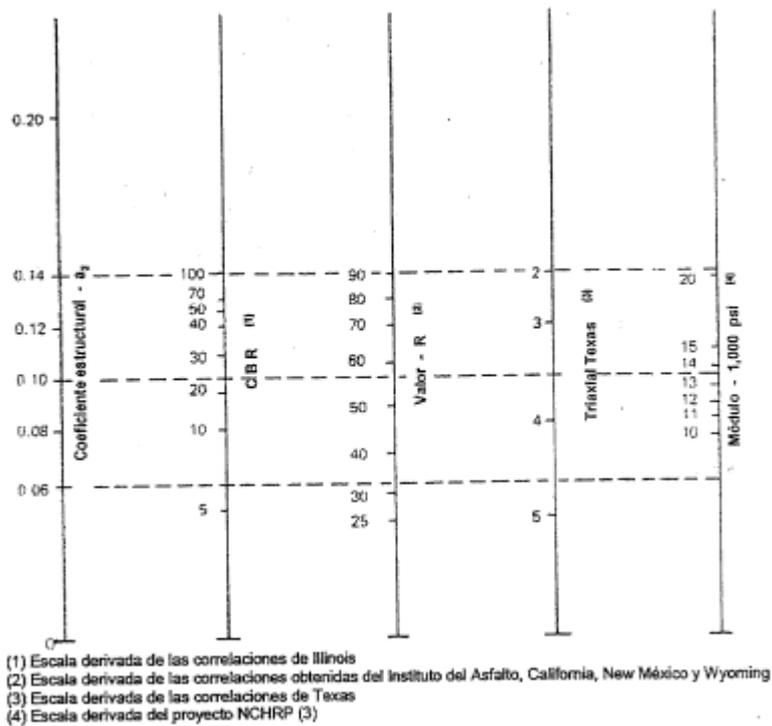


Figura 141. Variación del Coeficiente a_3 con diferentes parámetros de resistencia de la subbase granular

Fuente: (AASHTO, 1993)

Considerando que las carreteras a que va dirigida esta investigación es principalmente las vías intermedias y locales, se decidió hacer un diseño que contemplara este tipo de vías, de acuerdo a la recomendación de Rondón et al, al igual que el análisis de España.

Tabla 142. Frecuencia vs Velocidad

Frecuencia (Hz)	Velocidad (Kph)
5	35-45
10	70-80

Fuente: (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015)

Los resultados de los espesores se muestran para mezcla MAC Patrón en las Tabla 143. Diseño estructural de pavimento con MAC Patrón Temperatura de 10°C (Colombia), Tabla 144. Diseño estructural de pavimento con MAC Patrón temperatura de 20°C (Colombia), Tabla 145. Diseño estructural de pavimento con MAC Patrón temperatura de 30°C (Colombia), Tabla 146. Diseño estructural de pavimento con MAC Patrón temperatura de 40°C (Colombia) corresponden a las estructuras de pavimento arrojadas por el método empírico AASHTO, con los diferentes temperaturas y frecuencias 5 y 10 Hz.

Para mezcla MAC con 30% de cerámica, Tabla 147. Diseño estructural de pavimento con MAC 30% cerámica temperatura de 10°C (Colombia), Tabla 148. Diseño estructural de pavimento con MAC 30% cerámica temperatura de 20°C (Colombia), Tabla 149. Diseño estructural de pavimento con MAC 30% cerámica temperatura de 30°C (Colombia), Tabla 150. Diseño estructural de pavimento con MAC 30% cerámica temperatura de 40°C (Colombia) corresponden a las estructuras de pavimento arrojadas por el método empírico AASHTO, con los diferentes temperaturas y frecuencias 5 y 10 Hz.

Y para MAC 35 % de cerámica Tabla 151. Diseño estructural de pavimento con MAC 35% cerámica temperatura de 10°C (Colombia), Tabla 152. Diseño estructural de pavimento con MAC 35% cerámica temperatura de 20°C (Colombia), Tabla 153. Diseño estructura de pavimento con MAC 35% cerámica temperatura de 30°C (Colombia), Tabla 154. Diseño Estructura de pavimento con MAC 35% cerámica temperatura de 40°C (Colombia) corresponden a las estructuras de pavimento arrojadas por el método empírico AASHTO, con los diferentes temperaturas y frecuencias 5 y 10 Hz.

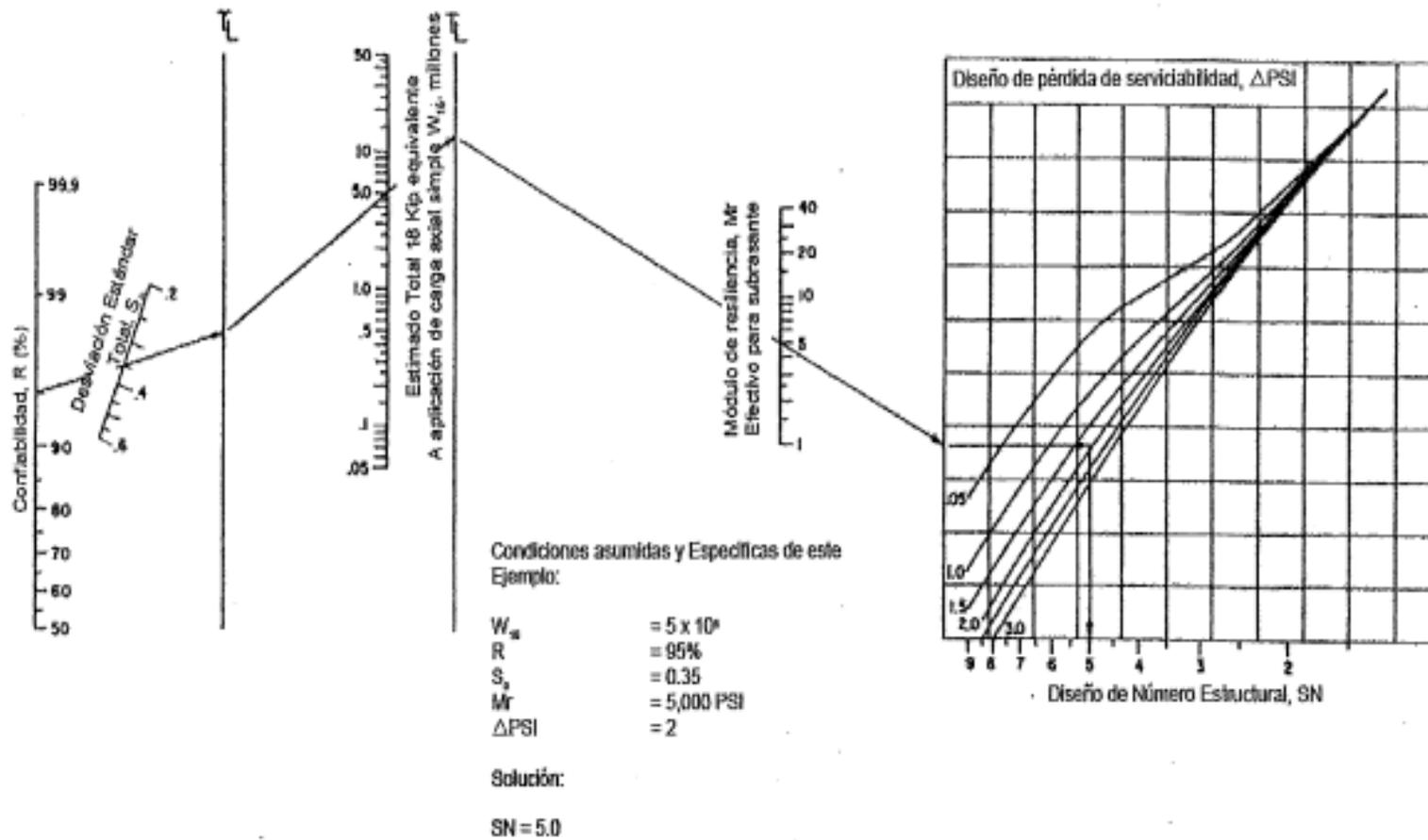


Figura 142. Nomograma de diseño para Pavimentos Flexibles

Fuente: (AASHTO, 1993)

Tabla 143. Diseño estructural de pavimento con MAC Patrón Temperatura de 10°C (Colombia)

Nivel de tránsito:	NT2	Frecuencia:	5 Hz		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
Temperatura:	10°C	Mezcla:	MAC Patrón		SN dispuesto	SN* propuesto		
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto					
Estructura	in	cm	cm	in				
CA	3,370	8,560	8,60	3,386	2,460	2,92	$SN_1^* > SN_1$	0,02
Base	2,212	5,618	6,00	2,362	3,15	3,18	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN_2$	0,01
Subbase	8,864	22,515	23,00	9,055	3,96	3,972	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN_3$	0,01

Nivel de tránsito:	NT2	Frecuencia:	10 Hz		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
Temperatura:	10°C	Mezcla:	MAC Patrón		SN dispuesto	SN* propuesto		
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto					
MAC Patrón	in	cm	cm	in				
CA	3,237	8,222	8,50	3,346	2,460	2,542	$SN_1^* > SN_1$	0,02
Base	4,712	11,968	15,00	5,906	3,15	3,157	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN_2$	0,02
Subbase	8,864	22,515	23,50	9,252	3,96	3,971	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN_3$	0,01

Tabla 144. Diseño estructural de pavimento con MAC Patrón temperatura de 20°C (Colombia)

Nivel de tránsito:	NT2	FRECUENCIA:	5 Hz					
Temperatura:	20°C	MEZCLA:	Patrón					
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC Patrón	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,727	9,467	9,50	3,740	2,460	2,569	SN ₁ *>SN1	0,09
Base	6,173	15,679	17,00	6,693	3,15	3,163	(SN ₁ *+SN ₂ *)>SN2	0,02
Subbase	9,123	23,172	23,50	9,252	3,96	3,977	(SN ₁ *+SN ₂ *+SN ₃ *)>SN3	0,01

Nivel de tránsito:	NT2	FRECUENCIA:	10 Hz					
Temperatura:	20°C	MEZCLA:	Patrón					
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo De los SN propuestos	
MAC Patrón	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,465	8,801	9,00	3,543	2,460	2,535	SN ₁ *>SN1	0,01
Base	6,101	15,497	16,00	6,299	3,15	3,17	(SN ₁ *+SN ₂ *)>SN2	0,01
Subbase	8,970	22,784	23,00	9,055	3,96	3,967	(SN ₁ *+SN ₂ *+SN ₃ *)>SN3	0,00

Tabla 145. Diseño estructural de pavimento con MAC Patrón temperatura de 30°C (Colombia)

Nivel de tránsito:	NT2	Frecuencia:	5 Hz					
Temperatura:	30°C	Mezcla:	Patrón					
MAC Patrón	Espesor inicial		Espesor propuesto		Número estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
	pulgadas	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	4,331	11,001	11,00	4,331	2,460	3,15	$SN_1^* > SN_1$	0,09
Base	6,135	15,583	16,00	6,299	3,15	6,102	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN_2$	0,02
Subbase	9,010	22,885	23,00	9,055	3,96	9,252	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN_3$	0,00

Nivel de tránsito:	NT2	Frecuencia:	10 Hz					
Temperatura:	30°C	Mezcla:	Patrón					
MAC Patrón	Espesor inicial		Espesor propuesto		Número estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
	pulgadas	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,884	9,865	10,00	3,937	2,460	2,539	$SN_1^* > SN_1$	0,08
Base	6,299	15,999	16,00	6,299	3,15	3,154	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN_2$	0,02
Subbase	8,923	22,664	23,00	9,055	3,96	3,968	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN_3$	0,01

Tabla 146. Diseño estructural de pavimento con MAC Patrón temperatura de 40°C (Colombia)

Nivel de tránsito:	NT2	Frecuencia:	5 Hz		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
Temperatura:	40°C	Mezcla:	Patrón		SN dispuesto	SN propuesto		
MAC Patrón	Espesor Inicial		Espesor propuesto					
	in	cm	cm	in				
CA	4,920	12,497	12,50	4,921	2,460	2,543	$SN_1^* > SN1$	0,05
Base	6,626	16,830	17,00	6,693	3,15	3,157	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN2$	0,02
Subbase	9,130	23,190	23,50	9,252	3,96	3,971	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN3$	0,02

Nivel de tránsito:	NT2	Frecuencia:	10 Hz		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
Temperatura:	40°C	Mezcla:	Patrón		SN dispuesto	SN propuesto		
MAC Patrón	Espesor Inicial		Espesor propuesto					
	in	cm	cm	in				
CA	4,331	11,001	11,00	4,331	2,460	2,576	$SN_1^* > SN1$	0,04
Base	6,135	15,583	16,00	6,299	3,15	3,17	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN2$	0,03
Subbase	9,010	22,885	23,00	9,055	3,96	3,967	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN3$	0,01

Tabla 147. Diseño estructural de pavimento con MAC 30% cerámica temperatura de 10°C (Colombia)

Nivel de tránsito:	NT2		Frecuencia:		5 Hz			
Temperatura:	10°C		Mezcla:		MAC 30% Cerámica			
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 30% cerámica	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,114	7,910	8,00	3,150	2,46	2,488	$SN_1^* > SN_1$	0,12
Base	5,452	13,848	14,00	5,512	3,15	3,164	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN_2$	0,01
Subbase	9,134	23,200	23,50	9,252	3,96	3,961	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN_3$	0,01

Nivel de tránsito:	NT2		Frecuencia:		10 Hz			
Temperatura:	10°C		Mezcla:		MAC 30% Cerámica			
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 30% cerámica	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,000	7,620	8,00	3,150	2,46	2,583	$SN_1^* > SN_1$	0,02
Base	6,557	16,655	14,00	5,512	3,15	3,156	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN_2$	0,01
Subbase	9,205	23,381	23,50	9,252	3,96	3,970	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN_3$	0,01

Tabla 148. Diseño estructural de pavimento con MAC 30% cerámica temperatura de 20°C (Colombia)

Nivel de tránsito:	NT2	Frecuencia:	5 Hz					
Temperatura:	20°C	Mezcla:	MAC 30% Cerámica					
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número o Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 30% cerámica	pulgadas	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,000	7,620	8,00	3,150	2,46	2,583	$SN_1^* > SN_1$	0,01
Base	6,557	16,655	14,00	5,512	3,15	3,156	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN_2$	0,00
Subbase	9,205	23,381	23,50	9,252	3,96	3,970	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN_3$	0,01

Nivel de tránsito:	NT2	Frecuencia:	10 Hz					
Temperatura:	20°C	Mezcla:	MAC 30% Cerámica					
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número o Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 30% cerámica	pulgadas	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,237	8,222	8,50	3,346	2,46	2,476	$SN_1^* > SN_1$	0,11
Base	5,837	14,826	15,00	5,906	3,15	3,152	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN_2$	0,02
Subbase	9,123	23,172	23,50	9,252	3,96	3,966	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN_3$	0,01

Tabla 149. Diseño estructural de pavimento con MAC 30% cerámica temperatura de 30°C (Colombia)

Nivel de tránsito:	NT2	Frecuencia:	5 Hz					
Temperatura:	30°C	Mezcla:	MAC 30% Cerámica					
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 30% cerámica	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,968	10,079	10,50	4,134	2,46	2,521	$SN_1^* > SN_1$	0,02
Base	5,643	14,333	14,50	5,709	3,15	3,156	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN_2$	0,02
Subbase	9,127	23,183	23,50	9,252	3,96	3,970	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN_3$	0,01

Nivel de tránsito:	NT2	Frecuencia:	10 Hz					
Temperatura:	30°C	Mezcla:	MAC 30% Cerámica					
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 30% cerámica	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,728	9,469	9,50	3,740	2,46	2,468	$SN_1^* > SN_1$	0,01
Base	5,475	13,907	14,00	5,512	3,15	3,164	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN_2$	0,02
Subbase	9,161	23,269	23,50	9,252	3,96	3,961	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN_3$	0,00

Tabla 150. Diseño estructural de pavimento con MAC 30% cerámica temperatura de 40°C (Colombia)

Nivel de tránsito:	NT2	Frecuencia:	5 Hz					
Temperatura:	40°C	Mezcla:	30% Cerámica					
	Espesor inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 30% cerámica	pulgadas	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	4,033	10,244	10,50	4,134	2,46	2,503	$SN_1^* > SN_1$	0,05
Base	6,214	15,784	16,00	6,299	3,15	3,159	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN_2$	0,02
Subbase	9,104	23,124	23,50	9,252	3,96	3,973	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN_3$	0,00

Nivel de tránsito:	NT2	Frecuencia:	10 Hz					
Temperatura:	40°C	Mezcla:	30% Cerámica					
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 30% cerámica	pulgadas	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	4,033	10,244	10,50	4,134	2,46	2,511	$SN_1^* > SN_1$	0,06
Base	6,041	15,344	15,50	6,102	3,15	3,167	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN_2$	0,01
Subbase	9,132	23,195	23,50	9,252	3,96	3,964	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN_3$	0,01

Tabla 151. Diseño estructural de pavimento con MAC 35% cerámica temperatura de 10°C (Colombia)

Nivel de Tránsito:	NT2		Frecuencia:		5 Hz			
Temperatura:	10°C		Mezcla:		35%		Cerámica	
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 35% cerámica	pulgadas	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,280	8,331	8,50	3,346	2,46	2,583	$SN_1^* > SN_1$	0,06
Base	6,159	15,644	16,00	6,299	3,15	3,156	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN_2$	0,00
Subbase	9,039	22,959	23,00	9,055	3,96	3,970	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN_3$	0,00

Nivel de tránsito:	NT2		Frecuencia:		10 Hz			
Temperatura:	10°C		Mezcla:		35%		Cerámica	
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 35% cerámica	pulgadas	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,154	8,011	8,50	3,346	2,46	2,51	$SN_1^* > SN_1$	0,01
Base	5,193	13,190	13,50	5,315	3,15	3,165	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN_2$	0,00
Subbase	9,061	23,015	23,50	9,252	3,96	3,962	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN_3$	0,01

Tabla 152. Diseño estructural de pavimento con MAC 35% cerámica temperatura de 20°C (Colombia)

Nivel de tránsito:	NT2	Frecuencia:	5 Hz					
Temperatura:	20°C	Mezcla:	35% cerámica					
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 35% cerámica	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,727	9,467	9,50	3,740	2,46	2,47	SN ₁ *>SN1	0,02
Base	6,554	16,647	17,00	6,693	3,15	3,152	(SN ₁ *+SN ₂ *)>SN2	0,01
Subbase	9,040	22,962	23,00	9,055	3,96	3,966	(SN ₁ *+SN ₂ *+SN ₃ *)>SN3	0,01

Nivel de tránsito:	NT2	Frecuencia:	10 Hz					
Temperatura:	20°C	Mezcla:	35% cerámica					
	Espesor Inicial		Espesor Propuesto		Número Estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 35% cerámica	in	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,417	8,679	9,00	3,543	2,46	2,609	SN ₁ *>SN1	0,01
Base	5,760	14,630	15,00	5,906	3,15	3,183	(SN ₁ *+SN ₂ *)>SN2	0,01
Subbase	9,032	22,941	23,00	9,055	3,96	3,963	(SN ₁ *+SN ₂ *+SN ₃ *)>SN3	0,00

Tabla 153. Diseño estructura de pavimento con MAC 35% cerámica temperatura de 30°C (Colombia)

Nivel de tránsito:	NT2	Frecuencia:	5 Hz					
Temperatura:	30°C	Mezcla:	35% cerámica					
MAC 35% cerámica	Espesor Inicial		Espesor propuesto		número estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
	pulgadas	cm	cm	in	SN DISPUESTO	SN PROPUESTO		
CA	4,393	11,158	11,50	4,528	2,46	2,559	SN ₁ *>SN1	0,02
Base	5,907	15,004	15,50	6,102	3,15	3,153	(SN ₁ *+SN ₂ *)>SN2	0,01
Subbase	8,974	22,794	23,00	9,055	3,96	3,967	(SN ₁ *+SN ₂ *+SN ₃ *)>SN3	0,01

Nivel de tránsito:	NT2	Frecuencia:	10 Hz					
Temperatura:	30°C	Mezcla:	35% cerámica					
MAC 35% cerámica	Espesor Inicial		Espesor propuesto		número estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
	pulgadas	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	3,844	9,764	10,00	3,937	2,46	2,48	SN ₁ *>SN1	0,03
Base	6,061	15,395	15,50	6,102	3,15	3,156	(SN ₁ *+SN ₂ *)>SN2	0,02
Subbase	9,156	23,256	23,50	9,252	3,96	3,970	(SN ₁ *+SN ₂ *+SN ₃ *)>SN3	0,00

Tabla 154. Diseño Estructura de pavimento con MAC 35% cerámica temperatura de 40°C (Colombia)

Nivel de tránsito:	NT2		Frecuencia:		5 Hz			
Temperatura:	40°C		Mezcla:		35% cerámica			
	Espesor inicial		Espesor propuesto		número estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 35% cerámica	pulgadas	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	4,033	10,244	10,50	4,134	2,46	2,535	$SN_1^* > SN_1$	0,06
Base	6,214	15,784	16,00	6,299	3,15	3,17	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN_2$	0,00
Subbase	9,104	23,124	23,50	9,252	3,96	3,967	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN_3$	0,01

Nivel de tránsito:	NT2		Frecuencia:		10 Hz			
Temperatura:	40°C		Mezcla:		35% cerámica			
	Espesor inicial		Espesor propuesto		número estructural		Verificación cumplimiento mínimo de los SN propuestos	
MAC 35% cerámica	pulgadas	cm	cm	in	SN dispuesto	SN propuesto		
CA	4,556	11,572	12,00	4,724	2,46	2,56	$SN_1^* > SN_1$	0,04
Base	5,760	14,630	15,00	5,906	3,15	3,157	$(SN_1^* + SN_2^*) > SN_2$	0,01
Subbase	9,032	22,941	23,00	9,055	3,96	3,971	$(SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*) > SN_3$	0,01

7.7 Costos y ahorros de la estructura de pavimento en Colombia

En cuanto a los costos y ahorros de usar MAC con cerámico se presenta un análisis de costos por metro cúbico tanto para la mezcla patrón como para las modificadas con cerámica al 30% y 35%. En la Tabla 155, se muestra el análisis desarrollado con base en información suministrada por una planta de asfalto de la ciudad de Bucaramanga y que utiliza las mismas fuentes de materiales. El resumen correspondiente a las MAC con cerámica, (ver

Tabla 156. Análisis de precios unitarios para MAC 30% Cerámica (Colombia) y Tabla 157. Análisis de precios unitarios para MAC 35% Cerámica (Colombia)).

Es importante anotar que el parámetro del transporte se tomó como un valor estándar igual al tomado para España, con el fin de que puedan ser comparables, ya que incluir en el costo el transporte desde Cúcuta, implicaría un sesgo que produciría un sobre costo que podría ser asumidos por múltiples alternativas, como por ejemplo el gobierno de Colombia ofrece a las empresas incentivos en cuestión de impuestos por reducción de impactos ambientales que en este análisis no se consideran, los costos del transporte por el bote de los residuos no se consideraron, estos podrían ser suplidos por la empresa que opte por usar el triturado cerámico dentro de su proceso de trituración de agregados y/o elaboración de mezcla. Se realizó el análisis en euros para que fueran fácilmente comparables.

Tabla 155. Análisis de precios unitarios MAC Patrón (Colombia)

		Análisis de precio unitario	
PROYECTO	Análisis de precio unitario de una mezcla asfáltica en caliente modificada con residuo cerámico		
ITEM	Mezcla semi densa en caliente MSC-25 (Patrón)- En Planta	und.	m³

Materiales

descripción	unidad	cant	desperdicio	Vr. Unitario	Vr. Parcial
Cemento Asfáltico 60/70	Kg	128,10	5%	€ 0,35	€ 44,71
Agregado para mezcla asfáltica	m ³	0,36	5%	€ 16,08	€ 6,52
Arena para mezcla asfáltica	m ³	0,84	5%	€ 8,16	€ 7,28
				Subtotal:	€ 59,00

Equipos

cant.	descripción	unidad	rend	tarifa	Vr. Parcial
1	Planta de asfalto en caliente	h	10,000	€ 189,68	€ 18,97
1	Planta trituradora	h	30,000	€ 129,67	€ 4,32
1	Cargador potencia 125 hp	h	30,000	€ 42,65	€ 1,42
	Herramienta menor			€ 0,39	€ 0,39
				Subtotal:	€ 25,11

TRANSPORTE

Descripción	unidad	dist. km	cantidad	Vr. Unitario	Vr. Parcial
Transporte de agregado pétreo	m3/km	60,00	1,250	€ 0,17	€ 12,94
				Subtotal:	€ 12,94

Mano de obra

cant.	descripción	Jornal	P. Soc.	Jornal + P. Soc.	rendimiento (Und/Día)	Vr. Parcial
2	oficial	€10,35	85%	€ 19,15	80	€ 0,48
2	ayudante	€ 8,74	85%	€ 16,17	80	€ 0,40
				Subtotal:		€ 0,88

SUBT TOTAL:		€ 97,93
Administración	4%	€ 3,92
Imprevistos	1%	€ 0,98
Utilidad	4%	€ 3,92
Iva Sobre Utilidad	19%	€ 0,74

TOTAL		€ 107,48
--------------	--	-----------------

 Fuente: <https://tinyurl.com/2u48u52c>, 2021

Tabla 156. Análisis de precios unitarios para MAC 30% Cerámica (Colombia)

		Análisis de precio unitario	
PROYECTO	Análisis de Precio Unitario de una mezcla asfáltica en caliente modificada con residuo cerámico		
ITEM	Mezcla semi densa en caliente MSC-25 +30% Residuo Cerámico-En Planta	und.	m ³

Materiales

descripción	unidad	Cant	Desperdicio	Vr. Unitario	Vr. Parcial
Cemento Asfáltico 60/70	kg	120,64	5%	€ 0,35	€ 42,11
Agregado para mezcla asfáltica	m ³	0,2247	5%	€ 16,08	€ 4,42
Arena para mezcla asfáltica	m ³	0,5325	5%	€ 8,16	€ 4,75
Residuo cerámico (30%)	m ³	0,3260	5%	€ -	€ -
				Subtotal:	€ 51,00

Equipos

CANT.	descripción	unidad	rend	tarifa	Vr. Parcial
1	Planta de asfalto en caliente	h	10,000	€ 189,68	€ 18,97
1	Planta trituradora	h	30,000	€ 129,67	€ 4,32
1	Cargador potencia 125 hp	h	30,000	€ 42,65	€ 1,42
	Herramienta menor			€ 0,39	€ 0,39
				Subtotal:	€ 25

Transporte

descripción	unidad	dist. km	cantidad	Vr. Unitario	Vr. Parcial
Transporte de agregado pétreo	m ³ /km	60,00	1,250	€ 0,17	€ 12,94
				Subtotal:	€ 12,94

Mano de obra

CANT.	Descripción	Jornal	P. Soc.	Jornal + P. Soc.	Rendimiento (Und/Día)	Vr. Parcial
2	Oficial	€ 10,35	85%	€ 19,15	80	€ 0,48
2	Ayudante	€ 8,74	85%	€ 16,17	80	€ 0,40
				Subtotal:		€ 0,88

Sub Total:		€ 89,93
Administración	4%	€ 3,60
Imprevistos	1%	€ 0,90
Utilidad	4%	€ 3,60
Iva Sobre Utilidad	19%	€ 0,68

TOTAL		€ 98,70
--------------	--	----------------

 Fuente: <https://tinyurl.com/2u48u52c>, 2021

Tabla 157. Análisis de precios unitarios para MAC 35% Cerámica (Colombia)

		Análisis de precio unitario	
PROYECTO	Análisis de Precio Unitario de una mezcla asfáltica en caliente modificada con residuo cerámico		
ITEM	Mezcla semi densa en caliente MSC-25 +35% residuo cerámico-En Planta	und.	m³

Materiales

descripción	unidad	cant	desperdicio	Vr. Unitario	Vr. Parcial
Cemento Asfáltico 60/70	kg	122,10	5%	€ 0,35	€ 42,62
Agregado para mezcla asfáltica	m ³	0,2057	5%	€ 16,08	€ 4,11
Arena para mezcla asfáltica	m ³	0,5059	5%	€ 8,16	€ 4,54
Residuo cerámico (35%)	m ³	0,3850	5%	€ -	€ -
				Subtotal:	€ 51,00

Equipos

CANT.	descripción	unidad	rend	tarifa	Vr. Parcial
1	Planta de asfalto en caliente	h	10,000	€ 189,68	€ 18,97
1	Planta trituradora	h	30,000	€ 129,67	€ 4,32
3	Cargador potencia 125 hp	h	30,000	€ 42,65	€ 1,42
	Herramienta menor			€ 0,39	€ 0,39
				Subtotal:	€... ..25

Transporte

Descripción	Unidad	Dist. Km	Cantidad	Vr. Unitario	Vr. Parcial
Transporte de agregado pétreo	m3/km	60,00	1,250	0,17€	12,94 €
				Subtotal:	13 €

Mano de obra

CANT.	descripción	Jornal	P. Soc.	Jornal + P. Soc.	rend (und/día)	Vr.Parcial
1	Oficial	€ 10	85%	€ 19,15	80	€ 0,48
1	Ayudante	€ 9	85%	€ 16,17	80	€ 0,40
				SUBTOTAL:		€ 0,88

SUBT TOTAL:		€ 89,93
ADMINISTRACION	4%	€ 3,60
IMPREVISTOS	1%	€ 0,90
UTILIDAD	4%	€ 3,60
IVA SOBRE UTILIDAD	19%	€ 0,68

TOTAL		€ 98,70
--------------	--	----------------

 Fuente: <https://tinyurl.com/2u48u52c>, 2021

8. Análisis

Tras el desarrollo de la caracterización de los materiales, la elaboración de los diseños y de las curvas maestras de los módulos dinámicos, se ha llevado a cabo un análisis más profundo de aquellos modelos que mejor desempeño han presentado. Dicho análisis ha permitido comparar las diferentes MAC y reconocer el mejor comportamiento entre las dos experimentaciones paralelas.

8.1 Caso Español – Europa

8.1.1 Caracterización de los materiales de la mezcla (España)

Los áridos usados provenientes de la cantera de Cheste, en Valencia, España, mostraron que contaban con las propiedades físicas y mecánicas requeridas para conformar el aglomerado bituminoso. En cuanto a la durabilidad los valores reportados de los ensayos de desgaste de la máquina de Los Ángeles, los ensayos relacionados con la forma como es el índice de lajas y las caras de fractura superan los requerimientos, esto garantiza que el esqueleto mineral posee fortalezas para resistir las sollicitaciones del tránsito, ya que adicionalmente las características de angularidad, y textura o rugosidad predominan.

Otro de los elementos fundamentales es el cumplimiento de la gradación con relación al PG-3, ya que esa distribución de áridos combinados con los diferentes tamaños ayuda a optimizar el contenido de betún. Según la gráfica de Füller, de donde se obtuvo la línea de máxima densidad, se observa que los rangos límites están desarrollados para alejar los tamaños grandes de la fórmula de trabajo, de tal manera que ese distanciamiento permite la presencia adecuada de vacíos y la cuantificación del betún a adicionar.

En cuanto a las micro-imágenes del árido y de la cerámica triturada ambas se observan compuestas de diferentes elementos que se agrupan con diferentes tamaños y superficies, la fricción es una propiedad que debe darse a todos los niveles para garantizar que las partículas van a estar inmersas en la matriz bituminosa. La presencia de silicio, carbono, dentro de los rayos del MEB pudiera llegar a predecir un comportamiento hidrofóbico del árido, lo cual sería de gran beneficio para cualquier mezcla elaborada. Por otro lado, el origen de las fuentes del Triásico, determina las características de rocas sedimentarias, conformada por conglomerados, areniscas, etc. que por su naturaleza confirman la capacidad de las fuentes.

8.1.2 Diseño de la mezcla asfáltica (España)

El diseño de la mezcla asfáltica consideró principalmente el porcentaje hueco de la mezcla para definir el contenido óptimo del betún, que para el caso de MAC Patrón fue 4,2% y para las MAC 30% Cerámica y MAC 35% Cerámica alcanzaron el valor de 4,6% y 4,7%, respectivamente, teniendo un incremento de 0,4% y 0,50%, lo cual representa un aumento del contenido de betún de aproximadamente 9,5% y 11,9%, respectivamente.

Aunque la normativa europea se alejó de los conceptos de estabilidad y flujo, de todas maneras, se desarrollaron y se compararon con el fin de profundizar en el comportamiento de las mezclas. Si bien, las tres tienen resultados aceptables, es conveniente que la estabilidad no sea muy alta para evitar comportamiento muy frágil y de fisuración temprana del concreto. En ese caso la

MAC 30% cerámica tiene la menor estabilidad mientras que la MAC Patrón mostró la más alta estabilidad. Las deformaciones están dentro de los valores límite, sin embargo, las tres MAC están más cerca del valor límite más bajo. En cuanto a la sensibilidad al agua, (ver Figura 143) se aprecia en MAC 35% cerámica mayor sensibilidad, mientras que MAC Patrón, es menos sensible; sin embargo, el ensayo lo superan todas las mezclas ampliamente. Las tres MAC alcanzan a obtener valores satisfactorios en todos los parámetros, algunos en los límites como el caso de los porcentajes de huecos de mezcla, pero en general son MAC en las que no hay diferencias notables.

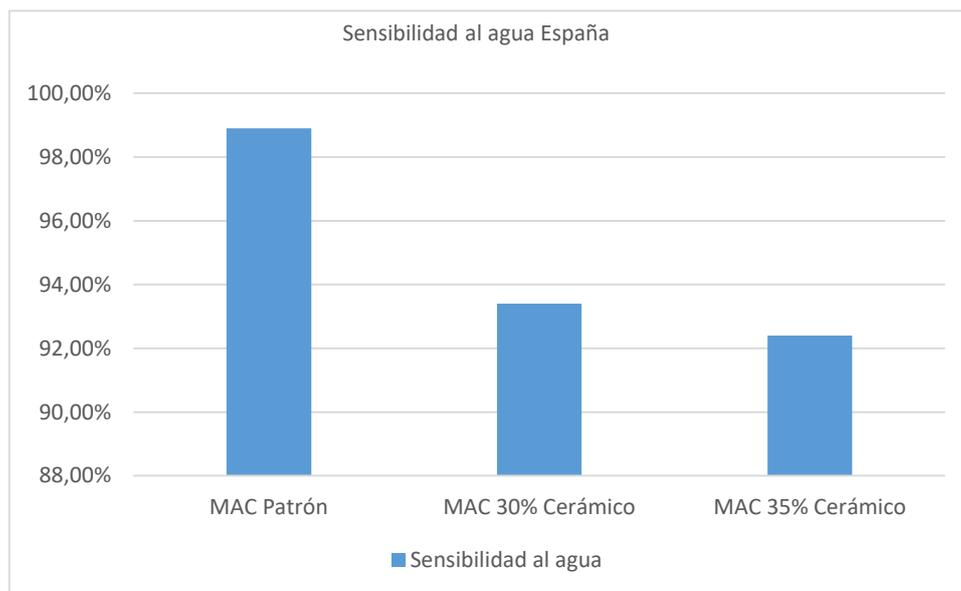


Figura 143. Comparación Sensibilidad al agua MAC España

La sensibilidad al agua de las mezclas ensayadas va disminuyendo con el porcentaje de adición de triturado cerámico. Los otros parámetros no visualizan un cambio con tendencia.

Tabla 158. Comparación MAC de España

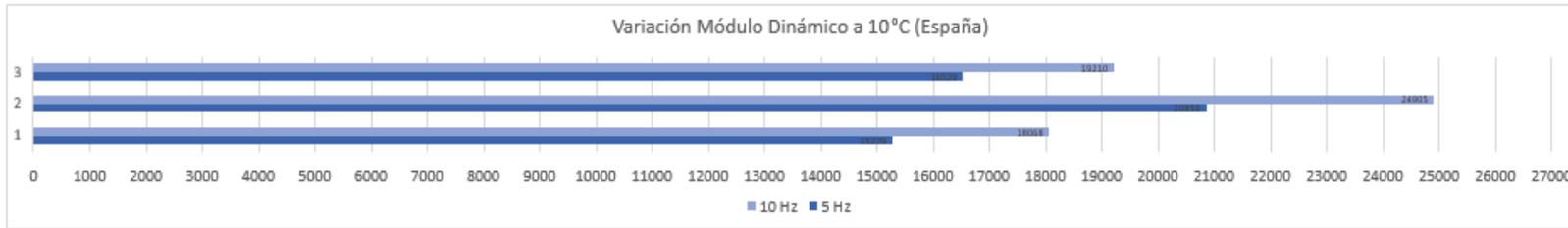
Ensayo/Propiedad	MAC Patrón (4.2%)	MAC 30% Cerámico	MAC 35% Cerámico
Contenido óptimo de betún %	4,2	4,6	4,7
Sensibilidad al agua	98,9%	93,4%	92,4%
Estabilidad (kN)	21,4	14,88	18,26
Flujo (mm)	2,4	2,04	2,8
Hueco de Mezcla (%)	4,0	7,0	7,03

8.1.3 Módulos dinámicos y sus curvas maestras (España)

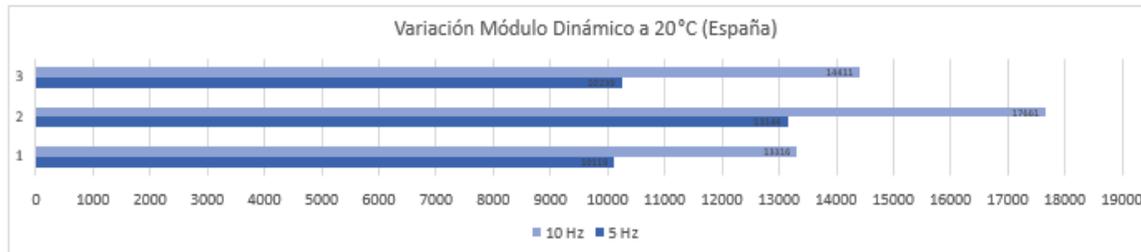
La comparación de los resultados de los ensayos de módulos dinámicos muestra a la MAC 30% Cerámica obteniendo valores superiores sobre las demás MAC. En segundo lugar, los valores más altos corresponden a MAC Patrón y en tercer lugar a la MAC 35% Cerámica. Desde luego, los valores más altos corresponden a la temperatura de 10°C y los más bajos a la temperatura

de 40°C (ver Figura 144. Comparativo entre Módulos Dinámicos en diferentes tipos de mezclas, temperaturas y frecuencias España. en donde se observa también el valor más alto para 10 Hz. Teniendo en cuenta que las mezclas en España tienen un esqueleto mineral competente, un betún 35/50, reconocido por su dureza y resistencia, y además en cuanto al triturado cerámico es también competidor en dureza y resistencia, tiene suficientes propiedades para ofrecer módulos dinámicos altos.

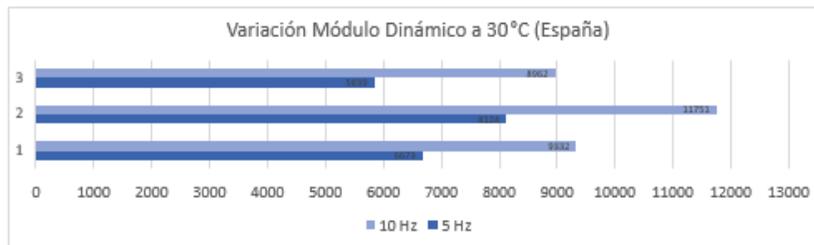
La MAC 35% Cerámica tiene módulos menores en temperaturas de 30°C y 40°C con relación a la MAC Patrón. A temperaturas de 10°C y 20°C mantiene la superioridad con relación a la MAC Patrón, pero nunca es superior a la MAC 30% Cerámica. Ésta última ofrece valores consistentes y mantiene su tendencia con relación a las demás MAC.



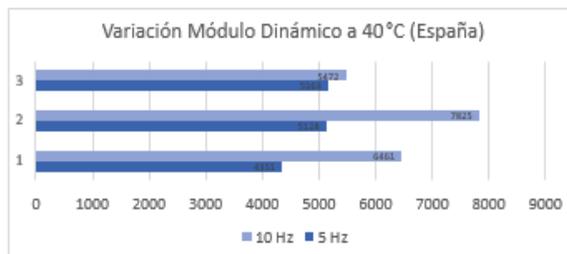
a)



b)



c)



d)

- | | | |
|---------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1. Mezclas Patrón | 2. Mezclas 30% cerámica | 3. Mezclas 35% cerámicas |
| a) Temperatura 10°C | b) Temperatura 20°C | c) Temperatura 30°C |
| | | d) Temperatura 40°C |

Figura 144. Comparativo entre Módulos Dinámicos en diferentes tipos de mezclas, temperaturas y frecuencias España.

Los valores de módulos dinámicos son altos en las temperaturas bajas, hay una disminución entre la temperatura de 10°C y la temperatura de 40°C que se muestra en la Tabla 159. Disminución Módulo Dinámico entre 10°C y 40°C siendo la de mayor diferencia en MAC Patrón.

Tabla 159. Disminución Módulo Dinámico entre 10°C y 40°C

MAC	España
MAC Patrón	32,42%
MAC 30% Cerámica	28,31%
MAC 35% Cerámica	29,76%

8.1.4 Estructura total de pavimento (España)

Con el fin de hacer una comparación de los espesores resultantes se realiza un resumen de las estructuras con cada una de las MAC y con las temperaturas de experimentación. Inicialmente los espesores de cada una de las capas (Tabla 164) luego el espesor de toda la estructura con su variación (Tabla 165) y finalmente se observa gráficamente (Figura 145).

Tabla 160. . Espesores totales de la estructura y sus variaciones (España)

Temperatura 10°C-T3-T4						
	Mezcla Patrón		Mezcla 30% cerámica		Mezcla 35% cerámica	
	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz
CA	8,6	8,5	8,0	8,0	8,5	8,5
Base	6,0	15,0	14,0	14,0	16,0	13,5
Subbase	23,0	23,5	23,5	23,5	23,0	23,5
Temperatura 20°C-T3-T4						
	Mezcla Patrón		Mezcla 30% cerámica		Mezcla 35% cerámica	
	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz
CA	9,5	9,0	9,0	8,5	9,5	9,0
Base	17,0	16,0	16,0	15,0	17,0	15,0
Subbase	23,5	23,0	23,0	23,5	23,0	23,0
Temperatura 30°C-T3-T4						
	Mezcla Patrón		Mezcla 30% cerámica		Mezcla 35% cerámica	
	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz
CA	10,0	11,0	10,5	9,5	11,5	10,0
Base	16,0	16,0	14,5	14,0	15,5	15,5
Subbase	23,0	23,0	23,5	23,5	23,0	23,5
Temperatura 40°C-T3-T4						
	MEZCLA Patrón		MEZCLA 30% cerámica		MEZCLA 35% cerámica	
	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz
CA	12,5	11,0	10,5	10,5	10,5	12,0
Base	17,0	16,0	16,0	15,5	16,0	15,0
Subbase	23,5	23,0	23,5	23,5	23,5	23,0

Tabla 161. Variaciones de los espesores con respecto a MAC Patrón (España)

Temperatura 10°C-T3-T4						
	Mezcla Patrón		Mezcla 30% cerámica		Mezcla 35% cerámica	
	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz
Total estructura	37,6	47,0	45,5	45,5	47,5	45,5
% Mayor			-21,01%	-3,19%	-26,33%	-3,19%
Temperatura 20°C-T3-T4						
	Mezcla Patrón		Mezcla 30% cerámica		Mezcla 35% cerámica	
	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz
Total estructura	50,0	48,0	48,0	47,0	49,5	47,0
% Mayor			-4,00%	-2,08%	-1,00%	-2,08%
Temperatura 30°C-T3-T4						
	Mezcla Patrón		Mezcla 30% cerámica		Mezcla 35% cerámica	
	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz
Total estructura	49,0	50,0	48,5	47,0	50,0	49,0
% Mayor			-1,02%	-6,00%	2,04%	-2,00%
Temperatura 40°C-T3-T4						
	Mezcla Patrón		Mezcla 30% cerámica		Mezcla 35% cerámica	
	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz
Total estructura	53,0	50,0	50,0	49,5	50,0	50,0
% Mayor			2,04%	-1,00%	2,04%	0,00%

La variación muestra una favorabilidad del uso de MAC con cerámica, ya que desde el punto de vista de diseño se encuentra disminución en los espesores de la estructura con respecto a la que contempla MAC patrón como también en las frecuencias 5 y 10 Hz. Esta consideración predomina principalmente en la temperatura de 20°C y 30°C y en menos intensidad en las temperaturas 10°C y 40°C, donde la variación se combina a veces en aumento para 5 Hz en ambas mezclas con cerámico o en disminución para las de 10 Hz, tanto en MAC de 30% y MAC de 35% de cerámica. Esta condición supondría que los espesores en las temperaturas de 20°C y 30°C son favorables.

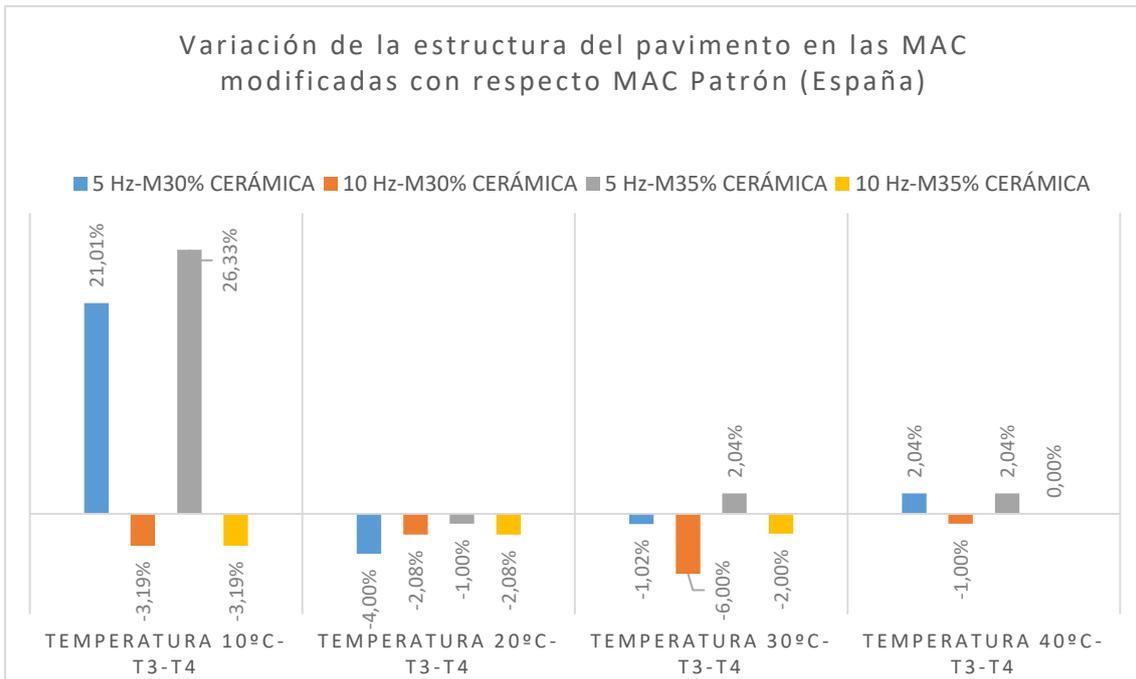


Figura 145. Variaciones de los Espesores de las Estructuras con relación a la Patrón (España)

8.1.5 Costos de producción de MAC (España)

Al comparar los Análisis de Precios Unitarios de las diferentes MAC se encuentra como es lógico una disminución de los precios en razón principalmente a que el árido que debería usarse para la elaboración de la MAC se reemplaza por un triturado cerámico que, en este caso, tiene una valoración de cero por ser residuo, pero que una vez reconocido su valor mecánico puede alcanzar un valor comercial. De la misma manera la disminución de los volúmenes de aporte a sitios de disposición de residuos puede ser motivo de disminución de impuestos, así como también debe revisarse la oportunidad de negociaciones que permitan optimizar los costos de transporte, ya que el triturado cerámico ya no requerirá transporte para ser dispuesto en los sitios de acumulación de residuos, sino que se trasladará a un patio de trituración para ser insertado en la cadena productiva de la producción de agregado para pavimentos. En resumen, se tiene para la MAC patrón un costo de 55 euros/m³, para las MAC 30% cerámico un costo de 52 euros/m³, es decir una disminución de 5,45% y un costo para MAC 35% cerámico de 53 euros/m³ para una disminución de 3,63%.

8.2 Caso Colombiano - Latinoamérica

8.2.1 Caracterización de los materiales de la mezcla (Colombia)

Con todo lo incluido en el numeral 7.2.1, se encuentra que tanto la gradación, como la forma, la textura y la dureza son propiedades que predominan de forma adecuada en la fórmula de trabajo.

En el caso de la gráfica de Füller, la fórmula de trabajo no debe coincidir con la línea de máxima densidad, para evitar vacíos de agregado mineral bajos, VMA. Con una fórmula de trabajo

exactamente sobre esta línea no se conseguiría suficiente espacio para obtener una película de asfalto suficientemente gruesa para un buen desempeño de la mezcla. En la Figura 97, se observa la representación gráfica de Füller de la fórmula de trabajo encontrando que está cerca a la máxima densidad, sin embargo, dentro de lo observado en los primeros tamaños, la fórmula de trabajo se aleja de la línea de máxima densidad y se acerca al límite inferior aceptado, posteriormente sigue por encima y en el tamiz No. 4 y No.10 se encuentra que vuelve a alejarse de la máxima densidad. Se observa que hay una tendencia de la fórmula a ser gruesa, pero en general se observa un buen comportamiento.

Con el cumplimiento de las especificaciones de INVIAS se garantiza que las fórmulas de trabajo cumplan con los conceptos predominantes de Tamaño Máximo Nominal TMN del agregado, que es la menor abertura de tamiz a través de la cual se permite que pase la totalidad del agregado en una serie normal de tamices y el Tamaño Máximo del agregado que es la menor abertura de tamiz a través del cual se requiere que pase la totalidad del agregado. Basado en esos dos conceptos, el INVIAS ha dado el nombre a los tipos de mezcla, en el caso de la mezcla escogida es MSC25 (Instituto Nacional de Vías, 2013).

8.2.2 Diseño de la mezcla asfáltica (Colombia)

El diseño de la mezcla asfáltica consideró principalmente promedio de los parámetros más representativos para definir el contenido óptimo del asfalto, que para el caso de MAC Patrón fue 5,0% y para las MAC 30% Cerámica y MAC 35% Cerámica alcanzaron el valor de 5,2% para ambas, teniendo un incremento de 0,2%, lo cual representa un aumento del contenido de asfalto de aproximadamente 4%.

Los conceptos de estabilidad y flujo se desarrollaron y se compararon con el fin de profundizar en el comportamiento de las mezclas. Si bien, las tres tienen resultados aceptables, es conveniente que la estabilidad no sea muy alta para evitar comportamiento muy frágil y de fisuración temprana del concreto. En ese caso la MAC 30% cerámica tiene la menor estabilidad y la más alta la MAC Patrón, al igual que las de España. Las deformaciones están dentro de los valores límite, sin embargo, las tres MAC están más cerca del valor más bajo. En cuanto a la sensibilidad al agua, (ver Figura 146) se aprecia en MAC 30% Cerámica y MAC 35% Cerámica mayor sensibilidad, mientras que MAC Patrón, es menos sensible; sin embargo, el ensayo que se confirmó está en los valores límite de la sensibilidad al agua. Las tres MAC alcanzan a obtener valores satisfactorios en todos los parámetros, algunos en los límites como el caso de los % de huecos de mezcla. La MAC 30% Cerámica obtuvo el menor valor de estabilidad por debajo de la MAC Patrón y de la MAC 35% Cerámica.

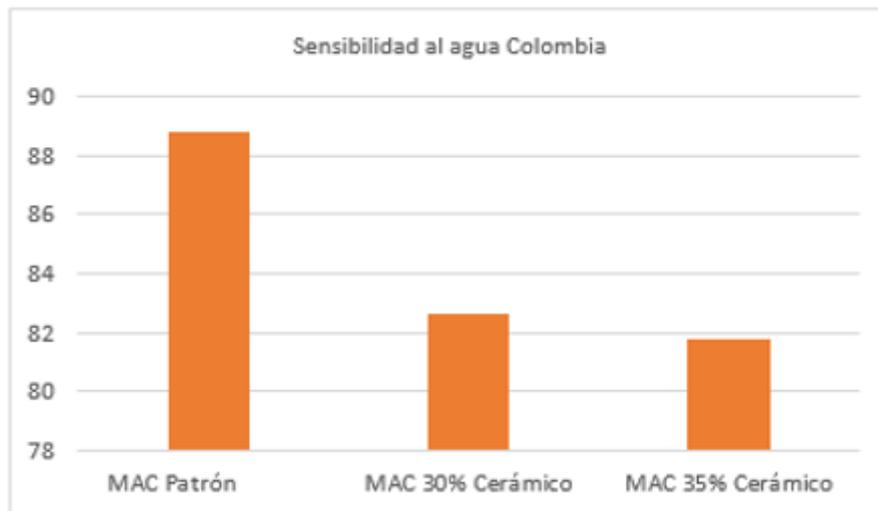


Figura 146. Comparación Sensibilidad al agua MAC Colombia

En el caso de las mezclas en Colombia, se mantiene la sensibilidad al agua con tendencia a la disminución con el aumento de la presencia de triturado cerámico añadido. Los otros parámetros no tienen una tendencia definida.

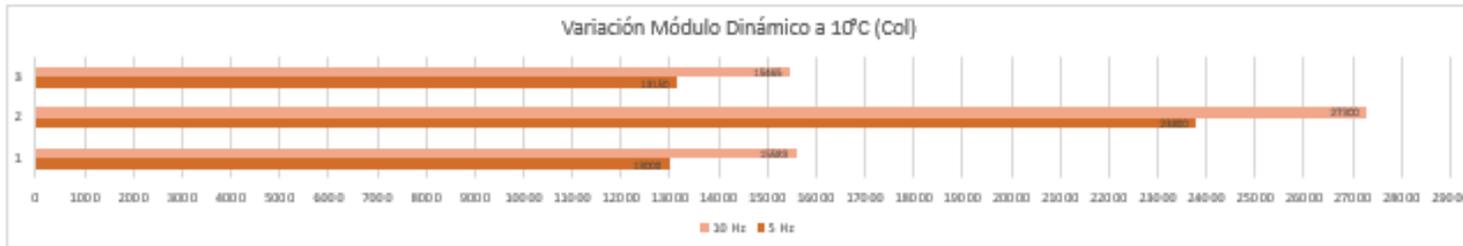
Tabla 162. Comparación MAC de Colombia

Ensayo/Propiedad	MAC Patrón	MAC 30% Cerámico	MAC 35% Cerámico
Contenido óptimo de betún %	5,0	5,2	5,2
Sensibilidad al agua	88,8	82,6	81,8
Estabilidad (kN)	16,98	14,53	16,30
Flujo (mm)	3,5	3,5	3,0
Vacios de Mezcla (%)	5,9	7,0	7,03

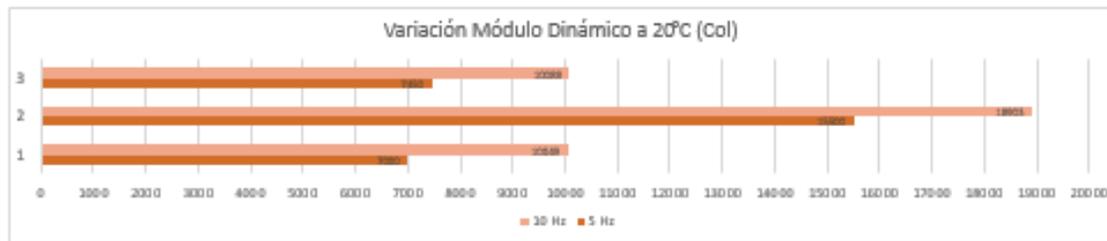
8.2.3 Módulos dinámicos y sus curvas maestras (Colombia)

La ejecución de los ensayos de módulos dinámicos demuestra la importancia de evaluar las mezclas bajo condiciones de temperatura y de frecuencia variadas. Se confirma la variabilidad de su resistencia o desempeño de una MAC debido a su sensibilidad a ambos parámetros. Sin embargo, al introducir una nueva variable como es un porcentaje de triturado de cerámico industrial se evidencia que ese esqueleto mineral incide en los resultados del módulo dinámico de forma importante.

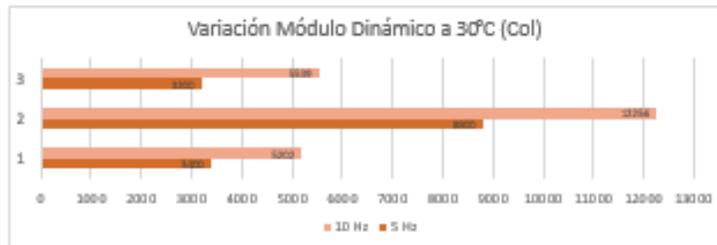
Se confirma nuevamente la necesidad de ejecutar ensayos de laboratorio y pruebas confirmativas con los materiales propios de cada zona. En el caso de Colombia, se están usando agregados y cerámicas obtenidas del Nororiente colombiano con unas características propias ya analizadas en los capítulos anteriores. Los resultados de los módulos dinámicos de las probetas sometidas a las diferentes temperaturas y a las frecuencias correspondientes a vías secundarias (ver Figura 147) muestran una tendencia de comportamiento consistente.



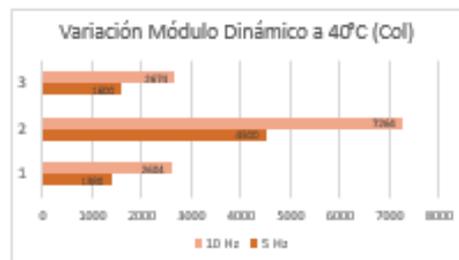
a)



b)



c)



d)

- | | | |
|---------------------|-------------------------|--------------------------|
| 2. Mezclas Patrón | 2. Mezclas 30% cerámica | 3. Mezclas 35% cerámicas |
| b) Temperatura 10°C | b) Temperatura 20°C | c) Temperatura 30°C |
| | | d) Temperatura 40°C |

Figura 147. Comparación del Módulo Dinámico MAC de Colombia

Las MAC Patrón identificadas con el número 1 tienen valores siempre menores que los alcanzados por las MAC con triturado de cerámica. Particularmente, en el caso del número 2, correspondiente a la MAC con 30% de cerámica triturada, en todos los casos se ubica con los valores más altos, indicando que este concreto asfáltico supera en su desempeño a la resistencia, bajo todas las temperaturas de ensayos a los valores obtenidos por las MAC Patrón, confirmando que la inclusión de triturado cerámico en el esqueleto mineral incide favorablemente en el comportamiento de la mezcla. La MAC con 35 % cerámica, aunque también reportó ligeramente valores superiores e inferiores a la MAC patrón, se podría inferir que hay una tendencia a la disminución, lo cual es consistente con la imposibilidad de desarrollar la MAC con 40% de cerámico y con lo concluido en el proyecto de IMPIVA en donde se descartó el 50% de inclusión de cerámica. En la

Tabla 163, se observa la disminución del valor del módulo entre 10°C y 40°C, siendo el de mayor diferencia la MAC 30% cerámica.

Tabla 163. Variación de Módulo Dinámico entre 10°C y 40°C (Colombia)

MAC	Colombia
MAC patrón	13,94%
MAC 30% cerámica	23,02%
MAC 35% cerámica	14,94%

8.2.4 Estructura total del pavimento (Colombia)

Con el fin de hacer una comparación de los espesores resultantes, se realiza un resumen de las estructuras con cada una de las MAC y con las temperaturas de experimentación. Inicialmente los espesores de cada una de las capas (Tabla 164), luego el espesor de toda la estructura con su variación (Tabla 165) y finalmente se observa gráficamente (Figura 148).

Para el diseño de la estructura de pavimento se han establecido las sollicitaciones mecánicas, del tránsito, y las sollicitaciones medioambientales, en donde se considere el efecto del agua en la estructura del pavimento. El objetivo general es tener un pavimento de buena calidad y que cumpla con la vida útil.

Tabla 164. Espesores de las Capas de las Estructuras de Pavimento diseñadas para cada MAC

Temperatura 10°C						
	Mezcla Patrón		Mezcla 30% Cerámica		Mezcla 35% Cerámica	
	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz
CA	9,0	8,5	8,0	7,5	9,0	8,5
Base	16,5	17,0	14,0	16,5	15,5	16,5
Subbase	23,5	23,0	23,5	23,5	23,5	23,5
Temperatura 20°C						
	Mezcla Patrón		Mezcla 30% Cerámica		Mezcla 35% Cerámica	
	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz
CA	11,0	9,5	8,5	8,5	10,5	9,5
Base	15,0	17,0	16,5	14,5	16,5	17,0
Subbase	23,0	23,0	23,5	23,0	23,5	23,0
Temperatura 30°C						
	Mezcla Patrón		Mezcla 30% Cerámica		Mezcla 35% Cerámica	
	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz
CA	14,0	12,0	10,0	9,1	14,0	11,5
Base	15,5	15,0	17,0	17,0	16,5	16,5
Subbase	23,0	23,0	23,0	23,0	23,5	23,0
Temperatura 40°C						
	Mezcla Patrón		Mezcla 30% Cerámica		Mezcla 35% Cerámica	
	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz
CA	22,0	15,5	12,5	10,5	20,0	15,5
Base	16,0	16,5	16,0	15,5	15,5	16,0
Subbase	23,5	23,0	23,0	23,5	23,5	23,5

Tabla 165. Espesores Totales de la Estructura y sus Variaciones (Colombia)

Temperatura 10°C						
	Mezcla Patrón		Mezcla 30% Cerámica		Mezcla 35% Cerámica	
	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz
Total estructura	49,0	48,5	45,5	47,5	48,0	48,5
% Mayor			-7,146	-2,06%	2,04%	0,00%
Temperatura 20°C						
	Mezcla Patrón		Mezcla 30% Cerámica		Mezcla 35% Cerámica	
	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz
Total estructura	49,0	49,5	48,5	46,0	50,5	49,5
% Mayor			-1,02%	-7,07%	3,06%	0,00%
Temperatura 30°C						
	Mezcla Patrón		Mezcla 30% Cerámica		Mezcla 35% Cerámica	
	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz
Total estructura	52,5	50,0	50,0	49,1	54,0	51,0
% Mayor			-4,76%	-1,80%	2,86%	2,00%
Temperatura 40°C						
	Mezcla Patrón		Mezcla 30% Cerámica		Mezcla 35% Cerámica	
	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz	5 Hz	10 Hz
Total estructura	61,5	55,0	51,5	49,5	59,0	55,0
% Mayor			-1,90%	-1,00%	12,38%	10,00%

La variación muestra una favorabilidad del uso de MAC con 30% de cerámica. Desde el punto de vista de diseño se encuentra disminución en los espesores de la estructura con respecto a la que contempla la MAC patrón como también en las frecuencias 5 y 10 Hz. Esta consideración

predomina principalmente en la temperatura de 10°C y en menor intensidad en las temperaturas, 20 y 30 °C; pero para la temperatura de 40°C la variación es mucho más notoria, especialmente las MAC 35% cerámica donde el aumento del espesor del pavimento es importante. En el caso de las MAC de 35% de cerámica hay aumento del espesor de la estructura lo cual desde el punto de vista económico no es atractivo.

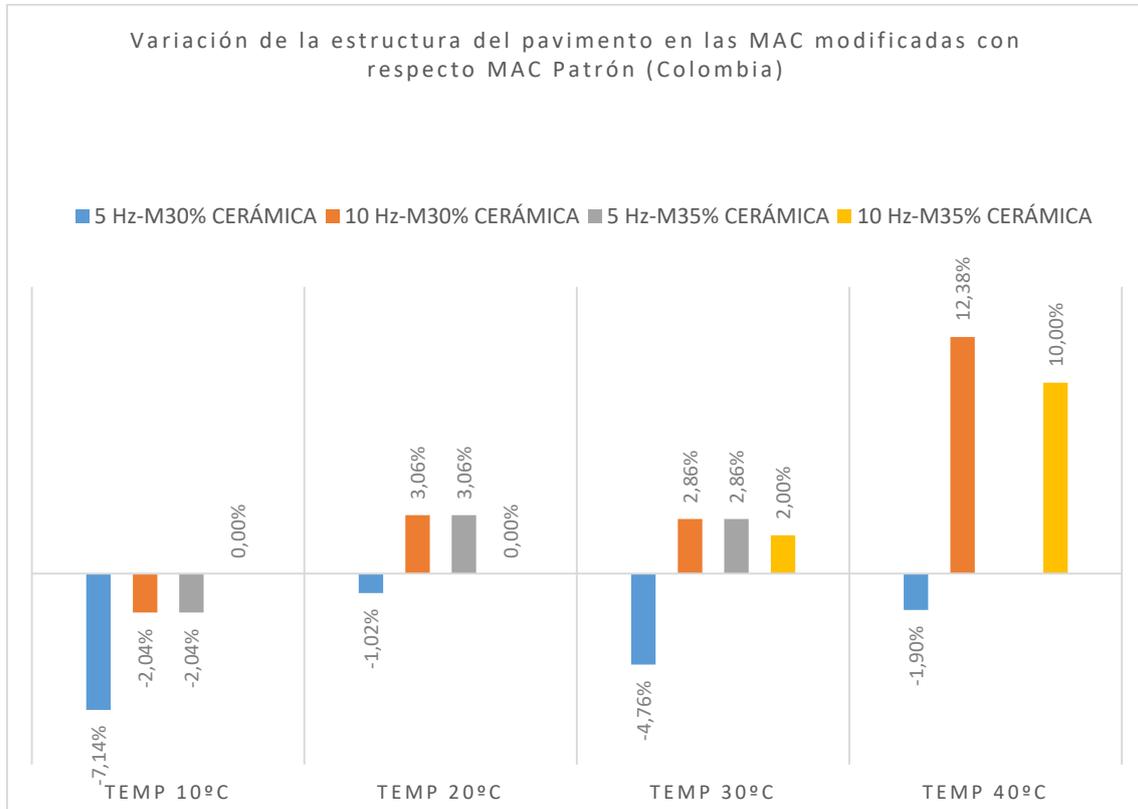


Figura 148. Variación del espesor Total con MAC modificadas vs MAC Patrón

8.2.5 Costos de producción de MAC (Colombia)

Al comparar los análisis de precios unitarios de las diferentes MAC se encuentra, como es lógico, una disminución de los precios en razón principalmente a que el agregado que debería usarse para la elaboración de la MAC se reemplaza por un triturado cerámico que, en este caso, tiene una valoración de cero por ser residuo. Al igual que en España, en Colombia prevalecen las mismas opciones para que el triturado cerámico gane un valor comercial

En resumen, se tiene para la MAC patrón un costo de 107,48 euros/m³, para las MAC 30% cerámico y MAC 35% cerámico un costo de 98,70 euros/m³, para ambas, es decir una disminución de 8,16%.

8.3 Comparación de ambos Casos

En cuanto a la caracterización de los materiales de acuerdo al MEB se observa una misma tendencia en el comportamiento de los elementos químicos que predominaron tanto en el árido como en los triturados cerámicos. Se puede constatar esa tendencia en la Figura 149, donde generalmente en la masa normalizada de los materiales de Colombia se observa una ligera superioridad.

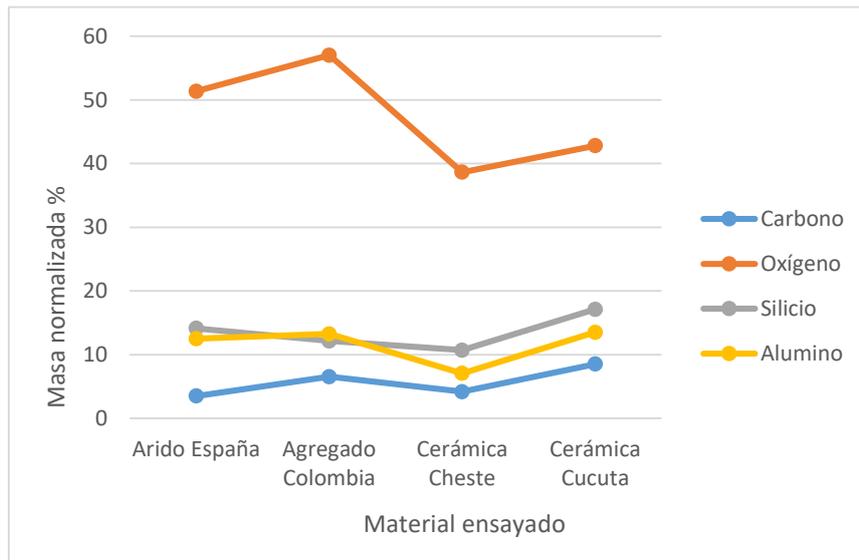


Figura 149. Masa normalizada de los elementos químicos del MEB.

Se presenta una comparación gráfica de las MAC Patrón, tanto para el caso de Colombia como para el caso de España. En cuanto a los resultados de diseño la MAC 35% es la que alcanza valores menos confiables de acuerdo a su coeficiente de correlación en los diferentes parámetros.

Para MAC Patrón de España, se encuentra que el módulo dinámico en todas las temperaturas y frecuencias siempre alcanzó valores más altos que el de Colombia, de forma consistente. Como se dijo anteriormente, esta condición puede ser debido al uso de un betún más duro que el colombiano, un esqueleto mineral con mejores características y por ende más resistente. La diferencia entre los dos es notable.

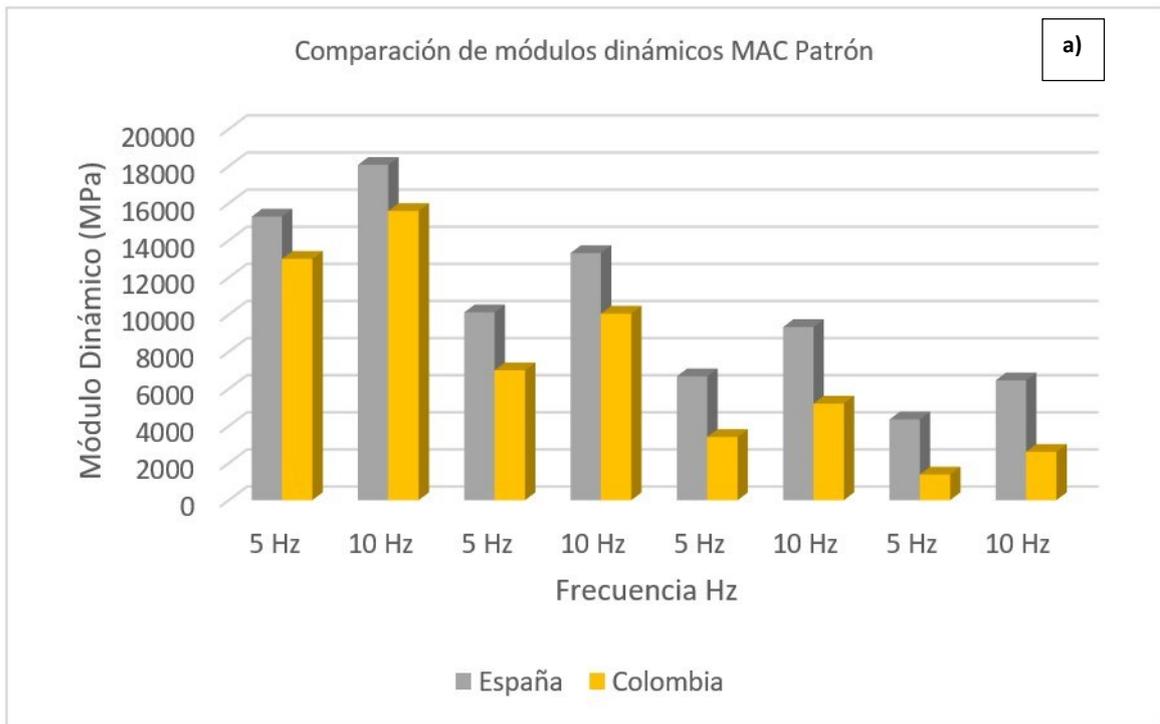


Figura 150. Comparación Módulos MAC Patrón España-Colombia

a) Variación por frecuencia

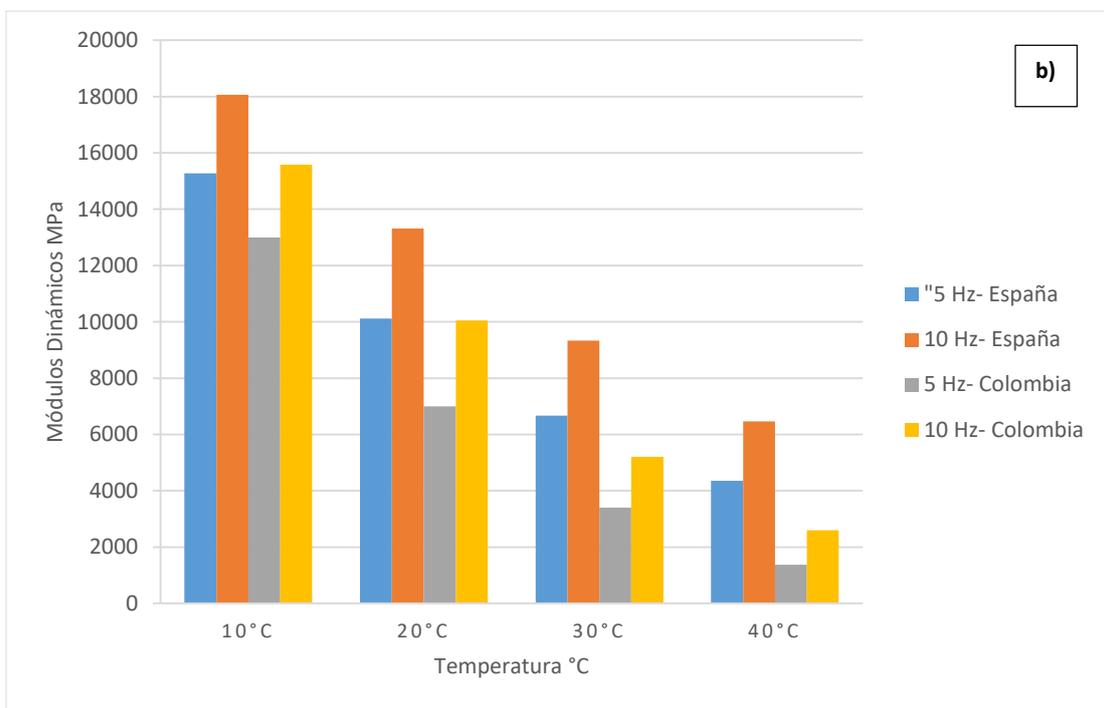


Figura 150. Comparación Módulos MAC Patrón España-Colombia

b) Variación por temperatura

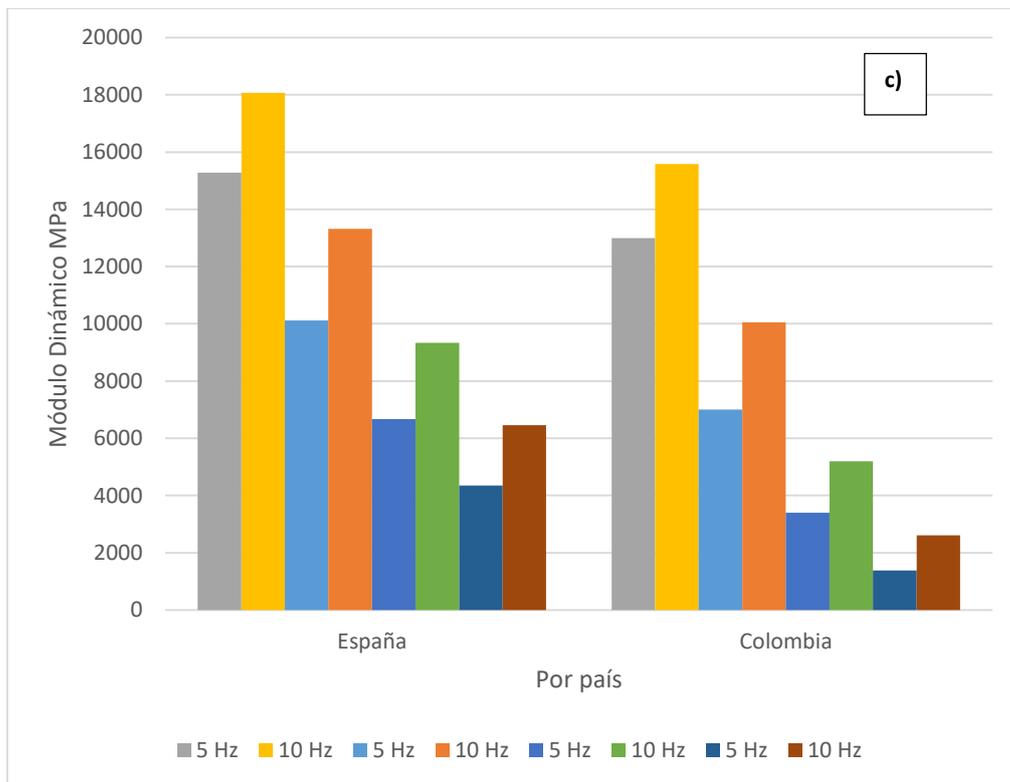


Figura 150. Comparación Módulos MAC Patrón España-Colombia

c) Variación por país

Se presenta también un diagrama de columnas en donde las barras están ordenadas por temperatura de 10°C hasta 40°C y esto se repite en los tres tipos de mezclas

En el caso de MAC 30% Cerámica, los módulos dinámicos de Colombia resultaron más altos que los de España. La diferencia entre los dos es reducida. En este caso se observa una incidencia importante del residuo cerámico que ha modificado los resultados originales de la MAC Patrón, principalmente porque los valores de módulo han resultado en ambos casos más altos que los MAC Patrón. Podría concluirse que el efecto del triturado cerámico en la mezcla es de mejora de la variable de resistencia en ambos casos. En el caso de Colombia, no se conoce una investigación paralela con la que se pueda comparar los resultados, por lo tanto, es la oportunidad para continuar profundizando en esta línea de investigación.

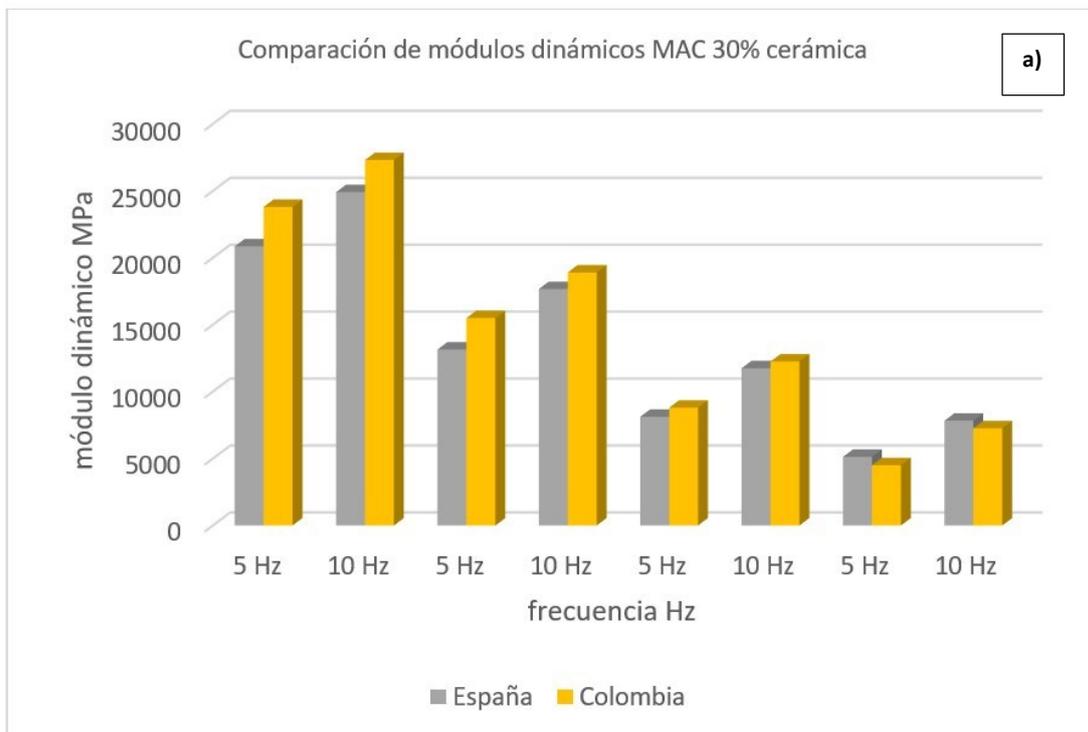


Figura 151. Comparación Módulos MAC 30% Cerámica España-Colombia

a) Variación por frecuencia

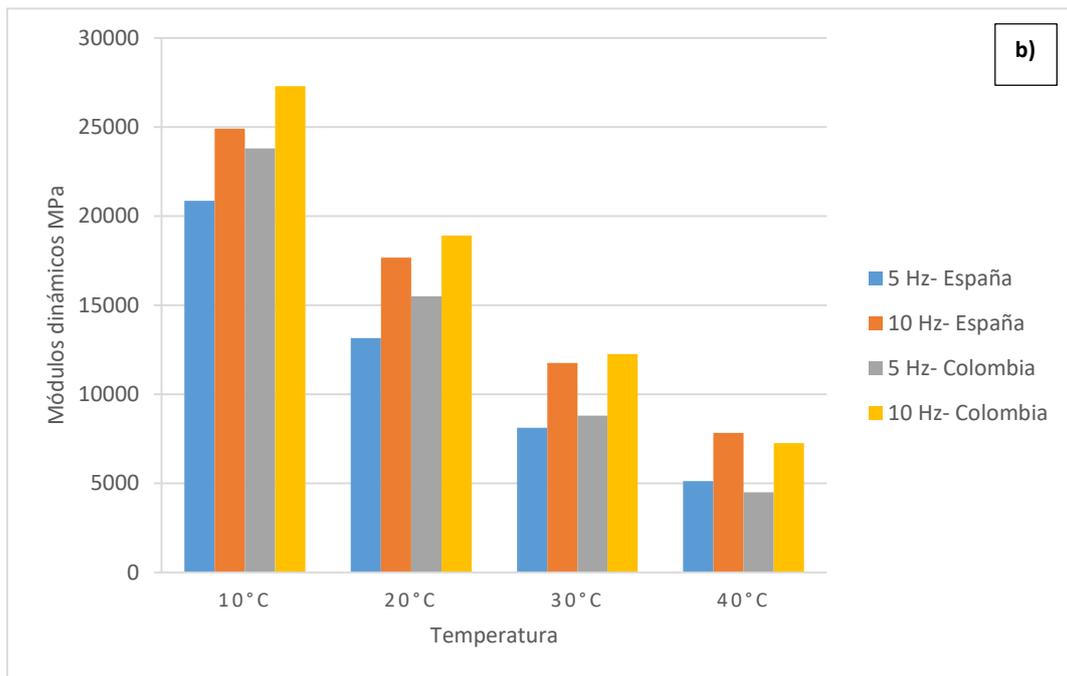


Figura 151. Comparación Módulos MAC 30% Cerámica España-Colombia

b) Variación por temperatura

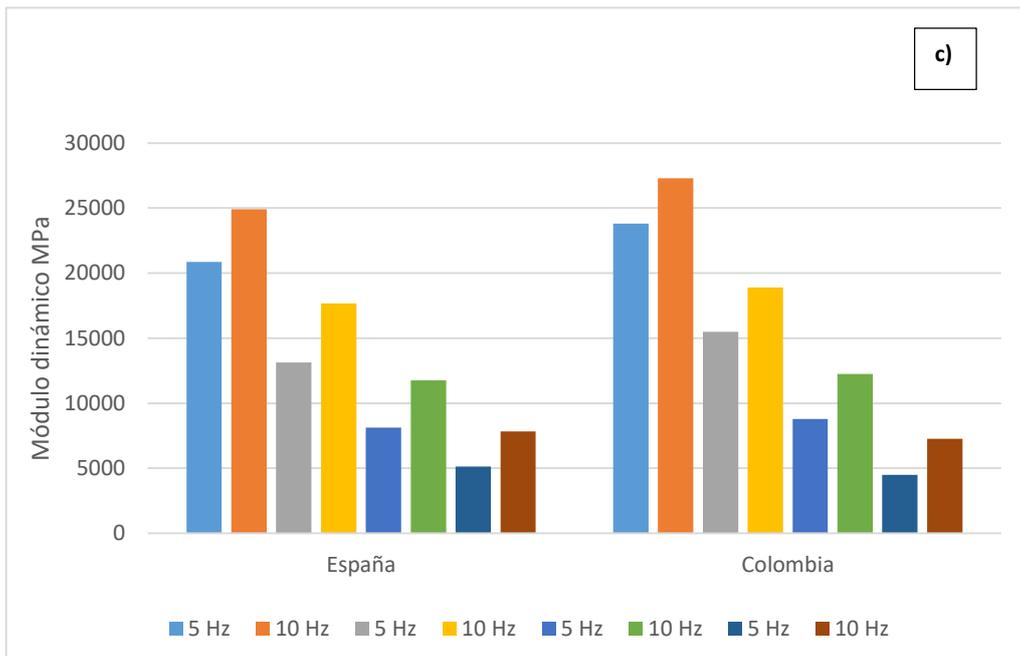


Figura 151. Comparación Módulos MAC 30% Cerámica España-Colombia
c) Variación por país

Para el caso de las MAC 35% Cerámica, hay mayor diferencia entre los módulos de España y los de Colombia. La diferencia entre los dos es notable. Los de España son más altos que los de Colombia (ver Figura 152). En la Tabla 166, se observan los deltas de variación entre los módulos de las MAC Patrón y las MAC Cerámicas, incluyendo la temperatura.

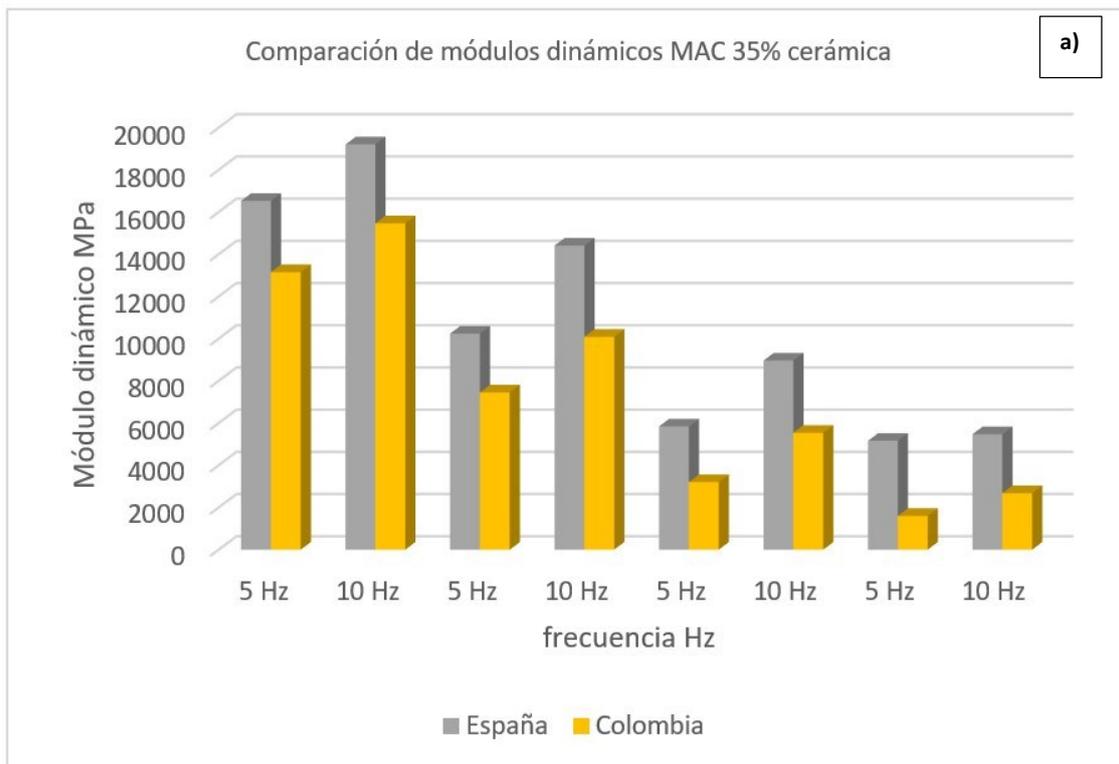


Figura 152. Comparación de Módulos MAC 35% Cerámica España-Colombia

a) Variación por frecuencia

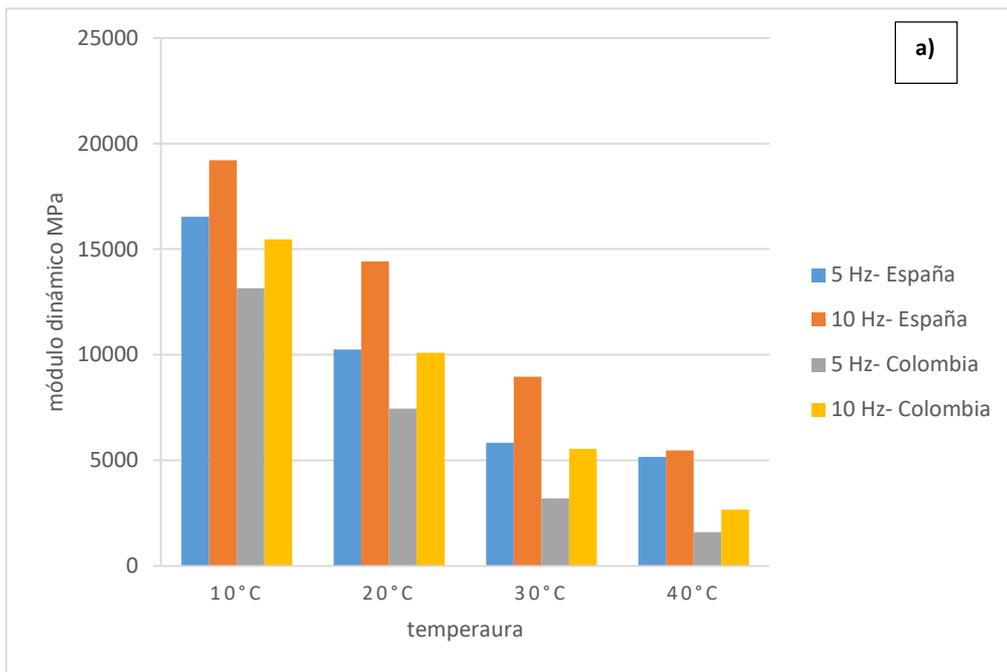


Figura 152. Comparación de Módulos MAC 35% Cerámica España-Colombia

a) Variación por temperatura

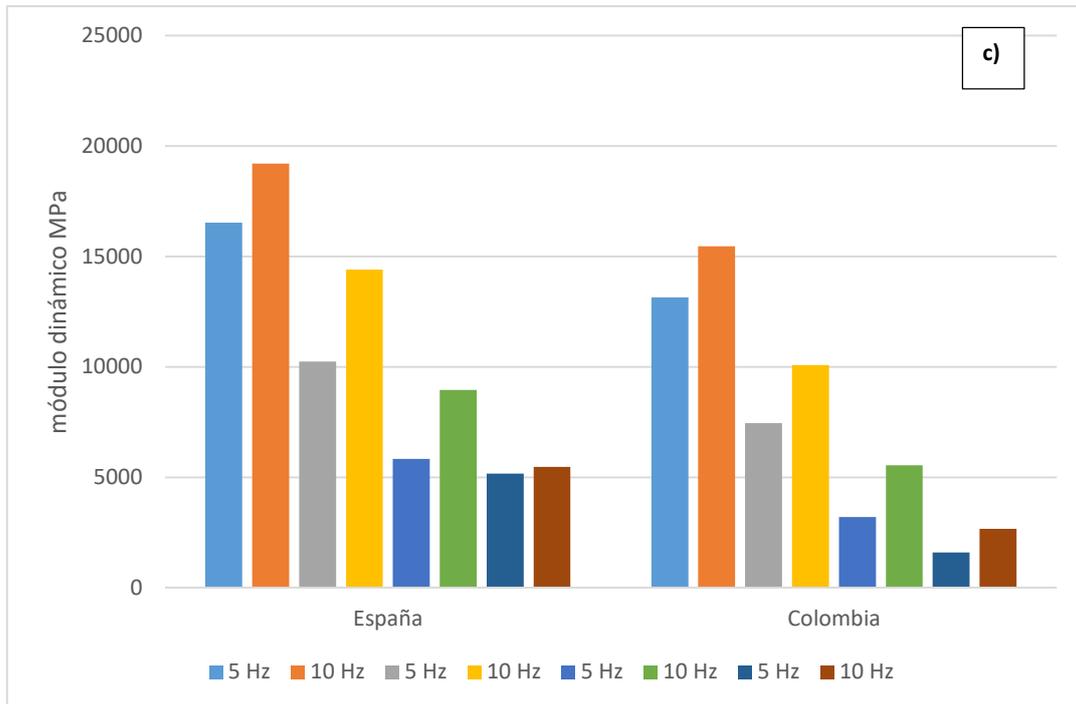


Figura 152. Comparación de Módulos MAC 35% Cerámica España-Colombia

b) Variación por país

En cuanto a la variación del módulo a medida que cambia la temperatura de 10°C a 40°C se obtienen mayores diferencias en el caso de España, especialmente en la MAC patrón, mientras que en el caso de Colombia hay mayor diferencia en la MAC 30% cerámica.

Tabla 166. Disminución de los Módulos entre 10°C y 40°C de España y Colombia

MAC	España	Colombia
MAC patrón	32,42%	13,94%
MAC 30% cerámica	28,31%	23,02%
MAC 35% cerámica	29,76%	14,94%

A continuación, se visualiza la tendencia muy similar de los resultados de los ensayos en cada una de las MAC tanto para España como para Colombia, y se puede observar la tendencia negativa con la temperatura, a mayor temperatura menor módulo dinámico y los resultados superiores de las MAC españolas tanto en patrón como en 35% de cerámico, mientras que en MAC 30% de cerámico hay una leve superioridad en los resultados de Colombia. La tendencia es prácticamente paralela entre los resultados de España y Colombia en la MAC 35% de cerámico, al igual que se presentó similar comportamiento en la MAC Patrón. Sin embargo, en la MAC 30% cerámico hay un comportamiento de convergencia de los resultados tanto de España como de Colombia (ver Figura 153).

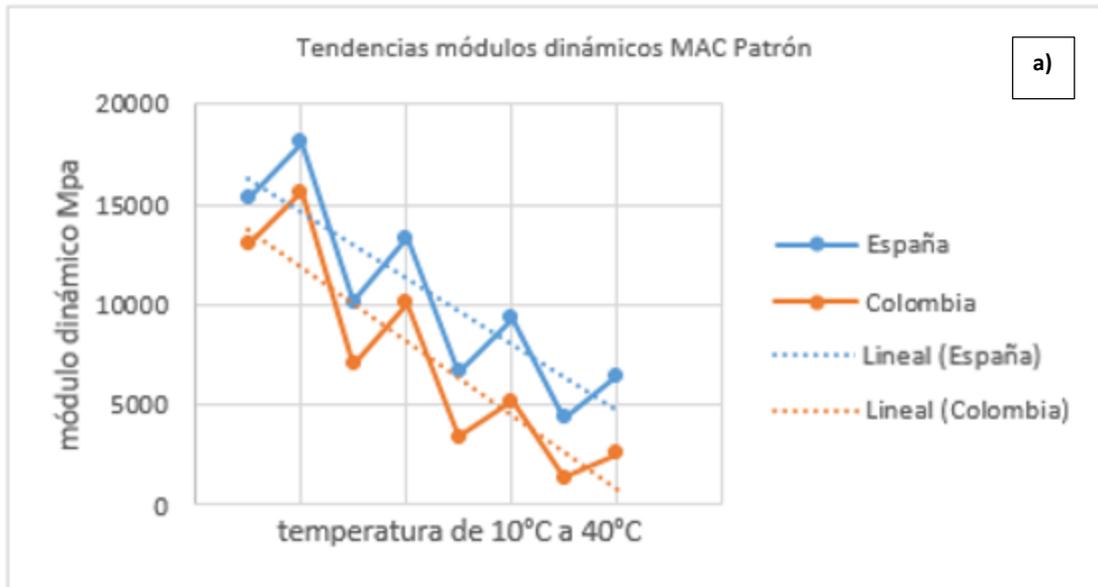


Figura 153. Tendencias módulos dinámicos de las diferentes MAC

a) MAC Patrón

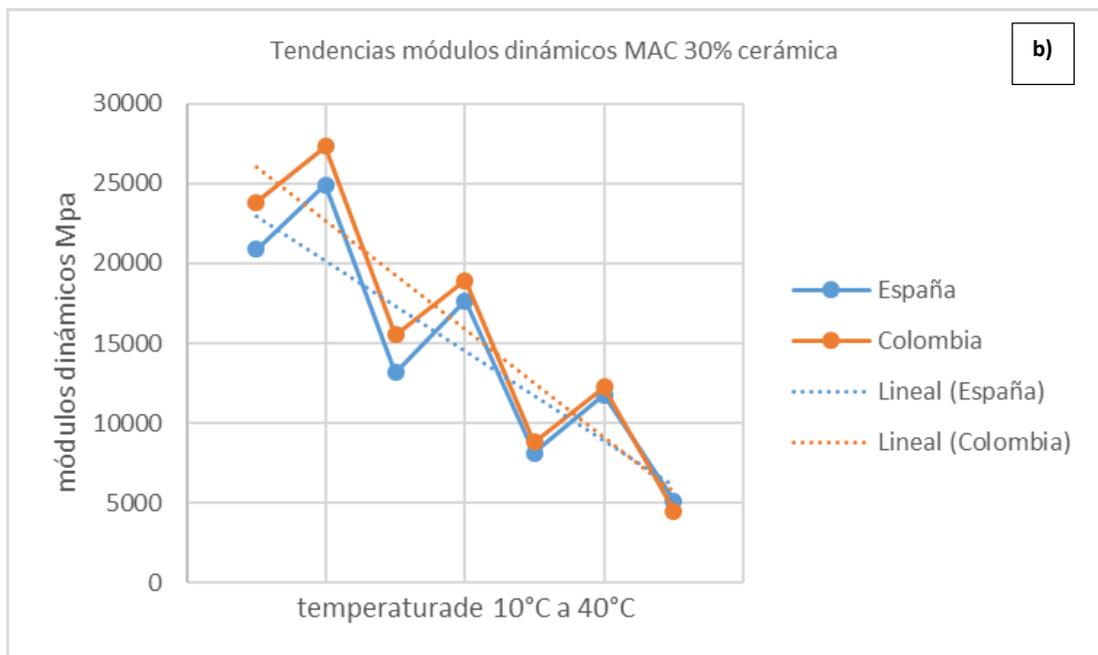


Figura 153. Tendencias módulos dinámicos de las diferentes MAC

b) MAC 30% cerámica

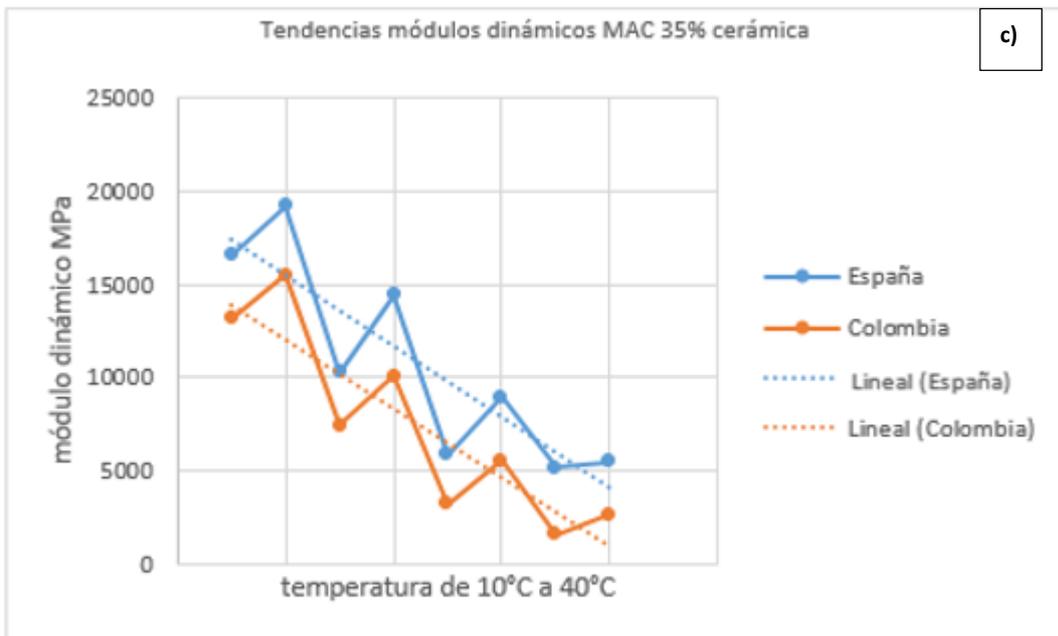


Figura 153. Tendencias módulos dinámicos de las diferentes MAC

c) MAC 35% cerámica

9. Discusión

Teniendo en cuenta los resultados de la caracterización tanto de los agregados convencionales y reciclados cerámicos como el cemento asfáltico empleados en esta tesis, se concluye que estos materiales pueden ser utilizados como parte constituyente de la mezcla asfáltica, bajo los criterios normativos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes del Ministerio de Fomento en España y de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías en Colombia. Toda investigación debe considerar los mejores materiales disponibles, que sean competentes para el desarrollo de una evaluación eficaz. Para los diseños de mezclas desarrollados se contó con los mejores materiales disponibles en cada región, lo cual permitió una adecuada valoración técnica de las mezclas asfálticas, llegando a confirmar el aprovechamiento del triturado cerámico industrial como constituyente del hormigón asfáltico.

Hasta hace un par de años, los parámetros de estabilidad, flujo y densidad fueron las únicas variables consideradas para clasificar las mezclas bituminosas y calcular el porcentaje óptimo de asfalto o betún. Hoy por hoy se confirma que la ejecución de ensayos dinámicos ofrece variables como el módulo dinámico que amplía el diagnóstico del comportamiento de la mezcla durante toda su vida útil.

Los costos y las externalidades del diseño de una carretera y el servicio de la misma durante toda su vida útil son justificantes suficientes del uso de ensayos dinámicos. Sin embargo, en países latinoamericanos como Colombia, las razones de tipo económico por el alto costo de los ensayos no han permitido el cambio de tecnología de diseño, razón por la cual se continúa con los tradicionales, especialmente para revestimientos en la red secundaria y terciaria que abarcan gran mayoría del país (90.46% de la red total) ocasionando un estancamiento en el estudio de las mezclas y en la optimización de los recursos disponibles (Atlassian, 2022).

Continuar haciendo combinaciones de la metodología tradicional con la caracterización dinámica es una opción que debe fortalecerse para comprender tendencias del comportamiento de las mezclas, de los materiales e ir plasmando recomendaciones con el fin de que los diseños obtengan un mejor desempeño en el momento de la construcción y servicio.

Como se explicó en el numeral 3.3, del capítulo 3, todos los países tienen un interés mundial en controlar los residuos, en orientar sus proyectos hacia el reciclaje, ya que está enmarcado en los objetivos de desarrollo sostenible, ODS, de las Naciones Unidas, ONU. Por lo anterior confirmar el aprovechamiento del triturado industrial cerámico con los materiales de la región es un logro importante para Europa y Latinoamérica, pues se ofrecen resultados que pueden ser llevados a la construcción de pruebas piloto con el fin de continuar desarrollando estudios que den pasos agigantados hacia la robustez de la investigación desde otras aristas y continuar su carrera hacia etapas de construcción.

Dentro de la caracterización dinámica las variables de frecuencia y temperatura tienen especial importancia debido a que el concreto asfáltico es susceptible a estos dos parámetros. El comportamiento o los resultados cambian a medida que estas variables cambian, aunque esta información no es nueva, sigue siendo innovadora, y se confirma con los ensayos que si es relevante. A mayor temperatura, el módulo dinámico se reduce, y el deterioro depende de la

frecuencia de las cargas, de igual manera a menos temperatura, el módulo dinámico aumenta y más si la frecuencia de las cargas es más alta. Estas condiciones podrían llevar a generar en el futuro una clasificación de los concretos asfálticos basado en su desempeño, tal como se ha desarrollado dentro de la tecnología Superpave. El grado de desempeño del asfalto, PG, puede empezar a servir para desarrollar una clasificación del concreto, donde los concretos asfálticos son nombrados con sufijos relacionados con los rangos de temperatura en que son recomendables su servicio. Desde luego sigue siendo importante el contexto geográfico y otras condiciones autóctonas de cada región, que deben continuar siendo consideradas.

Entre los porcentajes óptimos de asfalto obtenidos en esta tesis se tiene para España MAC Patrón, 4.2%, MAC 30% Cerámica es 4.6% y MAC 35% Cerámica es 4.7%, mientras para Colombia MAC Patrón, 5.0%, MAC 30% Cerámica y MAC 35% Cerámica es 5.2%. En otra experimentación en la que usaron 100%, 75%, 50% y 25% porcentajes de llenante mineral de triturado cerámico, obtuvieron contenidos óptimos de asfalto de 5,0%, 5,2%, 5,5% y 5,7% para diferentes porcentajes de reemplazo y para la MAC sin reemplazo el porcentaje fue de 4.8%. En esta investigación se confirma el aprovechamiento del residuo cerámico 100% como llenante y fue desarrollada en Asia (Shamsaei, Khafajeh, & Ghasem, 2019). Aunque se observan valores similares de porcentajes óptimos de asfalto o betún, a los calculados en esta tesina, los de España siempre son menores y los Colombia coincide con los del reemplazo de 100 y 75% de llenante, y muestra cierta convergencia de valores y resultados.

Como análisis dentro del contexto internacional, en el año 2008, se unió la empresa privada Becsa y la academia, representada por la Universidad Politécnica de Valencia, para iniciar la línea de investigación consistente en desarrollar una AC 22 BIN S, entre otras MAC con inclusión de residuo triturado cerámica. Casi simultáneamente, en el año 2009 Huang et al, usó favorablemente el 2.5% residuo cerámico como relleno mineral en la MAC (Huang, B., Dong, Q., & Burdette, E., 2009). En el año 2013, Silvestre et al, miembros del equipo de la UPV-Becsa concluyeron que efectivamente era factible reemplazar 20%, 30% de agregado, pero que con 50% ya los resultados no eran favorables en AC 22 BIN S, (Silvestre, R., Medel, E., García, A., & Navas, J., 2013) por lo que surge la incertidumbre si podría aumentar el porcentaje 30% y hasta cuánto. En el año 2015, Kara et al, en Turquía, llega a recomendar el uso del 30% de inclusión de residuo cerámico en MAC usando la normativa turca, (Kara & Karacasu, 2015) confirmando lo obtenido en España. Otro estudio utilizó cerámico triturado en un 5, 10, 15 y 20 % de sustitución del árido natural en pavimento bituminoso de macadán, en donde analizaron que los parámetros de estabilidad y flujo no disminuyeron con el uso del cerámico principalmente en 5,10 y 15% (Patel, Varia, & Mishra, 2017). Muniandy et al, en el 2018, hizo una investigación utilizando 0, 20, 40, 60, 80 y 100% concluyendo que el 20% era el valor máximo recomendado, en donde usó módulos dinámicos para evaluar la MAC, es decir a partir del 40% no se recomienda el uso del residuo cerámico (Muniandy, Ismail, & Hassim, 2018). También Andrzejuk, en el 2018, con cerámicos propios de su zona llega a recomendar el uso de 20 y 30% de cerámico en una MAC (Andrzejuk, W., Barnat-Hunek, D., Siddique, R., Zegardło, B., & Grzegorz, Ł., 2018). Y Shamsaei et al, 2019, concluyó que podía usar el 100% de residuo cerámico como llenante mineral en una MAC (Shamsaei, Khafajeh, & Ghasem, 2019). Con lo anterior, desarrollando esta tesis de doctorado dedicada a estudiar los porcentajes de 30%, 35% y 40%

de cerámica en MAC, cuyos resultados muestran coherencia en la línea de investigación, que de acuerdo a los módulos dinámicos el mejor desempeño se obtiene con 30%, el 35% aunque no obtiene valores desfavorables, si se observa una disminución en su desempeño y finalmente con el porcentaje de 40% no es conveniente, ya que se encontraron dificultades en la trabajabilidad de la mezcla, en su consistencia entre otras.

Hasta la actualidad todas las referencias consultadas recomiendan el uso de triturado cerámico, lo disponible en Europa y en Asia confirma lo encontrado en esta tesis. Por lo tanto, se puede concluir que el desempeño al módulo dinámico en proporciones de 30% de inclusión de cerámico es favorable usarlo dentro de una MAC, que valores de 35% estarían en un límite que empieza a ser desfavorable, los valores de inclusión de 40% definitivamente no son adecuados. Estos porcentajes son los más altos factibles que se han reemplazado como esqueleto mineral en MAC, se han incluido valores más altos de residuo cerámico, con resultados favorables, pero en llenante. Hasta ahora no se encontró referencias de uso de triturado cerámico en América, por lo que este estudio sería el primero en la región. En la Figura 154 se observa cómo ha sido la cronología hasta el año 2022.

Línea de tiempo. Residuo cerámico en MAC

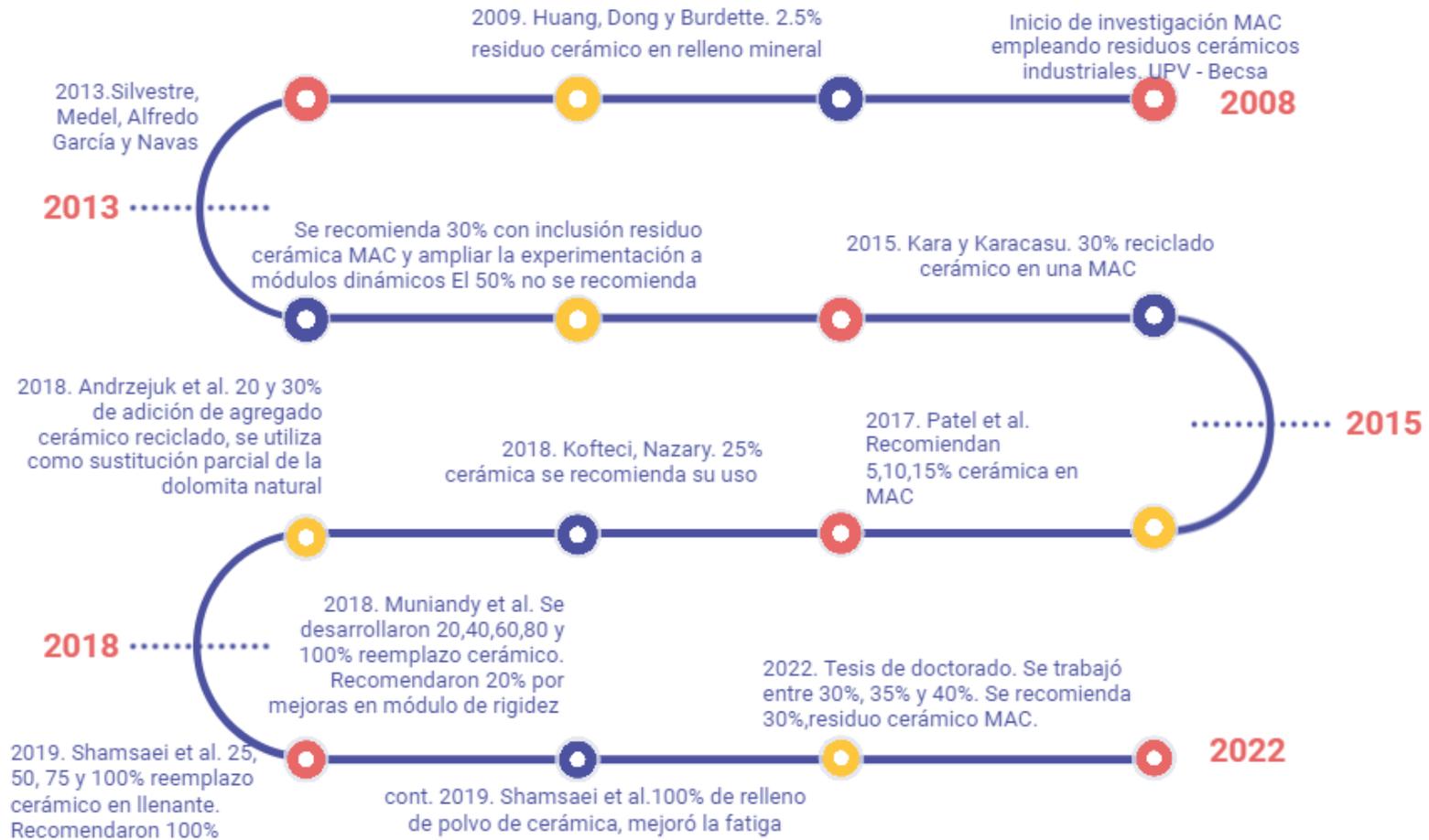


Figura 154. Línea de tiempo residuo cerámico incluido en MAC

Fuente: <https://tinyurl.com/3m54a5bh>, 2022

10. Conclusiones

Este Capítulo recoge las principales conclusiones obtenidas del desarrollo y análisis de la mezcla asfáltica patrón, la mezcla asfáltica con 30% de triturado de cerámica y la mezcla asfáltica con 35% de triturado de cerámica; su comportamiento con la metodología convencional y con los resultados de los ensayos de módulos dinámicos y la construcción de curvas maestras y discusión de la propuesta de uso del triturado cerámico para el aprovechamiento del residuo industrial y su incorporación a la industria del concreto asfáltico, así como también las futuras líneas de investigación.

Las conclusiones sobre el residuo cerámico Industrial, como alternativa de agregado en España y en Colombia son:

- El triturado cerámico se sometió a la caracterización de agregados establecida por el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes del Ministerio de Fomento en España y de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías en Colombia, encontrando que cumplen con las condiciones requeridas para ser usado como árido o agregado en cada caso.
- El triturado cerámico cumple ampliamente las características de dureza, durabilidad, limpieza del agregado y geometría de las partículas en ambos casos.
- El porcentaje de reemplazo del triturado cerámico es una condición importante en el manejo del agregado cuando hace parte de un aglomerado. Se evidenció que el porcentaje de 30% de uso dentro de la mezcla es adecuado, mientras que el porcentaje de 35%, aunque se desarrolló, su comportamiento fue menos óptimo que el anterior, especialmente en trabajabilidad y los resultados de los parámetros técnicos muestran tendencia a la baja. El porcentaje de 40% de cerámico no se logró trabajar adecuadamente y, por estudios anteriores, el porcentaje de 50% no es recomendable (Silvestre, R., Medel, E., García, A., & Navas, J., 2013)

Sobre las características de las fuentes de materiales usadas de España y de Colombia:

- Las fuentes usadas en España corresponden tradicionalmente a áridos usados en la industria de la construcción de carreteras, como es el caso de la cantera de Cheste, en Valencia, la cual es de propiedad de la empresa Pavasal S.A. Estos áridos fueron confirmados, con la ejecución de los ensayos de caracterización establecidos por el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes del Ministerio de Fomento en España, como altamente competentes para utilizarse en la construcción de aglomerados bituminosos.
- Adicionalmente se estudió la información geológica que confirma la presencia en la zona de Cheste, España, de bancos de conglomerados rodeados entre los que predominan cemento arcilloso, rojo y pardo, cuarzo y cuarcita, bancos gruesos de arenisca roja, arcillas rojas y pardo-oscuras, con características duros y resistentes. Y en cuanto al residuo cerámico, de Castellón, desde luego la presencia de arcilla para la elaboración

de tabletas cerámicas para uso residencial e industrial, lo cual confirma sus bondades de uso. Por otro lado, las micro-imágenes evidencian una similitud en la morfología del árido y el residuo cerámico en su composición intrínseca y en la presencia predominante en ambos casos de elementos químicos como son el oxígeno y el silicio, que confirman lo explicado inicialmente, elementos muy afines y que en la naturaleza se encuentran unidos en minerales comunes como el cuarzo y silicatos que son duros, poco solubles y trabajables. (Martínez Bogado, 2011)

- En cuanto al agregado de Pescadero, en Colombia, la geología lo describe con el nombre de granito de Pescadero y se ha descrito como un material que cumple ampliamente con las especificaciones INVIAS y es reconocido por su resistencia y uso en pavimentos. En cuanto al residuo cerámico de Cúcuta, se caracteriza por las arcillas que están ubicadas en la formación León y Guayabo con características favorables a los procesos de industrialización de la cerámica. En las micrografías se observa cierta similitud entre el agregado y la cerámica, con predominancia de los elementos de silicio y oxígeno al igual que los materiales de España, aunque aquí se adiciona el aluminio como presencia predominante adicional. Las micro-imágenes colombianas se observan más homogéneas, menos variables con relación a las españolas. La morfología muestra menos variabilidad.

Sobre el comportamiento de la MAC con inclusión de residuo cerámico:

- Se encuentra un mejoramiento en las condiciones de desempeño al módulo dinámico de las MAC con triturado cerámico. En casi ningún caso la MAC patrón superó las MAC con inclusión de triturado cerámico. Por lo tanto, se concluye que el triturado cerámico le confiere a la mezcla una mayor resistencia en el caso del MAC 30% Cerámica, por lo que se deduce que este porcentaje sería el óptimo, esto también está de acuerdo con las investigaciones consultadas y a los resultados obtenidos, ya que la MAC 35% Cerámica, aunque también ha dado valores superiores se observa que empieza un descenso en los resultados y podría no ser estable su desempeño.

Sobre comportamiento de las MAC en los ensayos de módulos dinámicos bajo diferentes parámetros de temperatura y frecuencia:

- Se construyeron las curvas maestras con temperaturas de referencia de 10°C, 20°C, 30°C y 40°C, considerando diferentes frecuencias puede conocer el módulo dinámico para ser usado en diseño, lo cual es una herramienta importante disponible de origen experimental que puede ser y seguirse retroalimentando.
- Desde luego los ensayos a 10°C son los que obtuvieron los más altos módulos, en zonas donde el promedio sea esta temperatura, se tiene la curva maestra para ser usada en diferentes frecuencias, pero desde luego deberá en su momento revisarse la factibilidad económica de la consecución de los materiales.
- Para los ensayos con temperaturas de 20 y 30°C se diría que los resultados todavía alcanzan valores altos que muestran el aporte del residuo cerámico a la MAC, y se observa un comportamiento favorable en ambos países. Sin embargo, en cuanto a los espesores en España, en estas temperaturas disminuyeron los espesores, pero en

Colombia hubo algunos que aumentaron, principalmente para las que tienen que ver con las velocidades más altas, aunque no se evidenció una tendencia visible.

- En el caso de las MAC en temperaturas de 40°C, se observa que hay una disminución de los valores, la temperatura alta pudiera no ser un parámetro conveniente para el uso de triturado cerámico. Al revisar los resultados de diseño de pavimento de las estructuras en temperaturas de 40° C aumentaron sus espesores en ambos casos. Es importante continuar con la línea de investigación para profundizar sobre el tema.

Sobre comparación de los resultados convencionales entre MAC de España y Colombia:

- Entre los parámetros como el de estabilidad se observó un decremento en los valores con el uso de triturado cerámico dentro de la MAC. Los huecos o vacíos de las mezclas estuvieron unidos al límite de las especificaciones técnicas permitido, en las MAC con cerámico. Los flujos en las MAC de España están bastante cercanos al límite bajo y las de Colombia en unos valores medios. Sin embargo, no se observa una tendencia definida, pero se puede decir que cumplieron con las especificaciones técnicas básicas y que como exigencia dentro de las reglamentaciones vigentes las MAC con cerámico podrían ser usadas.

Confirmación del aprovechamiento del residuo industrial cerámico en una MAC, siguiendo características convencionales:

- Los parámetros convencionales de Marshall pudieron cumplirse, en algunos casos en los límites establecidos por las especificaciones y el reglamento PG-3, lo cual indica una aceptación de la inclusión del triturado cerámico. Sin embargo, debe continuar desarrollándose ensayos confirmativos y de comparación con el fin de aumentar el diseño experimental, ofrecer mayor confiabilidad y conseguir la atención de los funcionarios encargados de la toma de decisiones, los contratistas de obra, así como también de las empresas de producción de cerámicas.

Confirmación del aprovechamiento del residuo industrial cerámico en una MAC, siguiendo características dinámicas:

- El desempeño de la mezcla bajo el parámetro del módulo dinámico tiene su confirmación en que las MAC con cerámico resultaron con módulos más altos y se comportaron como un hormigón asfáltico con sus características propias.
- Hay un mejoramiento de las MAC cuando se usa el residuo cerámico y esa es una conclusión predominante en todo el estudio.
- Se observa que hay consistencia desde el punto de vista convencional y dinámico entre Patrón y MAC con cerámico, en ambas metodologías es favorable el uso del triturado cerámico, tanto en el caso de Colombia como en el caso de España. Ha sido de gran aporte realizar unas investigaciones paralelas con materiales propios de cada región como es el caso de un país en Europa y otro país en América.
- Esta oportunidad no solo ha podido desarrollar el objetivo central de la tesis, sino que ha podido empezar a realizar comparaciones de resultados con el fin de ir dando avales en diferentes partes del mundo. Realizar pruebas similares con equipos similares y con apoyo de personal idóneo en cada laboratorio permite repensar la ingeniería no solo de

los pavimentos sino en ampliar los marcos de referencia y mover los límites o extrapolarlos a otros contextos que pudieran beneficiarse de experiencias técnicas.

De esta forma, ha quedado verificada la hipótesis planteada al inicio de la investigación. En este sentido, el residuo industrial cerámico da mejores resultados en cuanto a módulos dinámicos que la mezcla patrón.

Estos resultados proporcionan a los ingenieros nuevas herramientas para reducir el volumen de explotación de las fuentes naturales y empezar a utilizar material competente con una nueva línea de servicio en la industria de los pavimentos como es el residuo cerámico. Incluir esta opción en el proceso de diseño y mejora de carreteras secundarias o locales, tanto en España como en Colombia, permitirá disminuir los impactos negativos ambientales que se dan por la explotación de los áridos o agregados, de esta manera la ingeniería de los pavimentos continúa la incorporación de material reciclado, la cual es una política no solo de país sino a nivel planetario, atendiendo los llamados de la comunidad internacional a reusar y reciclar para un mejor aprovechamiento de los residuos.

Las conclusiones de esta Tesis Doctoral están limitadas a las características de los materiales usados en el estudio e incluidas en los Capítulos 6 para España y 7 para Colombia. Se tuvieron en cuenta condiciones para carreteras de Intensidad Media Diaria de vehículos pesados T3 y T4 en España y Nivel de Tránsito Intermedio o NT2 en Colombia. Por tanto, son aplicables a carreteras convencionales secundarias o locales, que pueden obtener una disminución en los costos de construcción y por ende más posibilidades de ser priorizada en forma más rápida.

Se debe destacar que las curvas maestras pueden ser usadas para el desarrollo de diseños estructurales bajo una temperatura de referencia desde 10° hasta 40°C, estableciendo una vez más que el desempeño de las mezclas al módulo dinámico depende de la temperatura y de la frecuencia de la carga o tipo de vía.

Una condición a tener en cuenta de la Tesis Doctoral es que es posible considerar el uso de módulo dinámico en el cálculo de estructuras de pavimento, en diferentes condiciones de temperatura y frecuencia para vías secundarias y locales, usando árido de la cantera de Cheste, en el caso de España, o agregados de la cantera de Pescadero, en el caso de Colombia. El análisis en cuanto a deformación plástica o fatiga se consideró que no hacía parte del alcance de la misma, ya que solo se trabajó en el ámbito de laboratorio y no se usó mezcla proveniente de planta asfáltica. Adicionalmente, la pandemia (2020-2021) limitó la ampliación de la tesis para evaluación de otros ensayos, por lo que no fue posible su ejecución en el tiempo disponible.

Teniendo en cuenta los resultados de la caracterización tanto de los agregados convencionales y reciclados cerámicos como del cemento asfáltico empleados en esta tesis, se concluye que estos materiales pueden ser utilizados como parte constituyente de la mezcla asfáltica, bajo los criterios normativos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes del Ministerio de Fomento en España y de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías en Colombia. Como se mencionó en la tesis, toda investigación debe considerar los mejores materiales disponibles, que sean competentes para el desarrollo de una evaluación eficaz. Para los diseños de mezclas

desarrollados se contó con los mejores materiales disponibles en cada región, lo cual permitió una adecuada valoración técnica de las mezclas asfálticas, llegando a confirmar el aprovechamiento del triturado cerámico industrial como constituyente del hormigón asfáltico.

Hasta hace un par de años, los parámetros de estabilidad, flujo y densidad fueron las únicas variables consideradas para clasificar las mezclas bituminosas y calcular el porcentaje óptimo de asfalto o betún. Hoy por hoy, se confirma que la ejecución de ensayos dinámicos ofrece variables como el módulo dinámico que amplía el diagnóstico del comportamiento de la mezcla durante toda su vida útil.

Como se mencionó, los costos y las externalidades del diseño de una carretera y el servicio de la misma durante toda su vida útil son justificantes suficientes del uso de ensayos dinámicos; sin embargo, en países latinoamericanos como Colombia, las razones de tipo económico por el alto costo de los ensayos no permiten el cambio de tecnología de diseño sino se continúa con las tradicionales, ocasionando un estancamiento en el estudio de las mezclas y en la optimización de los recursos disponibles.

Ir haciendo combinaciones de la metodología tradicional con la caracterización dinámica es una opción que debe fortalecerse para ir conociendo tendencias y haciendo recomendaciones con el fin de que los diseños obtengan un mejor desempeño en el momento de la construcción y servicio.

Como se explicó en el numeral 3.3, del capítulo 3, todos los países tienen un interés mundial en controlar los residuos, en orientar sus proyectos hacia el reciclaje, ya que está enmarcado en los objetivos de desarrollo sostenible, ODS, de las Naciones Unidas, ONU. Confirmar el aprovechamiento del triturado industrial cerámico con los materiales de la región es un logro importante para Europa y Latinoamérica, pues se ofrecen resultados que pueden ser llevados a la construcción de pruebas piloto con el fin de continuar desarrollando estudios que den pasos agigantados hacia la robustez de la investigación desde otras aristas y continuar su carrera hacia etapas de construcción.

Dentro de la caracterización dinámica, las variables de frecuencia y temperatura tienen especial importancia debido a que el concreto asfáltico es susceptible a estos dos parámetros, por lo que el comportamiento o los resultados varían a medida que estas variables cambian, aunque esta información no es nueva sigue siendo innovadora, y se confirma con los ensayos que sí es relevante. A mayor temperatura, el módulo dinámico se reduce, y el deterioro depende de la frecuencia de las cargas, de igual manera a menor temperatura, el módulo dinámico aumenta y más si la frecuencia de las cargas es más alta. Estas condiciones podrían llevar a generar en el futuro una clasificación de los concretos asfálticos basado en su desempeño, tal como se ha desarrollado dentro de la tecnología Superpave, el grado de desempeño del asfalto, PG, de esa misma forma, se puede empezar a desarrollar una clasificación del concreto basado en el PG, donde los concretos asfálticos son nombrados con sufijos relacionados con los rangos de temperatura, en que son recomendables su servicio. Desde luego sigue siendo importante el contexto geográfico y otras condiciones autóctonas de cada región, que deben continuar siendo consideradas.

11. Futuras líneas de investigación

La elaboración de esta tesis doctoral ha permitido el desarrollo de diferentes MAC usando triturado cerámico con diferentes temperaturas y frecuencias en el ensayo de módulo dinámico. Esto ha permitido comprender mejor el comportamiento de la mezcla en el laboratorio y definir los rangos de aplicación, los tipos de carretera y parámetros idóneos. A raíz de todo ello, se han identificado ciertos campos de investigación relacionados con la obtención de más combinaciones y parámetros que permitan profundizar en el desempeño de este tipo de mezclas que pueden resultar de gran interés.

Seguimiento a tramos de prueba piloto de pavimentos con residuos cerámicos construidos en España.

Como se comentó en el capítulo I. Antecedentes, Becsa S.A.S construyó un tramo de prueba, en la carretera CV-170, cerca de la población de Atzeneta, el cual se observa de acuerdo a Google Map (ver Figura 155. Carretera CV-170 cerca de Atzeneta, España) en buen estado de servicio. Para avanzar con la validación técnica de las mezclas especiales modificadas con triturado de cerámica, se recomienda continuar con líneas de investigación dedicadas al proceso de seguimiento. Ese seguimiento debe consistir en obtener conteos de tránsito históricos y actuales, realizar la evaluación de la regularidad superficial de modo que se obtenga el perfil transversal, el perfil longitudinal, con un analizador dinámico de perfil longitudinal y perfilógrafos transversales y conocer el estado de la textura superficial del pavimento con mediciones puntuales y de medida continua, como el péndulo TRL y el ensayo de la mancha de arena. Realizar un estudio de deterioros para conocer el estado de las fallas. Para este caso puntual, el análisis de la información permitiría conocer la vida útil remanente del pavimento existente y evaluar su desempeño qué, aunque en este caso es un tipo de mezcla de rodadura, es muy importante continuar estudiando las mezclas especiales modificadas con triturado cerámico teniendo como referente esta aplicación.



Figura 155. Carretera CV-170 cerca de Atzeneta, España

Fuente: Google Maps, 2022

Construcción de tramos de prueba piloto de pavimentos con residuos cerámicos construidos en Colombia.

Teniendo en cuenta que las mezclas que usan material de residuo industrial no se consideran como convencionales sino como especiales, se propone validar las mezclas asfálticas especiales modificadas con triturado de cerámica utilizando la construcción de un tramo piloto que sirva de laboratorio experimental en donde se realice un seguimiento periódico para establecer a futuro unas especificaciones técnicas de construcción particulares relacionadas con mezclas asfálticas que usan el triturado de cerámica como parte del agregado u árido con el fin de ofrecer un reglamento o especificación técnica que estandarice los parámetros de control de calidad más importantes de uso en diferentes países del mundo.

Análisis analítico de estructuras de pavimento con los nuevos materiales.

Se propone continuar y consolidar la etapa de dimensionamiento iniciada en esta tesis con el uso del método empírico AASHTO-93 aplicando uno o más métodos mecanicistas como por ejemplo la Guía de Diseño Mecano Empírica de Pavimentos, MEPDG, por sus siglas en inglés o el método francés Alizé, cuyos resultados permitan validar y confirmar el espesor de las capas usando metodologías de diseño basadas en modelos matemáticos que calculan las deformaciones y los esfuerzos para compararlos con leyes de fatiga propuestas.

Ampliación de los estudios experimentales a otras fuentes de agregado, cerámico y asfalto.

Se propone ampliar la muestra de ensayos con diferentes fuentes de agregado, varias fuentes de residuo cerámico, y también de diferentes tipos de cemento asfáltico con el fin de validar el uso del cerámico en los diferentes climas, temperaturas y tipos de vía - primarias, secundarias y locales -, avanzar con el uso de ensayos dinámicos que simulen condiciones de temperatura o de frecuencia. Inclusive la opción de reemplazar solo concentrado en algunos tamaños como, por ejemplo, solo reemplazar llenante mineral para profundizar en su desempeño y comportamiento.

Aplicación de otros ensayos dinámicos para conocer el desempeño de las MAC.

Otras de las propuestas resultantes de esta tesis de doctorado es ampliar el desarrollo de ensayos de fatiga y de deformación plástica con el fin de profundizar en el comportamiento de la mezcla especial modificada con triturado cerámico ante el tránsito y la vida útil contemplada. La fatiga si bien predomina en pavimentos al servicio de volúmenes altos de tráfico, es un parámetro de gran interés para conocer su comportamiento y proponer modificaciones que pudieran avalar el desempeño de la mezcla. De igual manera, sería recomendable el estudio de la deformación plástica de la mezcla asfáltica modificada con triturado cerámico para detallar el control de calidad mediante la especificación técnica desarrollada.

Uso de betún modificado con polímeros.

Otra propuesta de investigación es el desarrollo del diseño de mezclas asfálticas con betún o asfalto modificado con polímeros o aditivos que confieran una mayor resistencia con la inclusión de triturado cerámico para verificar su aplicación en carreteras de altos volúmenes de tránsito o carreteras troncales o primarias mejorando los parámetros de fluencia y de porcentaje de vacíos principalmente.

Diseño de la mezcla usando metodología Superpave para el desarrollo de pavimentos asfálticos de alto desempeño.

Otra propuesta de investigación es la evaluación de mezclas modificadas con cerámica usando la metodología desarrollada por EEUU con el programa Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave) entre 1987 y 1993 con el fin de predecir mejor el desempeño de las mezclas asfálticas. En este programa se crearon nuevas especificaciones, nuevos ensayos de laboratorio para asfaltos y agregados y nuevo método de diseño para mezclas asfálticas en caliente. Con esta tecnología se pueden evaluar parámetros como el agrietamiento térmico, la fatiga y el ahuellamiento, así como también caracterizar el asfalto por medio de la clasificación por Grado de Desempeño o PG por sus siglas en inglés (Performing Grading) en donde se define un rango de temperaturas de trabajo de los cementos asfálticos. Con el método se simula la condición de envejecimiento que sufre el asfalto cuando las mezclas son sometidas a su elaboración en planta y transporte de la mezcla hasta el sitio de aplicación. Superpave, también es un método volumétrico con la condición de que la mezcla asfáltica alcance un valor de densidad máxima teórica del 96%, junto con la confirmación del ensayo de susceptibilidad, que se ha usado en esta tesis en ambos casos. La ventaja de usar esta metodología radica en el uso del compactador giratorio en el desarrollo de todas las probetas, incluyendo las del diseño de mezcla, de tal manera que se pueda construir una mezcla asfáltica de forma más cercana a la compactación con vibración y amasado que ocurre en la carretera.

Aumento del porcentaje de triturado cerámico para pavimentos asfálticos en vías sin ningún tráfico de vehículos pesados.

Para pavimentaciones de carriles de bicicletas y áreas peatonales, sería posible aprovechar mucho más el residuo cerámico al no tener exigencias de cargas importantes y prevalecer las características superficiales de los pavimentos frente a las estructurales. En este sentido, habría que llevar a cabo ensayos similares sobre mezclas con porcentajes variables de triturado cerámico que, incluso, se aproximaran al 100% para analizar los resultados, aunque siempre habría que mantener un cierto porcentaje para el filler.

Uso de triturado cerámico como aditivo en bases o subbases granulares.

Otra propuesta de investigación es el desarrollo del diseño de bases o subbases granulares con triturado cerámico de tal manera que se contemple conocer los porcentajes de adición y se desarrollen en el laboratorio los respectivos ensayos de módulo resiliente para cuantificar y confirmar la viabilidad de esta opción.

Evaluación financiera y ambiental de Nuevos negocios usando el triturado cerámico en MAC

Revisar el ciclo de vida del material cerámico y realizar un estudio de las posibles alternativas financieras que puede tener una empresa de elaboración de cerámica con relación a la reutilización del residuo, reciclaje y aprovechamiento en mezclas asfálticas

Referencias bibliográficas

- AASHTO. (1993). *Guide for design of pavement structures*. Washington, D.C: AASHTO.
- AASHTO T 312. (2014). *AASHTO T312 Standard Method of Test for Preparing and Determining the Density of Asphalt Mixture Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor*. Chicago, USA: AASHTO.
- AASHTO T324. (2004). *Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) T 324 - 04*. EE.UU: AASHTO.
- AASHTO T342-11. (2015). *Determining Dynamic Modulus Of Hot Mix Asphalt (HMA)*. Estados Unidos: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AENOR UNE-EN 1097-2. (2010, Septiembre). Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación. Madrid, España.
- AENOR UNE-EN 12697-26 . (2006, diciembre). AENOR UNE-EN 12697-26 Rigidez Anexo E. España.
- AENOR UNE-EN 933-1. (2005). *Ensayo de Limpieza* .
- AENOR UNE-EN 933-1. (2012). Ensayo de Impurezas.
- AENOR UNE-EN 933-1. (2020). *Contenido de Impurezas*. Madrid.
- AENOR UNE-EN 933-10. (2012). Ensayo de Granulometría.
- AENOR UNE-EN 933-3. (2012). Ensayo de Índice de Lajas del árido grueso.
- AENOR UNE-EN 933-5. (2012). Ensayo de Angulosidad.
- AENOR UNE-EN 933-8. (2012, Julio). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de Finos. Ensayo del equivalente de arena. Madrid, España.
- Al-Mosawe, H. (2016). *Prediction of permanent deformation in asphalt mixtures*. Nottingham: University of Nottingham.
- Andrzejuk, W., Barnat-Hunek, D., Siddique, R., Zegardło, B., & Grzegorz, Ł. (2018). Application of Recycled Ceramic Aggregates for the Production of Mineral-Asphalt Mixtures. *Materials*, 1-20.
- Arabani, M., & Mirabdolazimi, S. (2011). Experimental investigation of the fatigue behaviour of asphalt concrete mixtures containing waste iron powder. *Materials Science and Engineering A*, 528 810-11).

- Asociación de fabricantes de ladrillos y tejas de la Comunidad Valenciana. (2020, Junio 7). *Gremi de Rajolers de la Comunitat Valenciana*. Retrieved from <https://gremirajolersvalencia.es/fabricacion/>
- Asociación Mundial de la Carretera, PIARC. (2021, Marzo 31). Retrieved from <https://www.piarc.org/es/actividades/Diccionario-Vial-Terminologia-Transporte-Carretera/Diccionario-Terminologia-Traduccion-Definicion-Busqueda-Tema?node=271>
- Asphalt Institute. (2014). MS-2 Asphalt Mix Design Methods. Lexington, Estados Unidos de América.
- Atlassian. (2022, 02 10). *Logistics Capacity Assessment*. Retrieved from <https://dlca.logcluster.org/display/public/DLCA/2.3+Colombia+Red+Carretera#:~:text=Colombia%20cuenta%20con%20una%20red,69.46%25%20a%20la%20red%20terciaria>.
- Barajas, Y., & Pineda, L. (2010). *Comportamiento del Modulo Dinamico de la Mezcla Asfáltica para diferentes fuentes de agregado*. Bucaramanga: Tesis de grado.
- Caro Spinel, S. (2020, Mayo 3). Módulo dinámico de mezclas asfálticas. Bogotá, Colombia.
- Castro-Estevés, J., Quispe-González, R & Colossiό. (2016). *Metodología de cálculo de la temperatura de ruptura de pavimentos sometidos a bajas temperaturas y causas probables de fisuramiento*. Quito, Ecuador.
- Cerámica Italia S.A. (2014). *Manejo de Rotura Cerámica Italia*. San José de Cucuta: Cerámica Italia.
- Clyne, T. R., Li, X., Marasteanu, M. O., & Skok, E. L. (2003). *Dynamic And Resilient Modulus Of Mn/Dot Asphalt Mixtures*. Minnesota. Retrieved April 21, 2016
- Dougan, C., Stephens, J., Mahoney, J., & Hansen, G. (2003). *E* - Dynamic Modulus Test Protocol – Problems and Solutions Report Number CT-SPR-0003084-F-03-3*. Storrs, Connecticut: Connecticut Department of Transportation.
- Ferry, J. (1980). *Viscoelastic Properties of Polymers*. New York: John Wiley.
- Flórez- Vargas, A. O., Sánchez-Molina, J., & Blanco-Meneses, D. S. (2018). Las arcillas de las formaciones geológicas de un área metropolitana, su uso en la industria cerámica e impacto en la economía regional. *Revista EIA*, 15(30), 133-150. doi:<https://doi.org/10.24050/reia.v15i30.1219>
- Flórez Vargas, A., Sánchez Molina, J., & Blanco Meneses, D. (2018). Las arcillas de las formaciones geológicas de un área. *Revista EIA*, 133-150. doi:<https://doi.org/10.24050/reia.v15i30.1219>
- Forigua Orjuela, J. E., & Pedraza Díaz, E. (2014). *Diseño de mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de desperdicios plásticos*. Bogotá: UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.

- García Morales, A. (2015). *Diseno de pavimento asfáltico por el método AASHTO-93*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- García Quesada. (2008). *Tema 3. Viscosidad lineal*. Alicante: Universidad de Alicante.
- Gonzalez Gonzalez, T. A., & Beleño Durán, M. F. (2018, Octubre 14). *REOLOGIA DE ASFALTOS 60/70 MODIFICADOS CON RESIDUO DE CERAMICA*. Retrieved from <http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00002399.pdf>
- Gonzalez, Y. Y., & Duran, L. J. (2010). *COMPORTAMIENTO DEL MODULO DINAMICO DE LA MEZCLA ASFALTICA PARA DIFERENTES FUENTES DE AGREGADO*. BUCARAMANGA. Retrieved 03 31, 2016, from <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2010/133832.pdf>
- Higuera Sandoval , C. (2011). *Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. Teoría, métodos de diseño y ejemplos de aplicación. Vol II*. Tunja, Boyacá, Colombia: Universidad Pedadógica y Tecnológica de Colombia.
- Huang, B., Dong, Q., & Burdette, E. (2009). Laboratory evaluation of incorporating waste ceramic materials into Portland cement and asphaltic concrete. *Construction and Building Materials*, 3451-3456.
- Huang, B., Dong, Q., & Burdette, E. (2009). Laboratory evaluation of incorporating waste ceramic materials into Portland cement and asphaltic concrete. . *Huang, B., Dong, Q., & Burdette, E. G. (2009). Laboratory evaluation of incorpoConstruction and Building Materials*,, 23.
- Huang, Q., Qian, Z., Hu, J., & Zheng, D. (2020). Evaluation of Stone Mastic Asphalt Containing Ceramic Waste Aggregate for Cooling Asphalt Pavement. *Materials Journal*, 1-20.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Huang, Y., Bird , R., & Heidrich , O. (2007). A review of the use of recycled solidwaste materials in asphalt pavements. *Elsevier Resources Conservation and Recycling*, 58-73.
- Huang, Y., Bird, R., & Heidrich, O. (2007). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources Conservation and Recycling*, 58–73.
- I.N.V E-237. (2013). Impurezas en agregado grueso. *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos Colombia*.
- I.N.V E-125 y E-126. (2013). Índice de plasticidad. *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos Colombia*.
- I.N.V E-133. (2013). Equivalente de arena (%) . Colombia.

- I.N.V E-213. (2013). Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino I.N.V E-213. Colombia.
- I.N.V E-218. (2013). Desgaste de la máquina de los ángeles. *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos*. Colombia.
- I.N.V E-222. (2013). Densidad relativa de agregado fino y grueso SH, con su respectivo porcentaje de absorción. *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos*. Colombia.
- I.N.V E-223. (2013). Densidad, densidad relativa (gravedad específica y absorción del agregado grueso. *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos*. Colombia.
- I.N.V E-227. (2013). Ensayo de Caras Fracturadas. Colombia.
- I.N.V E-239. (2013). Angularidad de la fracción fina. *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos* Colombia.
- I.N.V E-702. (2013). Ductilidad, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos* Colombia.
- I.N.V E-707. (2013). Densidad materiales bituminosos sólidos y semisólidos *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos*. Bogotá, Colombia.
- I.N.V E-709. (2013). Punto de Inflamación mediante copa abierta de Cleveland, °C. Colombia.
- I.N.V E-712. (2013). Punto de ablandamiento. *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos* Colombia.
- I.N.V E-717. (2013). Determinación de la Viscosidad del Asfalto empleando un Viscosímetro Rotacional. Bogotá, Distrito Capital, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos* Colombia.
- I.N.V E-724. (2013). Índice de Penetración (I.N.V E-724). *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos* Colombia.
- I.N.V E-725. (2013). Evaluación de la Susceptibilidad al Agua de las Mezclas de Concreto Asfáltico Utilizando la Prueba de Tracción Indirecta. In INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales*

para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos (Primera Parte) (pp. 253-265). Colombia: INVIAS.

- I.N.V E-733. (2013). Gravedad Específica Bulk y Densidad de Mezclas Asfálticas Compactadas No Absorbentes Empleando Especímenes Saturados y Superficialmente Secos. In INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos (Primera Parte)* (pp. 351-358). Colombia: INVIAS.
- I.N.V E-735. (2013). Gravedad Específica Máxima de Mezclas Asfálticas para Pavimentos. In INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos (Primera Parte)* (pp. 369-381). Colombia: INVIAS.
- I.N.V E-736. (2013). Porcentaje de Vacíos con Aire en Mezclas Asfálticas Compactadas Densas y Abiertas. In INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos (Primera Parte)* (pp. 383-387). Colombia: INVIAS.
- I.N.V E-748. (2013). Estabilidad y Flujo de Mezclas Asfálticas en Caliente Empleando el Equipo Marshall. In INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos (Primera Parte)* (pp. 473-492). Colombia: INVIAS.
- I.N.V E-799. (2013). Análisis Volumétrico de Mezclas Asfálticas Compactadas en Caliente. In INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (segunda parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos (Segunda Parte)* (pp. 361-369). Colombia: INVIAS.
- I.N.V. E-220. (2013). Perdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso (%). *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos* Colombia.
- I.N.V. E-224. (2013). Resistencia mecánica por el método del 10% de finos. *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos* Colombia.
- I.N.V. E-238. (2013). Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval. *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos*. Colombia.
- I.N.V. E-240. (2013). Ensayo de Partículas planas y alargadas. *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos*. Colombia.

- I.N.V. E-706. (2013). Ensayo de Penetración. *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos*. Colombia.
- Instituto de Desarrollo Urbano. (2018). Especificaciones Técnicas Generales. *Mezcla asfáltica en caliente con asfalto modificado con caucho por vía húmeda y vía seca*, 625-18, 626-18.
- Instituto Geológico y Minero de España. (1982). *Mapa Geológico de España. Hoja 695 Liria*. Madrid: Ministerio de Ciencia e Innovación. Retrieved from http://info.igme.es/cartografiadigital/datos/Geo50/memorias/d6_PS50/Memoria695_PS50.pdf
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá, Colombia.
- Instituto Nacional de Vías, INVIAS. (2013). *Portal Invias*. Retrieved from www.invias.gov.co
- INV 756-13. (2013). *Resistencia a la Deformación Plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio*.
- INVIAS. (2013). Artículo 410 - Suministro de Cemento Asfáltico. In INVIAS, *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras Capítulo 4 - Pavimentos Asfálticos* (pp. 43-49). Colombia: INVIAS.
- INVIAS. (2013). Artículo E - 213 Análisis Granulométrico de los Agregados Grueso y Fino. In INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Sección 200 - Agregados Pétreos* (pp. 33-43). Colombia: INVIAS.
- INVIAS. (2013). Artículo E - 724 Índice de Penetración de los Cementos Asfálticos. In INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos (Primera Parte)* (pp. 251-252). Colombia: INVIAS.
- INVIAS. (2013). Artículo 450 - Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico). In INVIAS, *Especificaciones generales de construcción de carreteras capítulo 4 - Pavimentos Asfálticos* (pp. 235-281). Colombia: INVIAS.
- INVIAS 749. (2013). *Ensayo de Tensión Indirecta para determinar el Módulo Resiliente de Mezclas Asfálticas*. Retrieved from www.invias.gov.co
- INVIAS 784. (2013). *Determinación de leyes de fatiga de mezclas asfálticas compactadas en caliente sometidas a flexión dinámica*. Retrieved from www.invias.gov.co
- INVIAS-E-745. (2007). *Módulo Dinámico De Mezclas Asfálticas*. Bogotá: Instituto Nacional De Vías.
- Kara, Ç., & Karacasu, M. (2015). Use of Ceramic Wastes in Road Pavement Design. *Proceedings of the World Congress on New Technologies (NewTech 2015)*, (p. 226). Barcelona.

- Kara, Ç., & Karacasu, M. (2017). Investigation of waste ceramic tile additive in hot mix asphalt using fuzzy logic approach. *Construction and Building Materials*, 141.
- Kofteci, S., & Nazary, M. (2018). Experimental study on usability of various construction wastes as fine aggregate in asphalt mixture. *Kofteci, S., & Nazary, M. (2018). Experimental study on usability of various construction wastes as fine aggregate in asphalt mixture. Construction and Building Materials*, 369-379.
- Lasso, E. d., & Marin, L. E. (2010). *INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA, EN LA VARIACION, DEL MODULO DINAMICO DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS COLOMBIANAS*. BUCARAMANGA. Retrieved Abril 21, 2016
- Leiva, F. (2009). *Estudio del Módulo Dinámico complejo de mezclas asfálticas: Desarrollo de curvas maestras 1era Parte*. Universidad de Costa Rica. San José: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME).
- Lifeceram. (2018, Octubre 15). *LIFECERAM*. Retrieved from <http://www.lifeceram.eu/es/the-project/summary.aspx>
- Lobo Guerrero , A. (1987). La Geología de Colombia. *Revista Avante*, 1-8. Retrieved from <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/18905/1187.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Lozano Picón, R. J., & Romero Rueda, M. T. (1993). *Características geomecánicas del granito de Pescadero y su aprovechamiento industrial*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Mantilla Rosas, I. (2012). *Potencial uso de la nanotecnología en la Infraestructura Vial en Colombia*. Bogotá: Proyecto de Grado - Universidad de los Andes. Retrieved 12 21, 2021, from <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/11696/u619185.pdf?sequence=1>
- Martínez Bogado, M. (2011). *Materiales y materias primas. Silicio*. Buenos Aires: Ministerio de Educación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Retrieved from <http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/silicio.pdf>
- Medina, C., Frías, M., & Sánchez de Rojas, M. . (2012). Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 112-118.
- Minambiente. (2017, Noviembre). *La paz está en nuestra naturaleza*. Retrieved from <https://www.cornare.gov.co/memorias/memorias-rcd/Ministerio-de-Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017, Febrero 28). Resolución No. 0472 de 2017 Reglamentación de la gestión integral de los residuos RCD. Bogotá, Distrito Capital, Colombia.

- Ministerio de Fomento, Gobierno de España. (2015, Enero 3). *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)*. Retrieved from https://m.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/7E090150-7354-4F83-8D4E-E4BA2BE70717/141045/PG3_PARTE_5.pdf
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2019, Junio 1). *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes* . Retrieved from <https://www.mitma.gob.es/carreteras/normativa-tecnica/17-pliegos-de-prescripciones-tecnicas-generales>
- Muniandy, R., Ismail, D., & Hassim, S. (2018). Performance of recycled ceramic waste as aggregates in hot mix asphalt (HMA). *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20.
- Norma UNE - EN - 12697 - 8. (2012). *Contenido de Huecos en Mezcla*.
- Norma UNE - EN 12697 - 12. (2019). *Determinación de la sensibilidad al agua de probetas de mezcla bituminosa*. Retrieved from normas@aenor.com
- Norma UNE-EN 12591. (2009). *Betunes y ligantes bituminosos. Especificaciones de betunes para pavimentación*. España: AENOR.
- Norma UNE-EN 1426. (2015). *Betunes y ligantes bituminosos. Determinación de la penetración con aguja*. www.une.org.
- Ortega Angel, German Augusto. (2017). *Descripción del Proceso Productivo de la Planta Industrial de Cerámica Italia*. San José de Cucuta: Cerámica Italia S.A.
- Padilla-Vaca, F., Mendoza-Macías, C. L., Franco, B., Anaya-Velázquez, F., Ponce-Noyola, P., & Flores-Martínez, A. (2018). El mundo micro en el mundo nano: importancia y desarrollo de nanomateriales para el combate de las enfermedades causadas por bacterias, protozoarios y hongos . *Mundo Nano*, 15-28.
- Patel , J., Varia, H., & Mishra, C. (2017). Design of Bituminous Mix with and without Partial Replacement of Waste Ceramic Tiles Material. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4.
- Quintana Rondón, H., Reyes Lizcano, F., & Figueroa Infante, A. (2012). Quintana Rondón, Hugo Alexander, Reyes LEstado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia. *Infraestructura Vial*, 10.
- Rectisol Rectificado de Soleras. (2018, Febrero 18). *rectisol*. Retrieved from <https://www.rectisol.com/>:
<https://www.rectisol.com/documentos/actividades/resistencia-al-derrapaje.pdf>
- Roadtec. (2020, Mayo 22). Pavementinteractive. Washington, Estados Unidos de América. Retrieved from <https://www.pavementinteractive.org/reference-desk/design/mix-design/marshall-mix-design/>

- Romero Flores, P., Bonifaz García, H., & Revelo Corella, M. (2014). *Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente Modificadas con Elastómero (caucho) y Tereftalato de Polietileno reciclados con Ligante Asfáltico AC-20*. Quito: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2015). *Pavimentos: materiales, construcción y diseño*. Bogotá: Macro EIRL.
- Sandoval, C. H., Barrera, G. M., & Acuña, J. F. (2011). Determinación del módulo dinámico de una mezcla asfáltica por correlaciones. *facultad de ingeniería, 20(30)*, 41 -54.
- Servicio Geológico Colombiano. (2016, Agosto). *CATÁLOGO DE UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS DE COLOMBIA*. Retrieved from GRANITO DE PESCADERO Cordillera Oriental, Departamento de Santander: <https://recordcenter.sgc.gov.co/B21/CatalogoGranitodePescadero/Documento/Pdf/CatalogoGranitodePescadero.pdf>
- Shamsaei, M., Khafajeh, R., & Ghasem, H. (2019). Experimental evaluation of ceramic waste as filler in hot mix asphalt. *Clean Technologies and Environmental Policy, 9*.
- Silvestre, R., Medel, E., García, A., & Navas, J. . (2013). Utilizing recycled ceramic aggregates obtained from tile industry in the design of open graded wearing course on both laboratory and in situ basis. *Materials and Design, 471–478*.
- Silvestre, R., Medel, E., García, A., & Navas, J. (2013). Using ceramic wastes from tile industry as a partial substitute of natural aggregates in hot mix asphalt binder courses. *Construction and Building Materials, 115 -122*.
- Subiaga, A. (2016). *El estado del arte de medidas de consistencia de los asfaltos para pavimentacion*. La Plata, Argentina: Tesis de grado.
- Templado Martínez, D., & Meserguer Pardo, J. (1949). *Mapa geológico de España Esc1:50000. Hoja641. Castellón de la Plana*. Madrid: Instituto geológico y minero de España.
- Timothy, C., Xinjun, L., Mihai, M., & Eugene, L. (2003). *Dynamic and Resilient Modulus of Mn/DOT Asphalt Mixtures*. Minnesota: Technical Report Documentation.
- Triana Nigrinis, S. J., & Grandas Castillo, D. D. (2019). *Análisis Comparativo del Comportamiento Mecánico y Dinámico de una Mezcla Asfáltica Convencional y una Modificada con Residuos Cerámicos al 30% Reemplazando Agregados Fino y Grueso y Utilizando Agregado de la Región del Pescadero en una Msc-25*. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana.
- UNE - EN 12697 - 22. (2011). *Deformación plástica mediante el ensayo de pista de laboratorio*.
- UNE-EN 12967-26. (2006). Anexo C: Ensayo de Tracción Indirecta Sobre Probetas Cilíndricas. In AENOR, *MEZCLAS BITUMINOSAS: Métodos de Ensayo para Mezcla Bituminosa en Caliente Parte 26: Rigidez* (pp. 28-36). Madrid, España: AENOR.

- Universidad de Antofagasta. (2015). Producción Limpia: Principios y Herramientas. Chile. Retrieved from http://www.ucipfg.com/Repositorio/MAES/MAES-01/Unidad_2/Cap_2_GesRes.pdf
- UPV. (2021). *Curso de Fundamentos de Ciencia de Materiales*. Retrieved from https://www.upv.es/materiales/Fcm/Indice_FCM.html
- Vías, I. N. (2012). Determinación de las leyes de fatiga de mezclas asálticas compactas en caliente sometidas a flexión dinámica. In *I.N.V.E 784-07*.
- Villacorta, I. F. (2003). *ESTUDIO DEL MÓDULO DINÁMICO COMPLEJO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DESARROLLO DE CURVAS MAESTRAS.1RA PARTE*. COSTA RICA. Retrieved April 21, 2016, from <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/autores/leiva/leiva-03.pdf>
- Wan, J., Xiao, Y., Liu, Q., & Schlangen, E. (2016). Characteristics of ceramic fiber modified asphalt mortar. *Materials*, 9.
- Ward, D., Goldsmith, R., Cruz B., J., & Restrepo A, H. (1973). *Boletín Geológico*. Retrieved Diciembre 17, 2021, from Geología de los Cuadrangulos H12 Bucaramanga y H13 Pamplona: <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/boletingeo/issue/view/68/Bol21>
- Witczak, M., & Bari, J. (2004). *DEVELOPMENT OF A MASTER CURVE (E*) DATABASE FOR LIME MODIFIED ASPHALTIC MIXTURES*. Arizona: Arizona State University Research Project.
- World Bank Group. (2018). *What a Waste 2.0*. Retrieved from www.worldbank.org: <https://openknowledge.worldbank.org/>
- Yang, H. (2004). *Pavement Analysis Design*. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall.

A continuación, se presentan las acciones de visibilización científica relacionadas con el desarrollo de la presente Tesis Doctoral.

Publicaciones en revistas indexadas

Residuos cerámicos en mezclas asfálticas semidensas: alternativas para caminos de bajo tráfico en países en vía de desarrollo, Revista Lamsápkos, Núm. 26, Medellín, **ISSN (En línea): 2145-4086**, 2022. (Aceptado y pendiente de publicación en <https://www.funlam.edu.co/revistas/index.php/lampsakos/>).

Autores: Norma Cristina Solarte, María Fernanda Serrano, Alfredo García García, y Carlos Alonso Troyano

Participaciones en congresos internacionales

Título de la Ponencia 1: Ceramic waste, the new materials for Asphalt Mixtures.

Ciudad, País y fecha del evento: Chicago, Estados Unidos, 21 al 24 de julio 2019.

Nombre del evento: International Airfield & Highway Pavements Conference.

Organizadores: Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles, ASCE.

Autores: Norma Cristina Solarte, Luz Marina Torrado, María Fernanda Serrano, Alfredo García García, y Carlos Alonso Troyano.

Título de la Ponencia 2: Feasibility of ceramic waste in asphalt mix.

Nombre del evento: 1st International Seminar on Physical Infrastructure.

Ciudad, País y fecha del evento: Cúcuta, Colombia, 13 al 15 de octubre 2021.

Organizadores: Foundation of Researchers in Science and Technology of Materials, Universidad Francisco de Paula Santander, Institute of Physics (IOP) .

Autores: Jorge Iván Arias Flórez, Norma Cristina Solarte Vanegas, Alfredo García García, y María Fernanda Serrano Guzmán.

Participaciones en congresos nacionales

Título de la Ponencia 1: Residuo Cerámico en la Ingeniería de los Pavimentos.

Nombre del evento: Encuentro Internacional de la Arcilla, la Cerámica y la Construcción – EIAC.

Ciudad, País y fecha del evento: Cúcuta, Colombia, 21 y 22 de octubre de 2021, ISSN 2665-3494.

Organizadores: Clúster de la construcción de la Cámara de Comercio de Cúcuta, el Centro de Investigación de Materiales Cerámicos de la Universidad Francisco de Paula Santander, Cámara Regional de la Construcción, CAMACOL Cúcuta y Nororiente, y la Asociación de Industriales de la Arcilla de Norte de Santander INDUARCILLA.

Autores: Jorge Iván Arias Flórez, Norma Cristina Solarte Vanegas, Alfredo García García, y María Fernanda Serrano Guzmán.

Título de la Ponencia 2: Cerámica Residual en Carreteras.

Nombre del evento: 2do Congreso Internacional de Ingeniería Civil.

Ciudad, País y fecha del evento: Bucaramanga, Colombia, 13 al 16 de octubre de 2021.

Organizadores: Universidad Pontificia Bolivariana.

Autores: Jorge Iván Arias Flórez, Norma Cristina Solarte Vanegas, Alfredo García García, y María Fernanda Serrano Guzmán.

Título de la Ponencia 3: Aplicación de residuos industriales en Geotecnia y Pavimentos.

Nombre del evento: XVIII Jornada Técnica de Ingeniería Civil. Tercer Simposio Innovar Para Crecer.

Ciudad, País y fecha del evento: Bucaramanga, Colombia, 17 al 20 de octubre de 2018.

Organizadores: Universidad Pontificia Bolivariana.

Autores: Luz Marina Torrado Gómez, Norma Cristina Solarte Vanegas, Emilio González, y José Alberto Rondón.

Estancias de Investigación

Estancia de Investigación, por seis (6) meses, entre septiembre de 2018 y mayo de 2019 en la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga.