

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL



**TESIS DOCTORAL**

**ESTUDIO DE SUPERFICIES URBANAS  
MULTIFUNCIONALES DE HORMIGÓN POROSO**

**PHD THESIS**

**STUDY OF POROUS CONCRETE  
MULTIFUNCTIONAL URBAN SURFACES**

Realizada por: EDUARDO JAVIER ELIZONDO MARTÍNEZ

Dirigida por: Dr. JORGE RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ  
Dra. ALEXANDRA OSSA LÓPEZ

Escuela de Doctorado de la Universidad de Cantabria

**Santander 2020**







## **DEDICATORIAS**

Esta tesis está dedicada a Silvia Marsotto y a mis padres, Eduardo Javier Elizondo Rivera y Bertha Alicia Martínez Pablos.



## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al Dr. Daniel Castro Fresno, director del Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO) por darme la oportunidad y la confianza de iniciar mi carrera investigadora en el grupo, a pesar de las dificultades presentadas.

De igual manera, agradecer a mis directores de tesis, los doctores Jorge Rodríguez Hernández y Alexandra Ossa López, por la confianza depositada en mí y por todo el apoyo recibido por su parte, tanto profesional como personal, para lograr concretar la presente tesis doctoral.

Gracias al Grupo de Caminos de Santander de la Universidad de Cantabria por su apoyo al permitirme el uso de las instalaciones del Laboratorio de Caminos y Aeropuertos durante la realización de gran parte de la investigación de la presente tesis doctoral.

Un agradecimiento a las empresas Grupo Cementos Portland Valderribas y BASF Construction Chemicals España S.L. por proveer los materiales empleados para el desarrollo de esta tesis doctoral.

Gracias al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por recibirme en la realización de una estancia pre-doctoral. Un agradecimiento a mis compañeros, técnicos y supervisores de la estancia, por su apoyo y amistad.

También, un agradecimiento al Departamento de Ingeniería Civil, Química, Ambiental y de Materiales (DICAM), de la Universidad de Bolonia, Italia, por recibirme en una segunda estancia pre-doctoral. En especial, gracias al Dr. Cesare Sangiorgi por aceptarme, aconsejarme y supervisarme durante la estancia, y gracias a mis compañeros y técnicos del lugar, por su amistad y ayuda cuando lo necesité.

Muchas gracias a mis amigos, en especial a Roberto Gonzalez Preciado, por tus consejos y por estar al pendiente de mi trabajo, también por tu hospitalidad en Ciudad de México cuando fui a realizar mi estancia pre-doctoral. A José Antonio Amavizca López,

por tu apoyo y ayuda cuando presenté dudas o necesidad de información para la realización de la tesis. Gracias a los dos por su amistad.

Muchas gracias a mis compañeros de GITECO de la Universidad de Cantabria. Gracias por su amistad, apoyo, consejos y ayuda. Sin ustedes este camino hubiera sido muy complicado.

Finalmente, un fuerte agradecimiento a mi familia, en especial a mis padres, Eduardo Javier Elizondo Rivera y Bertha Alicia Martínez Pablos, y a Silvia Marsotto. Por su apoyo incondicional desde el inicio de esta etapa de mi vida. Solo ustedes saben el gran sacrificio y esfuerzo que representó. Esta tesis es de ustedes también.



## ACKNOWLEDGEMENTS

I want to thank Dr. Daniel Castro Fresno, director of the Construction Technology Research Group (GITECO) for giving me the opportunity and confidence to start my research career in the group, despite the initial difficulties.

At the same time, thank you to my thesis supervisors, doctors Jorge Rodríguez Hernández and Alexandra Ossa López, for their trust and support received from them, both professionally and personally, to achieve the present doctoral thesis.

Thank you to the Caminos de Santander Group of the University of Cantabria for their support in the use of the Caminos y Aeropuertos Laboratory facilities during most part of the research in the present doctoral thesis.

Thank you to the companies Grupo Cementos Portland Valderribas and BASF Construction Chemicals España S.L. for providing the materials used for the development of the present doctoral thesis.

Thank you to the Engineering Institute of the National Autonomous University of Mexico (UNAM) for accepting me during my pre-doctoral secondment. Thanks to my partners, technicians and supervisors for your support and friendship.

Also, thank you to the Civil Engineering, Chemistry, Environment and Materials Department (DICAM) of the University of Bologna, Italy, for receiving me in a second pre-doctoral research stay. Especially thanks to Dr. Cesare Sangiorgi for accepting me, his advice and supervision during the stay, and thanks to my mates and technicians for your friendship and support when needed.

Thank you to my friends, especially to Roberto Gonzalez Preciado, for your advice and interest in my work, and for your hospitality in Mexico City during my pre-doctoral secondment. To José Antonio Amavizca López, for your help and support when having doubts or in the need for information for the thesis. Thanks both of you for your friendship.

A special thank you to my mates at GITECO from the University of Cantabria. Thanks for your friendship, support, advice and help. Without you this path would have been very difficult.

Finally, a big thank you to my family, especially my parents, Eduardo Javier Elizondo Rivera and Bertha Alicia Martínez Pablos, and Silvia Marsotto. For your unconditional support from the beginning of this stage of my life. Only you know the sacrifice and effort this represented. This thesis is also yours.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

Dedicatorias.....	I
Agradecimientos.....	III
Acknowledgements.....	V
Índice de Contenidos.....	VII
Índice de Figuras.....	XV
Índice de Tablas.....	XXIII
Notas y Acrónimos.....	XXIX
Resumen.....	XXXI
Abstract.....	XXXIII
Abstract (Italiano).....	XXXV
Capítulo I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Marco de la Tesis.....	2
1.1.1. Antecedentes y Motivación.....	2
1.1.2. Justificación.....	5
1.1.3. Estructura del documento.....	6
1.2. Objetivos e Hipótesis.....	8
1.2.1. Objetivos Generales.....	8
1.2.2. Objetivos Particulares.....	8
1.3. Conceptos fundamentales.....	9
1.3.1. Desarrollo Urbano.....	11
1.3.2. Desarrollo Sostenible.....	12
1.3.3. Cambio Climático.....	13
1.3.4. Resiliencia Urbana.....	15
1.3.5. Drenaje Sostenible.....	16
1.4. El drenaje sostenible en el mundo.....	18
1.4.1. Estados Unidos.....	18
1.4.2. Europa.....	20
1.4.3. Iberoamérica.....	22
1.4.3.1. España.....	22
1.4.3.2. México.....	24

1.4.3.3. Colombia .....	26
1.4.3.4. Brasil .....	27
1.4.3.5. Chile .....	28
Capítulo II. ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE.....	31
2.1. Firmes permeables.....	32
2.1.1. Definición .....	32
2.1.2. Clasificación .....	32
2.1.3. Ventajas .....	33
2.2. Hormigón Poroso .....	33
2.2.1. Definición .....	33
2.2.2. Componentes .....	35
2.2.2.1. Agregados.....	35
2.2.2.2. Cemento y Agua.....	36
2.2.2.3. Aditivos y Adiciones .....	38
2.2.3. Compactación de pavimentos de hormigón poroso .....	42
2.2.4. Relación entre porosidad y resistencia .....	43
2.2.5. Mantenimiento y Reparación .....	45
2.2.6. Alternativas al hormigón poroso – Geopolímeros .....	48
2.3. Característica funcionales básicas .....	49
2.3.1. Propiedades hidráulicas .....	50
2.3.2. Propiedades mecánicas.....	53
2.3.3. Propiedades superficiales .....	55
2.4. Características ambientales adicionales .....	58
2.4.1. Absorción del sonido.....	58
2.4.2. Purificación del aire.....	60
2.4.3. Mitigación de la temperatura.....	63
Capítulo III. METODOLOGÍA.....	67
3.1. Componentes principales .....	68
3.1.1. Agregados.....	68
3.1.2. Cemento.....	70
3.2. Metodologías de dosificación de hormigón poroso .....	71
3.2.1. ACI 211.3R-02 .....	72
3.2.2. ACI 522R-10 .....	73

3.2.3. Metodología de Dosificación para Concreto Poroso (PCD) .....	75
3.3. Estudio Económico.....	76
3.3.1. Identificación de los componentes del hormigón y de su proceso constructivo	77
3.3.2. Determinación de los rendimientos de los componentes del hormigón .....	77
3.3.3. Obtención de los precios de los materiales que conforman el hormigón .....	77
3.3.4. Determinación del costo de mano de obra .....	78
3.3.5. Cálculo del costo del Seguro Social .....	78
3.3.6. Cálculo del costo administrativo de la empresa (Costos Indirectos).....	78
3.3.7. Determinación del costo de los sistemas evaluados .....	79
3.3.8. Adición del costo administrativo.....	79
3.3.9. Adición de la utilidad propuesta.....	79
3.3.10. Comparación de los costos de los sistemas .....	79
3.4. Aditivos empleados .....	80
3.4.1. Fibras de acero al carbono.....	82
3.4.2. Fibras de polipropileno.....	82
3.4.3. Inclusor de Aire .....	82
3.4.4. Microsílice.....	83
3.4.5. Suspensión de nanosílice.....	83
3.4.6. Superplastificante (Reductor de agua) .....	84
3.4.7. Modulador de viscosidad.....	84
3.4.8. Retardante.....	84
3.4.9. Dióxido de Titanio (TiO <sub>2</sub> ) .....	85
3.5. Métodos de compactación .....	85
3.5.1. Compactación por compresión axial .....	86
3.5.2. Compactación giratoria .....	88
3.5.3. Compactación por impacto (Marshall).....	90
3.5.4. Compactación seccionada (Proctor estándar).....	91
3.5.5. Varilla de apisonamiento.....	92
3.6. Ensayos hidráulicos .....	93
3.6.1. Porosidad .....	93
3.6.2. Permeabilidad .....	94
3.6.3. Imágenes por Resonancia Magnética .....	97
3.7. Ensayos mecánicos.....	99

3.7.1. Tracción Indirecta.....	99
3.7.2. Compresión Axial.....	101
3.7.3. Módulo de Rigidez .....	103
3.8. Ensayos superficiales .....	104
3.8.1. Resistencia al Deslizamiento (Ensayo del Péndulo) .....	104
3.8.2. Círculo de Arena .....	105
3.8.3. Medición de la absorción del sonido .....	106
3.9. Estudio de geopolímeros .....	107
3.9.1. Metacaolín .....	107
3.9.2. Líquido reactivo .....	108
3.10. Análisis Estadístico .....	108
3.10.1. Diseño de Experimentos (DOE) – Superficie de Respuesta .....	108
3.10.2. Análisis de la Varianza (ANOVA).....	110
3.11. Análisis Multi-criterio .....	112
3.11.1. Proceso Analítico Jerárquico (AHP) .....	112
3.11.2. Método AHP con lógica difusa y cuestionario.....	113
3.11.3. Proceso Analítico en Red (ANP).....	116
3.11.4. Técnica para el Orden de Preferencia por Similitud con la Solución Ideal (TOPSIS) .....	118
3.11.5. Evaluación de Producto de Suma Agregada Ponderada (WASPAS).....	119
3.11.6. Método de Organización de la Clasificación de Preferencias para el Enriquecimiento de las Evaluaciones (PROMETHEE II) .....	120
Capítulo IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	123
4.1. Comparación de métodos de dosificación.....	124
4.1.1. Comparativa entre porcentajes de componentes .....	124
4.1.2. Dosificaciones estudiadas.....	126
4.1.3. Resultados generales .....	126
4.1.4. Análisis de resultados de Porosidad y Permeabilidad .....	127
4.1.5. Análisis de resultados Mecánicos.....	129
4.1.6. Análisis de resultados Superficiales .....	131
4.1.7. Conclusiones Parciales .....	132
4.2. Estudio económico .....	133
4.2.1. Comparativa entre la metodología ACI 522R-10 y la metodología PCD .....	133

4.2.2. Comparativa entre hormigón convencional, metodología PCD y asfalto .....	134
4.3. Determinación de la dosificación óptima sin aditivos.....	143
4.3.1. Dosificaciones estudiadas.....	143
4.3.2. Resultados generales .....	145
4.3.3. Análisis de resultados de Porosidad y Permeabilidad .....	146
4.3.4. Análisis de resultados Mecánicos.....	147
4.3.5. Análisis de la Fuerza a Compresión Teórica (FCT).....	150
4.3.6. Análisis de resultados Superficiales .....	151
4.3.7. Análisis de la Varianza (ANOVA).....	152
4.3.8. Conclusiones Parciales .....	154
4.4. Estudio de aditivos y adiciones .....	156
4.4.1. Dosificaciones estudiadas.....	156
4.4.2. Estudio de aditivos y adiciones por separado.....	158
4.4.2.1. Resultados generales .....	158
4.4.2.2. Análisis de resultados de Porosidad y Permeabilidad .....	160
4.4.2.3. Análisis de resultados Mecánicos.....	161
4.4.2.4. Análisis de la Varianza (ANOVA).....	163
4.4.2.5. Conclusiones Parciales .....	164
4.4.3. Estudio de combinaciones de aditivos.....	165
4.4.3.1. Resultados generales .....	165
4.4.3.2. Análisis de resultados de Porosidad y Permeabilidad .....	165
4.4.3.3. Análisis de resultados Mecánicos.....	167
4.4.3.4. Análisis de resultados Superficiales .....	168
4.4.3.5. Conclusiones Parciales .....	169
4.4.4. Mezclas con dióxido de titanio (TiO <sub>2</sub> ) .....	171
4.4.4.1. Dosificaciones estudiadas.....	171
4.4.4.2. Resultados generales .....	173
4.4.4.3. Análisis de resultados de Porosidad y Permeabilidad .....	173
4.4.4.4. Análisis de resultados Mecánicos.....	174
4.4.4.5. Conclusiones Parciales .....	175
4.5. Influencia de la compactación en mezclas de hormigón poroso .....	177
4.5.1. Dosificaciones estudiadas.....	177
4.5.2. Estandarización de esfuerzos de compactación.....	177

4.5.3. Resultados generales .....	179
4.5.4. Análisis de resultados de Porosidad y Permeabilidad .....	179
4.5.5. Análisis de resultados Mecánicos.....	182
4.5.6. Análisis de la Varianza (ANOVA).....	183
4.5.7. Conclusiones Parciales .....	184
4.6. Absorción del sonido con distintos agregados .....	186
4.6.1. Dosificaciones estudiadas.....	186
4.6.2. Resultados generales .....	187
4.6.3. Análisis de resultados de Porosidad y Permeabilidad .....	187
4.6.4. Análisis de imágenes por Resonancia Magnética .....	188
4.6.5. Análisis de resultados Mecánicos.....	191
4.6.6. Análisis de resultados Superficiales .....	192
4.6.7. Análisis de resultados de Absorción del Sonido .....	193
4.6.8. Conclusiones Parciales .....	195
4.7. Estudio de geopolímeros .....	197
4.7.1. Trabajabilidad de los geopolímeros .....	197
4.7.1.1. Determinación de la porosidad y huecos en el agregado mineral a utilizar .....	197
4.7.1.2. Caracterización del mortero de geopolímeros .....	199
4.7.2. Dosificaciones estudiadas.....	200
4.7.3. Resultados generales .....	201
4.7.4. Análisis de resultados de Porosidad y Permeabilidad .....	202
4.7.5. Análisis de resultados Mecánicos.....	203
4.7.6. Conclusiones Parciales .....	203
4.8. Análisis multi-criterio.....	205
4.8.1. Análisis de cuestionarios para ponderación de criterios .....	205
4.8.2. Comparación de métodos de dosificación.....	208
4.8.3. Determinación de la dosificación óptima sin aditivos.....	210
4.8.4. Estudio de aditivos por separado .....	213
4.8.5. Estudio de combinaciones de aditivos.....	216
4.8.6. Mezclas con dióxido de titanio (TiO <sub>2</sub> ) .....	219
4.8.7. Influencia de la compactación en mezclas de hormigón poroso .....	219
4.8.8. Absorción del sonido con distintos agregados .....	221



4.8.9. Estudio de geopolímeros .....	223
4.8.10. Conclusiones Parciales .....	224
4.9. Parámetros óptimos para el diseño de pavimentos de hormigón poroso .....	229
4.9.1. Criterios y requerimientos de desempeño de mezclas de hormigón poroso ....	229
4.9.2. Propuesta de pavimento multifuncional de hormigón poroso .....	230
Capítulo V. CONCLUSIONES .....	233
5.1. Conclusiones particulares .....	234
5.1.1. Comparación de métodos de dosificación y estudio económico .....	234
5.1.2. Determinación de la dosificación óptima sin aditivos .....	235
5.1.3. Estudio de aditivos y adiciones .....	235
5.1.4. Influencia de la compactación en mezclas de hormigón poroso .....	236
5.1.5. Absorción del sonido con distintos agregados .....	237
5.1.6. Estudio de geopolímeros .....	237
5.1.7. Análisis multi-criterio .....	238
5.2. Conclusiones generales .....	239
5.3. Recomendaciones .....	242
5.4. Futuras líneas de investigación .....	243
Extended abstract .....	247
Document Structure .....	248
Conclusions .....	249
Referencias .....	261
Anexos .....	293
Anexo 2: Fichas técnicas del cemento empleado .....	293
Anexo 2: Proceso de elaboración de mezclas de hormigón poroso .....	299
Anexo 3: Fichas técnicas de los aditivos empleados .....	306
A) Superplastificante – MasterEase 3850 BASF .....	306
B) Suspensión de nanosílice – MasterRoc MS 685 BASF .....	309
C) Fibras de acero al carbono – MasterFiber 482 BASF .....	312
D) Fibras de polipropileno – MasterFiber 248 BASF .....	315
E) Modulador de viscosidad – MasterMatrix 175 BASF .....	319
F) Microsílice – MasterRoc MS 610 BASF .....	321
G) Retardante – MasterSet R111 BASF .....	323
H) Inclusor de aire – MasterAir 169 BASF .....	326

Anexo 4: Ficha técnica del Dióxido de Titanio empleado .....	329
Anexo 5: Ficha técnica del Metacaolín empleado.....	331

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Reparto de escorrentía e infiltración en un entorno Rural y Urbano. Fuente: (Rodríguez-Bayon et al. 2011)</i> .....	3
Figura 2. <i>Organigrama de los conceptos fundamentales que constituyen el propósito de la presente tesis de investigación. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	10
Figura 3. <i>Ejemplo de una instalación para captación de agua de lluvia en el estacionamiento de un supermercado en los Estados Unidos. Fuente: Annette Lucas. Departamento de Calidad Ambiental de Carolina del Norte.</i> .....	20
Figura 4. <i>Estacionamiento experimental “Las Llamas” en Santander, España, donde se estudia la permeabilidad de distintos tipos de pavimentos porosos. Fuente: Dr. Jorge Rodríguez Hernández. Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO) de la Universidad de Cantabria.</i> .....	22
Figura 5. <i>Parque de las Llamas, en Santander, España. Con el humedal artificial visto de frente. Fuente: <a href="http://es.wikipedia.org/wiki/Parque_de_la_vaguada_de_las_Llamas#mediaviewer/File:Parque_de_la_Vaguada_de_las_Llamas_2.JPG">http://es.wikipedia.org/wiki/Parque_de_la_vaguada_de_las_Llamas#mediaviewer/File:Parque_de_la_Vaguada_de_las_Llamas_2.JPG</a>.</i> .....	24
Figura 6. <i>Planta Piloto tipo Humedal Artificial de Flujo Combinado UNAM- UAM-X. Fuente: <a href="http://sabersinfin.blogspot.com/2007/10/inauguraron-hoy-unam-y-uam-x-una-planta.html">http://sabersinfin.blogspot.com/2007/10/inauguraron-hoy-unam-y-uam-x-una-planta.html</a></i> .....	25
Figura 7. <i>Contaminantes en la escorrentía y su procedencia. Fuente: Elaboración propia de (Ball, Jenks, and Aubourg 1998)</i> .....	46
Figura 8. <i>Esquema de un sistema de infiltración de un pavimento de hormigón poroso. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	51
Figura 9. <i>Esquema de distribución de cargas de un pavimento de hormigón poroso. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	54
Figura 10. <i>Esquema de la capacidad de resistir el deslizamiento de un pavimento de hormigón poroso. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	56
Figura 11. <i>Esquema de la absorción del sonido de un pavimento de hormigón convencional, contra un pavimento de hormigón poroso. Fuente: Elaboración propia.</i> ....	58
Figura 12. <i>Esquema de degradación de contaminantes del aire de un pavimento de hormigón poroso con capacidad fotocatalítica. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	61
Figura 13. <i>Esquema de la reflexión solar de un pavimento de hormigón poroso. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	64

Figura 14. <i>Curvas Granulométricas empleadas con los distintos agregados para la elaboración de mezclas de hormigón poroso. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	70
Figura 15. <i>Relación entre el contenido de vacíos y la pasta de cemento para agregado grueso del número 8 (aproximadamente 2.4-9.5mm). Fuente: Comité 211 American Concrete Institute ACI, 2002 (disponible en acceso abierto).</i> .....	74
Figura 16. <i>Diagrama de los métodos de compactación analizados (Fuente: elaboración propia).</i> .....	86
Figura 17. <i>Prensa mecánica utilizada para compactar las mezclas con ofita, por compresión axial (presión) (Fuente: elaboración propia).</i> .....	87
Figura 18. <i>Prensa mecánica utilizada para compactar las mezclas con basalto, por compresión axial (presión) (Fuente: elaboración propia).</i> .....	88
Figura 19. <i>Compactador giratorio para la compactación de mezclas de hormigón poroso (Fuente: elaboración propia).</i> .....	89
Figura 20. <i>Compactador Marshall para compactación de muestras de hormigón poroso (Fuente: elaboración propia).</i> .....	90
Figura 21. <i>Compactador Proctor para compactación de mezclas de hormigón poroso (Fuente: elaboración propia).</i> .....	92
Figura 22. <i>Varilla de apisonamiento para compactación de mezclas de hormigón poroso (Fuente: elaboración propia).</i> .....	93
Figura 23. <i>Permeámetro LCS (Laboratorio de Caminos de Santander) (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	94
Figura 24. <i>Empleo del permeámetro Laboratorio de Caminos de Santander (LCS) en baldosas de hormigón poroso en laboratorio (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	95
Figura 25. <i>Esquema del permeámetro Laboratorio de Caminos de Santander (LCS) adaptado para muestras Marshall (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	96
Figura 26. <i>Cámara para remoción del aire, y saturación de las probetas antes de someterlas a resonancia magnética (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	97
Figura 27. <i>Equipo utilizado para la toma de imágenes por resonancia magnética (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	98
Figura 28. <i>Interfaz del software ARTS para análisis de imágenes por resonancia magnética (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	99
Figura 29. <i>Esquema del ensayo a Tracción Indirecta (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	100

Figura 30. <i>Equipo utilizado para el ensayo a Tracción Indirecta (Fuente: Elaboración propia)</i> . .....	100
Figura 31. <i>Rotura de una probeta de hormigón poroso mediante el ensayo de Tracción Indirecta (Fuente: Elaboración propia)</i> . .....	101
Figura 32. <i>Equipo utilizado para cortar las probetas de hormigón poroso de forma cúbica (Fuente: Elaboración propia)</i> . .....	101
Figura 33. <i>Equipo utilizado para el ensayo a compresión de las probetas cúbicas (Fuente: Elaboración propia)</i> . .....	102
Figura 34. <i>Equipo utilizado en el ensayo de Módulo de rigidez (Fuente: Elaboración propia)</i> . .....	103
Figura 35. <i>Equipo utilizado en el ensayo del Péndulo para la fricción de superficies (Fuente: Elaboración propia)</i> . .....	105
Figura 36. <i>Equipo utilizado en el ensayo del círculo de arena (Fuente: Elaboración propia)</i> . .....	105
Figura 37. <i>Tubo de impedancia para la medición de absorción del sonido en probetas de hormigón poroso. (Fuente: Khankhaje et al. 2017)</i> .....	106
Figura 38. <i>Creación de un diseño de Superficie de Respuesta en el software Minitab (Fuente: Elaboración propia)</i> . .....	109
Figura 39. <i>Demostración de los factores continuos y categóricos en el software Minitab (Fuente: Elaboración propia)</i> . .....	109
Figura 40. <i>Introducción de factores en el software Minitab (Fuente: Elaboración propia)</i> . .....	110
Figura 41. <i>Diagrama de la función de pertenencia triangular difusa, donde el valor de importancia se divide en tres valores: uno bajo (l), uno medio (m) y uno alto (u), para un análisis más preciso. (Fuente: Elaboración propia)</i> . .....	114
Figura 42. <i>Ejemplo de pregunta para la obtención de pesos de las variables de estudio en el análisis multi-criterio (Fuente: Elaboración propia)</i> . .....	116
Figura 43. <i>Diagrama de comparación de dosificaciones entre las metodologías ACI 522R-10 y ACI 211.3R-02, donde se aprecian los diferentes porcentajes de cada componente de la mezcla de hormigón poroso para una relación de arena-cemento (s/c) de 0.00, 0.50, y 1.00 (Fuente: Elaboración propia)</i> . .....	124
Figura 44. <i>Diagrama de comparación de dosificaciones entre las metodologías ACI 522R-10 y Diseño de Hormigón Poroso (PCD), donde se aprecian los diferentes porcentajes de</i>	

*cada componente de la mezcla de hormigón poroso para una relación de arena-cemento (s/c) de 0.00, 0.50, y 1.00 (Fuente: Elaboración propia)..... 125*

*Figura 45. PCD vs ACI 522R-10. Gráfico correlación entre los resultados de permeabilidad (k) y volumen de huecos (AV) (Fuente: Elaboración propia)..... 129*

*Figura 46. PCD vs ACI 522R-10. Gráfico correlación entre los resultados de tracción indirecta (TI) y volumen de huecos (AV) (Fuente: Elaboración propia). ..... 130*

*Figura 47. PCD vs ACI 522R-10. Gráfico correlación entre los resultados de fuerza a compresión (FC) y volumen de huecos (AV) (Fuente: Elaboración propia). ..... 131*

*Figura 48. Esquema de comparación para la elaboración de mezclas de hormigón poroso con diferentes dosificaciones (Fuente: Elaboración propia). ..... 143*

*Figura 49. Diferentes dosificaciones con la metodología PCD. Gráfico de correlación entre la permeabilidad (k) y el contenido de huecos (AV) para cada tamaño de agregado. (Fuente: Elaboración propia). ..... 146*

*Figura 50. Diferentes dosificaciones con la metodología PCD. Gráfico de correlación entre el tamaño de agregado y y los resultados para cada ensayo realizado (Fuente: Elaboración propia). ..... 147*

*Figura 51. Diferentes dosificaciones con la metodología PCD. Gráfico de correlación entre la fuerza a compresión (FC) y la tracción indirecta (TI) (Fuente: Elaboración propia).. 149*

*Figura 52. Diferentes dosificaciones con la metodología PCD. Gráfico de correlación entre el módulo de rigidez (MR) y el contenido de huecos (AV) (Fuente: Elaboración propia). 150*

*Figura 53. Diferentes dosificaciones con la metodología PCD. Gráfico de correlación entre la fuerza a compresión (FC) y la fuerza a compresión teórica (FCT) derivada de las ecuaciones propuestas por algunos autores (Fuente: Elaboración propia)..... 151*

*Figura 54. Diferentes dosificaciones con la metodología PCD. Gráfico de correlación entre el coeficiente de resistencia al deslizamiento bajo condiciones secas ( $CRD_{seco}$ ) y el coeficiente de resistencia al deslizamiento bajo condiciones húmedas ( $CRD_{húmedo}$ ) (Fuente: Elaboración propia). ..... 152*

*Figura 55. Estudio de aditivos por separado. Gráfico de correlación entre la permeabilidad (k) y el volumen de huecos (AV) para cada aditivo analizado (Fuente: Elaboración propia). ..... 160*

*Figura 56. Estudio de aditivos por separado. Gráfico de correlación entre la permeabilidad (k) y la densidad ( $\rho$ ) para cada aditivo analizado (Fuente: Elaboración propia). ..... 161*

*Figura 57. Estudio de aditivos por separado. Gráfico de correlación entre la tracción indirecta (TI) y el volumen de huecos (AV) para cada aditivo analizado (Fuente: Elaboración propia). ..... 162*

Figura 58. Estudio de aditivos por separado. Gráfico de correlación entre la tracción indirecta (TI) y la densidad ( $\rho$ ) para cada aditivo analizado (Fuente: Elaboración propia).	163
Figura 59. Estudio de combinaciones de aditivos. Gráfico de correlación entre la permeabilidad ( $k$ ) y el volumen de huecos (AV) de las mezclas con combinaciones de aditivos (Fuente: Elaboración propia).	166
Figura 60. Estudio de combinaciones de aditivos. Gráfico de correlación entre la tracción indirecta (TI) y el volumen de huecos (AV) de las mezclas con combinaciones de aditivos (Fuente: Elaboración propia).	167
Figura 61. Estudio de combinaciones de aditivos. Gráfico de correlación entre el coeficiente de resistencia al deslizamiento bajo condiciones secas ( $CRD_{seco}$ ) y el coeficiente de resistencia al deslizamiento bajo condiciones húmedas ( $CRD_{húmedo}$ ) de las mezclas con combinaciones de aditivos (Fuente: Elaboración propia).	168
Figura 62. Estudio de combinaciones de aditivos. Gráfico del espesor de la macrotextura de las mezclas con combinaciones de aditivos (Fuente: Elaboración propia).	169
Figura 63. Eficiencia fotocatalítica. Aplicación de los diferentes métodos con $TiO_2$ en la superficie de las probetas de hormigón poroso para el ensayo de eficiencia fotocatalítica (Fuente: Elaboración propia).	172
Figura 64. Eficiencia fotocatalítica. Resultados de permeabilidad ( $k$ ) y volumen de huecos (AV) de las mezclas con aditivo fotocatalítico $TiO_2$ para el ensayo de eficiencia fotocatalítica (Fuente: Elaboración propia).	174
Figura 65. Eficiencia fotocatalítica. Resultados de tracción indirecta (TI) y contenido de huecos (AV) de las mezclas con aditivo fotocatalítico $TiO_2$ para el ensayo de eficiencia fotocatalítica (Fuente: Elaboración propia).	175
Figura 66. Estudio de métodos de compactación. Ejemplo de una probeta compactada por el método seccionado (Proctor estandar) con la superficie dispereja (Fuente: Elaboración propia).	180
Figura 67. Estudio de métodos de compactación. Correlación entre el esfuerzo de compactación y la permeabilidad ( $k$ ) y volumen de huecos (AV) para cada método de compactación evaluado (Fuente: Elaboración propia).	181
Figura 68. Estudio de métodos de compactación. Correlación entre el esfuerzo de compactación y la tracción indirecta (TI) y la densidad ( $\rho$ ) para cada método de compactación evaluado (Fuente: Elaboración propia).	182
Figura 69. Medición de la absorción del sonido. Gráfico de correlación entre la permeabilidad ( $k$ ) y el volumen de huecos (AV) del estudio de absorción del sonido (Fuente: Elaboración propia).	188

Figura 70. <i>Imágenes por resonancia magnética de la capa superficial de las probetas hechas con material pórfido y caliza (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	189
Figura 71. <i>Imágenes por resonancia magnética de todas las capas de las probetas hechas con material pórfido y caliza (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	190
Figura 72. <i>Gráfico de correlación entre la tracción indirecta (TI) y el volumen de huecos (AV) del estudio de absorción del sonido (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	192
Figura 73. <i>Medición de la absorción del sonido. Gráfico de correlación entre el coeficiente de resistencia al deslizamiento bajo condiciones secas (<math>CRD_{seco}</math>) y el coeficiente de resistencia al deslizamiento bajo condiciones húmedas (<math>CRD_{húmedo}</math>), del ensayo de absorción del sonido (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	193
Figura 74. <i>Medición de la absorción del sonido. Gráfico de la absorción del sonido a distintas frecuencias para cada mezcla realizada en el estudio de la medición de absorción del sonido (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	194
Figura 75. <i>Estudio de geopolímeros. Comportamiento del mortero en mezclas de hormigón poroso y mezclas con geopolímeros (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	197
Figura 76. <i>Estudio de geopolímeros. Diferentes dosificaciones propuestos con la metodología PCD para las mezclas elaboradas con geopolímeros, variando la cantidad de huecos en el agregado mineral (VMA) y el volumen de huecos (AV) (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	198
Figura 77. <i>Estudio de geopolímeros. Fuerza a compresión de mezclas con geopolímeros después de 7 y 21 días de curado (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	200
Figura 78. <i>Pesos obtenidos del análisis de cuestionarios con el método AHP y AHP con lógica difusa (FAHP) para los apartados de comparación de metodologías y dosificación óptima sin aditivos (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	206
Figura 79. <i>Pesos obtenidos del análisis de cuestionarios con el método AHP y AHP con lógica difusa (FAHP) para los apartados de estudio de aditivos por separado, mezclas con dióxido de titanio, influencia de la compactación en mezclas de hormigón poroso y mezclas con geopolímeros (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	206
Figura 80. <i>Pesos obtenidos del análisis de cuestionarios con el método AHP y AHP con lógica difusa (FAHP) para el apartado de combinación de aditivos (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	207
Figura 81. <i>Pesos obtenidos del análisis de cuestionarios con el método AHP y AHP con lógica difusa (FAHP) para el apartado de absorción del sonido (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	207



Figura 82. *Requerimientos de desempeño para diversos usos urbanos de los pavimentos de hormigón poroso de acuerdo con Bonicelli et al., 2016. (Fuente: Bonicelli, Arguelles, and Pumarejo 2016).* ..... 230

Figura 83. *Propuesta final. Diagrama de propiedades propuestas para obtener un hormigón poroso multifuncional (Fuente: Elaboración propia).* ..... 232



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Comparación de población, superficie y densidad entre México y España. Fuente: Elaboración propia de INE 2017, INEGI 2015.</i> .....	11
Tabla 2. <i>Comparación de población, superficie y densidad entre las tres ciudades principales de México y España. Fuente: Elaboración propia de <a href="http://www.ine.es/prensa/np1010.pdf">http://www.ine.es/prensa/np1010.pdf</a>. y <a href="http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/encuestas/hogares/especiales/ei2015/doc/eic2015_resultados.pdf">http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/encuestas/hogares/especiales/ei2015/doc/eic2015_resultados.pdf</a>.</i> .....	12
Tabla 3. <i>Parámetros en componentes del hormigón poroso. Fuente: Elaboración propia.</i>	38
Tabla 4. <i>Resistencia a compresión (FC) para ciertas relaciones de agua-cemento(a/c). Fuente: Guevara et al. 2011.</i> .....	38
Tabla 5. <i>Aditivos y adiciones utilizados por diversos autores para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón poroso y lograr tener una capacidad de infiltración aceptable. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	40
Tabla 6. <i>Aditivos con mayor uso en las mezclas de hormigón poroso alrededor del mundo para mejorar las propiedades mecánicas, hidráulicas y trabajabilidad. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	41
Tabla 7. <i>Estudios recientes de mezclas de hormigón poroso en los últimos años con sus resultados mecánicos e hidráulicos. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	44
Tabla 8. <i>Número de publicaciones referentes a pavimentos de hormigón poroso en la década del 2009 al 2018. Fuente: Elaboración Propia.</i> .....	50
Tabla 9. <i>Clasificación de las superficies de los caminos de acuerdo a PIARC. Fuente: Elaboración propia, de Gandage et al. 2016.</i> .....	56
Tabla 10. <i>Coefficientes de absorción en pavimentos de hormigón poroso obtenidos por algunos autores. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	59
Tabla 11. <i>Estudios realizados con los ensayos y herramientas empleadas en la presente tesis de investigación. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	68
Tabla 12. <i>Propiedades y granulometrías del árido empleado en la presente investigación, así como los ensayos y normativas empleadas. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	69
Tabla 13. <i>Cálculo del porcentaje de agregado grueso a utilizar en las mezclas de hormigón poroso, dependiendo del porcentaje de agregado fino propuesto de acuerdo a la normativa ACI 522R-10, así como su relación arena-cemento (s/c). Fuente: Normativa ACI 522R-10.</i> .....	73

Tabla 14. Rangos típicos de los materiales que conforman el hormigón poroso de acuerdo a la normativa aci 522R-10. Fuente: Norma ACI 522R-10. ....	74
Tabla 15. Ejemplo de una comparación entre mezclas con árido fino (arena) y sin árido fino, con las normativas ACI 522R-10 y NRMCA (ACI 211.3R-02). Fuente: Elaboración propia. ....	75
Tabla 16. Cantidades máximas, mínimas y promedio de los aditivos más comunes empleados en las mezclas de hormigón poroso. Fuente: Elaboración propia. ....	80
Tabla 17. Aditivos empleados en la presente tesis de investigación y su dosificación. Fuente: Elaboración propia. ....	81
Tabla 18. Combinaciones de aditivos analizadas en la presente tesis de investigación. Fuente: Elaboración propia. ....	81
Tabla 19. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la resistencia a compresión teórica (FCT) y su referencia. Fuente: Elaboración propia. ....	102
Tabla 20. Cuadro de ecuaciones para el análisis de la Varianza (ANOVA) con dos factores. Fuente: Elaboración propia. ....	111
Tabla 21. Escala de comparación de Saaty y escala difusa de comparación para el análisis multi-criterio. Fuente: Elaboración propia. ....	114
Tabla 22. Dosificaciones de hormigón poroso con las metodologías ACI 522R-10 y PCD. Fuente: Elaboración propia. ....	126
Tabla 23. Resultados generales de las mezclas de hormigón poroso elaboradas con las metodologías ACI 522R-10 y PCD. Fuente: Elaboración propia. ....	127
Tabla 24. Resultados de la macrotextura mediante el ensayo del círculo de arena de las mezclas de hormigón poroso elaboradas con las metodologías ACI 522R-10 y PCD. Fuente: Elaboración propia. ....	127
Tabla 25. Análisis económico entre los materiales que se necesitan para fabricar $1m^3$ hormigón poroso con la metodología ACI 522R-10 y la metodología PCD (Fuente: Elaboración propia). ....	134
Tabla 26. Materiales que forman los sistemas de pavimentos para su análisis económico (Fuente: Elaboración propia). ....	135
Tabla 27. Presentación y rendimiento de los materiales que forman los sistemas de pavimentos para su análisis económico (Fuente: Elaboración propia). ....	136
Tabla 28. Costo de los materiales que forman los sistemas de pavimentos para su análisis económico, por unidad de $m^2$ (Fuente: Elaboración propia). ....	137

Tabla 29. <i>Costo de la mano de obra para elaboración y colocación de los sistemas de pavimentos para su análisis económico, por unidad de m<sup>2</sup> (Fuente: Elaboración propia).</i>	138
Tabla 30. <i>Costo de seguridad social de la mano de obra para elaboración y colocación de los sistemas de pavimentos para su análisis económico, por unidad de m<sup>2</sup> (Fuente: Elaboración propia).</i>	138
Tabla 31. <i>Costo administrativo de la empresa para elaboración y colocación de los sistemas de pavimentos para su análisis económico, por unidad de m<sup>2</sup> (Fuente: Elaboración propia).</i>	139
Tabla 32. <i>Costo para 1m<sup>2</sup> de cada sistema de pavimento evaluado (Fuente: Elaboración propia).</i>	140
Tabla 33. <i>Costo para 1m<sup>2</sup> de cada sistema de pavimento evaluado (Fuente: Elaboración propia).</i>	141
Tabla 34. <i>Cálculo de la utilidad propuesta del 10%, adición del I.V.A. (16%) y costo total para la elaboración de 1 m<sup>2</sup> de cada sistema de pavimento evaluado (Fuente: Elaboración propia).</i>	141
Tabla 35. <i>Dosificaciones de hormigón poroso empleadas con la metodología PCD. Fuente: Elaboración propia.</i>	144
Tabla 36. <i>Resultados de los diferentes ensayos realizados en las mezclas de hormigón poroso hechas con la metodología PCD. Fuente: Elaboración propia.</i>	145
Tabla 37. <i>Resultados de la macrotextura mediante el ensayo del círculo de realizados en las mezclas de hormigón poroso hechas con la metodología PCD. Fuente: Elaboración propia.</i>	146
Tabla 38. <i>Resultados del Análisis de la Varianza (ANOVA) para el estudio de dosificaciones con la metodología PCD. Fuente: Elaboración propia.</i>	153
Tabla 39. <i>Dosificaciones utilizadas para A) Estudio de aditivos por separado, y B) Estudio de combinaciones de aditivos (Elaboración propia).</i>	156
Tabla 40. <i>Aditivos y adiciones (fibras) con la dosificación de cada uno utilizada para el análisis por separado (Elaboración propia).</i>	157
Tabla 41. <i>Combinaciones de aditivos empleadas con la cantidad utilizada por aditivo (Fuente: Elaboración propia).</i>	158
Tabla 42. <i>Resultados de los diferentes ensayos realizados en el estudio de aditivos por separado. (Fuente: Elaboración propia).</i>	159

Tabla 43. <i>Resultados del Análisis de la Varianza (ANOVA) para el estudio de aditivos por separado (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	163
Tabla 44. <i>Resultados de los diferentes ensayos realizados en el estudio de aditivos por separado. (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	165
Tabla 45. <i>Porcentajes de Dióxido de Titanio (TiO<sub>2</sub>), agua (W), cemento (C) y arena (S), utilizados para agregar las propiedades fotocatalíticas a la superficie de las probetas (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	171
Tabla 46. <i>Porcentajes de Dióxido de Titanio (TiO<sub>2</sub>), agua (W), cemento (C) y arena (S), utilizados para agregar las propiedades fotocatalíticas a la superficie de las probetas (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	172
Tabla 47. <i>Resultados generales de las mezclas con aditivo fotocatalítico (TiO<sub>2</sub>) (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	173
Tabla 48. <i>Estandarización de los esfuerzos de compactación empleados. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	178
Tabla 49. <i>Resultados de los diferentes métodos de compactación analizados y evaluados. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	179
Tabla 50. <i>Resultados del Análisis de la Varianza (ANOVA) para el estudio de métodos de compactación. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	183
Tabla 51. <i>Resultados del Análisis de la Varianza (ANOVA) para obtener la influencia de los métodos de compactación en los ensayos realizados. Fuente: Elaboración propia.</i> ...	184
Tabla 52. <i>Dosificaciones de mezclas empleadas para el ensayo de absorción del sonido (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	186
Tabla 53. <i>Resultados de los diferentes ensayos realizados en el estudio de absorción del sonido. (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	187
Tabla 54. <i>Porosidades obtenidas con el software ARTS para la imagen de cada capa tomada en las probetas hechas con material pórfido y caliza (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	191
Tabla 55. <i>Porosidades obtenidas con el software ARTS para la imagen de cada capa tomada en las probetas hechas con material pórfido y caliza (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	191
Tabla 56. <i>Absorción del sonido (<math>\alpha</math>) obtenidos en el ensayo de absorción del sonido . (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	194
Tabla 57. <i>Dosificaciones de mezclas con geopolímeros empleadas con la metodología PCD (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	200

Tabla 58. <i>Dosificaciones de mezclas de hormigón poroso sustituyendo un porcentaje de cemento con metacaolín (Fuente: Elaboración propia)</i> .....	201
Tabla 59. <i>Resultados de los diferentes ensayos realizados con las mezclas con geopolímeros. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	201
Tabla 60. <i>Resultados de tracción indirecta (TI) de las mezclas con geopolímeros antes y después del ensayo de permeabilidad. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	202
Tabla 61. <i>Pesos y orden de jerarquía de las mezclas con la metodología PCD y ACI 522R-10 obtenidas del análisis multi-criterio. (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	209
Tabla 62. <i>Pesos y jerarquías de las mezclas para el estudio de dosificaciones con la metodología PCD obtenidas del análisis multi-criterio mediante el método de ponderación AHP. (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	211
Tabla 63. <i>Pesos y jerarquías de las mezclas para el estudio de dosificaciones con la metodología PCD obtenidas del análisis multi-criterio mediante el método de ponderación AHP con lógica difusa. (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	212
Tabla 64. <i>Pesos y jerarquías de las mezclas para el estudio de aditivos por separado obtenidas del análisis multi-criterio mediante el método de ponderación AHP. (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	214
Tabla 65. <i>Pesos y jerarquías de las mezclas para el estudio de aditivos por separado obtenidas del análisis multi-criterio mediante el método de ponderación AHP con lógica difusa. (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	215
Tabla 66. <i>Dosificación de aditivos utilizada para el estudio de combinaciones de aditivos, y el porcentaje de mejoría que representaron en términos de permeabilidad (k) y tracción indirecta (TI), en comparación con la mezcla de control (Fuente: Elaboración propia).</i> 217	
Tabla 67. <i>Pesos y jerarquías de las mezclas para el estudio combinaciones de aditivos obtenidas del análisis multi-criterio mediante el método de ponderación AHP y AHP con lógica difusa (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	218
Tabla 68. <i>Porcentaje de mejoría que representaron las combinaciones de aditivos en términos de permeabilidad (k), tracción indirecta (TI) y resistencia al deslizamiento (CRD) bajo condiciones secas y húmedas, en comparación con la mezcla de control (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	218
Tabla 69. <i>Pesos y orden de jerarquía de las mezclas con dióxido de titanio obtenidas del análisis multi-criterio. (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	219
Tabla 70. <i>Pesos y jerarquías de las mezclas para el estudio de métodos de compactación obtenidas del análisis multi-criterio mediante el método de ponderación AHP. (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	220

Tabla 71. <i>Pesos y jerarquías de las mezclas para el estudio de métodos de compactación obtenidas del análisis multi-criterio mediante el método de ponderación AHP con lógica difusa. (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	221
Tabla 72. <i>Pesos y jerarquías de las mezclas para el estudio combinaciones de aditivos obtenidas del análisis multi-criterio mediante el método de ponderación AHP y AHP con lógica difusa (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	222
Tabla 73. <i>Pesos y jerarquías de las mezclas para el estudio de geopolímeros obtenidas del análisis multi-criterio mediante el método de ponderación AHP. (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	223
Tabla 74. <i>Mezclas óptimas para cada estudio realizado por cada método multi-criterio evaluado con el método de ponderación AHP. (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	225
Tabla 75. <i>Mezclas óptimas para cada estudio realizado por cada método multi-criterio evaluado con el método de ponderación AHP con lógica difusa. (Fuente: Elaboración propia).</i> .....	225



## NOTAS Y ACRÓNIMOS

En este apartado se hacen constar una serie de notas y aclaraciones iniciales acerca de la nomenclatura utilizada durante la tesis, si bien es detallada de nuevo en cada capítulo.

La presente tesis de investigación considera al punto (.) como separador de decimales.

Los cuestionarios realizados, así como los datos obtenidos en las diversas fases de la investigación pueden ser solicitados al autor y/o supervisores.

Para el estudio de la comparación de métodos de dosificación (apartado 4.1), las mezclas realizadas con la metodología ACI 522R-10 se nombraron “ACI” y las hechas con la metodología propuesta “PCD”. Así mismo, las mezclas sin arena se representaron con el número 1; las mezclas con una relación arena-cemento de 0.50 con el número 2; y las mezclas con una relación arena-cemento de 1 con el número 3.

Para el estudio de la determinación de la dosificación óptima sin aditivos (apartado 4.3), las granulometrías empleadas fueron nombradas mediante una letra, donde el tamaño 2-4mm se representó con la letra A; 4-8mm con la letra B; 4-12mm con la letra C; y 8-12mm con la letra D.

Para el estudio de aditivos y adiciones por separado (apartado 4.4.2), las fibras de acero al carbono se nombraron “CSF”; las fibras de polipropileno “PF”; el inclusor de aire “AE”; la microsilice “MS”; la nanosílice “NS”; el superplastificante “SP”; el modulador de viscosidad “VM”; y el retardante “SR”.

Para el estudio de mezclas con dióxido de titanio (apartado 4.4.4), las mezclas donde introdujo el aditivo en la mezcla se nombraron “FOT” y las mezclas donde se aplicó el aditivo en la superficie se llaman “SUP”.

Para el estudio de la influencia de la compactación en mezclas de hormigón poroso (apartado 4.5), las mezclas compactadas mediante compresión axial se nombraron “CAX”;

las mezclas realizadas mediante la compactación giratoria “GIR”; las mezclas hechas mediante la compactación por impacto “IMP”; las mezclas elaboradas mediante la compactación seccionada “SEC”; y las mezclas donde se utilizó la varilla de apisonamiento “VAR”.

Para el estudio de absorción del sonido con distintos agregados (apartado 4.6), las mezclas realizadas con material pórfido se nombraron “POR”; las mezclas con material basalto “BAS”; y las mezclas con material calizo “CAL”.

Para el estudio de geopolímeros (apartado 4.7), las mezclas donde se reemplazó cierta cantidad de cemento por metacaolín se llamaron “CEM”; y las mezclas donde se empleó el geopolímero a base de metacaolín activado con una mezcla de silicato de sodio e hidróxido de sodio se nombraron “MET”.

## RESUMEN

Los pavimentos de hormigón poroso son un tipo de firmes permeables, considerados uno de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) más completos. Su estructura es adecuada para que el tráfico rodado y los peatones puedan transitar sobre ellos, mientras permiten que el agua proveniente de la lluvia se infiltre a las capas inferiores hasta llegar al subsuelo, o se almacene para un uso posterior. Con esto se controla la escorrentía superficial, y se disminuye la contaminación del agua, a la vez que se previenen posibles accidentes de tráfico asociados a la presencia del agua en la superficie. Esta característica se logra gracias a que estos pavimentos tienen una alta porosidad y vacíos interconectados.

El análisis de la literatura realizado en la presente tesis doctoral ha permitido destacar que los pavimentos de hormigón poroso proporcionan una serie de ventajas y propiedades adicionales que le otorgan la condición de pavimento multifuncional: resistencia mecánica, infiltración del agua, resistencia al deslizamiento, absorción del sonido generado por los vehículos y el pavimento, capacidad para limpiar parte de la contaminación atmosférica mediante el proceso de eficiencia fotocatalítica, entre otros. Sin embargo, debido a que los pavimentos de hormigón poroso tienen un alto contenido de vacíos, su estructura es más débil y menos trabajable.

Es por esta razón que se ha trabajado en el desarrollo de una nueva metodología que permita el incremento de la resistencia mecánica, manteniendo una infiltración del agua adecuada. Se han empleado diversos agregados (ofita, pórfido, basalto y caliza), granulometrías (2-4, 4-8, 5-10, 4-12 y 8-12mm), aditivos y fibras (fibras de acero y polipropileno, inclusor de aire, microsílíce, nanosílíce, superplastificante, modulador de viscosidad, retardante y dióxido de titanio), así como materiales alternativos al cemento (geopolímeros a base de metacaolín), evaluados mediante diversos ensayos mecánicos (tracción indirecta, compresión y módulo de rigidez), hidráulicos (permeabilidad y porosidad) y superficiales (resistencia al deslizamiento, círculo de arena para la macrotextura y absorción del sonido). Estudiando también diversos métodos de

compactación (compresión axial, impacto, giratorio, seccionado y varilla de apisonamiento) y discutiendo y comparando los resultados con herramientas estadísticas y de análisis multi-criterio para obtener las dosificaciones óptimas.

Siguiendo esta metodología, se han identificado los parámetros de diseño que proporcionan la mejor relación entre los diversos ensayos realizados. La viabilidad de la metodología desarrollada (PCD) fue comparada con la referencia de la normativa ACI. Además, el estudio de aditivos y fibras permitió incrementar tanto la trabajabilidad como la resistencia mecánica de las mezclas. Por otra parte, el análisis de los diferentes métodos de compactación permitió identificar tanto el proceso como la carga necesarias para adquirir los mejores resultados de resistencia y permeabilidad, de acuerdo a las necesidades del pavimento que se diseña. Finalmente, se probaron nuevos materiales más sostenibles, a base de material metacaolín y activado con una combinación de silicato de sodio e hidróxido de sodio, constatando el alto potencial que tiene el desarrollo e implementación de materiales alternativos al cemento convencional.

Los resultados han permitido concluir la viabilidad de la nueva metodología presentada en la presente tesis doctoral, incrementando los valores mecánicos de las mezclas de hormigón poroso en un 30% con respecto a la metodología ACI. Aunque los valores de permeabilidad fueron un 40% más bajos, se situaron por encima del mínimo especificado por el NCAT, de 100m/día (0.012cm/s). Se ha probado que es posible lograr un pavimento multifuncional de hormigón poroso con la metodología propuesta, aditivos superplastificante, incluso de aire y fibras de polipropileno, y compactación por impacto.

## ABSTRACT

Porous concrete pavements are a type of permeable pavements, one of the most complete Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS). Its structure is suitable for road traffic and pedestrians can walk on it, while allowing rainwater to infiltrate through its layers, reaching the subsoil, or it can be stored for future uses. With this, surface runoff is managed, and water pollution is controlled, preventing possible traffic accidents associated with the presence of water on the surface. This characteristic can be achieved to the fact that these pavements present a high porosity and interconnected voids.

The literature review carried out in the present work has highlighted that porous concrete pavements provide a series of advantages and additional properties that make it multifunctional: mechanical resistance, water infiltration, skid resistance, absorption of the sound generated by the vehicles and the pavement, the ability to clean the air from certain pollutants caused by vehicles smog through the photocatalytic efficiency process, among others. However, because porous concrete pavements have a high void content, their structure is weaker and less workable.

For this reason, work has been done in order to develop a new methodology that allows to increase the mechanical resistance, while maintaining an adequate water infiltration. Various aggregates have been employed (ofite, porphyry, basalt and limestone), as well as different gradations (2-4, 4-8, 5-10, 4-12 and 8-12mm), additives and fibers (carbon steel and polypropylene fibers, air entraining, microsilica, nanosilica, superplasticizer, viscosity modifier, set retarder and titanium dioxide), and alternative materials to cement (metakaolin-based geopolymers), evaluated through various mechanical tests (indirect tensile, compression and stiffness modulus), hydraulic tests (permeability and porosity), and superficial tests (skid resistance, circle of sand for macrotexture and sound absorption). Also studying various compaction methods (axial compression, impact, giratory, sectioned, and tamping rod) and discussing and comparing results with statistical and multi-criteria analysis tools to obtain the optimal dosages.

Following this methodology, the design parameters that provide the best relation between the diverse tests carried out have been identified. The feasibility of the developed methodology (PCD) was compared with the reference of the ACI regulations. In addition, the study of additives and fibers allowed to increase both workability and the mechanical resistance of the mixtures. On the other hand, the analysis of the different compaction methods allowed to identify both the process and the load necessary to acquire the best resistance and permeability results, according to the needs of the designed pavement. Finally, new sustainable materials were tested, based on metakaolin and activated with a combination of sodium silicate and sodium hydroxide, confirming the high potential of developing and implementing alternative materials to conventional cement.

With the results, it can be concluded the feasibility of the new methodology presented in this doctoral thesis, increasing the mechanical values of porous concrete mixtures by 30% with respect to the ACI methodology. Although permeability values were 40% lower, they were above the minimum specified by the NCAT of 100m/day (0.012cm/s). It has been proved that it is possible to achieve a multifunctional porous concrete pavement with the proposed methodology, superplasticizer and air entraining additives, polypropylene fibers and the impact compaction method.

## ABSTRACT (ITALIANO)

I pavimenti di calcestruzzo drenante sono un tipo di pavimento permeabile, considerati uno dei Sistemi Urbani di Drenaggio Sostenibile (SUDS) più completi. La loro struttura permette che il traffico su ruota e i pedoni possano transitarci e che l'acqua piovana filtri sugli strati inferiori fino ad arrivare al sottosuolo o sia immagazzinata per un uso posteriore. In questo modo risulta possibile controllare il deflusso dell'acqua sulla superficie, diminuire l'inquinamento della stessa e contemporaneamente si prevencono possibili incidenti di traffico dovuti alla presenza di acqua sulla superficie. Tutto questo è possibile grazie all'alta porosità di questa tipologia di pavimenti e alla presenza di vuoti interconnessi.

L'analisi letteraria realizzata nella presente tesi dottorale ha permesso di evidenziare una serie di vantaggi e proprietà aggiuntive che conferiscono ai pavimenti di calcestruzzo drenante la qualità di essere un pavimento multifunzionale: resistenza meccanica, infiltrazione d'acqua, resistenza allo scivolamento, assorbimento del suono generato dai veicoli e dalla pavimentazione, capacità di pulire parte dell'inquinamento atmosferico grazie al processo di efficienza fotocatalitica, tra molti. Tuttavia, poiché i pavimenti di calcestruzzo drenante sono ricchi di vuoti, la loro struttura è più debole e meno lavorabile.

Per le ragioni sopra descritte, si è lavorato allo sviluppo di una nuova metodologia che permetta l'aumento della resistenza meccanica, mantenendo un'infiltrazione adeguata dell'acqua. Sono stati utilizzati diversi agglomerati (ofite, porfido, basalto, calcare), granulometrie (2-4, 4-8, 5-10, 4-12 e 8-12mm), additivi e fibre (fibra di acciaio e propilpropano, aerante, microsilice, nanosilice, superplastificante, modulatore di viscosità, ritardante, diossido di titanio), così come materiali alternativi al cemento (geopolimeri a base di metacaolino), analizzati attraverso differenti esperimenti meccanici (trazione indiretta, compressione e modulo di rigidità), idraulici (permeabilità e porosità) e superficiali (resistenza allo scivolamento, cerchio di sabbia e assorbimento del suono). Sono stati studiati anche diversi metodi di compattazione (compressione assiale, impatto,

rotativo, sezionato e asta di pigiatura), discutendo e confrontando i risultati con strumenti statistici e di analisi multicriterio, al fine di ottenere le ottimali dosi.

Seguendo questa metodologia, è stato possibile identificare i parametri di disegno che forniscono la migliore relazione tra le diverse prove realizzate. La praticabilità della metodologia sviluppata (PCD) è stata confrontata in riferimento alla normativa ACI. Inoltre, lo studio di additivi e fibre ha permesso di aumentare sia la duttilità che la resistenza meccanica dei composti. D'altro canto, l'analisi dei differenti metodi di compattazione ha permesso di identificare il processo e il carico necessari al fine di ottenere i migliori risultati di resistenza e permeabilità, secondo le necessità del pavimento disegnato. Infine, sono stati testati nuovi materiali più sostenibili, a base di metacaolino, attivato con una combinazione di silicato di sodio e idrossido di sodio, riscontrando l'alto potenziale dello sviluppo e dell'implementazione di materiali alternativi al cemento convenzionale.

I risultati hanno permesso di concludere la praticabilità della nuova metodologia presentata in questa tesi dottorale, incrementando i valori meccanici dei composti di calcestruzzo drenante di un 30% rispetto alla metodologia ACI. Anche se i valori di permeabilità risultano inferiori di un 40%, questi si sono posizionati sopra al minimo specificato dal NCAT di 100m/giorno (0.012cm/s). La metodologia proposta, gli additivi superplastificante, aerante, le fibre di prolipropano e la compattazione per impatto hanno dato la possibilità di ottenere un pavimento multifunzionale di calcestruzzo drenante.



## **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN**

En este primer capítulo de introducción se presenta el marco de la tesis doctoral, destacando una breve explicación de los problemas ambientales que, a través del tiempo, han ido surgiendo por el desarrollo de las ciudades, y por la falta de conciencia del ser humano de carácter limitado de la naturaleza. También se repasa la situación del drenaje urbano sostenible en algunos países, principalmente de América Latina, y las medidas que emplean para tratar de adaptarse al cambio climático y disminuir sus efectos. Para cerrar el capítulo, se presentan los objetivos, hipótesis y estructura de la tesis doctoral.

## **1.1. Marco de la Tesis**

### **1.1.1. Antecedentes y Motivación**

A lo largo del tiempo, las grandes aglomeraciones del mundo han experimentado un gran desarrollo industrial y comercial, y, por consiguiente, un enorme crecimiento en su población. Este crecimiento está ligado a un desarrollo en infraestructura para satisfacer las propias necesidades de los habitantes. Algunos autores han explicado que, en la primera década del nuevo milenio, aproximadamente el 50% de la población mundial se había instalado en zonas urbanas, incrementando la demanda en infraestructura. Se espera que para el año 2030, cerca del 60% de la población mundial llegue a vivir en zonas urbanas (Sansalone, Kuang, and Ranieri 2008; United Nations 2017).

El rápido crecimiento de las ciudades, sumado a la falta de conciencia de sus habitantes acerca de los impactos ambientales, han ocasionado cambios muy radicales en el medio ambiente. Esto ha hecho que se busquen medidas para tratar de minimizar los impactos generados, tanto de carácter ambiental, como económico, buscando a la vez, que el bienestar humano no se vea alterado. Sólo en los Estados Unidos, la demanda en infraestructura oscila los \$480,000 millones de dólares al año, proveniente de los 3 millones de personas que, aproximadamente, se mudan a las grandes ciudades anualmente (Sansalone, Kuang, and Ranieri 2008).

Como consecuencia de este incremento en la población urbana, crecen también el número de vehículos circulantes, la cantidad de basura generada y los desperdicios (International Water Association 2017). Sumado el hecho de que el área urbana se expande, impermeabilizando grandes extensiones y creando así una gran barrera entre el agua de lluvia y el suelo que interrumpe el proceso natural del ciclo del agua, afectando la recarga de los acuíferos subterráneos (Rodriguez-Hernandez et al. 2013). Esta agua es redireccionada por los sistemas de drenaje de las ciudades (canales y depósitos, entre otros), generando un exceso de escorrentía superficial, contaminando el agua de lluvia y, por consiguiente, poniendo en riesgo la salud y seguridad de las personas.

Cuando el agua de lluvia cae sobre el terreno natural, se infiltra o se evapora, es tomada por las plantas por el proceso de evapotranspiración, y parte de esa agua encuentra su camino hacia los ríos. Estos estados del ciclo del agua se ven interrumpidos cuando el suelo se altera y desarrolla artificialmente, como puede apreciarse en la Figura 1. En las zonas urbanas tiende a haber menor cantidad de superficie permeable para la infiltración, así como menor número de plantas para la evapotranspiración. Al caer el agua de lluvia en suelo impermeable, ésta tiende a causar escorrentía superficial, causando encharcamientos, inundaciones, contaminación y problemas de erosión (Woods-Ballard et al. 2015).

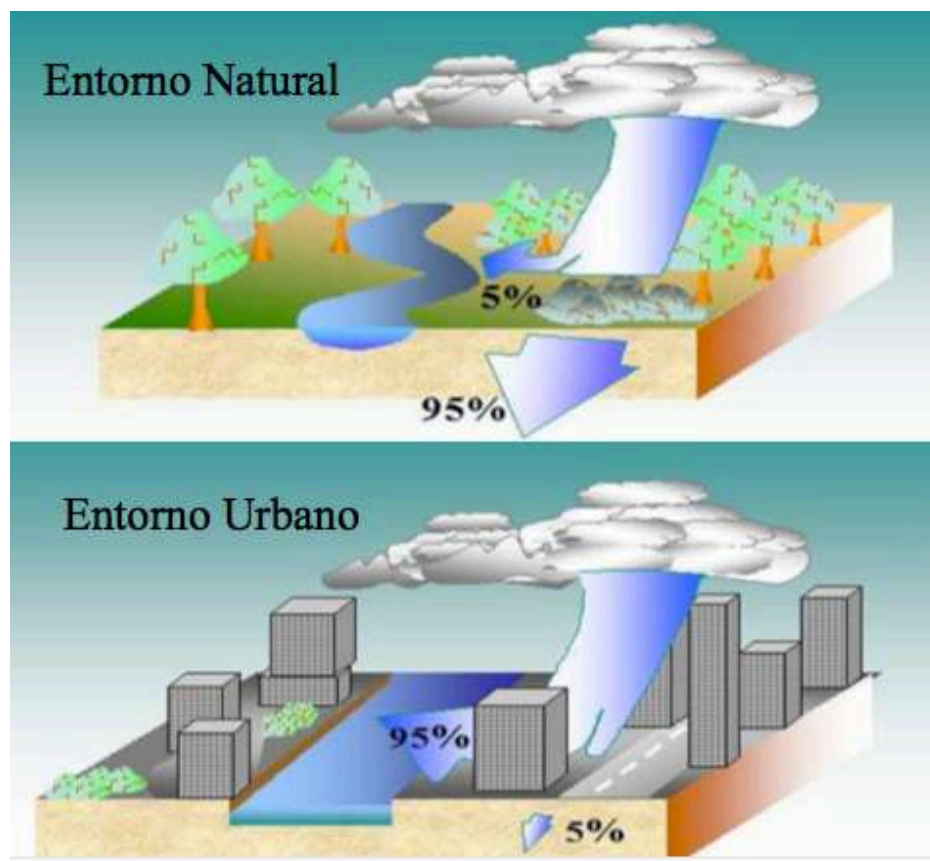


Figura 1. Reparto de escorrentía e infiltración en un entorno Rural y Urbano. Fuente: (Rodríguez-Bayon et al. 2011)

Algunos investigadores destacaron la importancia de incorporar el concepto de resiliencia en la planificación urbana para poder hacer frente al Cambio Climático, proponiendo para ello un incremento en la utilización de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) (Wong and Brown 2009). En esta línea, la regeneración urbana orientada a la obtención de una ciudad más resiliente es el tema fundamental tratado en las

publicaciones de otros autores, sobre cómo diseñar ciudades resilientes. Se recomienda la utilización de SUDS, y especialmente superficies urbanas permeables, con el objetivo de mejorar la adaptación del entorno urbanizado a los efectos del Cambio Climático (Jato-espino et al. 2014; Lombardi et al. 2012; Rodriguez-Bayon et al. 2011). Análogamente, otras investigaciones resaltaron la necesidad de avanzar hacia la construcción de ciudades resilientes, capaces de responder a los cambios y perturbaciones que conlleva la vida urbana hoy en día, mediante estrategias de biodiversidad, modularidad, multifuncionalidad y diseño adaptativo (Ahern 2013).

Por lo tanto, es necesario que las superficies urbanas de las ciudades sean regeneradas para recuperar el ciclo natural del agua y mejorar su resiliencia, asegurando su correcto servicio ante excepcionales eventos de lluvia (PlaNYC 2014). Sin embargo, la dificultad del proceso de regeneración de las infraestructuras construidas radica en la medida en que la resiliencia permita decidir cuáles son los cambios que deben llevarse a cabo (Arup 2013).

Con esto se crea el concepto de Drenaje Sostenible, al tratar de hacer una adecuada gestión del agua de lluvia, siendo uno de los mayores retos las áreas urbanas (Andrés-Doménech et al. 2018). Esta gestión pretende que el agua se desperdicie menos, y que su captación sirva para consumo humano, consumo animal, así como para actividades agrícolas. Entre los SUDS que existen, se pueden mencionar los jardines de lluvia, azoteas verdes, pozos de infiltración, y los pavimentos permeables (Rodriguez-Bayon et al. 2011).

Los SUDS tratan de minimizar las consecuencias del desarrollo urbano en cuanto a la producción de escorrentía, laminando la cantidad y depurando la calidad del agua (reduciendo los volúmenes de escorrentía generados y reduciendo su carga contaminante), y todo ello intentando maximizar la integración paisajística y el valor social y ambiental de las actuaciones, recuperando el equilibrio asociado al ciclo natural del agua (Woods-Ballard et al. 2015). A este respecto, se han demostrado los múltiples beneficios que puede proporcionar la instalación de SUDS en entornos urbanos, ayudando en la mitigación y adaptación a los efectos del Cambio Climático, aportando resiliencia ante las inundaciones y reduciendo el efecto isla de calor (Charlesworth 2010).

Dentro de los SUDS, los pavimentos permeables proporcionan un método de infiltración que permite capturar la escorrentía superficial, dejando que se infiltre en el suelo, logrando que las aguas subterráneas puedan regenerarse y se continúe el ciclo del agua (Lian and Zhuge 2010). Existen diferentes tipos de materiales que pueden utilizarse, por ejemplo, el pasto, adoquines o sistemas porosos como el asfalto y el hormigón poroso. Siendo este último el objeto de investigación en la presente tesis doctoral, donde ha sido considerado una de las mejores soluciones para reducir el efecto de la urbanización sobre la gestión del agua de escorrentía en las zonas urbanas (Guntakal and Selvan 2017), así como poder eliminar el efecto de isla de calor (H. Li et al. 2013), reducir el sonido generado entre los automóviles y el pavimento (Gerharz 1999), e incrementar la fricción del pavimento, aumentando la seguridad vial (Nicholls 1997; Nicholls and Daines 1992). Además, otros autores determinaron el ahorro de energía y emisiones de efecto invernadero que implica la construcción de una infraestructura verde formada por un pavimento permeable y árboles. Los resultados demostraron que para que éstas técnicas sean efectivas en este sentido, su implementación no debe ser simplemente puntual, sino contar con cierta extensión (Spatari, Yu, and Montaldo 2011).

### **1.1.2. Justificación**

Para justificar la presente investigación, se realizó un análisis en la base de datos de Scopus, en donde se buscaron los artículos referentes a pavimentos de hormigón poroso publicados en los últimos 10 años (período del 2009-2018). Con las combinaciones empleadas, se encontró un total de 171 artículos, los cuales abarcan investigaciones en diversas propiedades: desde propiedades mecánicas, e hidráulicas, hasta propiedades ambientales y de seguridad. Esta búsqueda permitió identificar que las investigaciones en este tema se centran en Estados Unidos, China e India. Este análisis que comenzó en 2017, logró publicarse para el año 2020, donde se estimó un crecimiento de 4.29 publicaciones, en el tema de hormigón poroso, al año para el periodo 2019-2039, destacando una falta de investigación orientada hacia la seguridad y sustentabilidad de estos pavimentos, (Elizondo-Martínez et al. 2020).

A pesar de que el hormigón poroso ha sido estudiado desde hace varias décadas, aún se necesita realizar mayores contribuciones para optimizar el diseño de mezclas y lograr una integración de las propiedades ambientales y de seguridad con las propiedades mecánicas e hidráulicas. En este contexto, se identifica que aún no hay suficientes contribuciones y confianza para utilizar estos sistemas en autopistas, y calles en general, a pesar de las ventajas ambientales y de seguridad que pueden proporcionar (Elizondo-Martínez et al. 2020).

Lo anterior resalta la necesidad de seguir investigando cómo los pavimentos de hormigón poroso pueden comportarse como un sistema multifuncional en zonas urbanas, especialmente en ciudades sobrepobladas que se encuentran enfrentando problemas ambientales graves como altas temperaturas, efecto isla de calor, contaminación del aire y del agua, entre otros.

Actualmente se están investigando y desarrollando nuevos materiales para sustituir el cemento, como los geopolímeros, ya que la producción de cemento representa un fuerte impacto ambiental en materia de consumo de energía. Una vez se logre dicha sustitución, toda la investigación sobre hormigón poroso será extrapolable, lo cuál hace especialmente importante desarrollar el máximo conocimiento posible acerca del carácter multifuncional del hormigón poroso, independiente del ligante utilizado.

### **1.1.3. Estructura del documento**

El presente documento inicia con las dedicatorias y los agradecimientos, seguido por el índice de Contenidos, y los índices de Figuras y Tablas. Posterior a eso se incluye un apartado de notas y acrónimos y el resumen de la tesis, en español, inglés e italiano. El trabajo de investigación se expone en cinco capítulos.

El primer capítulo es la introducción, donde se presentan los antecedentes, motivación y justificación de la investigación. También se presenta la estructura del documento y los objetivos e hipótesis del presente trabajo. Además se incluye una breve explicación de los problemas que han hecho necesaria la implementación de drenajes sostenibles en las ciudades, sobre todo de firmes permeables, incluida la definición de los

mismos. A su vez, se mencionan algunos fundamentos del drenaje sostenible, donde se incluye una explicación del desarrollo de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en Latinoamérica, principalmente en México, Colombia, Chile y Brasil.

El segundo capítulo se presenta el estudio del estado del arte, donde se profundiza específicamente en la materia de investigación, el hormigón poroso. Se estudia la construcción del hormigón poroso, identificando sus componentes por separado, seguido de un estudio bibliográfico acerca de su permeabilidad y resistencia mecánica. Por último, se añaden mejoras que pueden aplicarse a la materia de estudio para su utilización en el medio urbano.

En el tercer capítulo, metodología, se presentan la descripción de materiales y dosificaciones de mezclas de hormigón poroso estudiadas, así como una explicación de los ensayos a los que fueron sometidas las muestras para el estudio de su capacidad de infiltración y resistencia mecánica principalmente, finalizando con algunas mejoras añadidas a los especímenes en materia de aditivos. Así mismo, otros ensayos en materia de seguridad y cuestiones ambientales son explicados.

Posteriormente, los resultados obtenidos de estas pruebas y su discusión se presentan en el cuarto capítulo, mostrando los distintos comportamientos en materia hidráulica, mecánica, comportamiento de seguridad y ambiental, y con las mejoras empleadas. Estos resultados son analizados en detalle mediante métodos estadísticos y multi-criterio, con el objetivo de seleccionar el sistema y dosificaciones más óptimas en materia mecánica, sustentable y de seguridad.

Finalmente, en el quinto capítulo se muestran las conclusiones, tanto particulares como generales, a las que se ha llegado con la investigación. Finalizando con la mención de futuras líneas de investigación relacionadas con el hormigón poroso. Por último, se presenta la bibliografía utilizada para la presente investigación, así como los anexos empleados.

## **1.2. Objetivos e Hipótesis**

### **1.2.1. Objetivos Generales**

La meta principal de esta tesis es realizar un aporte novedoso en el ámbito de la construcción de pavimentos urbanos de hormigón poroso. Para ello se estudiarán, cuantificarán y tratarán de aunar toda una serie de características y beneficios, analizados hasta el momento de forma independiente (ej. características que incrementen la seguridad de los conductores), para lograr un pavimento integrador más resiliente (adaptado al Cambio Climático) y sostenible (sustentable económica, social y medioambientalmente). Para esto, será necesario implementar los siguientes objetivos generales:

1. Estudiar diferentes materiales, dosificaciones y técnicas de construcción de pavimentos de hormigón poroso.
2. Proponer una metodología de dosificación de mezclas de hormigón poroso que permita mejorar las propiedades mecánicas, manteniendo propiedades hidráulicas y permitiendo controlar otras propiedades adicionales.
3. Analizar en laboratorio la posibilidad de integración de mejoras en diferentes dosificaciones de hormigón poroso para lograr pavimentos multifuncionales adaptados a las necesidades específicas de cada aplicación urbana.

Como punto de partida, la hipótesis principal que la presente tesis pretende demostrar es que los pavimentos de hormigón poroso pueden ser diseñados de forma que se maximice su carácter multifuncional, potenciando sus beneficios en distintas aplicaciones urbanas (en vías urbanas con tráfico ligero, como aparcamientos de superficie para vehículos ligeros, o calles de acceso a zonas residenciales, así como aceras peatonales, entre otras), aumentando así la necesaria resiliencia de las ciudades.

### **1.2.2. Objetivos Particulares**

Para el desarrollar correctamente el presente trabajo de investigación, y poder cumplir la meta marcada y los objetivos generales asociados, se establecieron los siguientes



objetivos particulares o específicos:

1. Analizar la bibliografía existente para reconocer las características más evaluadas en los pavimentos de hormigón poroso e identificar brechas a superar para el desarrollo de un pavimento multifuncional.
2. Estudiar y optimizar los pavimentos de hormigón poroso mediante el análisis de metodologías de diseño, identificando las mejores dosificaciones.
3. Evaluar la viabilidad de los pavimentos de hormigón poroso mediante la realización de un análisis económico, comparándolo con un pavimento de hormigón convencional y otro de asfalto.
4. Analizar los diversos aditivos, que más se utilizan en los pavimentos de hormigón poroso, obteniendo las mejores dosificaciones y combinaciones para mejorar su resistencia y capacidad de infiltración.
5. Estudiar y optimizar los pavimentos de hormigón poroso mediante el análisis de sus procedimientos de construcción, evaluando los diversos métodos de compactación empleados. Integrar las mejoras de los pavimentos de hormigón poroso, en términos de seguridad y confort (fricción y absorción del sonido).
6. Explorar mezclas alternativas de hormigón poroso mediante la sustitución del cemento por geopolímeros, a base de metacaolín, que permitan incrementar la resistencia de los pavimentos.
7. Desarrollar de una metodología de análisis multicriterio y toma de decisión que permita seleccionar el mejor diseño para cada aplicación, considerando especialmente la resiliencia y la sostenibilidad aportadas a la ciudad.

### **1.3. Conceptos fundamentales**

A continuación, se presentan una serie de conceptos considerados de gran importancia para comprender los problemas que se quieren mitigar, así como lo que se quiere lograr, con un pavimento urbano de hormigón poroso. Esto es considerado el punto

de partida hacia el desarrollo de técnica constructiva con múltiples beneficios, entre los que destacan los medioambientales, que además logre conjugar otras características orientadas a la resiliencia de las ciudades y la consecuente seguridad y confort de la población.

En la Figura 2 se aprecian estos conceptos ordenados y relacionados para su entendimiento de tal forma que el Desarrollo Urbano y el Desarrollo Sostenible se encuentran condicionados por la imprescindible adaptación al Cambio Climático, justificando la mejora de la Resiliencia Urbana y la implementación del Drenaje Sostenible en las ciudades.

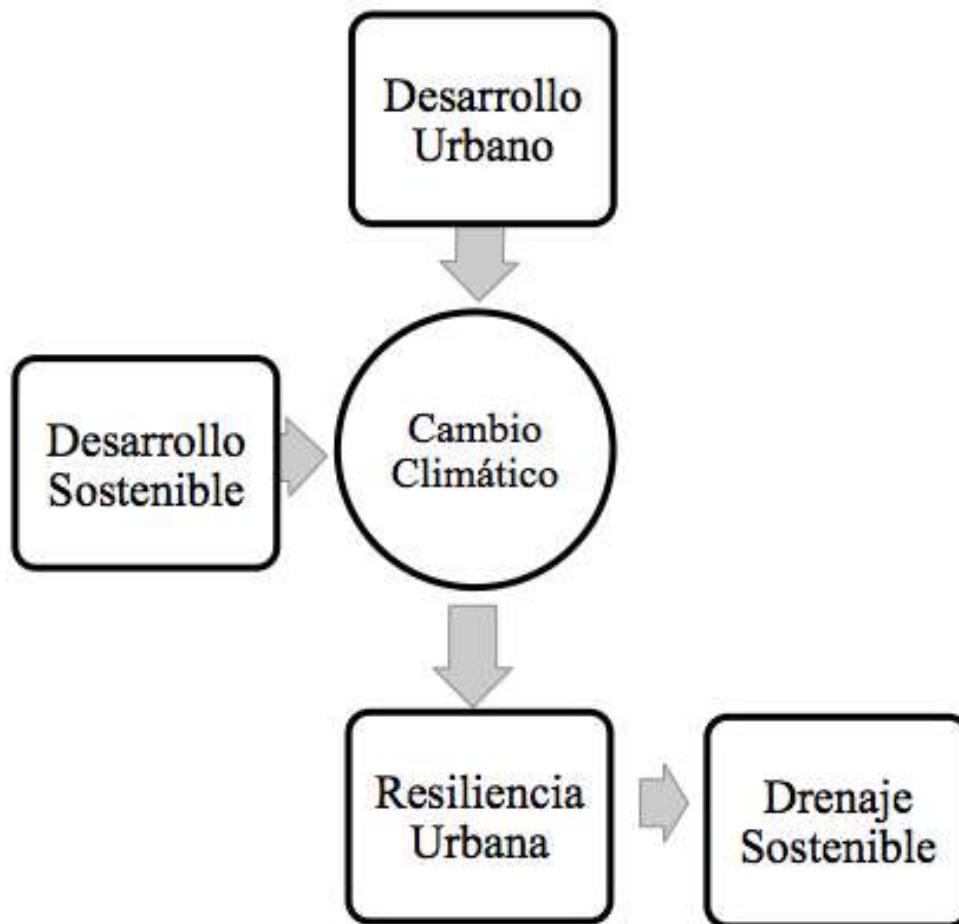


Figura 2. Organigrama de los conceptos fundamentales que constituyen el propósito de la presente tesis de investigación. Fuente: Elaboración propia.

### 1.3.1. Desarrollo Urbano

El rápido desarrollo urbano de las ciudades ha causado la necesidad de mitigar la extensión urbana (Daniels et al. 2018). Sólo en la ciudad de México, por ejemplo, habitan, en términos numéricos, aproximadamente la mitad de la totalidad de la población de España. Es decir, en la capital mexicana se encuentran 21,892,724 residentes (INEGI 2015), mientras que en España habitan 46,468,102 habitantes (INE 2016).

A pesar de la diferencia en población entre México y España, es de importancia señalar, que cuentan con una densidad de 60.85 hab/km<sup>2</sup> (INEGI 2015) y 92.07 hab/km<sup>2</sup> (INE 2016) respectivamente. Significando que el territorio español se encuentra un 33% más concentrado. Esto quiere decir, que en España ha habido una demanda mayor en infraestructura (transporte, vivienda, entre otros), y que en México existe un cierto déficit en infraestructura, pues, aunque cuenta con ciudades muy extensas, gran parte de su territorio no está poblado. A continuación, en la Tabla 1 se presenta una comparativa entre la población, superficie y densidad entre México y España, mientras que en la Tabla 2, una comparativa entre las tres ciudades más pobladas de cada país.

Tabla 1. *Comparación de población, superficie y densidad entre México y España. Fuente: Elaboración propia de INE 2017, INEGI 2015.*

País	Población (hab)	Superficie (km <sup>2</sup> )	Densidad (hab/km <sup>2</sup> )
México	119,530,753	1,964,375	60.85
España	46,528,966	505,370	92.07

A manera de ejemplo, se observa que la Ciudad de México tiene una superficie casi cuatro veces mayor que Madrid, y una población aproximadamente tres veces mayor. Sin embargo, ambas ciudades mantienen una densidad similar. Por consiguiente, se manifiesta el problema de interrupción del ciclo del agua, consumo de áreas naturales y, también, el amontonamiento de la población en ambas urbes. Por otro lado, por la cuestión de extensión de territorios, en España se acostumbra que las ciudades crezcan de manera vertical, mientras que en México de forma horizontal, observándose así la mayor densidad de población en Barcelona. Estos modelos de desarrollo urbano son diferentes, pero dan lugar a la misma problemática hidrológica.

Tabla 2. *Comparación de población, superficie y densidad entre las tres ciudades principales de México y España. Fuente: Elaboración propia de <http://www.ine.es/prensa/np1010.pdf>. y [http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/encuestas/hogares/especiales/ei2015/doc/eic2015\\_resultados.pdf](http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/encuestas/hogares/especiales/ei2015/doc/eic2015_resultados.pdf).*

Entidad	Población (hab)	Área Metropolitana (hab)	Superficie (km <sup>2</sup> )	Densidad (hab/km <sup>2</sup> )	Fuente
<b>México</b>					
<b>Cd. De México</b>	8,918,653.00	21,892,724.00	1,495.00	5,965.65	
<b>Guadalajara</b>	1,460,148.00	4,434,878.00	340.91	4,283.09	(INEGI 2015)
<b>Monterrey</b>	1,109,171.00	4,106,054.00	894.00	1,240.68	
<b>España</b>					
<b>Madrid</b>	3,165,541.00	6,466,996.00	605.77	5,225.65	
<b>Barcelona</b>	1,608,746.00	5,029,181.00	102.15	15,748.86	(INE 2016)
<b>Valencia</b>	790,201.00	1,550,885.00	134.65	5,868.56	

La futura planificación en los nuevos desarrollos urbanos, deben ahora ser sustentables, tanto desde el punto de vista ambiental, social y económico. Además de contribuir a la sustentabilidad del área urbana donde se localiza. A su vez, para lograr esto, es importante la implementación de la educación ambiental desde edades escolares tempranas (Garrido-Jiménez, Magrinyà, and del Moral-Ávila 2018). Es por eso que los pavimentos de hormigón poroso contribuyen a la necesidad de infraestructura sustentable desde el punto de vista ambiental, social y económico para la población de las ciudades.

### 1.3.2. Desarrollo Sostenible

En un principio, el concepto de desarrollo sostenible se refería a un desarrollo económico que pudiera mantenerse de manera indefinida, sin llevar a extremos la economía. Con el tiempo, la definición fue evolucionando, también incluye un desarrollo que no reduzca los niveles de capital ambiental ni social al mismo tiempo, que no interponga cargas desproporcionadas sobre las generaciones futuras (Priddle 1999). Con el fin de crear ciudades más desarrolladas y atractivas para atraer inversiones y crecer económicamente, las localidades crean planes de crecimiento a largo plazo, donde un factor a considerar es la sustentabilidad (Leducq and Scarwell 2017). Los espacios verdes juegan un papel muy importante en los planes de crecimiento, ya que proporcionan ventajas micro climáticas, así como ecológicas (Daniels et al. 2018). Sin embargo, estos espacios son mucho menores en cantidad, en comparación con la infraestructura de la ciudad. El

crecimiento urbanístico sin control, ha ocasionado un aumento de las superficies impermeables en el entorno de las urbes (Rodríguez-Bayon et al. 2011), generando serios problemas ambientales y de contaminación. Es necesario diseñar ciudades compactas, pero multifuncionales. Esto se refiere a paisajes urbanos densamente poblados, y a solucionar sus necesidades en compacto, para así evitar la extensión urbana (Daniels et al. 2018).

Es necesario que los distintos países se adapten a los cambios que están ocurriendo actualmente en la naturaleza. De no hacerlo, la población mundial está en riesgo de llegar a una escasez de recursos ecológicos. Los avances tecnológicos, así como la planeación sostenible, jugarán un papel muy importante en el cambio industrial para la sociedad, para así poder seguir proveyendo a la gente de recursos para satisfacer sus necesidades (Mulder 2007). La implementación de pavimentos de hormigón poroso encaja en el desarrollo de las ciudades al poder ser utilizada en la infraestructura vial tan necesaria, al mismo tiempo que son considerados zonas verdes debido a su capacidad de gestionar el agua de escorrentía.

### **1.3.3. Cambio Climático**

Uno de los problemas más conocidos a nivel mundial, es el del cambio climático. Las emisiones generadas por los combustibles quemados de los automóviles e industrias se concentran, reteniendo la energía solar y haciendo que la temperatura del planeta se incremente. Sumado a esto, otros problemas se derivan: deshielo de los polos, aumento del nivel del mar, incremento en los niveles de precipitaciones, entre otros.

El Artículo 1 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 1992, define el concepto de cambio climático como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparable (ONU 1992).

Sin embargo, desde su origen, el planeta ha estado en permanente cambio. Esto se sabe, por ejemplo, por las profundas transformaciones en la conformación del planeta causadas por las eras geológicas, y por la evolución de las especies desde que la vida apareció en la Tierra, lo que ha llevado a cuestionar si el cambio climático podría ser de

origen natural (Rodríguez Becerra et al. 2015). A pesar de esta cuestión, el rápido proceso de cambio climático que el planeta está presenciando no tiene causa natural. El IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change – Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático) afirma que la causa de la velocidad de cambio climático está en la actividad humana, principalmente en el consumo de combustibles fósiles, como el petróleo y carbón, que emiten dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y otros gases de efecto invernadero (Rodríguez Becerra et al. 2015).

Además, el IPCC, en su quinto informe sobre cambio climático, en 2014, centra su atención en la importancia de la gestión de riesgos y la elaboración de respuestas técnicas que logren la adaptación y mitigación de los impactos inevitables debidos al Cambio Climático. En el informe-resumen para los responsables políticos de todo el mundo, el IPCC subraya la importancia de lograr infraestructuras resilientes climáticamente que sean capaces de soportar temperaturas extremas (ej. Intensas olas de calor y tormentas de nieve) y eventos de lluvia excepcionales (ej. Precipitaciones con altas intensidades y largas sequías). En este sentido, uno de los principales retos actuales de la sociedad es lograr la resiliencia de las infraestructuras urbanas, siendo fundamental el papel de las administraciones públicas, empresas de construcción y gestión (IPCC 2014). Al mismo tiempo, el objetivo 9 marcado por la ONU para lograr el desarrollo sostenible a nivel mundial, exige la construcción de infraestructuras resilientes, fomentando la innovación en los países en desarrollo (ONU 2017). En consecuencia, actualmente la resiliencia se ha convertido en uno de los principales criterios para la toma de decisiones estratégicas a nivel regional para asegurar el éxito en el proceso de adaptación al Cambio Climático (McDaniels et al. 2015).

Los pavimentos de hormigón poroso se pueden considerar infraestructuras resilientes que ayuden a combatir el Cambio Climático y a controlarlo, debido a sus diversas ventajas relacionadas tanto con la gestión y contaminación del agua, así como su capacidad para depurar el aire de contaminantes, producto del smog de los vehículos, mediante el uso de ciertos aditivos que otorguen una capacidad fotocatalítica al pavimento.

### 1.3.4. Resiliencia Urbana

Las ciudades son el sistema socio-ecológico más complejo creado por el ser humano. Sin embargo, cuando uno de los subsistemas llega a fallar, la ciudad se vuelve vulnerable, lo que conlleva a la crisis y, en casos muy extremos, a su destrucción. Factores como los desastres naturales, corrupción, ataques terroristas, crisis financiera, entre otros, juegan un papel muy importante en el desarrollo urbano de la ciudad (Zhang and Li 2018). Dicho lo cual, se puede definir a la resiliencia urbana como la capacidad de individuos, comunidades, instituciones, negocios y sistemas dentro de una ciudad para sobrevivir, adaptarse y crecer sin importar la clase de riesgos o amenazas que hayan experimentado (Kramer n.d.).

Diversas ciudades alrededor del mundo han comenzado a tomar medidas y a crear iniciativas para hacer frente al cambio climático que se presenta hoy en día. La ciudad de México, por ejemplo, ha iniciado diversos programas para disminuir la cantidad de automóviles circulando en la mancha urbana, y se han creado sistemas de transporte público, además de los conocidos metro y el autobús, para minimizar el uso del automóvil particular, disminuir la congestión y beneficiar a los usuarios acortando los tiempos de traslado de un lugar a otro. La ciudad de Madrid, por otro lado, comenzó a finales de 2018, el proyecto “Madrid Central”, creando una zona que favorece a peatones y transporte público y que funcione como un pulmón para la ciudad (Ayuntamiento de Madrid 2018).

Además, existen iniciativas como “100 ciudades Resilientes”, donde se desarrollan estrategias que den respuesta al compromiso adquirido por las grandes ciudades en el mundo, con el fin de impulsar políticas públicas que contribuyan a fortalecer la capacidad de enfrentar diversos riesgos sin comprometer el desarrollo (Lipper 2016).

Las áreas urbanas se encuentran cambiando constantemente, y nunca llegan a estar completas. Esto debido a diversos factores, desde el cambio climático, hasta iniciativas políticas derivadas de demandas de la comunidad (Woods-Ballard et al. 2015). Cada zona del planeta es diferente, inclusive dentro de un mismo país se presentan condiciones diversas, por lo que cada ciudad debe de adaptarse a las condiciones de su ubicación, y al comportamiento que estas condiciones presenten con el cambio climático que se está

viviendo en estos tiempos. Estos eventos son impredecibles, y la resiliencia urbana futura dependerá de qué tan listos se encuentran los sistemas urbanos para adaptarse en caso de ocurrir (Woods-Ballard et al. 2015). En el año 2013, la Unión Europea, a través de su Comisión Europea, presentó dos documentos donde presentan estrategias y normativas dirigidas a conseguir que el continente europeo sea capaz de afrontar los efectos del Cambio Climático (Baruzzi, Martini, and Saltarelli 2013).

Los pavimentos de hormigón poroso, al ser una infraestructura resiliente, permiten el combatir problemas derivados de los eventos de lluvia, como lo son la escorrentía; al mismo tiempo, prevenir la contaminación del agua y evitar su desperdicio. Considerando también otros beneficios ambientales y de seguridad mencionados con anterioridad, proporcionando bienestar a la población inclusive en casos de necesidad.

### **1.3.5. Drenaje Sostenible**

Como respuesta a la necesidad de Desarrollo Sostenible y la problemática del Cambio Climático, se han desarrollado los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Con el objetivo de mejorar la calidad de vida de la población presente y futura (Woods-Ballard et al. 2015), reduciendo los efectos negativos de suelos urbanos impermeables. A su vez, permite gestionar el agua de lluvia, teniendo un desperdicio menor y mejorando su calidad, al facultar la continuidad del ciclo del agua (Rodríguez-Rojas et al. 2017).

En un inicio el objetivo principal de una red de drenaje era la de retirar el agua proveniente de las lluvias y que se acumulaba en las calles o caminos de las ciudades, a través de la manipulación del trayecto del agua hacia el sistema construido. Con el paso del tiempo, este sistema fue ocasionando que una gran cantidad de agua se contaminara debido a que, durante el trayecto, el líquido arrastraba sólidos, y otras sustancias que la hacían no apta para consumo humano. Sumado a eso, el hecho de que los desechos generados en viviendas, comercios e industrias se encuentran conectados al propio sistema de drenaje (Andrés-Doménech et al. 2018).



La problemática, que ha llevado a que se comience a pensar en drenaje sostenible, proviene de percances más minuciosos y que se han venido presentando poco a poco a lo largo del tiempo, siendo el problema más importante el crecimiento de las ciudades, impermeabilizando o sellando el suelo debido a la construcción de infraestructura para satisfacer las necesidades de la población, interrumpiendo los ciclos hidrológicos. A la vez que las ciudades se extienden, la creciente agua de escorrentía se vuelve un problema. Mientras más superficies impermeables son añadidas a la mancha urbana, se hace necesario el ayudar a la infiltración del agua de lluvia. Esto protege la calidad del agua y reduce la escorrentía del agua de lluvia (USDA 2011).

Debido a esto, se han desarrollado diversos SUDS que permiten la captación del agua procedente de la lluvia, y que sirva para consumo humano, animal e, inclusive, para actividades agrícolas. Entre estos sistemas se pueden encontrar los jardines de biorretención (o jardines de lluvia), techos verdes, pavimentos permeables, pozos de infiltración y las cunetas verdes (Rodríguez-Bayon et al. 2011).

De acuerdo a la clasificación para los SUDS, propuesta por el Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO), de la Universidad de Cantabria, en Santander, España, éstas pueden ser (Rodríguez-Bayon et al. 2011):

- Medidas preventivas:
  - Legislación.
  - Educación.
  - Programación económica.
- Sistemas de infiltración o control en origen:
  - Superficies permeables.
  - Pozos y zanjas de infiltración.
  - Depósitos de infiltración.
- Sistemas de transporte permeable:
  - Drenes filtrantes o drenes franceses.
  - Cunetas verdes.
  - Franjas filtrantes.

- Sistemas de tratamiento pasivo:
  - Depósitos de detención.
  - Estanques de retención.
  - Humedales artificiales.

Todos estos SUDS tienen como objetivo principal la mejor gestión posible del agua de escorrentía superficial para lograr el mayor beneficio posible. Sumado a esto, el valor de añadirle un uso al área donde se encuentra instalado el drenaje sostenible, ya sea para ocio, educación o comodidad (Woods-Ballard et al. 2015). Un ejemplo de esto, sería el proyecto del parque Porte des Alpes, en Lyon, Francia. Aquí se adoptaron técnicas SUDS, haciendo un sistema de distintas combinaciones, como cunetas verdes, drenes filtrantes, estanques de retención y depósitos de infiltración. Estas instalaciones se encuentran actualmente abiertas al público, en donde se pueden realizar actividades educativas, recreativas y deportivas (Perales-Momparler and Andrés-Doménech 2008).

Sin embargo, se considera que el empleo de pavimentos porosos, en este caso de hormigón, son muy importantes ya que su instalación se realiza en la misma infraestructura que demanda la ciudad, determinando que estos sistemas son de los SUDS más importantes.

#### **1.4. El drenaje sostenible en el mundo**

En este apartado se presenta brevemente la evolución del concepto de drenaje sostenible en una muestra representativa de países del mundo, destacando las soluciones y alternativas de países desarrollados como los Estados Unidos o la Unión Europea, y describiendo brevemente la situación actual de las mejores economías latinoamericanas.

##### **1.4.1. Estados Unidos**

Desde finales de la década de los 40, existe en los Estados Unidos el Acta de Control del Agua Contaminada. Habiéndose modificado en dos ocasiones, una en 1956 con el propósito de fortalecer la aplicación de las disposiciones que se encuentran en ella; y luego, en 1965, para establecer estándares de calidad para las aguas superficiales, exigibles

por autoridades estatales y federales (Environmental Protection Agency (EPA) 2000). Tras varios acontecimientos que ocurrieron en el país americano a finales de la década de los sesenta, la población comienza a tomar conciencia y se fomenta el control de la contaminación de las aguas. Con esto se crea la Ley de Agua Limpia (CWA), el Acuerdo de Calidad de Agua de los Grandes Lagos, y se crea la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency (EPA) 2000).

A partir de la década de los setenta, las normativas para gestión del agua, tanto federal como estatal, de los Estados Unidos, se orientaron hacia el control de la escorrentía y las inundaciones generadas por la lluvia. Con eso se pretendió que la calidad del agua de lluvia mejorara y se evitara el depósito de sedimentos en el suelo, así como la erosión del mismo. Es aquí, ya en los años ochenta, que surge el concepto de Mejores Prácticas de Gestión (Best Management Practices, BMP). Este concepto es sinónimo de los Sistemas de Drenaje Sostenible, utilizado en otros países del mundo (Perales-Momparler and Andrés-Doménech 2008). Estos sistemas se estudian en el país desde la década de los 70, siendo pioneros en el tema. Esto con el objetivo de disminuir la contaminación debida a los vertidos de los sistemas de saneamiento urinarios en tiempos de lluvia, reduciendo además los parámetros de diseño del resto de infraestructuras de drenaje urbano (J. Rodríguez-Hernández et al. 2011).

La Agencia de Protección Ambiental exige a los constructores a desarrollar e implementar un programa para la reducción de contaminantes en la escorrentía en proyectos nuevos que resulten en áreas mayores a una hectárea. Con esto, se logra la licencia de Sistema Nacional de Descarga y Eliminación de Contaminantes (NPDES, por sus siglas en inglés – National Pollutant Discharge Elimination System permit). Además, los gobiernos municipales deben implementar estrategias que incluyan BMPs (Obla 2007).

Actualmente, varios tipos de estos sistemas se emplean a lo largo de los Estados Unidos, siendo (Hunt et al. 2009) el estado de Carolina del Norte se considera potencia en el desarrollo e investigación de SUDS a nivel mundial, teniendo dentro de su territorio más de 30 mil SUDS construidos y en funcionamiento, de acuerdo a la información otorgada por el Dr. Bill Hunt III de la Universidad Estatal de Carolina del Norte. En la Figura 3 se

aprecia la instalación de un sistema de captación de agua de lluvia en un estacionamiento de un supermercado en la ciudad de Raleigh, capital de Carolina del Norte.



Photos: S&EC, Inc.

Figura 3. Ejemplo de una instalación para captación de agua de lluvia en el estacionamiento de un supermercado en los Estados Unidos. Fuente: Annette Lucas. Departamento de Calidad Ambiental de Carolina del Norte.

Las regulaciones actuales de los Estados Unidos limitan la escorrentía superficial, y se hace muy costoso para los constructores desarrollar infraestructura, debido al tamaño y costo de los sistemas de drenaje. Es por eso que en ese país se considera los pavimentos permeables de hormigón poroso como una alternativa a disminuir el tamaño y capacidad de otros sistemas de drenaje, ya que éstos disminuyen la escorrentía de áreas pavimentadas (Obla 2007), haciéndolos una opción factible tanto ambiental como económica para los desarrolladores de infraestructura.

#### 1.4.2. Europa

La política ambiental europea se ha ido condicionando por los problemas ambientales a nivel mundial. Con esto, su legislación se basa en compromisos internacionales, pues, hacia finales de los años noventa, alrededor del 35% de sus normativas trataban con aspectos a nivel mundial como el cambio climático, diversidad biológica, entre otros conceptos (Comisión Europea 2000). También, se crean planes y proyectos, como el Proyecto de Ciudades Sostenibles de 1993, teniendo como principal objetivo el hacer ver a la población la importancia de la sostenibilidad, principalmente en

las zonas urbanas del continente europeo (Gracia-Rojas 2015). En materia de los SUDS, éstos son cada vez más reconocidos en el continente europeo ya que se pueden utilizar para beneficio de zonas naturales amenazadas. Al mismo tiempo, esto ayuda a trazar estrategias y planes de acción (Woods-Ballard et al. 2015).

Reino Unido es considerado el pionero en estos sistemas a nivel europeo, introduciendo en su legislación nacional iniciativas e instrumentos relacionados con la gestión de escorrentía y agua superficial, hacia finales del año 2003 (Woods-Ballard et al. 2015). En el tema de pavimentos permeables, se comienzan a estudiar desde la década de los 80 en Reino Unido, publicando hacia el año 2002 un manual (CIRIA 2001) que recoge más de 20 años de experiencias en el diseño y construcción de estos sistemas (J. Rodríguez-Hernández et al. 2011). Al mismo tiempo, en Francia se desarrollaron los firmes permeables a partir de la década de los 70 en ciertos puntos del país, y se destaca la publicación de Legret, en el año 2001 (Legret 2001), acerca de los problemas de escorrentía superficial y contaminación difusa en las ciudades, analizando el uso de firmes permeables como sistema para solucionar estos problemas (J. Rodríguez-Hernández et al. 2011).

Se estima que en Europa, el terreno utilizado para desarrollo urbano es de 1000 km<sup>2</sup> cada año (Rodríguez-Rojas et al. 2018). Es por eso que el uso de SUDS se incrementa y se centra en el control de inundaciones y, recientemente, se ha comenzado a considerar el problema de la contaminación difusa, adoptando criterios que integren el paisaje, el valor social y ambiental (Perales-Momparler, Andrés-Doménech, and Escalante 2008). Este es uno de los principales aspectos estudiados en Alemania, donde los SUDS se encuentran regulados en sus normativas, utilizando los pavimentos permeables desde los años 70 (J. Rodríguez-Hernández et al. 2011).

A pesar de que Europa es pionero en el desarrollo y uso de SUDS, su uso no es el mismo en todos los países que conforman la Unión Europea. De acuerdo a algunos autores, en estos años de desarrollo de políticas ambientales en Europa, el uso de técnicas SUDS estaba siendo más utilizado en los países del centro y norte del continente. Siendo los países del sur, como España, Italia, Grecia y Portugal, quienes contaban con menor desarrollo de estos métodos (Perales-Momparler and Andrés-Doménech 2008). Sin

embargo, se destacan proyectos y obras en el sur del continente, como el estacionamiento experimental “Las Llamas” (Figura 4), en Santander, España, en donde se realizan diversas investigaciones para el análisis de infiltración de agua en cajones de estacionamiento contruidos con diversos materiales, siendo uno de los estacionamientos experimentales en funcionamiento más grandes del mundo, con 45 plazas, y 5 sistemas de pavimentos permeables distintos.



Figura 4. Estacionamiento experimental “Las Llamas” en Santander, España, donde se estudia la permeabilidad de distintos tipos de pavimentos porosos. Fuente: Dr. Jorge Rodríguez Hernández. Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO) de la Universidad de Cantabria.

### 1.4.3. Iberoamérica

A continuación se presenta la situación del drenaje sostenible en diversos países de Latinoamérica y España. Siendo estos seleccionados al constituir España la principal conexión entre Europa y Latinoamérica. Los países latinoamericanos mencionados fueron seleccionados por su papel destacado respecto del total, además de ser de las principales economías de la zona. Influidos también por Estados Unidos y Europa.

#### 1.4.3.1. España

La entrada de España en la Unión Europea supuso un cambio significativo mejorando en gran medida la protección del medio ambiente. En materia de gestión del agua, destacan la Ley 10/2001, de 5 de julio, y el Real Decreto Legislativo 1/2001,

referentes al Plan Hidrológico Nacional y a la Ley de Aguas de España respectivamente. Estas dos normativas se crean con el propósito de atender los problemas hídricos que presenta el territorio español, dando un enfoque global a las soluciones planteadas (Ministerio de Medio Ambiente 2001).

Es de destacar, que, con el paso de los años, el territorio español ha venido desarrollando las tecnologías SUDS, haciendo crecer su interés y comenzando a implementar estos sistemas en sus zonas urbanas. Tal es el caso de los pavimentos permeables, los cuales cuentan cada vez con una mayor importancia e implementación. Ciertos organismos, como por ejemplo el Ayuntamiento de Madrid con la Ordenanza de Gestión y Uso Eficiente del Agua en la Ciudad de Madrid, han estipulado que la cantidad de pavimentos impermeables en la zona urbana debe disminuir. Para esto han establecido criterios de permeabilidad en aceras, bulevares, medianas, plazas, zonas verdes y en otros puntos de tráfico ligero, llegando a reutilizar el agua para riego u otros usos. Esto llega a marcar un parteaguas donde se comienzan a diseñar planes urbanísticos con criterio de SUDS, principalmente en Madrid y Barcelona (Perales-Momparler and Andrés-Doménech 2008).

La primera investigación sobre pavimentos permeables en España data de 1995, destacando el potencial de depuración y reducción de escorrentía de estos sistemas (Jato-Espino et al. 2019). En la década siguiente, el Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO) de la Universidad de Cantabria, introduce el término SUDS en España, desarrollando el primer proyecto de investigación en pavimentos permeables del país (Jato-Espino et al. 2019). Actualmente dicha universidad sobresale por sus contribuciones en desarrollo e investigación de SUDS. En la ciudad de Santander destaca el Parque de las Llamas, apreciado en la Figura 5, donde se colocó un humedal y vegetación varia alrededor en donde se encontraba un vertedero de desechos. Actualmente, se reproducen ahí decenas de especies de aves distintas. En cuanto a los pavimentos permeables, se han desarrollado más de 10 proyectos de investigación en el país desde su introducción a mediados de los años noventa (Jato-Espino et al. 2019).



Figura 5. Parque de las Llamas, en Santander, España. Con el humedal artificial visto de frente. Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Parque\\_de\\_la\\_vaguada\\_de\\_las\\_Llamas#mediaviewer/File:Parque\\_de\\_la\\_Vaguada\\_de\\_las\\_Llamas\\_2.JPG](http://es.wikipedia.org/wiki/Parque_de_la_vaguada_de_las_Llamas#mediaviewer/File:Parque_de_la_Vaguada_de_las_Llamas_2.JPG)

### 1.4.3.2. México

El tema del drenaje sostenible es poco conocido en México. Sin embargo, comienza a llamar la atención debido a las catástrofes naturales que se están originando en diversos puntos del país, principalmente en la zona centro-sur. El crecimiento desmedido y el poco control en el consumo de recursos han originado que cerca de la quinta parte de los mantos acuíferos del país estén sobreexplotados (Gonzalez 2015).

Al mismo tiempo, se destaca que en torno a 260 sitios hidrológicos se encuentran en estados muy contaminados a lo largo del país. Esto genera un incremento muy considerable en el costo económico del gobierno ya que se agotan los recursos y se degrada el medio ambiente. Sumado a eso, el costo de prevenir, controlar y disminuir la contaminación causada por el desconocimiento de la gente, así como del propio gobierno (Gonzalez 2015). El Dr. Ernesto Marín Stillman, investigador del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), bautiza esta falta de conciencia, creando el concepto de analfabetismo hídrico. Haciendo énfasis en que la población mexicana tiene un consumo desmedido del agua, desperdiciándolo en gran medida (DCCS-UNAM 2015).

A pesar de esto, se pueden encontrar, a lo largo del territorio mexicano, diversos proyectos de infraestructura particulares orientados a la gestión del agua y la escorrentía superficial. Entre ellos destaca el proyecto de una planta piloto tipo Humedal Artificial de



Flujo Combinado (Figura 6), de donde se pretende obtener agua tratada apta para riego y protección de vida silvestre, en los canales de la zona de Xochimilco, en la parte sur de la ciudad de México (Arredondo 2017). Además, a mediados de la década de los 90, se introduce el concepto de los pavimentos permeables en México. Desde 1994 los pavimentos de hormigón poroso han sido estudiados, principalmente desde el sector privado, destacando las investigaciones y desarrollos de la empresa mexicana ECOCRETO (ECOCRETO 2011). En esta línea, se han encontrado varios proyectos de tesis en algunas universidades mexicanas, desde el 2009, apuntando a lugares específicos con la intención de introducir los pavimentos de hormigón poroso.



Figura 6. Planta Piloto tipo Humedal Artificial de Flujo Combinado UNAM- UAM-X. Fuente: <http://sabersinfin.blogspot.com/2007/10/inauguraron-hoy-unam-y-uam-x-una-planta.html>

Finalmente, algunos estados, como el Estado de Sonora, en el noroeste del país, han modificado sus leyes internas para incluir el concepto de infraestructura verde. Tal es el caso de la Ley del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente del Estado de Sonora, y la Ley de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano del Estado de Sonora. Las cuales brindan protección al equilibrio ecológico y al medio ambiente, respectivamente (Gobierno del Estado de Sonora 2017).

En suma, se considera que hay una gran oportunidad para desarrollar proyectos sobre pavimentos de hormigón poroso en México para gestión de agua. De acuerdo con información presentada por la Red Interamericana de Academias de Ciencias

(Interamerican Network of Academies of Science – IANAS) en el año 2012, gran cantidad del agua en el país no es tratada, y se mezcla con el agua de drenaje (Jiménez Cisneros and Galizia Tundisi 2012). Adicionalmente, las grandes ciudades, como la Ciudad de México, presentan un problema de contaminación del aire debido a la gran cantidad de vehículos e industria presentes. Medidas como la fotocatalisis y la infraestructura fresca (cool infrastructure) mediante la implementación de ciertos aditivos, podrían prevenir que la temperatura se incrementara en cerca de 4°C en los próximos años (Jiménez Cisneros and Galizia Tundisi 2012).

Con el fin de promover el uso de estos sistemas, el gobierno ha creado gratificaciones a los constructores con el fin de desarrollarlos en sus proyectos. Ejemplos de esto son un descuento del 10% en el impuesto predial por la implementación de azoteas verdes en la ciudad de México (Ramírez 2012), y la aceptación de los pavimentos permeables como parte del área de donación de terreno establecido por ley al realizar un proyecto de construcción, incrementando así el área donde se puede construir y vender, aumentando el ingreso de los inversionistas (Saucedo-Vidal 2010).

#### **1.4.3.3. Colombia**

La capital de Colombia, la ciudad de Bogotá, tiene, al igual que la ciudad de México, un crecimiento rápido y poco controlado que ha generado la impermeabilización de la ciudad, teniendo poca cobertura vegetal que ayude a interceptar el agua de lluvia. Esto ha causado encharcamientos e inundaciones en las vías públicas gracias a la poca capacidad de los colectores de drenaje convencional, en comparación con el volumen de agua pluvial que se recibe en las temporadas de lluvias. Por consiguiente, desde el año 2001, las universidades colombianas han realizado numerosas investigaciones en el tema de la gestión del agua, dando lugar, en cooperación con el gobierno, al desarrollo un manual de SUDS para la Ciudad de Bogotá (Molina, Gutiérrez, and Salazar 2011).

Los SUDS están reconocidos en Colombia por presentar demostradas ventajas sobre los sistemas convencionales. Las principales técnicas de drenaje sostenible se encuentran descritas en la norma técnica NS-085, donde se definen como “el conjunto de soluciones que se adoptan en un sistema de drenaje urbano con el objeto de retener el mayor tiempo

posible las aguas lluvias en su punto de origen sin generar problemas de inundación”. (Norma Técnica de Servicio NS-085 2009).

Desde el año 2010, se ha encontrado que solo ocho tesis de grado relacionadas con los SUDS se han llevado a cabo en Colombia, donde cuatro se refieren a pavimentos de hormigón poroso. A pesar de encontrarse señalado en la normativa del país (Norma Técnica de Servicio NS-085 2009), los SUDS son aún desconocidos y poco aplicados. Referente al hormigón poroso, las investigaciones son aún limitadas, ya que su uso es muy reciente (Ulloa-Mayorga et al. 2018). Para el año 2014, las primeras investigaciones del hormigón poroso como un pavimento sostenible fueron hechas en Colombia, destacando que ayuda a la disminución de la escorrentía (Moujir and Castañeda 2014).

#### **1.4.3.4. Brasil**

Brasil es el país latinoamericano con el mayor número de grandes ciudades, con millones de habitantes cada una, y otro mayor número de ciudades con más de 100 mil habitantes, lo que se traduce en un área impermeabilizada de suelo muy grande, que genera problemas ambientales. Estos hechos hicieron que varias ciudades brasileñas desarrollaran políticas para la preservación de la infiltración del agua en el suelo (Korman 2016).

Estas políticas establecen que un porcentaje del terreno debe ser de carácter permeable para combatir los problemas derivados del sellado del suelo. Estas estrategias varían de ciudad en ciudad. Por ejemplo, la ciudad de Itaijé fijó un porcentaje entre el 10-20% de suelo permeable, dependiendo de la zona urbana de la que se hable de la ciudad (Korman 2016). La ciudad de Porto Alegre implementó algunos principios del Plan Maestro de Drenaje Urbano (donde se plantea que se necesita acción pública a través de la regularización y la planificación, en términos de drenaje), estableciendo que cada zona urbana no debe de aumentar el flujo natural, o escorrentía, durante eventos de lluvia (Azzout et al. 1995).

A su vez, el Plan Maestro de Drenaje Urbano quiere tomar medidas para el control de la escorrentía, diciendo que será responsabilidad de quien produzca el aumento de la

escorrentía y la contaminación del agua de lluvia. Dividiendo las medidas en dos grupos (Azzout et al. 1995):

- La retención del agua de lluvia, para controlar la escorrentía y limitar la contaminación aguas abajo (retención y dispositivo de detención).
- La infiltración del agua cuando sea posible, para reducir la escorrentía de aguas abajo (dispositivos de infiltración).

Estas medidas están en discusión para el control de la escorrentía en Brasil, desde el enfoque de recuperación de agua en las zonas urbanas. Esto sugiere una tendencia hacia el uso de técnicas compensatorias que superen las soluciones ineficientes que se utilizan actualmente (Cross et al. 2001). A pesar de esto, los pavimentos de hormigón poroso están normalizados en Brasil desde el año 2015. Sin embargo, su uso e investigación ha sido muy limitado, siendo la causa de la falta de confianza por parte de la industria de la construcción (De Sousa Luis and Gastao Ferreira 2016).

#### **1.4.3.5. Chile**

En Chile es el Estado el ente responsable de evacuar y drenar el agua de lluvia. La red de drenaje del país se divide en dos: una red primaria y otra secundaria. dichas redes se encuentran a cargo de organismos diferentes, el Ministerio de Obras Públicas (MOP) de la primaria, y el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) de las secundarias. A pesar de esto, debido a la falta de un sistema eficiente, Chile es escenario de grandes inundaciones cuando llueve, generando pérdidas y molestias a sus habitantes. Diversos autores han determinado que el problema recae en el objetivo con el que se diseñan los sistemas de drenaje, donde se busca una rápida evacuación del agua de escorrentía, llevando el agua hacia abajo, reemplazando las redes de drenaje naturales (Gironas 2015).

A su vez, otros impactos se derivan de la mala gestión de las aguas de lluvias en el país chileno, como lo son las descargas sin tratamiento de sistemas unitarios, el lavado de contaminantes urbanos hacia cuerpos receptores, la erosión de cauces, y la degradación de ambientes acuáticos, principalmente localizados debajo de las ciudades (Gironas 2015).

Dicha mala gestión proviene de un entendimiento erróneo del medio natural, ya que no se considera a las cuencas como una unidad territorial. Por consiguiente, se carecen de objetivos ambientales que se deriven de las características propias de cada cuenca. También, y como problema no sólo en Chile, sino en América Latina en general, el utilizar más los sistemas de conducción y evacuación, sobre las técnicas de infiltración y almacenamiento de agua, sumado a la mala planificación territorial de las ciudades, son sólo algunas causas de los problemas que se viven en el país (Gironas 2015).

Con todo, en el año de 1996, Chile desarrolló el primer manual de Drenaje Urbano en español, con técnicas alternativas para la gestión del agua de lluvia en las ciudades, donde, a pesar de ello, pocos proyectos se han desarrollado en los últimos años (Gironas 2015). En algunos estudios desarrollados, materiales de construcción alternativos (incluidos el hormigón poroso) son evaluados con la intención de obtener soluciones e incrementar la competitividad de los pavimentos de hormigón (Masana 2009). En el año 2003, un estacionamiento experimental de hormigón poroso fue construido en la Universidad Católica de Chile, donde se evalúa la lluvia y el flujo del agua. Además, desde el año 2001, esta universidad desarrolló mezclas de hormigón porosas para comercializar, en cooperación con empresas privadas (Laura Portugal 2009).



## **CAPÍTULO II. ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE**

En el presente capítulo se realiza una revisión del proceso de construcción del hormigón poroso, detallando brevemente los elementos que lo integran, destacando las principales propiedades que presenta la mezcla final, en términos de resistencia mecánica, permeabilidad y distintas funciones adicionales.

## **2.1. Firmes permeables**

### **2.1.1. Definición**

Los firmes permeables son estructuras adecuadas para que el tráfico rodado y los peatones puedan transitar sobre ellas, mientras permiten que el agua proveniente de la lluvia se infiltre a las capas inferiores hasta llegar al subsuelo o se almacene para un uso posterior. Estos sistemas permiten tener un mejor control de la escorrentía superficial, disminuyendo la contaminación del agua, y ayudando a prevenir posibles accidentes de tráfico e incrementar la calidad de vida de los ciudadanos (Woods-Ballard et al. 2015).

Existen diversos tipos de firmes permeables, como lo son los pavimentos de asfalto poroso, hormigón poroso (con cemento u otro tipo de ligante, como resinas), adoquines con ranuras o porosos, o superficies de césped reforzadas de distintos tipos, entre otros. Hay otros sistemas, considerados de drenaje sostenible, que se colocan en lugares adyacentes a los pavimentos o aparcamientos, como lo son las cunetas verdes, sistemas de biorretención, entre otros. Sin embargo, los firmes permeables se consideran los SUDS más completos, a la vez que pueden conectarse a otros formando la cadena de tratamiento (Jorge Rodríguez-Hernández 2008; Sañudo-Fontaneda, Rodríguez-Hernandez, et al. 2014).

### **2.1.2. Clasificación**

Son varias las clasificaciones que se han hecho a los firmes permeables. Los investigadores basan sus selecciones en diversas características del pavimento, como el material de la superficie, o la función hidráulica que tendrá el pavimento (laminación, recarga o captación). Siendo las categorías a continuación descritas las consideradas más claras y fundamentales: Firmes permeables con pavimentos permeables discontinuos y firmes permeables con pavimentos permeables continuos. Siendo los primeros los pavimentos formados por materiales impermeables que logran infiltrar el agua al contar con ranuras o espacios en la superficie. Ejemplos de estos pavimentos son los conformados por adoquines con ranuras o juntas abiertas. Los pavimentos permeables continuos son aquellos que su estructura está conformada por materiales porosos, permitiendo una infiltración uniforme a lo largo de toda la superficie del pavimento. Ejemplos de este tipo son los



pavimentos de hormigón poroso y los pavimentos de asfalto poroso (J. Rodríguez-Hernández et al. 2011).

### **2.1.3. Ventajas**

Son muchas las ventajas que presentan los pavimentos permeables. Entre las cuales podemos destacar:

- **Ventajas Ambientales**
  - No se interrumpe el ciclo del agua natural, permitiendo que el agua se infiltre a los mantos subterráneos, rellenándolos.
  - Mediante el filtrado a través de las capas del firme, el agua se limpia de ciertos contaminantes presentes en ella.
- **Ventajas Económicas**
  - Se evitan costos de construcción de los sistemas de drenaje asociados a pavimentos impermeables.
  - Se reducen costos de mantenimiento en el pavimento por daños debidos al agua.
- **Ventajas Sociales:**
  - Se incrementa la seguridad vial al disminuir los charcos en los pavimentos.
  - Se disminuye la contaminación de ruido ocasionada por la interacción de los neumáticos con el pavimento, incrementando el confort en los habitantes.

## **2.2. Hormigón Poroso**

### **2.2.1. Definición**

Como hormigón poroso se entiende cualquier mezcla aglomerada compuesta fundamentalmente por agregados (áridos) y ligante (cemento hidráulico, betún bituminoso,

resina epoxi, geopolímero, etc). El alcance de esta tesis doctoral se centra en los hormigones porosos hidráulicos, explorando la opción de geopolímeros. Así, la ACI 522 (American Concrete Institute ACI Committee 522 2010) define al hormigón poroso como un tipo especial de hormigón con una alta porosidad, y vacíos continuos (huecos interconectados). Es un material compuesto por Cemento Portland, agregado grueso, pocos agregados finos (incluso puede ser ninguno), aditivos y agua (Nghopok et al. 2017), que se utiliza en la construcción de estacionamientos, calles secundarias, aceras y otros tipos de construcciones en todo el mundo (Golroo and Tighe 2011).

El tamaño de agregado utilizado en las mezclas de hormigón poroso se sitúa normalmente entre los 2 y los 12mm. El contenido de vacíos puede variar entre el 18% y el 35%, alcanzando una resistencia a la compresión aproximada entre 2.8 y 28MPa. La capacidad de infiltración de los hormigones porosos generalmente está entre los 0.14 y 1.21cm/s. Estos valores dependen en gran medida del tamaño del agregado y de la densidad de la mezcla (American Concrete Institute ACI Committee 522 2010).

Las mezclas de hormigón poroso se componen de una adecuada combinación de agregado, ligante (cemento), aditivos y agua (Tennis, Leming, and Akers 2004). Las propiedades resultantes de las mezclas dependen mucho de las características del agregado, su tamaño, el cemento y aditivos empleados, así como la cantidad de agua utilizada. Esto hace que el producto final varíe en sus propiedades mecánicas e hidráulicas. De acuerdo a la literatura estudiada, las propiedades volumétricas son clave en el comportamiento del hormigón poroso, influenciando el comportamiento mecánico, hidráulico y funcional (W. Martin, Putman, and Neptune 2014; Sansalone, Kuang, and Ranieri 2008). El principal dilema es que a mayor contenido de vacíos, mayor capacidad de infiltración (Bean, Hunt, and Bidelspach 2007), pero menor resistencia mecánica (Crouch, Pitt, and Hewitt 2007; Liu and Cao 2009).

Una proporción específica para el diseño de mezclas de hormigón poroso aún no ha sido definida. Esto, principalmente, por el hecho de que es un hormigón especial con distintas mezclas y compactaciones, ya que se pretende crear un balance entre el contenido de vacíos y la resistencia a compresión (Chindaprasirt et al. 2008).

Sin embargo, diferentes mezclas han sido creadas y analizadas por distintos autores, obteniendo resultados únicos en términos de permeabilidad y resistencia a compresión, pero siempre en los rangos mencionados anteriormente, alcanzando valores excepcionales por encima de los 40Mpa, para la compresión, en algunos casos, y alrededor de 0.20-0.90cm/s para la permeabilidad. Los resultados variando, ante todo, por el tipo de agregado, relación agua-cemento y el aditivo empleado (AMDE and ROGGE 2013; Bonicelli, Giustozzi, and Crispino 2015; Hesami, Ahmadi, and Nematzadeh 2014; B. S. Mohammed, Nuruddin, and Dayalan 2013; W. Shen et al. 2013).

### **2.2.2. Componentes**

Los componentes principales del hormigón poroso son el agregado grueso, el cemento y el agua. En la mayor parte de los casos, para mejorar las propiedades, sobre todo mecánicas, de la mezcla, se introduce agregado fino o arena, la cual tiende a disminuir la capacidad de infiltración. Por último, los aditivos son empleados con la intención de mejorar en aspectos mecánicos a las mezclas, así como el proporcionar otras características que por sí misma no podría tener, como lo son mejor trabajabilidad en ciertas condiciones o funcionalidades medioambientales como la fotocatalisis.

#### **2.2.2.1. Agregados**

El tamaño del agregado en las mezclas de hormigón poroso es un factor clave que condiciona su resistencia y permeabilidad. Normalmente se utiliza un solo tamaño de agregado estándar (Agar Ozbek et al. 2013), el cual ronda entre 4-12mm aproximadamente. Al aumentar el tamaño del agregado, se incrementa el volumen de huecos, y por consiguiente también la capacidad de infiltración, pero las propiedades mecánicas tienden a disminuir (Chen et al. 2013). También, el tamaño del agregado define la estructura de los poros de la mezcla porosa (Bonicelli et al. 2015), utilizándose, normalmente, un volumen de agregado entre 50-65% del total de la mezcla (Chandrappa and Biligiri 2016).

El agregado fino (arenas), ayuda a que la mezcla de hormigón poroso gane más resistencia tanto a compresión como a flexión, otorgando un volumen de huecos menor (Agar-Ozbek et al. 2013; Bonicelli et al. 2015; Crouch, Pitt, and Hewitt 2007; Lian and

Zhuge 2010; J. Yang and Jiang 2003). Esto debido a que la densidad de las partículas por unidad de volumen aumenta, incrementando el área o superficie de agregado, así como su revestimiento, resultando en una mayor conexión de puentes de pasta de cemento (Crouch, Pitt, and Hewitt 2007; Yahia and Kabagire 2014).

Generalmente, se evita el utilizar agregado fino en las mezclas de hormigón poroso (Agar-Ozbek et al. 2013). Sin embargo, algunas investigaciones han señalado que el uso de agregado fino en un rango entre 5-20% del peso total de la mezcla, ayuda a mejorar tanto la resistencia a compresión (Crouch, Pitt, and Hewitt 2007; Lian and Zhuge 2010), como la resistencia a tensión, la rigidez, y previene el desprendimiento de partículas de la mezcla (Bonicelli, Giustozzi, and Crispino 2015). Cuando se utiliza el agregado fino, su tamaño es menor a los 2mm.

En cuanto al tipo de roca, se han realizado muchas y diferentes investigaciones para poder determinar el agregado más adecuado para una mezcla de hormigón poroso. Algunos estudios han demostrado, por ejemplo, que las mezclas elaboradas con dolomita tuvieron una resistencia a compresión un 20% mayor, y a flexión entre 6-50% mayor, que mezclas hechas con caliza y cuarzo (Lian and Zhuge 2010). Otros estudios, comparando mezclas con basalto triturado y grava de río, evidenciaron que la grava de río resistía un 15% menos a compresión que el basalto, pero soportaba un 3.5% más a tensión (Agar-Ozbek et al. 2013). Otros investigadores quisieron sustituir el agregado virgen con agregado a base de hormigón reciclado, logrando incrementar la capacidad de infiltración y el volumen de huecos en un 93%, pero obteniendo capacidades mecánicas muy bajas en sus mezclas, disminuyendo la resistencia a compresión en un 32% y la resistencia a tensión en un 25% (Swe, Jongvivatsakul, and Pansuk 2016). Con todo, diversos autores afirman que las rocas ígneas son el mejor tipo de agregado a utilizar ya que presentan una gran fuerza y durabilidad (Lian and Zhuge 2010). En todos los casos, se observa una proporcionalidad entre la resistencia del tipo de roca empleada y la resistencia final del hormigón.

#### **2.2.2.2. Cemento y Agua**

El Cemento Portland tipo I es el material cementicio más utilizado en el hormigón poroso (Chandrappa and Biligiri 2016; Chen et al. 2013; Crouch, Pitt, and Hewitt 2007; H.

K. Kim and Lee 2010; Lee et al. 2011; Lian and Zhuge 2010). Este es el cemento más común, utilizado cuando no hay especificaciones especiales que atender. Se compone en su mayoría por clinker (54-90%) y yeso, y se usa normalmente en dosificaciones en el rango de 270-415kg/m<sup>3</sup> (American Concrete Institute ACI Committee 522 2010). Sin embargo, de acuerdo a la literatura analizada, existen otros tipos de materiales cementicios que pueden ser utilizados en estas mezclas, como lo son los cementos mezclados y los materiales cementicios suplementarios, como el humo de sílice, la ceniza volcánica (American Concrete Institute ACI Committee 522 2010; Chen et al. 2013; Crouch, Pitt, and Hewitt 2007; H. K. Kim and Lee 2010; Lee et al. 2011; Lian and Zhuge 2010; Rangelov et al. 2016; Tennis, Leming, and Akers 2004; Zhong and Wille 2016), o cementos puzolánicos (Chen et al. 2013; Lee et al. 2011; B. S. Mohammed, Nuruddin, and Dayalan 2013). A pesar de esto, algunos estudios han demostrado que la resistencia mecánica de las mezclas de hormigón poroso tienden a disminuir en un rango de 20-30% cuando se utilizan materiales cementicios suplementarios distintos del clinker (Chandrappa and Biligiri 2016; Fu et al. 2014). Por lo tanto, cuanto mejor es el cemento, más seguridad tienen los puentes de mortero que unen los agregados.

La relación agua-cemento (a/c) es uno de los principales factores en cuanto a la resistencia y permeabilidad del hormigón poroso. Un exceso en la cantidad de agua conduciría a que la pasta se drene entre los espacios producidos por el agregado, llegando a colmar el sistema de poros (American Concrete Institute ACI Committee 522 2006). Además, conteniendo el exceso de agua dentro de la pasta de cemento, resultando en mezclas más débiles (AMDE and ROGGE 2013; American Concrete Institute ACI Committee 211 2002). Algunos estudios en laboratorio han presentado resultados mecánicos e hidráulicos aceptables con relaciones agua-cemento (a/c) en el rango de 0.34-0.38 (Lian and Zhuge 2010). Pero, aun así, otros autores han empleado relaciones en el rango de más amplio de 0.20-0.42, debido principalmente a los aditivos empleados (Bonicelli, Arguelles, and Pumarejo 2016; Brake, Allahdadi, and Adam 2016; Chen et al. 2013; Crouch, Pitt, and Hewitt 2007; Ghashghaei and Hassani 2016; Giustozzi 2016; Ibrahim et al. 2014; Jang et al. 2015; Khankhaje et al. 2017, 2016; Y. J. Kim, Gaddafi, and Yoshitake 2016; Lee et al. 2011; Lian and Zhuge 2010; Lim, Tan, and Fwa 2013; Rangelov et al. 2016; Torres, Hu, and Ramos 2015; J. Yang and Jiang 2003; Zaetang et al. 2013). La

relación agua-cemento (a/c) máxima recomendada para obtener buenas características mecánicas, ronda entre 0.40-0.45 (AMDE and ROGGE 2013; American Concrete Institute ACI Committee 211 2002). En la Tabla 3, se pueden observar los parámetros en las cantidades de cemento, agua y relación agua-cemento (a/c) utilizadas por algunos investigadores encontrados en la literatura analizada, variando su cantidad dependiendo de la relación a/c, así como de la porosidad que se desea. Esto depende de la persona que diseñe el pavimento, considerando el uso que tendrá, la resistencia requerida y la permeabilidad deseada.

Tabla 3. *Parámetros en componentes del hormigón poroso. Fuente: Elaboración propia.*

Valor	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Agua (kg/m <sup>3</sup> )	a/c
Mínimo	150.00	50.00	0.20
Máximo	560.00	181.00	0.42

A su vez, la Tabla 4 muestra la resistencia a compresión (FC) que se pudieran obtener para ciertas relaciones de agua-cemento (a/c) dadas (Guevara et al. 2011). Si bien estos valores son teóricos, pueden dar una idea de los valores que se pueden adquirir, así como el observar el comportamiento de las mezclas, donde a menor a/c (mayor cantidad de cemento), la FC incrementa.

Tabla 4. Resistencia a compresión (FC) para ciertas relaciones de agua-cemento(a/c). Fuente: Guevara et al. 2011.

a/c	FC (kg/cm <sup>2</sup> )	FC (Mpa)
0.36	420.00	41.19
0.40	370.00	36.28
0.45	340.00	33.34
0.50	295.00	28.93
0.55	275.00	26.97
0.60	230.00	22.56
0.65	220.00	21.57
0.70	185.00	18.14
0.75	165.00	16.18
0.80	140.00	13.73

### 2.2.2.3. Aditivos y Adiciones

Un aditivo es, por definición de la norma ASTM C125, un material (que no es agua, agregado, arena o cemento) que reacciona químicamente con el agua para modificar las propiedades de los hormigones, como lo son los superplastificantes o moduladores de viscosidad. Las adiciones son productos de origen mineral cuyo objetivo es el de reaccionar

con la pasta de cemento (cemento y agua) para incrementar la resistencia mecánica y durabilidad del hormigón, como lo son las fibras. La falta de agregado fino en las mezclas porosas puede llegar a reducir la resistencia a compresión en aproximadamente un 60% (Hidayah, Hasanah, and Ramadhansyah 2014). Además, a mayor cantidad de huecos en la mezcla, se obtiene un esqueleto granular más delgado y débil, disminuyendo la capacidad de resistencia. Distintos autores han utilizado diversos aditivos y adiciones, variando en sus resultados, como puede verse en la Tabla 5, donde las adiciones se resaltan en color gris claro.

El humo de sílice y los reductores de agua, tienden a ser los aditivos más empleados en las mezclas de hormigón poroso (Agar-Ozbek et al. 2013; Bonicelli, Giustozzi, and Crispino 2015; Chen et al. 2013; Crouch, Pitt, and Hewitt 2007; H. K. Kim and Lee 2010; Lee et al. 2011; Lian and Zhuge 2010; J. Yang and Jiang 2003). El humo de sílice ayuda a que la mezcla alcance valores más altos de resistencia a compresión, pero hace que la mezcla requiera más agua (Malhotra and Carrette 1983). Sin embargo, al combinarlo con un reductor de agua, algunos estudios demostraron una mejoría, tanto mecánica como hidráulica, en la mezcla porosa (Lian and Zhuge 2010; J. Yang and Jiang 2003).

Son destacables también algunos investigadores que combinaron polímeros de etilvinilacetato (EVA) con emulsiones acrílicas, y obtuvieron mezclas con resistencia a flexión en el rango de los 7.0 MPa, un 20% más que en sus mezclas con humo de sílice y reductores de agua. En cuanto a la resistencia a compresión, los resultados fueron similares (32-44MPa), así como en el contenido de huecos (15-25%) (Chen et al. 2013).

Existen otros aditivos utilizados como los inclusores de aire, modificadores de viscosidad, y retardantes. Estos pueden ayudar a incrementar el contenido de vacíos, modificar la viscosidad de la mezcla y a demorar el tiempo de secado del hormigón (Agar-Ozbek et al. 2013; AMDE and ROGGE 2013; Bonicelli, Giustozzi, and Crispino 2015; Chen et al. 2013; Crouch, Pitt, and Hewitt 2007; H. K. Kim and Lee 2010).

Tabla 5. *Aditivos y adiciones utilizados por diversos autores para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón poroso y lograr tener una capacidad de infiltración aceptable. Fuente: Elaboración propia.*

Autor	Aditivo/ Adición	Resultado/conclusión
(Bhutta, Tsuruta, and Mirza 2012).	Reductor de agua de alto rango y polvo de polímero a base de celulosa soluble en agua (agente cohesivo)	El reductor de agua y el agente cohesivo, juntos, pueden mejorar la fuerza de la mezcla debido a una fuerte adherencia entre la pasta y el agregado. Sin embargo, la porosidad se afecta.
(Rangelov et al. 2016)	Fibras de carbón	El uso de fibras de carbón resultó en mejorar significativamente la trabajabilidad de la mezcla, sumado a una menor, pero más consistente, porosidad. A pesar de ello, los índices de infiltración se incrementaron.
(Chandrappa and Biligiri 2017)	Plastificante a base de lignosulfato	Se utilizó a un 0.2% del peso del cemento, y se concluyó que el plastificante ayuda a incrementar la plasticidad o viscosidad del hormigón
(Brake, Allahdadi, and Adam 2016)	Superplastificante de policarboxilato tipo I (SP) y un agente modificador de la viscosidad tipo S.	De acuerdo a la norma ASTM C1017, SP ayuda a producir un hormigón más fluido sin necesidad de adicionar más agua y no retarda el ajuste del hormigón. ASTM C494 define los aditivos tipo S como aditivos de comportamiento específico, donde su función es la de modificar el límite de elasticidad y la viscosidad plástica del hormigón.
(Rehder, Banh, and Neithalath 2014)	Monofilamento/ fibras de polipropileno fibriladas.	Encontraron que las fibras no tienen influencia alguna en la fuerza a compresión de la mezcla (convencional o porosa). Las fibras ayudan a mejorar la capacidad a flexión, aumentando ésta al incrementar la porosidad.
(Zhong and Wille 2015)	Humo de sílice (SF), polvo de sílice (SP) y un reductor de agua de alto rango (HRWR).	Hicieron dos tipos de mezclas diferentes, una con los aditivos y otra sin aditivos. En sus resultados obtuvieron que la mezcla con aditivos alcanzaba valores más altos de fuerza mecánica. En cuanto a características hidráulicas, los resultados fueron similares entre las dos mezclas.
(Jang et al. 2015)	Ceniza de carbón y aglutinante geopolimérico	Entre los beneficios de estos materiales juntos están un peso bajo, desarrollo de fuerza a temprana edad (en comparación con hormigón convencional). Además, presentan una fuerza a compresión aceptable.
(Yusak et al. 2016)	Nanosílice	Este aditivo mejora la unión entre el agregado y la pasta de cemento mejora, así como las propiedades mecánicas de la mezcla.
(Koupai et al. 2016)	Escoria de hierro	El objetivo del experimento era mejorar los parámetros de la demanda química de oxígeno (removiendo 44%), turbiedad (removiendo 91%), contaminación de metales pesados de plomo (removiendo 95%) y sólidos suspendidos (removiendo 95%), en una escorrentía urbana, teniendo muy buenos resultados.
(Ramadhansyah et al. 2014)	Microsílice	Se utiliza como reemplazo del cemento con la intención de mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla.
(J. Li et al. 2017)	Agente de expansión de tipo U (UEA), superplastificante, látex de estireno-butadieno, sol de sílice y fibras de polipropileno (PP).	Se estableció una proporción óptima para un hormigón poroso de alta resistencia, obteniendo fuerza a compresión alrededor de 70 MPa y una fuerza a flexión alrededor de 10 MPa. Se tuvo buena permeabilidad con una porosidad baja al diseñarse una estructura innovadora de poros.
(Khankhaje et al. 2016)	Aceite de cáscara de almendra de palma (OPKS)	Sus resultados demostraron que el OPKS aumenta el contenido de vacíos de la mezcla porosa, disminuyendo las propiedades mecánicas.
(W. Shen et al. 2013)	Látex de estireno-butadieno (caucho)	Sustituyeron el agregado con el látex. Entre sus resultados, tuvieron una fuerza a compresión baja, sin embargo, la fuerza a flexión aumentó debido a la elasticidad del caucho. Se tuvo, además, un 18% de porosidad, con 0.116 cm/s de permeabilidad.
(Chen et al. 2013)	Polímero de Etilvinilacetato	Se obtuvieron valores entre 32-46 MPa a los 28 días. La diferencia con un hormigón convencional radica en el tiempo para adquirir la resistencia, ya que adquiere su fuerza lento al principio, y va incrementando su rapidez a lo largo de los 28 días.
(Lee et al. 2011)	Fibras de acero	Entre las muestras realizadas, la que se hizo con fibras de acero y un 10% humo de sílice tuvo la mayor resistencia a compresión, con 275.5 kg/cm <sup>2</sup> , y una resistencia a flexión de 48.11 kg/cm <sup>2</sup> .
(Gesoğlu et al. 2014)	Desecho de caucho de neumáticos	Reemplazar el agregado natural con partículas de caucho de neumáticos, resultó en un incremento significativo de la tenacidad y ductilidad del hormigón, así como de su capacidad de amortiguación.

Las mezclas de hormigón poroso tienden a secar rápidamente, por lo que los aditivos retardantes y los estabilizadores de hidratación suelen ser muy utilizados también para mejorar sus características finales (Tennis, Leming, and Akers 2004).



Tras analizar las referencias consultadas, la Tabla 6 indica los aditivos que más se han utilizado en las mezclas de hormigón poroso alrededor del mundo con el objetivo de mejorar sus propiedades y trabajabilidad.

Tabla 6. *Aditivos con mayor uso en las mezclas de hormigón poroso alrededor del mundo para mejorar las propiedades mecánicas, hidráulicas y trabajabilidad. Fuente: Elaboración propia.*

Aditivo	Comentario	Referencia
Reductor de agua y reductor de agua de alto	-Disminuye la cantidad de agua requerida en mezclas de hormigón poroso. -Incrementa la fuerza a compresión, flexión y tensión.	(Agar-Ozbek et al. 2013; Bhutta, Tsuruta, and Mirza 2012; Bonicelli, Giustozzi, and Crispino 2015; Chen et al. 2013; Crouch, Pitt, and Hewitt 2007; H. K. Kim and Lee 2010; Lee et al. 2011; Lian and Zhuge 2010; J. Yang and Jiang 2003)
Humo de sílice	-Se utiliza normalmente en combinación con los WR o HRWR, teniendo mejoras en la fuerza a compresión, tensión y flexión. -Si se utiliza por sí solo, puede ocasionar problemas de segregación en la mezcla, así como tener efectos limitados en las propiedades mecánicas de la misma.	(Agar-Ozbek et al. 2013; Chen et al. 2013; Lee et al. 2011; Lian and Zhuge 2010; J. Yang and Jiang 2003)
Incluidor de aire	-Reducen la viscosidad de la pasta de cemento. -Incrementan el contenido de vacíos. -Incrementan la fuerza de la mezcla para la misma viscosidad de la pasta de cemento.	(Bhutta, Tsuruta, and Mirza 2012; Bonicelli, Giustozzi, and Crispino 2015; Chen et al. 2013; J T Kevern 2010; H. K. Kim and Lee 2010)
Retardantes	-Incrementan el tiempo de trabajabilidad retardando el endurecimiento del hormigón. -Puede ocurrir que la pasta de cemento se vaya al fondo del estrato.	(Agar-Ozbek et al. 2013; AMDE and ROGGE 2013; Crouch, Pitt, and Hewitt 2007)
Modificador de viscosidad	-Modifican la viscosidad de la pasta de cemento.	(AMDE and ROGGE 2013; Bhutta, Tsuruta, and Mirza 2012; Bonicelli, Giustozzi, and Crispino 2015; Crouch, Pitt, and Hewitt 2007)

Además, algunas investigaciones han utilizado fibras de celulosa como adiciones, concluyendo en que no tienen una influencia considerable en las propiedades mecánicas de las mezclas (AMDE and ROGGE 2013; Lee et al. 2011; Rehder, Banh, and Neithalath 2014; W. Shen et al. 2013). El polímero EVA ha mostrado el mejor comportamiento como adición, según la bibliografía revisada. Probablemente por la interacción química que produce con el cemento portland, que genera un retraso en la hidratación del cemento, así como por la formación de compuestos de calcio (Silva, Roman, and Gleize 2002). Algunos investigadores alcanzaron con ello resistencias a compresión de hasta 60MPa y a flexión sobre 6MPa. Resultados similares pueden obtenerse con el acetato de polivinilo, aunque éste gana fuerza más lentamente (Giustozzi 2016).

Otros estudios recientes han intentado utilizar elementos reciclados como adiciones. Por ejemplo, cenizas de carbón, trozos de neumáticos, hormigón reciclado y áridos reciclados (Jang et al. 2015; Y. J. Kim, Gaddafi, and Yoshitake 2016; Ngohpok et al. 2017; Swe, Jongvivatsakul, and Pansuk 2016). Sin embargo, los resultados mecánicos no han sido

extraordinarios, no logrando superar los 18MPa de resistencia a compresión en ninguno de los casos.

### **2.2.3. Compactación de pavimentos de hormigón poroso**

El método y fuerza de compactación es una característica crítica que determinará el comportamiento que tendrá el pavimento durante su tiempo de vida (Bonicelli et al. 2015). Es sabido que los resultados en laboratorio son distintos a los obtenidos en campo. Algunos estudios señalan al método de compactación empleado como la causa de la falla en algunos pavimentos (Giustozzi 2016; Lian and Zhuge 2010). Además, como las mezclas de hormigón poroso son un tipo diferente y especial de hormigón, comparado con un hormigón convencional, un nivel de compactación óptimo debe de realizarse para lograr obtener una permeabilidad y una resistencia mecánica adecuada (Chandrappa and Biligiri 2017; J. T. Kevern, Schaefer, and Wang 2009).

Actualmente aún no se encuentran muchos estudios relacionados con la compactación en pavimentos de hormigón poroso, principalmente porque se comparan con hormigón convencional, que usualmente se compacta manualmente o con vibrador. Pero algunos estudios concluyen en que los ensayos realizados en hormigón convencional no aplican en hormigón poroso (Rizvi et al. 2009). Por ejemplo, el ensayo de revenimiento del hormigón no es útil en mezclas de hormigón poroso debido a su alta porosidad y mortero más seco de lo normal (J. T. Kevern, Schaefer, and Wang 2009). Además, algunos estudios realizados en hormigón poroso han empleado la compactación giratoria, simulando las condiciones de campo (J. T. Kevern, Schaefer, and Wang 2009). Finalmente, otros investigadores compactaron sus muestras de hormigón poroso con un martillo proctor estandar, en una sola capa con 20 golpes, tratando de simular la compactación en la superficie (Rizvi et al. 2009). Las conclusiones de todos estos estudios confirman que las características finales del hormigón poroso dependen en gran medida de la compactación, quedando justificado el interés de investigación de la misma al tratarse de un procedimiento común y barato que podría tener más influencia que aditivos más costosos.

#### 2.2.4. Relación entre porosidad y resistencia

Estudios recientes se han centrado en la relación entre la resistencia a compresión, contenido de huecos y capacidad de infiltración al experimentar con diferentes diseños de mezclas y aditivos. La relación agua-cemento ( $a/c$ ) está muy ligada con ciertas propiedades del hormigón, de ahí la importancia de controlarla para que la mezcla cumpla los requerimientos establecidos (Guevara et al. 2011). Sin embargo, la tecnología actual de pavimentos porosos no está desarrollada lo suficiente, limitando su uso a construcciones de cargas ligeras como banquetas (aceras) o estacionamientos (J. Li et al. 2017).

Los métodos generales para mejorar las características de hormigón poroso son el mejorar el tipo y tamaño de agregado (Ćosić et al. 2015; J. Yang and Jiang 2003), así como la relación agua-cemento ( $a/c$ ) (Lian and Zhuge 2010), e implementando, en ciertos casos, aditivos/adiciones para fortalecer la mezcla y mantener, o incrementar, la cantidad de huecos (J. Yang and Jiang 2003). La Tabla 7 muestra los resultados más destacados obtenidos por algunos autores en los últimos años.

El diseño de hormigón poroso se basa en una previa cantidad de huecos objetivo (Chu, Fwa, and Tan 2017; Jang et al. 2015), normalmente en un 25% en promedio (Bonicelli, Arguelles, and Pumarejo 2016; Brake, Allahdadi, and Adam 2016; Chen et al. 2013; Crouch, Pitt, and Hewitt 2007; Ghashghaei and Hassani 2016; Giustozzi 2016; Ibrahim et al. 2014; Jang et al. 2015; Khankhaje et al. 2017, 2016; H. K. Kim and Lee 2010; Lee et al. 2011; Lim, Tan, and Fwa 2013; Torres, Hu, and Ramos 2015; Zaetang et al. 2013). Teniendo las propiedades mecánicas como variables, y dentro de los rangos generales comentados previamente, algunos autores obtuvieron valores muy bajos, de 1MPa (Adewumi et al. 2016; Ibrahim et al. 2014) y muy altos, hasta de 60MPa (Zhong and Wille 2015, 2016) para la resistencia a compresión. Como resultado, muchos estudios se han concentrado en las propiedades mecánicas. Algunos autores lograron valores de resistencia a compresión desde los 6.5MPa hasta los 18.6MPa, obteniendo un porcentaje de huecos de 31.34% y 18.90% respectivamente. Esto permitió una infiltración de 1.43 m/s y 0.53cm/s respectivamente (Torres, Hu, and Ramos 2015).

Tabla 7. *Estudios recientes de mezclas de hormigón poroso en los últimos años con sus resultados mecánicos e hidráulicos. Fuente: Elaboración propia.*

Referencia	Fuerza mecánica a los 28 días (MPa)			Propiedades hidráulicas		a/c	Tamaño del agregado (mm)
	Compresión	Flexión	Tensión	Porosidad (%)	Permeabilidad (cm/s)		
(Zaetang et al. 2013)	2.47-5.99	-	0.47-0.99	15.5-31.80	0.30-4.77	0.24	4.80-9.50
(Ibrahim et al. 2014)	1.06-6.95	-	0.21-1.32	30.00-42.00	1.50-2.82	0.30-0.40	4.50-12.50
(Zhong and Wille 2015)	8.40-65.80	-	-	17.02-30.94	0.03-0.64	0.22-0.55	1.19-4.75
(Jang et al. 2015)	1.50-9.50	-	-	24.00-40.00	-	0.25-0.30	2.50-13.00
(Torres, Hu, and Ramos 2015)	3.20-18.60	-	1.09-3.09	17.98-31.34	0.72-1.69	0.33	6.35-9.54
(Bonicelli, Giustozzi, and Crispino 2015)	-	-	0.02-0.21	0.10-3.50	0.06-0.97	0.27-0.35	3.00-10.00
(Rangelov et al. 2016)	16.00-21.60	-	1.40-2.90	20.50	0.47-1.86	0.24	9.50
(Zhong and Wille 2016)	8.80-65.80	-	-	17.02-32.75	-	0.22-0.55	1.19-4.75
(Adewumi et al. 2016)	1.06-6.95	-	0.21-1.32	30.00-42.00	-	0.35-0.40	4.50-22
(Brake, Allahdadi, and Adam 2016)	9.00-34.90	-	0.98-3.04	9.00-27.00	0.33-0.99	0.27-0.30	10.00
(Bonicelli, Arguelles, and Pumarejo 2016)	-	-	1.40-2.20	15.40-26.70	0.63-2.61	0.27-0.35	-
(Y. J. Kim, Gaddafi, and Yoshitake 2016)	6.00-12.00	-	-	-	1.75-2.15	0.30	9.50
(Giustozzi 2016)	10.00-61.00	2.30-6.20	-	19.70-25.80	1.39-2.40	0.30-0.35	2.00-11.00
(Khankhaje et al. 2016)	6.00-14.00	-	-	18.50-29.00	0.35-1.50	0.32	4.75-9.50
(Chandrappa and Biligiri 2017)	-	2.22-2.89	-	20.19-27.82	-	0.35	27.50-37.50
(Xu et al. 2018)	8.00-60.00	-	-	6.00-35.00	-	0.38-0.56	2.36-26.50

El mismo parámetro se llega a repetir en otros experimentos, donde los valores de resistencia a compresión fueron desde los 6MPa hasta los 14MPa, con un contenido de huecos del 28.0% y 23.5% respectivamente. Aquí se obtuvieron valores de infiltración de 1.50cm/s y 0.59cm/s respectivamente (Khankhaje et al. 2016).

Los mejores resultados encontrados en la literatura revisada demostraron un contenido de huecos máximo de 25.63% y mínimo de 23.17%, con resistencia a compresión de 53MPa y 61MPa respectivamente. Aquí los resultados de infiltración fueron muy buenos, obteniendo 2.40cm/s y 2.34cm/s respectivamente. Esto se logró con el uso de polímero de etilvinilacetato (1% del peso del cemento) y una relación agua-cemento (a/c) de 0.30 (Giustozzi 2016).

### **2.2.5. Mantenimiento y Reparación**

El principal problema al que debe hacerse frente a largo plazo es la colmatación del pavimento. Dependiendo del uso del suelo de las áreas adjuntas, los pavimentos reciben diferentes tipos de contaminantes (Novotny 2003). Se entiende que la estructura porosa del pavimento trabaja como un filtro, reteniendo parte de los sedimentos y contaminantes transportados por el agua de escorrentía (Sansalone, Kuang, and Ranieri 2008). Los neumáticos de automóviles, los frenos, aceites, lubricantes, la combustión de los carros (vehículos) y el propio pavimento, son los principales causantes de contaminantes en esta infraestructura (Jiang et al. 2015; Rodriguez-Hernandez et al. 2013). Otros contaminantes son las deposiciones atmosféricas, derrames y fugas accidentales, basura, las propias actividades de limpieza, vegetación, el mantenimiento del paisaje, actividades agrícolas y operaciones de deshielo. Estas actividades incrementan la contaminación por nutrientes, sedimentos, pesticidas, cloruros, cianuros, hidrocarburos, metales pesados, y materia orgánica (Woods-Ballard et al. 2015). Entre mayor actividad de filtración tenga el pavimento a través del tiempo, la cantidad de poros se comienza a colmatar y se comienza a perder capacidad de infiltración (Sansalone, Kuang, and Ranieri 2008). La Figura 7 expone los contaminantes presentes en la escorrentía más comunes, así como su origen.

La capa colmatada producida se localiza cerca de la superficie del pavimento aproximadamente en los primeros 15mm, donde la consolidación existe en los primeros 6.5mm (Vancura, MacDonald, and Khazanovich 2012). También, se puede formar una capa sobre la superficie debido a la acumulación progresiva de partículas (Sansalone et al. 2012). Algunos pavimentos han sido diseñados con diferentes capas de porosidades, siendo la capa superficial la que contiene el menor porcentaje de huecos. Esto con el propósito de evitar

que la contaminación penetre dentro de la estructura del pavimento y llegue a taparla (Kia, Wong, and Cheeseman 2017).

Básicamente, los sedimentos que podemos encontrar son de tipo arenoso o arcilloso. Los sedimentos arenosos logran mantener un índice de infiltración razonable en las mezclas porosas, aún con concentraciones muy altas de sedimento (Andrés-Valeri et al. 2016; Marchioni et al. 2016; Sañudo-Fontaneda, Rodriguez-Hernandez, et al. 2014), mientras que los sedimentos arcillosos producen más colmatación por masa (Coughlin, Campbell, and Mays 2012; Haselbach 2010). Esto puede deberse a las propiedades expansivas de la arcilla, que hacen que retenga la humedad por un periodo de tiempo muy extenso. Por consiguiente, la infiltración tiende a disminuir, llegando a ser muy lenta (Yekkalar, Haselbach, and Langfitt 2018). Sin embargo, es recomendado medir la capacidad de infiltración, al menos una vez al año, para evaluar la permeabilidad del pavimento de hormigón poroso y diagnosticar el estado colmatación para activar las acciones de mantenimiento en caso necesario (Chopra 2007).

<b>Contaminantes y su fuente principal</b>	<b>Nitrógeno:</b> Fertilizantes en terrenos adjuntos	<b>Manganeso:</b> Escape del automóvil	<b>Cianuro:</b> Anticongelante
<b>Fósforo:</b> Fertilizantes en terrenos adjuntos	<b>Plomo:</b> Desgaste de neumáticos, aceites, grasas y escape de autos	<b>Sodio:</b> Sales para descongelar	<b>Sulfatos:</b> Superficie del camino, combustibles, sales para descongelar
<b>Zinc:</b> Desgaste de neumáticos, aceite y grasas	<b>Hierro:</b> Óxido del auto, estructuras de acero en autopista	<b>Hidrocarburos de petróleo:</b> Derrames, fugas, asfalto, etc.	<b>Cromo:</b> Metales, desgaste de los frenos
<b>Cobre:</b> Revestimiento, insecticidas, pesticidas, etc.	<b>Cadmio:</b> Desgaste de neumáticos, insecticidas	<b>Níquel:</b> Combustibles, aceites, pavimento de asfalto, etc.	<b>Sedimentos:</b> Desgaste del pavimento, mantenimiento

Figura 7. Contaminantes en la escorrentía y su procedencia. Fuente: Elaboración propia de (Ball, Jenks, and Aubourg 1998)

Sin embargo, algunos autores llegaron a demostrar que los sedimentos finos no son la causa principal de la colmatación, sino partículas de tamaños más grandes provenientes del propio deterioro del pavimento (Kayhanian et al. 2012; Welker et al. 2013), así como partículas provenientes de la vegetación aledaña (Kayhanian et al. 2012). Por consiguiente, es recomendable establecer un programa de mantenimiento específico, de acuerdo a las condiciones locales de la ciudad de que se trate. Esto ayuda a retrasar la colmatación en el pavimento y a incrementar la efectividad de otras técnicas de limpieza que se apliquen posteriormente (Al-Rubaei et al. 2013). Algunos autores mencionan que al aplicar mantenimiento, cual sea el método, una vez cada 3 a 6 meses, ayudará a conservar más del 95% de la capacidad de infiltración del pavimento (Gunderson 2008; Henderson and Tighe 2012; Kia, Wong, and Cheeseman 2017; Sansalone et al. 2012; Vardanega 2014).

La combinación entre el aspirado y el lavado con agua a alta presión ha demostrado ser la técnica más efectiva para mantener un pavimento poroso (Chopra et al. 2010b; Drake and Bradford 2013; Golroo and Tighe 2012; Kia, Wong, and Cheeseman 2017; Winston et al. 2016), permitiendo recuperar hasta el 100% de la infiltración inicial, en comparación con otras técnicas y combinaciones (Sansalone et al. 2012). De forma separada, el aspirado tiende a no hacer diferencia alguna en la capacidad de infiltración cuando el pavimento se encuentra totalmente colmatado. A diferencia de lo que ocurre en un pavimento parcialmente colmatado donde ésta técnica sí mejora la infiltración (Chopra et al. 2010a). Pruebas realizadas en diferentes localidades mostraron un incremento en la capacidad de infiltración de alrededor del 100% después de aspirar (Henderson, Tighe, and Norris 2009). El lavado a presión demostró muy buenos resultados cuando el pavimento estaba completamente y parcialmente colmatado (Chopra et al. 2010a).

Además del problema de colmatación, pueden llegar a ocurrir ciertas fallas estructurales ya sea durante la etapa de construcción, o cuando el pavimento ya se encuentra en servicio. Esto puede deberse a un mal proceso constructivo o a la eventual necesidad de instalar algún servicio en el pavimento (American Concrete Institute ACI Committee 522 2006). Para repararlo, se pueden aplicar soluciones básicas dependiendo de la causa. Si se presenta un hoyo, un parche con una mezcla epóxica o con una mezcla de hormigón porosa de las mismas dosificaciones del pavimento pueden ser la solución. En

caso de presentarse cortaduras, se pueden arreglar removiendo una sección cuadrada del pavimento, que abarque los cortes, y rellenarlo con la misma mezcla de hormigón poroso. Por último, puede suceder que el pavimento se levante, produciendo pequeños topes, los cuales pueden ser removidos o desbastados con un molino o afiladora ponderada (American Concrete Institute ACI Committee 522 2006).

Las presiones cortantes, producidas por las maniobras y movimientos de los vehículos, pueden resultar en daños por desprendimiento tanto en hormigones porosos como en asfaltos porosos. Este es el fenómeno que ocurre cuando las partículas de agregado de la superficie del pavimento se desprenden (Wurst III and Putman 2013), pudiendo ocasionar parabrisas quebrados, así como otorgar condiciones peligrosas para conducir (Molenaar, Hagos, and van de Ven 2010). Asimismo, se produce una consecuente reducción en la esperanza de vida del pavimento. El efecto de desprendimiento se relaciona principalmente con la fragilidad del puente de contacto entre las piedras de la mezcla, y puede ser causada por una falla cohesiva o adhesiva (Giustozzi 2016). Una mala compactación, un bajo contenido de aglutinante, así como características pobres de la misma, son las principales causas del efecto de desprendimiento en las mezclas porosas (Bonicelli et al. 2015).

La reparación mediante sustitución, resuelve también problemas por colmatación, cuando los métodos comunes de limpieza no funcionan. Remover de 10-25mm de la capa superior del pavimento (Bean, Hunt, and Bidelspach 2007; Gerrits and James 2004) puede servir para recuperar la capacidad de infiltración original. Estudios recientes han demostrado que esta es una técnica muy efectiva, donde se recupera la capacidad filtrante en su totalidad (Winston et al. 2016).

### **2.2.6. Alternativas al hormigón poroso – Geopolímeros**

El concreto de geopolímeros ha emergido como una nueva tecnología con el potencial para contribuir al desarrollo de pavimentos y construcciones más sostenibles, al utilizarse como sustituto del cemento Portland en el hormigón, por lo que su investigación, desarrollo e implementación comienza a ganar interés en tiempos recientes (Tataranni et al. 2018).



Los geopolímeros se producen mediante procesos químicos, en donde intervienen óxidos de silicato de aluminio con poli silicatos alcalinos. Solamente son necesarios dos componentes principales para la realización de estos materiales: un líquido alcalino y un material origen. Entre el líquido alcalino, se utiliza normalmente soluciones de sodio o potasio. A su vez, el material origen debe de tener un contenido alto de silicatos y aluminio, o ser un subproducto como arcilla, metakaolino, cenizas volantes, escoria, cenizas depositadas, entre otros (Tho-In et al. 2012).

Algunas investigaciones trataron de reemplazar el Cemento Portland Ordinario con un aglutinante geopolímero, logrando incrementar tanto las propiedades hidráulicas como mecánicas (resistencia a compresión de 9.5MPa y contenido de huecos de 24.1%). Sin embargo, los resultados con el Cemento Portland Ordinario seguían siendo razonables (resistencia a compresión de 6MPa y contenido de huecos de 35.9%) (Jang et al. 2015). Esto se debe a que en las mezclas donde se sustituye parte del cemento, se emplea agua en lugar de un activador para el material geopolímero.

### **2.3. Característica funcionales básicas**

Con el objetivo de mostrar el carácter marcadamente multifuncional del hormigón porosos, durante la década del 2009 al 2018, se han identificado 15 propiedades, en los artículos científicos relacionados con pavimentos de hormigón poroso. Esto se obtiene de un análisis en la base de datos de Scopus, en donde las combinaciones utilizadas arrojaron 171 artículos en este período de tiempo (Elizondo-Martínez et al. 2020). Dichas funciones se encuentran identificadas en la Tabla 8 organizadas en 4 categorías: funciones hidráulicas, mecánicas, de seguridad y ambientales. Seis de estas funciones o propiedades se consideraron de especial interés debido a su capacidad para hacer más sostenible y resiliente un pavimento multifuncional de hormigón poroso, las cuales se describirán a continuación.

Las propiedades hidráulicas se refieren a la capacidad del pavimento de infiltrar el agua en el subsuelo, o de almacenarla para un uso posterior. Las propiedades mecánicas, divididas en fuerza a compresión, tracción indirecta y flexión, se centran en la capacidad del pavimento de soportar las cargas del tráfico sin sufrir rotura o fallo. La gran cantidad de

huecos en los pavimentos de hormigón poroso permite también reducir el ruido generado por la interacción entre los neumáticos y el propio pavimento, a través de una absorción acústica por parte de los huecos. Además, la macrotextura superficial debida a dichos huecos incrementa, al mismo tiempo, la resistencia al deslizamiento (fricción), mejorada además por el continuo contacto del neumático con la superficie gracias a la rápida infiltración del agua de escorrentía. Finalmente, el uso de ciertos aditivos permite otorgar al pavimento de hormigón poroso capacidades ambientales, como la remoción de contaminantes del aire, provenientes de las emisiones vehiculares, mediante un proceso fotocatalítico. Además, la posibilidad de aumentar el albedo de la superficie, reflejando los rayos solares, permitiendo así disminuir la temperatura en el centro de las ciudades, y, por consiguiente, reduciendo el consumo energético, puede ser logrado gracias al color claro que presenta el hormigón.

Tabla 8. *Número de publicaciones referentes a pavimentos de hormigón poroso en la década del 2009 al 2018. Fuente: Elaboración Propia.*

Áreas identificadas	Propiedades	Número de Estudios (2009-2018)
Hidráulicas	Infiltración	93
	Colmatación	19
	Porosidad	9
Mecánicas	Fuerza a Compresión	49
	Fuerza a Tracción Indirecta	13
	Fuerza a Flexión	19
	Fatiga	1
	Rigidez	5
Seguridad	Ciclo hielo-deshielo	9
	Resistencia al deslizamiento	19
Ambientales	Remoción de Contaminantes	20
	Mitigación de la contaminación (Fotocatálisis)	5
	Mitigación de la temperatura (Isla de Calor)	12
	Absorción del Sonido	18

### 2.3.1. Propiedades hidráulicas

Se ha definido a la permeabilidad como la variable que mejor describe la capacidad del hormigón de resistir la penetración del agua u otras sustancias a través de él (líquido,

gas, iones, entre otros). El hormigón poroso por sí solo contiene un número elevado de poros, o huecos, interconectados entre si, los cuales permiten la circulación de sustancias a través de ellos, como se aprecia en la Figura 8. La cantidad de huecos presentes en la mezcla depende de diversos factores como la relación agua-cemento ( $a/c$ ), el tamaño de árido empleado, la relación entre la pasta de cemento y el agregado, entre otros (López 2004).

Los pavimentos de hormigón poroso deben trabajar con la capacidad hidráulica con la que se diseñaron. La porosidad es un indicador típico de su permeabilidad (W. D. Martin, Kaye, and Putman 2014). Estas mezclas deben de proveer la capacidad de infiltración necesaria para poder gestionar los eventos de lluvia que ocurran a lo largo de su tiempo de vida (Liu and Cao 2009), donde solo un porcentaje del total de huecos llegan a estar interconectados (Vardanega 2014).

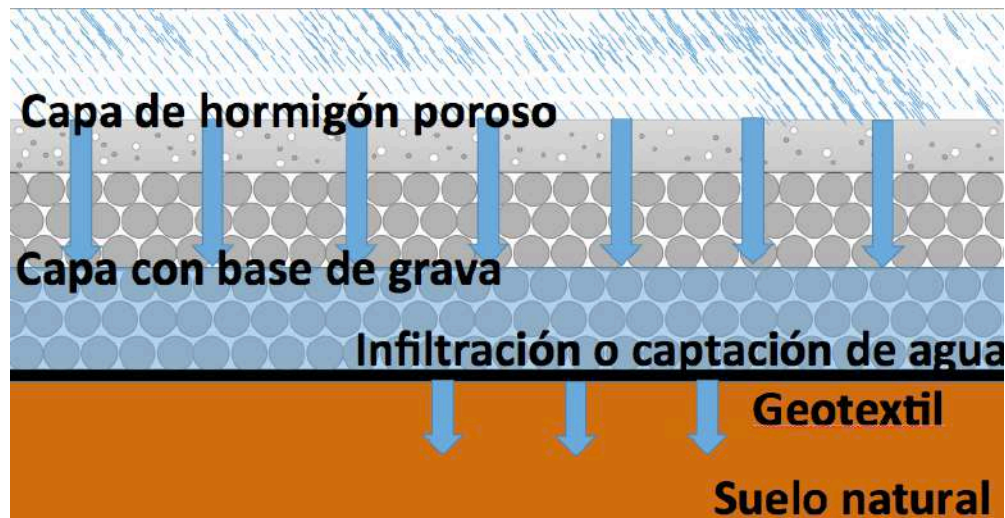


Figura 8. Esquema de un sistema de infiltración de un pavimento de hormigón poroso. Fuente: Elaboración propia.

Algunos autores han obtenido un volumen de huecos en torno al 40% (Crouch, Pitt, and Hewitt 2007; Ghashghaei and Hassani 2016; Ibrahim et al. 2014). Sin embargo, los huecos interconectados disminuyen hasta un 30% aproximadamente (Agar-Ozbek et al. 2013; Crouch, Pitt, and Hewitt 2007; H. K. Kim and Lee 2010; W. Shen et al. 2013). Esto puede deberse al nivel de compactación al que fue sometida la muestra (Crouch, Pitt, and Hewitt 2007), así como el tamaño del agregado empleado, empleando más de un tamaño distinto (Ibrahim et al. 2014). Al contrario, otros estudios han obtenido un volumen de

huecos del 3%, debido a la cantidad de finos o arena utilizada en la mezcla (alrededor del 18%). Esto conlleva a una densidad muy elevada de la mezcla ( $2325\text{kg/m}^3$ ), y por consiguiente la infiltración es muy baja ( $0.12\text{cm/s}$ ) (Lian and Zhuge 2010). Por tanto, la porosidad también depende de la fuerza de compactación aplicada, donde, a mayor fuerza, menor es el contenido de huecos. Además, aquí se pueden identificar dos tipos de hormigones porosos: las mezclas de baja fuerza de compactación y las de alta fuerza de compactación (conocidas también como Mezclas con Alto Contenido de Pasta – MACP – y Bajo Contenido de Pasta – MBCP, respectivamente). Donde los comportamientos demostraron una capacidad de infiltración mayor para las MBCP, pero una menor resistencia a compresión, esto puede deberse por el efecto de colmatación que hace la pasta, disminuyendo la conectividad de los poros (Sumanasooriya and Neithalath 2011).

Destacar que se han utilizado diferentes métodos para medir la capacidad de infiltración efectiva de las superficies porosas directamente: infiltrómetro de anillo sencillo, infiltrómetro de anillo doble (Dougherty et al. 2011; H. Li, Kayhanian, and Harvey 2013), simuladores de lluvia (Andrés-Valeri et al. 2016; J. Rodríguez-Hernández et al. 2016; Sañudo-Fontaneda, Andrés-Valeri, et al. 2014), y permeámetros (H. Li, Kayhanian, and Harvey 2013; Ranieri et al. 2012).

Al mismo tiempo, algunos investigadores han desarrollado modelos matemáticos basados en medidas y observaciones. Conectando la permeabilidad del hormigón poroso con algunos parámetros de la matriz porosa, destacando siempre el total de porosidad, obteniendo la conductividad hidráulica (Kuang et al. 2011; Ranieri et al. 2012; Sansalone, Kuang, and Ranieri 2008; Sansalone, Liu, and Kim 2009; Wu, Yu, and Yun 2007).

Con el objetivo de caracterizar mejor el medio poroso, otros métodos se han diseñado para medir el volumen de huecos en un pavimento poroso. Los sistemas tradicionales como la aspiradora o el análisis dimensional son algunos ejemplos (Alvarez, Martin, and Estakhri 2011). Sin embargo, en años recientes, la tomografía por rayos X ha demostrado muy buenos resultados midiendo los huecos, con la ventaja de prevenir una destrucción accidental de la muestra (Sansalone, Kuang, and Ranieri 2008). Además, pudiendo observar que el mal curado puede llevar a una distribución irregular de los poros

dentro de la mezcla, así como a sellar la superficie de la misma, bloqueando la infiltración desde un inicio (Chung et al. 2014; Radlinska et al. 2012).

Analizando la relación entre huecos y permeabilidad, la literatura analizada mostró valores desde 0.03cm/s (J. Yang and Jiang 2003) hasta 4.77cm/s. Éste último resultado con un contenido de huecos del 31.8%, producto de un 15% de pasta de cemento y un tamaño de árido entre 4.8-9.5mm (Zaetang et al. 2013). Sin embargo, el porcentaje más grande de contenido de huecos encontrado en la literatura fue del 42%, teniendo una permeabilidad de 1.74cm/s (Ibrahim et al. 2014). En consecuencia, la permeabilidad realmente depende de la interconexión de los huecos, cuya cantidad total depende de materiales y dosificación, pero cuya interconexión depende en gran medida de la compactación y el curado. Independientemente de la dosificación, pueden surgir problemas de ejecución en la superficie (colmatación o bloqueo debido a diversas causas) o en el fondo de la capa (segregación, exceso de agua y concentración del mortero en la parte baja).

### **2.3.2. Propiedades mecánicas**

Las mezclas de hormigón poroso deben reunir ciertos requerimientos específicos, en términos mecánicos, dependiendo de la aplicación in-situ. Tanto en el hormigón convencional, como en el poroso, la resistencia a compresión es el dato más relevante en el momento de diseñar estructuras de hormigón. Las estructuras porosas son rígidas, resistiendo las presiones verticales directamente por interconexión de áridos mediante puentes de mortero, ocurriendo agrietamientos con facilidad al concentrarse excesivamente las cargas. Estas grietas se guían a través de la estructura de poros, fracturando los pequeños puentes de pasta de cemento que unen al agregado. Por consiguiente, el hormigón poroso tiende a fallar, haciendo este último comportamiento la principal diferencia con el hormigón convencional (Agar-Ozbek et al. 2013) y pudiendo afirmar que, a pesar de tener el nombre de hormigón, el esquema estructural del hormigón poroso es completamente distinto del de el hormigón convencional.

La continua aplicación de presiones verticales puede también causar daño de fatiga en las mezclas porosas (Chen et al. 2013), y una excesiva deformación plástica, produciendo fallas en el pavimento (Alvarez, Martin, and Estakhri 2011). En la Figura 9 se

aprecia un esquema de distribución de cargas de un vehículo a un pavimento de hormigón poroso.

Las mezclas de hormigón adquieren cerca del 70% de su resistencia durante los primeros siete días, incrementando al 85% a los catorce días, para finalmente, según lo esperado, alcanzar el 100% de su capacidad a los veintiocho días. Es de importancia realizar el curado de una manera correcta, de lo contrario, la mezcla puede perder hasta un 30% de su resistencia (Guevara et al. 2011).

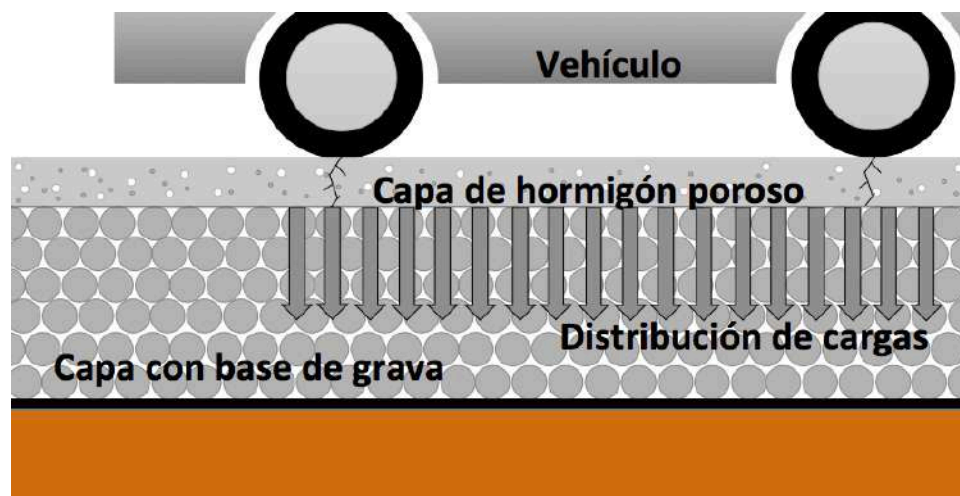


Figura 9. Esquema de distribución de cargas de un pavimento de hormigón poroso. Fuente: Elaboración propia.

Las condiciones climáticas pueden modificar el comportamiento mecánico del pavimento a lo largo del tiempo. Los ciclos de congelación y descongelación en climas fríos, por ejemplo, pueden producir pequeñas grietas en las mezclas de hormigón poroso debido al agua congelada retenida dentro de la estructura porosa, reduciendo así la capacidad mecánica de los materiales (J. Kevern, Wang, and Schaefer 2010; Park and Tia 2004). A su vez, las mezclas de hormigón poroso pueden llegar a degradarse por los iones ácidos contenidos en el agua de lluvia (Beddoe and Dorner 2005).

Como se ha comentado previamente, de acuerdo a la bibliografía revisada, las mezclas de hormigón poroso pueden alcanzar resistencias a la compresión por encima de los 40MPa (Agar-Ozbek et al. 2013; Chen et al. 2013; Lian and Zhuge 2010; J. Yang and Jiang 2003), resistencia a tensión entre 1.5 y 3 MPa (Adewumi et al. 2016; Agar-Ozbek et al. 2013; Bonicelli, Arguelles, and Pumarejo 2016; Brake, Allahdadi, and Adam 2016;

Ibrahim et al. 2014; Rangelov et al. 2016; Torres, Hu, and Ramos 2015; Zaetang et al. 2013), y fuerza a flexión sobre 5MPa (Chen et al. 2013; Giustozzi 2016; Lee et al. 2011; W. Shen et al. 2013). Sin embargo, estos datos varían de espécimen a espécimen, dependiendo de los métodos de diseño empleados, así como los materiales y diseño de mezcla utilizado por cada autor. Es de destacar el trabajo realizado por la empresa ECOCRETO, donde el desarrollo de un aditivo, así como un sistema constructivo para pavimentos de hormigón poroso, les ha permitido obtener resistencias a compresión de 45MPa, manteniendo una permeabilidad aceptable (ECOCRETO 2011).

La mayoría de los estudios acerca de hormigón poroso se centran en la resistencia a compresión. Por consiguiente, las investigaciones que reportan resistencia a flexión son limitadas. Esto es importante ya que los pavimentos porosos sufren fundamentalmente presiones de flexión y fatiga debido a las cargas de los vehículos (Chandrappa and Biligiri 2017). La resistencia a tensión, al igual que la fuerza a compresión, puede ser modificada dependiendo de los aditivos y adiciones empleados, mejorando la resistencia al agrietamiento (Giustozzi 2016). Aún así, es importante resaltar que los ensayos y parámetros empleados para pavimentos de hormigón convencional pudieran no aplicarse a pavimentos de hormigón poroso (Rizvi et al. 2009). Por ejemplo, el ensayo de asentamiento tiende a ser inefectivo en el hormigón poroso debido a su alto contenido de huecos y pasta de cemento algo seca por la poca cantidad de agua empleada (J. T. Kevern, Schaefer, and Wang 2009). Dicho lo anterior, es necesario fijar otros límites en los pavimentos de hormigón poroso.

### **2.3.3. Propiedades superficiales**

La resistencia al deslizamiento (RD) está íntegramente relacionada con la textura de la superficie del pavimento (Jafari and Toufigh 2009), como se aprecia en la Figura 10. De acuerdo a la Asociación Internacional Permanente de Congresos Viales (Permanent International Association of Road Congress – PIARC), las superficies de los caminos pueden clasificarse de acuerdo a la Tabla 9 (Gandage et al. 2016).

Gracias a la fricción que ocurre entre el pavimento y los neumáticos del vehículo, los conductores logran dirigir, frenar, acelerar y permanecer dentro de la autopista (Eriskin

et al. 2017). Por consiguiente, se pueden identificar tres escenarios que afectan a los valores de la resistencia al deslizamiento: pavimento seco, húmedo (mojado) o congelado (hielo) (AMDE and ROGGE 2013; Fwa and Ong 2007; Jafari and Toufigh 2009; Khankhaje et al. 2018).

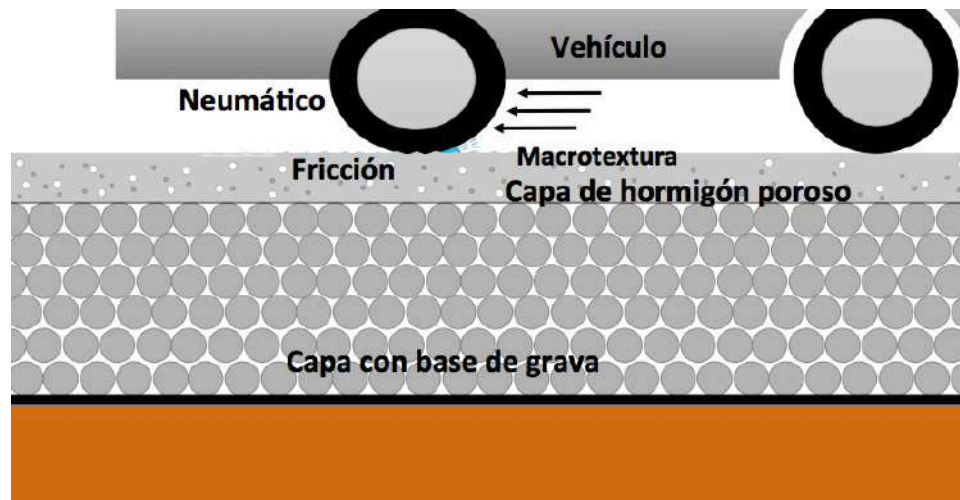


Figura 10. Esquema de la capacidad de resistir el deslizamiento de un pavimento de hormigón poroso. Fuente: Elaboración propia.

La microtextura controla los valores de la resistencia al deslizamiento principalmente a velocidades bajas, mientras que la macrotextura lo hace a velocidades altas (Chen, Wang, and Zhou 2013; Jafari and Toufigh 2009).

Tabla 9. Clasificación de las superficies de los caminos de acuerdo a PIARC. Fuente: Elaboración propia, de Gandage et al. 2016.

Clasificación	Profundidad
Micro textura	< 0.5mm
Macro textura	0.5mm – 50mm
Mega textura	50mm – 500mm
Áspero	0.5m – 50m

La resistencia al deslizamiento puede medirse con la Prueba del Péndulo Británico (BPT), el cual consiste en un péndulo que produce un contacto deslizante entre una goma estándar y la superficie del pavimento, a una velocidad baja, alrededor de 10km/h. Esta prueba es la más comúnmente utilizada para medir la resistencia al deslizamiento y la microtextura. El resultado se expresa en términos de un Número de Péndulo Británico (BPN), donde el dispositivo permite tomar lecturas de 0 a 150 (NLT-175/98 1998). Entre mayor el BPN, mejor es la fricción del pavimento (AMDE and ROGGE 2013; Bonicelli,



Giustozzi, and Crispino 2015; Chen, Wang, and Zhou 2013; Jafari and Toufigh 2009; Khankhaje et al. 2018).

Algunos estudios de laboratorio notaron que el BPN disminuía cerca de un 13% si el área de contacto entre la goma y la superficie se reducía, tanto para condiciones secas y húmedas. También, el espacio entre el agregado de la mezcla, cuando es reducido, puede llegar a disminuir el BPN en un 9% para condiciones secas, y hasta en un 45% en condiciones húmedas (Fwa, Choo, and Liu 2003).

La aspereza de la superficie del pavimento puede medirse mediante la profundidad de la macrotextura, en estado seco (Chen, Wang, and Zhou 2013). Para medir la macrotextura del pavimento, se emplea otro ensayo, el círculo de arena, el cual mide la profundidad de ésta mediante la cantidad, o peso, de arena que cubre la totalidad de los huecos superficiales de un área determinada a evaluar (NLT-335/87 1987).

En cuanto a cómo mejorar el BPN de los pavimentos de hormigón poroso, algunos autores estudiaron la adición de arena en diferentes cantidades (0, 5 y 10%, variando la relación agua-cemento (a/c). Obteniendo su mejor resultado en condiciones secas, con un BPN de 74 para una relación agua-cemento (a/c) de 0.27. Esto tanto en la muestra con 5% de arena como en la muestra con 10%. Sin embargo, sin tomar en cuenta la relación agua-cemento (a/c), un 10% de arena tiende a mostrar el mejor resultado en cualquier mezcla (Bonicelli, Giustozzi, and Crispino 2015).

Otros investigadores, demostraron las diferencias entre diversos pavimentos de hormigón poroso bajo diferentes condiciones, obteniendo un BPN de 96 para un camino seco, 74.5 para uno húmedo y 29 para uno congelado (AMDE and ROGGE 2013). A pesar de esto, los valores de BPN más altos encontrados en la literatura fueron casi de 100 para un pavimento seco, recién construido, con una relación agua-cemento (a/c) de 0.32 y 23.5% de huecos. Utilizando cemento portland ordinario, arena y un tamaño de agregado de 6.30 mm (Khankhaje et al. 2018).

Sin embargo, a pesar de que los valores obtenidos en los diversos estudios son aceptables para un pavimento, éstos son alrededor de un 15% menores que un pavimento de

hormigón o asfalto convencional, bajo condiciones secas, al tener éstos valores entre 85-88 para el hormigón, y 85-87 para el asfalto (Jafari and Toufigh 2009). Por tanto, las propiedades superficiales se ven afectadas por la discontinuidad superficial debida a los huecos, si bien estos permiten drenar el agua, mejorando los resultados en húmedo. Existiendo siempre margen de mejora en seco.

## 2.4. Características ambientales adicionales

### 2.4.1. Absorción del sonido

La presencia de grandes volúmenes de poros interconectados, hacen del hormigón poroso muy efectivo para absorber el sonido. Esto puede lograrse ya que los pavimentos porosos alteran la generación de sonido, minimizando el bombeo de aire entre el neumático y la superficie del camino (American Concrete Institute ACI Committee 522 2006), como puede observarse en la Figura 11. El comportamiento acústico del agregado dependerá de sus dimensiones, porosidad, tamaño y forma del poro, así como de la distribución que tenga en la mezcla (Carbajo et al. 2015).

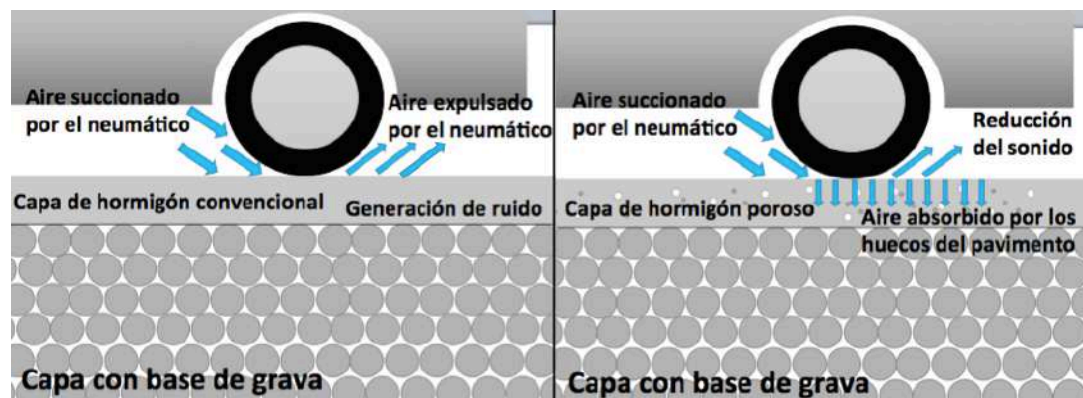


Figura 11. Esquema de la absorción del sonido de un pavimento de hormigón convencional, contra un pavimento de hormigón poroso. Fuente: Elaboración propia.

Para medir la capacidad de absorción de sonido de un material, debe de calcularse el coeficiente de absorción. Un material con un coeficiente de 1 indica que es puramente absorbente, mientras que un material con un coeficiente de 0, indica que es puramente reflectivo. El hormigón convencional tiene, normalmente, un coeficiente de absorción entre 0.03-0.05. Por el contrario, el hormigón poroso tiene, típicamente, un coeficiente de absorción entre 0.1 a casi 1. Este coeficiente depende de la frecuencia de las ondas de

sonido causadas por la interacción entre los neumáticos y el pavimento, donde algunos estudios demostraron que esta interacción ronda entre los 630-2000Hz. Un rango entre 800-1200Hz es lo más desagradable para el oído humano (American Concrete Institute ACI Committee 522 2006; Chu, Fwa, and Tan 2017).

Las propiedades de absorción del hormigón poroso se pueden evaluar con un tubo de impedancia. Este dispositivo consiste en un tubo de vidrio que permite medir la velocidad del sonido, así como visualizar las ondas de sonido. Se colocan micrófonos a lo largo del tubo para detectar las ondas de sonido transmitidas a la muestra de hormigón a evaluar (American Concrete Institute ACI Committee 522 2006; Nelson et al. 2008). La Tabla 10 representa el coeficiente de absorción que algunos autores obtuvieron dentro del rango de 800-1200Hz.

Tabla 10. *Coefficientes de absorción en pavimentos de hormigón poroso obtenidos por algunos autores.*  
*Fuente: Elaboración propia.*

Referencia	Material	Tamaño (mm)	coeficiente de absorción*	coeficiente de absorción máximo obtenido
(Horoshenkov, Hughes, and Cwirzen 2003)	Aluminato de calcio sintético fusionado con bauxita y piedra caliza. (ALAG)	0.60- >1.18	0.13-0.70	0.99 a 2750Hz.
(Carbajo et al. 2015)	Arlita y vermiculita	0.50- >4.00	0.20-0.91	0.96 a 1160Hz.
(Chang et al. 2016)	Grava de río	2.40-4.80	0.01-0.87	0.95 a 250Hz.
	Escoria de horno de arco eléctrico (EAFS)	2.40-4.80	0.02-0.88	0.95 a 156Hz.
(Nghopok et al. 2017)	Piedra caliza triturada, hormigón reciclado y ceniza de carbón.	4.75-9.00	0.20-0.40	1.00 a 500Hz.
(Khankhaje et al. 2017)	Aceite de cáscara de nuez de palma	4.75-6.30	0.05-0.80	0.80 a 1700Hz.
(Izevbekhai 2017)	Diamante	-	0.35-0.65	0.85 a 1700Hz.

\*Resultados del coeficiente de absorción en el rango de 800-1200 Hz.

Cada tipo de agregado tiene sus propias características acústicas, por lo que es un factor clave en el coeficiente de absorción que el hormigón poroso llegue a tener (Asdrubali, Schiavoni, and Horoshenkov 2012). Algunos autores obtuvieron un coeficiente de absorción cerca de 1.00 usando vermiculita de tamaño 1mm o menos, así como un contenido de vacíos de 39% (Carbajo et al. 2015), siendo este el mejor resultado encontrado en la literatura revisada.

Otros investigadores compararon el uso como ligante hidráulico de escoria de cemento (alcalino) con el cemento portland ordinario, obteniendo un coeficiente de absorción mayor para la escoria de cemento. También, utilizaron dos tipos de agregado diferentes: grava de río y escoria de horno eléctrico de arco (EHEA). Los resultados mostraron que la EHEA se comportaba mejor al reducir el sonido en el pavimento. Esto gracias a sus características, donde tenía un 40.75% de porosidad, en comparación con la grava de río que tenía un 37.50%. Concluyeron que entre menor fuera la cantidad de huecos en la mezcla, el coeficiente de absorción se reducía hasta casi un 100% (Chang et al. 2016).

#### **2.4.2. Purificación del aire**

Los pavimentos de hormigón poroso que contienen agentes fotocatalizadores, tienen el potencial de eliminar los compuestos contaminantes del aire, y ayudar a controlar la contaminación en las áreas urbanas (Ballari et al. 2010; Hasan et al. 2017). De forma similar a la fotosíntesis de las plantas, los compuestos fotocatalíticos utilizan la luz del sol, no para respirar, sino para atrapar y absorber contaminantes nocivos. Estos compuestos fijados orgánicos e inorgánicos pueden ser óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) (S. Shen et al. 2012), o hidrocarburos aromáticos policíclicos que pueden ser encontrados en el agua de lluvia (Hasan et al. 2017), entre otros contaminantes (Cros et al. 2015; S. Shen et al. 2012), como puede apreciarse en la Figura 12. Algunos estudios han investigado la degradación fotocatalítica de NO<sub>x</sub>, obteniendo buenos resultados, de hasta un 64% de reducción (Ballari et al. 2010).

El dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) es uno de los semiconductores fotocatalíticos más investigados como parte de los materiales de construcción (Ballari et al. 2010; Cros et al. 2015; Hassan et al. 2012; Lackhoff et al. 2003; Osborn et al. 2014). Esto gracias a su bajo costo y rápida reacción en condiciones ambientales (temperatura ambiente, presión atmosférica), sin necesidad de reactivos químicos. Por consiguiente, no se producen reacciones secundarias. El TiO<sub>2</sub> puede fijar y descomponer los contaminantes gaseosos con la presencia de la luz solar.

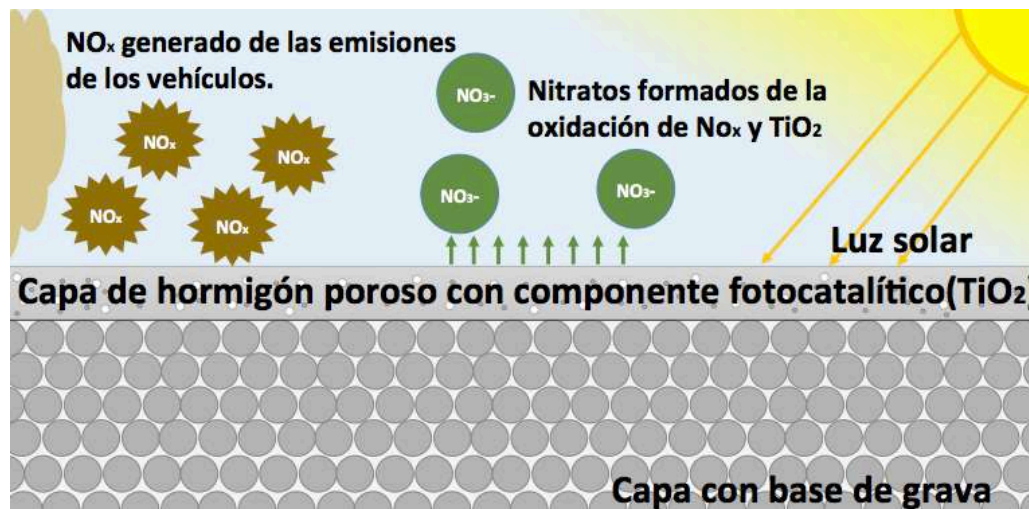


Figura 12. Esquema de degradación de contaminantes del aire de un pavimento de hormigón poroso con capacidad fotocatalítica. Fuente: Elaboración propia.

Aplicar compuestos fotocatalíticos al pavimento puede ayudar a eliminar la emisión de contaminantes justo bajo la fuente, los tubos de escape de los vehículos que son conducidos sobre el pavimento. La superficie más rugosa, así como la mayor porosidad de los pavimentos de hormigón poroso, retendrán más los gases en contacto con las partículas de TiO<sub>2</sub> debido a los poros y una mayor área de superficie, y contribuirán a un mejor efecto fotocatalítico para la purificación del aire en los días soleados (Hasan et al. 2017; S. Shen et al. 2012). De hecho, algunos resultados de laboratorio demostraron un incremento en la eficiencia de remoción de NO<sub>x</sub> de pavimentos porosos en un 3.60% por cada 25mm de profundidad de la capa fotocatalítica en la estructura porosa. Los mejores resultados observados fueron a 75mm de profundidad con un 31% de huecos (Asadi et al. 2012).

Existen algunos recubrimientos fotocatalíticos disponibles comercialmente que son usados principalmente en los pavimentos de hormigón convencional. Algunos investigadores estudiaron tres de ellos: estuco, pintura blanca y pintura transparente. Lo aplicaron en el borde de una carretera y obtuvieron resultados favorables para el estuco (81% de remoción de NO<sub>x</sub>), en comparación con la pintura blanca (40% de remoción de NO<sub>x</sub>), que tuvo un resultado similar que el pavimento sin revestimiento (38%). La pintura transparente removió el 52% de NO<sub>x</sub>. Este experimento también midió la remoción de ozono, donde el estuco también tuvo el mejor resultado, removiendo cerca del 73% del ozono. Sin embargo, la pintura blanca mejoró, removiendo un 65%, comparado con la pintura transparente que removió el 60% de ozono (Cros et al. 2015).

A pesar de esto, los revestimientos fotocatalíticos no son muy utilizados en pavimentos porosos debido a la alta pérdida de porosidad que supone su aplicación. Por tanto, algunas investigaciones se han enfocado en aplicaciones innovadoras del  $\text{TiO}_2$  en este tipo de pavimentos. Uno de ellos es el  $\text{TiO}_2$  en agua. Consiste una mezcla uniforme de agua con  $\text{TiO}_2$  y cepillarlo en la superficie del pavimento poroso. Esta técnica logró reducir el NO en un 97.14%, así como otros contaminantes como el tolueno (91.98%) y trimetilbenzeno (TMB) (96.34%). Sin embargo, el revestimiento mostró ser débil, concluyendo en que se podía quitar con agua. Otro método es el de una especie de lodo líquido de cemento (en baja concentración), agua y  $\text{TiO}_2$  uniformemente mezclados y cepillado también en la superficie del pavimento poroso. Este proceso logró reducir el NO en un 96.94%, el tolueno en 78.82% y el TMB en 97.26%. Teniendo la desventaja de que este método disminuía la infiltración en un 51.50% (S. Shen et al. 2012).

La mezcla de protección de entrada de vehículos es otro método que ha adquirido buenos resultados, logrando remover hasta un 97.92% de NO. Debe su nombre a los productos utilizados en las aceras para protegerlas de derrames de aceite de los vehículos, y consiste en un líquido transparente (normalmente una especie de silicón a base de agua que sella el hormigón) mezclado con  $\text{TiO}_2$  y cepillado en la superficie del pavimento. El tolueno se removió en un 61.65% y el TMB en un 93.87%. La infiltración disminuyó en un 30.49% (S. Shen et al. 2012).

Otros investigadores intentaron rociar el  $\text{TiO}_2$ . Aplicándolo en tres fases, variando el espesor de la capa de  $\text{TiO}_2$ . Aquí se logró reducir la concentración de NO en solo un 47.6% (Osborn et al. 2014). Otros estudios han desarrollado aditivos fotocatalíticos, añadiéndolos en el mortero directamente. Aquí los resultados demostraron una demanda mayor de agua para mantener la mezcla fluida (Pérez-Nicolás et al. 2017). A su vez, el cemento fotocatalítico es un método innovador en varias compañías de Europa, facilitando la propiedad fotocatalítica en la mezcla, pero aún no consigue grandes resultados como los revestimientos o aditivos (Faraldos 2012). Ejemplos de ello, se pueden mencionar los adoquines de hormigón poroso fotocatalítico de la empresa PVT (PVT 2016), o la empresa italiana Italcementi, con su gama de productos “i.active”, que al ser introducidos en el

hormigón, se pueden reducir la contaminación atmosférica entre un 20-80%, pero llegando a incrementar el coste del hormigón en un 10-20% (i.nova 2016).

Otro semiconductor fotocatalítico utilizado en pavimentos es el óxido de zinc (ZnO) (Hasan et al. 2017). Pero algunos estudios han demostrado que su actividad fotocatalítica es menor que el  $\text{TiO}_2$  (cerca de un 92%). Esto puede deberse a que el ZnO crea un gran retraso en el proceso de hidratación del cemento y llega a convertirse en hidrato de cincado de calcio durante el proceso (Lackhoff et al. 2003). Sin embargo, al tener en cuenta la permeabilidad que necesita lograr el pavimento de hormigón poroso, la opción con mayor potencial para estos materiales parece ser utilizar el  $\text{TiO}_2$  como aditivo en la mezcla, salvaguardando la porosidad de la misma.

### **2.4.3. Mitigación de la temperatura**

Muchos investigadores han señalado al pavimento como principal causante del incremento de superficies calientes y de la temperatura del aire en las ciudades. Esto debido a la falta de vegetación, que absorbe parte de la radiación solar, aprovechando esa energía para la fotosíntesis, reflejando el resto. También por las características de las superficies (ya sea hormigón o asfalto), que absorben la radiación solar en lugar de reflejarla, así como las actividades humanas, industriales y los vehículos (John T Kevern, Haselbach, and Schaefer 2009; Rehan 2016), como se aprecia en la Figura 13. Con esto se compromete la salud de los peatones, la calidad del aire urbano, el uso de energía en los edificios, el bienestar de la sociedad, así como la sustentabilidad urbana (Wang, Berardi, and Akbari 2015).

La temperatura del pavimento cambia periódicamente por diversos factores, como la influencia de la radiación solar, la temperatura del aire, así como el viento. A su vez, también influyen las propiedades de los propios materiales que forman el pavimento, como por ejemplo, el color de los materiales, ya que entre más oscuro, se tiende a incrementar la temperatura, y viceversa (Karlessi et al. 2009; John T Kevern, Haselbach, and Schaefer 2009; H. Li et al. 2013). Es por eso que la temperatura en diversos pavimentos varía mucho, aún bajo las mismas condiciones climáticas (Hu et al. 2017). Estas condiciones se ven alteradas debido a la urbanización descontrolada, afectando en manera negativa el

ambiente urbano, causando lo que se conoce como efecto isla de calor (HIE por sus siglas en inglés – Heat Island Effect) (Rehan 2016).

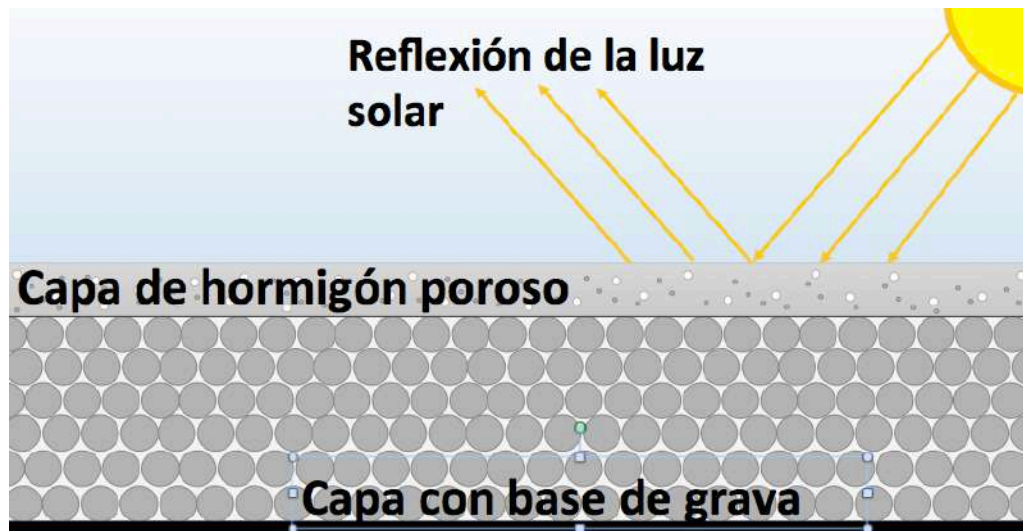


Figura 13. Esquema de la reflexión solar de un pavimento de hormigón poroso. Fuente: Elaboración propia.

HIE se define como el incremento de la temperatura en las zonas urbanas debido a una radiación solar elevada, que es absorbida por los materiales que se utilizan en la construcción. También, es causada por las actividades industriales y las emisiones de los vehículos, generando lo que se conoce como efecto invernadero (Rehan 2016). HIE puede incrementar la temperatura hasta en 10°C en zonas urbanas muy densas (Coseo and Larsen 2015). Los pavimentos de hormigón poroso, así como los pavimentos permeables en general, son considerados un tipo de pavimento fresco (cool pavement), debido a su capacidad para retener agua y por tanto evaporarla, ayudando a mitigar el HIE (Hui Li, Harvey, and Ge 2014).

El albedo (la proporción de la luz o radiación incidente que se refleja en una superficie) es un indicador de la capacidad de reflejo de una superficie. Se utiliza para evaluar el efecto de enfriamiento de los materiales. Se mide en una escala de 0 a 1, donde, a mayor albedo, mayor es la reflectividad solar del material, y viceversa (H. Li et al. 2013). Algunos investigadores han intentado evaluar el albedo de diferentes pavimentos, especialmente de hormigón convencional, obteniendo resultados interesantes que dependen del sitio de estudio y de la técnica empleada para crear la reflectividad (pinturas, aditivos,



etc.), logrando alcanzar niveles de albedo entre 0.5-0.9 (Karlessi et al. 2009; Kondo, Ogasawara, and Kanamori 2008; Masatoshi et al. 2006).

La literatura analizada ha mostrado mejores resultados en el nivel de albedo para pavimentos convencionales que para los porosos, esto puede deberse a la mayor área de contacto del pavimento convencional entre su superficie y los rayos del sol. Algunos autores llegaron a obtener niveles de albedo alrededor de 0.29, con un 17% de contenido de huecos. Utilizando cemento blanco y un tamaño de agregado de 9.5mm. Siendo este el mejor resultado encontrado en la literatura para pavimentos de hormigón poroso (Hui Li, Harvey, and Ge 2014).

Otros experimentos obtuvieron niveles de albedo de hasta 0.36 pero con un contenido de huecos de 15.1%, usando un agregado entre 2.36-4.76mm de tamaño (Hu et al. 2017). También hay estudios que obtuvieron una diferencia de 6°C y 0.03 en el nivel de albedo en favor del hormigón convencional, bajo las mismas condiciones climáticas (H. Li et al. 2013). Con esto demostraron que el hormigón poroso se comporta térmicamente similar al hormigón convencional (Haselbach et al. 2011; Santamouris 2013). Además de tener una superficie con mayor temperatura durante el día, pero menor durante la noche (John T Kevern, Haselbach, and Schaefer 2009; Santamouris 2013). También, el uso de ciertos aditivos, como la ceniza volcánica y musgo en el hormigón poroso, muestra una temperatura menor en su superficie, en comparación con el asfalto, de alrededor de 0.1°C (Asaeda and Ca 2000; Matsuo, Morino, and Iwatsuki 2005). Esta característica proporciona una ventaja al pavimento de hormigón poroso con respecto a otros materiales, ya que se traduce en un ahorro de energía, contribuyendo tanto al ambiente como a la economía de la población.



## **CAPÍTULO III. METODOLOGÍA**

El capítulo tercero describe detalladamente todos los elementos del proceso realizado para la ejecución de la investigación, incluyendo los materiales utilizados, metodologías, ensayos en laboratorio, herramientas de análisis estadístico, multi-criterio y económico. La Tabla 11 muestra la relación entre los diferentes estudios realizados en la presente investigación con los ensayos y herramientas empleadas en cada uno a fin de cumplir con los objetivos planteados.

Tabla 11. *Estudios realizados con los ensayos y herramientas empleadas en la presente tesis de investigación.*  
Fuente: *Elaboración propia.*

Estudios realizados	Herramientas empleadas				Ensayos realizados						
	Diseño de experimentos	Análisis de la varianza	Análisis multi-criterio	Análisis económico	Permeabilidad	Tracción indirecta	Fuerza a compresión	Resistencia al deslizamiento (seco y húmedo)	Círculo de arena	Módulo de Rigidez	Absorción del sonido
Comparación de métodos de dosificación			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Determinación de la dosificación óptima sin aditivos	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Estudio de aditivos y adiciones por separado		✓	✓		✓	✓					
Estudio de combinaciones de aditivos			✓		✓	✓		✓	✓		
Mezclas con dióxido de titanio			✓		✓	✓					
Influencia de la compactación en mezclas de hormigón poroso		✓	✓		✓	✓					
Absorción del sonido con distintos agregados			✓		✓	✓		✓			✓
Estudio de geopolímeros			✓		✓	✓					

### 3.1. Componentes principales

El presente apartado describe los diferentes materiales utilizados para la elaboración de probetas de hormigón poroso, así como los tipos, tamaños, cantidades y relaciones empleadas con el objetivo de estudiar las variables planteadas en términos hidráulicos, mecánicos, de seguridad y ambientales. De acuerdo al material disponible en los diversos laboratorios donde se realizaron los ensayos (en España, México e Italia), se trató de realizar siempre 3-4 probetas por mezcla, esto con el fin de incrementar la confianza en los resultados.

#### 3.1.1. Agregados

Se utilizaron diversos tipos de agregado para los diferentes ensayos realizados: ofita, basalto, pórfido y caliza. Al mismo tiempo, 5 granulometrías diferentes fueron

empleadas: 2-4mm, 4-8mm, 4-12mm, 8-12mm y 5-10mm, de acuerdo a las curvas granulométricas de la Figuras 14 en diferentes ensayos propuestos. La Tabla 12 explica y organiza los diferentes agregados, sus propiedades, granulometrías y ensayos empleados, así como las normas de referencia.

Tabla 12. *Propiedades y granulometrías del árido empleado en la presente investigación, así como los ensayos y normativas empleadas. Fuente: Elaboración propia.*

Propiedades	Norma	Árido											
		Ofita				Caliza			Basalto			Pórfido	
Granulometría (mm)	---	2-4	4-8	4-12	8-12	5-10	4-8	8-12	5-10	4-8	8-12	4-8	8-12
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	EN 1097-3	1.50	1.51	1.53	1.51	1.36	1.41	1.38	1.37	1.34	1.35	1.39	1.28
Volumen de huecos (%)	EN 1097-3	48.40	48.16	47.23	47.99	49.75	47.87	48.94	52.79	53.90	53.41	50.21	54.32
Densidad aparente compactada (g/cm <sup>3</sup> )	EN 1097-3	1.82	1.84	1.80	1.90	1.59	1.60	1.58	1.69	1.62	1.62	1.56	1.56
Volumen de huecos compactado (%)	EN 1097-3	37.53	36.67	37.94	34.64	41.24	40.69	41.58	41.69	43.99	44.28	44.25	44.18
Densidad partículas (g/cm <sup>3</sup> )	EN 1097-6	2.91	2.91	2.91	2.91	2.70	2.70	2.70	2.90	2.90	2.90	2.80	2.80
Absorción del agua (%)	EN 1097-6	1.00	1.00	1.00	1.00	0.90	0.90	0.90	0.30	0.30	0.30	1.20	1.20
Evaluación													
Métodos de compactación									✓				
Geopolímeros						✓							
Permeabilidad		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Tracción indirecta		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Compresión Axial		✓	✓	✓	✓								
Módulo de rigidez		✓	✓	✓	✓								
Resistencia al deslizamiento		✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓	✓
Círculo de arena		✓	✓	✓	✓								
Absorción del sonido							✓	✓		✓	✓	✓	✓

La distribución de la granulometría en las mezclas, es decir, la cantidad de árido de cada tamaño empleado, se dictaminó utilizando el método de la curva de gradación con exponente 0.45 de la Administración Federal de Autopistas de los Estados Unidos (FHWA por sus siglas en inglés). Este método consiste en elevar a una potencia de 0.45 el tamaño del árido, colocándolo en el eje de abscisas de un gráfico. El eje de ordenadas consistirá en el porcentaje que pasa de árido. Se traza una pendiente desde el árido con cero por ciento que pasa, al árido que pasa 100%, y donde intersecten en la pendiente los tamaños intermedios, será el porcentaje a utilizar en la mezcla, obteniendo así una granulometría de

máxima compacidad (Harman, D'Angelo, and Bukowski 2002; Roberts et al. 1996). Posteriormente se verificó con los tamaños estándar mostrados en la norma ASTM D448.

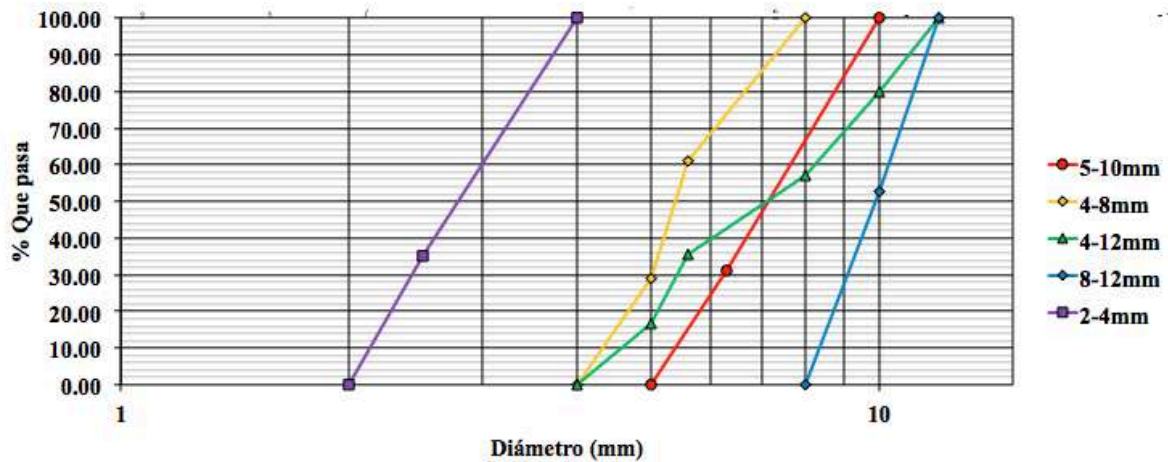


Figura 14. Curvas Granulométricas empleadas con los distintos agregados para la elaboración de mezclas de hormigón poroso. Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los finos (áridos de 0-2mm), su distribución se determinó mediante la ecuación 1, que es una modificación de la ecuación de Fuller realizada por la FHWA en 1962. En donde “Pi” es el porcentaje que pasa para cierto tamaño de tamiz (árido), “di” es el tamaño del árido y “D” el tamaño máximo de árido empleado en la mezcla (Harman, D'Angelo, and Bukowski 2002; Roberts et al. 1996).

$$P_i = \left(\frac{d_i}{D}\right)^{0.45} \quad (1)$$

### 3.1.2. Cemento

Se llegaron a utilizar 3 tipos diferentes de cemento, de acuerdo al lugar en donde se realizaba la investigación y su disponibilidad en España, México e Italia. El cemento CEM I 52.5R, de la empresa Grupo Cementos Portland Valderrivas fue empleado para la mayoría de las mezclas, en donde se desarrollaron ensayos de permeabilidad, tracción indirecta, compresión axial, módulo de rigidez, resistencia al deslizamiento y círculo de arena. Este tipo de cemento presenta una resistencia alta de 52.5Mpa a 28 días, con resistencia inicial elevada R (mayor a 20Mpa a los 2 días, de acuerdo a la normativa EN 197-1).

Por su parte, el cemento CPC 30R, de la empresa CEMEX, fue utilizado para la evaluación de los métodos de compactación. Este cemento, de clase 30, de acuerdo a la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2010, tiene una resistencia especificada a los 3 días y se utiliza para efectos de durabilidad, retracción y fisuración. Los métodos de compactación fueron estudiados mediante los ensayos de permeabilidad y tracción indirecta. Al mismo tiempo, las mezclas con este cemento fueron evaluadas con el aditivo de dióxido de titanio. En el *Anexo 1: Fichas técnicas del cemento empleado*. Se aprecia la información de los cementos empleados.

Finalmente, el cemento CEM I 42.5R fue utilizado en Italia para las probetas usadas en el ensayo de absorción del sonido. Además de evaluar también la permeabilidad, tracción indirecta y resistencia al deslizamiento con este tipo de cemento. Este cemento proporciona una resistencia media-alta de 42.5Mpa a 28 días con una resistencia inicial elevada R.

En general, de acuerdo a la norma EN 1907-6, el cemento obtuvo un peso específico de  $3.14\text{gr}/\text{cm}^3$ . Otros factores de diseño empleados fueron la relación arena-cemento (s/c), en donde se utilizaron tres cantidades diferentes de finos: 0, 0.5 y 1, en relación con la cantidad de cemento empleada. Otra característica utilizada fue la relación agua-cemento (a/c), en donde la cantidad de agua a utilizar dependía también de la cantidad de cemento de la mezcla. Aquí se utilizaron tres relaciones: 0.30, 0.35 y 0.40.

### **3.2. Metodologías de dosificación de hormigón poroso**

Las dosificaciones de hormigón poroso dependen de la metodología empleada. A continuación, se detallan dos metodologías de la normativa ACI, y una tercera llamada PCD (Diseño de hormigón poroso, por sus siglas en inglés – Porous Concrete Design), basada en las dos primeras metodologías, propuesta con la intención de mejorar las capacidades mecánicas de la mezcla, tratando de no afectar la permeabilidad. En el *Anexo 2: Proceso de elaboración de mezclas de hormigón poroso* se aprecian fotografías del procedimiento de elaboración de mezclas de hormigón poroso con cualquier metodología.

**3.2.1. ACI 211.3R-02**

En 2002 en Estados Unidos la NRMCA (National Ready Mix Concrete Association, por sus siglas en inglés: Asociación Nacional de Hormigón Premezclado) propone una metodología resumida en la norma ACI 211.3R-02 (American Concrete Institute ACI Committee 211 2002). Esta metodología de diseño de la NRMCA normalizada por el ACI (American Concrete Institute – Instituto Americano del Hormigón) consiste en determinar primero el volumen de la pasta de cemento que se utilizará para unir al agregado, manteniendo un contenido de huecos propuesto. Primero, se calcula el peso unitario seco envarillado del agregado grueso ( $\gamma_{DR}$ ), la densidad específica a granel del agregado grueso ( $\gamma$ ) y la capacidad de absorción de agua del agregado grueso ( $A_{ag}$ ) mediante la norma ASTM C-29/C-29M. Después, el volumen del agregado grueso ( $V_{ag}$ ) se obtiene de la ecuación 2.

$$V_{ag} = \frac{(\gamma_{DR})(A_{ag})(0.99)}{\gamma} \quad (2)$$

El siguiente paso es calcular el volumen de pasta de cemento, estimando el porcentaje de contenido de vacíos y aplicando la ecuación 3.

$$V_T = V_{ag} + V_{AV} + V_p \quad (3)$$

Donde “ $V_T$ ” es el volumen total de la mezcla, “ $V_{AV}$ ” es el volumen del contenido de vacíos y “ $V_p$ ” es el volumen de la pasta de cemento. Por último, la relación agua-cemento (a/c) deseada se establece para obtener las cantidades de cemento y agua de la ecuación 4.

$$V_p = V_c + V_w = \frac{W_c}{3150} + \frac{W_w}{1000} \quad (4)$$

Siendo “ $V_c$ ” y “ $V_w$ ” los volúmenes de cemento y agua, mientras que “ $W_c$ ” y “ $W_w$ ” son los pesos del cemento y del agua respectivamente. Cuando se utiliza agregado fino, el volumen de pasta ( $V_p$ ) se debe reducir 2% por cada 10% de agregado fino, en masa del agregado total para hormigón poroso bien compactada, y en 1% por cada 10% de agregado fino, en masa del agregado total para hormigón poroso ligeramente compactado.



### 3.2.2. ACI 522R-10

Esta metodología, propuesta por el comité 522 de la ACI en el año 2010 (American Concrete Institute ACI Committee 522 2010), con la intención de complementar la norma anterior en términos de diseño, se inicia definiendo el tipo de agregado a utilizar mediante una tabla traducida en la Tabla 13. En este caso se especifica desde un inicio si la mezcla tendrá, o no, agregado fino (arena). Y este porcentaje se toma del total de agregado grueso a utilizar.

Tabla 13. *Cálculo del porcentaje de agregado grueso a utilizar en las mezclas de hormigón poroso, dependiendo del porcentaje de agregado fino propuesto de acuerdo a la normativa ACI 522R-10, así como su relación arena-cemento (s/c). Fuente: Normativa ACI 522R-10.*

% Agregado Fino	% Agregado Grueso		s/c
	2.36-9.50mm	4.75-19.00mm	
0.00	0.99	0.99	0.00
5.00	0.96	0.96	0.51
10.00	0.93	0.93	1.12
20.00	0.85	0.86	2.24

A diferencia de la metodología de la NRMCA de 2002, aquí se propone iniciar con los pesos de los materiales para posteriormente determinar el volumen que ocupan en la mezcla, comenzando con el peso del agregado grueso ( $W_{ag}$ ) utilizando la ecuación 5.

$$W_{ag} = (\gamma_{varillado\ seco})(\% \text{ agregado grueso})(Vol. total\ concreto) \quad (5)$$

Y ajustando el valor resultante de acuerdo al porcentaje de absorción del árido. Obteniendo, entonces, el peso saturado con superficie seca ( $W_{SSD}$ ), que será el utilizado en la mezcla, con la ecuación 6.

$$W_{SSD} = (W_{ag})(1 + A_{ag}) \quad (6)$$

Para el cálculo de las cantidades de cemento y agua, se utiliza la Figura 15, referente al gráfico de relación entre el contenido de pasta y el contenido de vacíos. Se determina un porcentaje de huecos deseado, y de ahí se obtiene el porcentaje de pasta que la mezcla tendrá.

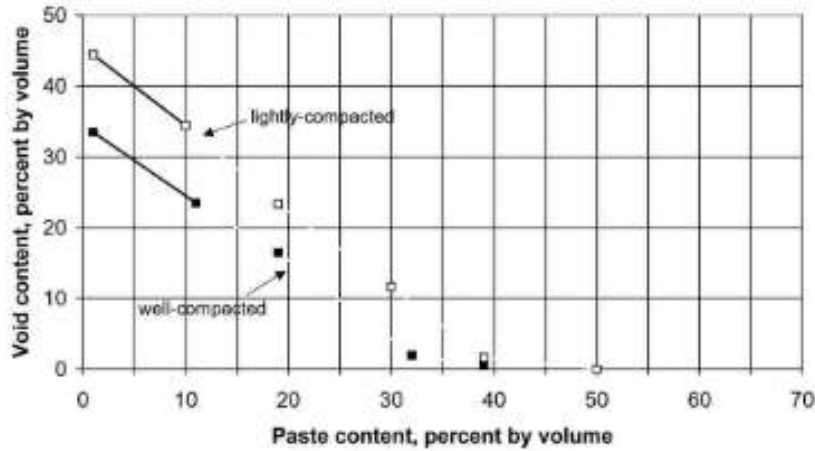


Figura 15. Relación entre el contenido de vacíos y la pasta de cemento para agregado grueso del número 8 (aproximadamente 2.4-9.5mm). Fuente: Comité 211 American Concrete Institute ACI, 2002 (disponible en acceso abierto).

Posteriormente, con la ecuación 7, se calcula la cantidad de cemento, y con la ecuación 8 obtenemos el contenido de agua de la mezcla:

$$C = \left( \frac{V_p}{0.315 + a/c} \right) (\gamma_{Agua}) \tag{7}$$

$$W = (C)(a/c) \tag{8}$$

La Tabla 14, ayuda a que se revisen los datos teóricos, al cumplir con ciertos parámetros establecidos. De no ser el caso, se procede a realizar los ajustes necesarios hasta que la mezcla cumpla la calidad requerida.

Tabla 14. Rangos típicos de los materiales que conforman el hormigón poroso de acuerdo a la normativa aci 522R-10. Fuente: Norma ACI 522R-10.

	Proporciones kg/m <sup>3</sup>
Material cementicio	270-415
Agregado	1190-1480
a/c, por masa	0.27-0.34
Relación agregado/cemento, por masa	4-4.5:1
Relación agregado fino/agregado grueso, por masa	0-1:1

Los resultados de diseño de las metodologías ACI 522R-10 y ACI 211.3R-02 tienden a ser muy similares, teniendo una diferencia de 0.5 gramos en el peso total por probeta. Esta diferencia se debe a variaciones en las cantidades de agua y cemento que se

obtienen en cada caso. En la Tabla 15 se puede observar una comparativa entre dos mezclas, una con arena y otra sin arena, diseñadas con ambas metodologías.

Tabla 15. *Ejemplo de una comparación entre mezclas con árido fino (arena) y sin árido fino, con las normativas ACI 522R-10 y NRMCA (ACI 211.3R-02). Fuente: Elaboración propia.*

	ACI 522R-10	ACI 211-3R-02	ACI 522R-10	ACI 211-3R-02
s/c	0.00	0.00	1.10	1.10
a/c	0.40	0.40	0.40	0.40
Arena (gr)	0.00	0.00	1,082.10	1,082.10
Agregado (gr)	10,501.30	10,501.30	10,097.00	10,097.00
Agua (gr)	445.70	444.20	386.30	385.00
Cemento (gr)	1,114.30	1,110.40	965.70	962.40

### 3.2.3. Metodología de Dosificación para Concreto Poroso (PCD)

La metodología propuesta PCD (Porous Concrete Design) para el diseño de mezclas de hormigón poroso, parte de unas relaciones arena-cemento (s/c) y agua-cemento (a/c) ya establecidas, así como de un porcentaje de huecos de diseño (Elizondo-martinez et al. 2019; Elizondo-Martinez et al. 2020). Entre las diferencias con las metodologías NRMCA (ACI 211.3R-02) y ACI 522R-10, se pueden destacar:

- La adición de arena se establece mediante una relación arena-cemento (s/c) definida previamente, no como un porcentaje del total de agregado.
- La arena se incluye, junto con el cemento y el agua, en la cantidad de pasta de cemento. Esto significa que la adición de arena modifica las cantidades de cemento y agua que se utilizarán. Esto se define por el porcentaje de pasta definido y por las características de absorción del agregado, así como la densidad de los materiales. En las normativas ACI, la pasta de cemento considera solamente agua y cemento, por lo que el agregado es condicionado por el porcentaje de arena utilizado.

Establecidas inicialmente las relaciones arena-cemento y agua-cemento, y el porcentaje de huecos de diseño, la resta del porcentaje de huecos del árido menos el porcentaje de huecos de diseño se toma como la cantidad de pasta de cemento a utilizar.

Para obtener la cantidad de árido grueso (Ag), se multiplica la densidad del agregado por el volumen que ocupa éste, es decir, el volumen total ( $V_T$ ) menos el porcentaje de huecos en el agregado mineral (VMA), como se refleja en la ecuación 9.

$$Ag = (\delta_{agregado})(V_T - VMA) \quad (9)$$

Para conocer el peso del cemento, se debe calcular antes el volumen de la pasta ( $V_p$ ) de cemento. Dicho dato se logra de la multiplicación entre el volumen total por la diferencia entre los huecos en el agregado mineral (VMA) y el volumen de huecos teórico (AV), como se observa en la ecuación 10.

$$V_p = (V_T)(VMA - AV) \quad (10)$$

Calculando la densidad del mortero en estado fresco, lo multiplicamos por el volumen de la pasta de cemento obtenido y se obtiene el peso de la pasta ( $W_p$ ). Con este dato, las fórmulas 11, 12 y 13, los porcentajes de absorción del árido (%abs) y las relaciones agua-cemento (a/c) y arena-cemento (s/c), podemos calcular la cantidad de cemento (C), arena (S) y agua (A).

$$C = \frac{W_p}{1 + a/c + s/c} \quad (11)$$

$$S = (s/c)(C) \quad (12)$$

$$A = [(a/c)(C)] + [(%abs)(Ag) + (%abs)(S)] \quad (13)$$

### 3.3. Estudio Económico

El estudio económico de cualquier procedimiento o material constructivo es de suma importancia, y de interés primordial, sobre todo cuando se trata de una innovación. Además de proporcionar a los futuros inversores, o a los constructores que se pretende utilicen la innovación, las ventajas que el producto presenta, el costo de éste puede ser el factor principal que defina si las empresas optan por utilizarlo o no. Para la presente investigación, se empleó la metodología propuesta por Carlos Suárez Salazar (Suarez-Salazar 1978). A continuación, se describen cada uno de los pasos, adaptados a la presente investigación.

### **3.3.1. Identificación de los componentes del hormigón y de su proceso constructivo**

Como primer paso, es importante identificar los materiales que conforman la mezcla del hormigón. El análisis se realizó para un hormigón base, es decir, sin contemplar aditivos, tanto para un hormigón convencional como para dos hormigones porosos, uno realizado con la metodología PCD, y otro con la metodología ACI 522R-10. Además, se evaluó el costo de un pavimento de asfalto para comparar los resultados. Adicionalmente, se analiza el diseño de la base y la sub-base, costos administrativos (indirectos), de mano de obra, seguro social, trabajos preliminares, instalación de sistema de drenaje (en caso de ser requerido), así como terminación y mantenimiento.

### **3.3.2. Determinación de los rendimientos de los componentes del hormigón**

Para determinar un rendimiento de cada componente del hormigón (cemento, árido grueso, arena y agua), se fijó una cantidad determinada de mezcla, en este caso,  $1\text{m}^3$ . En base a experiencia previa y de acuerdo a lo que ciertos proveedores de materiales establecen, se calcula la dosificación de  $1\text{m}^2$  de hormigón, considerando un espesor de 12cm de capa, obteniendo así las cantidades que se requieren. Dicho lo anterior, el análisis se basará en la cantidad de  $1\text{m}^2$  de sistema de pavimento, obteniendo el resto de los costos necesarios para el análisis bajo la misma unidad.

Debido a que la mayoría de las tiendas de materiales de construcción manejan diferentes cantidades de material y, por consiguiente, varía el precio del mismo, se fijaron cantidades estándar de cada componente. Se utilizó la presentación de saco de 50kg para el cemento, y  $\text{m}^3$  para el árido grueso, arena y agua.

### **3.3.3. Obtención de los precios de los materiales que conforman el hormigón**

Una vez que se define el rendimiento y la unidad de presentación a emplear, se obtiene el precio de cada material. Como el interés es el precio comercial del producto, se utilizan los precios netos que se pueden obtener en las tiendas comerciales de materiales de construcción. A pesar de que cada comercio puede contar con un costo diferente, el resultado será una aproximación a lo que puede llegar a costar el hormigón poroso.

Además, se realiza una comparación entre los tres métodos de dosificación mencionados anteriormente.

#### **3.3.4. Determinación del costo de mano de obra**

Generalmente, los trabajadores que laboran en la construcción en México, tienen su salario por jornada. Para la presente investigación, se convirtió ese salario por jornada a costo por m<sup>2</sup>, considerando un rendimiento de 7m<sup>2</sup> de elaboración y colocación de hormigón por jornada. Se consideró una cuadrilla de un Oficial albañil con dos ayudantes. Esto incluye excavaciones, instalaciones hidráulicas y de más elementos que conforman todo el sistema de pavimento.

#### **3.3.5. Cálculo del costo del Seguro Social**

El costo del Seguro Social es una cantidad de dinero diaria proporcionada por la empresa que contrata a la mano de obra (trabajadores) la cual, dividida entre los m<sup>2</sup> de rendimiento por jornada establecidos, es posible obtener el costo del Seguro Social por m<sup>2</sup>.

#### **3.3.6. Cálculo del costo administrativo de la empresa (Costos Indirectos)**

Los costos indirectos son valores que afectan el costo final del producto, pero no se pueden asignar como una cantidad fija a un solo producto, sino que se realiza un análisis considerando las obras o ventas mensuales (por ejemplo), y se añade como un porcentaje del costo del producto. Estos costos contemplan: salario del gerente o dueño, secretaria, ingenieros, supervisores, alquiler de oficina, servicios (internet, agua, luz), viáticos, seguros de vehículos, mantenimiento de vehículos, combustible, seguro social del personal administrativo, equipo de cómputo, entre otros.

Para la presente investigación, al estar realizando un análisis económico para otorgar una idea de los costos de los pavimentos permeables de hormigón, y de uno convencional, se emplearon cantidades basadas en la experiencia propia, así como de información otorgada por ingenieros civiles que laboran en empresas en México.

### **3.3.7. Determinación del costo de los sistemas evaluados**

Se realiza una compilación de los datos de costos de materiales obtenidos anteriormente, así como de las dosificaciones para cada sistema de pavimento analizado, y se obtiene el costo de cada tipo de pavimento evaluado, en la unidad establecida, de m<sup>2</sup>. Es importante contemplar también costos producto de la excavación para la base y sub-base, material para los mismos, acarrees, instalaciones hidráulicas (en caso de ser requeridas), sellado de juntas (en caso de ser requeridas), entre otros.

### **3.3.8. Adición del costo administrativo**

Como siguiente paso, una vez obtenido el costo en la unidad establecida (m<sup>2</sup> en este caso), se añade el costo administrativo calculado, en porcentaje. Este valor será diferente para cada sistema de pavimento, ya que el costo de cada procedimiento es diferente, pero la cantidad, en términos monetarios del costo administrativo, será siempre la misma.

### **3.3.9. Adición de la utilidad propuesta**

La utilidad que la empresa que otorga el servicio ganará, generalmente es propuesta por ella misma. Se establece en porcentaje del total del costo del sistema más el costo indirecto. La utilidad se establece de acuerdo a lo que necesita la empresa para poder continuar con sus operaciones normales, siendo un valor entre un 6-10%. Para la presente investigación, se considerará una utilidad del 10%, donde, una vez obtenido el valor, se adiciona el Impuesto al Valor Agregado (I.V.A), que en México es de 16%, y en España del 21%. Ya que los precios del presente análisis son de México, se considerará el I.V.A. de ese país.

### **3.3.10. Comparación de los costos de los sistemas**

Finalmente, una vez obtenido el costo de los sistemas de pavimentos contemplados para el análisis, se procede a su comparación y se determina cuál es, en términos económicos, más viable de realizar actualmente (los precios futuros podrían variar, modificando el resultado). Es importante aclarar que, el análisis económico que se realizará

es sólo de instalación. Posteriormente, se puede agregar un análisis del costo de mantenimiento, considerando los años de vida que el pavimento llega a tener normalmente.

### 3.4. Aditivos empleados

De acuerdo a la literatura revisada, es muy común el uso de diferentes cantidades de aditivos para distintas dosificaciones de hormigón poroso, obteniendo diversos resultados. Esto siempre con la finalidad de obtener un pavimento poroso óptimo que resista las cargas generadas por el tráfico, infiltre el agua y, también, sea sostenible. En la Tabla 16 se pueden apreciar las cantidades máximas y mínimas, así como un promedio, de los aditivos más comunes, así como de algunos tipos de adiciones (distintos tipos de fibras), en las mezclas de hormigón poroso. (Agar Ozbek et al. 2013; AMDE and ROGGE 2013; Bhutta, Tsuruta, and Mirza 2012; Bonicelli, Giustozzi, and Crispino 2015; Chen et al. 2013; Gesoğlu et al. 2014; Lee et al. 2011; Lian and Zhuge 2010; W. Shen et al. 2013).

Tabla 16. *Cantidades máximas, mínimas y promedio de los aditivos más comunes empleados en las mezclas de hormigón poroso. Fuente: Elaboración propia.*

Aditivo	Superplastificante	Incluidor de aire	Retardante	Modificador de viscosidad	Fibras poliméricas	Fibras metálicas
Unidad	Peso del material cementicio (%)	Peso total de la mezcla (%)	Peso total de la mezcla (%)	Peso del agregado (%)	Peso del material cementicio (%)	Peso del material cementicio (%)
Mínimo	0.20	0.02	0.01	0.02	1.15	8.33
Máximo	2.00	0.02	0.05	0.15	1.15	8.33
Promedio	0.75	0.02	0.04	0.14	1.15	8.33

Estas cantidades fueron tomadas como base para el diseño de mezclas porosas de hormigón. Sin embargo, se dio prioridad a las cantidades establecidas en las fichas técnicas, procurando tener al menos tres dosificaciones por cada aditivo analizado para evaluar mejor el comportamiento asociado. Las mezclas elaboradas fueron introducidas en el curado por un periodo de siete días, tiempo considerado el suficiente para observar resultados viables y comportamientos adecuados. Se realizó una mezcla de control (sin aditivos) para comparar las mejoras que cada aditivo otorgaba a la misma.

Posterior a obtener las cantidades óptimas de aditivos por separado, se procedió a combinarlos añadiéndolos a la dosificación óptima obtenida del estudio previo de las mezclas elaboradas sin aditivos.



La Tabla 17 muestra los aditivos empleados en la presente tesis de investigación con sus respectivas cantidades y la Tabla 18 las combinaciones realizadas con ellos. Los aditivos son descritos posteriormente. En el *Anexo 3: Fichas técnicas de los aditivos empleados*, se aprecia la información de los aditivos utilizados en la presente investigación.

Tabla 17. *Aditivos empleados en la presente tesis de investigación y su dosificación. Fuente: Elaboración propia.*

Aditivo	Dosificaciones empleadas	Cantidad de mezclas	Nota
Fibras de acero al carbono	3.42, 8.33 y 27.39% del peso del cemento	3	
Fibras de polipropileno	0.68, 1.15 y 2.46% del peso del cemento	3	
Incluser de aire	0.15, 1.5 y 3% del peso del cemento	3	
Microsilíce	5, 10 y 15% del peso del cemento	4	Se hicieron dos mezclas, una quitando el respectivo peso del cemento y otra sin quitarlo. Posterior a eso, se realizaron dos mezclas más (10% y 15%) con la que presentó mejor resultado de la primera fase.
Suspensión de nanosilíce	0.5%, 5%, 10% y 15% del peso del cemento	4	
Superplastificante	0.5%, 1.5% y 2.5% del peso del cemento	5	Se evaluaron cuatro cantidades de agua (-0%, -5%, -10% y -15%)
Modulador de viscosidad	0.5%, 0.65% y 0.8% del peso del cemento	3	Se combinó con la cantidad óptima de superplastificante
Retardante	0.2%, 1.35% y 2.5% del peso del cemento	3	Se combinó con la cantidad óptima de superplastificante

Tabla 18. *Combinaciones de aditivos analizadas en la presente tesis de investigación. Fuente: Elaboración propia.*

Combinaciones realizadas con los diferentes aditivos evaluados	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suspensión de nanosilíce</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suspensión de nanosilíce + Superplastificante</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superplastificante</li> <li>• Fibras de acero al carbono</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suspensión de nanosilíce + Superplastificante + Fibras de acero al carbono</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fibras de polipropileno</li> <li>• Superplastificante + Retardante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suspensión de nanosilíce + Superplastificante + Fibras de polipropileno</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superplastificante + Modificador de viscosidad</li> <li>• Microsilíce</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suspensión de nanosilíce + Superplastificante + Retardante</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suspensión de nanosilíce + Superplastificante + Retardante + Modificador de viscosidad + Fibras de acero al carbono + Fibras de polipropileno</li> </ul>	

A continuación se describen brevemente los aditivos utilizados en la presente investigación.

### 3.4.1. Fibras de acero al carbono

Este tipo de fibras se utiliza mucho cuando se requiere un refuerzo estructural o un hormigón de alta resistencia. Tiene una esbeltez elevada y proporciona una buena ductilidad y refuerzo estructural a flexión, tracción y cortante. Algunos investigadores lograron incrementar por encima del 40% la resistencia a compresión del hormigón poroso y en un 16% la resistencia a flexión, utilizando  $40\text{kg/m}^3$  de este tipo de fibras. Sin embargo, la permeabilidad se vio afectada al disminuir un 25%, decreciendo un 22% la cantidad de huecos de la mezcla (Lee et al. 2011). Estos resultados contaban además con un 10% de humo de sílice añadido. El tamaño de las fibras es de 10mm aproximadamente. Para la presente investigación se utilizaron 3 diferentes dosificaciones de acuerdo a la ficha técnica y lo evaluado en la literatura: 3.42%, 8.33% y 27.39% del peso del cemento.

### 3.4.2. Fibras de polipropileno

Este tipo de fibras se utiliza con la intención de evitar que el hormigón sufra fisuras por la humedad al reducir las grietas. Al mismo tiempo, permite aumentar la resistencia a compresión y flexión al permitir una mejor adherencia en la mezcla. También, en caso de fallar la estructura, ésta puede recaer en las fibras, previniendo un accidente mayor. Algunos estudios lograron aumentar la resistencia a la compresión en más de un 30%, y la resistencia a tensión en casi 35%, empleando  $0.9\text{kg/m}^3$  de fibras de polipropileno en la mezcla (Huang et al. 2010). Otras investigaciones lograron incrementar en un 6% la resistencia a la compresión empleando fibras en un 0.5% del volumen total de la mezcla. (Rehder, Banh, and Neithalath 2014). El tamaño de las fibras es de aproximadamente 54mm. En la presente investigación se utilizaron estas fibras en 0.68%, 1.15% y 2.46% del peso total del cemento, de acuerdo a lo analizado en las fichas técnicas y en la literatura evaluada.

### 3.4.3. Inclisor de Aire

Estos aditivos, a pesar de no ser muy utilizados en hormigón poroso, se emplean para crear resistencia a los ciclos de hielo-deshielo (ASTM C260/C260M-10a 2013).

También, tiene por objetivo hacer un hormigón con mayor trabajabilidad, más sencillo de manejar para su puesta en obra, ya que aumenta el aire ocluido en el hormigón. Este aditivo fue utilizado en un 0.15%, 1.50% y 3% del peso total del cemento, de acuerdo a lo evaluado en las fichas técnicas y en la literatura existente.

#### **3.4.4. Microsílice**

Es un aditivo en polvo, que se emplea en hormigones en cantidades pequeñas (normalmente entre el 5-10% del peso del cemento), ya que hace requerir de más agua la mezcla. Por este motivo, es muy normal combinarlo con superplastificantes (Malhotra and Carette 1983). No representa un incremento muy grande en la resistencia mecánica de las mezclas, sin embargo, al disminuir la cantidad de cemento en la mezcla, se considera que disminuye su impacto ambiental. Algunos investigadores observaron que los resultados mecánicos eran influenciados, no solamente por la microsílice, sino también por el tamaño del agregado empleado. Así, obtuvieron un incremento de casi 7% en la resistencia a compresión al utilizar un tamaño de agregado de 2-4mm, pero una disminución de poco más del 9% cuando el tamaño se incrementaba de 4-8mm (Agar Ozbek et al. 2013). En esta tesis, se evaluó este aditivo, primero, en un 5% del peso del cemento, tanto disminuyendo como manteniendo la cantidad de cemento. Una vez obtenidos los resultados, se evaluó en un 5%, 10% y 15% del peso del cemento, disminuyendo la cantidad de cemento de la mezcla.

#### **3.4.5. Suspensión de nanosílice**

Este aditivo es un mineral muy activo que, durante la hidratación del cemento, reacciona con el hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), mejorando las propiedades del cemento. Esto se debe a su alta área superficial específica, y con ello se logran menores periodos de inducción, y una resistencia a la compresión más alta (Tobón et al. 2018). Algunos estudios dicen que la suspensión de nanosílice mejora la calidad de la pasta de cemento por sus propiedades puzolánicas, haciendo más densa la microestructura del hormigón, incrementando su durabilidad, pudiendo también mejorar las propiedades de un hormigón poroso (B. S. Mohammed et al. 2018). Para la presente investigación se utilizó este aditivo en un 0.50%, 5%, 10% y 15% del peso total del cemento.

### **3.4.6. Superplastificante (Reductor de agua)**

Los aditivos superplastificantes permiten reducir la cantidad de agua en la mezcla sin perder su trabajabilidad y consistencia. Según estudios previos, estos aditivos pueden reducir la cantidad de agua hasta un máximo de 30% y pueden mejorar las propiedades reológicas del hormigón (L. Yang et al. 2018). Otras investigaciones han logrado concluir que estos aditivos pueden mejorar las propiedades mecánicas del hormigón poroso (Chen et al. 2013; Erismann et al. 2016). Estas mejoras mecánicas pueden explicarse por avances microestructurales ocasionados por la reducción de la relación agua-cemento (a/c) en las mezclas (Yilmaz et al. 2015). En esta tesis, este aditivo fue analizado en un 0.50%, 1.50% y 2.50% del peso total del cemento. Siendo previamente evaluado un 1.50% reduciendo un 0%, 5%, 10% y 15% de agua en la mezcla.

### **3.4.7. Modulador de viscosidad**

Estos aditivos ayudan a que las mezclas sean más sencillas de trabajar y moldear, aunque no presentan una ayuda significativa en la fuerza y durabilidad de la mezcla. En términos de hormigón poroso, al ser éste un material más duro y difícil de manejar, debido a su ausencia de agregado fino y poca agua en comparación con un hormigón convencional, el modulador de viscosidad ayuda a tener una mezcla más fluida y que sea más sencillo de colocar y compactar (AMDE and ROGGE 2013). Para la presente investigación se utilizó este aditivo en un 0.50%, 0.65% y 0.80% del peso total del cemento, de acuerdo al análisis de la ficha técnica y de la literatura existente.

### **3.4.8. Retardante**

Estos aditivos sirven para controlar la hidratación del cemento. También, pueden actuar como lubricantes para poder descargar el hormigón de un mezclador, mejorando su manejo, así como las características de rendimiento. De acuerdo a la evaluación de la literatura existente y la ficha técnica de este aditivo, se decidió utilizarlo en un 0.20%, 1.40% y 2.50% del peso total del cemento.

### 3.4.9. Dióxido de Titanio (TiO<sub>2</sub>)

Para otorgar la propiedad fotocatalítica a las mezclas, se utilizó dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) de la marca Aeroxide P25, de la compañía Evonik. De acuerdo a la ficha técnica, mostrada en el *Anexo 4: Ficha técnica del Dióxido de Titanio empleado*. Este producto se utiliza, entre otros usos, para que materiales de construcción, como el concreto o el yeso, obtengan la capacidad de autolimpieza mediante una propiedad fotocatalítica. Tiene una consistencia en polvo, parecida al talco, de color blanco. Se caracteriza por ser muy volátil, por lo que es importante mantenerlo en un ambiente cerrado, sin humedad, y no a la intemperie.

En esta tesis, se evaluaron diferentes métodos de adición del TiO<sub>2</sub> en mezclas de hormigón poroso. Entre ellos, diferentes formas de aplicarlo directamente en la superficie una vez realizada la probeta de hormigón. Al no ser tan adhesivo, el TiO<sub>2</sub> se aplicó con un poco de cemento y arena en la superficie, evaluando posteriormente su afectación en la permeabilidad. Además, se evaluó la adición de TiO<sub>2</sub> en la mezcla, en diferentes proporciones, para cuantificar la capacidad fotocatalítica que la mezcla podía llegar a obtener, evaluando también la alteración en las propiedades mecánicas e hidráulicas de las mezclas.

### 3.5. Métodos de compactación

Esta parte de la investigación se desarrolló en el Laboratorio de Vías Terrestres de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en la Ciudad de México, y se enfocó en comparar en métodos de compactación diferentes, evaluados en mezclas de hormigón poroso en varias investigaciones, para evaluar la influencia de la compactación en los resultados hidráulicos y mecánicos de las mezclas. En la Figura 16 se observa el diagrama de los métodos de compactación analizados, siendo éstos detallados posteriormente.

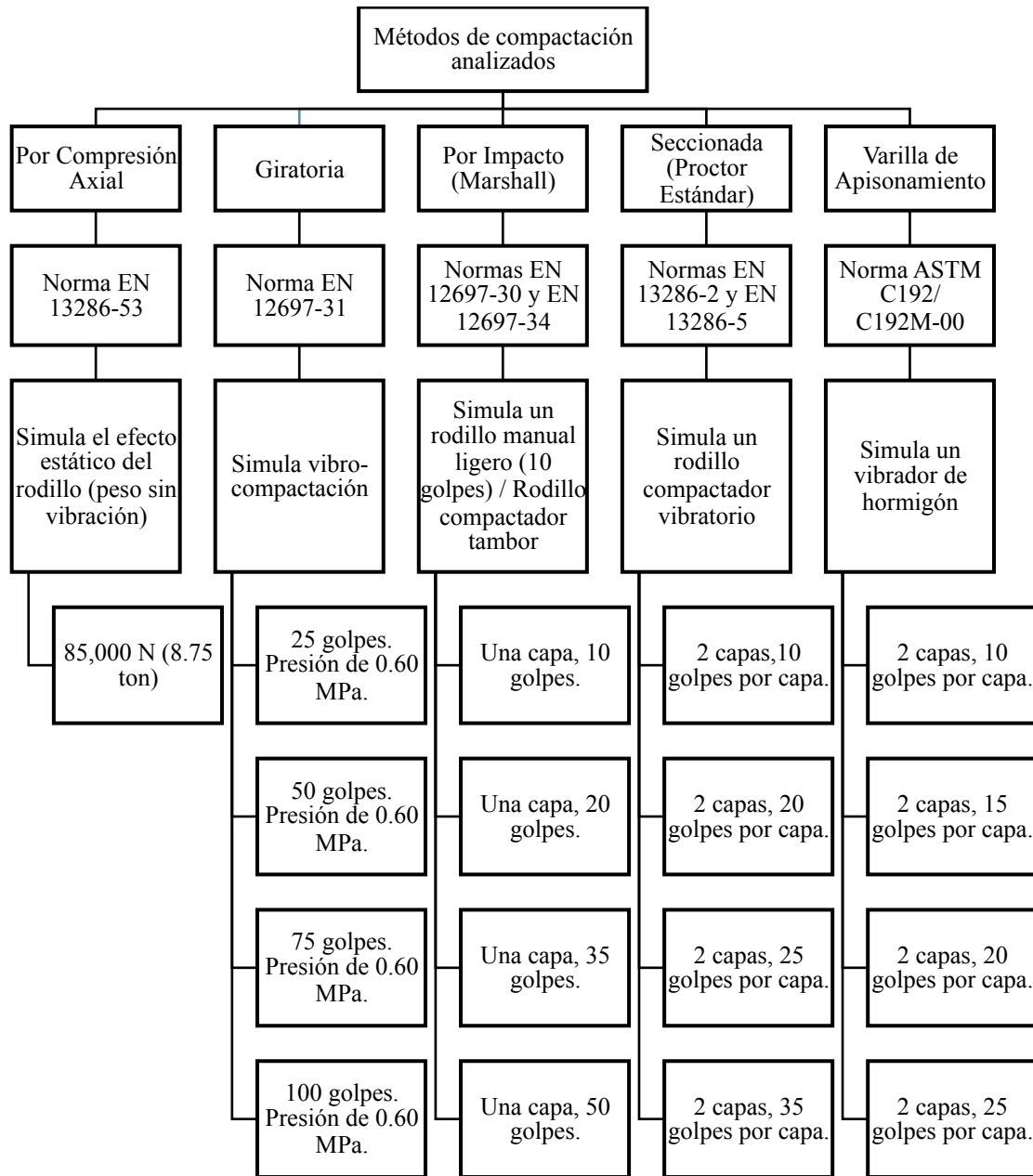


Figura 16. Diagrama de los métodos de compactación analizados (Fuente: elaboración propia).

### 3.5.1. Compactación por compresión axial

La compactación por compresión axial puede simular la parte estática de un rodillo, es decir, la acción del peso, pero sin la vibración. Éste método es muy utilizado en la producción de adoquines de hormigón. Sin embargo, la razón de su implementación en las mezclas de hormigón poroso de la presente investigación es que éste método permite controlar de una mejor manera el espesor final de la probeta, ya que la carga se incrementa hasta que se logra un espesor final definido. Esto permite definir el contenido de huecos

teórico (20% en este caso), y faculta para evaluar diversas dosificaciones variando únicamente las cantidades de los componentes, sin alterar el contenido de huecos teórico establecido. Con esto, es posible determinar la dosificación que dé la máxima resistencia mecánica con un volumen de huecos constante. Por tanto, la compactación con este método no se realizó a control de una fuerza, sino a control de desplazamiento, donde el pistón de la prensa utilizada se movía a 10mm/min, hasta alcanzar una fuerza máxima de 85,000N (8.67ton). La norma en la que se basó el ensayo fue la EN 13286-53, donde se especifica que la prensa de compactación a utilizar debe de poder ejercer una fuerza suficiente, sin vibraciones, y de manera controlada.

Las muestras de ofita se compactaron con una prensa mecánica (Figura 17), utilizando el software de computadora TestExpert II para controlar la fuerza de compactación en todas las mezclas. Este software permite evaluar diferentes variables en las probetas, como son la deformación y la capacidad de carga, entre otras variables que hacen que se utilice para casi todas las normativas existentes. Debido a los diferentes tamaños de agregado utilizado, diversos aditivos y cantidades de los mismos empleados, así como a las relaciones arena-cemento (s/c) y agua-cemento (a/c) utilizadas, sumado al desgaste que han sufrido los moldes Proctor y Marshall empleados (que generan una fricción entre las paredes internas del molde y el agregado), la compactación final puede ser distinta en todas las mezclas, si bien variando muy poco la altura y por consiguiente el volumen de huecos.



Figura 17. Prensa mecánica utilizada para compactar las mezclas con ofita, por compresión axial (presión) (Fuente: elaboración propia).

La Figura 18 muestra el equipo utilizado para la compactación por compresión axial de las probetas hechas con basalto al momento de comparar métodos de compactación. Se realizó una sola mezcla con este agregado, compactada también a 85,000N. Esta decisión se realizó, por un lado, para aplicar la misma compactación de las muestras hechas con ofita a las mezclas hechas con basalto, para comparar los diversos métodos de compactación con éste método. Por otro lado, se empleó sólo una fuerza de compactación porque se asumió que, a mayor fuerza, la compactación incrementa y, por consiguiente, la capacidad mecánica aumenta, disminuyendo la capacidad hidráulica.

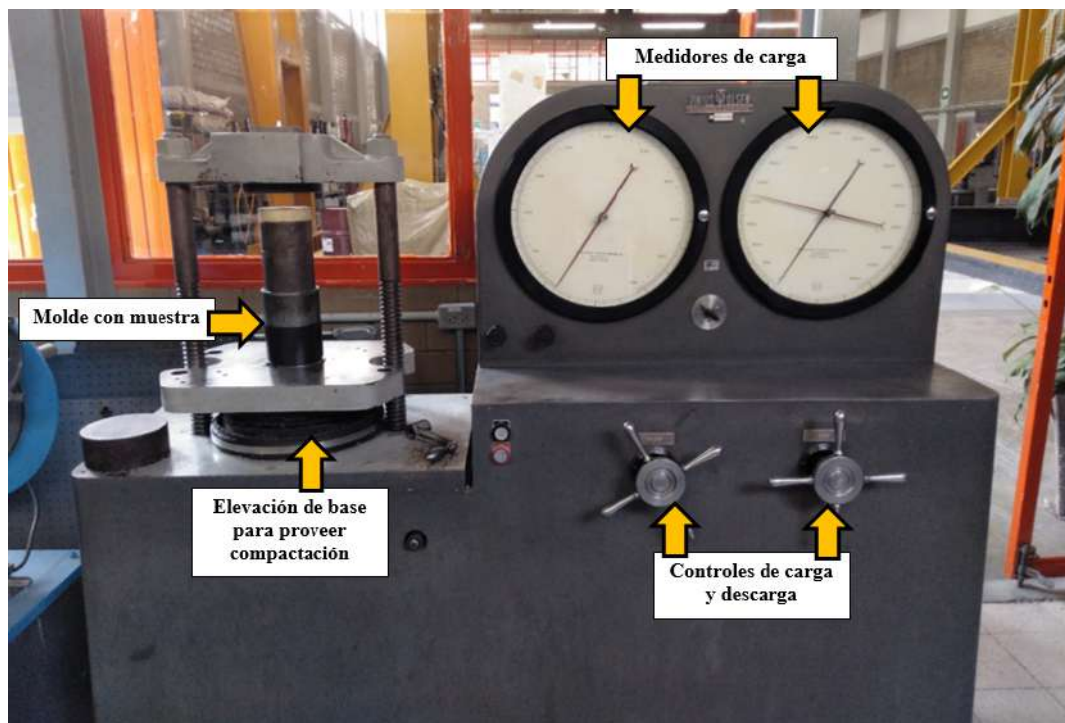


Figura 18. Prensa mecánica utilizada para compactar las mezclas con basalto, por compresión axial (presión) (Fuente: elaboración propia).

### 3.5.2. Compactación giratoria

Este tipo de compactación se realiza por amasado de la mezcla, y, de acuerdo a algunos autores, puede simular el amasado que produce un rodillo compactador. Normalmente, esta compactación es utilizada para mezclas asfálticas, a una presión de 0.60MPa, en el laboratorio (J. T. Kevern, Schaefer, and Wang 2009). El dispositivo consiste en un molde cilíndrico, con un diámetro interior de 150mm. Adicionalmente, cuenta con una base redonda debajo, con la intención de proveer confinamiento durante la



compactación. Esta base gira a una velocidad constante de 30rpm durante la compactación, y el molde se posiciona con un ángulo de inclinación de 1.25°, como puede observarse en la Figura 19 (Fattah, Hilal, and Flyeh 2019).



Figura 19. Compactador giratorio para la compactación de mezclas de hormigón poroso (Fuente: elaboración propia).

Usualmente se utilizan 100 giros para la realizar la compactación, pudiendo variar para lograr diferentes porcentajes de huecos. Para esta investigación, se realizaron cuatro mezclas compactadas a 25, 50, 75 y 100 giros cada una, a una presión de 0.60MPa, de acuerdo con la norma EN 12697-31. Investigaciones han concluido que realizar una compactación a más de 100 giros, puede disminuir la cantidad de huecos considerablemente (J. T. Kevern, Schaefer, and Wang 2009) . Las probetas elaboradas mediante este método de compactación tienen dimensiones de 150mm de diámetro y 90mm de altura.

Las probetas a 25, 50, 75 y 100 giros fueron empleadas para evaluar la mejor relación mecánica-hidráulica en función del tipo de compactación. Las probetas realizadas para el ensayo de absorción del sonido, y algunas muestras donde se evaluó también la resistencia al deslizamiento, tracción indirecta y permeabilidad, comparando distintos agregados, se compactaron mediante este método, a 100 giros.

### 3.5.3. Compactación por impacto (Marshall)

Este tipo de compactación ha sido utilizado por muchos investigadores, ya que también puede reproducir las características in situ del hormigón poroso, con una desviación estándar pequeña (Bonicelli et al. 2015). Consiste en un martillo con una base circular y plana de 98.4mm (3 7/8”) de diámetro. Arriba de la base, a una distancia de 456.2mm (18”), se encuentra un pistón de 4.536kg (10lb), como puede apreciarse en la Figura 20. El martillo se suelta, y golpea la probeta Marshall colocada debajo, siendo considerado éste un golpe. El grado de compactación depende del número de golpes aplicado a la probeta, donde la norma EN 12697-30 establece 50 golpes por cada lado del molde. También pueden aceptarse 35 golpes cuando se considera tráfico ligero, y 75 golpes cuando se considera un tráfico pesado, de acuerdo a la norma EN 12697-34. Adicionalmente, algunos autores han concluido que más de 20 golpes en las mezclas de hormigón poroso tienden a colmatar casi por completo la muestra, ya que este método es originalmente para mezclas asfálticas no porosas. Con esto se elimina casi por completo la capacidad de infiltración, pero la fuerza mecánica incrementa (Bonicelli et al. 2013).

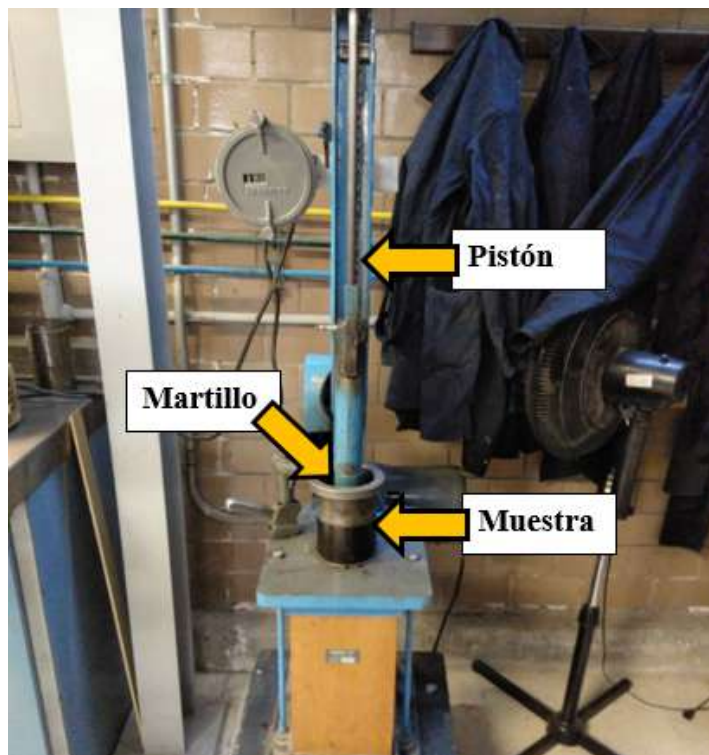


Figura 20. Compactador Marshall para compactación de muestras de hormigón poroso (Fuente: elaboración propia).

Para esta investigación, se realizaron 4 mezclas, compactándolas con 10, 20, 35 y 50 golpes, por un solo lado del molde, cada una, para evaluar la influencia de la compactación en las mezclas y poder obtener el mejor resultado en términos de la combinación hidráulica-mecánica de las mezclas. Al mismo tiempo, las mezclas que se realizaron para el estudio de geopolímeros y el estudio de fotocatalisis, fueron compactadas con este método, a 35 golpes por un solo lado del molde.

#### **3.5.4. Compactación seccionada (Proctor estándar)**

Este método de compactación se utiliza principalmente para determinar la densidad seca máxima de materiales terrosos, así como para realizar un control de calidad de la compactación del mismo. Existen dos ensayos Proctor que se encuentran normalizados: el ensayo Proctor Estándar y el ensayo Proctor Modificado. La diferencia radica en el peso y altura del martillo o pistón a utilizar en la compactación. Donde para el primero, de acuerdo a la norma EN 13286-2, se usa una masa 2.50kg a una altura de 305mm; y para el segundo, una masa de 4.50kg a una altura de 457mm. Con el ensayo proctor estándar se caracterizan los suelos in situ sobre los cuales se construirá un pavimento. De este modo se controlan algunas de las capas que van en la estructura del propio pavimento y que están alejadas de la superficie. Mientras, con el proctor modificado se caracterizan las capas más cercanas a la superficie.

Para esta investigación, se utilizó el ensayo Proctor estándar, ya que se consideró que el modificado podría llegar a colmar la probeta considerablemente por exceso de compactación. El dispositivo se aprecia en la Figura 21. El molde utilizado es de 100mm de diámetro por 120mm de alto, donde las probetas se diseñaron con una altura de 65mm para la realización del ensayo a tracción indirecta.

Algunos autores obtuvieron resistencia a compresión superiores a 15MPa con permeabilidades considerables de alrededor de 0.50cm/s, empleando 3 capas de 10 golpes cada una (Torres, Hu, and Ramos 2015). Otros autores obtuvieron resistencia a compresión superiores a 20MPa, compactando con 2 capas a 20 golpes cada una, con permeabilidades de 0.58cm/s. Si bien en este último estudio se observó que las probetas llegaban a fallar en

la unión de las capas (Rizvi et al. 2009). En la presente tesis, se compactaron las muestras a 2 capas, con 10, 20, 25 y 35 golpes cada capa.



Figura 21. Compactador Proctor para compactación de mezclas de hormigón poroso (Fuente: elaboración propia).

### 3.5.5. Varilla de apisonamiento

Este método trata de simular el vibrado del hormigón. Se realiza de forma manual, donde una varilla de 16mm de diámetro y 300mm de altura es utilizada, como se aprecia en la Figura 22. El ensayo consiste en colocar en un molde específico, un volumen de mezcla y apisonarla con cierto número de golpes a lo largo de su superficie, y en diferentes capas de ser posible. La normativa ASTM C192 establece realizar 3 capas de 25 golpes cada una, para probetas de 100mm de diámetro y 200mm de altura, o 150mm de diámetro y 300mm de altura. Sin embargo, como las probetas para la presente investigación fueron calculadas

para ser de 100mm de diámetro y 65mm de altura, se decidió compactar los especímenes a 2 capas con 10, 15, 20 y 25 golpes cada una.



Figura 22. Varilla de apisonamiento para compactación de mezclas de hormigón poroso (Fuente: elaboración propia).

### 3.6. Ensayos hidráulicos

A continuación se describen los ensayos hidráulicos realizados a las probetas de concreto poroso con el objetivo de evaluar la permeabilidad que pueden llegar a alcanzar con las diversas dosificaciones analizadas. Al mismo tiempo, se calcula la porosidad total de las probetas y se muestra una técnica reciente, las Imágenes por Resonancia Magnética, que alcanza a mostrar los resultados de una forma más exacta y visual que permite entender el comportamiento de la mezcla mediante el análisis de su estructura interna.

#### 3.6.1. Porosidad

Para el cálculo de la porosidad (P), una vez que las mezclas estaban elaboradas, se empleó la ecuación 14, obtenida de la norma ASTM C1688:

$$P = \left( \frac{\rho_t - \rho}{\rho_t} \right) * 100 \quad (14)$$

Donde  $\rho_t$  corresponde a la densidad teórica, calculada mediante la suma de la proporción de masa total de los materiales empleada para elaborar la mezcla, dividida entre el volumen del molde a emplear, y  $\rho$  es la densidad real obtenida de la masa neta de la muestra dividida entre el volumen del molde utilizado.

### 3.6.2. Permeabilidad

Para este ensayo, se utilizó el permeámetro LCS (Laboratorio de Caminos de Santander), donde el dispositivo empleado consta de una base de apoyo circular de acero (165mm de diámetro y 10mm de espesor), que cuenta con un orificio circular en el centro (40mm de diámetro). En la parte inferior cuenta con caucho para su adherencia en el pavimento o probeta. En la parte superior, se encuentra un tubo transparente de metacrilato (94mm de diámetro y 500mm de altura) y se une a la base de apoyo. Se coloca una carga (sobrepeso) de 20kg de masa de manera que se consiga un apoyo estable sobre la placa. En el interior del tubo se coloca un tapón para contener el agua, y que al soltarlo comience a infiltrarse en la zona de estudio. El dispositivo puede observarse en la Figura 23 (NLT-327/00 2000).

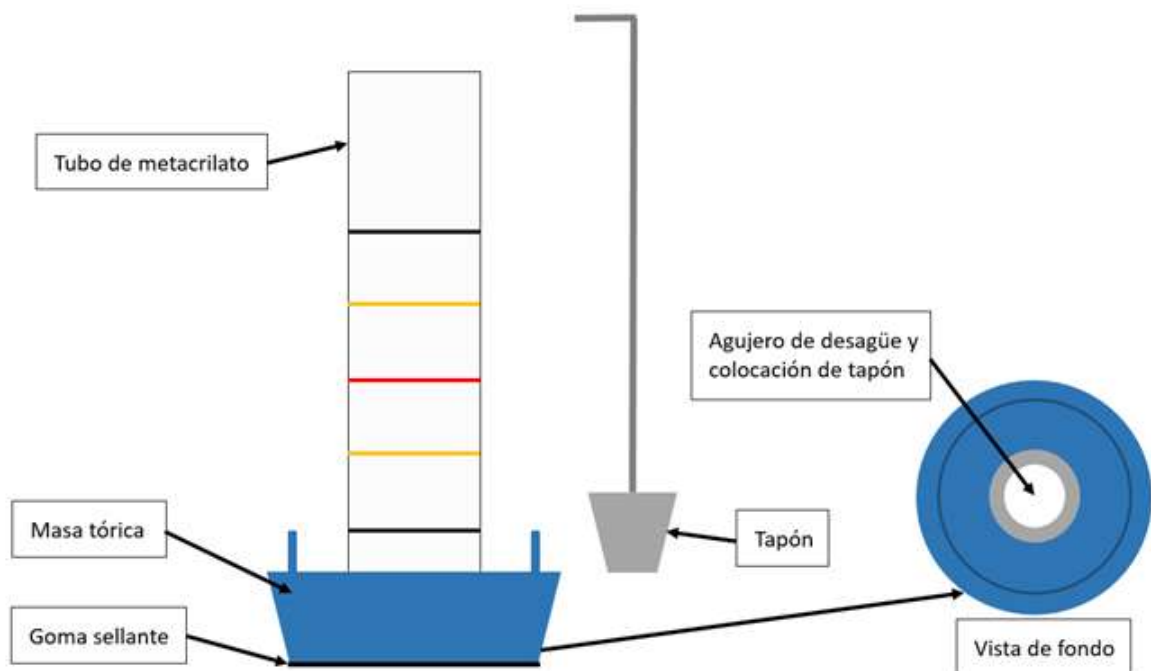


Figura 23. Permeámetro LCS (Laboratorio de Caminos de Santander) (Fuente: Elaboración propia).

Este ensayo se encuentra establecido en la norma española NLT-327/00 y fue creado en el Laboratorio de la Cátedra de Caminos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander. Consiste en medir el tiempo que tarda en pasar un volumen conocido de agua a través del pavimento. Dicho procedimiento es similar al del infiltrómetro de anillo simple, con la diferencia de contar con un montaje más sencillo y se facilita la medición del tiempo al ser un tubo transparente (Fernández-Barrera et al. 2008).

Primero se coloca el dispositivo en un punto del pavimento, y después se coloca la carga sobre la base. Una vez fijado, se llena el tubo de agua (el cual debe tener una marca superior de inicio y una inferior de finalización). Este primer llenado se deja infiltrar para ocasionar una saturación en el pavimento. Después, se vuelve a llenar de agua el tubo, por encima de la marca superior, y se quita de nuevo el tapón, comenzando a tomar el tiempo al llegar el nivel a dicha marca superior, finalizando cuando el nivel del agua llega a la marca inferior. Se recomienda realizar la lectura de cada punto tres veces para tener un resultado más confiable sobre el comportamiento del pavimento o muestra (NLT-327/00 2000). En la Figura 24 se puede observar el uso del permeámetro LCS sobre baldosas de hormigón poroso.



Figura 24. Empleo del permeámetro Laboratorio de Caminos de Santander (LCS) en baldosas de hormigón poroso en laboratorio (Fuente: Elaboración propia).

El permeámetro fue utilizado para medir y comparar la capacidad hidráulica de las mezclas de hormigón poroso, siendo modificado para poder analizar la permeabilidad en muestras de dimensión Marshall. Dicha modificación consiste en un molde de PVC de 4” de diámetro que cubra la muestra. Dentro se coloca una capa de caucho esponjoso para ajustar la muestra y prevenir la salida del agua por los laterales. Se ajusta el molde con la muestra dentro con abrazaderas metálicas, y encima del molde se coloca un tubo de metacrilato donde se vierte el agua para iniciar el ensayo, como se aprecia en la Figura 25.

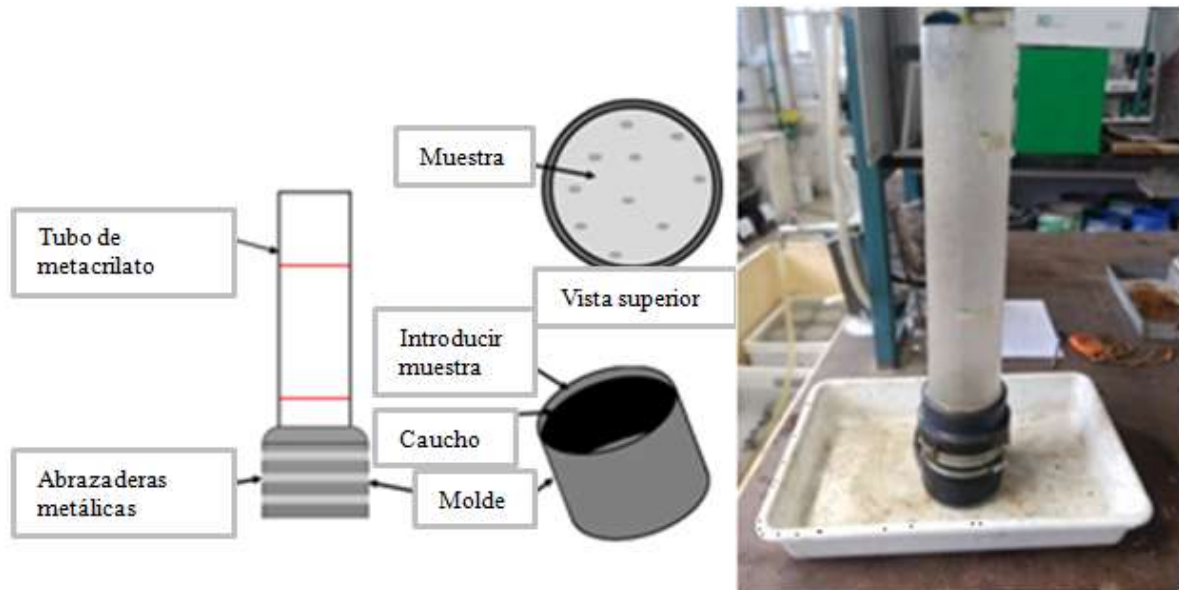


Figura 25. Esquema del permeámetro Laboratorio de Caminos de Santander (LCS) adaptado para muestras Marshall (Fuente: Elaboración propia).

El tubo de metacrilato se encuentra calibrado, teniendo un punto de partida y uno final. Estos puntos fueron separados a una distancia de 20cm y, con ayuda de un cronómetro, se mide el tiempo que el agua tarda en ir del punto de partida al punto final. Utilizando la ley de Darcy, mostrada en la ecuación 15, calculamos la capacidad de infiltración de la muestra.

$$k = \left[ \frac{(A_{muestra}) * (h_{muestra})}{(A_{tubo}) * (t)} \right] \left[ \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \right] \quad (15)$$

Donde “k” es el coeficiente de permeabilidad, en cm/s; “A<sub>muestra</sub>” es el área de contacto de la muestra; “h<sub>muestra</sub>” es la altura de la muestra; “A<sub>tubo</sub>” corresponde al área del



hueco interior del tubo de metacrilato, “ $t$ ” es el tiempo que tarda el agua en ir del punto de inicio ( $h_1$ ) al punto final ( $h_2$ ).

### 3.6.3. Imágenes por Resonancia Magnética

El presente ensayo fue realizado en las instalaciones del Laboratorio DICAM de la Universidad de Bolonia, en Italia, en donde se evaluaron: 3 tipos de agregado diferentes (Pórfido, Caliza y Basalto, de acuerdo al material disponible en el laboratorio), y 2 granulometrías distintas con cada uno de ellos (4-8mm y 8-12mm, de acuerdo a los tamaños vistos en la literatura que se utilizan más en mezclas de hormigón poroso).

El cálculo de la porosidad efectiva, de la cuál depende la permeabilidad, en probetas de hormigón poroso (y cualquier otro material poroso) es difícil de hacer por métodos tradicionales debido al alto contenido de huecos que hay presentes. Por consiguiente, los resultados obtenidos de porosidad pueden ser aproximados y no exactos. Las imágenes por resonancia magnética puede contribuir a conseguir datos más confiables (Borgia et al. 1996). Este método no es destructivo ni invasivo para la probeta en estudio. La mezcla es secada en su totalidad en un horno, después introducida en un recipiente donde, en primer lugar, se saca el aire de la probeta, al introducirla en una cámara de vacíos como se muestra en la Figura 26.



Figura 26. Cámara para remoción del aire, y saturación de las probetas antes de someterlas a resonancia magnética (Fuente: Elaboración propia).

Posteriormente, en la misma cámara, se comienza la introducción de agua a la muestra hasta su completa saturación. Después, la muestra es llevada al dispositivo mostrado en la Figura 27, donde se tomarán las imágenes por resonancia magnética. Finalmente, mediante el empleo del software ARTS 1.4 (Advanced Tomography Relaxation Software, por sus siglas en inglés), desarrollado en la Universidad de Bolonia, se analizan las imágenes a distintas profundidades de la probeta, pudiendo calcular su porosidad, como se aprecia en la Figura 28.



Figura 27. *Equipo utilizado para la toma de imágenes por resonancia magnética (Fuente: Elaboración propia).*

En el ejemplo de la Figura 28 se aprecian las imágenes por resonancia magnética de 4 capas de una probeta de hormigón poroso, a cada 5mm. Donde el color gris y azul de la imagen informan de donde se almacena agua en la probeta, es decir, muestra los poros interconectados que hay en esa capa. En las zonas de color negro se entiende que son las áreas donde se encuentran las partículas de árido. Con la herramienta “ROE” que viene en el software, es posible seleccionar un área de interés en la imagen, donde la información otorgada es el área total seleccionada, en pixeles, y el área donde el agua está presente. De esta forma, haciendo la división correspondiente, es posible el obtener la cantidad de huecos efectivos que hay en la probeta en cuestión.

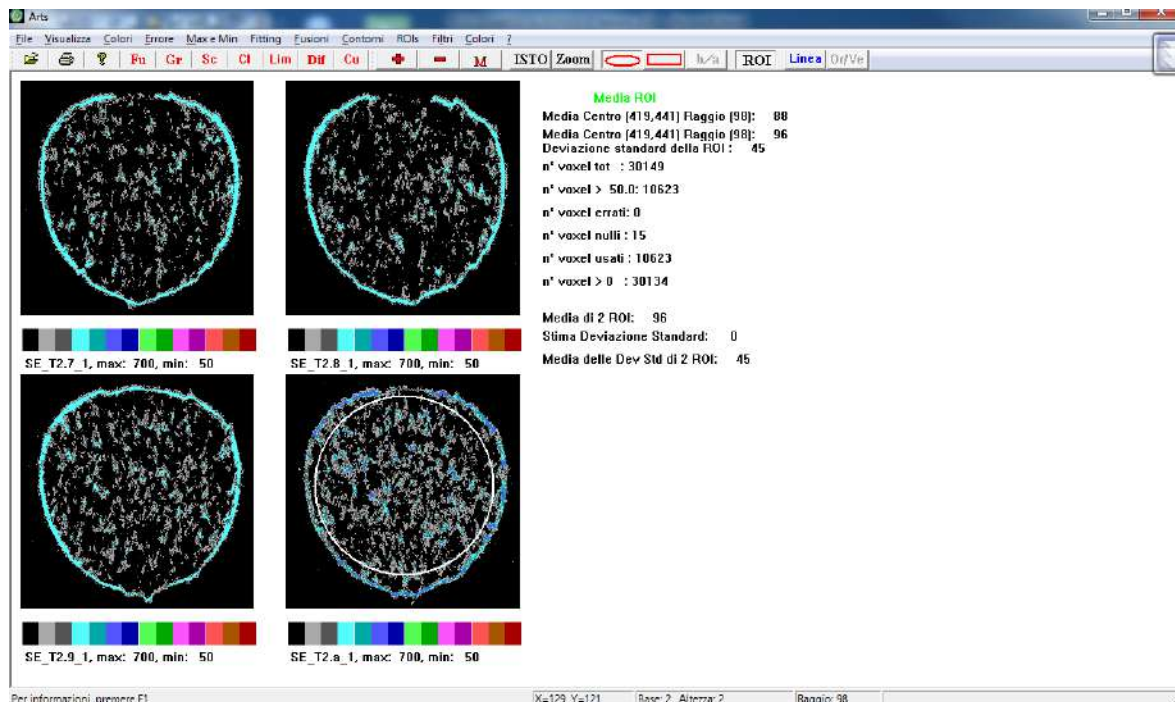


Figura 28. Interfaz del software ARTS para análisis de imágenes por resonancia magnética (Fuente: Elaboración propia).

### 3.7. Ensayos mecánicos

A continuación se describen los ensayos mecánicos realizados a las probetas de concreto poroso con el objetivo de evaluar la resistencia que éstas pueden llegar a obtener con las distintas dosificaciones estudiadas. Se utilizaron tres ensayos distintos: tracción indirecta, compresión axial y módulo de rigidez, considerados de gran importancia para tomar la decisión de si la mezcla en cuestión es apta para su uso como pavimento y bajo qué condiciones.

#### 3.7.1. Tracción Indirecta

Este ensayo consiste en someter a una fuerza de compresión diametral una muestra cilíndrica a lo largo de su longitud, como se aprecia en la Figura 29. Para esto, se utiliza una prensa que induce el fallo rompimiento de la probeta a tracción (Figura 30). La velocidad de carga se ajusta, de acuerdo a la norma, a 250N/seg. Al romper la muestra (Figura 31), se toma la lectura de la carga máxima alcanzada por la misma. Normalmente, las unidades de fuerza se obtienen en newtons (N), y en la parte 6 de la norma EN 12390-6,

se describe la ecuación 16 para calcular la resistencia a la tracción indirecta en unidades de megapascales (MPa).

$$TI = \frac{2F}{\pi Ld} \quad (16)$$

Donde “TI” es la resistencia a tracción indirecta, en megapascales (MPa) o newtons por milímetro cuadrado (N/mm<sup>2</sup>). “F” es la carga máxima, en newtons (N). “L” es la longitud de la línea de contacto de la probeta o altura de la probeta, en milímetros (mm), y “d” es la dimensión de la sección transversal o diámetro de la probeta, en milímetros (mm) (AENOR 2010).

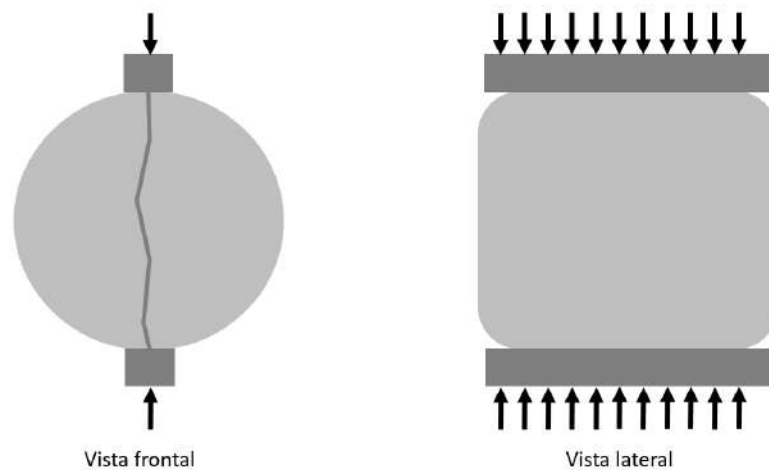


Figura 29. Esquema del ensayo a Tracción Indirecta (Fuente: Elaboración propia).

Las especificaciones de las probetas de ensayo vienen explicadas en la norma EN 12390-1. El aparato se describe en la norma EN 12390-4 (máquina de ensayo, dispositivo para alinear las probetas y las bandas de apoyo) (AENOR 2010).



Figura 30. Equipo utilizado para el ensayo a Tracción Indirecta (Fuente: Elaboración propia).



Figura 31. Rotura de una probeta de hormigón poroso mediante el ensayo de Tracción Indirecta (Fuente: Elaboración propia).

### 3.7.2. Compresión Axial

Para la realización de este ensayo, las probetas Marshall se cortaron con una sierra hidráulica de forma cúbica para obtener una relación aproximada de 1:1, cumpliendo los requerimientos de la normativa EN 12390-3 para realizar los ensayos, como puede observarse en la Figura 32. Las muestras tuvieron dimensiones de 65x65x65mm, las cuales no cumplen las dimensiones mínimas especificadas en la norma, de 100x100x100mm. Sin embargo, permitieron obtener valores de referencia para hacer una comparación entre las muestras. En la Figura 33 se muestra el equipo utilizado para la realización del ensayo.

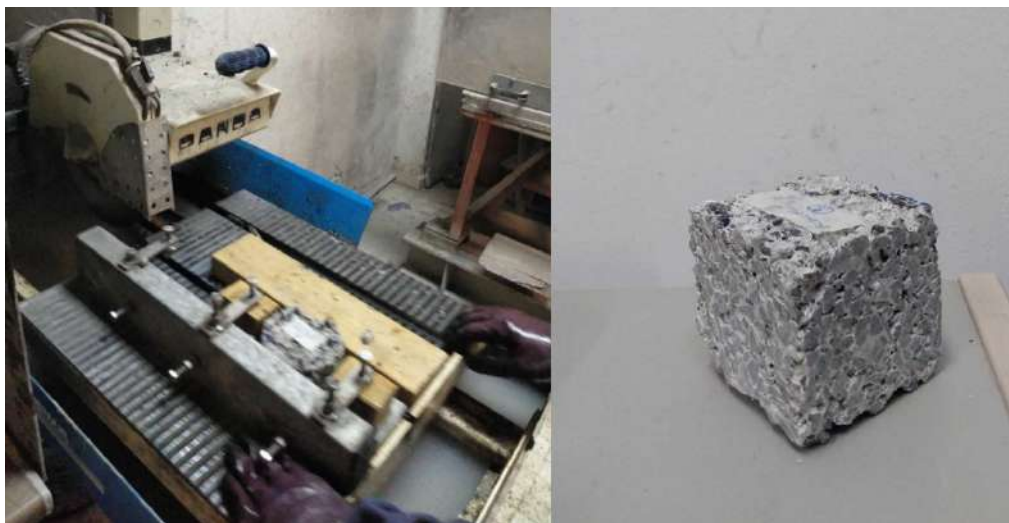


Figura 32. Equipo utilizado para cortar las probetas de hormigón poroso de forma cúbica (Fuente: Elaboración propia).



Figura 33. Equipo utilizado para el ensayo a compresión de las probetas cúbicas (Fuente: Elaboración propia).

Además de con el ensayo de compresión en las condiciones descritas, se estimó la resistencia a compresión a partir de la resistencia a tracción indirecta. La literatura revisada demostró que la resistencia a tracción indirecta es entre el 12-15% del total de su resistencia a compresión axial (Bonicelli, Giustozzi, and Crispino 2015). Utilizando algunas ecuaciones de autores encontrados en la bibliografía (Behnood, Verian, and Modiri Gharehveran 2015), y despejando en función de la variable de resistencia a tracción indirecta (TI), la compresión axial teórica (FCT) puede ser estimada, como se aprecia en la Tabla 19. El cálculo de FCT permitió comparar los resultados obtenidos de las ecuaciones con los resultados en laboratorio, permitiendo avalar los valores de las probetas y ajustar la ecuación más adecuada para estimar la resistencia a compresión a partir de la tracción indirecta.

Tabla 19. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la resistencia a compresión teórica (FCT) y su referencia. Fuente: Elaboración propia.

Autor	Ecuación	Nota
(Raphael 1984)	$FCT = 10^{\frac{\text{LOG}_{10} \frac{TI}{0.313}}{0.667}}$	Para concreto normal; $FC \leq 40\text{MPa}$
(ACI-Committee-318 1999)	$FCT = 10^{\frac{\text{LOG}_{10} \frac{TI}{0.56}}{0.5}}$	-----
(Bulletin d'Information No. 199 1991)	$FCT = 10^{\frac{\text{LOG}_{10} \frac{TI}{0.3}}{2/3}}$	-----
(Carino and Lew 1982)	$FCT = 10^{\frac{\text{LOG}_{10} \frac{TI}{0.272}}{0.71}}$	-----
(Gardner, Cheung, and Sau 1988)	$FCT = 10^{\frac{\text{LOG}_{10} \frac{TI}{0.47}}{0.59}}$	Concretos con cemento tipo I; $3 \leq FC \leq 46\text{MPa}$

### 3.7.3. Módulo de Rigidez

Los pavimentos de hormigón son conocidos por ser muy rígidos en comparación con los pavimentos de asfalto, considerados más flexibles. De ahí la diferencia en la distribución de cargas al pavimento cuando los vehículos transitan sobre él. El hormigón tiende a distribuir las cargas sobre un área mucho mayor que el asfalto, entonces su deformación casi no puede apreciarse. El módulo de rigidez es un ensayo que se aplica a pavimentos de asfalto. Sin embargo, se consideró un parámetro importante a la hora de comparar distintas mezclas de hormigón poroso, con el objetivo de evaluar el tiempo de vida del pavimento, por más pequeña que sea la deformación.

El módulo de rigidez de las probetas se midió mediante la variante del ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas descrito en el anexo C de la normativa EN 12697-26 (AENOR 2012). Este ensayo permite evaluar la deformación elástica generada por las rápidas y constantes cargas a las que el pavimento está sujeto debido al tráfico. Con este objetivo, las muestras se someten a golpes, de 0.2-0.3 segundos cada uno, con un descanso de 2.7 segundos aproximadamente, para sufrir deformación mediante un ensayo de tracción indirecta, como se observa en la Figura 34. Una máquina hidráulica universal (Zwick Z100) se utilizó para los ensayos con cargas de 4.5kN y 6kN.

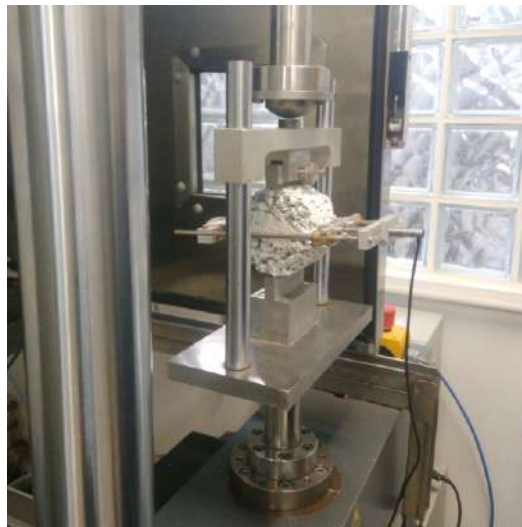


Figura 34. Equipo utilizado en el ensayo de Módulo de rigidez (Fuente: Elaboración propia).

Además, el ensayo aplica 16 golpes a las muestras, donde los golpes 11 al 15 son los que llegan a medirse, debido a que la carga comienza en  $-0.10\text{kN}$  y a medida que aumentan los golpes, la carga deseada se logra a partir del golpe 11.

### **3.8. Ensayos superficiales**

Los ensayos que se presentan en este apartado fueron realizados con el objetivo de evaluar la interacción que llega a tener un pavimento de hormigón poroso con los neumáticos de los vehículos, fundamentalmente en términos de agarre y de frenado, para incrementar la seguridad de las personas.

#### **3.8.1. Resistencia al Deslizamiento (Ensayo del Péndulo)**

La resistencia al deslizamiento fue evaluada con el ensayo del péndulo con la intención de observar el comportamiento de los pavimentos, en términos de seguridad (NLT-175/98 1998). El ensayo consiste en evaluar la fricción de una muestra con un dispositivo que cuenta con un péndulo calibrado, como se muestra en la Figura 35. Al dejarse caer el péndulo, éste comienza a perder energía durante el contacto con la muestra. También, el dispositivo tiene una aguja de medición que apunta a una escala, de 0 a 150, mostrando el número de fricción (British Pendulum Number, “BPN”, por su nombre en inglés). Entre mayor sea el número, mayor será la fricción con la que cuenta la muestra. El “BPN” se divide entre 100 para obtener el Coeficiente de resistencia al deslizamiento (CRD), de acuerdo a la norma (NLT-175/98 1998). Cabe destacar que este ensayo otorga un buen parámetro para conocer la microtextura de una muestra.

Este ensayo se realizó en las probetas de dimensiones de 150mm de diámetro y 90mm de alto, compactadas con el compactador giratorio. En las probetas de tamaño Marshall, al ser más pequeñas, se fijó una distancia de 76mm, permitiendo una comparación entre las muestras, a pesar de no cumplir la distancia de la norma de 150mm. Para esto, se utilizó una escala alternativa, de 0 a 100, que se emplea cuando se quiere ensayar la susceptibilidad al pulimento de los áridos, descrito en la norma NLT-174/93. Aquí se establece una distancia de 76mm, con una curvatura definida.



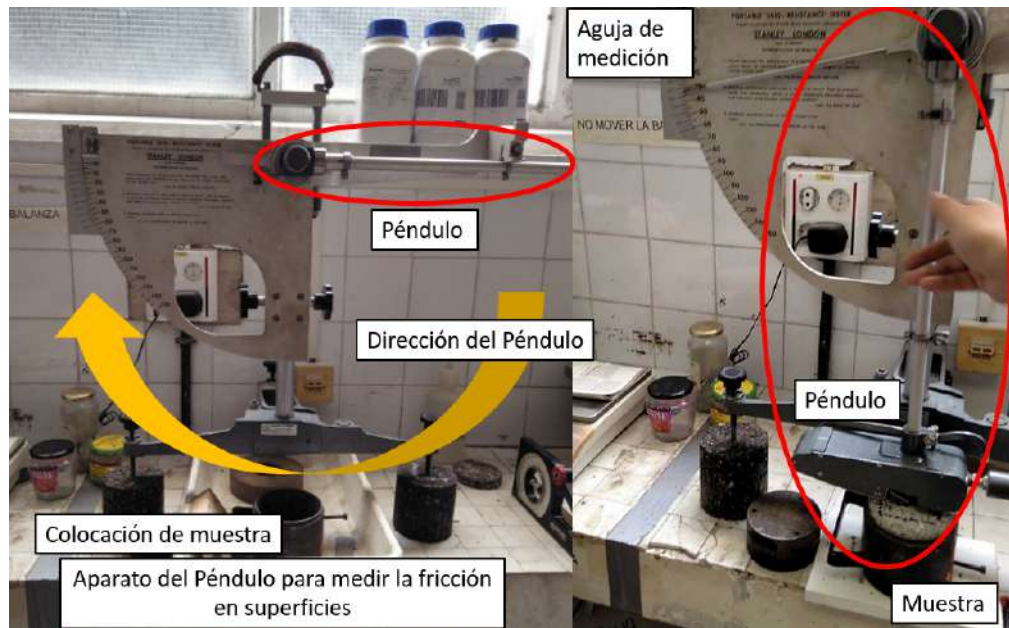


Figura 35. Equipo utilizado en el ensayo del Péndulo para la fricción de superficies (Fuente: Elaboración propia).

### 3.8.2. Círculo de Arena

El círculo de arena es un ensayo que ayuda a conocer la profundidad de la macrotextura de una muestra. Primero, se pesa la probeta seca; posteriormente, filler (o arena sílice) se distribuye en toda la superficie de la muestra, rellenando los huecos y quitando el exceso, enrasando, con un bastón especial, como se aprecia en la Figura 36.



Figura 36. Equipo utilizado en el ensayo del círculo de arena (Fuente: Elaboración propia).

Una vez que los huecos están rellenos y se ha enrasado la probeta, se pesa de nuevo. El volumen de arena se calcula y divide entre el área de la superficie de la muestra,

obteniendo la profundidad de la macrotextura, en milímetros (Raposeiras et al. 2012). De acuerdo a esta característica, los pavimentos pueden ser divididos o catalogados en textura muy fina (profundidad  $H < 0.20\text{mm}$ ), textura fina ( $0.20 < H < 0.40\text{mm}$ ), textura media ( $0.40 < H < 0.80\text{mm}$ ), textura profunda ( $0.80\text{mm} < H < 1.20\text{mm}$ ), y textura muy profunda ( $1.20\text{mm} < H$ ). Donde las sugerencias de uso van desde no recomendado (textura muy fina) hasta recomendado para curvas peligrosas y lluvias fuertes (textura muy profunda) (Aavik, Kaal, and Jentson 2013). En el caso de mezcla porosa, este ensayo es meramente informativo al tener una cantidad considerable de huecos, y presentar en todos los casos una macrotextura considerable.

### 3.8.3. Medición de la absorción del sonido

La absorción del sonido de las muestras de hormigón poroso fue medida mediante el ensayo del tubo de impedancia descrito en la norma ASTM E1050-98. El dispositivo consiste en un tubo hueco, de un solo diámetro, colocado de manera horizontal, donde se coloca la muestra en un extremo, y la fuente de sonido en el otro. Se colocan micrófonos en dos o más puntos a lo largo de la pared lateral del tubo, como se muestra en la Figura 37. Se transmite el sonido, midiéndose, y se resta la cantidad de ondas de sonido que rebotan en la muestra. De esta forma, restando, se obtiene el coeficiente de absorción del sonido de la probeta de hormigón poroso. Para la adquisición y el procesamiento de datos, se utiliza un análisis de frecuencia digital de dos canales.

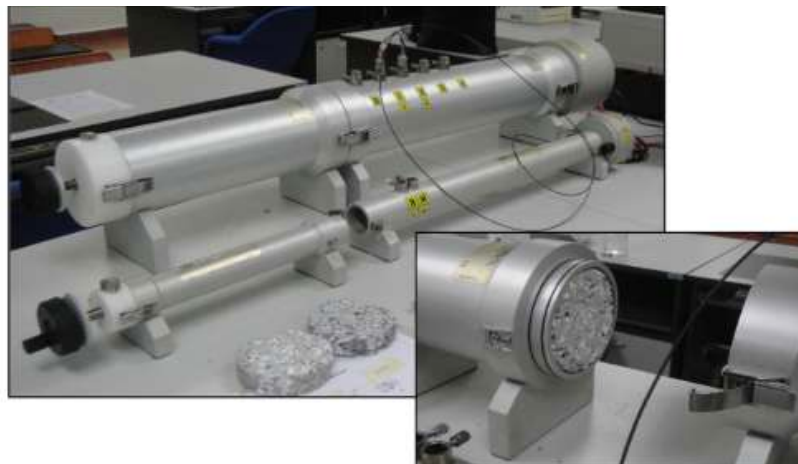


Figura 37. *Tubo de impedancia para la medición de absorción del sonido en probetas de hormigón poroso.*  
(Fuente: Khankhaje et al. 2017)

Este ensayo se utiliza para medir el coeficiente de absorción del sonido de materiales absorbentes con una incidencia normal, es decir, a 0°. También, se puede determinar la impedancia y radios, o relaciones, de admisión, pudiendo comparar en detalle distintos materiales capaces de absorber el sonido.

### **3.9. Estudio de geopolímeros**

El estudio de mezclas porosas con geopolímeros fue realizado en las instalaciones del Laboratorio DICAM de la Universidad de Bolonia, en Italia. El objetivo era diseñar mezclas con geopolímeros con la metodología PCD para validar dicha metodología de dosificación con otros materiales, y para comparar el hormigón poroso con otros pavimentos porosos ejecutados con materiales novedosos con los que se pretende sustituir al cemento. Las mezclas fueron sometidas al ensayo de permeabilidad y de tracción indirecta y compactadas mediante el método por impacto, a 35 golpes por un lado. Se empleó una granulometría de 5-10mm de material calizo debido a la disponibilidad tanto de material como de granulometría.

#### **3.9.1. Metacaolín**

En años recientes, científicos han estado buscando materiales que puedan sustituir al cemento en las mezclas de hormigón, con la intención de disminuir el impacto ambiental asociado, fundamentalmente a su producción a altas temperaturas. A pesar de esto, hay quienes aclaman que, aún cuando el cemento tiene una enorme huella ambiental, son más los beneficios ambientales del hormigón como material de construcción eficiente y duradero. Aún así, ligantes como el metacaolín han llamado la atención considerablemente por su capacidad de otorgar una gran resistencia a compresión en un periodo corto de tiempo, además de ser resistente al fuego y a agentes químicos (A. Mohammed, Salih, and Raof 2020).

En la presente investigación, se utilizó metacaolín MasterLife MK 828 de la marca BASF. La ficha técnica se encuentra en el *Anexo 5: Ficha técnica del metacaolín empleado*, en donde se recomienda utilizar en una cantidad entre el 5-25% del peso del ligante para obtener un hormigón estructural de alta resistencia, que soporte la erosión y la

abrasión. Se evaluaron diferentes adiciones de metacaolín a la mezcla, sustituyendo cantidades de cemento en ella. Al mismo tiempo, otras mezclas con metacaolín y agregados de caliza fueron realizadas para evaluar las propiedades de mezclas sin cemento.

### 3.9.2. Líquido reactivo

De acuerdo al material disponible en el laboratorio de Bolonia donde se realizó el estudio de geopolímeros, se utilizó como líquido reactivo silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) combinado con hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ), con una molaridad de 10, en una relación de 3:1 ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ ). Esto con el objetivo de prevenir lixiviación en las mezclas, las cuales son producidas cuando la relación tiende a ser mayor. Este líquido se utiliza cuando se requiere activar químicamente el metacaolín, y fue empleado en las mezclas donde el cemento no fue requerido.

### 3.10. Análisis Estadístico

Para el análisis de resultados, fueron utilizadas herramientas computacionales como Microsoft Excel, Minitab y Rstudio. Los métodos empleados, tanto al inicio de la investigación para la selección de la cantidad de mezclas a elaborar, como los métodos utilizados para la elección final de la mejor mezcla, se describen a continuación.

#### 3.10.1. Diseño de Experimentos (DOE) – Superficie de Respuesta

El diseño de experimentos es utilizado hoy en día con el propósito de optimizar las combinaciones necesarias para la realización de un experimento y el análisis de resultados. Diversos programas computacionales son utilizados para agilizar la toma de decisiones y optimizar los trabajos de laboratorio. Al introducir la máxima información posible (las variables y condiciones, entre otros), se crea un enlace entre el experimento y la realidad que permiten observar el comportamiento de las variables con respecto al modelo y dan la oportunidad de tomar las decisiones adecuadas de optimización (Franceschini and Macchietto 2008).

La superficie de respuesta es un método estadístico que permite analizar la interacción entre diversos parámetros como la relación a/c, arena-cemento (s/c),

granulometría, nivel de compactación, entre otros. Esto permite obtener una solución óptima acerca de la cantidad de series que es indispensable realizar para crear criterios estables de comparación entre las variables (Hatami, Sabour, and Amiri 2018).

Utilizando el software Minitab, se puede crear un diseño de superficie de respuesta, como se aprecia en la Figura 38.

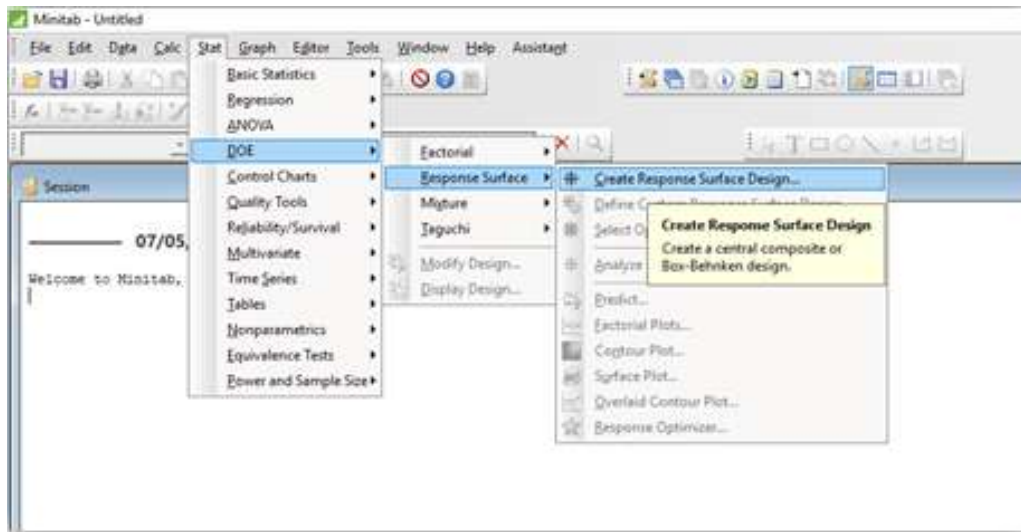


Figura 38. Creación de un diseño de Superficie de Respuesta en el software Minitab (Fuente: Elaboración propia).

La Figura 39, muestra que, posterior a esto, aparece un cuadro de diálogo donde hay que introducir el número de variables, siendo los factores continuos variables cuantitativas y los factores categóricos variables cualitativas.

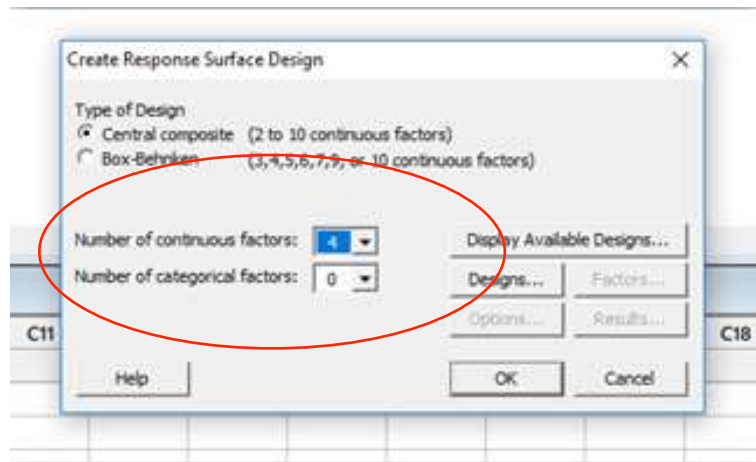


Figura 39. Demostración de los factores continuos y categóricos en el software Minitab (Fuente: Elaboración propia).

En el botón de “diseños” (designs), se elige el diseño de acuerdo al número de factores. Después, se introducen los factores en el botón de “factores” (factors), como se muestra en la Figura 40. Oprimiendo el botón de “ok”, el programa nos arroja una tabla con las combinaciones esenciales para la realización del experimento.

Microsoft Excel nos permite realizar la superficie de respuesta al graficar las variables en un gráfico de superficie 3D. Esto permite ver el comportamiento entre dos variables con respecto a un resultado (Y), pudiendo obtener la función.

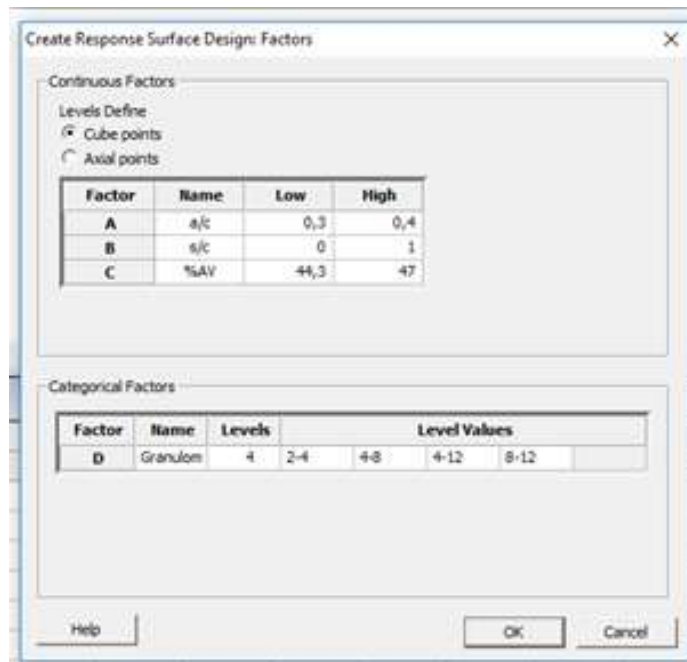


Figura 40. Introducción de factores en el software Minitab (Fuente: Elaboración propia).

Esta herramienta se empleó en la etapa de determinación de la dosificación óptima con la metodología PCD sin aditivos, con el objetivo de obtener una cantidad óptima de mezclas a elaborar que cumplieran con las variables que se querían estudiar, y así ser capaces de ahorrar tanto tiempo como material.

### 3.10.2. Análisis de la Varianza (ANOVA)

El análisis de la varianza (ANOVA) se realizó con el objetivo de evaluar los resultados obtenidos en cada ensayo y determinar la influencia de los componentes de la mezcla. La herramienta utilizada fue el complemento de Microsoft Excel *Real Statistics*, así como el software Minitab. Se implementó un ANOVA para cada componente (tamaño del

árido, relación arena-cemento (s/c), relación agua-cemento (a/c), nivel de compactación y cantidad de cemento) y para cada ensayo (permeabilidad, ensayo a compresión, tracción indirecta, fricción y módulo de elasticidad). Los resultados se hicieron con la F de la distribución de Fisher al comparar el ANOVA. Si la F obtenida era menor que la F crítica, obtenida de las tablas de la distribución de Fisher, entonces no había diferencia significativa entre los datos. Por el contrario, cuando la F era mayor que la F crítica, entonces había una diferencia significativa entre los valores considerados. Para el ANOVA, se utilizó la Tabla 20:

Tabla 20. Cuadro de ecuaciones para el análisis de la Varianza (ANOVA) con dos factores. Fuente: Elaboración propia.

Variación	Suma de Cuadrados de las Desviaciones (S.C.D.)	Grados de Libertad	Cuadrados Medios
Entre Tratamientos	SST	p-1	$MT = \frac{SST}{p-1}$
Entre Bloques	SSB	b-1	$MB = \frac{SSB}{b-1}$
Debido al azar	SSE	(p-1)(b-1)	$ME = \frac{SSE}{(p-1)(b-1)}$
Total	SS	$F_{Ho} = \frac{MT}{ME}$	$F_{H1o} = \frac{MB}{ME}$

Donde SS corresponde a la variación en los datos de la tabla debida a SST y SSE; SST y SSE son la variación debida a los tratamientos y al azar, respectivamente; SSB es la variación debida a los bloques; p es el número de tratamientos (de manera horizontal), y b el número de bloques (de manera vertical).

Esta herramienta se empleó en la etapa de determinación de la dosificación óptima con la metodología PCD para ver la influencia que los distintos componentes de la mezcla de hormigón tienen en las propiedades mecánicas, hidráulicas y de seguridad que presenta la mezcla. También, se utilizó en el estudio de aditivos por separado (individualmente), para analizar la influencia de los aditivos en las propiedades mecánicas e hidráulicas en las mezclas de hormigón poroso.

### 3.11. Análisis Multi-criterio

El análisis multi-criterio es una herramienta que se crea a partir de una necesidad de tomar decisiones cuando se tiene una gran cantidad de información. Esta herramienta facilita la elección de la respuesta más viable que puede traducirse en un mayor ahorro de dinero, en una eficiencia en la gestión del tiempo, en la correcta elección de un material o personal, entre otros grandes beneficios (Jato-Espino et al. 2014).

La toma de decisiones puede complicarse cuando se tiene una considerada cantidad de variables con un gran número de alternativas como solución (Kalamaras et al. 2000). En este caso, para el presente estudio, las variables determinantes fueron: la capacidad de infiltración, la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción indirecta, resistencia al deslizamiento o fricción (bajo condiciones secas y condiciones húmedas), módulo de rigidez o elasticidad, así como fotocatalisis y absorción del sonido. Como alternativas, se tuvieron cada una de las mezclas elaboradas.

#### 3.11.1. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El método AHP es de los más utilizados en cualquier disciplina, principalmente por su sencillez. (Al-harbi 2001; El-mikawi and Mosallam 1996; Jato-Espino et al. 2014; Skibniewski and Chao 1992). Fue creado por Thomas Saaty en la década de los ochenta, y consiste en tomar decisiones realizando comparación por pares, basándose en el juicio de la persona que realiza la decisión al otorgar valores de prioridad o de importancia a las variables de comparación de las alternativas. Saaty propuso una tabla de valores del 1 al 9, en donde el valor más bajo significa un nivel igual de importancia para ambas variables, y el nivel más alto una importancia absoluta de una variable sobre otra (Al-harbi 2001).

Los pasos para realizar el método AHP son los siguientes:

1. Se acomodan las alternativas en una matriz de “n” factores, tanto en el eje horizontal como en el vertical y se asigna un valor de importancia al comparar cada alternativa con otra de forma individual. Si, por ejemplo, una alternativa A tiene un grado de importancia de 5 con respecto a otra B, la alternativa B tendrá un grado de



importancia de 1/5 con respecto a A, es decir, el valor recíproco. Esto se observa en la ecuación 17:

$$A = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{1n} & \cdots & x_{nj} & \cdots & x_{nn} \end{bmatrix}, x_{ii} = 1, x_{ij} = 1/x_{ji}, x_{ji} \neq 0 \quad (17)$$

2. Se normaliza la matriz dividiendo cada valor de la matriz entre la suma de los valores de su columna, como se aprecia en la ecuación 18:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}; j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

3. Se calcula el valor promedio en cada fila de la matriz normalizada, obteniendo un vector para cada alternativa en estudio. Entre mayor sea el valor del vector, mejor será la jerarquía de la alternativa con respecto a las demás.
4. Este proceso se realiza para cada variable de estudio. Posteriormente, se multiplica el valor de cada alternativa para cada variable con el peso,  $w_j$ , calculado, con la ecuación 19:

$$\tilde{x} = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij} \quad (19)$$

5. Se calcula un promedio entre el valor de cada alternativa en cada variable de estudio, obteniendo un vector. El vector con el valor más alto, será la alternativa más óptima.

### 3.11.2. Método AHP con lógica difusa y cuestionario

Aquí, como en el método AHP, se propone una escala de 9 valores de importancia, como se aprecia en la Tabla 20. Sin embargo, algunos autores mencionan que esta técnica no logra capturar la ambigüedad presente en una comparación subjetiva (Jato-espino et al. 2014). Para resolver este problema, el método AHP es combinado con conjuntos difusos para tratar con esta incertidumbre, al utilizar funciones de pertenencia triangulares y

trapezoidales (Gul, Guven, and Guneri 2018). Por consiguiente, la escala difusa de importancia es presentada en la Tabla 21 también.

Tabla 21. Escala de comparación de Saaty y escala difusa de comparación para el análisis multi-criterio.  
Fuente: Elaboración propia.

Término lingüístico	Valor numérico	Escala difusa
Igual	1	(1, 1, 1)
Moderado	3	(2, 3, 4)
Fuerte	5	(4, 5, 6)
Muy fuerte	7	(6, 7, 8)
Extremadamente fuerte	9	(9, 9, 9)
Valores intermedios	2	(1, 2, 3)
	4	(3, 4, 5)
	6	(5, 6, 7)
	8	(7, 8, 9)

Se emplea la función de pertenencia triangular difusa  $\mu_A(x)$ , como se observa en la Figura 41. Donde “l”, “m” y “u” se refieren al valor difuso bajo, medio y alto, del eje triangular, respectivamente.

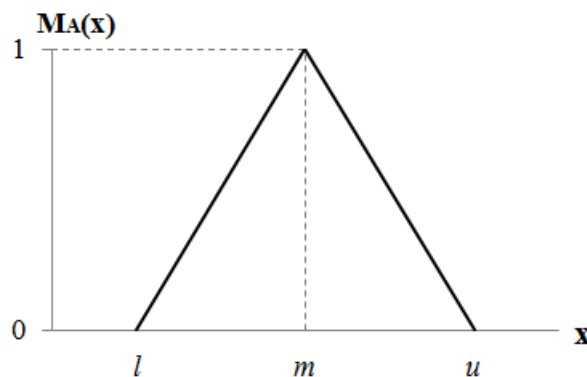


Figura 41. Diagrama de la función de pertenencia triangular difusa, donde el valor de importancia se divide en tres valores: uno bajo (l), uno medio (m) y uno alto (u), para un análisis más preciso. (Fuente: Elaboración propia).

Para el método AHP, las variables se colocan en una matriz de “n” factores, y se asigna un valor de importancia cuando se hace la comparación por pares entre las variables (ensayos). Por ejemplo, si a la resistencia a tracción indirecta se le asigna un valor de importancia de 2 con respecto a la permeabilidad, entonces la permeabilidad tendrá un valor de importancia de 1/2 con respecto a la tracción indirecta, como se aprecia en la ecuación 20.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{1n} & \cdots & a_{ni} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}, a_{ii} = 1, a_{ij} = 1/a_{ji}, a_{ji} \neq 0 \quad (20)$$

El mismo procedimiento se utiliza para la función de pertenencia triangular difusa, con las variaciones de la ecuación 21:

$$\widetilde{A}^{-1} = (l, m, u)^{-1} = \left( \frac{1}{u}, \frac{1}{m}, \frac{1}{l} \right) \quad (21)$$

Siguiendo con el mismo ejemplo, y de acuerdo a la Tabla 20, en vez de un valor de importancia de 2, la tracción indirecta tendría una importancia de (1, 2, 3) con respecto a la permeabilidad. Por consiguiente, la permeabilidad tendrá un valor de importancia de (1/3, 1/2, 1/1) con respecto a la tracción indirecta. Como segundo paso, el valor geométrico medio difuso,  $\tilde{r}_i$ , se calcula con la ecuación 22:

$$\tilde{r}_i = \widetilde{A}_1 \times \widetilde{A}_2 = (l_1, m_1, u_1)(l_2, m_2, u_2) = (l_1 * l_2, m_1 * m_2, u_1 * u_2) \quad (22)$$

Siendo  $\widetilde{A}_1$  y  $\widetilde{A}_2$  las variables evaluadas. Después, los valores se suman con el objetivo de tener solo 3 valores restantes (1, m, u). Aplicando la ecuación 23, y la ecuación 18 se vuelve a utilizar también:

$$\widetilde{A}_1 + \widetilde{A}_2 = (l_1, m_1, u_1) + (l_2, m_2, u_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (23)$$

Con esto, los pesos difusos,  $\tilde{w}_i$ , se pueden calcular con la ecuación 24:

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i (\tilde{r}_1 * \tilde{r}_2 * \dots * \tilde{r}_n)^{-1} \quad (24)$$

Finalmente, con la ecuación 25, los pesos finales,  $w_i$ , son obtenidos:

$$w_i = \left( \frac{l + m + u}{3} \right) \quad (25)$$

La suma de los pesos,  $w_i$ , debe ser igual a 1. En caso de no serlo, se normalizan con la ecuación 26:

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum w_i} \tag{26}$$

Para determinar los pesos de importancia entre las variables de estudio, se realizó un cuestionario a expertos en el tema del hormigón, drenaje sostenible y pavimentos pertenecientes a Universidades e Instituciones de Investigación en España, México, Italia, Chile, Reino Unido y Australia. Se obtuvieron en total 15 respuestas, permitiendo realizar un promedio entre los resultados de los participantes, y utilizando dicho promedio como los pesos para el análisis multi-criterio. La Figura 42 muestra un ejemplo de una pregunta del cuestionario.

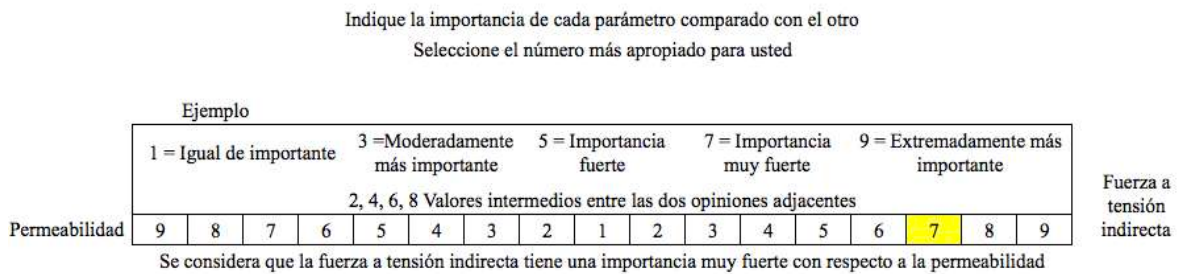


Figura 42. Ejemplo de pregunta para la obtención de pesos de las variables de estudio en el análisis multi-criterio (Fuente: Elaboración propia).

### 3.11.3. Proceso Analítico en Red (ANP)

El método ANP, es una versión derivada del AHP. También creado por Thomas Saaty, consiste en realizar de igual manera comparaciones por pares, otorgando un valor numérico de importancia a cada alternativa con respecto a otra. El primer paso es calcular la matriz normalizada y los pesos para cada alternativa en cada variable, igual que en el método AHP. También se calcula la matriz de comparación por pares de las variables. Esto quiere decir, que se calcula la influencia de las alternativas sobre las variables, y viceversa (Bobylev 2011; Jato-Espino et al. 2014).

Una vez teniendo los pesos, se elabora una matriz de Dominación Interfactorial, como se muestra en la ecuación 27, donde se introducen tanto las variables como las

alternativas, e identificando las influencias de unas sobre otras. De acuerdo a esta ecuación, una variable no tiene influencia sobre ella misma, por consiguiente, el valor que se asigna es cero (0). Ocurriendo lo mismo con las alternativas. Por el contrario, las alternativas influyen en las variables, y viceversa, por lo que el valor es 1.

$$\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c}
 & & \text{Variables} & & & & \text{Alternativas} & & & & & \\
 & & \hline 1 & 2 & 3 & \dots & n & \hline A & B & C & \dots & n & \\
 \text{Variables} & \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \dots \\ n \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 1 \\ 1 \\ \dots \\ \dots \end{array} & \begin{array}{c} 1 \\ 0 \\ 1 \\ \dots \\ \dots \end{array} & \begin{array}{c} 1 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \end{array} & \begin{array}{c} \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \end{array} & \begin{array}{c} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \dots \\ \dots \end{array} & \begin{array}{c} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \dots \\ \dots \end{array} & \begin{array}{c} 1 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \end{array} & \begin{array}{c} \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \end{array} & \begin{array}{c} \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \end{array} & \begin{array}{c} \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \end{array} \\
 \text{Alternativas} & \begin{array}{c} A \\ B \\ C \\ \dots \\ n \end{array} & \begin{array}{c} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \dots \\ \dots \end{array} & \begin{array}{c} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \dots \\ \dots \end{array} & \begin{array}{c} \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \end{array} & \begin{array}{c} \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ \dots \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ \dots \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \end{array} & \begin{array}{c} \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \end{array} & \begin{array}{c} \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \end{array} & \begin{array}{c} \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \end{array}
 \end{array} \tag{27}$$

Posterior a eso, se introducen los pesos calculados en las casillas correspondientes, identificadas como influyentes. Por lo general, las columnas de las variables no sumarán 1, sino 2, por lo que hay que convertir la matriz en una matriz estocástica (que todas las columnas sumen 1), con ayuda de la ecuación 28. Para esto, se realiza una otra matriz, en donde se comparan las variables y las alternativas en general.

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \tag{28}$$

El siguiente paso es multiplicar los pesos obtenidos por cada fila de las columnas que no sumen la unidad, para así obtener una matriz estocástica, a la que se denominará supermatriz ponderada. Por último, se multiplica esta matriz por sí misma, las veces que sea necesario, hasta que todas las columnas tengan el mismo valor, convirtiéndose en una supermatriz límite. El valor más alto, será la alternativa más óptima o mejor.

### 3.11.4. Técnica para el Orden de Preferencia por Similitud con la Solución Ideal (TOPSIS)

Este método, basado en dimensiones, trata de elegir soluciones que están simultáneamente cerca a la solución ideal y más lejos de la solución ideal negativa (Shanian and Savadogo 2006). Es necesario proporcionar información sobre la importancia que tiene cada propiedad que es considerada en el proceso (Çalişkan et al. 2013).

Los pasos para realizar el método TOPSIS son los siguientes:

1. Normalizar la matriz de decisión, mediante la utilización de la siguiente ecuación 29:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}; j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m \quad (29)$$

2. Las columnas de la matriz normalizada se multiplican con los pesos,  $w_j$ , establecidos previamente. La matriz de decisión normalizada y pesada se obtiene con la ecuación 30:

$$V_{ij} = n_{ij}w_{ij}; j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m \quad (30)$$

3. Determinar la solución ideal y la solución ideal negativa mediante la utilización de las ecuaciones 31 y 32, respectivamente:

$$\{V_1^+, V_2^+, \dots, V_n^+\} = \{(Max_i V_{ij} | j \in K), (Min_i V_{ij} | j \in K') | i = 1, 2, \dots, m\} \quad (31)$$

$$\{V_1^-, V_2^-, \dots, V_n^-\} = \{(Min_i V_{ij} | j \in K), (Max_i V_{ij} | j \in K') | i = 1, 2, \dots, m\} \quad (32)$$

Donde K es el índice de conjuntos de criterios de beneficio (cuando se busca el valor máximo), y K' el índice de conjuntos de criterios de no beneficio (cuando se busca el valor mínimo).

4. Calcular las distancias entre la solución ideal y la solución ideal negativa con las ecuaciones 33 y 34, respectivamente:

$$S_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2 \right\}^{0.5}; j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m \quad (33)$$

$$S_i^- = \left\{ \sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2 \right\}^{0.5}; j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m \quad (34)$$

5. Calcular la cercanía relativa con la solución ideal con la ecuación 35:

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}; i = 1, 2, \dots, m; 0 \leq C_i \leq 1 \quad (35)$$

Entre mayor sean los valores de  $C_i$ , mejor será la jerarquía de la alternativa.

### 3.11.5. Evaluación de Producto de Suma Agregada Ponderada (WASPAS)

El método WASPAS está basado en operadores de agregación, y realiza una combinación de dos métodos de decisión multicriterio: el método de suma ponderada (WSM) y el método de producto ponderado (WPM). Estos dos componentes se balancean por un parámetro  $\lambda$ , cuyos valores van de 0 a 1. Cuando  $\lambda = 1$ , la jerarquía de las alternativas se calcula en base al WSM. Si  $\lambda = 0$ , entonces la jerarquía se calcula por el WPM. Generalmente se emplea  $\lambda = 0.5$  (Ceballos-Martín 2016).

Los pasos para realizar el método WASPAS son los siguientes:

1. Normalizar la matriz de decisión. Se utilizan las ecuaciones 36 y 37 para variables de beneficio (cuando se busca el valor máximo) y para variables de no beneficio (cuando se busca el valor mínimo), respectivamente:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}} \quad (36)$$

$$n_{ij} = \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}} \quad (37)$$

2. Cálculo de WSM y WPM con las ecuaciones 38 y 39, respectivamente:

$$WSM = \sum_{j=1}^n r_{ij} w_j \quad (38)$$

$$WPM = \prod_{j=1}^n (r_{ij})^2 \quad (39)$$

3. Cálculo de la importancia relativa total de cada alternativa. Se realiza una combinación de los métodos WSM y WPM mediante la ecuación 40:

$$Q_i = \lambda WSM + (1 - \lambda) WPM \quad (40)$$

### 3.11.6. Método de Organización de la Clasificación de Preferencias para el Enriquecimiento de las Evaluaciones (PROMETHEE II)

El primer paso es normalizar la matriz de evaluación o decisión con las ecuaciones 41 y 42 para criterios beneficiosos y no beneficiosos respectivamente.

$$n_{ij} = \frac{[x_{ij} - \min(x_{ij})]}{[\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})]}; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (41)$$

$$n_{ij} = \frac{[\max(x_{ij}) - x_{ij}]}{[\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})]}; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (42)$$

El siguiente paso es calcular la diferencia evaluativa de la  $i^{\text{ma}}$  alternativa con respecto a las demás alternativas, restando el valor de una alternativa con respecto a los valores de las otras alternativas. En el tercer paso se calcula la función preferencial,  $P_j(a, b)$ , como se aprecia en las ecuaciones 43 y 44:

$$P_j(a, b) = 0; \text{ si } n_{aj} \leq n_{bj} \quad (43)$$

$$P_j(a, b) = (n_{aj} - n_{bj}); \text{ si } n_{aj} > n_{bj} \quad (44)$$



El cuarto paso es calcular la preferencia agregada con la ecuación 45.

$$\pi(a, b) = \frac{[\sum_{j=1}^n w_j P_j(a, b)]}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (45)$$

Posteriormente, con las ecuaciones 46 y 47, se calculan los flujos superiores de entrada y salida:

$$\varphi^+ = \frac{1}{m-1} \sum_{b=1}^m \pi(a, b); \quad (a \neq b) \quad (46)$$

$$\varphi^- = \frac{1}{m-1} \sum_{a=1}^m \pi(b, a); \quad (a \neq b) \quad (47)$$

Siendo  $\varphi^+$  el flujo de salida, y  $\varphi^-$  el flujo de entrada, para la alternativa  $a^{ma}$ .  $m$  se refiere al número de alternativas que se tienen. Por último, se calcula el flujo superior neto para cada alternativa, con la ecuación 48.

$$\varphi(a) = \varphi^+(a) - \varphi^-(a) \quad (48)$$

El valor de esta resta, determinará el ranking o jerarquía entre cada alternativa.



## **CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las distintas fases de la investigación, a partir de los distintos métodos empleados. Contiene, además, una discusión acerca del análisis realizado para llegar a la decisión considerada óptima, probando así la hipótesis de partida.

#### 4.1. Comparación de métodos de dosificación

La primera parte de la investigación corresponde a la realización de mezclas de acuerdo a la normativa ACI 522R-10 y la nueva metodología, modificada, PCD. Esto con la intención de ver si la metodología PCD llega a mejorar las características deseadas o no.

##### 4.1.1. Comparativa entre porcentajes de componentes

Primero se hizo una comparación entre las dos metodologías ACI, donde, a pesar de comenzar el proceso de diseño de forma distinta, el resultado final es muy similar entre ellas. Como se aprecia en la Figura 43, donde se muestran los porcentajes de cada componente en la mezcla de hormigón poroso, ambas metodologías ACI presentaron dosificaciones muy similares, variando la cantidad de los componentes de la pasta de cemento por cantidades muy pequeñas. Siempre siendo mayores estas cantidades para la metodología ACI 522R-10. El agregado grueso y fino siempre tuvieron las mismas cantidades para ambas metodologías.

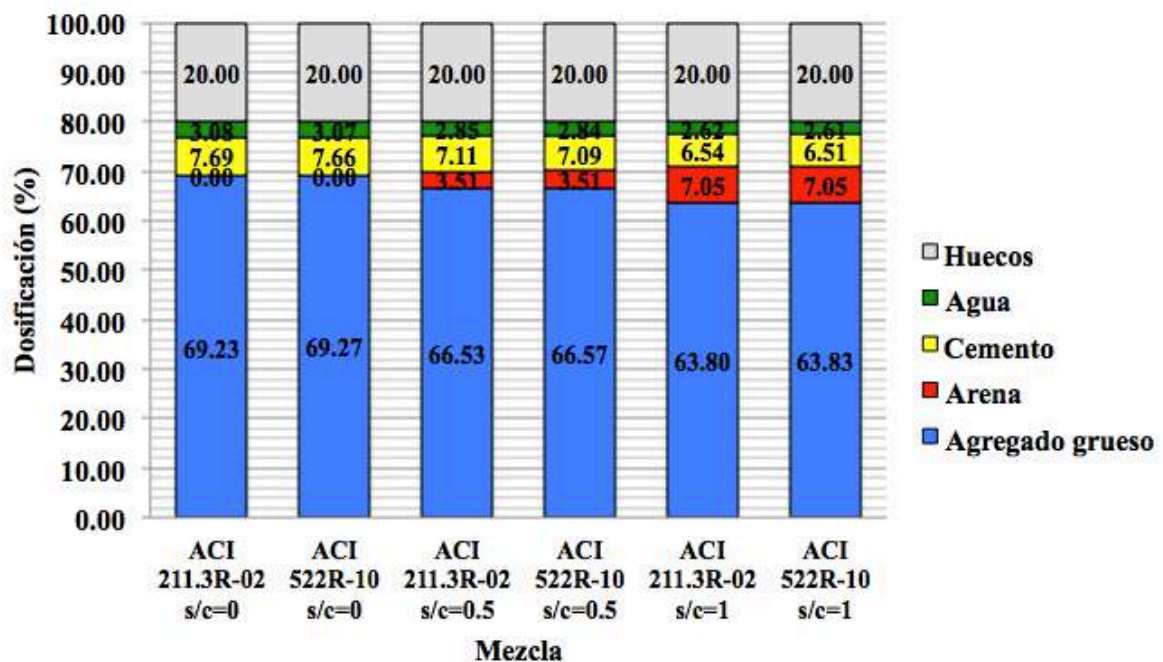


Figura 43. Diagrama de comparación de dosificaciones entre las metodologías ACI 522R-10 y ACI 211.3R-02, donde se aprecian los diferentes porcentajes de cada componente de la mezcla de hormigón poroso para una relación de arena-cemento (s/c) de 0.00, 0.50, y 1.00 (Fuente: Elaboración propia).

La principal diferencia entre las dos metodologías ACI es la secuencia de la dosificación. La metodología ACI 522R-10 comienza calculando el peso de los

componentes para después calcular los volúmenes. En cambio, la metodología ACI 211.3R-02 comienza con los volúmenes y finaliza con el peso de los componentes.

Tras esta comparación inicial, se decidió elaborar mezclas con la normativa ACI 522R-10 en representación de ambas. Esto porque la normativa es más reciente que la ACI 211.3R-02 y porque las proporciones dan lugar a una mezcla más trabajable, debido a la mayor cantidad de pasta de cemento.

Posteriormente, la nueva metodología PCD se desarrolló con la intención de mejorar las propiedades de las mezclas porosas. En la Figura 44 se puede apreciar los diferentes porcentajes entre los componentes de mezcla de la metodología ACI 522R-10 y la metodología PCD.

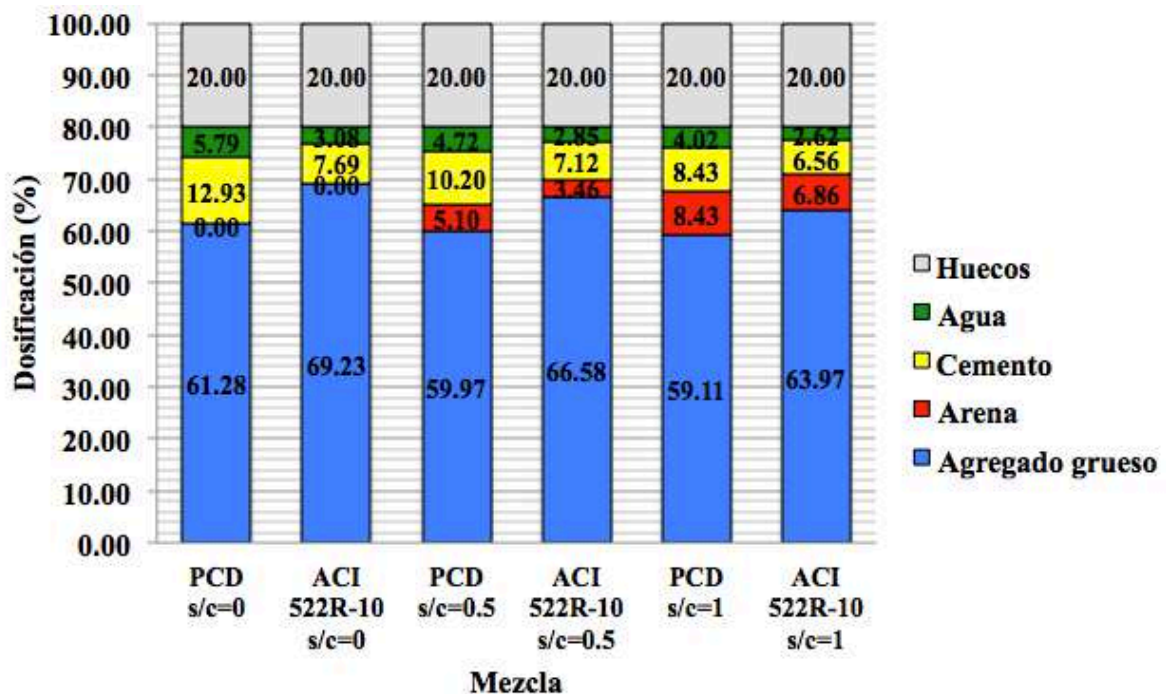


Figura 44. Diagrama de comparación de dosificaciones entre las metodologías ACI 522R-10 y Diseño de Hormigón Poroso (PCD), donde se aprecian los diferentes porcentajes de cada componente de la mezcla de hormigón poroso para una relación de arena-cemento (s/c) de 0.00, 0.50, y 1.00 (Fuente: Elaboración propia).

Las mezclas fueron elaboradas con un tamaño de agregado de 8-12mm debido a la disponibilidad del material en el laboratorio. Se realizó una mezcla para cada relación arena-cemento (s/c) considerada, siendo tres mezclas diferentes para cada método (PCD y ACI 522R-10).

#### 4.1.2. Dosificaciones estudiadas

Tres mezclas diferentes, variando la relación arena-cemento (s/c), fueron elaboradas para cada metodología, compactadas mediante el método de compresión axial. Las dosificaciones realizadas se muestran en la Tabla 22, donde las mezclas “PCD” corresponden a las elaboradas con la normativa PCD, y las mezclas “ACI” con la normativa ACI 522R-10. Además, el número a la derecha del nombre de cada mezcla (1, 2, 3) corresponde a la relación arena-cemento (s/c) utilizada (0, 0.5, 1, respectivamente).

Tabla 22. *Dosificaciones de hormigón poroso con las metodologías ACI 522R-10 y PCD. Fuente: Elaboración propia.*

Mezcla	s/c <sup>+</sup>	a/c <sup>**</sup>	C <sup>+</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	W <sup>-</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	S <sup>-</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	AV <sup>+</sup> (%)
ACI-1	0.00	0.40	209.97	83.99	0.00	20.00
ACI-2	0.50	0.40	195.97	78.39	95.14	20.00
ACI-3	1.00	0.40	181.97	72.79	190.28	20.00
PCD-1	0.00	0.40	341.47	76.39	0.00	20.00
PCD-2	0.50	0.40	275.53	63.68	28.61	20.00
PCD-3	1.00	0.40	230.93	55.09	47.95	20.00

<sup>+</sup>s/c corresponde a la relación arena-cemento

<sup>\*\*</sup>a/c corresponde a la relación agua-cemento

<sup>+</sup>C corresponde a la cantidad de cemento

<sup>-</sup>W corresponde a la cantidad de agua

<sup>-</sup>S corresponde a la cantidad de arena

<sup>+</sup>AV corresponde al volumen de huecos

Como la normativa ACI-522R-10 no emplea la relación arena-cemento (s/c) para dosificar, sino un porcentaje de arena de acuerdo a la cantidad de árido grueso empleado, se calculó esta relación para las mezclas con esta normativa. Esto puede apreciarse en la Tabla 13, la cual está derivada de la Tabla 6.1 localizada en la normativa ACI-522R-10 (American Concrete Institute ACI Committee 522 2010). Se realizaron ocho probetas con cada una de las seis mezclas estudiadas para la realización de los ensayos propuestos.

#### 4.1.3. Resultados generales

La Tabla 23 demuestra los resultados obtenidos en todos los ensayos evaluados para ambas metodologías, con la desviación estándar ( $\sigma$ ) adquirida al haberse realizado 8 probetas por mezcla, y la Tabla 24 muestra los resultados de la macrotextura, obtenidas mediante el ensayo del círculo de arena.

Tabla 23. Resultados generales de las mezclas de hormigón poroso elaboradas con las metodologías ACI 522R-10 y PCD. Fuente: Elaboración propia.

Mezcla	AV* (%)	$\sigma$	TI** (MPa)	$\sigma$	k+ (cm/s)	$\sigma$	FC** (MPa)	$\sigma$	CRD <sup>ˆ</sup> seco	$\sigma$	CRD <sup>ˆ</sup> húmedo	$\sigma$	Módulo de rigidez (MPa)	$\sigma$
ACI-1	33.32	0.91	0.66	0.19	3.19	0.58	3.56	0.91	0.65	0.01	62.00	0.01	6804.00	151.32
ACI-2	32.01	1.03	0.83	0.06	1.96	0.35	5.86	0.55	0.65	0.004	0.58	0.03	11589.50	1474.32
ACI-3	31.53	1.23	0.68	0.11	2.24	0.55	3.99	0.63	0.68	0.02	0.58	0.03	9476.50	550.84
PCD-1	29.51	0.76	1.10	0.05	1.40	0.05	7.88	0.72	0.64	0.10	0.52	0.03	11154.50	661.14
PCD-2	28.72	0.91	0.99	0.21	1.18	0.08	8.93	2.07	0.65	0.01	0.55	0.05	15756.50	902.98
PCD-3	30.88	1.44	0.92	0.08	1.90	0.02	5.14	0.59	0.65	0.03	0.59	0.01	13478.00	1227.54

\*AV corresponde al volumen de huecos

\*\*TI corresponde a la tracción indirecta

+k corresponde a la permeabilidad

\*\*FC corresponde a la fuerza a compresión

ˆCRD corresponde al coeficiente de resistencia al deslizamiento

Tabla 24. Resultados de la macrotextura mediante el ensayo del círculo de arena de las mezclas de hormigón poroso elaboradas con las metodologías ACI 522R-10 y PCD. Fuente: Elaboración propia.

Mezcla	Macrotextura (mm)
ACI-1	3.52
ACI-2	2.51
ACI-3	2.84
PCD-1	2.86
PCD-2	2.45
PCD-3	3.02

#### 4.1.4. Análisis de resultados de Porosidad y Permeabilidad

Al compactar las mezclas en la prensa mecánica, se observó que las probetas hechas con la metodología ACI 522R-10 tenían mayores problemas para compactarse. Esto significó una cantidad mayor de huecos (AV) debido a que el agregado grueso no lograba acomodarse apropiadamente en el molde, lo que es consecuencia de la metodología de diseño ya que la pasta de cemento era más seca y difícil de trabajar, en comparación con la metodología PCD (Tabla 21). Adicionalmente, este hecho forma puentes de pasta de cemento muy delgados, los cuales unen las diversas partículas de agregado grueso, más débilmente. Además, al ser una pasta muy seca, se apreció que no lograba acomodarse completamente entre el agregado grueso, quedándose una parte en la superficie de las probetas, y que podía removerse fácilmente con la mano.

Todas las mezclas, para ambas metodologías, se diseñaron para un contenido de huecos del 20%. Sin embargo, como se aprecia en la Tabla 22, el contenido de huecos real obtenido en las mezclas con la metodología ACI 522R-10 fue alrededor de 8-10% mayor

que el contenido de huecos de las mezclas con la metodología PCD, el cual fue entre 3-6% mayor que el 20% de diseño. Esto dió lugar a valores de permeabilidad,  $k$ , muy grandes en las mezclas ACI 522R-10, a costa de disminuir su resistencia mecánica. Con lo anterior, se puede afirmar que la metodología PCD ajusta la cantidad de mortero y agregado a un contenido de huecos fijo, mientras que la metodología ACI 522R-10 determina el contenido de huecos dependiendo de la cantidad de pasta de cemento. Así, los valores de permeabilidad en las probetas ACI 522R-10 fue alrededor de un 40% mayor que las probetas PCD.

Además, un contraste en los comportamientos puede apreciarse entre las dos metodologías, ya que el mayor valor de permeabilidad en la metodología PCD corresponde a una relación arena-cemento (s/c) de 1. Por el contrario, en la metodología ACI 522R-10, el valor más alto de permeabilidad corresponde a una relación arena-cemento (s/c) de 0. Esto permite afirmar que, al introducir arena en la mezcla, la metodología PCD no afecta la cantidad de agregado grueso ni contenido de huecos calculado, mientras que en la metodología ACI 522R-10 afecta la cantidad de agregado grueso calculado, disminuyendo el contenido de huecos.

A pesar de que los valores de permeabilidad en la metodología PCD fueron menores, se consideran lo suficientemente aceptables para pavimentos de hormigón poroso, cumpliendo los estándares americanos de mínimo una permeabilidad de 100m/día (0.012cm/s). Sin embargo, hidráulicamente hablando, la metodología ACI 522R-10 fue mucho mejor, siendo su mezcla sin arena alrededor de un 35% mayor la permeabilidad que las mezclas con arena.

Finalmente, se calculó una la regresión linear para ambas metodologías, donde los valores de permeabilidad pueden ser estimados con el contenido de huecos obtenido. Con esto, se obtuvieron valores de  $R^2$  de 0.79 para la metodología ACI 522R-10 y 0.99 para la PCD, concluyendo que la nueva metodología proporciona un modelo hidráulico más preciso al, como se aprecia en la Figura 45.



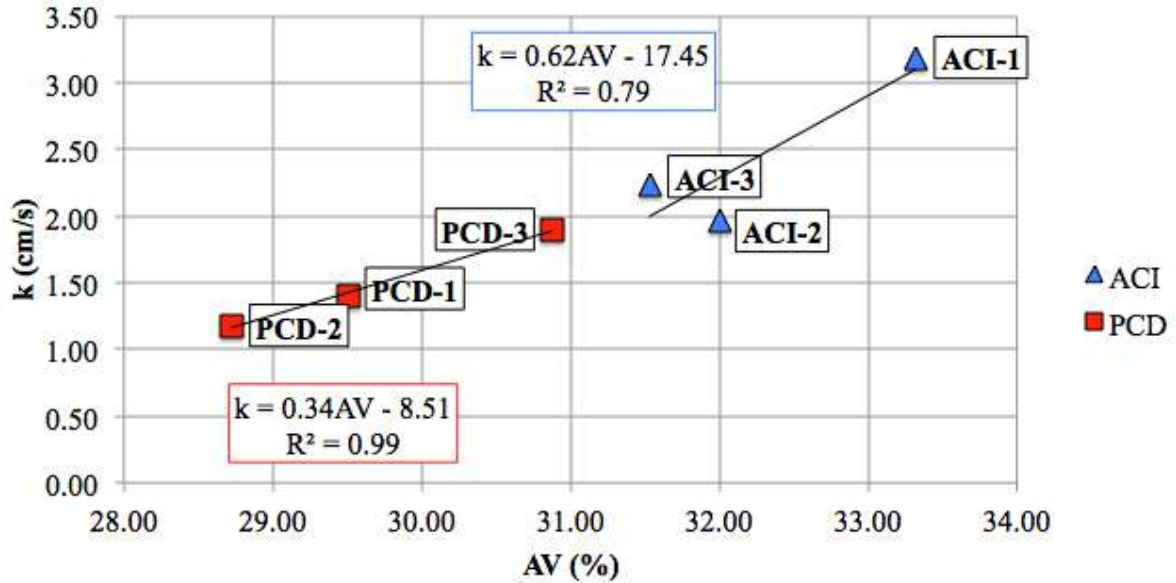


Figura 45. PCD vs ACI 522R-10. Gráfico correlación entre los resultados de permeabilidad ( $k$ ) y volumen de huecos ( $AV$ ) (Fuente: Elaboración propia).

#### 4.1.5. Análisis de resultados Mecánicos

En general, las mezclas PCD fueron alrededor de 30% más resistentes que las mezclas ACI 522R-10, donde, inclusive, el valor más alto para esta metodología fue un 9% menor que la mezcla PCD más débil. Las mezclas sin arena demostraron los mejores resultados de tracción indirecta con la metodología PCD, con 1.10Mpa de resistencia. Esto se debe a que al quitar la arena de la dosificación, la cantidad de cemento y agua incrementa. Por consiguiente, la pasta de cemento se hace más adhesiva, y las partículas de agregado grueso tienen una mejor adhesión entre ellas. Sin embargo, esto puede reducir los valores de permeabilidad, ya que la misma pasta se puede hacer más fluida. La precisión del modelo de regresión, como se aprecia en la Figura 46, fue baja para ambos métodos, con un  $R^2$  de 0.27 para la metodología PCD y 0.13 para la metodología ACI 522R-10.

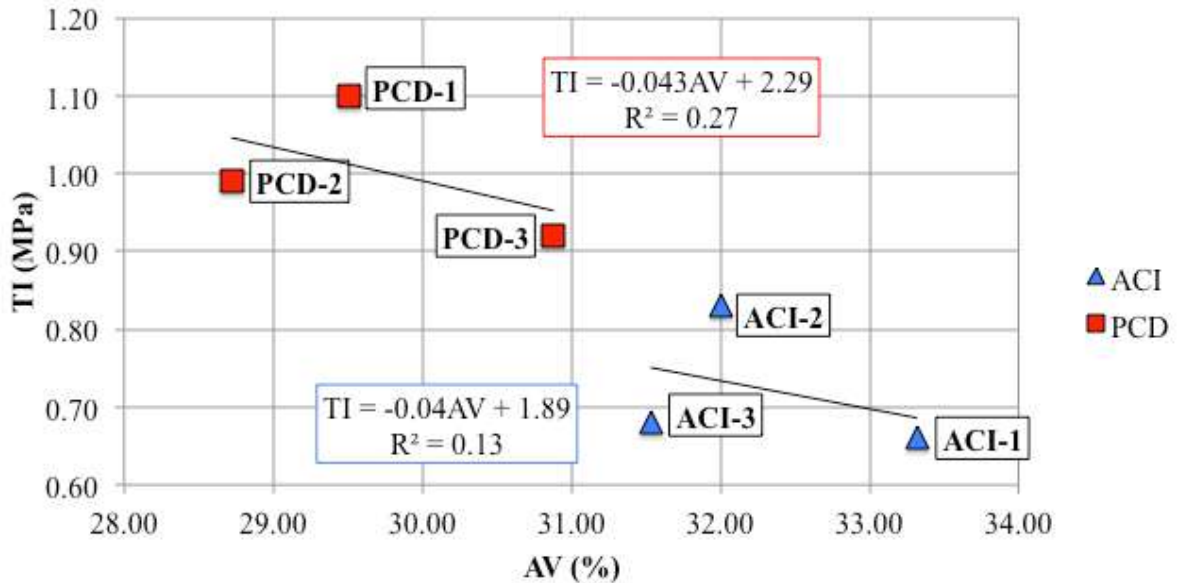


Figura 46. PCD vs ACI 522R-10. Gráfico correlación entre los resultados de tracción indirecta (TI) y volumen de huecos (AV) (Fuente: Elaboración propia).

En términos de fuerza a compresión (FC), las mezclas PCD obtuvieron valores un 28% mayores que las mezclas ACI 522R-10. Una relación arena-cemento (s/c) de 0.5 resultó otorgar el mejor comportamiento en ambas metodologías. Esto significa que el añadir arena en la mezcla ayuda a incrementar la fuerza a compresión. Por el contrario, en las mezclas ACI 522R-10, la fuerza a compresión disminuye cuando se remueve la arena de la dosificación, ya que esto no altera la cantidad de cemento, usando siempre la misma, a pesar de la relación arena-cemento (s/c). Este comportamiento se puede demostrar en la regresión lineal, donde la metodología ACI 522R-10 obtuvo valores de  $R^2$  de 0.18, en relación con el contenido de huecos adquirido, mientras que las mezclas PCD obtuvieron una  $R^2$  de 0.99, como se aprecia en la Figura 47. Con esto se puede establecer que la metodología PCD controla de una forma adecuada las cantidades de los componentes del mortero, ayudando a otorgar una buena adhesión entre partículas de agregado grueso.

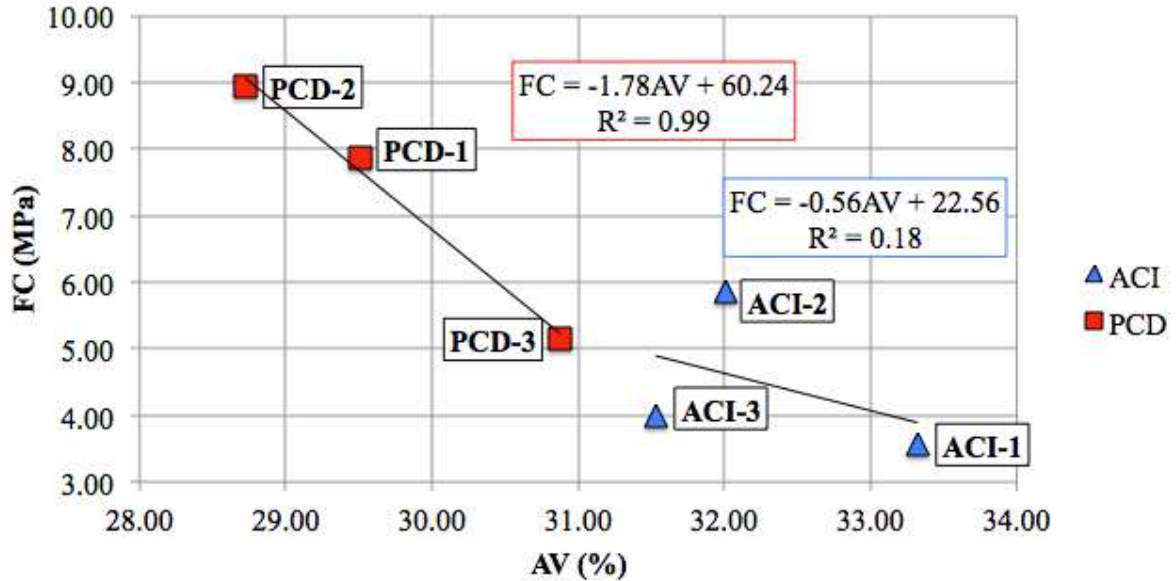


Figura 47. PCD vs ACI 522R-10. Gráfico correlación entre los resultados de fuerza a compresión (FC) y volumen de huecos (AV) (Fuente: Elaboración propia).

En cuanto al módulo de rigidez, las mezclas PCD demostraron un 30% mayor resistencia a la deformación que las mezclas ACI 522R-10, para todas las relaciones de arena-cemento (s/c) evaluadas. Adicionalmente, el añadir arena, en cualquier metodología, ayuda a que la mezcla sea más elástica y resista mayor fuerza de deformación. Sin embargo, un exceso de arena (s/c de 1), tiende a disminuir esta capacidad. Aún así, el módulo de rigidez es mayor en las mezclas sin arena, en un 18% para la metodología PCD, y casi 30% para la metodología ACI 522R-10.

#### 4.1.6. Análisis de resultados Superficiales

La resistencia al deslizamiento demostró resultados similares para ambas metodologías, siendo un poco mayor en las mezclas ACI 522R-10 (Tabla 22). Bajo condiciones secas, las mezclas ACI 522R-10 fueron un 1.30% mejores que las mezclas PCD, y bajo condiciones húmedas, el margen incrementó a 6.20%. Esto se debe a la alta porosidad de las mezclas ACI 522R-10 donde, principalmente bajo condiciones húmedas, el agua se drena muy rápidamente, evitando encharcamientos y, por consiguiente, que el coeficiente de resistencia al deslizamiento (CRD) disminuya. Bajo condiciones secas, las mezclas ACI 522R-10 tuvieron un coeficiente de resistencia al deslizamiento ligeramente mayor debido a que al tener una pasta de cemento más seca, ésta se quedó, en parte, en la superficie de la mezcla, incrementando el área de contacto entre el péndulo y la probeta,

disminuyendo la energía del péndulo y aumentando el coeficiente de resistencia al deslizamiento. Adicionalmente, se encontró que la adición de arena incrementa la resistencia al deslizamiento en las mezclas PCD, ya que tiende a hacer el mortero más áspero. El comportamiento fue el mismo para las mezclas ACI 522R-10 bajo condiciones secas, pero opuesto bajo condiciones húmedas, al disminuir la permeabilidad por el mayor contenido de arena.

En cuanto al ensayo del círculo de arena, todas las mezclas, en este caso, tuvieron una macrotextura muy profunda, sobre los 2mm. Esto conlleva a concluir que el tamaño de agregado grueso utilizado puede ser recomendado para cada tipo de pavimento, especialmente en curvas peligrosas y lugares donde llueve mucho. La macrotextura de las mezclas ACI 522R-10 fue alrededor de un 6% mayor que en las mezclas PCD. Esto debido a la gran cantidad de árido grueso que tiene la metodología ACI 522R-10 (aproximadamente 5% más que las PCD).

#### **4.1.7. Conclusiones Parciales**

Del estudio de la comparativa entre metodologías de diseño de hormigón poroso ACI y PCD, se extrajeron las siguientes conclusiones parciales:

- Añadir arena en la dosificación tiende a incrementar la capacidad mecánica de la mezcla considerablemente, independientemente de la metodología empleada. Sin embargo, mientras en la metodología ACI 522R-10 el agregar arena disminuye la permeabilidad, en la metodología PCD se incrementa. Esto se debe a que esta última metodología el mortero es adaptado de acuerdo al porcentaje de pasta establecido con respecto a las relaciones agua-cemento (a/c) y arena-cemento (s/c) de diseño. Consecuentemente, agregar arena en las mezclas PCD incrementa tanto la permeabilidad como la resistencia mecánica, hasta un límite de arena de  $s/c = 1$ .
- La metodología PCD llega a incrementar la resistencia mecánica de las mezclas manteniendo valores de permeabilidad aceptables en el entorno de los 2 cm/s. Con esto, se puede establecer que las mezclas PCD pueden resistir un mayor impacto del tráfico al tener una mayor resistencia a la deformación, retrasando la aparición de grietas. Además, la dosificación PCD permite tener una mezcla menos seca, en

comparación con la metodología ACI 522R-10, logrando una mayor trabajabilidad y adhesión entre las partículas de agregado.

- Los resultados de resistencia al deslizamiento fueron similares en ambas metodologías, sobre todo bajo condiciones secas. Sin embargo, el CRD incrementa en las mezclas ACI 522R-10 bajo condiciones húmedas. Esto se debe a la alta permeabilidad resultante de esta metodología.
- Las mezclas PCD obtuvieron 30% mayor resistencia mecánica que las mezclas ACI 522R-10. Sin embargo, su permeabilidad fue 40% menor. Esto debido a la dosificación donde esta última metodología permite un mayor porcentaje de huecos, otorgando una permeabilidad mucho mayor. Sin embargo, los resultados de permeabilidad de las mezclas PCD fueron buenos, estando todos por encima del mínimo requerido por las normativas americanas de 100m/día (0.012cm/s aproximadamente).

## **4.2. Estudio económico**

Se considera de suma importancia, además de las propiedades mecánicas, hidráulicas, de seguridad y ambientales, el analizar el aspecto económico de las metodologías y así proporcionar la viabilidad de las mismas. En un primer análisis, se compara el costo entre las metodologías ACI 522R-10 y la metodología PCD. Posteriormente, se realiza un análisis de comparación de costos entre la metodología PCD (empleando una relación arena-cemento de 0.5 y agua-cemento de 0.3, así como un VMA de 47%), un pavimento de hormigón convencional (considerando una  $f^c$  de 300kg/cm<sup>2</sup>) y un pavimento de asfalto, según las especificaciones dadas por una empresa constructora en México.

### **4.2.1. Comparativa entre la metodología ACI 522R-10 y la metodología PCD**

Para comparar la metodología ACI 522R-10 y la metodología PCD en términos económicos, se realizó un análisis simple considerando solamente la cantidad de material que se necesita para fabricar 1m<sup>3</sup> de hormigón poroso, para cada mezcla estudiada en el apartado de comparación de métodos de dosificación. Esto ya que se consideró que los materiales son los únicos costos variables, y el resto (mano de obra, seguro, indirectos,

entre otros) no cambian. Como se aprecia en la Tabla 25, los resultados demuestran que la metodología PCD es más costosa, ya que necesita una mayor cantidad de cemento. A pesar de esto, algunos autores determinan que para incrementar la resistencia mecánica en pavimentos de hormigón poroso, la cantidad de cemento debe ser de al menos  $300\text{kg}/\text{cm}^3$  (Bachmann n.d.; Batezini, Curvo, and Balbo n.d.; Sell, Nehls, and Lyhs n.d.). Cantidad que la mezcla PCD-1 sobrepasa, y que la metodología PCD está más cerca de cumplir que la ACI 522R-10, de acuerdo a la Tabla 22.

Tabla 25. *Análisis económico entre los materiales que se necesitan para fabricar  $1\text{m}^3$  hormigón poroso con la metodología ACI 522R-10 y la metodología PCD (Fuente: Elaboración propia).*

Material	ACI-1	ACI-2	ACI-3	PCD-1	PCD-2	PCD-3
Cemento (kg)	€ 43.58	€ 40.68	€ 37.77	€ 70.89	€ 57.19	€ 47.93
Agregado ( $\text{m}^3$ )	€ 56.69	€ 54.97	€ 53.26	€ 48.55	€ 48.55	€ 48.55
Arena ( $\text{m}^3$ )	€ -	€ 1.90	€ 3.80	€ -	€ 2.75	€ 4.61
Agua ( $\text{m}^3$ )	€ 0.16	€ 0.15	€ 0.14	€ 0.29	€ 0.25	€ 0.21
Total	€ 100.43	€ 97.70	€ 94.97	€ 119.73	€ 108.74	€ 101.30
Diferencia	-	-	-	16.12%	10.15%	6.25%

Cuando una relación arena-cemento (s/c) de 1 se emplea, la metodología PCD es 6.25% más costosa que la metodología ACI 522R-10. Disminuyendo la relación en 0.50, la diferencia en el costo incrementa 10.15%, y cuando no se utiliza arena, sube a 16.12%. A pesar de estos incrementos, el rango de costos se considera entre parámetros aceptables, de acuerdo con algunas investigaciones (Vogel et al. 2018); y el hecho de que la metodología PCD logra una duración a largo término mayor, debido a su resistencia, lleva a la conclusión de que es económicamente viable.

#### 4.2.2. Comparativa entre hormigón convencional, metodología PCD y asfalto

A continuación se presenta un análisis de los costos de fabricación de un metro cuadrado ( $\text{m}^2$ ) de un pavimento de hormigón poroso con la metodología PCD, empleando una dosificación con arena en una relación arena-cemento (s/c) de 0.5, y una relación agua-cemento (a/c) de 0.3, de un pavimento de hormigón convencional, y de un pavimento de asfalto convencional, siguiendo los pasos descritos en el capítulo de metodología. Es importante mencionar que los costos utilizados corresponden a los empleados en México, en su divisa de pesos mexicanos (MXN). Esto por la facilidad para obtenerlos. Además, los sistemas proporcionados son descritos por ingenieros civiles que trabajan en el ámbito en

México. Aún así, el objetivo del presente análisis es demostrar una comparación y diferencia de costos entre los sistemas expuestos. Así mismo, al final del análisis, los valores obtenidos se convierten a la divisa de euros (EUR), tomando los valores de conversión del Banco Santander de México del día 24 de febrero de 2020, donde 1EUR corresponde a 20.51MXN.

1. Identificación de los componentes del hormigón y del asfalto, así como de su proceso constructivo: Para determinar el costo del hormigón, así como del asfalto, se debe descomponer en los diversos materiales o componentes que lo conforman. Así mismo, se deben de analizar cada uno de ellos en términos de rendimiento y costo, donde al final se suman para obtener el precio del sistema en la unidad establecida. En la Tabla 26 se aprecian los elementos de cada sistema evaluado.

Tabla 26. *Materiales que forman los sistemas de pavimentos para su análisis económico (Fuente: Elaboración propia).*

Pavimento	Hormigón Convencional	Metodología PCD	Asfalto
Elaboración de hormigón / asfalto	Cemento	Cemento	Asfalto
	Árido	Árido	Riego de impregnación
	Arena	Arena	Riego de liga
	Agua	Agua	
Preliminares y adicionales	Excavación/trabajos de tierra	Excavación/trabajos de tierra	Excavación/trabajos de tierra
	Acero estructural	---	---
	Sistema de drenaje	---	Sistema de drenaje
Base y subbase	Material base	Material base	Material base
	Material subbase	Material subbase	Material subbase
Terminación	Sellado de juntas	---	---

2. Determinación de los rendimientos de los componentes del hormigón y del asfalto: Para calcular los rendimientos, los materiales tienen que medirse en la misma unidad ( $m^2$ ). Esta información se obtuvo principalmente de ingenieros civiles que laboran en el ámbito en México. Es importante mencionar que para el cálculo de los rendimientos, se propone un desperdicio del 5% para cada material, considerando residuos de material que quedan incrustados en la hormigonera, traslapes, entre otros. Esta información se presenta en la Tabla 27.

Tabla 27. *Presentación y rendimiento de los materiales que forman los sistemas de pavimentos para su análisis económico (Fuente: Elaboración propia).*

Sistema	Material	Presentación	Rendimiento por m <sup>2</sup>
Hormigón Convencional	Cemento	saco de 50kg	0.92
	Árido	m <sup>3</sup>	0.09
	Arena	m <sup>3</sup>	0.04
	Agua	m <sup>3</sup>	0.02
	Excavación/trabajos de tierra	m <sup>3</sup>	0.72
	Acero estructural	m <sup>2</sup>	1.00
	Sistema de drenaje	Lote	1.00
	Material base	m <sup>3</sup>	0.30
	Material subbase	m <sup>3</sup>	0.30
	Sellado de juntas	ml	1.00
Metodología PCD	Cemento	saco de 50kg	0.83
	Árido	m <sup>3</sup>	0.12
	Arena	m <sup>3</sup>	0.01
	Agua	m <sup>3</sup>	0.01
	Excavación/trabajos de tierra	m <sup>3</sup>	0.72
	Material base	m <sup>3</sup>	0.30
	Material subbase	m <sup>3</sup>	0.30
Asfalto	Asfalto	m <sup>2</sup> con profundidad de 6cm	1.00
	Riego de impregnación	m <sup>2</sup>	1.00
	Riego de liga	m <sup>2</sup>	1.00
	Excavación/trabajos de tierra	m <sup>3</sup>	0.66
	Sistema de drenaje	Lote	1.00
	Material base	m <sup>3</sup>	0.30
	Material subbase	m <sup>3</sup>	0.30

3. Obtención de los precios de los materiales que conforman los sistemas analizados: Los precios de los materiales que conforman cada uno de los sistemas de pavimentos evaluados fueron obtenidos gracias al apoyo de la Empresa Constructora RUVA, en Ciudad Obregón, Sonora. Dichas cantidades corresponden a valores del año 2019. En la Tabla 28 se aprecia el precio (sin I.V.A. incluido), de los materiales que conforman cada sistema a evaluar, así como el precio total de acuerdo a las cantidades establecidas que se necesitarán de la Tabla 27.



Tabla 28. Costo de los materiales que forman los sistemas de pavimentos para su análisis económico, por unidad de m<sup>2</sup> (Fuente: Elaboración propia).

Sistema	Material/concepto	Costo por unidad (sin I.V.A.)		Total (de acuerdo a cantidades de la Tabla 55)	
		MXN	EUR	MXN	EUR
Hormigón convencional	Cemento	\$202.59	€ 9.88	\$186.38	€ 9.09
	Árido	\$230.00	€ 11.21	\$20.70	€ 1.01
	Arena	\$230.00	€ 11.21	\$9.20	€ 0.45
	Agua	\$14.40	€ 0.70	\$0.29	€ 0.01
	Excavación/trabajos de tierra	\$186.57	€ 9.10	\$134.33	€ 6.55
	Acero de refuerzo	\$16.76	€ 0.82	\$16.76	€ 0.82
	Sistema de drenaje	\$409.77	€ 19.98	\$409.77	€ 19.98
	Material base	\$265.76	€ 12.96	\$79.73	€ 3.89
	Material subbase	\$186.02	€ 9.07	\$55.81	€ 2.72
	Sellado de juntas	\$41.46	€ 2.02	\$41.46	€ 2.02
Metodología PCD	Cemento	\$202.59	€ 9.88	\$168.15	€ 8.20
	Árido	\$230.00	€ 11.21	\$27.60	€ 1.35
	Arena	\$230.00	€ 11.21	\$2.30	€ 0.11
	Agua	\$14.40	€ 0.70	\$0.14	€ 0.01
	Excavación/trabajos de tierra	\$186.57	€ 9.10	\$134.33	€ 6.55
	Material base	\$265.76	€ 12.96	\$79.73	€ 3.89
	Material subbase	\$186.02	€ 9.07	\$55.81	€ 2.72
Asfalto	Concreto asfalto	\$181.05	€8.83	\$181.05	€ 8.83
	Riego de impregnación	\$134.40	€6.55	\$134.40	€ 6.55
	Riego de liga	\$70.00	€3.41	\$70.00	€ 3.41
	Excavación/trabajos de tierra	\$186.57	€9.10	\$123.14	€ 6.00
	Sistema de drenaje	\$409.77	€19.98	\$409.77	€ 19.98
	Material base	\$265.76	€12.96	\$79.73	€ 3.89
	Material subbase	\$186.02	€9.07	\$55.81	€ 2.72

4. Determinación del costo de mano de obra: Para el cálculo del costo de mano de obra se tomaron los costos por jornada de cada trabajador que conforma la cuadrilla predeterminada, y se dividieron entre el rendimiento considerado en m<sup>2</sup>. Con esto es muy sencillo establecer el costo de la persona solamente por realizar el trabajo, sin considerar su seguro social y otros gastos derivados de impuestos. Esto se puede apreciar en la Tabla 29.

Tabla 29. Costo de la mano de obra para elaboración y colocación de los sistemas de pavimentos para su análisis económico, por unidad de m<sup>2</sup> (Fuente: Elaboración propia).

Sistema	Concepto	Nombre	Rendimiento (m <sup>2</sup> /jor)	Costo (por jornada)		Costo (por m <sup>2</sup> )	
				MXN	EUR	MXN	EUR
Hormigón convencional	Elaboración de concreto	Of. Albañil	7	\$400.00	€18.60	\$57.14	€ 2.66
		Ayudante	7	\$200.00	€9.30	\$28.57	€ 1.33
		Ayudante	7	\$200.00	€9.30	\$28.57	€ 1.33
Metodología PCD	Preliminares y adicionales	Mano de obra incluida en costo de concepto					
Asfalto	Base y subbase	Ayudante	0.25	\$250.00	€11.62	\$62.50	€2.91
		Ayudante	0.25	\$250.00	€11.62	\$62.50	€2.91
	Terminación	Mano de obra incluida en costo de concepto					

5. Cálculo del costo del Seguro Social: El costo de Seguridad Social para los trabajadores es fijado por la empresa constructora, dependiendo del salario que el propio trabajador tiene. En la Tabla 30 se muestra el costo de Seguridad Social aproximado de la zona norte de México (lugar de donde se obtuvieron los costos en general), y su conversión a unidades de m<sup>2</sup> y EUR.

Tabla 30. Costo de seguridad social de la mano de obra para elaboración y colocación de los sistemas de pavimentos para su análisis económico, por unidad de m<sup>2</sup> (Fuente: Elaboración propia).

Sistema	Concepto	Nombre	Costo (por jornada)		Costo (por m <sup>2</sup> )	
			MXN	EUR	MXN	EUR
Hormigón convencional	Elaboración de concreto	Of. Albañil	\$100.00	€4.88	\$14.29	€0.66
		Ayudante	\$100.00	€4.88	\$14.29	€0.66
		Ayudante	\$100.00	€4.88	\$14.29	€0.66
Metodología PCD	Preliminares y adicionales	Mano de obra incluida en costo de concepto				
Asfalto	Base y subbase	Ayudante	\$100.00	€4.88	\$14.29	€0.66
		Ayudante	\$100.00	€4.88	\$14.29	€0.66
	Terminación	Mano de obra incluida en costo de concepto				

6. Cálculo del costo administrativo de la empresa (Costos Indirectos): El costo administrativo de la empresa se aprecia en la Tabla 30. Aquí se incluyen los conceptos propuestos por la metodología empleada, y los valores corresponden a experiencias propias y de ingenieros civiles que laboran en empresas constructoras dedicadas a la colocación de pavimentos, así como (pudiera ser el caso), de otras obras de construcción diversas. Como se aprecia en la Tabla 31, el cálculo del costo por m<sup>2</sup> de la empresa es de 983.57 MXN, o 47.96 EUR. Es un costo muy elevado

para la colocación de 1m<sup>2</sup> de hormigón. Hay que tener en cuenta que el costo obtenido en este apartado es un costo general, ya sea mensual, diario, horario o por unidad. Es decir, en este costo se incluyen todos los posibles trabajos, proyectos, o m<sup>2</sup> trabajados en un periodo de tiempo establecido.

Tabla 31. *Costo administrativo de la empresa para elaboración y colocación de los sistemas de pavimentos para su análisis económico, por unidad de m<sup>2</sup> (Fuente: Elaboración propia).*

Concepto	Costo Mensual	Costo Diario	Costo Horario	Costo por m <sup>2</sup>
Gastos técnicos o administrativos	\$92,000.00	\$3,066.67	\$383.33	\$438.10
Gerente General	\$30,000.00	\$1,000.00	\$125.00	\$142.86
Asistente Gerente General	\$12,000.00	\$400.00	\$50.00	\$57.14
Analista de Costos	\$12,000.00	\$400.00	\$50.00	\$57.14
Gerente de Obra	\$8,000.00	\$266.67	\$33.33	\$38.10
Supervisor de Obra 1	\$7,000.00	\$233.33	\$29.17	\$33.33
Supervisor de Obra 2	\$7,000.00	\$233.33	\$29.17	\$33.33
Jefe de Almacén	\$4,000.00	\$133.33	\$16.67	\$19.05
Secretaria-Recursos Humanos	\$5,000.00	\$166.67	\$20.83	\$23.81
Contador	\$7,000.00	\$233.33	\$29.17	\$33.33
Alquileres y/o Depreciaciones	\$18,100.00	\$603.33	\$75.42	\$86.19
Renta Oficina Central	\$5,000.00	\$166.67	\$20.83	\$23.81
Mantenimiento Oficina Central	\$3,000.00	\$100.00	\$12.50	\$14.29
Servicio vehículos	\$6,000.00	\$200.00	\$25.00	\$28.57
Teléfonos móviles	\$1,500.00	\$50.00	\$6.25	\$7.14
Agua	\$500.00	\$16.67	\$2.08	\$2.38
Luz	\$1,000.00	\$33.33	\$4.17	\$4.76
Teléfono de oficina e internet	\$600.00	\$20.00	\$2.50	\$2.86
Depreciación de Equipo	\$500.00	\$16.67	\$2.08	\$2.38
Obligaciones y Seguros	\$52,250.00	\$1,741.67	\$217.71	\$248.81
Prima de Seguro vehículos	\$2,250.00	\$75.00	\$9.38	\$10.71
IMSS Personal Administrativo	\$50,000.00	\$1,666.67	\$208.33	\$238.10
Materiales de consumo	\$21,600.00	\$720.00	\$90.00	\$102.86
Papelería	\$2,000.00	\$66.67	\$8.33	\$9.52
Papelería Impresa (tinta)	\$800.00	\$26.67	\$3.33	\$3.81
Artículos de Oficina	\$1,500.00	\$50.00	\$6.25	\$7.14
Artículos de Limpieza	\$500.00	\$16.67	\$2.08	\$2.38
Gastos de operación vehículos	\$16,800.00	\$560.00	\$70.00	\$80.00
Capacitación y Promoción	\$1,600.00	\$53.33	\$6.67	\$7.62
Capacitación	\$600.00	\$20.00	\$2.50	\$2.86
Promoción	\$1,000.00	\$33.33	\$4.17	\$4.76
Otros Gastos	\$21,000.00	\$700.00	\$87.50	\$100.00
Viáticos	\$6,000.00	\$200.00	\$25.00	\$28.57
Combustible	\$15,000.00	\$500.00	\$62.50	\$71.43
<b>Total (MXN)</b>	<b>\$206,550.00</b>	<b>\$6,885.00</b>	<b>\$860.63</b>	<b>\$983.57</b>
<b>Total (EUR)</b>	<b>€ 9,602.51</b>	<b>€ 320.08</b>	<b>€ 40.01</b>	<b>€ 47.96</b>

Por consiguiente, el valor obtenido en la Tabla 31 debe de dividirse entre los proyectos que la empresa tiene en promedio, en un periodo de tiempo, en este caso, de un mes. Hablando con diversos ingenieros, se tienen en promedio un total de 7 proyectos simultáneos por empresa, por lo que se hace una división como se muestra a continuación:

$$\frac{\text{Costo por m}^2 \text{ del análisis administrativo}}{\text{Número de obras totales al mes}} = \frac{\$983.57}{7} = \$140.51$$

De acuerdo al cálculo, esta es la cantidad a emplear por m<sup>2</sup> de pavimento instalado. Convertido a euros, serían 6.85EUR.

7. Determinación del costo de los sistemas evaluados: En este paso se realiza una sumatoria de los costos analizados en los puntos anteriores. Se excluye el costo administrativo, ya que posteriormente se añade como un porcentaje de costos indirectos. En la Tabla 32 se aprecia el costo para 1m<sup>2</sup> de cada sistema evaluado.

Tabla 32. Costo para 1m<sup>2</sup> de cada sistema de pavimento evaluado (Fuente: Elaboración propia).

Concepto	Hormigón convencional		Metodología PCD		Asfalto	
	MXN	EUR	MXN	EUR	MXN	EUR
Material						
Cemento	\$186.38	€9.09	\$168.15	€8.20	-	-
Árido	\$20.70	€1.01	\$27.60	€1.35	-	-
Arena	\$9.20	€0.45	\$2.30	€0.11	-	-
Agua	\$0.29	€0.01	\$0.14	€0.01	-	-
Concreto asfalto	-	-	-	-	\$181.05	€8.83
Riego de impregnación	-	-	-	-	\$19.20	€0.94
Riego de liga	-	-	-	-	\$10.00	€0.49
Excavación/trabajos de tierra	\$134.33	€6.55	\$134.33	€6.55	\$123.14	€6.00
Acero estructural	\$16.76	€0.82	-	-	-	-
Sistema de drenaje	\$409.77	€19.98	-	-	\$475.33	€22.10
Material base	\$79.73	€3.89	\$79.73	€3.89	\$92.48	€4.30
Material subbase	\$55.81	€2.72	\$55.81	€2.72	\$64.73	€3.01
Sellado de juntas	\$41.46	€2.02	-	-	-	-
Mano de obra						
Of. Albañil	\$80.00	€3.90	\$80.00	€3.90	\$80.00	€3.90
Ayudante	\$102.50	€5.00	\$102.50	€5.00	\$102.50	€5.00
Ayudante	\$102.50	€5.00	\$102.50	€5.00	\$102.50	€5.00
Seguro social						
Of. Albañil	\$20.00	€0.98	\$20.00	€0.98	\$20.00	€0.98
Ayudante	\$40.00	€1.95	\$40.00	€1.95	\$40.00	€1.95
Ayudante	\$40.00	€1.95	\$40.00	€1.95	\$40.00	€1.95
<b>Total</b>	<b>\$1,339.41</b>	<b>€ 65.31</b>	<b>\$853.06</b>	<b>€ 41.59</b>	<b>\$1,263.69</b>	<b>€ 61.61</b>

Con los datos obtenidos hasta el momento, se puede apreciar que 1m<sup>2</sup> de pavimento de hormigón poroso con la metodología PCD resulta 36.31% y 32.49% más económico que 1m<sup>2</sup> de pavimento con hormigón convencional y con asfalto, respectivamente. Esto sin añadir los beneficios sociales y ambientales que el hormigón poroso puede otorgar.

8. Adición del costo administrativo: Para la obtención del porcentaje del costo administrativo (o costo indirecto), basta dividir la cantidad obtenida en el paso 6, donde se calculó el costo administrativo, entre el costo de cada sistema de pavimento. Hay que mantener ambos costos bajo la misma unidad, que será m<sup>2</sup> en este caso. Esto se aprecia en la Tabla 33, donde el porcentaje de costo administrativo, o indirecto, es diferente para cada sistema, pero en términos de dinero es la misma cantidad.

Tabla 33. Costo para 1m<sup>2</sup> de cada sistema de pavimento evaluado (Fuente: Elaboración propia).

Sistema	Hormigón convencional		Metodología PCD		Asfalto	
<b>Costo administrativo</b>	\$140.51		€6.85			
<b>Costo total del sistema</b>	\$1,339.41	€ 65.31	\$853.06	\$41.59	\$1,263.69	\$61.61
<b>% de costo indirecto</b>	<b>10.49%</b>		<b>16.47%</b>		<b>11.12%</b>	

9. Adición de la utilidad propuesta y comparación de los costos de los sistemas: La utilidad propuesta para este análisis fue del 10%. Aquí basta con calcular dicho porcentaje de la suma del costo de los sistemas más el costo administrativo obtenido en pasos anteriores. Esto se aprecia en la Tabla 34. Posteriormente, dicho subtotal se le agrega el 16% correspondiente al I.V.A. y finalmente se obtiene el costo total de los sistemas de pavimentación evaluados en la presente investigación.

Tabla 34. Cálculo de la utilidad propuesta del 10%, adición del I.V.A. (16%) y costo total para la elaboración de 1 m<sup>2</sup> de cada sistema de pavimento evaluado (Fuente: Elaboración propia).

Sistema	Hormigón convencional		Metodología PCD		Asfalto	
	MXN	EUR	MXN	EUR	MXN	EUR
<b>Costo del sistema</b>	\$1,339.41	€ 65.31	\$853.06	€ 41.59	\$1,263.69	€ 61.61
<b>Costo administrativo (10.49%, 16.47%, 11.12%)</b>	\$140.51	€ 6.85	\$140.51	€ 6.85	\$140.51	€ 6.85
<b>Subtotal</b>	\$1,479.92	€ 72.16	\$993.57	€ 48.44	\$1,404.20	€ 68.46
<b>Utilidad (10%)</b>	\$147.99	€ 7.22	\$99.36	€ 4.84	\$140.42	€ 6.85
<b>Subtotal</b>	\$1,627.92	€ 79.37	\$1,092.92	€ 53.29	\$1,544.62	€ 75.31
<b>I.V.A. (16%)</b>	\$260.47	€ 12.70	\$174.87	€ 8.53	\$247.14	€ 12.05
<b>Total</b>	<b>\$1,888.38</b>	<b>€ 92.07</b>	<b>\$1,267.79</b>	<b>€ 61.81</b>	<b>\$1,791.75</b>	<b>€ 87.36</b>

Se aprecia que el pavimento de hormigón poroso es viable, en comparación con los otros dos sistemas, ya que es un 32.86% y un 29.24% más económico que el hormigón convencional y el asfalto, respectivamente. Sumado a esto, los beneficios ambientales que presenta el hormigón poroso en términos de prevenir el desperdicio y evitar la contaminación de agua.

Es importante, como nota, aclarar que los costos de cada sistema pueden ser ajustados y cambiar considerablemente si se considera la maquinaria y equipo pesado utilizado para la instalación de estos pavimentos. Esto hace que el trabajo se realice de una forma más eficiente. Debido a los tiempos con los que se contaba para la realización de la presente tesis doctoral, se decidió no hacer los costos horarios de maquinaria, y manejar los precios de una cuadrilla de trabajadores. Al final, el objetivo de comparar los sistemas y darnos una idea de cuál es más económico, se cumple.

### 4.3. Determinación de la dosificación óptima sin aditivos

Una vez comparadas las metodologías de diseño de mezclas de hormigón poroso, se establece que la metodología PCD satisface las características que se buscan en la presente tesis de investigación. Como continuación del estudio, se realiza ahora una evaluación de diferentes dosificaciones con la intención de determinar qué cantidad de los componentes del hormigón poroso otorgan los mejores resultados sin aditivos.

#### 4.3.1. Dosificaciones estudiadas

Para determinar la cantidad óptima de mezclas a elaborar, considerando las variables establecidas, el software estadístico Minitab fue utilizado, en donde se realizó un análisis de Diseño de Experimentos. En la Figura 48 se aprecia el esquema de comparación planeado para las mezclas, donde 31 mezclas diferentes fueron consideradas para el análisis de un total de 72 posibles.

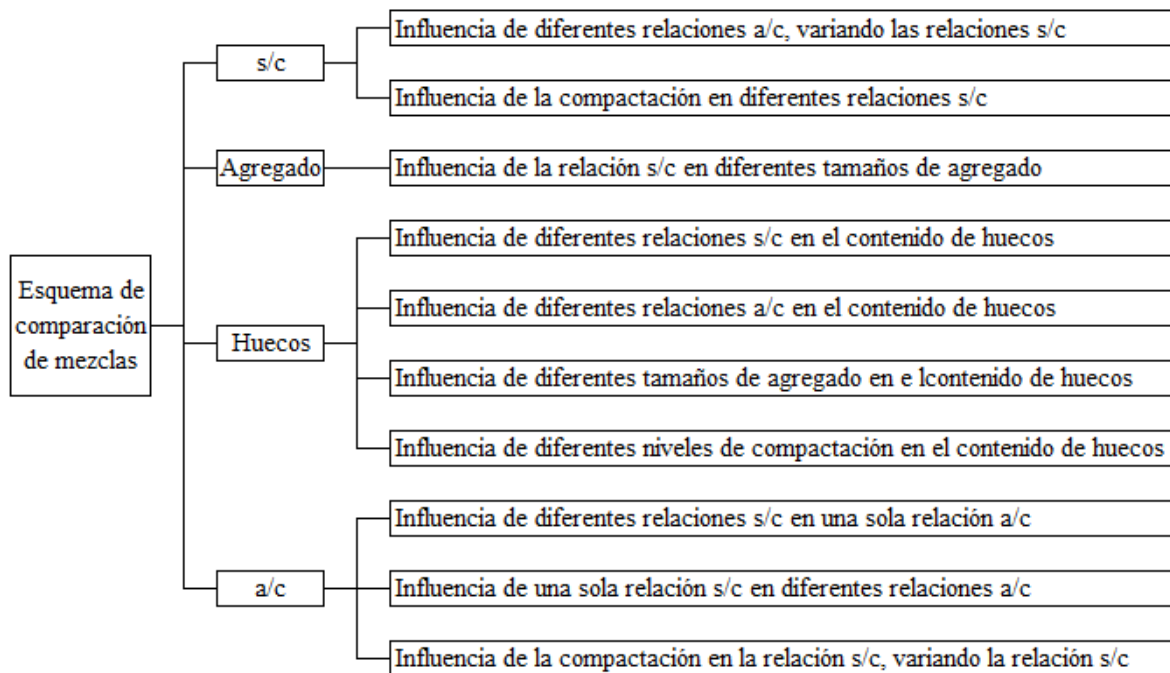


Figura 48. Esquema de comparación para la elaboración de mezclas de hormigón poroso con diferentes dosificaciones (Fuente: Elaboración propia).

En la Tabla 35 se muestran las diferentes mezclas realizadas, con su dosificación. En donde la “A” se refiere al tamaño 2-4mm, “B” al 4-8mm, “C” al 4-12mm y “D” al 8-12mm. Las mezclas fueron compactadas mediante el método de compresión axial.

Tabla 35. *Dosificaciones de hormigón poroso empleadas con la metodología PCD. Fuente: Elaboración propia.*

Mezcla	Tamaño (mm)	s/c <sup>*</sup>	a/c <sup>**</sup>	C <sup>+</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	Ag <sup>++</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	W <sup>-</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	S <sup>-</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	VMA <sup>'</sup> (%)	AV <sup>''</sup> (%)
A-1	2-4	0.00	0.30	397.23	1618.33	135.35	0.00	44.30	20.00
A-2	2-4	0.00	0.40	341.48	1618.33	152.77	0.00	44.30	20.00
A-3	2-4	1.00	0.30	255.15	1618.33	94.51	255.15	44.30	20.00
A-4	2-4	1.00	0.40	230.92	1618.33	110.18	230.92	44.30	20.00
B-1	4-8	0.00	0.30	397.23	1618.33	135.35	0.00	44.30	20.00
B-2	4-8	0.00	0.35	367.23	1618.33	144.71	0.00	44.30	20.00
B-3	4-8	0.00	0.40	341.48	1618.33	152.77	0.00	44.30	20.00
B-4	4-8	0.50	0.30	310.71	1618.33	110.48	155.35	44.30	20.00
B-5	4-8	0.50	0.35	292.05	1618.33	119.42	146.03	44.30	20.00
B-6	4-8	0.50	0.40	275.52	1618.33	127.35	137.76	44.30	20.00
B-7	4-8	1.00	0.30	255.15	1618.33	94.51	255.15	44.30	20.00
B-8	4-8	1.00	0.35	242.42	1618.33	102.72	242.42	44.30	20.00
B-9	4-8	1.00	0.40	230.92	1618.33	110.18	230.92	44.30	20.00
B-10	4-8	0.00	0.30	440.81	1540.71	147.65	0.00	47.00	20.00
B-11	4-8	0.00	0.35	407.54	1540.71	158.04	0.00	47.00	20.00
B-12	4-8	0.00	0.40	378.94	1540.71	166.98	0.00	47.00	20.00
B-13	4-8	1.00	0.40	256.27	1540.71	119.71	256.28	47.00	20.00
B-14	4-8	1.00	0.30	283.15	1540.71	102.33	283.15	47.00	20.00
B-15	4-8	0.50	0.35	324.12	1540.71	129.99	162.05	47.00	20.00
B-16	4-8	0.50	0.30	344.81	1540.71	120.06	172.40	47.00	20.00
B-17	4-8	0.50	0.40	305.76	1540.71	138.78	152.88	47.00	20.00
C-1	4-12	0.00	0.30	397.23	1618.33	135.35	0.00	44.30	20.00
C-2	4-12	0.00	0.40	341.48	1618.33	152.77	0.00	44.30	20.00
C-3	4-12	1.00	0.30	255.15	1618.33	94.51	255.15	44.30	20.00
C-4	4-12	1.00	0.40	230.92	1618.33	110.18	230.92	44.30	20.00
C-5	4-12	0.00	0.30	440.81	1540.71	147.65	0.00	47.00	20.00
C-6	4-12	1.00	0.40	256.28	1540.71	119.71	256.28	47.00	20.00
D-1	8-12	0.00	0.30	397.23	1618.33	135.35	0.00	44.30	20.00
D-2	8-12	0.00	0.40	341.48	1618.33	152.77	0.00	44.30	20.00
D-3	8-12	1.00	0.30	255.15	1618.33	94.51	255.15	44.30	20.00
D-4	8-12	1.00	0.40	230.92	1618.33	110.18	230.92	44.30	20.00

\*s/c corresponde a la relación arena-cemento

\*\*a/c corresponde a la relación agua-cemento

+C corresponde a la cantidad de cemento

++Ag corresponde a la cantidad de árido grueso

-W corresponde a la cantidad de agua

-S corresponde a la cantidad de arena

-VMA corresponde a los huecos en el agregado mineral

-AV corresponde al volumen de huecos



### 4.3.2. Resultados generales

La Tabla 36 muestra los resultados obtenidos con las diferentes mezclas realizadas junto con su desviación estándar ( $\sigma$ ), al haberse realizado 8 probetas por mezcla. La Tabla 37 muestra los resultados del ensayo de la macrotextura con el círculo de arena.

Tabla 36. Resultados de los diferentes ensayos realizados en las mezclas de hormigón poroso hechas con la metodología PCD. Fuente: Elaboración propia.

Mezcla	AV <sup>*</sup> (%)	$\sigma$	TI <sup>**</sup> (MPa)	$\sigma$	k <sup>+</sup> (cm/s)	$\sigma$	FC <sup>++</sup> (MPa)	$\sigma$	CRD <sup>-</sup> seco	$\sigma$	CRD <sup>-</sup> húmedo	$\sigma$	Módulo de rigidez (MPa)	$\sigma$
A-1	27.46	0.64	1.47	0.09	0.19	0.02	16.70	1.63	0.75	0.00	0.65	0.01	18256.50	374.06
A-2	28.09	0.45	1.43	0.10	0.40	0.03	16.70	1.13	0.70	0.01	0.61	0.05	17627.50	3027.12
A-3	28.91	1.33	1.20	0.16	0.22	0.06	9.17	1.42	0.69	0.01	0.61	0.06	15318.50	143.54
A-4	26.95	0.71	1.44	0.15	0.23	0.03	14.00	0.90	0.63	0.02	0.55	0.05	17435.50	292.04
B-1	28.84	0.58	1.37	0.12	0.54	0.07	12.45	2.73	0.73	0.02	0.63	0.04	17038.50	647.00
B-2	29.03	0.85	1.43	0.14	0.58	0.09	15.15	2.38	0.67	0.15	0.50	0.04	19199.00	278.60
B-3	26.74	0.79	1.39	0.19	0.43	0.07	15.60	2.56	0.73	0.01	0.66	0.01	19077.00	415.78
B-4	27.40	0.22	1.51	0.15	0.48	0.07	14.55	1.72	0.66	0.01	0.59	0.01	21360.50	726.20
B-5	27.55	0.39	1.74	0.06	0.70	0.17	15.85	1.73	0.72	0.02	0.62	0.05	21087.00	29.70
B-6	28.87	0.43	1.49	0.10	0.71	0.12	14.45	2.83	0.68	0.04	0.59	0.03	19183.00	1204.91
B-7	27.01	0.53	1.69	0.23	0.54	0.06	18.15	1.88	0.68	0.03	0.58	0.07	18762.00	799.03
B-8	27.86	0.57	1.28	0.22	0.57	0.04	13.40	1.27	0.70	0.03	0.64	0.01	17985.00	210.72
B-9	26.14	0.91	1.41	0.10	0.42	0.03	14.90	0.70	0.85	0.01	0.80	0.05	18662.00	1542.91
B-10	28.82	0.66	1.57	0.15	0.37	0.11	16.10	3.03	0.64	0.04	0.54	0.03	17846.00	899.44
B-11	29.49	0.96	1.54	0.11	0.50	0.12	16.50	3.93	0.68	0.04	0.55	0.12	19401.00	1315.22
B-12	30.03	0.89	1.63	0.26	0.48	0.14	15.75	1.96	0.57	0.02	0.53	0.02	21921.00	4531.14
B-13	27.05	0.59	1.44	0.09	0.56	0.03	14.00	2.91	0.70	0.01	0.62	0.03	19260.50	2403.46
B-14	28.62	1.34	1.13	0.10	0.51	0.25	8.01	0.52	0.61	0.06	0.57	0.04	16683.00	1097.43
B-15	26.35	0.31	1.65	0.11	0.20	0.11	18.27	4.91	0.75	0.04	0.65	0.06	19195.00	2726.60
B-16	27.02	0.55	1.89	0.06	0.23	0.05	18.80	3.66	0.73	0.01	0.58	0.02	17899.00	1523.11
B-17	29.85	0.57	1.83	0.10	0.42	0.03	15.10	0.90	0.65	0.05	0.59	0.07	18431.50	142.13
C-1	27.57	0.59	1.37	0.05	0.60	0.06	12.60	3.33	0.80	0.00	0.61	0.01	17198.00	725.49
C-2	28.65	0.63	1.19	0.16	0.88	0.16	8.80	0.65	0.71	0.01	0.57	0.04	14146.00	1506.14
C-3	26.99	1.12	1.30	0.11	0.67	0.19	10.90	1.20	0.68	0.05	0.58	0.02	15195.50	557.91
C-4	27.92	1.23	1.44	0.26	0.87	0.13	12.80	2.42	0.65	0.00	0.55	0.04	14712.50	1924.04
C-5	27.22	0.61	1.69	0.20	0.41	0.15	14.60	2.97	0.69	0.01	0.61	0.03	16564.50	299.11
C-6	26.62	0.54	1.49	0.11	0.52	0.18	14.70	3.07	0.86	0.01	0.80	0.07	18855.00	2696.91
D-1	29.76	0.42	1.38	0.28	1.00	0.27	11.85	1.76	0.60	0.06	0.55	0.06	16547.50	313.25
D-2	29.51	0.76	1.10	0.05	1.40	0.05	7.88	0.73	0.64	0.09	0.52	0.03	11154.50	661.14
D-3	29.80	1.73	1.10	0.12	0.67	0.01	8.35	0.86	0.65	0.03	0.55	0.04	20838.00	7530.69
D-4	30.88	1.44	0.92	0.08	1.90	0.02	5.14	0.59	0.65	0.05	0.59	0.01	13478.00	1227.54

<sup>\*</sup>AV corresponde al volumen de huecos  
<sup>\*\*</sup>TI corresponde a la tracción indirecta  
<sup>+</sup>k corresponde a la permeabilidad

<sup>++</sup>FC corresponde a la fuerza a compresión  
<sup>-</sup>CRD corresponde al coeficiente de resistencia al deslizamiento

Tabla 37. Resultados de la macrotextura mediante el ensayo del círculo de realizados en las mezclas de hormigón poroso hechas con la metodología PCD. Fuente: Elaboración propia.

Mezcla	Macrotextura (mm)	Mezcla	Macrotextura (mm)	Mezcla	Macrotextura (mm)	Mezcla	Macrotextura (mm)
A-1	0.74	B-5	1.26	B-13	1.11	C-4	1.43
A-2	0.89	B-6	1.33	B-14	1.05	C-5	1.72
A-3	0.70	B-7	1.07	B-15	1.27	C-6	3.63
A-4	0.70	B-8	1.22	B-16	1.13	D-1	2.28
B-1	1.24	B-9	1.16	B-17	1.26	D-2	2.86
B-2	1.42	B-10	1.43	C-1	1.66	D-3	1.76
B-3	1.53	B-11	1.66	C-2	2.10	D-4	3.02
B-4	1.13	B-12	1.96	C-3	1.19		

### 4.3.3. Análisis de resultados de Porosidad y Permeabilidad

La mezcla D-4 tuvo los valores de permeabilidad más altos, como se aprecia en la Tabla 36, infiltrando 1.9cm/s, producto del tamaño de árido grueso empleado, de 8-12mm, el cual dota de una mayor contenido de huecos a la mezcla (25.10% en este caso). Sin embargo, al comparar la mezcla D-4 con la mezcla D-2, la primera obtuvo una mayor permeabilidad, a pesar de tener una relación arena-cemento (s/c) de 1, mientras que la segunda no tenía arena en la mezcla. La comparación entre los resultados de contenido de huecos y permeabilidad son los esperados, ya que a mayor contenido de huecos, mayor permeabilidad, como se observa en la Figura 49.

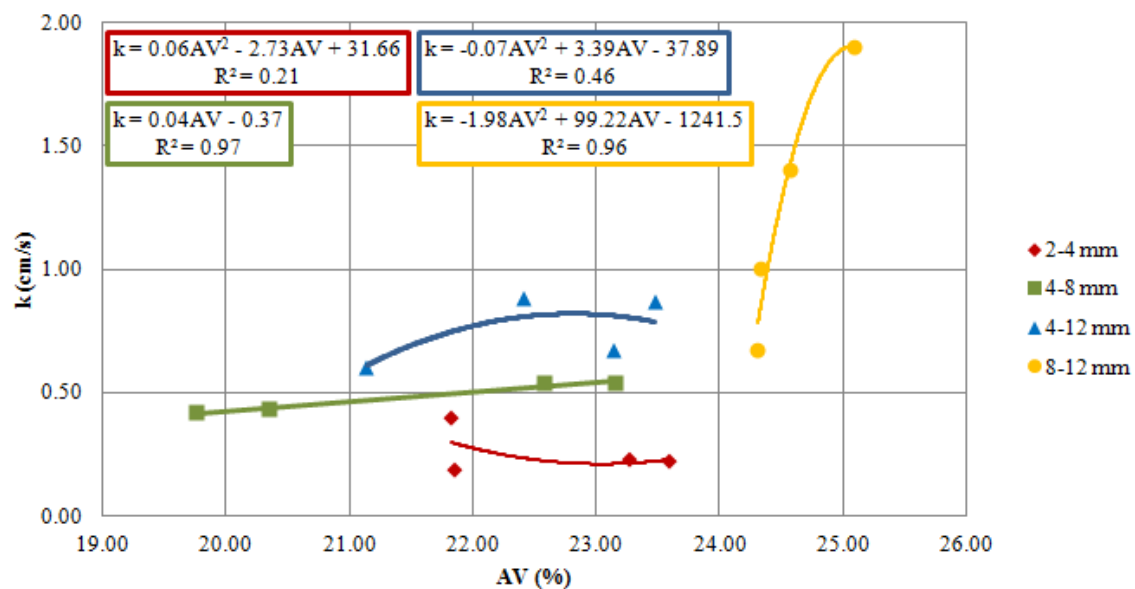


Figura 49. Diferentes dosificaciones con la metodología PCD. Gráfico de correlación entre la permeabilidad (k) y el contenido de huecos (AV) para cada tamaño de agregado. (Fuente: Elaboración propia).

Es de notarse que las mezclas con una granulometría de 2-4mm disminuyen su permeabilidad mientras que el contenido de huecos incrementa. Esto puede deberse a los huecos interconectados en la mezcla, ya que a menor granulometría, las partículas de agregado se acomodan mejor en el molde de la mezcla, dando una menor cantidad de huecos interconectados (llamado también porosidad efectiva). Este hecho ocurre independientemente de si la mezcla tiene arena o no.

La literatura analizada demostró valores de permeabilidad entre 0.03-4.77cm/s, que varían dependiendo de la granulometría empleada principalmente. Los resultados en la presente investigación se encuentran entre 0.19-1.9cm/s, posicionándose dentro de los parámetros de la literatura, no siendo tan bajos, considerados muy aceptables. Diferentes tamaños de agregado, así como diversas dosificaciones de hormigón poroso, dan lugar a estructuras diferentes de huecos para el mismo volumen de contenido de huecos, variando también la permeabilidad. Por tanto, con estos resultados, es posible estimar los valores de permeabilidad que puede a llegar a obtener una mezcla, de acuerdo a la granulometría empleada. Esto puede apreciarse en la Figura 50.

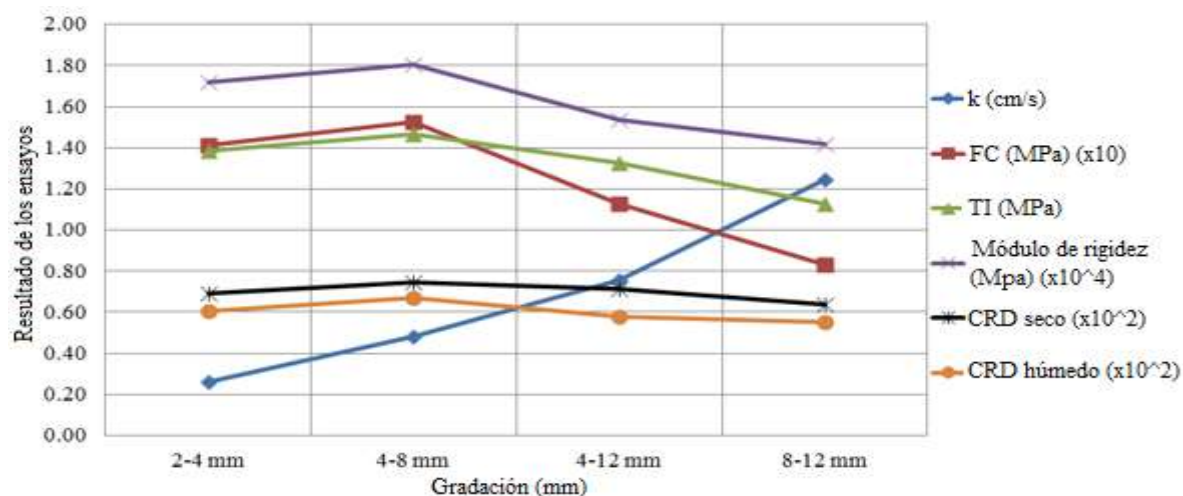


Figura 50. Diferentes dosificaciones con la metodología PCD. Gráfico de correlación entre el tamaño de agregado y los resultados para cada ensayo realizado (Fuente: Elaboración propia).

#### 4.3.4. Análisis de resultados Mecánicos

Los diferentes resultados mecánicos para cada mezcla se pueden apreciar en la Tabla 23. La mezcla D-4 (mayor permeabilidad) adquirió los resultados más bajos con 5.14 y 0.92Mpa para la fuerza a compresión y tracción indirecta respectivamente. Esto se debió

a su gran cantidad de contenido de huecos causada por el tamaño de agregado. Los puentes de conexión formados por el mortero no fueron lo suficientemente fuertes para mantener la adhesión necesaria entre las partículas de árido grueso, llevando a la mezcla a fallar más rápido.

Por otro lado, las mezclas con una granulometría de 2-4mm no fueron tan fuertes como se esperaba, y la granulometría 4-8mm tuvo los mejores resultados. Esto puede deberse a que la distribución del árido grueso fue mejor, permitiendo que el mortero formara una mejor adhesión entre las partículas de agregado. Además de que el área de contacto del mortero fue mayor en la granulometría 2-4mm, encontrando que los puntos de falla se encontraban en el mortero y no en el árido grueso.

La mezcla B-16 tuvo los resultados mecánicos más altos en la fuerza a compresión y tracción indirecta, con 18.80 y 1.89MPa respectivamente. En este caso, además de emplear una granulometría 4-8mm, una relación arena-cemento (s/c) de 0.5 ayudó a incrementar la resistencia de la mezcla. Adicionalmente, una relación agua-cemento (a/c) de 0.3 colaboró a que la mezcla fuera más adhesiva y contara con una mejor trabajabilidad. Finalmente, utilizando un porcentaje de huecos en el agregado mineral de 47%, se incrementa la cantidad de mortero en la mezcla, disminuyendo, al mismo tiempo, la cantidad de árido grueso en un 5%, en comparación con un porcentaje de huecos en el agregado mineral de 44.30%, por lo que incrementa la capacidad mecánica.

La Figura 51 demuestra la correlación entre la fuerza a compresión y tracción indirecta (TI), obteniendo una  $R^2$  de 0.85. Como se aprecia en la Figura 50, el comportamiento mecánico tiene una tendencia decreciente mientras el tamaño de árido grueso incrementa. Sin embargo, un tamaño 4-8mm otorga la mejor adhesión entre partículas de árido grueso, considerando una permeabilidad aceptable.

Comparando con los valores encontrados en la literatura, estos tienden a variar mucho dependiendo de la metodología empleada, aditivos utilizados, entre otras características. Se llegó a observar que los valores de tracción indirecta se encuentran en un rango aproximado de 0.03-4.77MPa y los de compresión de 1-65MPa. Tomando estos márgenes de referencia, se puede apreciar que los valores obtenidos en todas las mezclas en

la presente sección se encuentran dentro de esos rangos, posicionándose dentro de los valores normales que se llegan a obtener.

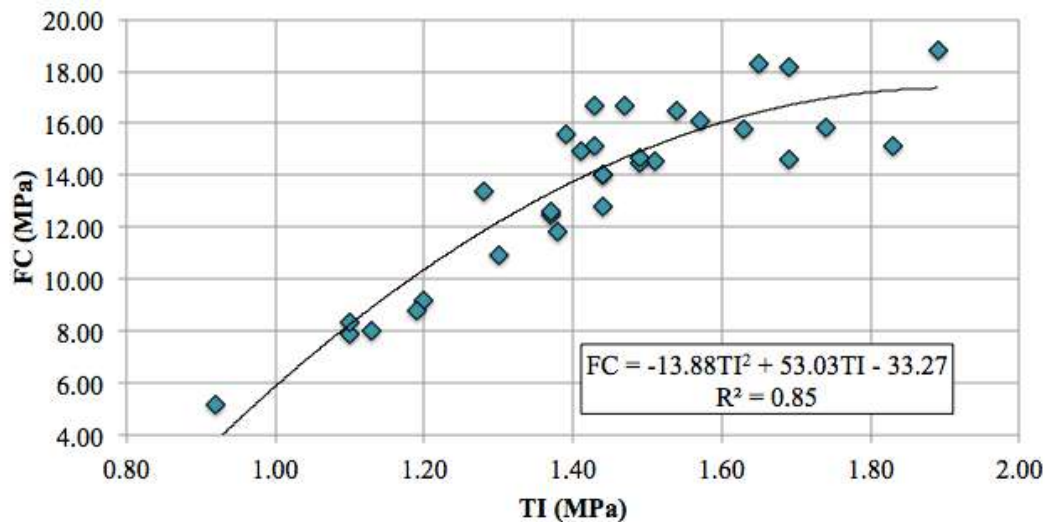


Figura 51. Diferentes dosificaciones con la metodología PCD. Gráfico de correlación entre la fuerza a compresión (FC) y la tracción indirecta (TI) (Fuente: Elaboración propia).

Como se aprecia en la Tabla 36, los valores del módulo de rigidez en todas las mezclas analizadas es bastante alto, sobrepasando, en su mayoría, los 15,000MPa. Sin embargo, grietas pueden surgir en las mezclas de hormigón poroso, especialmente en áreas urbanas, siguiendo el patrón del contenido de huecos y del mortero, llegando a fallar el pavimento.

La Figura 52 muestra la correlación entre el módulo de rigidez y el contenido de huecos, donde, a pesar de tener una  $R^2$  muy baja, de 0.05, se aprecia que a mayor contenido de huecos, la deformación elástica incrementa. El tamaño de árido grueso determina este comportamiento, donde, como se aprecia en la Figura 50, un tamaño de 4-8mm representa el comportamiento más rígido del total analizado.

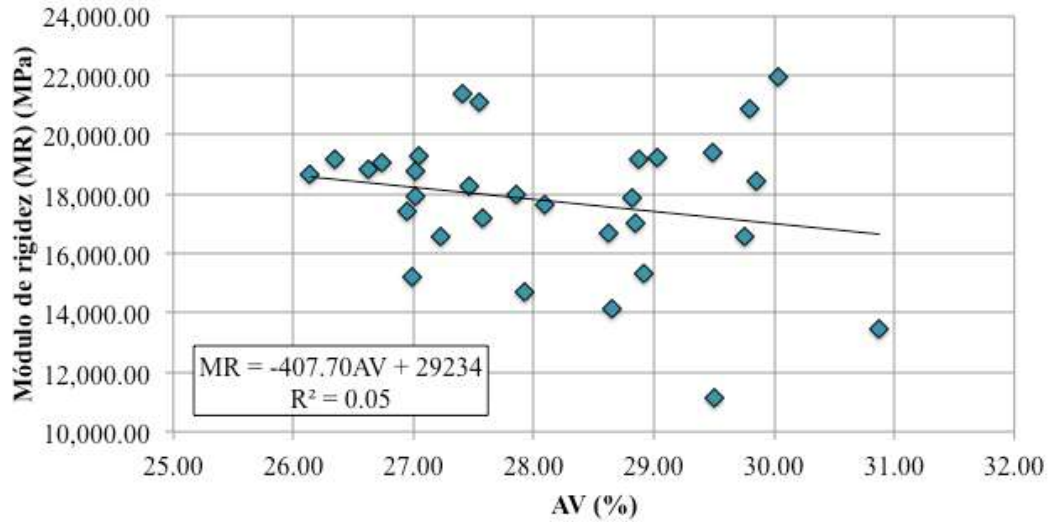


Figura 52. Diferentes dosificaciones con la metodología PCD. Gráfico de correlación entre el módulo de rigidez (MR) y el contenido de huecos (AV) (Fuente: Elaboración propia).

#### 4.3.5. Análisis de la Fuerza a Compresión Teórica (FCT)

La Figura 53 muestra los cálculos de la fuerza a compresión teórica (FCT), donde, utilizando las ecuaciones propuestas por los autores de la Tabla 19, se calculó una fuerza a compresión teórica promedio. Realizando un gráfico entre este valor y la fuerza a compresión obtenida en el laboratorio con las probetas hechas con la metodología PCD, una  $R^2$  de 0.84 fue obtenida, concluyendo que los resultados de los especímenes de dimensiones 65x65x65mm son lo suficientemente buenos para ser comparados con otros resultados fuera de los límites de esta investigación.

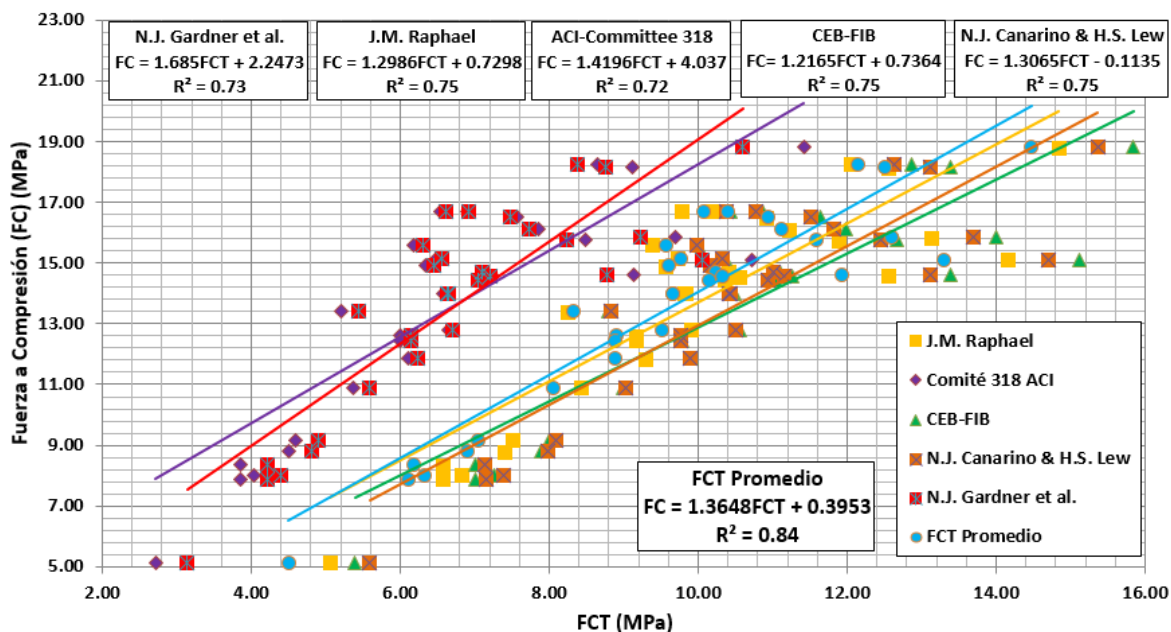


Figura 53. Diferentes dosificaciones con la metodología PCD. Gráfico de correlación entre la fuerza a compresión (FC) y la fuerza a compresión teórica (FCT) derivada de las ecuaciones propuestas por algunos autores (Fuente: Elaboración propia).

#### 4.3.6. Análisis de resultados Superficiales

En la Tabla 36 se pueden observar los resultados obtenidos del ensayo del péndulo. Como puede apreciarse, todas las mezclas tuvieron valores de resistencia al deslizamiento adecuados, donde las mezclas B-9 y C-6 tuvieron los valores del coeficiente de resistencia al deslizamiento más altos. Una relación agua-cemento (a/c) de 0.40 y arena-cemento (s/c) de 1 resultó ser la combinación que otorga mayor fricción a la superficie de la mezcla. Esto se debe a que la arena da una textura más áspera.

Otro factor que influye la resistencia a la fricción del pavimento es el tamaño de árido grueso utilizado. Las mezclas con un tamaño de 2-4mm dieron mejores resultados cuando no se utilizaba arena en su dosificación, principalmente porque el mortero sin arena, al tener una densidad menor, tiende a quedarse, en parte, en la superficie, incrementando el área de contacto entre el péndulo (simulando un neumático) y la superficie de la mezcla (simulando el pavimento), facilitando el frenado.

Se observa también que la resistencia al deslizamiento disminuye alrededor de un 14% cuando el pavimento está húmedo, donde la mayor pérdida fue para la mezcla B-2, con un 25.65% menos resistencia al deslizamiento que en seco. La mezcla con la menor

pérdida de fricción fue la B-9. La correlación entre los resultados del coeficiente de resistencia al deslizamiento bajo condiciones secas y húmedas es aceptable, como se aprecia en la Figura 54, obteniendo una  $R^2$  de 0.78.

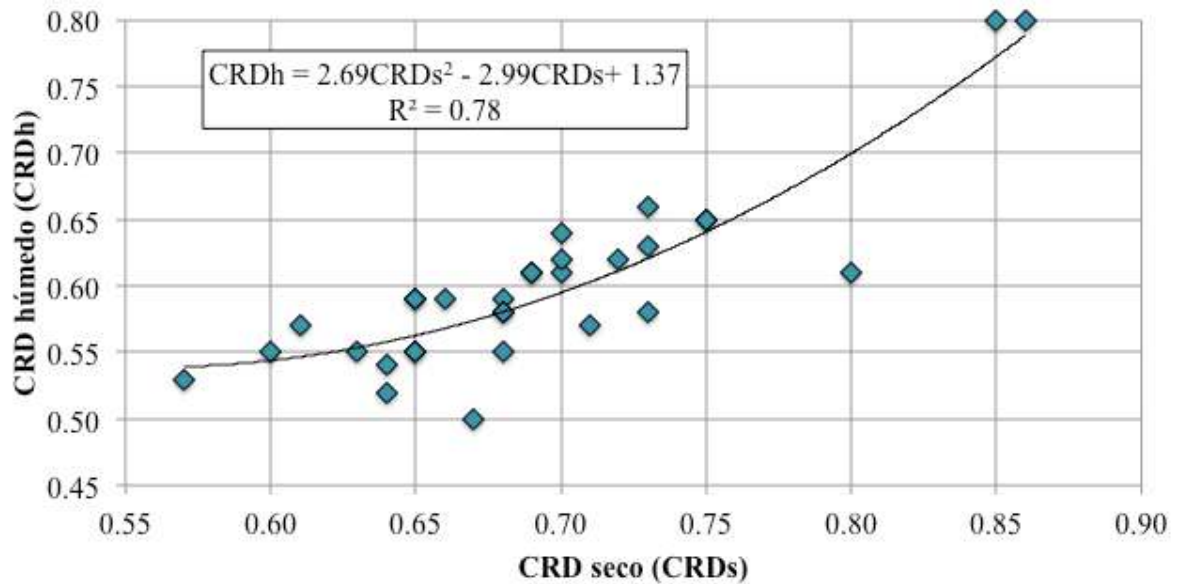


Figura 54. Diferentes dosificaciones con la metodología PCD. Gráfico de correlación entre el coeficiente de resistencia al deslizamiento bajo condiciones secas ( $CRD_{seco}$ ) y el coeficiente de resistencia al deslizamiento bajo condiciones húmedas ( $CRD_{húmedo}$ ) (Fuente: Elaboración propia).

En términos de Macrotextura, el ensayo del círculo de arena demostró que ésta disminuye cuando la granulometría se hace más pequeña. El tamaño 2-4mm tuvo una macrotextura de 0.76mm en promedio, que es recomendable para vías de hasta 120km/h como máximo. Los tamaños 4-8mm, 4-12mm y 8-12mm tuvieron macrotexturas promedio de 1.25mm, 1.59mm y 2.48mm, respectivamente, y todas cumplen para ser empleadas en curvas peligrosas y eventos de lluvia fuertes.

#### 4.3.7. Análisis de la Varianza (ANOVA)

De acuerdo con la Tabla 38, la granulometría y la cantidad de cemento son los dos componentes que más influyen en las propiedades de la mezcla. En términos de permeabilidad, la granulometría condiciona el volumen de huecos de la mezcla, y, por consiguiente, la capacidad de infiltración resultante. Como la metodología de dosificación relaciona todos los componentes, la cantidad de mortero no afecta significativamente a la cantidad de agregado.



Tabla 38. Resultados del Análisis de la Varianza (ANOVA) para el estudio de dosificaciones con la metodología PCD. Fuente: Elaboración propia.

Componente	Permeabilidad				Fuerza a compresión			
	GL*	SCD*	Varianza	Importancia (%)	GL*	SCD*	Varianza	Importancia (%)
Granulometría	2	304.13	9.71	85.9	1	204.42	4.41	57.56
s/c	2	8.64	1.37	2.44	1	20.58	0.19	5.79
a/c	2	8.64	1.06	2.44	1	20.58	0.19	5.79
Compactación	1	3.06	1.12	0.86	1	10.51	2.79	2.96
Cemento	1	29.6	1.73	8.36	8	99.04	3.68	27.89
Componente	Tracción indirecta				Módulo de Rigidez			
	GL*	SCD*	Varianza	Importancia (%)	GL*	SCD*	Varianza	Importancia (%)
Granulometría	1	0.51	3.37	33.03	1	72.20x10 <sup>6</sup>	4.08	49.91
s/c	1	0.18	0.9	11.67	1	17.32x10 <sup>6</sup>	1.77	11.97
a/c	1	0.18	0.23	11.67	2	17.32x10 <sup>6</sup>	0.44	11.97
Compactación	1	0.06	22.74	3.66	5	7.28x10 <sup>6</sup>	3.26	5.03
Cemento	6	0.62	0.55	39.97	4	30.55x10 <sup>6</sup>	1.09	21.12
Componente	Resistencia al deslizamiento (seco)				Resistencia al deslizamiento (húmedo)			
	GL*	SCD*	Varianza	Importancia (%)	GL*	SCD*	Varianza	Importancia (%)
Granulometría	1	635.75	2.38	32.58	1	654.94	2.78	25.04
s/c	2	264	0.68	13.53	2	522	0.92	19.96
a/c	1	264	1.02	13.53	1	522	1.35	19.96
Compactación	1	182	2.63	9.33	1	194.83	1.08	7.45
Cemento	1	605.44	1.45	31.03	2	721.44	1.7	27.59

\*GL: Grados de Libertad, SCD: Suma de Cuadrados de las Desviaciones

En términos de capacidad mecánica, la importancia de la cantidad de cemento aumenta significativamente, siendo un poco mayor en la tracción indirecta. Esto es debido a que el cemento es el componente que da la adhesión al mortero para mantener una buena unión entre las partículas de agregado. Adicionalmente, a menor tamaño de la granulometría, las partículas logran acomodarse mejor en el molde, disminuyendo el volumen de huecos e incrementando la capacidad mecánica al construirse puentes de unión más resistentes. Este comportamiento puede ser explicado también por los resultados del módulo de rigidez.

En la resistencia al deslizamiento, la granulometría y la cantidad de cemento son casi igual de importantes, ya que, tanto el volumen de huecos en la mezcla, como la cobertura del mortero, afectan esta capacidad. El volumen de huecos permite que la infiltración del agua sea más rápida, disminuyendo los posibles encharcamientos en la superficie, y el mortero incrementa la capacidad de fricción de la mezcla.

Las relaciones arena-cemento (s/c) y agua-cemento (a/c) obtuvieron la misma importancia en cada prueba, ya que tanto el agua como la arena influyen el comportamiento que tendrá el mortero, ya sea aumentando o disminuyendo la adhesividad que el cemento puede otorgar. Adicionalmente, esta importancia es menor en la prueba de permeabilidad porque la arena tiende a colmatar la mezcla. Pero la importancia incrementa en la tracción indirecta, fuerza a compresión y resistencia al deslizamiento porque la arena otorga más fuerza y una mayor rugosidad a la mezcla. Finalmente, el porcentaje de huecos en el agregado utilizado condiciona la cantidad de los componentes de la mezcla, ya que este parámetro determina la cantidad de mortero que tendrá la mezcla.

#### **4.3.8. Conclusiones Parciales**

En la presente sección se evaluó el comportamiento de las mezclas de hormigón poroso empleando diferentes dosificaciones con la metodología PCD buscando la manera de definir el comportamiento óptimo. Las siguientes conclusiones parciales se establecen:

- De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede llegar a establecer a la mezcla B-16 (s/c de 0.5, a/c de 0.3, VMA de 47% y granulometría de 4-8mm) como la dosificación óptima debido a su alta resistencia mecánica y sus buenos valores de permeabilidad y resistencia al deslizamiento comparados con el resto de mezclas estudiadas.
- La granulometría y la cantidad de cemento son considerados los principales factores en influenciar los resultados en este tipo de mezclas de hormigón poroso, de acuerdo con el ANOVA realizado. Esto debido a que la granulometría influye la estructura interna de la mezcla, determinando el porcentaje de huecos, así como la resistencia mecánica. El cemento precisa otros factores, como la cantidad de agua y arena a emplear, para asegurar una buena adhesividad del mortero y poder conectar las partículas de agregado grueso adecuadamente, fundamental para la resistencia.
- En términos de resistencia al deslizamiento, ésta incrementa a menor contenido de huecos, incrementando el área de contacto entre los neumáticos y la superficie del pavimento. Sin embargo, una superficie 100% impermeable no provee la fricción

suficiente durante eventos de lluvia, al presentarse encharcamientos que disminuyen este contacto neumático-superficie.

- La adición de arena en la mezcla incrementa la resistencia al deslizamiento entre un 10-13% y 7-15% bajo condiciones secas y húmedas respectivamente. Aquí, una relación arena-cemento ( $s/c$ ) de 0.5 representó los mejores resultados. Se establece que contenidos de arena mayores a esta relación tienden a colmatar el pavimento más rápidamente, dando lugar a encharcamientos durante eventos de lluvia, disminuyendo la fricción en húmedo.
- Una relación agua-cemento ( $a/c$ ) de 0.35 fue el mejor parámetro dado que, a pesar de otorgar, en promedio, resultados mecánicos bajos, la relación entre estos resultados y la permeabilidad fue la mejor. Con todo, algunas mezclas con esta relación tuvieron resistencia mecánica muy elevada gracias a otros factores como la granulometría y la relación arena-cemento ( $s/c$ ).
- Un porcentaje de huecos en el agregado mineral alto permite un mayor porcentaje de mortero en la mezcla, mejorando la adhesión y fricción entre las partículas de agregado, incrementando la resistencia mecánica.

#### 4.4. Estudio de aditivos y adiciones

El presente apartado muestra el estudio de aditivos que se realizó a las mezclas de hormigón poroso, consistiendo en dos partes. La primera, donde se evaluaron algunos aditivos por separado, de forma aislada, para obtener sus cantidades óptimas de acuerdo a la mejor relación mecánica-hidráulica. Y la segunda, donde se analizaron diversas combinaciones de aditivos empleando las cantidades óptimas obtenidas en la primera parte. Es importante mencionar que, por cuestiones de tiempo, las mezclas se sometieron a un curado de 7 días. Este lapso de tiempo se considera suficiente para poder evaluar, comparar y establecer conclusiones.

##### 4.4.1. Dosificaciones estudiadas

Para la primera parte de la investigación, se utilizó la mezcla cuya dosificación se aprecia en la Tabla 39A. Posteriormente, para la segunda parte de la investigación, la dosificación mostrada en la Tabla 39B fue usada. Esta diferencia de dosificaciones fue debido a la disponibilidad de material al momento de realizar cada análisis. La metodología empleada fue la PCD, compactando las mezclas por el método de compresión axial.

Tabla 39. *Dosificaciones utilizadas para A) Estudio de aditivos por separado, y B) Estudio de combinaciones de aditivos (Elaboración propia).*

A) Dosificación empleada en el estudio de aditivos por separado								
Dosificación	Tamaño (mm)	s/c <sup>*</sup>	a/c <sup>**</sup>	VMA <sup>+</sup> (%)	C <sup>++</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	Ag <sup>-</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	S <sup>-</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	W' (kg/m <sup>3</sup> )
	8-12	0.50	0.35	44.30	292.05	1618.33	146.03	119.42
B) Dosificación empleada para el estudio de combinaciones de aditivos								
Dosificación	Tamaño (mm)	s/c	a/c	VMA (%)	C (kg/m <sup>3</sup> )	Ag (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	W (kg/m <sup>3</sup> )
	4-8	0.50	0.30	47.00	344.81	1540.71	172.40	120.06

<sup>\*</sup>s/c corresponde a la relación arena-cemento

<sup>\*\*</sup>a/c corresponde a la relación agua-cemento

<sup>+</sup>VMA corresponde a los huecos en el agregado mineral

<sup>++</sup>C corresponde a la cantidad de cemento

<sup>-</sup>Ag corresponde a la cantidad de árido grueso

<sup>-</sup>S corresponde a la cantidad de arena

<sup>'</sup>W corresponde a la cantidad de agua

En la Tabla 40 se aprecian los aditivos y adiciones utilizados, así como su dosificación para el estudio de aditivos por separado, siendo las fibras de acero al carbono y las fibras de polipropileno las consideradas adiciones.

Tabla 40. *Aditivos y adiciones (fibras) con la dosificación de cada uno utilizada para el análisis por separado (Elaboración propia).*

Aditivo	Clave	Mezcla	Dosificación*	Nota
Fibras de acero al carbono	CSF	CSF-1	3.42	
		CSF-2	8.33	
		CSF-3	27.39	
Fibras de polipropileno	PF	PF-1	0.68	
		PF-2	1.15	
		PF-3	2.46	
Inclusor de aire	AE	AE-1	0.15	
		AE-2	1.50	
		AE-3	3.00	
Microsilise	MS	MS-1	5.00	Sin remover cemento
		MS-2	5.00	Removiendo cemento
		MS-3	10.00	Removiendo cemento
		MS-4	15.00	Removiendo cemento
Nanosilise	NS	NS-1	0.50	
		NS-2	5.00	
		NS-3	10.00	
		NS-4	15.00	
Superplastificante	SP	SP-1	1.50	Removiendo 0% de agua
		SP-2	1.50	Removiendo 5% de agua
		SP-3	1.50	Removiendo 10% de agua
		SP-4	1.50	Removiendo 15% de agua
		SP-5	0.50	Removiendo 5% de agua
		SP-6	2.50	Removiendo 5% de agua
Modulador de viscosidad	VM	VM-1	0.50	
		VM-2	0.65	
		VM-3	0.80	
Retardante	SR	SR-1	0.20	
		SR-2	1.40	
		SR-3	2.50	

\*% del peso del cemento

Una vez que se concluye la primera parte del análisis, se procede con el estudio de combinaciones de aditivos donde, además de la densidad, huecos, permeabilidad y tracción indirecta, se evaluó la resistencia al deslizamiento mediante el ensayo del péndulo de fricción.

Se realizaron seis combinaciones diferentes basadas en lo observado en la literatura, numeradas de la A a la F. Estas combinaciones, así como las proporciones utilizadas para cada aditivo, pueden verse en la Tabla 41. Las fibras de acero al carbono no se emplearon en ninguna combinación, como consecuencia de los resultados del estudio de aditivos y adiciones por separado que se presentan en el siguiente apartado.

Tabla 41. *Combinaciones de aditivos empleadas con la cantidad utilizada por aditivo (Fuente: Elaboración propia).*

Aditivo	Proporciones empleadas (% peso del cemento)					
	A	B	C	D	E	F
Fibras de Acero al Carbono	-	-	-	-	-	-
Fibras de Polipropileno	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
Superplastificante*	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	-
Retardante	0.20	0.20	-	-	-	0.20
Modulador de Viscosidad	0.50	0.50	-	-	0.50	0.50
Inclisor de Aire	0.15	-	0.15	-	0.15	0.15
Microsilíce**	15.00	-	-	15.00	-	-
Suspensión de Nanosilíce	0.50	-	-	0.50	-	-

\*Removiendo 5% de la cantidad de agua

\*\*Removiendo 15% de la cantidad de cemento

#### 4.4.2. Estudio de aditivos y adiciones por separado

##### 4.4.2.1. Resultados generales

Los resultados obtenidos en esta parte del estudio pueden observarse en la Tabla 42. Aquí se muestran los resultados generales (densidad, huecos, permeabilidad y tracción indirecta) obtenidos para cada cantidad de aditivo analizada. Adicionalmente, se muestra la desviación estándar de cada ensayo, ya que se realizaron 3 probetas por mezcla.

Tabla 42. Resultados de los diferentes ensayos realizados en el estudio de aditivos por separado. (Fuente: Elaboración propia).

Aditivo	Mezcla	Resultados							
		$\rho^{**}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma$	AV <sup>+</sup> (%)	$\sigma$	k <sup>++</sup> (cm/s)	$\sigma$	TI (MPa)	$\sigma$
Fibras de acero al carbono	Control*	2030.35	13.20	28.53	0.69	1.19	0.14	1.10	0.04
	CSF-1	2007.07	22.53	27.87	0.81	1.10	0.10	1.10	0.22
	CSF-2	1999.82	5.44	27.68	0.20	1.13	0.10	0.94	0.12
	CSF-3	1965.09	1.79	27.23	0.07	1.23	0.17	0.59	0.04
Fibras de polipropileno	Control*	2030.35	13.20	28.53	0.69	1.19	0.14	1.10	0.04
	PF-1	2008.82	28.43	29.14	1.00	1.01	0.14	1.19	0.21
	PF-2	2008.72	19.70	29.28	0.90	1.14	0.14	1.25	0.04
	PF-3	1972.86	15.92	30.29	0.56	1.10	0.26	0.80	0.08
Incluser de aire	Control*	2030.35	13.20	28.53	0.69	1.19	0.14	1.10	0.04
	AE-1	2040.64	22.01	28.06	0.78	0.96	0.19	1.49	0.20
	AE-2	2044.81	22.65	27.83	0.80	0.83	0.12	1.27	0.12
	AE-3	1999.50	23.99	29.33	0.85	1.40	0.43	1.21	0.09
Microsilise	Control*	2030.35	13.20	28.53	0.69	1.19	0.14	1.10	0.04
	MS-1	2026.30	21.57	28.19	0.76	0.98	0.05	1.05	0.18
	MS-2	1995.07	14.64	29.25	0.52	1.34	0.24	1.08	0.13
	MS-3	2038.13	26.24	27.41	0.93	0.59	0.25	0.96	0.05
	MS-4	2037.93	22.11	27.04	0.79	0.49	0.10	1.20	0.12
Nanosilise	Control*	2030.35	13.20	28.53	0.69	1.19	0.14	1.10	0.04
	NS-1	2003.60	13.61	29.45	0.75	1.25	0.03	1.25	0.06
	NS-2	2026.46	17.03	28.40	0.53	1.02	0.23	1.18	0.11
	NS-3	2002.29	7.57	28.99	0.36	1.10	0.14	1.12	0.11
	NS-4	2008.81	10.54	28.50	0.35	0.96	0.13	1.22	0.26
Superplastificante	Control*	2030.35	13.20	28.53	0.69	1.19	0.14	1.10	0.04
	SP-1	1975.32	12.73	30.39	0.37	2.11	0.24	1.00	0.17
	SP-2	2003.66	14.44	29.51	0.50	2.13	0.16	1.28	0.26
	SP-3	1979.50	37.32	30.47	1.08	2.18	0.37	1.22	0.12
	SP-4	1996.59	17.97	29.99	0.57	1.99	0.24	1.04	0.21
	SP-5	2005.89	16.41	29.49	0.54	1.15	0.20	1.25	0.15
	SP-6	1933.11	16.59	31.94	0.58	2.48	0.28	0.97	0.30
Modulador de viscosidad	Control*	2030.35	13.20	28.53	0.69	1.19	0.14	1.10	0.04
	VM-1	2027.65	27.04	28.52	0.95	1.39	0.38	1.37	0.14
	VM-2	2010.84	17.09	29.11	0.60	1.57	0.25	0.89	0.16
	VM-3	2024.11	10.28	28.63	0.36	1.28	0.12	1.09	0.34
Retardante	Control*	2030.35	13.20	28.53	0.69	1.19	0.14	1.10	0.04
	SR-1	2019.05	23.87	28.85	0.84	1.58	0.36	1.26	0.13
	SR-2	1915.43	48.11	32.43	1.70	2.60	0.24	0.59	0.09
	SR-3	1991.54	26.95	29.68	0.95	1.49	0.13	0.45	0.06

\*Se refiere a la misma mezcla

++ k corresponde a la permeabilidad

\*\*  $\rho$  corresponde a la densidad

TI corresponde a la tracción indirecta

+AV corresponde al volumen de huecos

#### 4.4.2.2. Análisis de resultados de Porosidad y Permeabilidad

Los valores de permeabilidad fueron altos en todas las mezclas, mejorando la capacidad de infiltración con casi todos los aditivos utilizados, comparándolos con la mezcla de Control. Solo el inclusor de aire y la microsíllice demostraron valores más bajos, en casi todas sus dosificaciones, que la mezcla de Control, como se aprecia en la Figura 55. Este comportamiento se puede deber a que el inclusor de aire otorga una mayor densidad ( $\rho$ ) a la mezcla, como se observa en la Figura 56, colmatándola. El mismo comportamiento es visto con la microsíllice, donde el material, al remplazar cierta cantidad de cemento, incrementa su  $\rho$ .

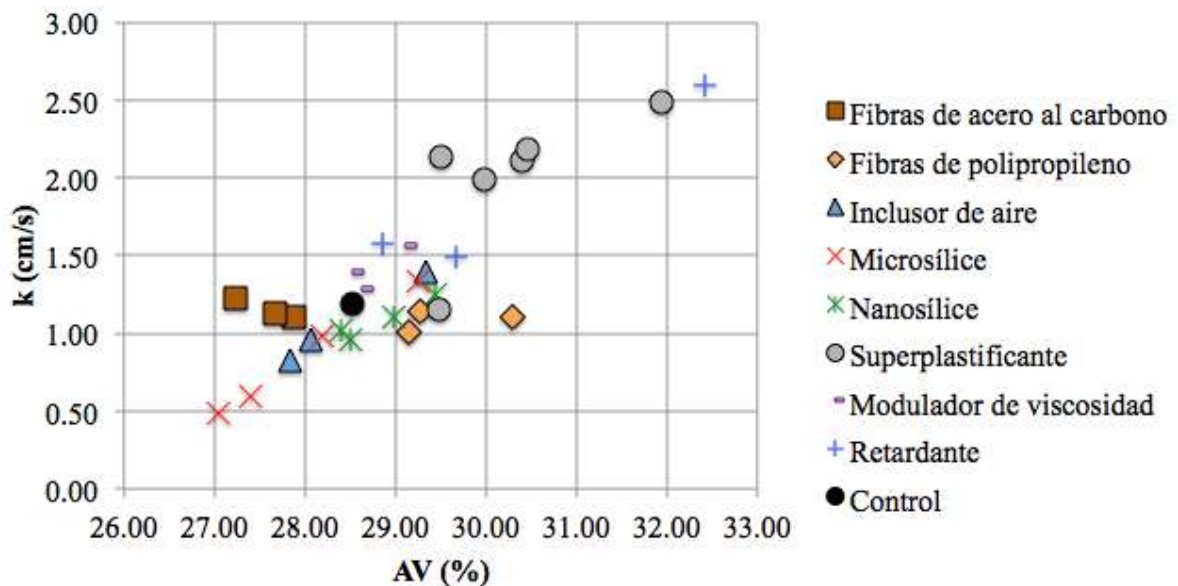


Figura 55. Estudio de aditivos por separado. Gráfico de correlación entre la permeabilidad ( $k$ ) y el volumen de huecos ( $AV$ ) para cada aditivo analizado (Fuente: Elaboración propia).

Adicionalmente, el superplastificante y el retardante (solamente la mezcla SR-2) representaron los mayores valores de permeabilidad del total de mezclas debido al alto contenido de huecos ( $AV$ ) que presentaron. Esto se puede explicar porque dichos aditivos hacen el mortero con una consistencia más trabajable y tiende a cubrir las partículas de agregado de una forma mejor, incrementando el volumen del agregado, afectando la compactación, incrementando el contenido de huecos y disminuyendo su densidad ( $\rho$ ).



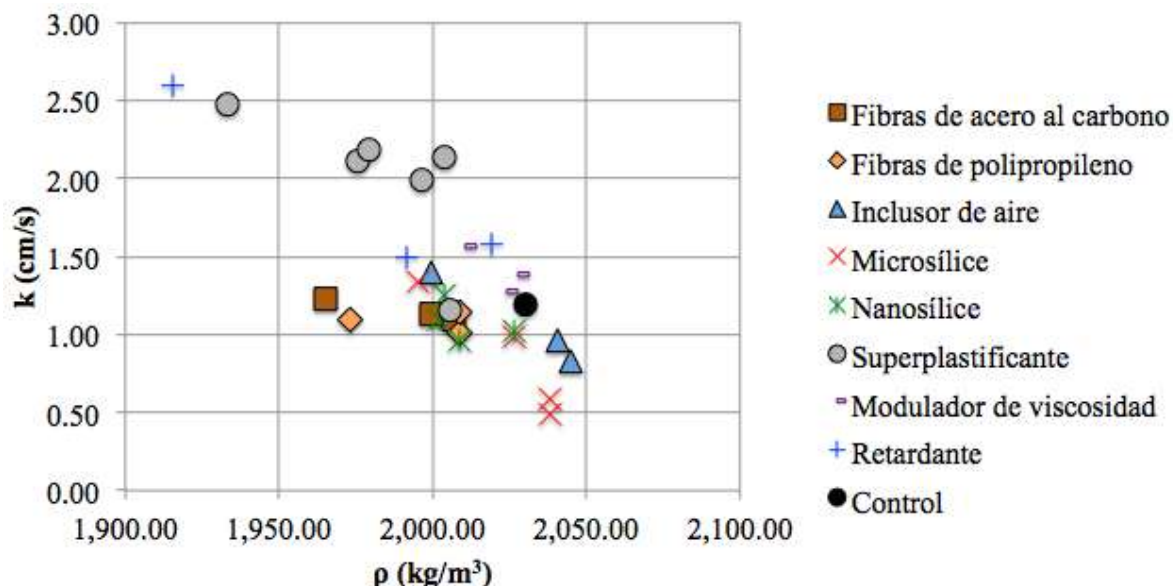


Figura 56. Estudio de aditivos por separado. Gráfico de correlación entre la permeabilidad ( $k$ ) y la densidad ( $\rho$ ) para cada aditivo analizado (Fuente: Elaboración propia).

De acuerdo a la literatura analizada, los rangos de los valores de contenido de huecos en diversas investigaciones ronda entre 15-30%, y la permeabilidad entre un 0.01-4.77cm/s (Brake, Allahdadi, and Adam 2016; Giustozzi 2016; Rangelov et al. 2016), los cuales varían dependiendo del diseño de la mezcla. Comparado con los resultados en la presente sección, se obtuvo un rango de huecos entre 27-32% y una permeabilidad entre 0.49-2.6cm/s, estando dentro de los rangos normales. En el caso de la densidad, la literatura demostró valores entre 1866-2325kg/m<sup>3</sup>, obteniendo en la presente investigación resultados entre 1915-2044kg/m<sup>3</sup>. Estando dentro de los resultados normales en la densidad también (AMDE and ROGGE 2013; Lee et al. 2011; Lian and Zhuge 2010).

#### 4.4.2.3. Análisis de resultados Mecánicos

Por el contrario que la permeabilidad, el inclisor de aire representó los valores más altos de tracción indirecta, como se aprecia en la Figura 57. Siguiendo la misma explicación del apartado anterior, a mayor  $\rho$  que otorga el aditivo, la adhesión entre las partículas de agregado incrementa, llegando a tener muestras más fuertes, como se aprecia en la Figura 58.

Las fibras de acero al carbono representaron los valores más bajos de resistencia a la tracción indirecta del total de mezclas. Esto se debe a las dimensiones de la fibra, que era

de 1cm de largo aproximadamente, y no lograban otorgar suficiente adhesión entre las partículas de agregado por la cantidad de huecos de la mezcla. Adicionalmente, el uso de estas fibras en hormigones porosos puede dar problemas debido al agua que se llega a infiltrar en las mezclas con este material, tendiendo a oxidar las fibras, afectando su funcionalidad. Además, ya que ciertas fibras llegaban a quedarse en la superficie de las muestras, se comprobó que su uso podría llegar a ser peligroso para los usuarios, especialmente para personas que transitan en bicicleta o motocicleta, donde, de sufrir una caída, se podían sufrir severos raspones.

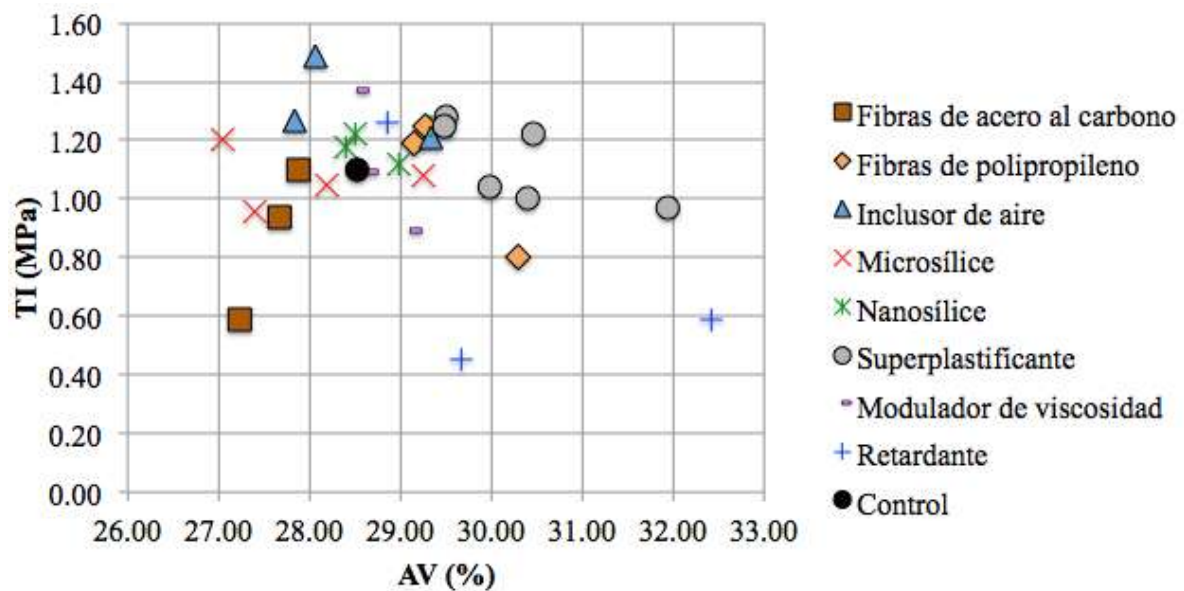


Figura 57. Estudio de aditivos por separado. Gráfico de correlación entre la tracción indirecta (TI) y el volumen de huecos (AV) para cada aditivo analizado (Fuente: Elaboración propia).

En el caso del aditivo retardante, se obtuvieron valores de tracción indirecta muy bajos posiblemente porque se mejoró el cubrimiento, por completo, de las partículas de agregado, lo cual tendía a incrementar el contenido de huecos (Figura 57), y disminuir  $\rho$  (Figura 58), dando lugar a puentes de mortero más delgados y débiles para conectar dichos agregados, causando falla muy rápido.

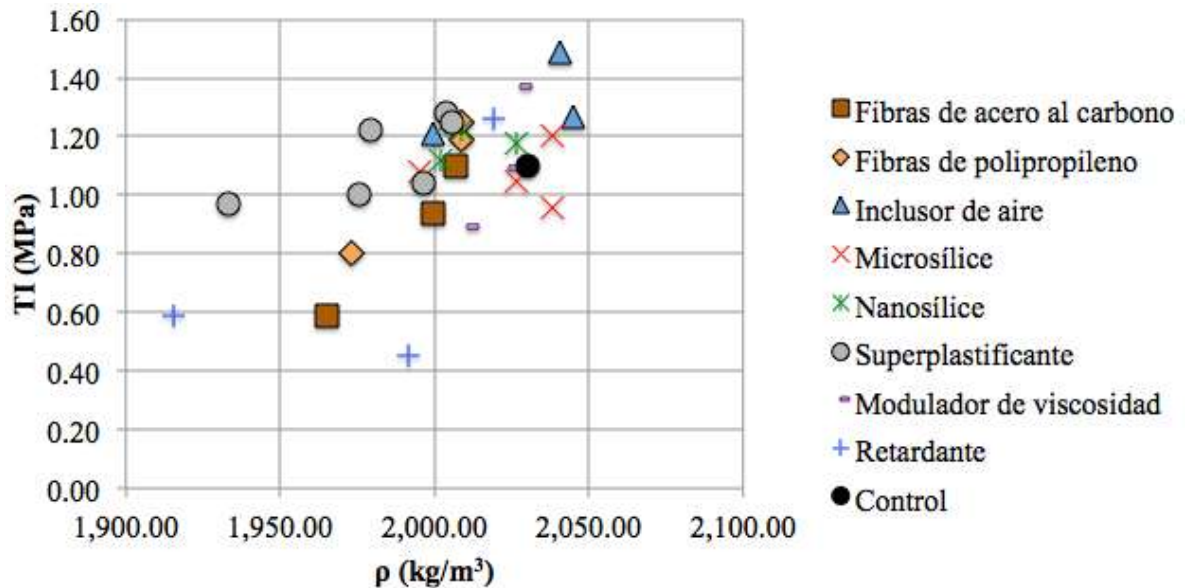


Figura 58. Estudio de aditivos por separado. Gráfico de correlación entre la tracción indirecta (TI) y la densidad ( $\rho$ ) para cada aditivo analizado (Fuente: Elaboración propia).

#### 4.4.2.4. Análisis de la Varianza (ANOVA)

De acuerdo a la Tabla 43, en el ANOVA, el superplastificante es el aditivo con una importancia mayor que el resto de los aditivos en las propiedades evaluadas. Esto puede explicarse porque la mezcla se hace más trabajable, con una mejor consistencia. Así, este aditivo mejoró significativamente las propiedades mecánicas e hidráulicas de la mezcla, en especial la permeabilidad, en un 78.96% respecto a la referencia.

Tabla 43. Resultados del Análisis de la Varianza (ANOVA) para el estudio de aditivos por separado (Fuente: Elaboración propia).

Aditivo	Resultados			
	GL*	SCD*	Varianza	Importancia (%)
Modulador de Viscosidad	1.00	231.65	17.22	10.00
Retardante	1.00	263.50	3.03	11.38
Fibras de Acero al Carbono	1.00	132.16	10.49	5.71
Fibras de Polipropileno	2.00	212.93	17.21	9.20
Suspensión de Nanosílice	2.00	332.39	449.08	14.36
Inclisor de Aire	1.00	359.10	49.49	15.51
Superplastificante	1.00	518.23	49.07	22.38
Microsílice	1.00	265.39	48.21	11.46

\*GL: Grados de Libertad, SCD: Suma de Cuadrados de las Desviaciones

Por el contrario, las fibras de acero al carbono representaron la menor importancia de todos los aditivos analizados, por las cuestiones a continuación establecidas:

- El tamaño de las fibras era muy pequeño y no llegaba a unir apropiadamente las partículas de agregado.
- Al tratarse de pavimentos permeables, el agua que infiltra el pavimento tiende a oxidar las fibras de acero.
- Las fibras que quedaban en la superficie de las probetas se consideraron de alto riesgo vial, sobre todo para motociclistas o personas en bicicleta, ya que, de sufrir una caída, eran propensos a sufrir raspaduras y cortes por las fibras que salían.
- También, el paso de los neumáticos sobre estas superficies ocasionaba que las fibras se desprendieran y, en ocasiones, se incrustaran en el neumático, pudiendo ocasionar que el neumático se desinflara.

Se determinó que hay una diferencia significativa entre los efectos producidos por los distintos aditivos estudiados, ya que la F de Fisher calculada arrojó un resultado de 1.28, mientras que la F tabulada dio un valor de 3.63. Al ser mayor este último número que la F calculada, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ), que determina que no hay diferencia significativa, en este caso, entre los aditivos.

#### 4.4.2.5. Conclusiones Parciales

A continuación se presentan las conclusiones parciales obtenidas del estudio de aditivos por separado (aisladamente):

- La adición de fibras de acero al carbono no representaron ninguna mejora en términos mecánicos ni de permeabilidad, en comparación con la mezcla de control. Por el contrario, los valores fueron menores. La longitud de las fibras, de alrededor de 10mm, se considera insuficiente para mantener una adhesión adecuada entre las partículas de agregado debido al alto contenido de huecos presente en las mezclas. Además, el agua infiltrada podría oxidar las fibras, alterando su propiedad y debilitando la mezcla, y la permanencia de las fibras metálicas en superficie podría causar daños a los usuarios de los pavimentos. Por consiguiente, estas fibras no fueron empleadas en el estudio de combinaciones de aditivos.
- Todos los aditivos evaluados representaron una mejora en la trabajabilidad de la mezcla, siendo el modulador de viscosidad el aditivo que demostró valores de

resistencia mecánica más altos, debido a su capacidad para hacer la mezcla más adherente, incrementando la resistencia de los puentes entre las partículas de agregado.

- El aditivo retardante dió los valores de permeabilidad más altos, debido a la baja densidad otorgada a las mezclas, dando cabida a un contenido de huecos alto.

#### 4.4.3. Estudio de combinaciones de aditivos

En este apartado se muestran los resultados obtenidos con las seis combinaciones de aditivos expuestas, analizando sus resultados de permeabilidad, tracción indirecta y resistencia al deslizamiento.

##### 4.4.3.1. Resultados generales

A continuación se presentan los resultados generales obtenidos de los ensayos realizados a las combinaciones de aditivos, los cuales pueden apreciarse en la Tabla 44. Se presenta, además la desviación estándar al realizarse 3 probetas por mezcla.

Tabla 44. Resultados de los diferentes ensayos realizados en el estudio de aditivos por separado. (Fuente: Elaboración propia).

Combinación	$\rho^{**}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma$	AV <sup>+</sup> (%)	$\sigma$	k <sup>++</sup> (cm/s)	$\sigma$	TI <sup>†</sup> (MPa)	$\sigma$	CRD <sup>‡</sup> seco	$\sigma$	CRD <sup>‡</sup> húmedo	$\sigma$
Control	2074.22	15.76	27.02	0.55	0.23	0.05	1.89	0.06	0.72	0.01	0.58	0.02
A	2078.73	22.35	25.12	0.81	0.13	0.08	1.87	0.23	0.66	0.17	0.56	0.14
B	2058.85	22.35	27.44	0.79	0.29	0.10	2.22	0.33	0.67	0.02	0.56	0.07
C	2085.15	24.92	26.56	0.88	0.44	0.11	2.75	0.37	0.67	0.15	0.56	0.13
D	2069.26	19.86	25.53	0.71	0.16	0.06	1.76	0.16	0.68	0.03	0.57	0.04
E	2074.71	19.09	26.89	0.67	0.39	0.12	2.55	0.5	0.68	0.12	0.59	0.10
F	2059.17	17.44	27.40	0.61	0.32	0.08	1.62	0.14	0.72	0.10	0.59	0.08

\*\* $\rho$  corresponde a la densidad

+AV corresponde al volumen de huecos

++k corresponde a la permeabilidad

†TI corresponde a la tracción indirecta

‡CRD corresponde al coeficiente de resistencia al deslizamiento

##### 4.4.3.2. Análisis de resultados de Porosidad y Permeabilidad

Como se observa en la Figura 59, los resultados de permeabilidad fueron buenos para todas las mezclas. Se aprecia que la permeabilidad decrece mientras el volumen de huecos incrementa. Este comportamiento contrario puede ser atribuido al hecho de que el aditivo inclusor de aire ayuda a controlar la cantidad de huecos en la estructura de la

mezcla, ayudando, además, a producir una trabajabilidad muy aceptable de la mezcla. Por esta razón, las mezclas C, E, y F (todas con inclusor de aire), obtuvieron los valores de permeabilidad más altos. Por otro lado, las mezclas A y D tuvieron los valores más bajos, donde se puede afirmar que tanto la microsílíce como la suspensión de nanosílíce tienden a bloquear los huecos interconectados, ya que estos aditivos hacen la pasta más densa, a pesar de tener un contenido de huecos mayor en las probetas. Adicionalmente, empleando todos los aditivos evaluados (mezcla A), dio los resultados más bajos en términos de permeabilidad, ya que el volumen de la pasta incrementaba reduciendo los huecos.

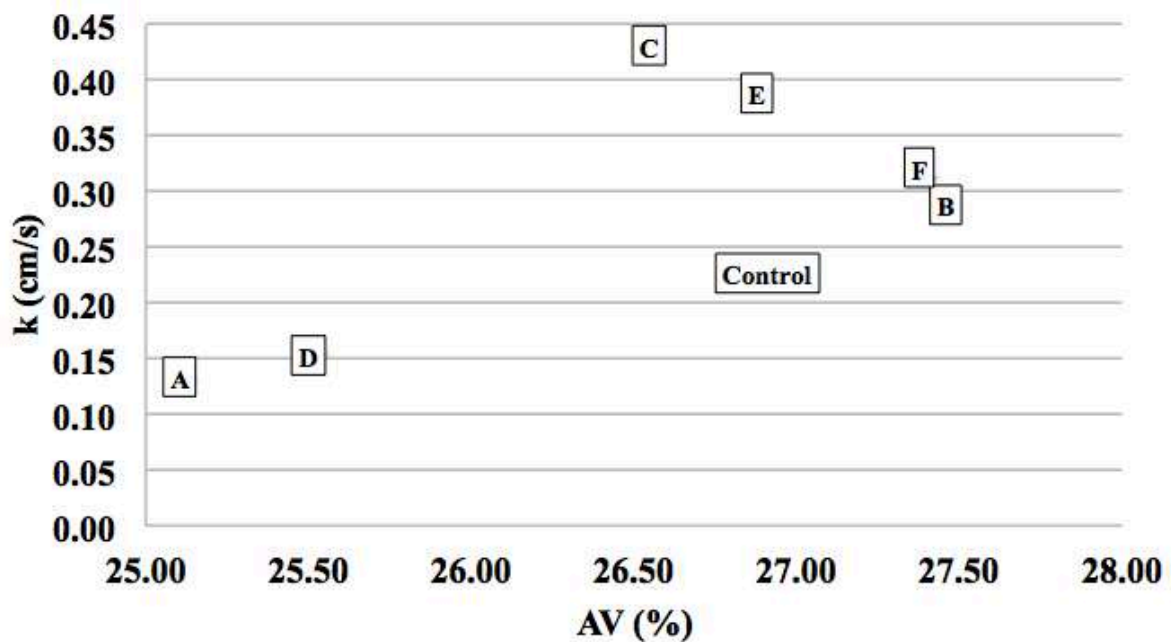


Figura 59. Estudio de combinaciones de aditivos. Gráfico de correlación entre la permeabilidad ( $k$ ) y el volumen de huecos ( $AV$ ) de las mezclas con combinaciones de aditivos (Fuente: Elaboración propia).

La mezcla de Control obtuvo una permeabilidad de 0.23cm/s, como se puede apreciar en la Tabla 44. Esto significa que la microsílíce y la suspensión de nanosílíce disminuyeron la capacidad de infiltración alrededor de 50% y 35% para las mezclas A y D, respectivamente respecto a la mezcla de Control. El resto de las mezclas (y combinaciones) mejoró su capacidad de infiltración, siendo la mezcla C la que tuvo la mejora más alta, con más de un 80%.

#### 4.4.3.3. Análisis de resultados Mecánicos

La Figura 60 representa la correlación entre tracción indirecta y contenido de huecos. Aquí, de nuevo, las mezclas A y D obtuvieron los resultados más bajos, donde se puede afirmar que la microsílíce hace que el mortero pierda adhesividad, ya que la cantidad de cemento se disminuye. Adicionalmente, el superplastificante tiende a hacer la mezcla más trabajable, flexible, y adhesiva, incrementando la fuerza mecánica de las mezclas. La mezcla F fue la que tuvo este aditivo, siendo la mezcla más rígida de todas, obteniendo la fuerza a tracción indirecta más baja, y uno de los resultados más bajos de tracción indirecta, ya que tuvo 22% menos resistencia que la mezcla de Control.

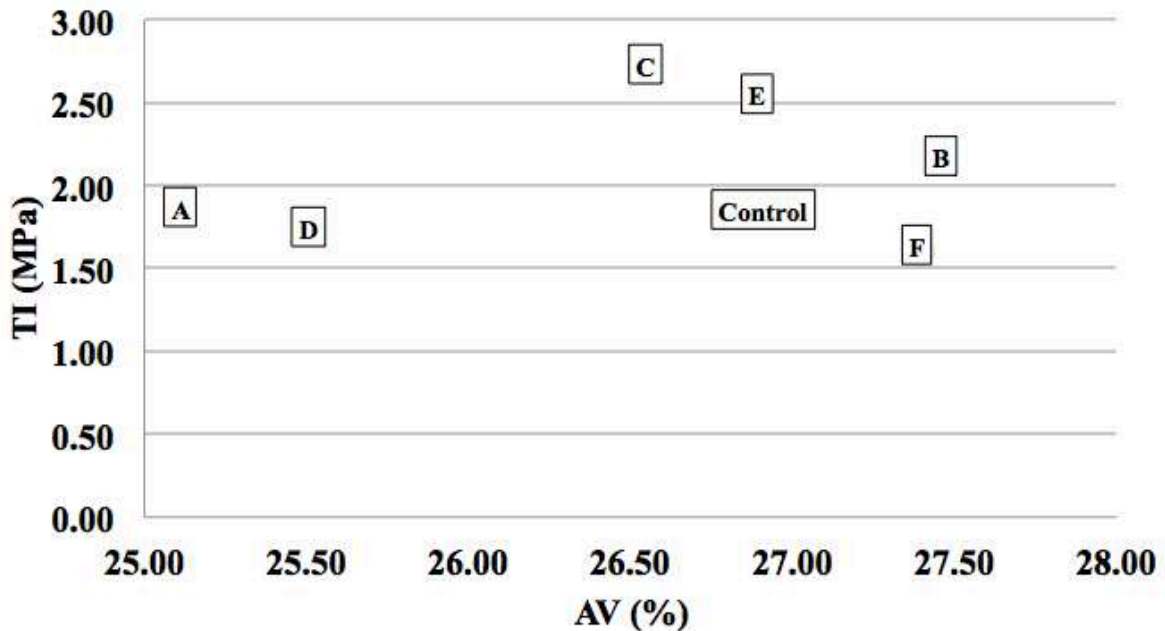


Figura 60. Estudio de combinaciones de aditivos. Gráfico de correlación entre la tracción indirecta (TI) y el volumen de huecos (AV) de las mezclas con combinaciones de aditivos (Fuente: Elaboración propia).

La mezcla C representó los mejores resultados de tracción indirecta, mejorando alrededor de un 45%. La combinación de superplastificante con inclusor de aire tiende a proveer la mezcla con la suficiente adhesividad, flexibilidad y trabajabilidad para mejorar los valores mecánicos. Las fibras de polipropileno ayudan también a incrementar la fuerza, pero más que dar una mejora notoria, se pudo observar que estas fibras ayudan a otorgar mayor control y seguridad al pavimento cuando éste llega a fallar o agrietarse, manteniendo las piezas de la mezcla adheridas.

#### 4.4.3.4. Análisis de resultados Superficiales

Los resultados a fricción (resistencia al deslizamiento) fueron, en general, bastante buenos para todas las mezclas, como puede apreciarse en la Figura 61.

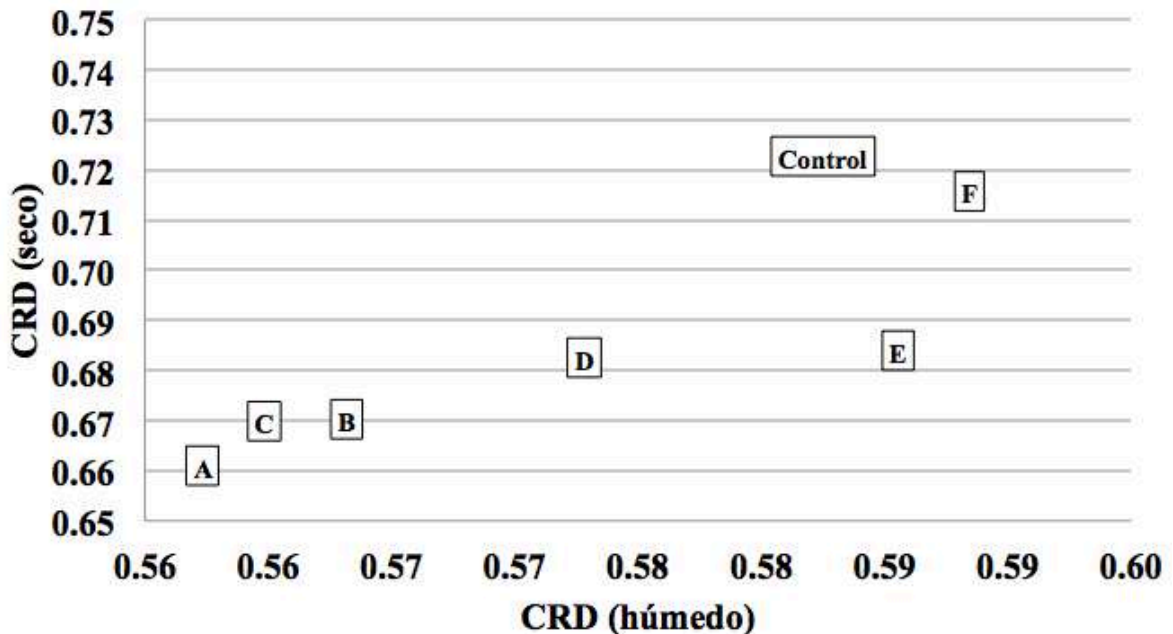


Figura 61. Estudio de combinaciones de aditivos. Gráfico de correlación entre el coeficiente de resistencia al deslizamiento bajo condiciones secas ( $CRD_{seco}$ ) y el coeficiente de resistencia al deslizamiento bajo condiciones húmedas ( $CRD_{húmedo}$ ) de las mezclas con combinaciones de aditivos (Fuente: Elaboración propia).

Aunque los resultados fueron alrededor de 5% y 3% más bajos, bajo condiciones secas y húmedas, respectivamente, comparado con la mezcla de Control. A excepción de las mezclas E y F, que obtuvieron alrededor de 1.50% valores más altos de fricción bajo condiciones húmedas. La mezcla F obtuvo los valores más altos en ambos escenarios, afirmando que la ausencia de aditivo superplastificante incrementa la rugosidad de las mezclas, especialmente bajo condiciones húmedas. Sin embargo, a pesar del aditivo empleado, bajo condiciones secas la fricción tiende a disminuir (alrededor de 1.30% menos para la mezcla F). En este caso, la mezcla C obtuvo uno de los resultados más bajos en ambos escenarios, donde el inductor de aire puede incrementar el área de huecos en la superficie, disminuyendo el área de contacto y haciendo que el péndulo del ensayo a fricción conserve su energía (producto de la oscilación del péndulo), disminuyendo la fricción.



Adicionalmente, el espesor de la macrotextura disminuye considerablemente en todas las mezclas, en comparación con la mezcla de control, como puede observarse en la Figura 62. Siendo la mezcla A la que tuvo la mayor pérdida, con más del 70%. La pérdida de macrotextura era esperada, ya que la adición de aditivos incrementó el volumen de la mezcla. Sin embargo, la permeabilidad no se vio afectada, incrementando en casi todas las mezclas. También, se puede apreciar una relación entre el espesor de la macrotextura y la resistencia al deslizamiento, ya que la mezcla con el menor espesor, y la mezcla con el mayor espesor (A y C respectivamente), obtuvieron los resultados más bajos en términos de fricción. Con esto, se puede afirmar que la resistencia al deslizamiento está más relacionada con las condiciones del agregado y el mortero, y que las diferencias en los huecos en la superficie no es significativa comparando mezclas porosas.

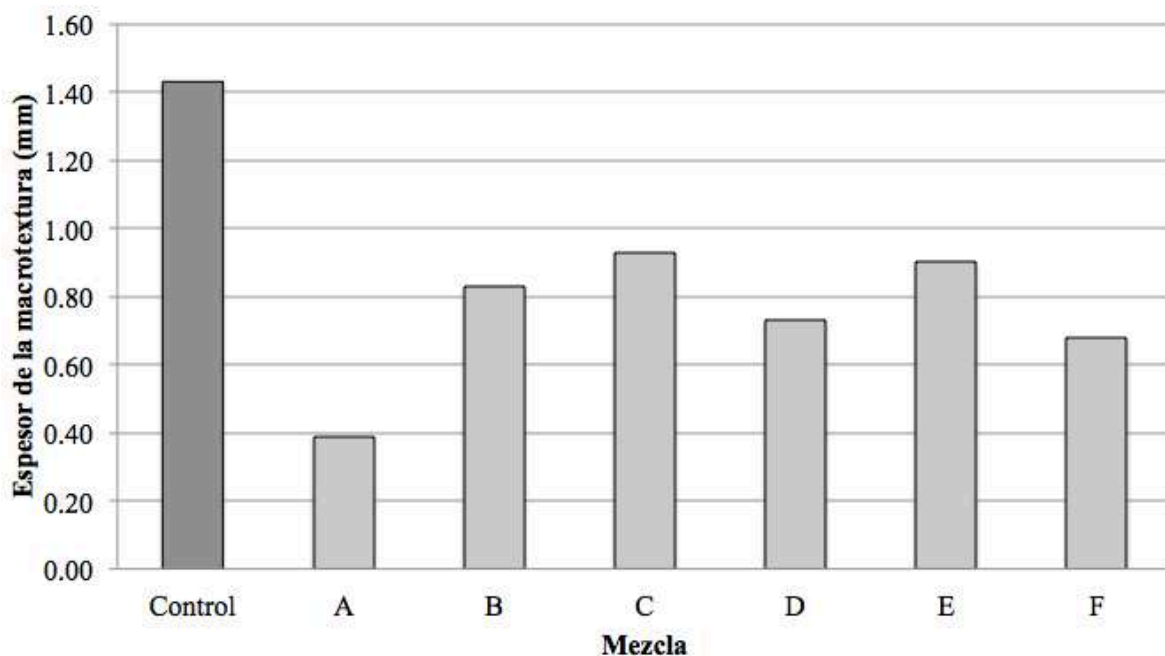


Figura 62. Estudio de combinaciones de aditivos. Gráfico del espesor de la macrotextura de las mezclas con combinaciones de aditivos (Fuente: Elaboración propia).

#### 4.4.3.5. Conclusiones Parciales

Las conclusiones parciales que se pueden mencionar del estudio de combinaciones de aditivos son:

- Las fibras de polipropileno, más que otorgar una mejora en la resistencia, daban un incremento en la seguridad vial, ya que, por su longitud de 54mm, cuando el

pavimento fallaba, sus piezas se mantenían unidas gracias a estas fibras, pudiendo así prevenir desgastes. Por esta razón se emplearon en todas las combinaciones.

- La combinación C (Fibras de polipropileno + Superplastificante + Inclusor de Aire) tuvo los mejores resultados mecánicos y de permeabilidad con valores un 46.79% y 45% más altos, respectivamente, que la mezcla de control (óptima sin aditivos). Se puede concluir que el inclusor de aire ayuda a controlar los huecos en la estructura de la mezcla, a la vez que, en combinación con el superplastificante, se mejora la trabajabilidad y adherencia con las partículas de agregado. Sin embargo, la combinación C tuvo los valores de CRD más bajos del todos, debido a que el inclusor de aire incrementó la cantidad de huecos, disminuyendo el área de contacto con el péndulo y la superficie de la probeta. Aún así, todos los valores de CRD se consideran lo suficientemente altos para proporcionar la adecuada fricción al pavimento que permite a los vehículos frenar de una forma mejor.
- Las mezclas A y D tuvieron los peores resultados de permeabilidad con valores un 50% y 35% más bajos, respectivamente, que la mezcla de control. Ambas combinaciones tenían microsílíce y nanosílíce, los cuales hacían el mortero más denso, colmatando la mezcla. Al mismo tiempo, los resultados mecánicos de estas mezclas fueron de los más bajos, ya que, al reemplazar cemento con microsílíce, se pierde adhesividad en la pasta o mortero.
- La combinación F (Modulador de Viscosidad + Retardante + Fibras de Polipropileno + Inclusor de Aire) tuvo la resistencia mecánica más baja de todas. Fue la única combinación sin superplastificante, por lo que se considera que fue la mezcla más rígida del total estudiado, teniendo 22% menos resistencia que la mezcla de control. Al mismo tiempo, sus resultados de CRD fueron los más elevados, donde la ausencia de superplastificante otorgó mayor rugosidad a la superficie de la mezcla.
- De acuerdo a los rangos observados en el estado del arte, la combinación C logró ubicarse dentro de los parámetros, obteniendo buenos resultados de permeabilidad (0.44cm/s), valores altos de tracción indirecta (2.75Mpa) y una fricción aceptable (0.67 y 0.56 bajo condiciones secas y húmedas respectivamente).

#### 4.4.4. Mezclas con dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>)

El presente apartado analiza diversas formas de añadir el aditivo fotocatalítico, TiO<sub>2</sub>, en las mezclas de hormigón poroso, y evalúa los resultados mecánicos e hidráulicos. Esta razón se debe a que el aditivo, dependiendo de la cantidad y forma en que se añada, puede afectar, en forma positiva o negativa, los resultados de la mezcla.

##### 4.4.4.1. Dosificaciones estudiadas

Para el estudio de mezclas con dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) se empleó la dosificación de la mezcla B-16, con el basalto como árido (al realizarse los ensayos en México y ser el agregado que se disponía), con una granulometría de 5-10mm. El análisis se realizó en dos partes. Por un lado, se utilizaron tres métodos de aplicación en la superficie de las probetas del TiO<sub>2</sub>, basados en la literatura analizada, los cuales pueden apreciarse en la Tabla 45.

Tabla 45. *Porcentajes de Dióxido de Titanio (TiO<sub>2</sub>), agua (W), cemento (C) y arena (S), utilizados para agregar las propiedades fotocatalíticas a la superficie de las probetas (Fuente: Elaboración propia).*

Mezcla	Método	TiO <sub>2</sub> (gr)	TiO <sub>2</sub> (%)	W (%)	C (%)	S (%)
SUP-1	TiO <sub>2</sub> + Agua	0.70	11.76	88.24	-----	-----
SUP-2	TiO <sub>2</sub> + Agua + Cemento	0.70	9.82	80.37	9.82	-----
SUP-3	TiO <sub>2</sub> + Agua + Cemento + Arena	0.70	0.42	16.85	16.18	66.55

De acuerdo con lo que establecen algunos autores, 4 gr de TiO<sub>2</sub> por cada 46500mm<sup>2</sup> de área en la superficie, trabajan de forma eficiente al remover contaminantes del aire. Lo que equivaldría a aproximadamente 0.70 gr de TiO<sub>2</sub> por 8171mm<sup>2</sup> de área en la superficie, que es el área total que dan las probetas de 101.6mm de diámetro realizadas en el laboratorio. Los tres métodos fueron aplicados con una brocha a la superficie de las probetas, como se aprecia en la figura 63, donde se detalla la aplicación con brocha, la presentación del TiO<sub>2</sub>, la pasta que se formaba con los elementos para cada método y su resultado final.

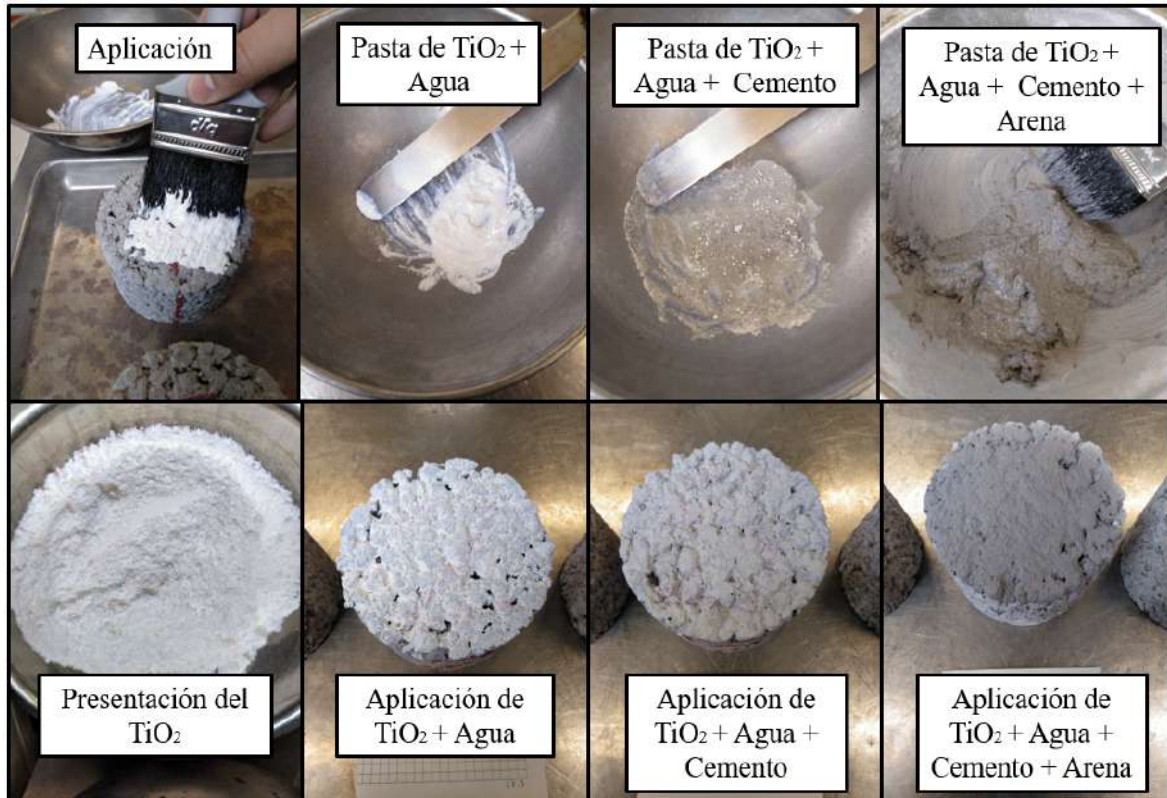


Figura 63. Eficiencia fotocatalítica. Aplicación de los diferentes métodos con  $TiO_2$  en la superficie de las probetas de hormigón poroso para el ensayo de eficiencia fotocatalítica (Fuente: Elaboración propia).

La otra parte del análisis fue la de añadir determinados porcentajes, en términos de peso del cemento, de  $TiO_2$  en la mezcla, sin sustituir la cantidad en peso del cemento. Se utilizaron 3 porcentajes diferentes: 3%, 5%, y 7%, de acuerdo a lo que se emplea en la literatura analizada. Se empleó la misma dosificación, B-16, la cual se aprecia en la Tabla 46.

Tabla 46. Porcentajes de Dióxido de Titanio ( $TiO_2$ ), agua ( $W$ ), cemento ( $C$ ) y arena ( $S$ ), utilizados para agregar las propiedades fotocatalíticas a la superficie de las probetas (Fuente: Elaboración propia).

Mezcla	Tamaño (mm)	s/c*	a/c**	C <sup>+</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	Ag <sup>++</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	W <sup>-</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	S <sup>--</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	TiO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	TiO <sub>2</sub> (%)	VMA' (%)
Control	5-10	0.5	0.3	375.35	1565.26	124.11	178.68	0.00	0.00	47.00
FOT-1	5-10	0.5	0.3	375.35	1565.26	124.11	178.68	10.72	3.00	47.00
FOT-2	5-10	0.5	0.3	375.35	1565.26	124.11	178.68	17.87	5.00	47.00
FOT-3	5-10	0.5	0.3	375.35	1565.26	124.11	178.68	25.02	7.00	47.00

\*s/c corresponde a la relación arena-cemento

\*\*a/c corresponde a la relación agua-cemento

+C corresponde a la cantidad de cemento

++Ag corresponde a la cantidad de árido grueso

-W corresponde a la cantidad de agua

--S corresponde a la cantidad de arena

'VMA corresponde a los huecos en el agregado mineral

En cuanto al nombre de las mezclas, las probetas SUP se refieren a aquellas mezclas donde se aplicó el  $\text{TiO}_2$  en la superficie, y su numeración depende del método de aplicación en superficie que se aprecia en la Tabla 44. Las mezclas FOT se refieren a aquellas probetas donde el  $\text{TiO}_2$  se introdujo en la mezcla, y su numeración depende del porcentaje de aditivo empleado. Todas las mezclas fueron compactadas por el método Marshall de impacto a 35 golpes, y permanecieron 28 días en curado.

#### 4.4.4.2. Resultados generales

En la Tabla 47 se aprecian los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos e hidráulicos en las mezclas con aditivo fotocatalítico  $\text{TiO}_2$ , así como su desviación estándar al realizarse 3 probetas por mezcla.

Tabla 47. *Resultados generales de las mezclas con aditivo fotocatalítico ( $\text{TiO}_2$ ) (Fuente: Elaboración propia).*

Mezcla	AV* (%)	$\sigma$	TI** (MPa)	$\sigma$	k <sup>+</sup> (cm/s)	$\sigma$
Control	24.24	1.09	2.54	0.41	0.70	0.24
FOT-1	25.49	0.59	2.20	0.12	0.39	0.08
FOT-2	25.61	0.41	2.10	0.06	0.36	0.15
FOT-3	25.90	1.44	1.64	0.16	0.35	0.08
SUP-1	22.99	0.27	-	-	0.48	0.02
SUP-2	22.76	0.31	-	-	0.61	0.11
SUP-3	23.06	0.73	-	-	0.45	0.17

\*AV corresponde al volumen de huecos

\*\*TI corresponde a la tracción indirecta

\*k corresponde a la permeabilidad

#### 4.4.4.3. Análisis de resultados de Porosidad y Permeabilidad

La Figura 64 muestra los resultados obtenidos de las mezclas analizadas con aditivo fotocatalítico  $\text{TiO}_2$ . Se puede apreciar que el contenido de huecos se mantiene bastante estable, al estar entre 22-25% porosidad. Sin embargo, en términos de permeabilidad, todas las mezclas disminuyeron considerablemente su capacidad, siendo las mezclas con porcentaje de  $\text{TiO}_2$  en la mezcla quienes lo hicieron en una mayor cantidad. La mezcla con 7% de  $\text{TiO}_2$  en la mezcla disminuyó su permeabilidad en algo más de un 50%, con respecto a la mezcla de control. Esto se debe a que esta mezcla incrementó su densidad con la gran cantidad de  $\text{TiO}_2$  añadida.

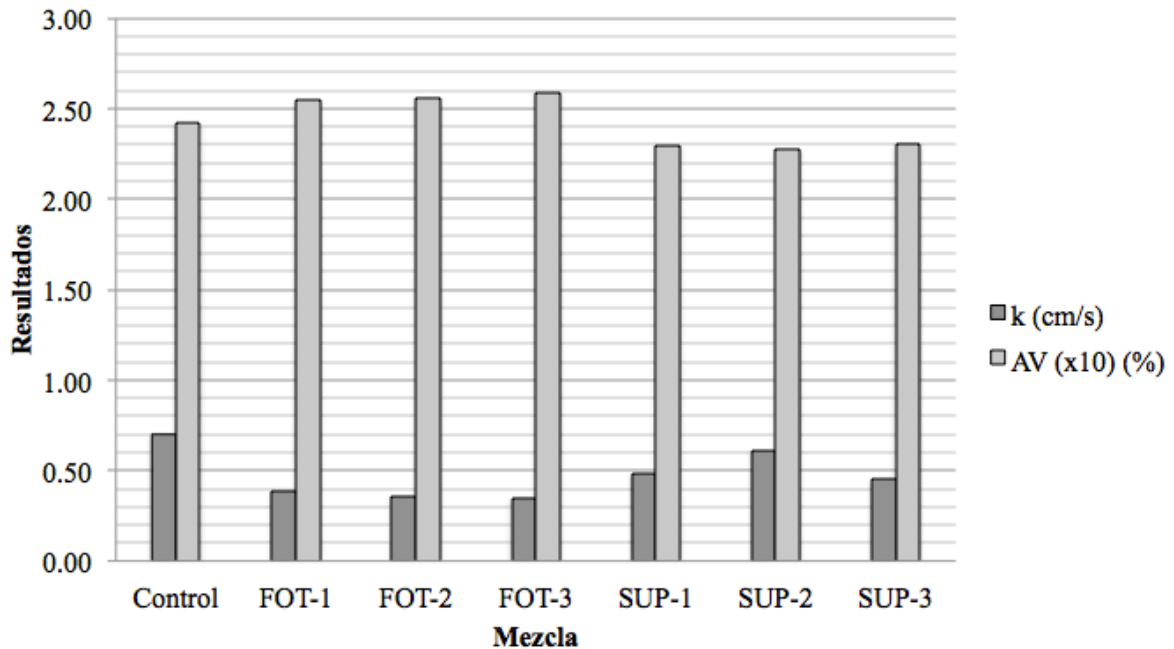


Figura 64. Eficiencia fotocatalítica. Resultados de permeabilidad ( $k$ ) y volumen de huecos ( $AV$ ) de las mezclas con aditivo fotocatalítico  $TiO_2$  para el ensayo de eficiencia fotocatalítica (Fuente: Elaboración propia).

Curiosamente, las mezclas donde se colocó una mezcla de  $TiO_2$  en la superficie, tuvieron cantidades menores de disminución de permeabilidad que las mezclas con  $TiO_2$  añadido. Sin embargo, su porcentaje es aún considerable, donde, del total, la mezcla SUP-2, quien tiene en su superficie una mezcla de  $TiO_2$  con agua y cemento, representó la menor disminución en la capacidad de permeabilidad, con solo el 12.86% menos infiltración que la mezcla de control.

#### 4.4.4.4. Análisis de resultados Mecánicos

El ensayo de tracción indirecta se realizó solamente en las mezclas donde el  $TiO_2$  fue añadido, ya que en las mezclas donde se colocó superficialmente, se consideró que no tendría ningún efecto, positivo o negativo, en sus resultados mecánicos, al no alterarse su estructura resistente interna.

Como se puede apreciar en la Figura 65, el  $TiO_2$  añadido en mezcla afecta la capacidad mecánica de las mezclas también. Donde a mayor porcentaje de este aditivo, es mayor la disminución en su fuerza. La mezcla con 3% de  $TiO_2$  disminuyó su capacidad mecánica en un 13.39%, mientras que al incrementar el porcentaje en 7%, su resistencia

decrece en un 35.43%. Se concluye que la adición de  $\text{TiO}_2$  en la mezcla no permite una buena adhesión entre partículas, ya que parece disminuir la adhesividad del mortero, debilitándola y decreciendo su fuerza.

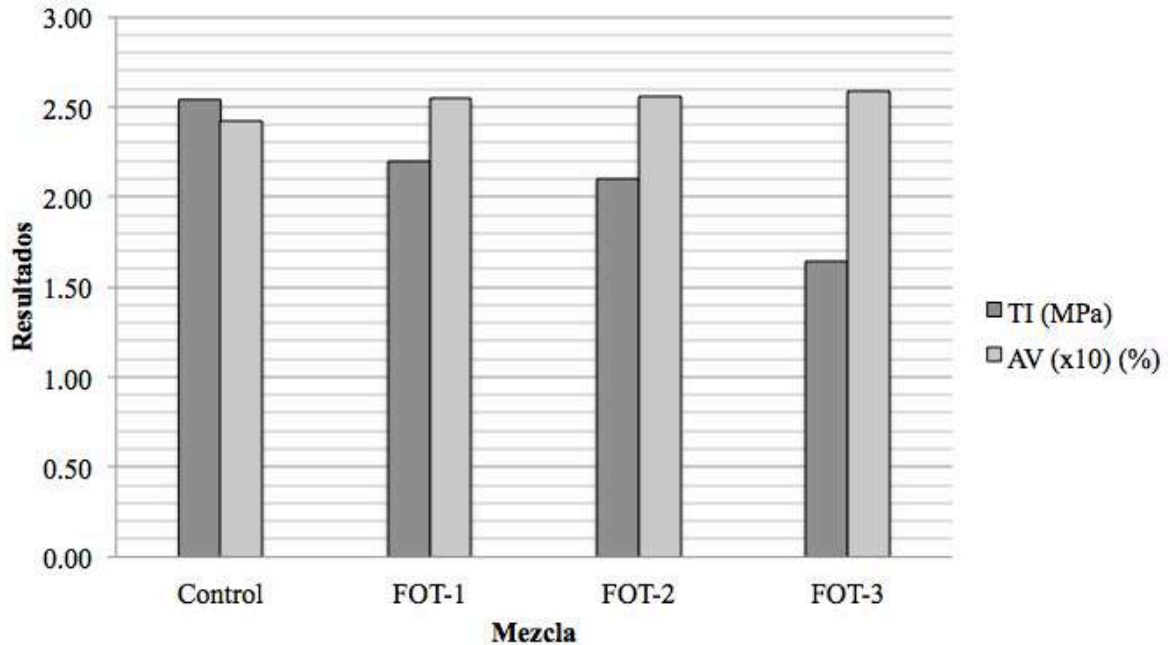


Figura 65. Eficiencia fotocatalítica. Resultados de tracción indirecta (TI) y contenido de huecos (AV) de las mezclas con aditivo fotocatalítico  $\text{TiO}_2$  para el ensayo de eficiencia fotocatalítica (Fuente: Elaboración propia).

#### 4.4.4.5. Conclusiones Parciales

Las conclusiones parciales obtenidas de las mezclas con dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) se resumen en:

- El mezclar  $\text{TiO}_2$  con agua y colocarlo en la superficie de las probetas se traduce en una pérdida de permeabilidad del 31.43%. Esto debido a que la pasta con estos dos componentes es muy líquida y se llega a introducir en los huecos de la muestra, colmatándola.
- Una mezcla de  $\text{TiO}_2$ , agua y cemento, produce una mezcla más trabajable y fácil de colocar. Este método produjo la menor disminución de permeabilidad, con un 12.86%, debido a que la mezcla no llegaba a introducirse ni a quedarse sobre los huecos de la superficie.

- La mezcla con  $\text{TiO}_2$ , agua, cemento y arena demostró una consistencia muy densa que, al colocarse en la superficie, representó una barrera que colmató la probeta disminuyendo la permeabilidad en un 35.71%. La diferencia entre este método y el de  $\text{TiO}_2$  con agua, es que el primero colmata la probeta desde la superficie, mientras que el  $\text{TiO}_2$  con agua desde el interior de la muestra.
- El añadir un porcentaje de  $\text{TiO}_2$  a la mezcla significa reducir tanto la resistencia mecánica como la capacidad de permeabilidad de la mezcla. Un 3% de  $\text{TiO}_2$  en la mezcla disminuye la resistencia a tracción indirecta en un 13.39% y la permeabilidad en un 44.29%.
- A mayor cantidad de  $\text{TiO}_2$ , mayor es la reducción en la capacidades de la mezcla. Un 5% de  $\text{TiO}_2$  reduce en un 17.32% y un 48.57% la resistencia a tracción indirecta y permeabilidad, respectivamente; y un 7% de  $\text{TiO}_2$  en un 35.43% y 50%, respectivamente. Esto puede deberse a que el  $\text{TiO}_2$  hace que el mortero sea menos adhesivo y otorgue una cohesión menor a las partículas de agregado.
- El  $\text{TiO}_2$  proporciona una densidad mayor a la mezcla, colmatando su volumen de huecos, disminuyendo la permeabilidad. En parte esto sucede ya que el  $\text{TiO}_2$  se añade sin modificar las cantidades del cemento, arena y agua; pero el hacer esto podría perjudicar más los valores de resistencia mecánica.
- Es necesario un estudio de eficiencia fotocatalítica que permita analizar la capacidad depuración del aire de los pavimentos de hormigón poroso, y evaluarlo con la capacidad mecánica y de permeabilidad obtenidas para ver si el pavimento es viable en términos ambientales y mecánicos, y decidir el uso que éste tendrá.
- En términos de permeabilidad, todas las probetas demostraron valores aceptables a pesar de disminuir su capacidad de infiltración. De acuerdo a normas americanas, se recomienda un mínimo de 0.012cm/s de permeabilidad en las probetas. Cantidad sobrepasada considerablemente por todas las muestras.



#### **4.5. Influencia de la compactación en mezclas de hormigón poroso**

Entre los procedimientos de construcción asociados a la puesta en obra de pavimentos de hormigón poroso, se seleccionó la compactación por su elevada importancia relativa. Por tanto, en esta investigación se evaluaron diferentes métodos de compactación para ver cuál otorgaba una mejor relación hidráulica-mecánica. En total fueron cinco métodos de compactación: compresión axial, giratoria, por impacto (Marshall), seccionada (Proctor Estandar) y la varilla de apisonamiento. Con las mezclas compactadas con cada método, se realizaron los ensayos de permeabilidad y tracción indirecta para evaluar la influencia de la compactación, ya que no hay en la actualidad una normativa que especifique parámetros de ejecución de mezclas de hormigón poroso.

##### **4.5.1. Dosificaciones estudiadas**

De acuerdo al material disponible en el laboratorio de la UNAM (México), se utilizó una granulometría 5-10mm, y basalto como árido. Se empleó la dosificación de la mezcla B-16, la cual consiste en una relación arena-cemento (s/c) de 0.5, agua-cemento (a/c) de 0.3 y huecos en el agregado mineral (VMA) del 47%. En cuanto al nombre que recibieron las mezclas, estas se explican en el siguiente apartado. La carga empleada se observa en la Tabla 48 referente a la estandarización de esfuerzos.

Las mezclas son denominadas por una abreviación del método de compactación empleado: compresión axial (CAX), giratoria (GIR), impacto (IMP), seccionada (SEC) y varilla de apisonamiento (VAR). Adicionalmente, son numeradas del 1 al 4, donde el 1 representa el esfuerzo mayor y el 4 el esfuerzo menor en cada método. Esto también se aprecia en la Tabla 48.

##### **4.5.2. Estandarización de esfuerzos de compactación**

Como el esfuerzo aplicado por cada golpe o giro en los métodos de compactación es diferente debido al tipo de dispositivo empleado y las especificaciones de las normas, los esfuerzos fueron estandarizados con el objetivo de poder apreciar todos en una sola gráfica y entender los diversos comportamientos de las mezclas evaluadas. Esto se aprecia en la Tabla 48, donde el la carga en MPa/seg es el parámetro que se utilizó para comparar los

resultados de las mezclas. La primera columna de la Tabla 49 muestra el tipo de impacto que las mezclas recibieron. Por ejemplo, el método giratorio aplica giros a las mezclas, mientras que otros métodos utilizan golpes. El método por compresión axial compacta las probetas con una fuerza constante; de ahí que la segunda columna represente las unidades por segundo del ensayo, o el rango al cual cada unidad es aplicada. El método por compresión axial aplica 500N por segundo, hasta alcanzar una fuerza total de 10.40MPa (85,000N). Las mezclas generalmente fallan antes de alcanzar este máximo de fuerza. El método giratorio aplica 0.51 giros por segundo, el método por impacto 0.83 golpes por segundo, el método seccionado 0.64 golpes por segundo y la varilla de apisonamiento 1.06 golpes por segundo.

Tabla 48. *Estandarización de los esfuerzos de compactación empleados. Fuente: Elaboración propia.*

Mezcla	Unidad	Cantidad	Unidad/seg	Esfuerzo total (MPa)	Tiempo del ensayo (seg)	Esfuerzo de compactación (MPa/seg)
CAX-1	Newton	85,000	500.00	10.40	170.00	0.06
GIR-1	Giros	100	0.51	0.60	195.67	0.60
GIR-2		75		0.60	146.75	0.60
GIR-3		50		0.60	97.83	0.60
GIR-4		25		0.60	48.92	0.60
IMP-1	Golpes	50	0.83	0.12	60.00	0.10
IMP-2		35		0.09	42.00	0.07
IMP-3		20		0.05	24.00	0.04
IMP-4		10		0.03	12.00	0.02
SEC-1	Golpes	35	0.64	0.13	55.00	0.09
SEC-2		25		0.10	39.29	0.06
SEC-3		20		0.08	31.43	0.05
SEC-4		10		0.04	15.71	0.02
VAR-1	Golpes	25	1.06	0.14	23.69	0.15
VAR-2		20		0.11	18.95	0.12
VAR-3		15		0.09	14.21	0.09
VAR-4		10		0.06	9.48	0.06

La columna de “Esfuerzo total” indica la carga total aplicada a la mezcla cuando el ensayo ha finalizado. El método giratorio actúa con una carga de 0.60MPa desde el inicio del ensayo, y se mantiene constante hasta que este finaliza. La diferencia de compactación en este método depende del número de giros empleados para compactar, y por consiguiente, el tiempo del ensayo. En el resto de los métodos, el esfuerzo se aplica

dependiendo del número de golpes dados a la probeta. La columna “Tiempo del ensayo” representa el tiempo total requerido para efectuar el ensayo, y la columna “Esfuerzo de compactación” muestra el esfuerzo aplicado por segundo. La razón de utilizar esta última columna para estandarizar los resultados en una gráfica, en lugar del esfuerzo total, se debe al método de compresión axial, donde no se usa una fuerza puntual por golpe, sino que esta va incrementando hasta alcanzar una fuerza máxima en un tiempo aproximado de 170 segundos.

#### 4.5.3. Resultados generales

La Tabla 48 muestra los resultados obtenidos de los diferentes ensayos y métodos de compactación, así como su desviación estándar al haberse realizado 3 probetas por mezcla.

Tabla 49. Resultados de los diferentes métodos de compactación analizados y evaluados. Fuente: Elaboración propia.

Método de compactación	Mezcla	AV* (%)	$\sigma$	TI** (MPa)	$\sigma$	k* (cm/s)	$\sigma$
<b>Compresión axial</b>	CAX-1	25.48	0.81	1.19	0.34	0.13	0.05
<b>Giratoria</b>	GIR-1	16.29	0.31	1.76	0.07	0.11	0.03
	GIR-2	19.86	0.49	1.28	0.40	0.14	0.03
	GIR-3	22.06	0.24	1.15	0.09	0.28	0.06
	GIR-4	25.09	0.99	0.96	0.19	0.61	0.17
<b>Impacto (Marshall)</b>	IMP-1	21.37	0.25	2.75	0.39	0.56	0.16
	IMP-2	24.83	1.09	2.54	0.41	0.70	0.24
	IMP-3	27.68	0.40	2.04	0.24	1.15	0.12
	IMP-4	33.89	0.80	0.55	0.05	2.04	0.34
<b>Seccionada (Proctor)</b>	SEC-1	27.64	1.17	1.22	0.17	0.31	0.04
	SEC-2	30.58	0.92	1.14	0.24	0.84	0.57
	SEC-3	31.67	1.11	0.84	0.44	1.41	0.14
	SEC-4	37.43	0.00	0.43	0.02	4.38	0.45
<b>Varilla de apisonamiento</b>	VAR-1	35.83	1.03	0.85	0.14	1.43	0.47
	VAR-2	37.90	0.34	0.88	0.11	1.82	0.25
	VAR-3	39.08	0.38	0.77	0.13	2.29	0.10
	VAR-4	41.76	0.90	0.72	0.07	4.92	1.09

\*AV corresponde al volumen de huecos; \*\*TI corresponde a la tracción indirecta; \*k corresponde a la permeabilidad

#### 4.5.4. Análisis de resultados de Porosidad y Permeabilidad

Como se aprecia en los resultados, la mezcla VAR-4 (varilla de apisonamiento, 10 golpes) produjo la porosidad y permeabilidad más altas del total. A pesar de que su

esfuerzo total es mayor que otras mezclas, el hecho de que la varilla empleada para el ensayo tenga un área de contacto pequeño (diámetro de 16mm) conlleva a una menor compactación. Además, se puede sugerir que este método acomoda la mezcla en el molde más que compactarla en sí. Adicionalmente, las probetas compactadas por este método se diseñaron para una altura de 65mm, y midieron alrededor de 10mm más, llevando a la porosidad tan grande obtenida. El método seccionado demostró resultados de permeabilidad muy altos también, especialmente a menores esfuerzos de compactación, como es el caso de la mezcla SEC-4. En este escenario, el esfuerzo total fue muy bajo, sumado al hecho de que el martillo empleado, así como la varilla de apisonamiento, teniendo un área de contacto pequeña (menor al área superficial de la probeta), se obtenía una superficie dispareja en las muestras. Esto se puede apreciar en la Figura 66, donde se muestra una probeta de tipo SEC-4. Adicionalmente, la división entre las dos capas de compactación se aprecian también, deduciendo que no hay una buena adhesión entre las dos capas.



Figura 66. Estudio de métodos de compactación. Ejemplo de una probeta compactada por el método seccionado (Proctor estándar) con la superficie dispareja (Fuente: Elaboración propia).

La Figura 67 muestra la correlación entre la permeabilidad y la porosidad (huecos), con el esfuerzo de compactación, donde se aprecia que ambos parámetros decrecen cuando el esfuerzo de compactación aumenta. Como puede observarse, el método giratorio emplea la carga más alta, resultando en valores de permeabilidad y huecos bajos, más que la mezcla de control CAX-1. Los métodos seccionado y varilla de apisonamiento demostraron altas permeabilidades, especialmente a menor compactación (menos golpes), sobrepasando

la mezcla CAX-1 en más de 37 veces. La compactación giratoria se alinea sobre el mismo esfuerzo de compactación ya que su carga es siempre constante, variando solamente el número de giros del ensayo, siendo la mezcla con mayor número de giros, GIR-1, la que demostró la menor permeabilidad y porosidad, y viceversa.

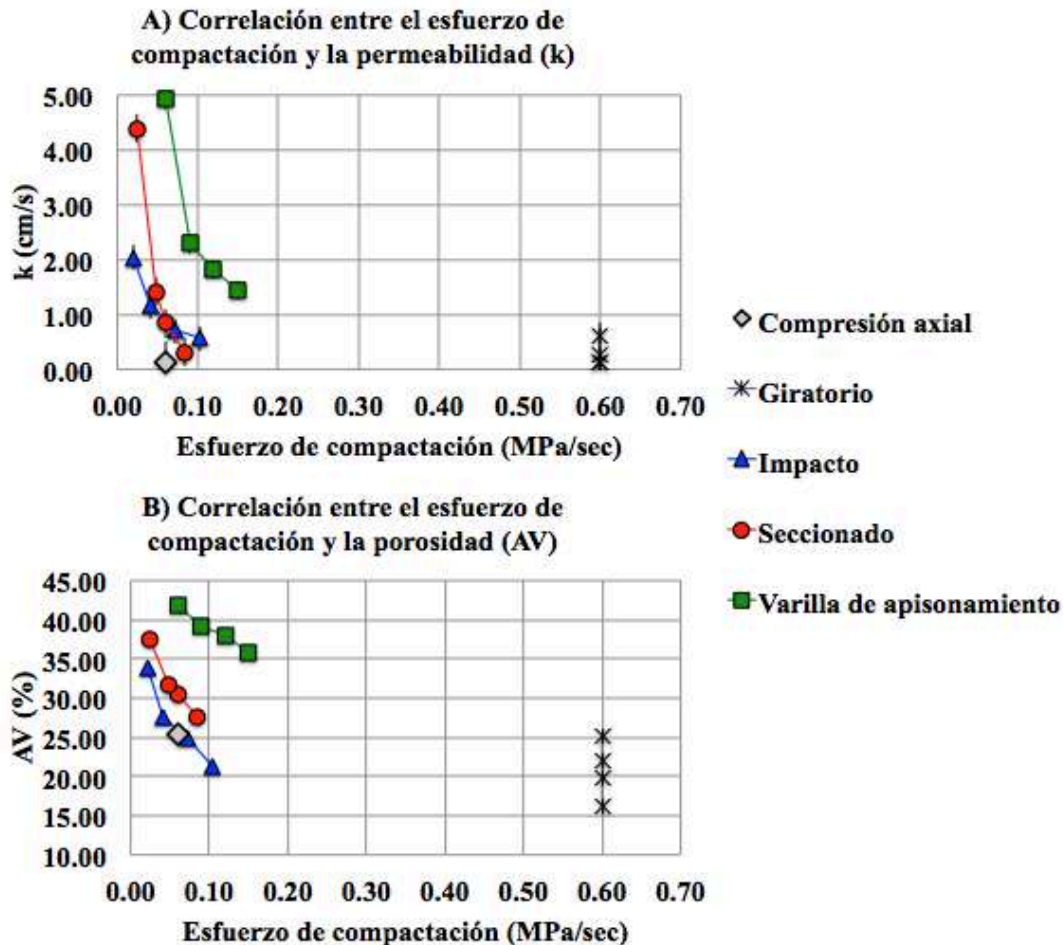


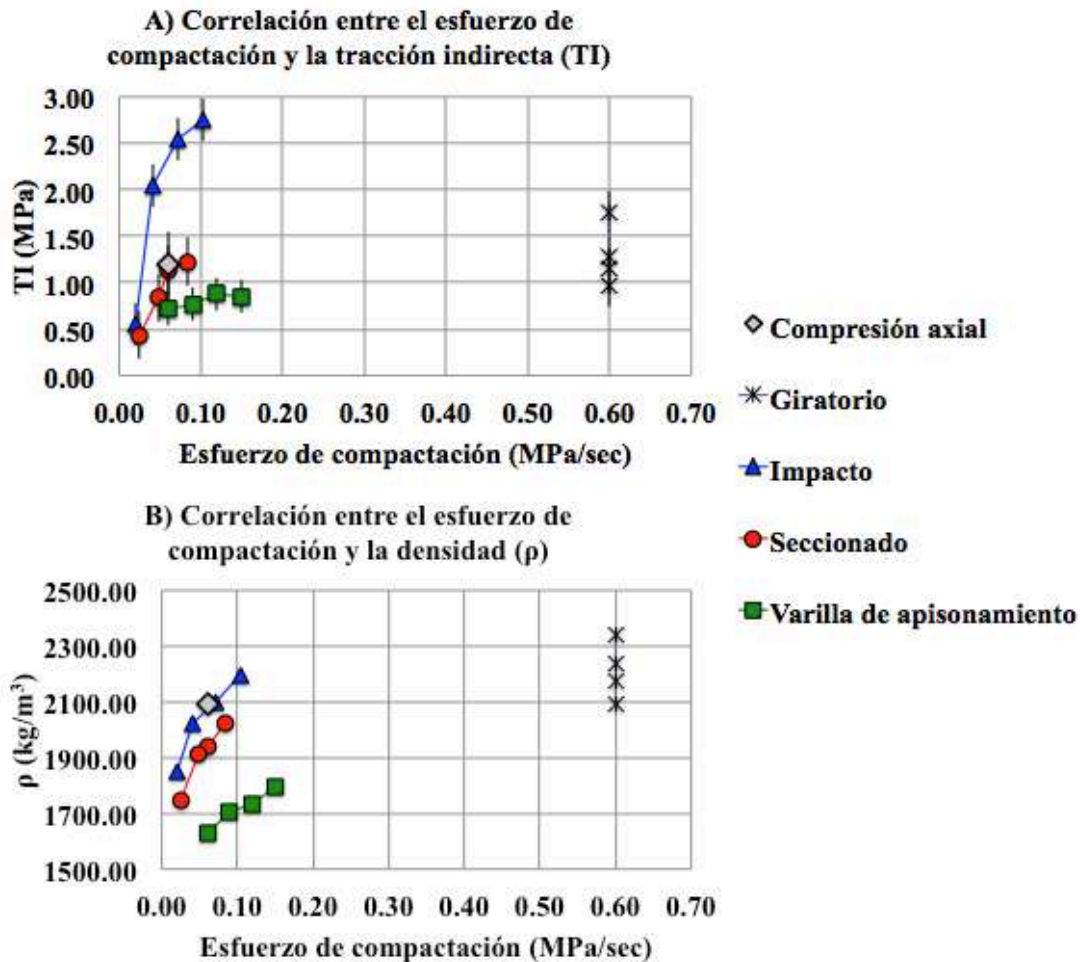
Figura 67. Estudio de métodos de compactación. Correlación entre el esfuerzo de compactación y la permeabilidad (k) y volumen de huecos (AV) para cada método de compactación evaluado (Fuente: Elaboración propia).

La mezcla CAX-1 demostró uno de los resultados más bajos de permeabilidad, superando solamente a la mezcla GIR-1. El esfuerzo empleado en el método de compactación axial pudo haber sido muy alto, acomodando las partículas de agregado de una mejor manera en la mezcla, disminuyendo la cantidad de huecos. Solamente las mezclas GIR-1, GIR-2 y GIR-3 tuvieron una cantidad de huecos baja, ya que la compactación giratoria emplea tanto la presión vertical como la acción giratoria, ejerciendo más esfuerzo. Sin

embargo, todas las mezclas cumplieron con el mínimo de permeabilidad requerida por normativas americanas de 100m/día (0.012cm/s) (Andres-Valeri et al. 2018).

#### 4.5.5. Análisis de resultados Mecánicos

En contraste con la permeabilidad y la porosidad, la densidad ( $\rho$ ) y la tracción indirecta (TI) aumentan cuando la compactación incrementa, como se aprecia en la Figura 68. El método giratorio demostró las densidades más altas, pero las mezclas IMP-1, IMP-2 e IMP-3 sobrepasaron su resistencia, empleando el método por impacto. La mezcla IMP-1 tuvo los valores de tracción indirecta más altos, por encima de la mezcla de Control CAX-1 en un 57%. Los métodos giratorio, impacto y compresión axial lograron resistencias sobre 1MPa, mientras que los métodos seccionado y varilla de apisonamiento no.



De acuerdo con los resultados demostrados en (Bonicelli, Arguelles, and Pumarejo 2016), el método por impacto otorga mezclas que pueden ser empleadas en vías urbanas de volumen mediano, ya que las mezclas IMP-1, IMP-2 e IMP-3 tuvieron valores de tracción indirecta sobre 1.90MPa. El método giratorio alcanza mezclas para vías urbanas de volumen bajo y estacionamientos, logrando valores de tracción indirecta entre 1.70-1.90MPa, como es el caso de la mezcla GIR-1. La mezcla GIR-2 puede ser aceptada para áreas peatonales, ya que logró resultados entre 1.20-1.50MPa. Similar con la mezcla SEC-1, del método seccionado.

#### 4.5.6. Análisis de la Varianza (ANOVA)

La hipótesis planteada es la probabilidad de obtener un valor mayor a 1.20, para la tracción indirecta, y mayor a 0.012 para la permeabilidad. Esto de acuerdo con el análisis previamente realizado en los apartados anteriores de la presente sección. De acuerdo a la Tabla 50, hay alrededor de un 50% de probabilidad de superar dichos valores, con un 95% de confianza. No es claro aquí tomar una decisión de qué método emplear, pero al determinar la importancia de cada método de compactación con el ANOVA, el método seccionado demuestra la mejor correlación entre permeabilidad y tracción indirecta, con un 33% de importancia. Los valores de permeabilidad tan altos de este método le permitieron conseguir este resultado, sumado al hecho de que sus resultados de tracción indirecta fueron promedios. Sin embargo, el método por impacto logró los valores de tracción indirecta más altos y aceptable permeabilidad, logrando el segundo lugar en importancia con 24.94%.

Tabla 50. Resultados del Análisis de la Varianza (ANOVA) para el estudio de métodos de compactación. Fuente: Elaboración propia.

Método de compactación	GL*	SCD*	p-valor		Importancia (%)
			TI	k	
Giratorio	3.00	0.67	0.50	0.50	21.77
Impacto	3.00	0.77	0.50	0.50	24.94
Seccionado	3.00	1.02	0.52	0.50	33.00
Varilla de apisonamiento	3.00	0.63	0.51	0.50	20.29

\*GL: Grados de Libertad, SCD: Suma de Cuadrados de las Desviaciones

Realizando el análisis simultáneo con todos los métodos de compactación, es posible obtener la influencia de los métodos de compactación en la permeabilidad y la

tracción indirecta. Como se aprecia en la Tabla 51, la permeabilidad tiene una importancia de 66.76%. Esto significa que la permeabilidad es el parámetro que más se afecta, ya sea en una forma positiva o negativa, por el método de compactación, y carga, que se aplica, en comparación con la tracción indirecta.

Tabla 51. *Resultados del Análisis de la Varianza (ANOVA) para obtener la influencia de los métodos de compactación en los ensayos realizados. Fuente: Elaboración propia.*

Ensayo	GL*	SCD*	Importancia (%)
Permeabilidad	15.00	1.87	66.76
Tracción indirecta	15.00	0.93	33.24

\*GL: Grados de Libertad, SCD: Suma de Cuadrados de las Desviaciones

Se determinó que hay una diferencia significativa entre los efectos producidos por los distintos métodos de compactación, ya que la F de Fisher calculada arrojó un resultado de 0.58, mientras que la F tabulada dio un valor de 3.26. Al ser mayor este último número que la F calculada, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ), que determina que no hay diferencia significativa, en este caso, entre los los métodos de compactación.

#### 4.5.7. Conclusiones Parciales

A continuación se presentan las conclusiones parciales extraídas del estudio de métodos de compactación:

- La compactación por impacto, que simula un rodillo compactador tambor, demostró los resultados mecánicos más altos, con una permeabilidad aceptable. El número de golpes empleado, acorde a la norma EN 12697-30, permite controlar la compactación de acuerdo a escenarios diferentes: Tráfico pesado, ligero y normal. Esto da lugar a un mejor control de los esfuerzos, conforme a las necesidades del pavimento. Además, éste método se asemeja más al que se emplea cuando se instala un pavimento de hormigón poroso.
- La compactación giratoria, que simula vibrocompactación, en apariencia, demostró una compactación muy buena. Sin embargo, los resultados mecánicos no fueron tan altos como los de la compactación por impacto, y su permeabilidad fue muy baja. Este método colmata casi por completo la superficie de las muestras debido a los giros empleados por el equipo.



- La compactación seccionada, que simula un rodillo compactador vibratorio, demostro superficies irregulares en las probetas. De hecho, estas mezclas llegaban a perder partículas de agregado debido a que la adhesión entre ellas no era lo suficientemente fuerte. Adicionalmente, al hacerse la compactación en 2 capas, la división entre ellas era muy notoria y la falla mecánica se presentó principalmente a través de esta línea. Por consiguiente, los resultados mecánicos fueron muy bajos.
- La varilla de apisonamiento, que simula un vibrador de hormigón, obtuvo los valores de permeabilidad más altos ya que este método tiende a acomodar la mezcla en el molde, más que a aplicar una fuerza para compactar. Esto dió como resultado mezclas con una altura mayor a la diseñada, con contenidos de huecos muy altos en consecuencia. Por consiguiente, los resultados mecánicos fueron muy bajos ya que los puentes de interconexión del mortero entre las partículas de agregado eran muy delgados y débiles.
- El método de compresión axial, que simula el efecto estático del rodillo, fue utilizado para la mezcla de Control, y se considera un procedimiento que permite controlar el contenido de huecos de diseño. Sin embargo, los resultados demostraron valores mecánicos y de permeabilidad muy bajos. Esto puede deberse a que el método se realiza a control de desplazamiento, más que a control de fuerza, donde la fuerza de compactación decrecía cuando se lograba la altura propuesta.

## 4.6. Absorción del sonido con distintos agregados

El presente apartado muestra un estudio, además de las propiedades mecánicas, hidráulicas y de seguridad, de la absorción del sonido que las mezclas de hormigón poroso pueden llegar a obtener. Para esto, se analizaron 3 tipos de agregado diferente: pórfido, basalto y caliza; así como 2 granulometrías: 4-8mm y 8-12mm, con el objetivo de ver la influencia del agregado y del tamaño que se utiliza en la absorción del sonido generado por la interacción entre los neumáticos de los vehículos y el pavimento. Además, se empleó el método de imágenes por resonancia magnética como propuesta alternativa al cálculo de la porosidad de las probetas.

### 4.6.1. Dosificaciones estudiadas

De acuerdo al material disponible en la Universidad de Bolonia (Italia), donde se realizó esta fase de la investigación, en la Tabla 52 se muestran las seis mezclas estudiadas, combinando agregados de pórfido, caliza o basalto, en granulometrías de 4-8mm o de 8-12mm. La dosificación utilizada fue la de la mezcla B-10. Esta decisión fue tomada por la disponibilidad de material, sumado al hecho de que los resultados de esta mezcla en el estudio de la determinación de la dosificación óptima sin aditivos fueron aceptables y en el laboratorio donde se llevó a cabo el estudio no se podía conseguir el material fino suficiente para otra mezcla diferente. Adicionalmente, las mezclas fueron compactadas por el método giratorio a 100 giros, teniendo un diámetro de 150mm y altura de 90mm, por cuestiones de dimensiones del dispositivo.

Tabla 52. Dosificaciones de mezclas empleadas para el ensayo de absorción del sonido (Fuente: Elaboración propia).

Mezcla	Material	Tamaño (mm)	s/c*	a/c**	C <sup>+</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	Ag <sup>++</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	W <sup>-</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	S <sup>-</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	VMA' <sup>+</sup> (%)	AV'' <sup>+</sup> (%)
POR-1	Pórfido	4-8	0.00	0.30	440.81	1540.71	147.65	0.00	47.00	20.00
BAS-1	Basalto	4-8	0.00	0.30	440.81	1540.71	147.65	0.00	47.00	20.00
CAL-1	Caliza	4-8	0.00	0.30	440.81	1540.71	147.65	0.00	47.00	20.00
POR-2	Pórfido	8-12	0.00	0.30	440.81	1540.71	147.65	0.00	47.00	20.00
BAS-2	Basalto	8-12	0.00	0.30	440.81	1540.71	147.65	0.00	47.00	20.00
CAL-2	Caliza	8-12	0.00	0.30	440.81	1540.71	147.65	0.00	47.00	20.00

\*s/c corresponde a la relación arena-cemento

\*\*a/c corresponde a la relación agua-cemento

+C corresponde a la cantidad de cemento

++Ag corresponde a la cantidad de árido grueso

-W corresponde a la cantidad de agua

--S corresponde a la cantidad de arena

'VMA corresponde a los huecos en el agregado mineral

''AV corresponde al volumen de huecos

#### 4.6.2. Resultados generales

A continuación se muestran los resultados obtenidos del ensayo de absorción del sonido en probetas de hormigón poroso, haciendo una correlación con resultados mecánicos, hidráulicos y superficiales. En la Tabla 53 se aprecian estos resultados. Además, se muestra la desviación estándar obtenida, ya que se realizaron 3 probetas por mezcla.

Tabla 53. Resultados de los diferentes ensayos realizados en el estudio de absorción del sonido. (Fuente: Elaboración propia).

Mezcla	AV* (%)	$\sigma$	TI** (MPa)	$\sigma$	k <sup>+</sup> (cm/s)	$\sigma$	CRD <sup>+</sup> seco	$\sigma$	CRD <sup>+</sup> húmedo	$\sigma$	NRC <sup>+</sup> (%)	$\sigma$
POR-1	21.93	1.05	3.24	0.00	0.22	0.06	0.79	0.02	0.75	0.02	11.15	0.00
BAS-1	22.73	1.94	2.78	0.00	0.23	0.14	0.76	0.03	0.72	0.04	10.80	0.00
CAL-1	16.14	0.15	2.55	0.00	0.06	0.02	0.78	0.02	0.72	0.03	11.76	0.00
POR-2	24.04	0.05	2.07	0.00	0.60	0.02	0.76	0.07	0.73	0.06	10.74	0.00
BAS-2	23.20	0.35	3.19	0.00	0.53	0.10	0.71	0.03	0.66	0.02	12.49	0.00
CAL-2	16.72	2.46	2.45	0.00	0.36	0.39	0.77	0.01	0.73	0.06	9.74	0.00

\*AV corresponde al volumen de huecos

\*\*TI corresponde a la tracción indirecta

\*k corresponde a la permeabilidad

\*CRD corresponde al coeficiente de resistencia al deslizamiento

\*NRC corresponde al coeficiente de absorción del sonido

#### 4.6.3. Análisis de resultados de Porosidad y Permeabilidad

Como se aprecia en la Figura 69, donde se muestra la correlación entre los valores de permeabilidad y contenido de huecos, a mayor granulometría, mayores valores de permeabilidad. Es de llamar la atención que el material calizo, sin importar la granulometría empleada, tuvo los valores de contenido de huecos más pequeños del total. Esto puede deberse a que las calizas, al triturarse, forman lajas que se rompen cuando se compacta la muestra, lo que hace que la granulometría se llegue a modificar y se colmaten los huecos. Aún así, la mezcla CAL-2 no tuvo valores de permeabilidad tan bajos. Sin embargo, la mezcla POR-2, hecha con pórfido, tuvo los valores de permeabilidad más altos de todos, seguido por la mezcla BAS-2. Pudiendo establecer que el material pórfido y el basalto permiten una mejor permeabilidad que el material calizo, bajo las mismas condiciones de diseño, permitiendo un mayor contenido de huecos, y la posibilidad de prolongar más la vida útil antes de la colmatación del pavimento.

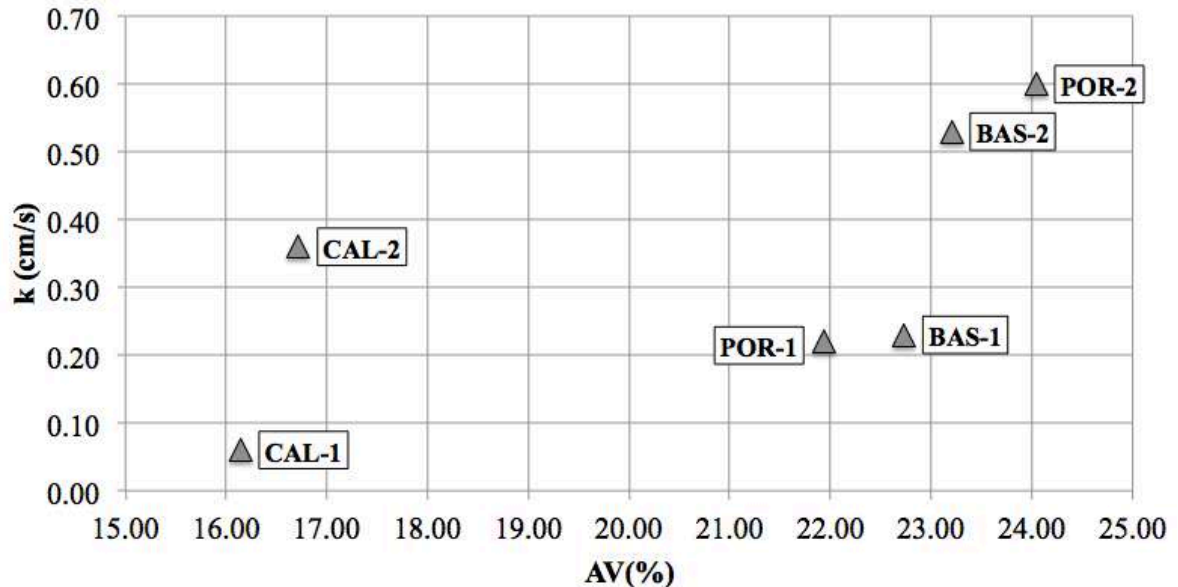


Figura 69. Medición de la absorción del sonido. Gráfico de correlación entre la permeabilidad ( $k$ ) y el volumen de huecos ( $AV$ ) del estudio de absorción del sonido (Fuente: Elaboración propia).

#### 4.6.4. Análisis de imágenes por Resonancia Magnética

Las imágenes por resonancia magnética para el cálculo de la porosidad de las probetas fueron realizadas para comparar granulometrías y tipo de agregado grueso. Adicionalmente, los porcentajes de porosidad son comparados con los obtenidos mediante la ecuación 15. Uno de los inconvenientes de este método es que no logra obtener imágenes cuando el material presenta propiedades magnéticas. Debido a esto, las probetas realizadas con basalto no pudieron ser ensayadas ya que contienen hierro. Además, por cuestiones de tiempo, y otros imprevistos, se logró realizar la toma de imágenes de las probetas hechas con pórfido y caliza con un tamaño 4-8mm solamente. Aún así, se considera que los resultados obtenidos ayudan a la comparación y toma de conclusiones, así como obtención de futuras líneas de investigación.

El ensayo consistió en obtener 10 imágenes por probeta, de 5mm de profundidad. La separación entre imágenes es de 1mm. Por lo que la profundidad fue de 60mm en total, a partir de la superficie de la probeta. Esto con la intención de evaluar la macrotextura en la superficie. Se requirió cortar las probetas para que tuvieran 10cm de diámetro.

En la Figura 70 se aprecia las imágenes de la superficie de ambas probetas ensayadas, en donde a primera instancia se aprecia que el lograr la imagen justo al iniciar la

probeta es complicado, principalmente debido a que el recipiente donde se introduce la probeta no es transparente y se tiene que colocar aproximadamente donde uno considera que inicia la probeta. La probeta en el recipiente se encuentra saturada de agua, y la imagen llega a abarcar parte de la película de agua en la superficie, es por eso que en las imágenes se ve una capa de agua (color azul y gris) muy grande, y al hacer el cálculo de la porosidad en esta zona, se obtiene una porosidad muy grande (obtenida de dividir los valores indicados en la imagen:  $n^{\circ}\text{voxel usati} / n^{\circ}\text{voxel} > 0$ ).

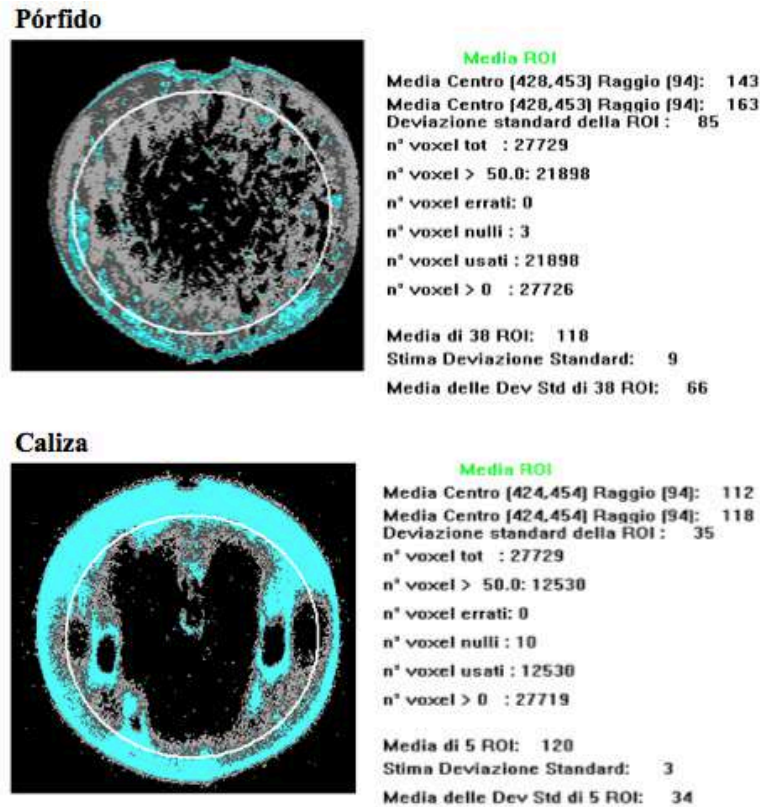


Figura 70. Imágenes por resonancia magnética de la capa superficial de las probetas hechas con material pórfido y caliza (Fuente: Elaboración propia).

En la Figura 71 se aprecian todas las imágenes obtenidas de cada probeta, tanto con material pórfido como con caliza. Se comienza con la capa superficial, y se va avanzando hacia el interior de la probeta. Se observa como a medida que se avanza hacia el interior de la probeta, la porosidad disminuye (la cantidad de color azul es cada vez menor), en ambos casos.

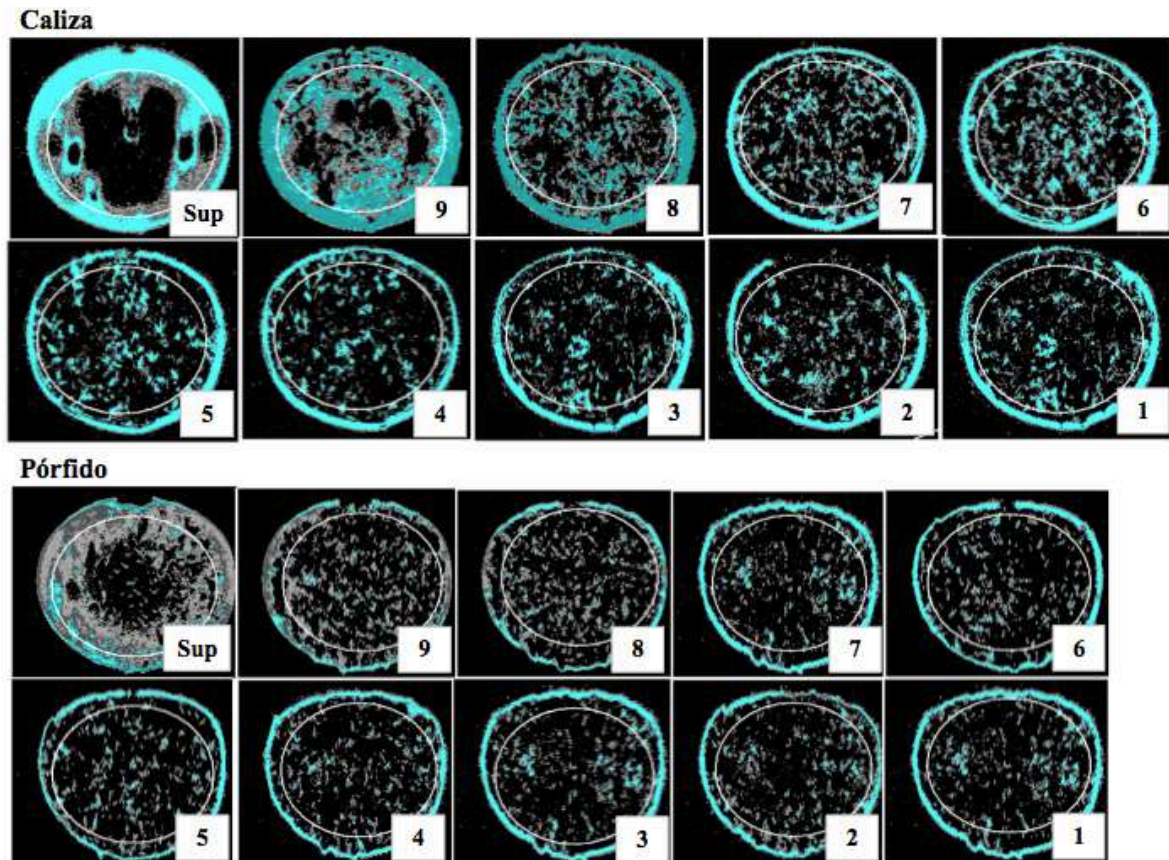


Figura 71. Imágenes por resonancia magnética de todas las capas de las probetas hechas con material pórfido y caliza (Fuente: Elaboración propia).

Esto se ve en la Tabla 54, donde se muestran las porosidades obtenidas en cada capa. Es importante recordar que las capas son de 5mm, con 1mm de espacio entre ellas. Considerando que las probetas tienen 90,mm de altura, los 30mm inferiores de las probetas no fueron medidos. En este caso, para obtener un cálculo más preciso de la porosidad, se planteó utilizar el obtenido por las capas 4, 3, 2 y 1, las cuales son las capas centrales de las probetas.

La capa “Sup” corresponde a la capa superficial, siendo el extremo que recibió los golpes de la compactación por el método de impacto. Se observa en la Tabla 53 que los valores en ambos agregados comienzan a parecerse a partir de la capa 5, donde es probable que las diferencias en las capas superiores obedezcan al tipo de agregado utilizado durante la compactación de la mezcla.

Tabla 54. Porosidades obtenidas con el software ARTS para la imagen de cada capa tomada en las probetas hechas con material pórfido y caliza (Fuente: Elaboración propia).

Capa	Pórfido (%)	Caliza (%)
Sup	78.98	45.20
9	51.39	70.55
8	50.03	42.14
7	37.06	40.77
6	27.36	35.52
5	25.15	24.14
4	18.36	18.52
3	17.23	20.54
2	17.11	21.58
1	18.89	14.47

La comparación entre las porosidades obtenidas con la ecuación 15 y la obtenida en las imágenes por resonancia magnética (IRM), se aprecia en la Tabla 55. Es posible observar que hay diferencias entre ambas porosidades, de 18.38% y 14.06% para el pórfido y la caliza respectivamente. Esto se debe a diversos factores, como el hecho de que en las probetas con IRM se tomaron solamente las medidas centrales de la probeta. El cálculo puede ser más exacto y, posiblemente, parecido entre ambos, si se llega a tener la porosidad en la probeta completa en el método de imágenes por resonancia magnética.

Tabla 55. Porosidades obtenidas con el software ARTS para la imagen de cada capa tomada en las probetas hechas con material pórfido y caliza (Fuente: Elaboración propia).

Mezcla	AV (%)		Diferencia (%)
	Ec. 15	IRM	
POR-1	21.93	17.90	18.38
CAL-1	16.14	18.78	14.06

#### 4.6.5. Análisis de resultados Mecánicos

En la Figura 72 se puede apreciar la correlación de contenido de huecos con los valores de tracción indirecta. Aquí se destaca el comportamiento de la mezcla BAS-2, donde tuvo uno de los resultados mecánicos más altos, junto con sus valores de permeabilidad. En el caso del pórfido, la mezcla POR-2 tuvo los valores de tracción indirecta más bajos del total, que pueden deberse a su alta porosidad, en comparación con el resto de las mezclas. La mezcla POR-1 tuvo los valores mecánicos más altos del total, pero esto se debe a la compactación de la mezcla, que permitió un contenido de huecos no tan alto, con puentes de mortero que unen al agregado más cortos y fuertes. El basalto, con

ambas granulometrías, tuvo valores mecánicos altos, por lo que se puede establecer que este material es de los mejores al momento de diseñar mezclas porosas.

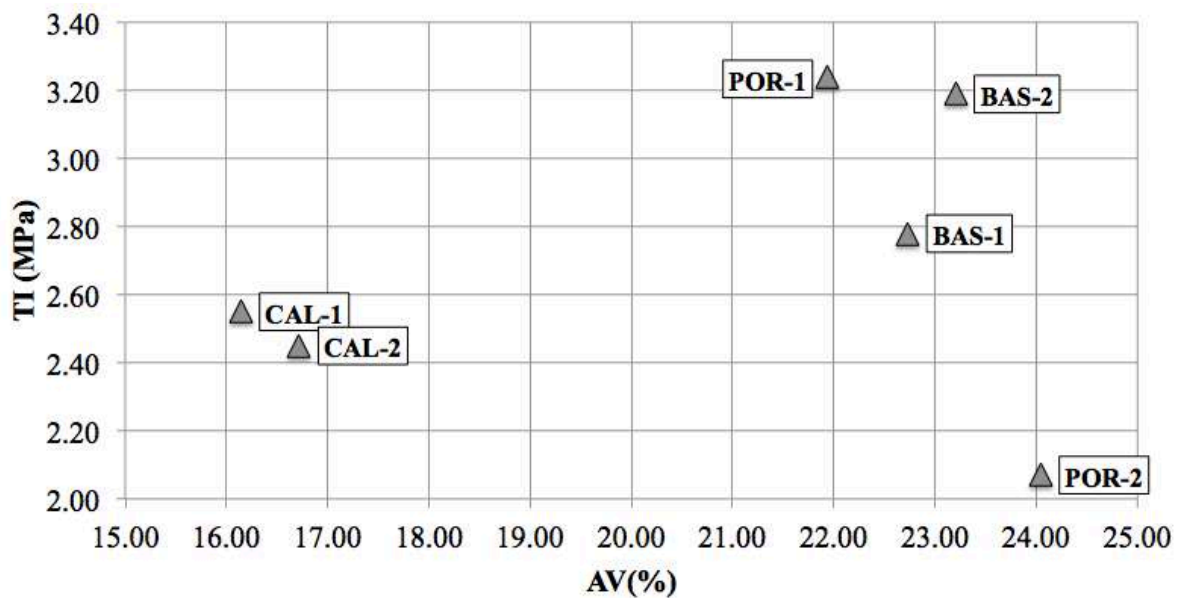


Figura 72. Gráfico de correlación entre la tracción indirecta (TI) y el volumen de huecos (AV) del estudio de absorción del sonido (Fuente: Elaboración propia).

El comportamiento del material calizo, por el contrario, demostró que resiste menos la compactación empleada, y sus mezclas se colmatan de una forma más rápida. Esto se aprecia en sus valores de permeabilidad y de contenido de huecos, y, a pesar de que sus valores de tracción indirecta fueron buenos en general, fueron de los más bajos del total.

#### 4.6.6. Análisis de resultados Superficiales

En la Figura 73 se aprecia la correlación entre los valores del coeficiente de resistencia al deslizamiento bajo condiciones secas y húmedas. Por el contrario que con los resultados mecánicos y de permeabilidad, la mezcla BAS-2 demostró los valores de CRD más bajos en ambas condiciones, seguido de la mezcla BAS-1, aunque esta última tuvo resultados parecidos al resto de las mezclas, con alrededor de un 7% mayor fricción que la mezcla BAS-2. Aquí el tipo de material determina la resistencia a la fricción que la mezcla tendrá, sumado a la porosidad resultante. La mezcla BAS-2, al tener una porosidad alta, en comparación con el resto, tiene menos área de contacto en su superficie con el péndulo del ensayo de fricción. Esto hace que el péndulo conserve su energía de movimiento por mayor tiempo y tarde más en detenerse, dando un CRD más bajo. Aún así, los valores de esta



mezcla fueron aceptables, pero alrededor de un 11% más bajos que la mezcla POR-1 (quien tuvo los valores más altos del total), bajo ambas condiciones.

Dicho lo anterior, una granulometría menor, como la 4-8mm, ayuda a tener un área de contacto mayor en la superficie, incrementando la fricción, como es el caso en las mezclas POR-1 y CAL-1, quienes fueron las dos más altas del total. Esta última debe su gran resistencia al deslizamiento a su bajo contenido de huecos.

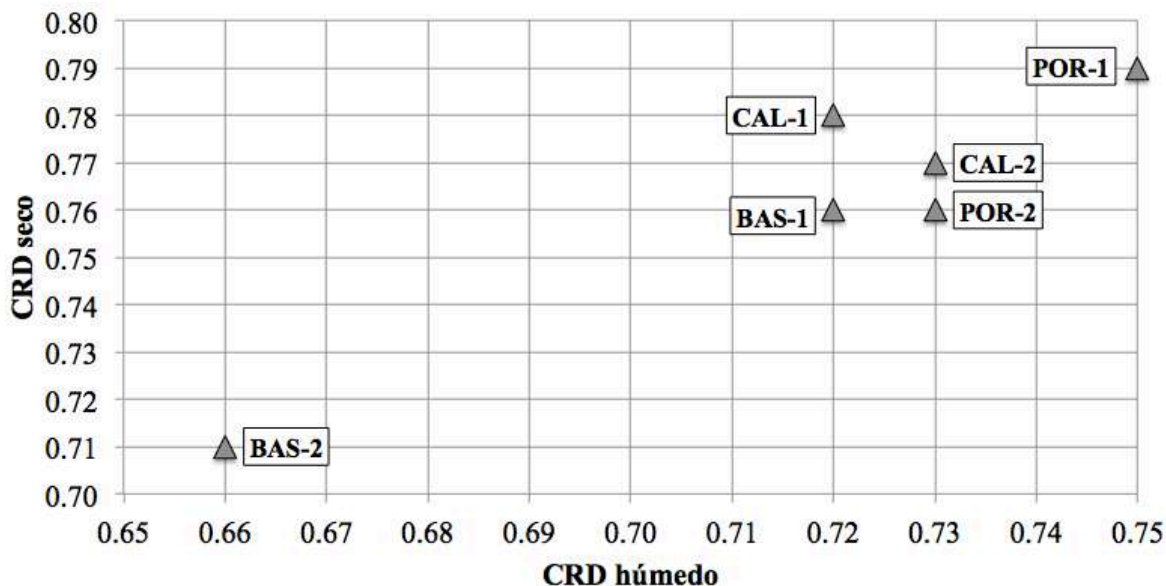


Figura 73. Medición de la absorción del sonido. Gráfico de correlación entre el coeficiente de resistencia al deslizamiento bajo condiciones secas ( $CRD_{seco}$ ) y el coeficiente de resistencia al deslizamiento bajo condiciones húmedas ( $CRD_{húmedo}$ ), del ensayo de absorción del sonido (Fuente: Elaboración propia).

#### 4.6.7. Análisis de resultados de Absorción del Sonido

La Tabla 56 muestra los resultados del coeficiente de absorción del sonido obtenidos del ensayo en general. Aquí se aprecia la absorción del sonido ( $\alpha$ ) a diferentes frecuencias. La razón de limitar las lecturas hasta los 1600Hz se debe a que a partir de esta frecuencia las lecturas de la absorción del sonido ( $\alpha$ ) se mantienen constantes. La diferencia entre la absorción del sonido,  $\alpha$ , y el coeficiente de absorción del sonido, NRC, es que este último se representa en porcentaje, mientras que el primero es un tanto por uno. Es importante mencionar que para la realización del ensayo, las probetas tuvieron que cortarse para tener un diámetro de 10cm, por cuestiones de dimensiones del dispositivo.

Tabla 56. Absorción del sonido ( $\alpha$ ) obtenidos en el ensayo de absorción del sonido . (Fuente: Elaboración propia).

Frecuencia (Hz)	Absorción del sonido ( $\alpha$ )					
	POR-1	BAS-1	CAL-1	POR-2	BAS-2	CAL-2
125	0.02	0.09	0.04	0.02	0.17	0.07
160	-0.02	0.08	0.01	0.00	0.09	0.05
200	0.01	0.11	0.01	0.05	0.15	0.10
250	0.04	0.10	0.02	0.04	0.15	0.13
315	0.04	0.07	0.02	0.04	0.06	0.07
400	0.04	0.04	0.01	0.06	0.04	0.02
500	0.05	0.03	0.04	0.11	0.03	-0.01
630	0.07	0.03	0.10	0.13	0.09	0.00
800	0.12	0.05	0.18	0.14	0.13	0.06
1000	0.16	0.13	0.23	0.14	0.13	0.07
1250	0.20	0.16	0.20	0.12	0.20	0.14
1600	0.20	0.17	0.18	0.14	0.20	0.19

La Figura 74 muestra cómo aumenta y disminuye la absorción del sonido a medida de la frecuencia se va incrementando en cada una de las mezclas realizadas. De acuerdo a lo establecido por los especialistas, la absorción del sonido en pavimentos se centra entre los 600 y 800Hz de frecuencia. Tomando en consideración la afirmación anterior, se puede establecer que la mezcla POR-2 (Pórfido 8-12mm), es la que proporciona los resultados más constantes dentro de esos parámetros de frecuencia, pudiendo así, considerarse como la mejor cuando se trata de minimizar el sonido en los pavimentos.

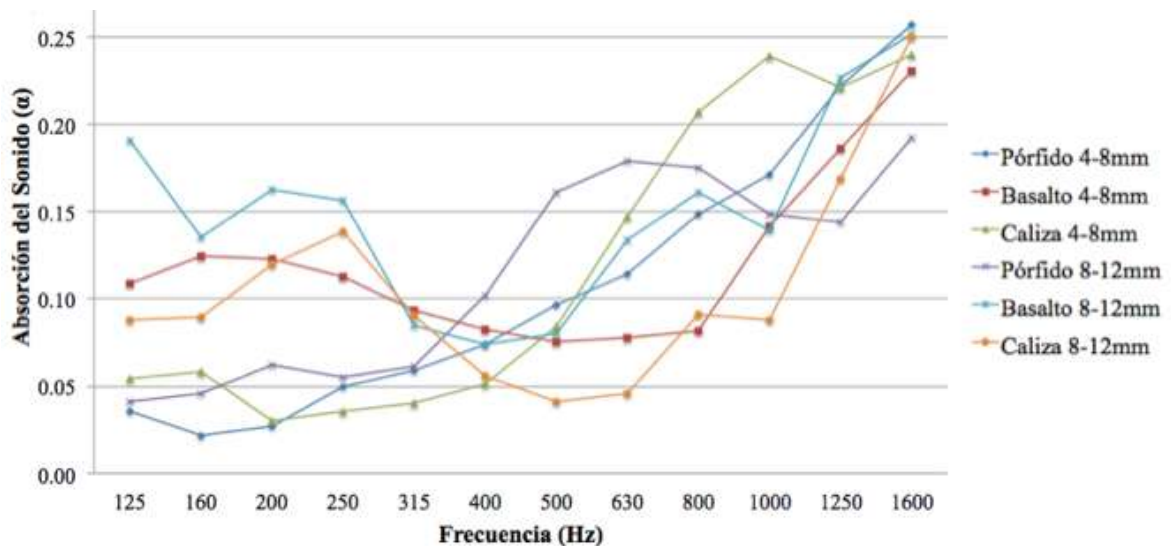


Figura 74. Medición de la absorción del sonido. Gráfico de la absorción del sonido a distintas frecuencias para cada mezcla realizada en el estudio de la medición de absorción del sonido (Fuente: Elaboración propia).

Empleando la ecuación 49, utilizada por algunos autores (Khankhaje et al. 2017; Sukontasukkul 2009) se puede obtener un coeficiente de absorción del sonido (NRC) promedio, donde cada  $\alpha$  representa la absorción del sonido a una determinada frecuencia. Para la absorción del sonido a 2000Hz, se empleó el resultado obtenido a 1600Hz, ya que, como se mencionó anteriormente, a partir de esta frecuencia los resultados eran constantes.

$$NRC = \left( \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} \right) * 100 \quad (49)$$

Los resultados obtenidos del coeficiente de absorción del sonido se aprecian en la Tabla 53, donde la mezcla que tuvo una mayor absorción fue la mezcla BAS-2. Esto se debe a su capacidad de absorción elevada (en comparación con el resto de las mezclas) entre las frecuencias de 125-315Hz y de 1000Hz en adelante. Por consiguiente, dependiendo del especialista que analice los datos, en términos generales la mezcla BAS-2 representa los mejores resultados, mientras que tomando en cuenta el margen de frecuencias considerado para un pavimento (600-800Hz), la mezcla POR-2 otorga los mejores resultados. A pesar de esto, la granulometría 8-12mm, por la mayor porosidad que da a la probeta desde la superficie hacia el interior, tiene una mejor capacidad de absorción que la granulometría 4-8mm.

#### 4.6.8. Conclusiones Parciales

Las conclusiones parciales que se obtienen del estudio de la absorción del sonido, son las siguientes:

- A mayor tamaño de la granulometría empleada, los valores de permeabilidad son más altos, sin importar el material empleado como agregado, puesto que a igualdad de dosificación, se generan más huecos que absorben el sonido.
- El material calizo representó los valores más bajos de permeabilidad debido a la baja porosidad que le dió a las mezclas. Esto se debe a que el material calizo, al triturarse, forman lascas que se rompen cuando se compacta la muestra, lo que hace que la granulometría se llegue a modificar y se colmaten los huecos

- La mezcla BAS-2 representó uno de los valores más altos tanto de permeabilidad como de tracción indirecta, concluyendo que el basalto llega a otorgar la mejor correlación de estas dos propiedades en mezclas de hormigón poroso. Mientras la mezcla POR-2 tuvo los valores de tracción indirecta más bajos debido a la alta porosidad que tuvo en su estructura interna.
- Las imágenes por resonancia magnética son una herramienta eficaz que permiten tener un cálculo más preciso de la porosidad con la que cuentan las mezclas de hormigón poroso. Sin embargo, la utilización de otras herramientas de análisis permitirían hacer una integración de las imágenes por resonancia magnética en una sola en 3D, permitiendo entender mejor la interconexión de los poros y, así, el comportamiento mecánico e hidráulico que presentan.
- Tomando en cuenta los parámetros de frecuencia entre 600-800Hz con los que se dice un pavimento trabaja normalmente, la mezcla POR-2 representa los valores más estables del coeficiente de absorción del sonido.
- En general, se estuvo en un rango de 0.04-0.2 de coeficiente de absorción, donde la literatura analizada se centró en un rango desde 0.01 hasta 0.91. A pesar de que se está dentro del rango, y de que los resultados parecen ser bajos, un coeficiente entre 0.1-0.2 se considera aceptable.
- En promedio, la mezcla BAS-2 representó los mejores valores del coeficiente de absorción del sonido, debido a su buena capacidad de absorción a frecuencias muy bajas y muy altas, fuera del intervalo 600-800Hz donde la POR-2 resultó mejor. Con esto se puede concluir que el tipo de agregado influye en la absorción del sonido en el sentido de que la forma y tamaño de éste determina la composición de los huecos de la mezcla.

## 4.7. Estudio de geopolímeros

El presente apartado realiza un estudio de geopolímeros como materiales alternativos al uso de cemento, con el objetivo principal de evaluar la metodología PCD con otros materiales diversos y ver su funcionalidad.

### 4.7.1. Trabajabilidad de los geopolímeros

Los geopolímeros tienen un comportamiento distinto al hormigón. Mientras el hormigón tiende a formar puentes de conexión entre las partículas de agregado, los geopolímeros tienden principalmente a cubrir el agregado. Esto se aprecia en la Figura 75. En una mezcla porosa, si se utiliza la misma dosificación para ambos materiales, la mezcla con geopolímeros se encontraría más colmatada que la de hormigón. Es por esto que antes de comenzar a realizar mezclas con geopolímeros, y decidir la dosificación a utilizar, se estudiaron diferentes dosificaciones, siempre con la metodología PCD.

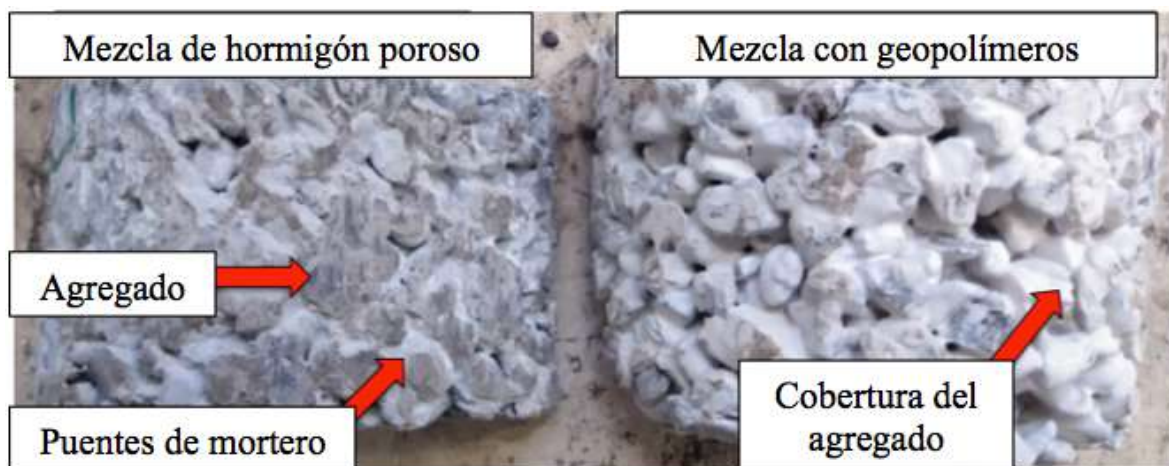


Figura 75. Estudio de geopolímeros. Comportamiento del mortero en mezclas de hormigón poroso y mezclas con geopolímeros (Fuente: Elaboración propia).

#### 4.7.1.1. Determinación de la porosidad y huecos en el agregado mineral a utilizar

El porcentaje de huecos de diseño y el porcentaje de huecos en el agregado mineral condicionan las cantidades de mortero y agregado en la mezcla. Por esta razón, se evaluaron 2 diferentes porcentajes de huecos en el agregado mineral y 2 de contenido de huecos totales, en combinación. En la Figura 76 se aprecian las diferentes mezclas evaluadas.

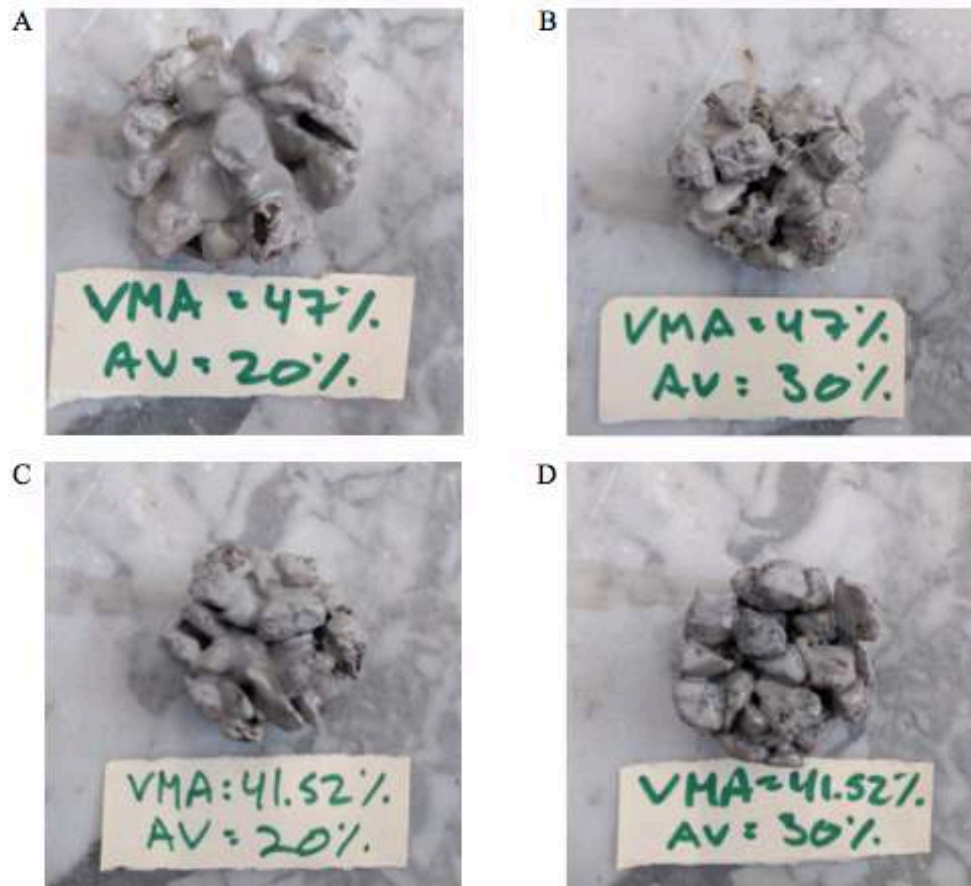


Figura 76. Estudio de geopolímeros. Diferentes dosificaciones propuestas con la metodología PCD para las mezclas elaboradas con geopolímeros, variando la cantidad de huecos en el agregado mineral (VMA) y el volumen de huecos (AV) (Fuente: Elaboración propia).

Se puede apreciar que, un porcentaje de huecos en el agregado mineral de 47% con un porcentaje de huecos en mezcla (AV) del 20%, colmata casi por completo la mezcla, como se aprecia en la Figura 76A. Esta dosificación es la que se considera mejor cuando de hormigón poroso se trata. Sin embargo, al observar las imágenes de la Figura 76, se observa que, al utilizarse geopolímeros, es mejor incrementar el volumen de huecos en mezcla y disminuir el porcentaje de huecos en el agregado mineral. El porcentaje utilizado de huecos es a consideración, siendo recomendable no sobrepasar los parámetros que se encuentran en la literatura acerca de los huecos en pavimentos de hormigón poroso. La cantidad de huecos en el agregado mineral viene condicionada por el ensayo de porosidad de los agregados descrito en la normativa EN-1097-3:1999.

Este ensayo puede realizarse de manera compactada y no compactada, obteniendo dos valores de huecos en el agregado mineral, considerados los parámetros dentro de los

cuales se puede elegir un valor para dosificar una mezcla porosa con la metodología PCD. Es por ello que se evaluaron dos porcentajes de huecos en el agregado mineral (41.52% y 47%), y dos porcentajes de huecos en mezcla (uno estándar de 20% y otro de 30%) antes de elegir qué parámetros emplear para diseñar mezclas porosas con geopolímeros. Finalmente, se decidió utilizar la dosificación presentada en la Figura 76D, con un porcentaje de huecos en el agregado mineral de 41.25% y 30% de huecos en mezcla.

#### **4.7.1.2. Caracterización del mortero de geopolímeros**

Se evaluaron 3 mezclas de geopolímeros diferentes: una con 100% de metacaolín activado, otra sustituyendo 50% de metacaolín con filler de basalto, y otra reemplazando el 75% de metacaolín con filler de basalto. Para caracterizar el mortero, tres cubos de 40x40x40mm fueron elaborados para cada mezcla y fueron evaluadas a 7 y 21 días de curado. El curado en mezclas con geopolímeros se realizó introduciendo las probetas en un horno a 70°C por un tiempo de 12 horas. Después de ese tiempo, las probetas reposaron a temperatura ambiente, cubiertas en plástico, por un tiempo de 7 y 21 días.

Al no haber normativa para materiales de geopolímeros, las propiedades mecánicas se analizan generalmente mediante el ensayo de fuerza a compresión de probetas cúbicas, de acuerdo con la norma EN 1051-11. Como se aprecia en la Figura 77, los valores parecen ser constantes a partir del día 7 hasta el día 21 de curado en la mezcla con 100% metacaolín. Para el resto de las mezclas hay una variación alrededor de 10Mpa. La mezcla con 25% metacaolín y 75% filler de basalto tiene un resultado muy bajo a los 21 días de curado debido a la poca cantidad de metacaolín, pero en términos generales, las mezclas parecen cumplir con su tiempo de curado a los 7 días.

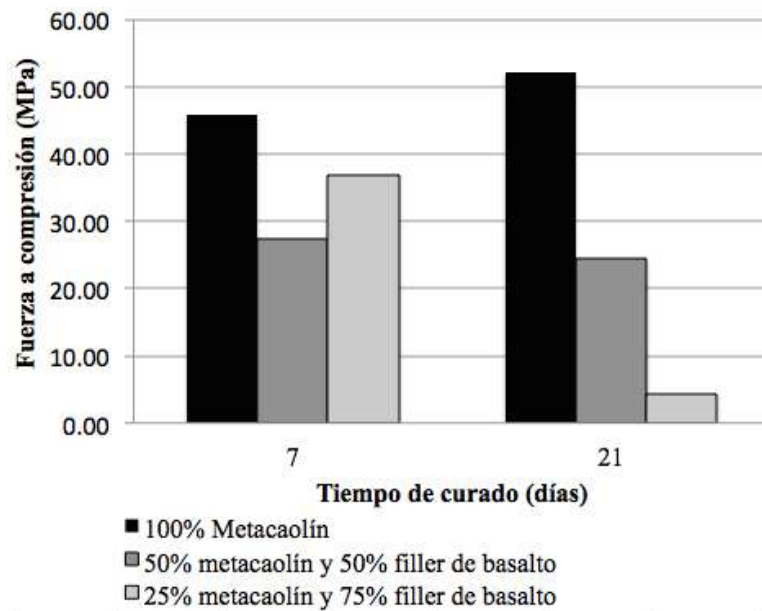


Figura 77. Estudio de geopolímeros. Fuerza a compresión de mezclas con geopolímeros después de 7 y 21 días de curado (Fuente: Elaboración propia).

#### 4.7.2. Dosificaciones estudiadas

Partiendo de la decisión de porcentajes a emplear de huecos en el agregado mineral y en mezcla, explicada en el apartado anterior, se diseñaron las mezclas que se aprecian en la Tabla 57. La mezcla MET-1 consiste en un 100% de metacaolín (MK), la mezcla MET-2 contiene 50% metacaolín y 50% basalto (Bas), y la mezcla MET-3 se compone de un 25% de metacaolín y 75% de basalto. Para que el metacaolín reaccionara, con la intención de incrementar la capacidad mecánica de la mezcla, el agua se sustituye por una combinación de silicato de sodio (SS) e hidróxido de sodio (SH) en una relación de 3:1.

Tabla 57. Dosificaciones de mezclas con geopolímeros empleadas con la metodología PCD (Fuente: Elaboración propia).

Mezcla	Tamaño (mm)	Ag* (kg/m³)	Material cementicio (P)		Líquido reactivo (A)		A/P**	VMA' (%)	AV'' (%)
			MK** (kg/m³)	Bas+ (kg/m³)	SS++ (kg/m³)	SH (kg/m³)			
MET-1	5-10	1586.84	143.94	0.00	106.10	35.43	0.98	41.25	30.00
MET-2	5-10	1586.84	74.29	74.29	109.07	36.36	0.98	41.25	30.00
MET-3	5-10	1586.84	37.61	113.13	110.37	36.73	0.98	41.25	30.00

\*Ag corresponde a la cantidad de árido grueso

\*\*MK corresponde a la cantidad de metacaolín

+Bas corresponde a la cantidad de basalto

''AV corresponde al volumen de huecos

''A/P corresponde a la relación líquido reactivo-material cementicio (SS+SH/MK+Bas)

\*SH corresponde a la cantidad de hidróxido de sodio

SH corresponde a la cantidad de hidróxido de sodio

VMA corresponde a los huecos en el agregado mineral

Las mezclas se compactaron con el dispositivo Marshall, a 35 golpes por un solo lado, y para su curado se introdujeron en un horno a 70°C por 12 horas, de acuerdo a la



receta sugerida en investigaciones previas (Tataranni et al. 2018). Posterior a eso, estuvieron 21 días en reposo a temperatura ambiente.

También, se realizaron otras dos mezclas adicionales con cemento, pero sustituyendo cierta cantidad del mismo con metacaolín, además de una mezcla de control solamente con cemento. Estas tres mezclas también fueron compactadas mediante el dispositivo Marshall a 35 golpes por un lado, y estuvieron en curado por un periodo de 28 días. La Tabla 58 muestra estas dosificaciones, donde la mezcla CEM-1 corresponde a un 95% de cemento y 5% de metacaolín, y la mezcla CEM-2 a un 90% de cemento y un 10% de metacaolín. La mezcla de Control contiene 100% cemento.

Tabla 58. Dosificaciones de mezclas de hormigón poroso sustituyendo un porcentaje de cemento con metacaolín (Fuente: Elaboración propia)

Mezcla	Tamaño (mm)	Ag* (kg/m <sup>3</sup> )	C** (kg/m <sup>3</sup> )	MK <sup>+</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	W <sup>++</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	a/c	VMA' (%)	AV'' (%)
Control	5-10	1431.64	440.55	0.00	149.51	0.30	47.00	20.00
CEM-1	5-10	1431.64	415.73	21.89	148.40	0.30	47.00	20.00
CEM-2	5-10	1431.64	390.97	43.44	147.47	0.30	47.00	20.00

\*Ag corresponde a la cantidad de árido grueso

\*\*C corresponde a la cantidad de cemento

+MK corresponde a la cantidad de metacaolín

++W corresponde a cantidad de agua

a/c corresponde a la relación agua-cemento (W/ C+ MK)

VMA corresponde a los huecos en el agregado mineral

AV corresponde al volumen de huecos

### 4.7.3. Resultados generales

La Tabla 59 muestra los resultados obtenidos del ensayo de tracción indirecta y permeabilidad en las mezclas con geopolímeros.

Tabla 59. Resultados de los diferentes ensayos realizados con las mezclas con geopolímeros. Fuente: Elaboración propia.

Mezcla	AV* (%)	$\sigma$	TI** (MPa)	$\sigma$	k <sup>+</sup> (cm/s)	$\sigma$
<b>Control</b>	19.72	0.18	2.31	0.92	0.14	0.00
<b>CEM-1</b>	20.18	0.86	2.83	0.60	0.29	0.07
<b>CEM-2</b>	20.59	0.39	2.23	1.03	0.14	0.03
<b>MET-1</b>	35.88	0.02	1.33	0.00	3.53	0.00
<b>MET-2</b>	35.21	0.14	1.08	1.38	2.58	0.00
<b>MET-3</b>	34.15	0.95	0.65	0.88	2.37	0.00

\*AV corresponde al volumen de huecos

\*\*TI corresponde a la tracción indirecta

+k corresponde a la permeabilidad

Al mismo tiempo, se realizó el ensayo a tracción indirecta en las mezclas con geopolímeros que no contenían cemento, una vez sometidas al ensayo de permeabilidad, y

sin haberles realizado el ensayo, para observar si el paso del agua generaba alguna alteración en los resultados de estos materiales. Estos resultados se aprecian en la Tabla 60. Finalmente, se muestra la desviación estándar de los resultados, al haberse realizado 3 probetas por mezcla.

Tabla 60. Resultados de tracción indirecta (TI) de las mezclas con geopolímeros antes y después del ensayo de permeabilidad. Fuente: *Elaboración propia.*

Mezcla	TI (MPa)	TI después de permeabilidad (MPa)	$\Delta$ IT (%)
MET-1	1.33	1.10	16.67
MET-2	1.08	0.65	40.13
MET-3	0.65	0.45	31.37

#### 4.7.4. Análisis de resultados de Porosidad y Permeabilidad

Los resultados hidráulicos de las mezclas con geopolímeros se pueden apreciar en la Tabla 59. Se puede destacar, en un inicio, que el método de compactación empleado no fue muy adecuado, ya que el contenido de huecos obtenido en las mezclas con cemento y metacaolín fue muy bajo, menor al 15%. Sin embargo, presentaron valores de permeabilidad razonables, al estar por encima del mínimo requerido por las especificaciones americanas de 0.012cm/s. En particular, se puede decir que el sustituir un 5% de cemento con metacaolín ayuda a incrementar la capacidad hidráulica en un 51.72%, con respecto a la mezcla de control. Un 10% de metacaolín en la mezcla no representó una mejoría en este ensayo, aunque el contenido de huecos incrementó en un 1.20%.

Con el resto de las mezclas, al haber sido diseñadas para un 30% de huecos, se obtuvieron valores de permeabilidad muy elevados, como se aprecia en la misma Tabla 59. Esto se debe en gran medida a que al variar tanto la cantidad de contenido de huecos en mezcla como de huecos en el agregado mineral en el diseño de la mezcla, se incrementó la cantidad de árido grueso, y por consiguiente la compactación de las probetas resultó en una mayor porosidad y gran permeabilidad.

Finalmente, se puede apreciar en los resultados que el añadir basalto a la mezcla, se cambia por completo la trabajabilidad. Este material hace que la mezcla sea más líquida, y por consiguiente que se colmate, por lo que las mezclas MET-2 y MET-3 tuvieron valores de permeabilidad en un 26.93% y 32.74% menores que la mezcla MET-1.

#### 4.7.5. Análisis de resultados Mecánicos

En términos mecánicos, como se aprecia en la Tabla 59, sustituir 5% de cemento con metacaolín logra incrementar la capacidad mecánica hasta en un 18.37%, haciendo que la mezcla CEM-1 tuviera los resultados más altos tanto en términos mecánicos como hidráulicos. El incrementar la cantidad de metacaolín en un 10%, en la mezcla CEM-2, decrece la fuerza en un 3.46%, en comparación con la mezcla de control.

En las mezclas diseñadas únicamente con geopolímeros con 30% de contenido de huecos, la resistencia mecánica no fue tan alta como se esperaba, en comparación con las mezclas con cemento, ya que tuvieron menos de la mitad de capacidad. Sin embargo, al ser estas mezclas puramente experimentales, se considera que el diseñarlas con una menor cantidad de contenido de huecos, incrementará su resistencia considerablemente, siempre siendo mayor que 20%. Es importante recordar que un 20% de contenido de huecos en mezclas con metacaolín y líquido reactivo tiende a colmatar la mezcla debido al comportamiento de este material, como se ha explicado, por lo que el ajuste de permeabilidad y resistencia en este tipo de mezclas resulta más complicado que en las mezclas con cemento.

Además, el basalto añadido en las mezclas en sustitución del metacaolín tiende a disminuir la capacidad mecánica también, al disminuir la fuerza de la mezcla MET-2 y la mezcla MET-3, en un 18.30% y 51.91%, respectivamente. La trabajabilidad de la mezcla cambia mucho con el basalto, haciéndola más líquida, por lo que no se recomienda utilizar los mismos parámetros de diseño de la mezcla MET-1 cuando se pretende utilizar basalto.

#### 4.7.6. Conclusiones Parciales

De acuerdo a los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones parciales de estudio experimental de mezclas de hormigón poroso con geopolímeros:

- Sustituir un 5% de cemento por metacaolín representó un incremento del 18.37% y 51.72% en su resistencia mecánica y permeabilidad respectivamente, en comparación con la mezcla de control, ya que el metacaolín, al no estar activado, es menos adhesivo que el cemento, pero, al mismo tiempo, su comportamiento es

diferente al del cemento, donde el metacaolín tiende a cubrir el agregado y el cemento a formar puentes de interconexión.

- Incrementar esta sustitución de cemento por metacaolín en un 10% se considera un exceso de este último material, ya que, en términos mecánicos, la resistencia disminuyó en un 3.46%, si bien la permeabilidad quedó igual.
- A pesar de que el método de compactación empleado redujo el contenido de huecos considerablemente, los resultados de permeabilidad obtenidos cumplen las especificaciones americanas mínimas de 100m/día (aproximadamente 0.012cm/s).
- Cuando se realizan mezclas porosas únicamente con geopolímeros (metacaolín activado con un líquido reactivo) con la metodología PCD, se recomienda proponer un contenido de huecos mayor al 20% y, de ser posible, menor al 30%. En este caso se empleó un contenido de huecos de 30% y, aunque sus resultados mecánicos fueron buenos, fueron menores a los de la mezcla de control realizada únicamente con cemento.
- El añadir basalto en las mezclas porosas con geopolímeros, en sustitución del metacaolín, decrece tanto la capacidad mecánica como la permeabilidad considerablemente.

#### **4.8. Análisis multi-criterio**

Como complemento a los estudios realizados y expuestos hasta el momento, se aplicaron herramientas de análisis multi-criterio a todos los resultados con el objetivo de conocer la mejor dosificación posible.

##### **4.8.1. Análisis de cuestionarios para ponderación de criterios**

Antes de entrar en detalle con el análisis de mezclas porosas, se consideró importante mostrar, para efectos de un mejor entendimiento de la presente tesis de investigación, los resultados obtenidos del análisis de los cuestionarios realizados a expertos, para el análisis multi-criterio empleado en cada uno de los siguientes apartados.

Se realizó un promedio de los resultados de los 15 cuestionarios, analizando posteriormente los resultados con las herramientas multi-criterio descritas en el capítulo de metodología. Las Figuras 78-81 muestra los resultados para los métodos AHP y AHP con lógica difusa (FAHP) obtenidos del análisis para cada apartado previo del capítulo de resultados.

Es importante mencionar que el ensayo del círculo de arena para la obtención de la profundidad de la macrotextura no se consideró en los cuestionarios, ni por tanto en el análisis multi-criterio, ya que se estimó desde el inicio como de carácter informativo solamente, al considerarse que todas las mezclas, al ser porosas, tienen una profundidad de la macrotextura considerable sin diferencias significativas entre sí.

La Figura 78 muestra los pesos obtenidos con ambos métodos (AHP y FAHP) para los apartados referentes a la comparación de métodos de dosificación y la determinación de la dosificación óptima sin aditivos. Como se aprecia, los resultados entre los métodos AHP y FAHP varían un poco. Con el método AHP, la tracción indirecta (TI) tuvo la mayor importancia con 20.20% del total, mientras que con el método FAHP, fue el CRD bajo condiciones húmedas. Aquí se aprecia que los expertos tienen opiniones diferentes de acuerdo a la importancia de estos parámetros en los pavimentos de hormigón poroso.

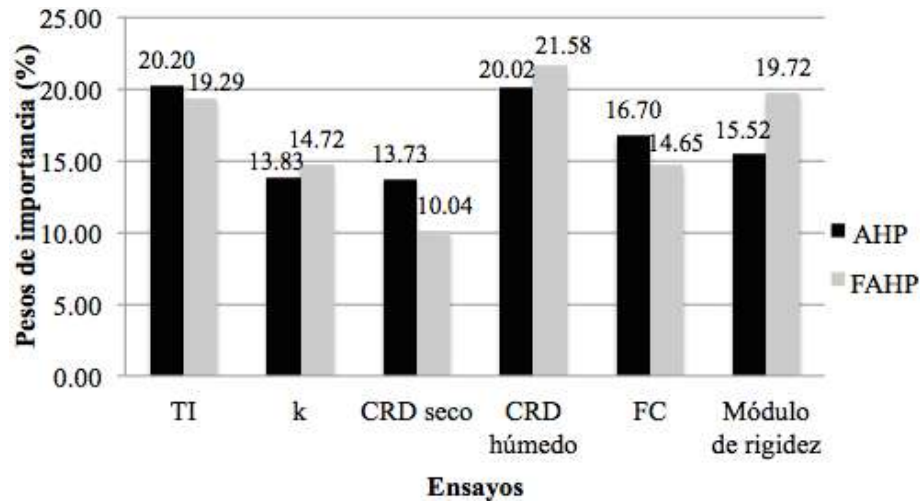


Figura 78. Pesos obtenidos del análisis de cuestionarios con el método AHP y AHP con lógica difusa (FAHP) para los apartados de comparación de metodologías y dosificación óptima sin aditivos (Fuente: Elaboración propia).

En la Figura 79 se muestran los pesos obtenidos de los ensayos realizados en los apartados de estudio de aditivos por separado, mezclas con dióxido de titanio, influencia de la compactación en mezclas de hormigón poroso y mezclas con geopolímeros. Aquí, la mayoría de los expertos evaluaron, para ambos métodos de ponderación de forma similar, a la tracción indirecta (TI) sobre la permeabilidad (k).

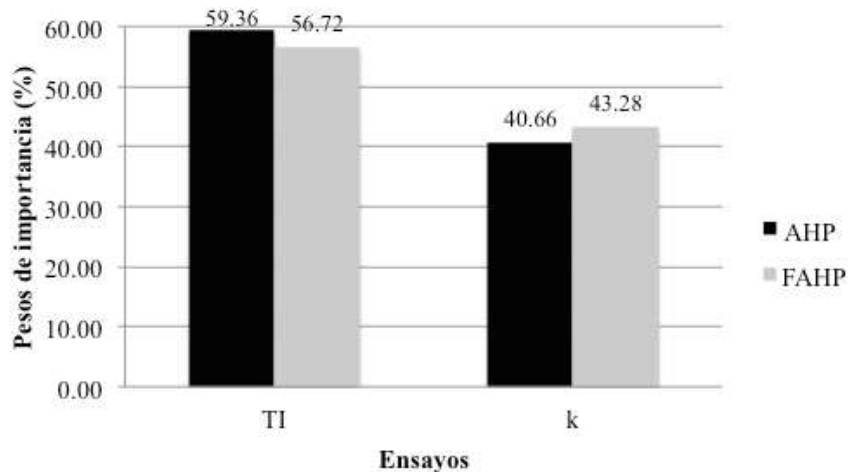


Figura 79. Pesos obtenidos del análisis de cuestionarios con el método AHP y AHP con lógica difusa (FAHP) para los apartados de estudio de aditivos por separado, mezclas con dióxido de titanio, influencia de la compactación en mezclas de hormigón poroso y mezclas con geopolímeros (Fuente: Elaboración propia).

Para los ensayos en el estudio de combinaciones de aditivos se utilizaron los pesos obtenidos en la Figura 80. Aquí los resultados fueron similares a los de la Figura 78 en términos de orden, donde con el método AHP, la tracción indirecta (TI) tuvo la mayor

importancia, mientras que con el método FAHP, fue el coeficiente de resistencia al deslizamiento (CRD) bajo condiciones húmedas.

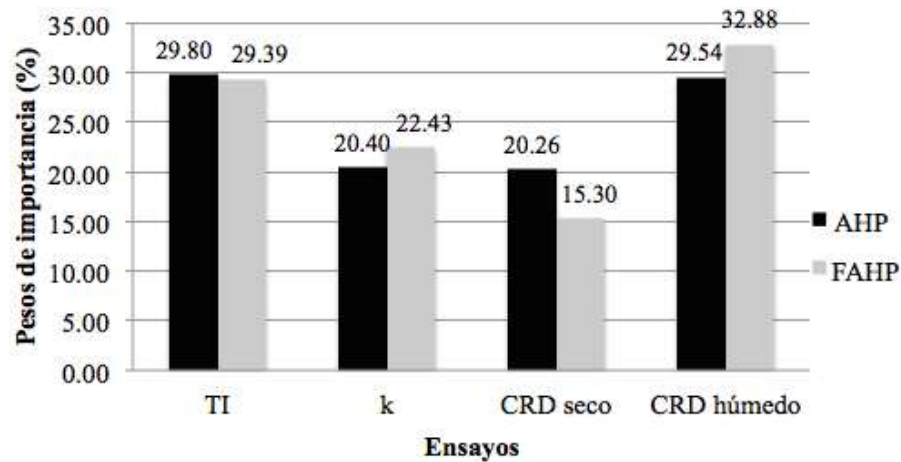


Figura 80. Pesos obtenidos del análisis de cuestionarios con el método AHP y AHP con lógica difusa (FAHP) para el apartado de combinación de aditivos (Fuente: Elaboración propia).

En la Figura 81 se observan los pesos obtenidos para los ensayos del apartado referente a la medición de la absorción del sonido. Se observa que el coeficiente de absorción del sonido (NRC) tuvo una importancia muy baja. Esto se debe a que la reducción del sonido en el pavimento se puede considerar más como una comodidad que una característica ambiental o de seguridad. Es por eso que el resto de los ensayos tuvieron un peso mucho mayor, y similar entre ellos, sobre todo la tracción indirecta, la permeabilidad (k) y el coeficiente de resistencia al deslizamiento (CRD) bajo condiciones húmedas.

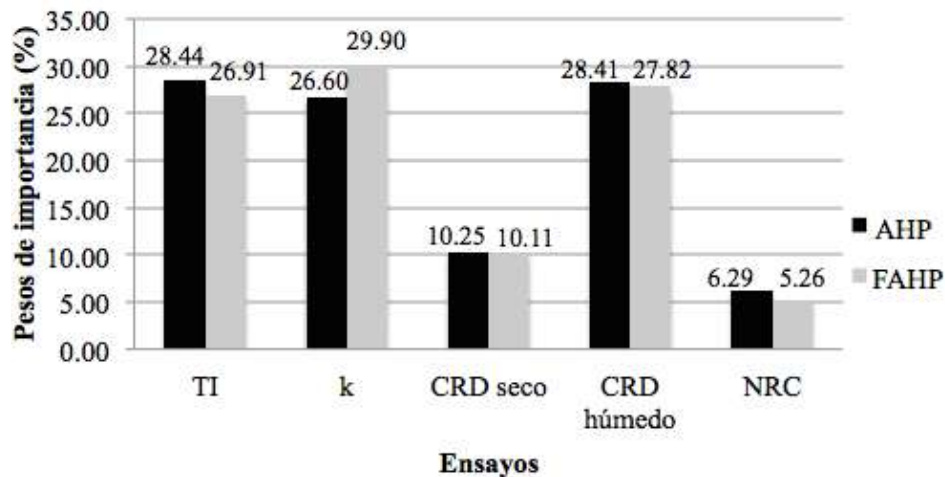


Figura 81. Pesos obtenidos del análisis de cuestionarios con el método AHP y AHP con lógica difusa (FAHP) para el apartado de absorción del sonido (Fuente: Elaboración propia).

Es de llamar la atención que la permeabilidad no tuvo la importancia mayor, pero, según mencionaron algunos expertos, se considera que el pavimento es poroso y ya cuenta con una determinada infiltración de agua, por lo que otras características, ya sea mecánicas o de seguridad, deberían tener prioridad. A pesar de esta aclamación, esto es tema de discusión entre los expertos, donde otros apuntan a que la permeabilidad debe de ser la prioridad en estos pavimentos, o de lo contrario no se pretendería diseñarlos.

#### **4.8.2. Comparación de métodos de dosificación**

La Tabla 61 muestra los pesos y jerarquías obtenidos del análisis con cada uno de los métodos multi-criterio, y métodos para obtención de pesos, para el estudio de comparativa de metodologías. Como puede apreciarse, los métodos WASPAS y TOPSIS dieron como mejor metodología a la PCD, dándole un orden de importancia, o jerarquía, absoluta sobre las mezclas ACI 522R-10. Estos métodos consideraron mejor la mezcla con una relación arena-cemento (s/c) de 0.5 (PCD-2). La mezcla PCD-1 demostró valores más altos de permeabilidad y tracción indirecta en un 10.76% y un 13.27%, respectivamente, que la mezcla PCD-2. Sin embargo, la mezcla PCD-2 obtuvo valores más altos de fuerza a compresión, coeficiente de resistencia al deslizamiento bajo condiciones secas y húmedas, y módulo de rigidez en un 14.09%, 6.15%, 5.45% y 29.21%, respectivamente.

El método ANP, que eligió como mezcla óptima la que no tiene arena (PCD-1), al realizar una comparación por pares, consideró los valores de tracción indirecta como los más importantes de acuerdo a la ponderación AHP, y, al haber una diferencia significativa entre los resultados de este ensayo entre la metodología PCD y ACI 522R-10, la primera tuvo una mayor jerarquía en sus mezclas. En la Ponderación AHP con lógica difusa, el coeficiente de resistencia al deslizamiento bajo condiciones húmedas tuvo una mayor importancia que el resto de los ensayos. Sin embargo, al ser los resultados en todas las mezclas muy similares entre ellos, el resto de los ensayos (tracción indirecta, permeabilidad, fuerza a compresión y módulo de rigidez), dieron una mayor importancia a las mezclas de la metodología PCD. Lo mismo para los métodos WASPAS y TOPSIS, con la diferencia de que en estos métodos se consideró la mezcla que en general tuvo los mejores resultados, siendo esta la mezcla PCD-2. Dicha mezcla tuvo resultados más altos



en la mayoría de los ensayos, y poca diferencia respecto al mejor valor en los que no lo tuvo, siendo mejorada en estos casos únicamente por la mezcla PCD-1.

Tabla 61. Pesos y orden de jerarquía de las mezclas con la metodología PCD y ACI 522R-10 obtenidas del análisis multi-criterio. (Fuente: Elaboración propia).

Mezcla	Método AHP									
	AHP		ANP		WASPAS		TOPSIS		PROMETHEE II	
	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden
ACI-1	0.030	2	0.043	3	0.699	6	0.393	5	-850.713	6
ACI-2	0.021	6	0.040	5	0.775	4	0.439	4	39.660	3
ACI-3	0.026	5	0.039	6	0.707	5	0.303	6	-353.156	5
PCD-1	0.026	4	0.042	4	0.793	3	0.469	3	391.407	2
PCD-2	0.028	3	0.088	1	0.805	2	0.540	2	-42.557	4
PCD-3	0.036	1	0.081	2	0.845	1	0.593	1	815.350	1

Mezcla	Método AHP con lógica difusa									
	AHP		ANP		WASPAS		TOPSIS		PROMETHEE II	
	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden
ACI-1	0.031	2	0.036	5	0.693	6	0.401	5	-1080.854	6
ACI-2	0.021	6	0.040	3	0.770	4	0.451	4	50.419	3
ACI-3	0.024	5	0.034	6	0.703	5	0.324	6	-448.878	5
PCD-1	0.026	4	0.039	4	0.795	2	0.506	3	497.312	2
PCD-2	0.027	3	0.098	1	0.790	3	0.508	2	-53.843	4
PCD-3	0.037	1	0.086	2	0.839	1	0.588	1	1035.844	1

En cuanto a los métodos AHP y PROMETHEE II, también dieron una preferencia por la metodología PCD. Sin embargo, dieron preferencia a la mezclas ACI sobre la mezcla PCD-1. Lo anterior se debe a que el método AHP otorgó preferencia a la mezcla ACI-1, con ambas ponderaciones, debido a sus altos valores de tracción indirecta y permeabilidad. Por otra parte, el método PROMETHEE II eligió a la mezcla ACI-2, en ambas ponderaciones, debido a sus resultados más altos en la mayoría de los ensayos (permeabilidad, coeficiente de resistencia al deslizamiento bajo ambas condiciones, y módulo de rigidez), con respecto a la mezcla PCD-0.

A pesar de estas mínimas diferencias, se puede concluir que la metodología PCD otorga la mejor combinación de resultados en términos de fuerza mecánica, permeabilidad y seguridad, con cualquiera de los métodos multi-criterio analizados.

### 4.8.3. Determinación de la dosificación óptima sin aditivos

En la Tabla 62 y 63 se pueden apreciar los pesos y jerarquías obtenidos del análisis multi-criterio con las diferentes dosificaciones con la metodología PCD sin aditivos. Se puede apreciar que en cada método multi-criterio, una mezcla diferente fue designada como la más óptima, para ambos métodos de ponderación, siendo la misma mezcla la más óptima a pesar de la diferencia de pesos de acuerdo al análisis de los cuestionarios.

En el método multi-criterio AHP, la mezcla C-6 obtuvo la mayor jerarquía. Sus valores mecánicos y de permeabilidad no fueron los más altos, pero tampoco fueron bajos, manteniéndose en un promedio equilibrado. Destacan sus altos valores del coeficiente de resistencia al deslizamiento bajo ambas condiciones, gracias a los cuales, debido al peso otorgado a este ensayo en los cuestionarios, logró posicionarse como la mezcla más óptima del total.

El método ANP dió como mezcla más óptima a la B-16, donde al realizar la comparación por pares y la supermatriz límite, al final, el incremento y balance en los valores mecánicos le otorgó el puntaje mayor. Sus valores de permeabilidad fueron de los más bajos del total, pero sus valores de tracción indirecta y fuerza a compresión fueron los más altos de todo el lote de mezclas. El ensayo de módulo de rigidez demostró valores por encima del promedio, aunque otras mezclas tuvieron valores alrededor de un 11% mayores. En términos del coeficiente de resistencia al deslizamiento, los valores obtenidos por esta mezcla también fueron sobre el promedio, pero un 15% y 28% menores bajo condiciones secas y húmedas, respectivamente, que la mezcla C-6, la más óptima en este parámetro y en el total de acuerdo al método AHP.

Tabla 62. Pesos y jerarquías de las mezclas para el estudio de dosificaciones con la metodología PCD obtenidas del análisis multi-criterio mediante el método de ponderación AHP. (Fuente: Elaboración propia).

Mezcla	Método AHP									
	AHP		ANP		WASPAS		TOPSIS		PROMETHEE II	
	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden
A-1	0.006	7	0.013	9	0.676	19	0.366	9	83.21	15
A-2	0.005	16	0.011	13	0.692	15	0.336	17	-19.16	19
A-3	0.003	29	0.004	29	0.560	31	0.260	27	-390.89	26
A-4	0.003	27	0.007	25	0.617	26	0.293	22	-52.67	20
B-1	0.005	21	0.007	24	0.675	20	0.289	25	-113.48	22
B-2	0.004	22	0.009	18	0.682	17	0.286	26	229.87	8
B-3	0.006	9	0.011	14	0.709	10	0.349	12	214.51	10
B-4	0.006	10	0.010	17	0.707	11	0.340	15	578.05	2
B-5	0.009	4	0.018	3	0.782	1	0.433	2	535.98	3
B-6	0.005	17	0.010	15	0.721	5	0.339	16	229.22	9
B-7	0.007	6	0.018	2	0.746	4	0.397	7	162.16	12
B-8	0.005	19	0.007	23	0.682	18	0.291	23	38.21	16
B-9	0.010	2	0.013	7	0.749	3	0.412	5	134.08	13
B-10	0.005	20	0.012	12	0.672	23	0.325	18	13.50	18
B-11	0.006	11	0.013	10	0.710	9	0.342	14	263.67	5
B-12	0.005	14	0.012	11	0.703	13	0.352	11	665.63	1
B-13	0.005	18	0.009	19	0.706	12	0.324	19	242.44	6
B-14	0.002	31	0.004	31	0.572	30	0.201	31	-174.25	23
B-15	0.009	5	0.018	4	0.713	8	0.404	6	233.99	7
B-16	0.009	3	0.024	1	0.719	6	0.414	4	24.61	17
B-17	0.006	8	0.016	5	0.714	7	0.377	8	108.44	14
C-1	0.005	15	0.008	21	0.690	16	0.294	21	-87.30	21
C-2	0.003	26	0.006	28	0.619	25	0.243	28	-579.40	29
C-3	0.003	28	0.006	27	0.637	24	0.230	29	-410.99	27
C-4	0.004	23	0.008	20	0.673	22	0.291	24	-489.09	28
C-5	0.005	13	0.013	8	0.694	14	0.349	13	-190.04	24
C-6	0.011	1	0.015	6	0.773	2	0.431	3	183.54	11
D-1	0.004	24	0.008	22	0.674	21	0.311	20	-195.74	25
D-2	0.004	25	0.007	26	0.595	29	0.356	10	-1061.17	31
D-3	0.003	30	0.004	30	0.615	27	0.225	30	510.56	4
D-4	0.006	12	0.010	16	0.607	28	0.445	1	-687.48	30

El método WASPAS eligió a la mezcla B-5 como la mejor de las estudiadas. Esta mezcla tuvo mejores valores de permeabilidad, en un 52%, que la mezcla B-16 (óptima del método ANP), pero valores de tracción indirecta y fuerza a compresión en un 20% y 22% menores, respectivamente. Este método al no realizar una comparación por pares, realiza la mejor combinación en general de acuerdo al valor máximo o mínimo de cada ensayo, de

acuerdo a lo que se está buscando, y también dependiendo de las ponderaciones de los cuestionarios a expertos.

Tabla 63. Pesos y jerarquías de las mezclas para el estudio de dosificaciones con la metodología PCD obtenidas del análisis multi-criterio mediante el método de ponderación AHP con lógica difusa. (Fuente: Elaboración propia).

Método AHP con lógica difusa										
Mezcla	AHP		ANP		WASPAS		TOPSIS		PROMETHEE II	
	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden
A-1	0.006	8	0.013	8	0.664	23	0.398	14	104.87	15
A-2	0.005	16	0.012	12	0.684	15	0.378	19	-24.65	19
A-3	0.003	29	0.004	29	0.555	31	0.302	30	-496.33	26
A-4	0.003	26	0.008	21	0.611	28	0.334	27	-66.26	20
B-1	0.004	22	0.007	25	0.670	20	0.353	25	-144.51	22
B-2	0.005	20	0.009	17	0.678	18	0.355	23	292.51	8
B-3	0.006	9	0.010	15	0.704	9	0.403	12	271.88	10
B-4	0.006	10	0.010	16	0.708	6	0.409	11	734.64	2
B-5	0.009	3	0.019	3	0.780	1	0.489	1	680.49	3
B-6	0.005	15	0.010	14	0.720	5	0.412	10	291.28	9
B-7	0.007	6	0.020	2	0.738	4	0.437	5	205.87	12
B-8	0.005	19	0.007	24	0.680	17	0.365	20	48.34	16
B-9	0.010	2	0.011	13	0.742	3	0.453	4	176.27	13
B-10	0.005	21	0.013	10	0.665	22	0.364	21	17.61	18
B-11	0.006	12	0.013	7	0.704	10	0.395	15	335.09	5
B-12	0.006	13	0.013	9	0.706	8	0.414	9	846.75	1
B-13	0.005	18	0.009	19	0.704	11	0.394	16	307.85	6
B-14	0.002	31	0.003	31	0.576	30	0.281	31	-220.24	23
B-15	0.009	5	0.019	4	0.701	13	0.432	7	296.33	7
B-16	0.009	4	0.027	1	0.703	12	0.433	6	30.68	17
B-17	0.006	7	0.018	5	0.708	7	0.416	8	138.01	14
C-1	0.005	17	0.007	23	0.682	16	0.356	22	-111.71	21
C-2	0.003	27	0.005	28	0.617	26	0.315	28	-735.82	29
C-3	0.003	28	0.005	27	0.633	24	0.303	29	-521.81	27
C-4	0.004	24	0.009	20	0.667	21	0.355	24	-620.83	28
C-5	0.005	14	0.014	6	0.685	14	0.386	18	-241.56	24
C-6	0.011	1	0.013	11	0.766	2	0.473	3	231.03	11
D-1	0.004	23	0.007	22	0.676	19	0.389	17	-247.68	25
D-2	0.004	25	0.006	26	0.592	29	0.402	13	-1347.13	31
D-3	0.003	30	0.004	30	0.625	25	0.338	26	641.54	4
D-4	0.006	11	0.009	18	0.616	27	0.476	2	-872.53	30

El método TOPSIS analiza de una forma similar al WASPAS, dando valores de 0 o 1 dependiendo si se desea el valor mínimo o máximo en cada ensayo. Esta metodología (TOPSIS) eligió a la mezcla D-4 como la mejor de todas. Esta mezcla tuvo los valores de

tracción indirecta y fuerza a compresión más bajos de todos. También sus valores del coeficiente de resistencia al deslizamiento fueron de los más bajos en ambas condiciones. Sin embargo, su alto valor de permeabilidad (el más alto de todos) hizo que el método TOPSIS, al hacer su combinación, la señalase como la más óptima, a pesar del bajo porcentaje obtenido en las ponderaciones de los cuestionarios. Esto puede deberse a que el método TOPSIS no necesariamente vincula como la peor alternativa a la de menor importancia, y viceversa, sino que selecciona a la mejor alternativa en función de un radio que vincula ambas distancias.

Finalmente, el método PROMETHEE II también realiza una evaluación de los resultados, empleando los valores máximos y mínimos en cada ensayo, otorgando valores de 0 y 1, en función de si se desea el menor o mayor valor para cada parámetro. Sin embargo, posterior a esto, realiza una comparación por pares entre todas las mezclas, obteniendo la diferencia entre cada comparación. Este método, que pudiera considerarse tener una combinación del resto de los métodos empleados, eligió a la mezcla B-12 como la mejor. Sus valores en todos los ensayos son aceptables, pero menores a la mezcla B-16 (método ANP), siendo un poco menores en términos mecánicos y en fricción, pero mayores en permeabilidad y módulo de rigidez. Sin embargo, se puede considerar que la combinación de sus resultados es más equilibrada.

#### **4.8.4. Estudio de aditivos por separado**

La Tabla 64 y 65 muestran los pesos y jerarquías obtenidos del análisis multi-criterio con los métodos de ponderación AHP y AHP con lógica difusa, respectivamente, para el apartado de estudio de aditivos individualmente. Se puede observar que, sin importar el método multi-criterio empleado, así como el método de ponderación utilizado, las jerarquías fueron las mismas para todas las mezclas, con mínimas variaciones.

Tabla 64. Pesos y jerarquías de las mezclas para el estudio de aditivos por separado obtenidas del análisis multi-criterio mediante el método de ponderación AHP. (Fuente: Elaboración propia).

		Método AHP									
Aditivo	Mezcla	AHP		ANP		WASPAS		TOPSIS		PROMETHEE II	
		Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden
Fibras de acero al carbono	Control	0.192	1	0.128	1	0.986	1	0.958	1	0.150	1
	CSF-1	0.110	3	0.073	3	0.956	2	0.875	2	0.101	2
	CSF-2	0.059	4	0.039	4	0.877	3	0.671	3	-0.014	3
	CSF-3	0.140	2	0.093	2	0.704	4	0.125	4	-0.237	4
Fibras de polipropileno	Control	0.172	2	0.115	2	0.930	2	0.692	3	0.057	2
	PF-1	0.096	3	0.064	3	0.910	3	0.743	2	0.029	3
	PF-2	0.194	1	0.130	1	0.983	1	0.933	1	0.146	1
	PF-3	0.038	4	0.025	4	0.750	4	0.114	4	-0.232	4
Incluctor de aire	Control	0.066	3	0.044	3	0.785	3	0.405	3	-0.078	3
	AE-1	0.208	1	0.139	1	0.866	2	0.541	2	0.105	2
	AE-2	0.062	4	0.042	4	0.741	4	0.254	4	-0.142	4
	AE-3	0.164	2	0.110	2	0.884	1	0.617	1	0.115	1
Microsilíce	Control	0.113	3	0.075	3	0.908	2	0.790	2	0.157	2
	MS-1	0.063	4	0.042	4	0.816	3	0.556	3	0.011	3
	MS-2	0.132	2	0.088	2	0.938	1	0.840	1	0.211	1
	MS-3	0.022	5	0.015	5	0.642	5	0.116	5	-0.253	5
	MS-4	0.171	1	0.114	1	0.704	4	0.274	4	-0.127	4
Nanosilíce	Control	0.074	3	0.050	3	0.910	2	0.524	2	-0.010	2
	NS-1	0.236	1	0.157	1	1.000	1	1.000	1	0.131	1
	NS-2	0.061	4	0.041	4	0.893	3	0.347	5	-0.035	3
	NS-3	0.038	5	0.025	5	0.889	4	0.380	3	-0.044	5
	NS-4	0.091	2	0.061	2	0.886	5	0.352	4	-0.042	4
Superplastificante	Control	0.077	4	0.052	4	0.753	6	0.354	6	-0.256	6
	SP-1	0.035	6	0.023	6	0.806	4	0.546	4	0.001	4
	SP-2	0.121	1	0.081	1	0.942	1	0.785	1	0.212	1
	SP-3	0.089	2	0.059	2	0.921	2	0.781	2	0.190	2
	SP-4	0.033	7	0.022	7	0.805	5	0.523	5	-0.028	5
	SP-5	0.064	5	0.043	5	0.745	7	0.348	7	-0.276	7
	SP-6	0.081	3	0.054	3	0.849	3	0.630	3	0.157	3
Modificador de viscosidad	Control	0.061	3	0.041	3	0.785	3	0.382	3	-0.099	4
	VM-1	0.245	1	0.163	1	0.953	1	0.832	1	0.225	1
	VM-2	0.140	2	0.093	2	0.782	4	0.307	4	-0.062	2
	VM-3	0.054	4	0.036	4	0.801	2	0.386	2	-0.063	3
Retardante	Control	0.115	3	0.077	3	0.691	2	0.559	2	-0.084	3
	SR-1	0.192	1	0.128	1	0.828	1	0.696	1	0.247	2
	SR-2	0.159	2	0.106	2	0.662	3	0.435	3	0.276	1
	SR-3	0.033	4	0.022	4	0.440	4	0.104	4	-0.439	4

Tabla 65. Pesos y jerarquías de las mezclas para el estudio de aditivos por separado obtenidas del análisis multi-criterio mediante el método de ponderación AHP con lógica difusa. (Fuente: Elaboración propia).

Método AHP con lógica difusa											
Aditivo	Mezcla	AHP		ANP		WASPAS		TOPSIS		PROMETHEE II	
		Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden
Fibras de acero al carbono	Control	0.189	1	0.126	1	0.985	1	0.953	1	0.145	1
	CSF-1	0.106	3	0.071	3	0.953	2	0.863	2	0.093	2
	CSF-2	0.058	4	0.039	4	0.879	3	0.668	3	-0.016	3
	CSF-3	0.147	2	0.098	2	0.716	4	0.137	4	-0.222	4
Fibras de polipropileno	Control	0.178	2	0.119	2	0.933	2	0.695	3	0.059	2
	PF-1	0.092	3	0.062	3	0.908	3	0.726	2	0.022	3
	PF-2	0.190	1	0.127	1	0.982	1	0.926	1	0.141	1
	PF-3	0.039	4	0.026	4	0.757	4	0.125	4	-0.222	4
Inclisor de aire	Control	0.069	3	0.046	3	0.787	3	0.427	3	-0.069	3
	AE-1	0.200	1	0.133	1	0.858	2	0.516	2	0.092	2
	AE-2	0.061	4	0.040	4	0.734	4	0.237	4	-0.152	4
	AE-3	0.171	2	0.114	2	0.889	1	0.641	1	0.128	1
Microsilíce	Control	0.114	3	0.076	3	0.907	2	0.796	2	0.165	2
	MS-1	0.063	4	0.042	4	0.812	3	0.561	3	0.014	3
	MS-2	0.136	2	0.091	2	0.940	1	0.853	1	0.225	1
	MS-3	0.022	5	0.015	5	0.633	5	0.117	5	-0.260	5
	MS-4	0.164	1	0.110	1	0.687	4	0.253	4	-0.145	4
Nanosilíce	Control	0.078	3	0.052	3	0.912	2	0.549	2	-0.005	2
	NS-1	0.236	1	0.157	1	1.000	1	1.000	1	0.133	1
	NS-2	0.060	4	0.040	4	0.890	3	0.334	4	-0.038	3
	NS-3	0.038	5	0.025	5	0.888	4	0.393	3	-0.042	4
	NS-4	0.088	2	0.059	2	0.881	5	0.328	5	-0.049	5
Superplastificante	Control	0.075	4	0.050	4	0.740	6	0.330	6	-0.281	6
	SP-1	0.036	6	0.024	6	0.808	4	0.566	4	0.012	4
	SP-2	0.119	1	0.079	1	0.938	1	0.778	2	0.215	1
	SP-3	0.089	2	0.059	2	0.919	2	0.780	1	0.196	2
	SP-4	0.034	7	0.023	7	0.805	5	0.537	5	-0.022	5
	SP-5	0.062	5	0.041	5	0.731	7	0.324	7	-0.302	7
	SP-6	0.085	3	0.057	3	0.856	3	0.655	3	0.180	3
Modificador de viscosidad	Control	0.060	3	0.040	3	0.783	4	0.372	3	-0.105	4
	VM-1	0.240	1	0.160	1	0.950	1	0.818	1	0.217	1
	VM-2	0.147	2	0.098	2	0.791	3	0.331	4	-0.047	2
	VM-3	0.054	4	0.036	4	0.802	2	0.380	2	-0.065	3
Retardante	Control	0.112	3	0.074	3	0.679	2	0.534	2	-0.111	3
	SR-1	0.187	1	0.125	1	0.818	1	0.673	1	0.229	2
	SR-2	0.167	2	0.111	2	0.675	3	0.459	3	0.316	1
	SR-3	0.034	4	0.023	4	0.445	4	0.112	4	-0.433	4

Las fibras de acero al carbono fueron el único material donde la mezcla de control tuvo una mejor jerarquía. Esto debido a las razones explicadas previamente acerca del efecto negativo de estas fibras en la trabazón y seguridad superficial de las mezclas porosas. De ahí la decisión de no utilizar estas fibras en el estudio de combinaciones de aditivos.

En el caso de la microsílíce, la mezcla MS-2 (removiendo 5% del peso del cemento) obtuvo la jerarquía más alta debido a sus altos valores de permeabilidad y la buena correlación de estos con los valores de tracción indirecta. A pesar de esto, para el estudio de combinaciones de aditivos, se decidió emplear la mezcla MS-4 (removiendo 15% del peso del cemento), debido a que su tracción indirecta es mayor, y porque esta mezcla usa 10% menos cemento que la MS-2, por lo que se considera que es más sostenible.

Las fibras de polipropileno disminuyeron los valores de tracción indirecta cuando su cantidad incrementaba. Esto debido a que este tipo de fibras, más que representar una mejoría en términos mecánicos, ayudaban a que el pavimento se estabilizara en caso de falla, incrementando potencialmente la seguridad vial. Para el resto de los aditivos analizados, los resultados del análisis multi-criterio establecieron como la mejor dosificación a la que tenía los valores de tracción indirecta más altos.

#### **4.8.5. Estudio de combinaciones de aditivos**

La Tabla 66 muestra las dosificaciones de aditivos utilizada para el estudio de combinaciones de aditivos, así como el porcentaje de mejoría que representaron en términos de permeabilidad y tracción indirecta, en comparación con los resultados de la mezcla de control.

En la Tabla 67 se aprecian los resultados y jerarquías obtenidas del análisis multi-criterio para el estudio de combinaciones de aditivos. Se puede observar que para ambos métodos de ponderación y todos los métodos multi-criterio empleados, las 2 mejores mezclas fueron las combinaciones C y E. La combinación C tuvo los valores de permeabilidad y tracción indirecta más altos. Por el contrario, la combinación E demostró valores del coeficiente de resistencia al deslizamiento más altos que C, bajo ambas



condiciones. Sin embargo, ambas combinaciones demostraron resultados similares en el resto de los ensayos.

Tabla 66. *Dosificación de aditivos utilizada para el estudio de combinaciones de aditivos, y el porcentaje de mejora que representaron en términos de permeabilidad (k) y tracción indirecta (TI), en comparación con la mezcla de control (Fuente: Elaboración propia).*

Mezcla	$\Delta k$ (%)	$\Delta IT$ (%)
Control	-	-
VM-1	16.98	24.54
SR-1	32.58	13.83
CSF-1*	-7.57	0.05
PF-2	-4.08	13.17
NS-1	4.97	9.31
SP-2	78.96	16.28
AE-1	-19.33	35.25
MS-4**	-58.94	8.88

\*No se utilizó en el estudio de combinaciones de aditivos

\*\*No fue el mejor resultado del análisis, pero se consideró más sostenible.

Los resultados de la Tabla 67 sugieren que el uso de superplastificantes e inclusores de aire mejoran las propiedades del hormigón poroso (combinaciones C y E). La combinación A también tiene estos aditivos en su mezcla, pero el uso de microsílíce tiende a colmatarla, disminuyendo los valores de permeabilidad considerablemente. La combinación F demostró los valores de tracción indirecta más bajos, donde la ausencia de superplastificante se hizo notar, al tener una mezcla menos trabajable. Esta combinación tuvo los valores del coeficiente de resistencia al deslizamiento más altos, bajo ambas condiciones, dado que el modificador de viscosidad y el retardante tienden a mejorar el contenido de huecos, mejorando la fricción en la superficie de la mezcla. Las fibras de polipropileno no significaron una mejora en los valores mecánicos, pero se consideran importantes por las cuestiones de seguridad, explicadas previamente, dado que mantienen la integridad de la mezcla evitando la pérdida de partículas. De ahí que se emplearan en todas las combinaciones analizadas.

Tabla 67. Pesos y jerarquías de las mezclas para el estudio combinaciones de aditivos obtenidas del análisis multi-criterio mediante el método de ponderación AHP y AHP con lógica difusa (Fuente: Elaboración propia).

Método AHP										
Combinación	AHP		ANP		WASPAS		TOPSIS		PROMETHEE II	
	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden
Control	0.037	4	0.050	4	0.795	5	0.303	5	0.910	2
A	0.008	7	0.011	7	0.705	7	0.127	6	-1.228	7
B	0.023	5	0.031	5	0.848	3	0.526	3	-0.489	5
C	0.053	2	0.071	2	0.971	1	0.925	1	-0.614	6
D	0.018	6	0.024	6	0.724	6	0.108	7	-0.099	4
E	0.063	1	0.084	1	0.947	2	0.839	2	0.577	3
F	0.047	3	0.063	3	0.808	4	0.415	4	0.943	1

Método AHP con lógica difusa										
Combinación	AHP		ANP		WASPAS		TOPSIS		PROMETHEE II	
	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden
Control	0.033	4	0.045	4	0.786	5	0.305	5	-0.281	4
A	0.008	7	0.011	7	0.693	7	0.119	6	-0.395	5
B	0.023	5	0.031	5	0.844	3	0.527	3	0.154	3
C	0.054	2	0.073	2	0.973	1	0.931	1	0.911	1
D	0.018	6	0.024	6	0.713	6	0.106	7	-0.502	6
E	0.066	1	0.087	1	0.948	2	0.843	2	0.640	2
F	0.047	3	0.063	3	0.805	4	0.434	4	-0.527	7

La Tabla 68 muestra las mejoras de cada combinación en cada ensayo realizado, en comparación con la mezcla de control, donde se puede afirmar que la combinación C representa la mejor combinación de aditivos para mejorar las propiedades mecánicas y de seguridad del hormigón poroso. A pesar de obtener un 6.85% y un 3.45% menos resistencia al deslizamiento bajo condiciones secas y húmedas, respectivamente, los resultados de este ensayo se consideran que, en general, fueron aceptables en todas las mezclas.

Tabla 68. Porcentaje de mejoría que representaron las combinaciones de aditivos en términos de permeabilidad ( $k$ ), tracción indirecta ( $TI$ ) y resistencia al deslizamiento ( $CRD$ ) bajo condiciones secas y húmedas, en comparación con la mezcla de control (Fuente: Elaboración propia).

Combinación	$\Delta k$ (%)	$\Delta IT$ (%)	$\Delta CRD$ seco(%)	$\Delta CRD$ húmedo(%)
Control	-	-	-	-
A	-42.48	-1.14	-8.22	-3.45
B	26.49	17.10	-6.85	-1.72
C	87.88	45.35	-6.85	-3.45
D	-31.77	-6.96	-5.48	0.00
E	69.06	34.91	-5.48	1.72
F	36.17	-14.43	-1.37	1.72

#### 4.8.6. Mezclas con dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>)

La Tabla 69 muestra los pesos y jerarquías obtenidas del análisis multi-criterio con las mezclas con dióxido de titanio. Es importante aclarar que el análisis se realizó solamente a las mezclas que tuvieron el TiO<sub>2</sub> en la mezcla (FOT-1, FOT-2 y FOT-3) en porcentajes del peso del cemento, ya que al resto de las mezclas solamente se les hizo el ensayo de permeabilidad al tener su estructura igual a la mezcla de Control.

Tabla 69. Pesos y orden de jerarquía de las mezclas con dióxido de titanio obtenidas del análisis multi-criterio. (Fuente: Elaboración propia).

Método AHP										
Mezcla	AHP		ANP		WASPAS		TOPSIS		PROMETHEE II	
	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden
Control	30.961	1	0.206	1	1.000	1	1.000	1	0.468	1
FOT-1	10.368	2	0.069	2	0.732	2	0.360	2	0.031	2
FOT-2	6.216	3	0.041	3	0.691	3	0.287	3	-0.065	3
FOT-3	2.465	4	0.016	4	0.584	4	0.000	4	-0.434	4

Método AHP con lógica difusa										
Mezcla	AHP		ANP		WASPAS		TOPSIS		PROMETHEE II	
	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden
Control	31.175	1	0.208	1	1.000	1	1.000	1	0.462	1
FOT-1	10.188	2	0.068	2	0.724	2	0.339	2	0.026	2
FOT-2	6.145	3	0.041	3	0.682	3	0.269	3	-0.067	3
FOT-3	2.492	4	0.017	4	0.580	4	0.000	4	-0.421	4

Dicho lo anterior, y de acuerdo a los pesos obtenidos del análisis de cuestionarios, era de esperarse que la mezcla de Control tuviera la jerarquía más alta ya que el TiO<sub>2</sub> decrece la capacidad mecánica e hidráulica de las mezclas. Aún así, se observa que a medida que incrementa la cantidad de TiO<sub>2</sub> en la mezcla, la importancia disminuye ya que sus resultados lo hacen también. Aquí es muy importante la realización de un ensayo de eficiencia fotocatalítico para evaluar la importancia de las mezclas con esta propiedad considerada y tomar una adecuada decisión sobre la viabilidad y uso del pavimento. Por cuestiones ajenas al presente proyecto de investigación, dicho ensayo no pudo ser elaborado en tiempo y forma.

#### 4.8.7. Influencia de la compactación en mezclas de hormigón poroso

Las Tablas 70 y 71 muestran los pesos y jerarquías del análisis multi-criterio con el método de ponderación AHP y AHP con lógica difusa, respectivamente, para el estudio de

métodos de compactación. Como se puede apreciar, con el primer método de ponderación, la mezcla IMP-1 dominó la jerarquía general al ser elegida la más óptima en los métodos AHP, ANP y WASPAS, al tener el valor más alto de tracción indirecta. Su valor de permeabilidad no fue bajo del todo, pero sí un 88% más bajo que la mezcla VAR-4, que fue, según estos 3 métodos multicriterio la tercera mejor mezcla, y segunda en la jerarquía general. El alto valor de permeabilidad de la mezcla VAR-4 la sitúa entre las mejores mezclas del total, y se considera que su capacidad hidráulica es muy excesiva, pero se debe al propio método de compactación con el que fue hecho (varilla de apisonamiento).

Realizando el análisis con el método de ponderación AHP con lógica difusa, la mezcla VAR-4 obtiene la mayor importancia en los análisis WASPAS, TOPSIS y PROMETHEE II. En los métodos AHP y ANP vuelve a tener la mayor importancia la mezcla IMP-1. Esto se debe a la comparación por pares, y a los pesos de los cuestionarios, donde el valor de tracción indirecta tiene una mayor importancia que la permeabilidad. En general, la mezcla IMP-1 tuvo la mayor capacidad mecánica, siendo alrededor de un 74% mayor que la mezcla VAR-4.

Tabla 70. Pesos y jerarquías de las mezclas para el estudio de métodos de compactación obtenidas del análisis multi-criterio mediante el método de ponderación AHP. (Fuente: Elaboración propia).

Mezcla	Método AHP									
	AHP		ANP		WASPAS		TOPSIS		PROMETHEE II	
	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden
CAX-1	0.016	15	0.011	15	0.203	17	0.213	10	-0.562	17
GIR-1	0.029	6	0.019	6	0.275	12	0.324	6	-0.214	9
GIR-2	0.019	10	0.012	10	0.219	16	0.232	8	-0.501	14
GIR-3	0.016	16	0.011	16	0.228	15	0.203	11	-0.523	16
GIR-4	0.014	17	0.010	17	0.243	14	0.153	15	-0.502	15
IMP-1	0.071	1	0.047	1	0.527	1	0.485	2	0.608	3
IMP-2	0.059	2	0.039	2	0.520	2	0.467	3	0.539	4
IMP-3	0.044	4	0.029	4	0.500	4	0.414	5	0.416	5
IMP-4	0.019	9	0.013	9	0.279	11	0.174	14	-0.140	8
SEC-1	0.019	11	0.012	11	0.244	13	0.218	9	-0.466	13
SEC-2	0.018	13	0.012	13	0.302	8	0.200	12	-0.287	12
SEC-3	0.017	14	0.011	14	0.298	10	0.149	17	-0.229	11
SEC-4	0.044	5	0.029	5	0.386	5	0.421	4	0.793	2
VAR-1	0.018	12	0.012	12	0.301	9	0.153	16	-0.216	10
VAR-2	0.021	8	0.014	8	0.339	7	0.198	13	-0.031	7
VAR-3	0.023	7	0.015	7	0.348	6	0.233	7	0.101	6
VAR-4	0.054	3	0.036	3	0.508	3	0.497	1	1.215	1

En tercer lugar está la mezcla IMP-2, que tuvo un 7% menor resistencia de tracción indirecta que la mezcla IMP-1, pero una 20% mayor permeabilidad. A pesar de esto, ambas mezclas tuvieron valores aceptables en ambos ensayos, y se puede concluir que la compactación por impacto ofrece los mejores resultados cuando se trata de mezclas de hormigón poroso. Además, de acuerdo a la norma, se puede compactar a 35 (IMP-2) golpes si queremos considerar un tráfico ligero en el pavimento, o a 50 (IMP-1) golpes si queremos considerar tráfico normal.

Tabla 71. Pesos y jerarquías de las mezclas para el estudio de métodos de compactación obtenidas del análisis multi-criterio mediante el método de ponderación AHP con lógica difusa. (Fuente: Elaboración propia).

Mezcla	Método AHP con lógica difusa									
	AHP		ANP		WASPAS		TOPSIS		PROMETHEE II	
	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden
CAX-1	0.016	15	0.011	15	0.193	17	0.213	11	-0.595	17
GIR-1	0.028	6	0.018	6	0.260	12	0.324	6	-0.264	11
GIR-2	0.018	12	0.012	12	0.208	16	0.231	8	-0.536	15
GIR-3	0.016	16	0.011	16	0.219	15	0.202	14	-0.551	16
GIR-4	0.014	17	0.010	17	0.237	13	0.152	17	-0.515	14
IMP-1	0.068	1	0.045	1	0.504	2	0.488	2	0.544	3
IMP-2	0.057	3	0.038	3	0.499	3	0.471	3	0.484	4
IMP-3	0.043	5	0.029	5	0.486	4	0.421	5	0.387	5
IMP-4	0.020	9	0.013	9	0.284	11	0.205	12	-0.102	8
SEC-1	0.018	10	0.012	10	0.234	14	0.217	10	-0.495	13
SEC-2	0.018	13	0.012	13	0.296	10	0.203	13	-0.298	12
SEC-3	0.017	14	0.011	14	0.297	9	0.164	16	-0.217	10
SEC-4	0.046	4	0.031	4	0.403	5	0.458	4	0.900	2
VAR-1	0.018	11	0.012	11	0.301	8	0.168	15	-0.203	9
VAR-2	0.022	8	0.015	8	0.340	7	0.221	9	-0.008	7
VAR-3	0.024	7	0.016	7	0.353	6	0.265	7	0.141	6
VAR-4	0.057	2	0.038	2	0.526	1	0.532	1	1.329	1

#### 4.8.8. Absorción del sonido con distintos agregados

La Tabla 72 muestra los pesos y jerarquías obtenidos de los ensayos multi-criterio para el estudio de la absorción del sonido con distintos agregados, donde se puede establecer que la mezcla BAS-2 es la más adecuada cuando se relacionan capacidades mecánicas, hidráulicas, de fricción y absorción del sonido, al tener resultados muy altos en todos los ensayos. Los métodos AHP y ANP eligieron a la mezcla POR-1 como la mejor, pero esto se debe a que esta mezcla tuvo los valores mecánicos más altos del total, y debido a la ponderación de criterios, se determinó como la mezcla más óptima.

La mezcla POR-2, a pesar de tener los resultados de tracción indirecta más bajos, obtuvo jerarquías aceptables, principalmente debido a sus altos valores de permeabilidad (los más altos del total) y valores del coeficiente de resistencia al deslizamiento, aceptables bajo condiciones secas y húmedas. Su valor del coeficiente de disminución del sonido (NRC) estuvo en la media. Solamente en el método PROMETHEE II ocupó la quinta preferencia, ya que sus bajos valores de tracción indirecta y su valor relativamente igual a varias mezclas del coeficiente de resistencia al deslizamiento bajo condiciones húmedas, no ayudaron a incrementar su preferencia en este método.

Tabla 72. Pesos y jerarquías de las mezclas para el estudio combinaciones de aditivos obtenidas del análisis multi-criterio mediante el método de ponderación AHP y AHP con lógica difusa (Fuente: Elaboración propia).

Método AHP										
Mezcla	AHP		ANP		WASPAS		TOPSIS		PROMETHEE II	
	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden
POR-1	0.055	1	0.092	1	0.792	4	0.390	4	0.160	2
BAS-1	0.021	5	0.036	5	0.749	5	0.359	5	-0.035	3
CAL-1	0.019	6	0.032	6	0.587	6	0.128	6	-0.092	4
POR-2	0.038	3	0.064	3	0.871	2	0.758	2	-0.157	5
BAS-2	0.042	2	0.069	2	0.919	1	0.849	1	0.303	1
CAL-2	0.024	4	0.041	4	0.795	3	0.537	3	-0.179	6

Método AHP con lógica difusa										
Mezcla	AHP		ANP		WASPAS		TOPSIS		PROMETHEE II	
	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden	Peso	Orden
POR-1	0.053	1	0.089	1	0.770	4	0.370	4	0.145	2
BAS-1	0.021	5	0.035	5	0.732	5	0.351	5	-0.036	3
CAL-1	0.018	6	0.031	6	0.557	6	0.111	6	-0.108	4
POR-2	0.041	3	0.068	3	0.878	2	0.788	2	-0.130	5
BAS-2	0.042	2	0.069	2	0.916	1	0.853	1	0.285	1
CAL-2	0.025	4	0.041	4	0.787	3	0.543	3	-0.157	6

La mezcla BAS-1, a pesar de sus buenos resultados de tracción indirecta, tuvo una jerarquía del quinto lugar en casi todos los métodos multi-criterio, principalmente por su bajo valor de permeabilidad y porque no tuvo el mejor valor en ningún ensayo, a pesar de que fueron resultados aceptables. Por esto mismo, el método PROMETHEE II la eligió como la tercera en importancia, al tener una correlación aceptable de todos los resultados. Las mezclas realizadas con material calizo, no tuvieron un buen desempeño en términos generales, obteniendo importancias muy bajas en todos los métodos multi-criterio. Aquí se

encuentran los valores más bajos de permeabilidad, tracción indirecta y coeficiente de reducción del sonido.

#### 4.8.9. Estudio de geopolímeros

En la Tabla 73 se pueden observar los pesos y órdenes de importancia de las mezclas realizadas para el estudio de geopolímeros, con los métodos de ponderación AHP y AHP con lógica difusa, donde las jerarquías obtenidas son las mismas para ambos métodos. Aquí, de nuevo, las jerarquías dependen del método multi-criterio empleado, donde el método AHP y ANP dan como mejor opción la mezcla CEM-2, ya que la ponderación de criterios dió un valor más alto a la tracción indirecta. Los métodos WASPAS, TOPSIS y PROMETHEE II, eligieron a la mezcla MET-1, quien tuvo, por mucho, los valores de permeabilidad más altos, valores de tracción indirecta aceptables, y la mejor relación entre estos dos valores.

Tabla 73. Pesos y jerarquías de las mezclas para el estudio de geopolímeros obtenidas del análisis multi-criterio mediante el método de ponderación AHP. (Fuente: Elaboración propia).

<b>Método AHP</b>											
<b>Mezcla</b>	<b>AHP</b>		<b>ANP</b>		<b>WASPAS</b>		<b>TOPSIS</b>		<b>PROMETHEE II</b>		
	<b>Peso</b>	<b>Orden</b>	<b>Peso</b>	<b>Orden</b>	<b>Peso</b>	<b>Orden</b>	<b>Peso</b>	<b>Orden</b>	<b>Peso</b>	<b>Orden</b>	
<b>Control</b>	0.084	3	0.056	3	0.370	5	0.386	3	-0.260	4	
<b>CEM-1</b>	0.116	1	0.078	1	0.494	3	0.457	2	0.183	2	
<b>CEM-2</b>	0.061	5	0.041	5	0.359	6	0.374	4	-0.317	5	
<b>MET-1</b>	0.106	2	0.071	2	0.662	1	0.521	1	0.695	1	
<b>MET-2</b>	0.078	4	0.052	4	0.510	2	0.340	5	0.054	3	
<b>MET-3</b>	0.055	6	0.036	6	0.382	4	0.254	6	-0.355	6	
<b>Método AHP con lógica difusa</b>											
<b>Mezcla</b>	<b>AHP</b>		<b>ANP</b>		<b>WASPAS</b>		<b>TOPSIS</b>		<b>PROMETHEE II</b>		
	<b>Peso</b>	<b>Orden</b>	<b>Peso</b>	<b>Orden</b>	<b>Peso</b>	<b>Orden</b>	<b>Peso</b>	<b>Orden</b>	<b>Peso</b>	<b>Orden</b>	
<b>Control</b>	0.082	3	0.055	3	0.350	5	0.386	3	-0.322	5	
<b>CEM-1</b>	0.113	1	0.075	1	0.471	3	0.459	2	0.110	2	
<b>CEM-2</b>	0.059	5	0.039	5	0.340	6	0.374	5	-0.376	6	
<b>MET-1</b>	0.109	2	0.073	2	0.675	1	0.564	1	0.772	1	
<b>MET-2</b>	0.081	4	0.054	4	0.519	2	0.386	4	0.109	3	
<b>MET-3</b>	0.056	6	0.038	6	0.393	4	0.297	6	-0.293	4	

Es complicado hacer una comparación correcta o aceptable entre las mezclas de control, CEM-1 y CEM-2 y las mezclas MET-1, MET-2 y MET-3. Esto porque las últimas tres mezclas fueron diseñadas con un contenido de huecos en mezcla y huecos en el

agregado mineral diferente a las primeras, debido al comportamiento que presentan los geopolímeros, en comparación con el hormigón. Debido a esta diferencia de diseño, los resultados fueron diversos. Sin embargo, el análisis multi-criterio seleccionó como mezclas más óptimas a la mezcla CEM-1, y a la MET-1, quienes obtuvieron los mejores resultados mecánicos e hidráulicos (así como la mejor correlación entre estos), respectivamente. También, el método de compactación utilizado fue un factor determinante en los resultados obtenidos, donde los resultados serían diversos de emplearse un método diferente.

Al final, se puede concluir que es posible sustituir un 10% de cemento de la mezcla con metacaolín y alcanzar valores mecánicos e hidráulicos muy buenos. Además, al realizar geopolímeros, entre más metacaolín se utilice en la mezcla, más resistencia mecánica se obtiene. Sin embargo, aún se considera que se debe de realizar investigación adicional para comprender y obtener los mejores resultados cuando se quieren realizar mezclas porosas con geopolímeros.

#### **4.8.10. Conclusiones Parciales**

En las Tablas 74 y 75 se aprecia un resumen de las mezclas óptimas para cada estudio realizado en la presente tesis de investigación, por cada uno de los métodos multi-criterios analizados en la presente sección para los métodos de ponderación AHP y AHP con lógica difusa respectivamente. Se aprecia que los resultados son prácticamente iguales para ambos procedimientos de ponderación, llegando a la conclusión de que no hay una diferencia significativa entre los resultados obtenidos mediante cada uno de ellos, sin importar el método que se aplique.



Tabla 74. Mezclas óptimas para cada estudio realizado por cada método multi-criterio evaluado con el método de ponderación AHP. (Fuente: Elaboración propia).

Estudio	Método multi-criterio				
	AHP	ANP	WASPAS	TOPSIS	PROMETHEE II
<b>Comparación de métodos de dosificación</b>	PCD-3	PCD-2	PCD-3	PCD-3	PCD-3
<b>Determinación de la dosificación óptima sin aditivos</b>	C-6	B-16	B-5	D-4	B-12
<b>Estudio de aditivos por separado</b>					
Fibras de acero al carbono	Control	Control	Control	Control	Control
Fibras de polipropileno	PF-2	PF-2	PF-2	PF-2	PF-2
Inclisor de aire	AE-1	AE-1	AE-3	AE-3	AE-3
Microsílice	MS-4	MS-4	MS-2	MS-2	MS-2
Nanosílice	NS-1	NS-1	NS-1	NS-1	NS-1
Superplastificante	SP-2	SP-2	SP-2	SP-2	SP-2
Modulador de viscosidad	VM-1	VM-1	VM-1	VM-1	VM-1
Retardante	SR-1	SR-1	SR-1	SR-1	SR-2
<b>Estudio de combinaciones de aditivos</b>	E	E	C	C	E
<b>Mezclas con dióxido de titanio</b>	Control	Control	Control	Control	Control
<b>Influencia de la compactación en mezclas de hormigón poroso</b>	IMP-1	IMP-1	IMP-1	VAR-4	VAR-4
<b>Absorción del sonido con distintos agregados</b>	POR-1	POR-1	BAS-2	BAS-2	BAS-2
<b>Estudio de geopolímeros</b>	CEM-1	CEM-1	MET-1	MET-1	MET-1

Tabla 75. Mezclas óptimas para cada estudio realizado por cada método multi-criterio evaluado con el método de ponderación AHP con lógica difusa. (Fuente: Elaboración propia).

Estudio	Método multi-criterio				
	AHP	ANP	WASPAS	TOPSIS	PROMETHEE II
<b>Comparación de métodos de dosificación</b>	PCD-3	PCD-2	PCD-3	PCD-3	PCD-3
<b>Determinación de la dosificación óptima sin aditivos</b>	C-6	B-16	B-5	B-5	B-12
<b>Estudio de aditivos por separado</b>					
Fibras de acero al carbono	Control	Control	Control	Control	Control
Fibras de polipropileno	PF-2	PF-2	PF-2	PF-2	PF-2
Inclisor de aire	AE-1	AE-1	AE-3	AE-3	AE-3
Microsílice	MS-4	MS-4	MS-2	MS-2	MS-2
Nanosílice	NS-1	NS-1	NS-1	NS-1	NS-1
Superplastificante	SP-2	SP-2	SP-2	SP-3	SP-2
Modulador de viscosidad	VM-1	VM-1	VM-1	VM-1	VM-1
Retardante	SR-1	SR-1	SR-1	SR-1	SR-2
<b>Estudio de combinaciones de aditivos</b>	E	E	C	C	C
<b>Mezclas con dióxido de titanio</b>	Control	Control	Control	Control	Control
<b>Influencia de la compactación en mezclas de hormigón poroso</b>	IMP-1	IMP-1	VAR-4	VAR-4	VAR-4
<b>Absorción del sonido con distintos agregados</b>	POR-1	POR-1	BAS-2	BAS-2	BAS-2
<b>Estudio de geopolímeros</b>	CEM-1	CEM-1	MET-1	MET-1	MET-1

A continuación se presentan las conclusiones parciales obtenidas de los diversos análisis multi-criterio realizados a lo largo de la presente investigación:

- El análisis multi-criterio permite hacer una evaluación de diferentes alternativas (mezclas en este caso) que tienen diversos criterios (ensayos realizados) para llegar a tomar la mejor decisión de la alternativa óptima a desarrollar.
- Las ponderaciones de los criterios son determinantes e influyen por completo en el análisis multi-criterio. Por esta razón, es importante contar con la opinión de expertos que avalen las decisiones referentes a la importancia entre criterios.
- En términos generales, en todos los métodos evaluados, la metodología PCD obtuvo un peso mayor de importancia que la metodología ACI 522R-10, concluyendo que la primera permite diseñar obteniendo mejores propiedades mecánicas, hidráulicas y de seguridad en un pavimento de hormigón poroso.
- Los valores de macrotextura no fueron considerados en el análisis multi-criterio ya que no representan un valor significativo en el comportamiento del pavimento poroso, siendo sus resultados meramente informativos.
- En general, el análisis multi-criterio en la determinación de la dosificación óptima sin aditivos con la metodología PCD dió preferencia a una mezcla con una granulometría 4-8mm, huecos en el agregado mineral del 47% y una relación arena-cemento (s/c) de 0.5.
- En cuanto a la relación agua-cemento (a/c), la preferencia estuvo dividida dependiendo del método multi-criterio empleado. Donde el método AHP y el método TOPSIS eligieron una relación de 0.4. El primer método determinó a la mezcla C-6 como la mejor debido al peso de los cuestionarios y resultados obtenido del coeficiente de resistencia al deslizamiento, que fueron los más altos. Mientras que el método TOPSIS eligió a la mezcla D-4, quien dió los valores más altos de permeabilidad por un margen muy amplio.
- El método ANP eligió a la mezcla B-16, con una relación agua-cemento (a/c) de 0.30. Esta mezcla fue quien tuvo los resultados mecánicos más altos del total. Finalmente, el método WASPAS y PROMETHEE determinaron a la mezcla B-5,

con una relación agua-cemento (a/c) de 0.35, y B-12, con un a/c de 0.4, respectivamente.

- Las fibras de acero al carbono no representaron una mejora en las mezclas de hormigón poroso, por el contrario, llegaron a afectar sus valores de tracción indirecta y permeabilidad. Las fibras de polipropileno, empleándolas en 1.50% del peso del cemento en la mezcla, son suficientes para incrementar la seguridad en este tipo de pavimentos. Una cantidad menor no es suficiente para mantener el pavimento junto en caso de falla.
- El inclusor de aire, en un 0.15% del peso del cemento, ayuda a la mezcla a ser más trabajable, facilitando su mezclado y puesta en el molde. Una cantidad mayor haría a la mezcla muy líquida y se colmataría.
- La suspensión de nanosílice, en un 0.50% del peso del cemento ayuda a lograr una trabajabilidad mejor y a incrementar las propiedades mecánicas de la mezcla. La microsílice, debido a su densidad, colmata la mezcla, disminuyendo su permeabilidad, aunque aún con la suficiente capacidad para operar bajo condiciones de lluvia intensa. Este material, en un 15% del peso del cemento, ayuda también a incrementar la capacidad mecánica de la mezcla, ayudando a disminuir la cantidad de cemento empleada.
- El superplastificante, retardante y modulador de viscosidad, en 1.50%, 0.20% y 0.50% del peso del cemento, respectivamente, ayudan también a la trabajabilidad y puesta en obra de este tipo de mezclas, ya que son mezclas con poca agua y se endurecen más rápido. Al mismo tiempo, estas cantidades ayudan a incrementar la capacidad mecánica, manteniendo una capacidad de permeabilidad muy buena también.
- Las combinaciones de aditivos C y E fueron las mejores de acuerdo con los análisis multi-criterio, donde el uso de superplastificante e inclusor de aire ayudaron a la mezcla a tener la trabajabilidad adecuada para obtener la mejor relación mecánica-hidráulica posible.
- El dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) no representa un beneficio mecánico ni hidráulico a la mezcla cuando se introduce en la mezcla en cualquier cantidad, siendo la mezcla de Control quien tuvo la mayor jerarquía. A mayor cantidad de este aditivo, mayor es

la pérdida de propiedades mecánicas e hidráulicas. Sin embargo, los resultados aún pueden considerarse buenos, por lo que un ensayo de eficiencia fotocatalítica determinaría su viabilidad.

- Referente a la influencia de la compactación en mezclas de hormigón poroso, el análisis multi-criterio dió como las mejores mezclas a la IMP-1 y a la VAR-4, donde la primera tuvo los valores de tracción indirecta más altos, y la segunda los valores de permeabilidad más altos. Se considera la mezcla IMP-1 como la mejor, al tener una mejor relación entre resistencia mecánica y capacidad hidráulica, ya que la mezcla VAR-4 tuvo una resistencia muy baja, donde se llegaban a desprender partículas de agregado de la superficie.
- El material basalto dió la mejor relación en términos mecánicos, hidráulicos y de seguridad, junto con la capacidad de absorción del sonido. Esto gracias, en parte, al método utilizado para determinar el NRC (ecuación 48). Es por esto que el análisis multicriterio determinó a la mezcla BAS-2 como la óptima
- El material calizo tuvo de los valores más bajos en términos generales, en comparación con el basalto y el pórfido. Este último, con una granulometría 8-12mm (mezcla POR-2), representó los mejores valores del coeficiente de absorción del sonido cuando se utilizan solamente los parámetros de 600-800Hz considerados para pavimentos.
- Sustituir 5% del cemento en la mezcla con metacaolín ayuda a obtener los valores mecánicos e hidráulicos más altos. Esto es algo muy bueno ya que se disminuye el uso del cemento en mezclas de hormigón, generando un impacto al ambiente menor gracias al uso de geopolímeros. Es por eso que la mezcla CEM-1 se considera la mejor en este análisis multi-criterio.
- Sin embargo, tomando en cuenta las mezclas de geopolímeros sin cemento, a mayor cantidad de metacaolín, mayor será la resistencia mecánica. Inclusive, debido al comportamiento que presenta este material una vez activado con un líquido reactivo, también se impulsa una mayor capacidad hidráulica controlando adecuadamente los huecos desde el diseño. En esta investigación, la mezcla con 100% de metacaolín (MET-1) demostró también muy buenos resultados, especialmente correlacionando resistencia y capacidad hidráulica.

- Es necesario un estudio más profundo de geopolímeros en mezclas porosas, con distintas cantidades de contenido de huecos para obtener los mejores resultados y los parámetros óptimos a utilizar.

#### **4.9. Parámetros óptimos para el diseño de pavimentos de hormigón poroso**

A continuación se presenta una propuesta de hormigón multifuncional, dependiendo del uso que se le vaya a dar al pavimento, y de acuerdo a los ensayos aplicados en la presente investigación, así como de los resultados obtenidos del análisis multi-criterio. Por consiguiente, será difícil recomendar, por ejemplo, una cierta combinación de aditivos junto con una cantidad de  $\text{TiO}_2$ , debido a que no se evaluaron estos componentes juntos y aún no se conoce cuál será su comportamiento.

##### **4.9.1. Criterios y requerimientos de desempeño de mezclas de hormigón poroso**

El presente apartado muestra los parámetros de desempeño en los que se basó la presente investigación para considerar al pavimento apto para un uso urbano, en términos de tracción indirecta y permeabilidad. Estos dos ensayos son considerados los más importantes al tratarse de considerar un pavimento de hormigón poroso para su desarrollo.

La Figura 82 muestra el gráfico propuesto por Bonicelli et al., 2016, donde los requerimientos de desempeño para diferentes usos urbanos de los pavimentos de hormigón poroso se muestran. Como es explicado por los autores, los caminos urbanos de volumen medio requieren una resistencia a la tracción indirecta sobre los 1.9MPa; los caminos urbanos de volumen pequeño y aparcamientos contemplan una tracción indirecta entre 1.7-1.9MPa y una permeabilidad sobre 1cm/s. Valores de tracción indirecta entre 1.5-1.7MPa y una permeabilidad sobre 1.5cm/s son necesarias para las ciclovías, mientras que valores de permeabilidad sobre los 2cm/s funcionan mejor en áreas peatonales, aceras, plazas y parques.

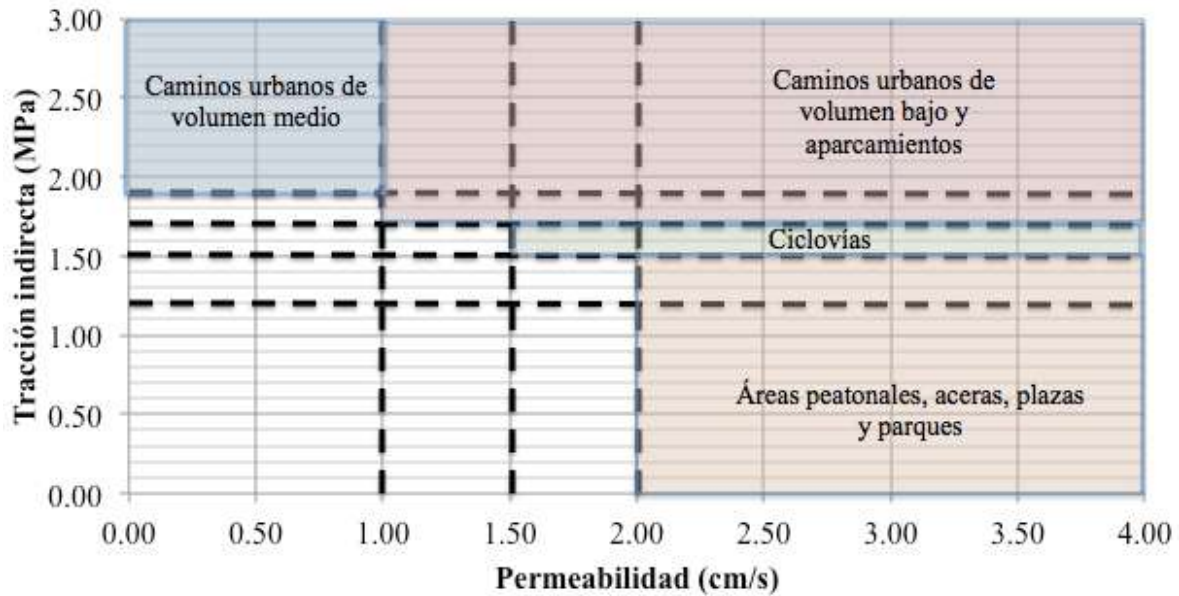


Figura 82. *Requerimientos de desempeño para diversos usos urbanos de los pavimentos de hormigón poroso de acuerdo con Bonicelli et al., 2016. (Fuente: Bonicelli, Arguelles, and Pumarejo 2016).*

También, en términos de permeabilidad, de acuerdo con el Centro Nacional de Tecnología del Asfalto (National Center for Asphalt Technology – NCAT, por sus siglas en inglés), una permeabilidad de 100m/día (o su equivalente a 0.012cm/s) es sugerida para pavimentos porosos (Alvarez et al. 2006; Mallick et al. 2000).

#### 4.9.2. Propuesta de pavimento multifuncional de hormigón poroso

El elegir una sola mezcla de hormigón poroso como la mejor de todas, incluyendo combinaciones de aditivos, compactación, entre otras características, se considera difícil y, además, erróneo. Esto ya que el pavimento se diseña en función del uso que este tendrá. Por ejemplo, no es lo mismo diseñar un pavimento que será utilizado para el tráfico de vehículos ligeros, que un pavimento que será empleado para peatones. Éste último requiere menor resistencia mecánica por el peso que tendría que resistir, y por lo tanto se puede sacrificar la resistencia por maximizar otras funciones.

De acuerdo a los resultados obtenidos y a los requerimientos de desempeño considerados en el apartado anterior, se considera que la metodología PCD es la mejor opción para diseñar mezclas de hormigón poroso. Inclusive, es posible diseñar mezclas porosas con otros materiales, como los geopolímeros y, posiblemente, con asfalto. Aquí solamente hay que establecer los parámetros de diseño ya que el comportamiento y

trabajabilidad de los materiales es distinta, pero los pasos a seguir serían iguales. Además, de las dosificaciones de hormigón poroso analizadas con la metodología PCD, se recomienda la dosificación B-5, la cual estuvo dentro de las 5 mejores mezclas en cada uno de los métodos de análisis multi-criterio. Esta mezcla demostró valores mecánicos muy altos, que es lo que se busca incrementar en este tipo de mezclas para poder ser utilizadas en calles y autopistas. Sus valores de permeabilidad fueron aceptables también, y suficientes para soportar eventos de lluvia.

En cuanto al método de compactación utilizado, la compactación por impacto (Marshall) a 50 golpes por un lado de la probeta, que simula un rodillo compactador vibratorio, demostró dar la mejor relación mecánica-hidráulica a las mezclas. En caso de que el pavimento se piense utilizar en una zona sin tráfico vehicular, y moderado tráfico peatonal, como alguna zona pavimentada en el patio trasero de una casa, una buena opción puede ser la varilla de apisonamiento, a 20 golpes y dos capas, que simula un vibrador de hormigón. Ya que otorgan una resistencia mecánica baja (que no importa mucho al tener poca carga sobre el pavimento), y una permeabilidad muy alta.

Además, si se pretende utilizar el pavimento en una zona peatonal, el sustituir 15% del cemento con microsílíce, sin otro aditivo, ayuda a mejorar la capacidad mecánica de la mezcla, ayudando también a disminuir el uso de cemento. O, por otro lado, emplear la combinación de aditivos C o E ayudan mucho a mejorar este comportamiento también. En cuanto al metacaolín, se considera que ayuda mucho al comportamiento mecánico e hidráulico de las mezclas de hormigón poroso si se sustituye en un 10% con la cantidad de cemento calculada para la mezcla.

Si lo que se desea es disminuir el ruido con pavimentos de hormigón poroso, emplear material pórfido como agregado en una granulometría 8-12mm ayuda a mejorar la absorción del sonido considerablemente. A pesar de esto, hay que tener en cuenta que, de acuerdo al estudio de dosificaciones, la granulometría 4-8mm proporciona los mejores resultados mecánicos.

En la Figura 83 se observa un diagrama de las propiedades propuestas para un hormigón multifuncional.

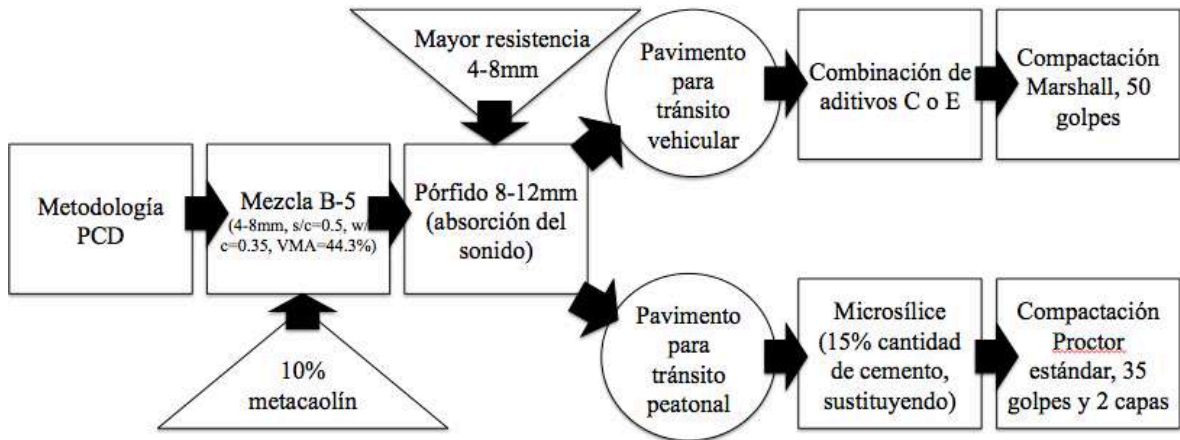


Figura 83. Propuesta final. Diagrama de propiedades propuestas para obtener un hormigón poroso multifuncional (Fuente: Elaboración propia).

Lamentablemente en esta investigación doctoral no hubo oportunidad para fabricar las mezclas que se proponen para comprobar los resultados esperados, pero sí se ha logrado el objetivo principal de probar sin lugar a dudas la capacidad multifuncional del hormigón poroso aportando metodologías para la toma de decisión durante su diseño.



## **CAPÍTULO V. CONCLUSIONES**

En este capítulo se presentan las conclusiones particulares y generales obtenidas del análisis de resultados en la presente tesis de investigación. Al mismo tiempo, se presentan algunas recomendaciones y futuras líneas de investigación identificadas.

## 5.1. Conclusiones particulares

De las conclusiones parciales obtenidas de la discusión de los resultados de las distintas partes de las que consta la presente tesis, se destacan las siguientes:

### 5.1.1. Comparación de métodos de dosificación y estudio económico

Las siguientes conclusiones particulares extraída de la comparación de metodologías dan por cumplidos los objetivos particulares 1 y 2 fijados para esta tesis:

- El análisis multi-criterio otorgó un peso mayor a la metodología PCD sobre la metodología ACI 522R-10, concluyendo que la primera provee de mejores propiedades mecánicas, hidráulicas y de seguridad a un pavimento de hormigón poroso.
- Las mezclas PCD obtuvieron un 30% mayor resistencia mecánica en comparación con las mezclas ACI 522R-10. Sin embargo, su permeabilidad fue 40% menor. Aún así, sobrepasan las especificaciones mínimas requeridas por normativas americanas de infiltrar 100m/día (0.012cm/s).
- Para lograr mayor capacidad mecánica con la metodología PCD, hay que incrementar la cantidad de mortero y disminuir la de agregado grueso (aumentar los huecos en el agregado mineral), sacrificando parcialmente la capacidad de infiltración.

Las siguientes conclusiones particulares extraídas del estudio económico dan por cumplido el objetivo particular 3 fijado para esta tesis:

- Las mezclas PCD pueden ser entre un 6 y un 16% más costosas que las mezclas ACI 522R-10, dependiendo de la relación arena-cemento (s/c) empleada. Esto porque la metodología PCD utiliza más cemento. Sin embargo, se considera viable ya que su resistencia en el largo plazo es mayor que la proporcionada por las mezclas ACI 522R-10.
- El hormigón poroso realizado con la metodología PCD es más económico que el hormigón convencional para pavimentos y que para el asfalto.

### **5.1.2. Determinación de la dosificación óptima sin aditivos**

Las siguientes conclusiones particulares extraídas del apartado de determinación de la dosificación óptima sin aditivos dan por cumplido el objetivo particular 2 fijado para esta tesis:

- La adición de arena en las mezclas PCD incrementa tanto su resistencia mecánica como su permeabilidad, debido a la forma de diseñar la dosificación (crear un mortero en vez de una pasta de cemento). Adicionalmente, la arena otorga mayor rugosidad a la superficie de la mezcla, logrando incrementar la fricción. Una relación arena-cemento (s/c) de 0.5 demostró el mayor incremento en la capacidad mecánica, así como la capacidad de infiltración.
- Para lograr una mayor capacidad de infiltración con la metodología PCD, hay que incrementar la granulometría y el volumen de huecos. Esto puede perjudicar la capacidad mecánica de la mezcla, pero puede mejorar, además, la fricción del pavimento, evitando películas de agua en la superficie y mejorando la interacción entre los neumáticos y la superficie del pavimento.
- La granulometría y la cantidad de cemento son considerados los principales factores en influenciar los resultados en este tipo de mezclas de hormigón poroso. Esto debido a que la granulometría influye en la estructura interna de la mezcla, determinando el porcentaje de huecos, así como la resistencia mecánica. El cemento precisa otros factores, como la cantidad de agua y arena a emplear, para asegurar una buena adhesividad del mortero y poder conectar las partículas de agregado grueso adecuadamente, fundamental para la resistencia.

### **5.1.3. Estudio de aditivos y adiciones**

Las siguientes conclusiones particulares extraídas del estudio de aditivos y adiciones dan por cumplido el objetivo particular 4 fijado para esta tesis:

- La adición de fibras de acero al carbono no representaron ninguna mejora en términos mecánicos ni de permeabilidad, en comparación con la mezcla de control. Por el contrario, los valores fueron menores. La longitud de las fibras, de alrededor

de 1cm, se considera insuficiente para mantener una adhesión adecuada entre las partículas de agregado debido al alto contenido de huecos presente en las mezclas.

- Se observa que el agua infiltrada podría oxidar las fibras de acero al carbono, alterando su propiedad y debilitando la mezcla, y la permanencia de las fibras metálicas en superficie podría causar daños a los usuarios de los pavimentos.
- La combinación de fibras de polipropileno, superplastificante e incluso de aire, demostró la mayor mejoría en términos mecánicos e hidráulicos, además de valores aceptables de resistencia al deslizamiento.
- El introducir dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) en las mezclas de hormigón poroso representa una pérdida de las capacidades mecánicas e hidráulicas, donde, a mayor cantidad, mayor es la pérdida.
- La pasta de  $\text{TiO}_2$  colocada en la superficie tiende a taparla, disminuyendo la permeabilidad. Una mezcla de  $\text{TiO}_2$  con agua se introduce en los huecos tapándola; una mezcla de  $\text{TiO}_2$ , agua, cemento y arena, tiende a ser muy densa y tapa la superficie de la mezcla. Una combinación de  $\text{TiO}_2$ , agua y cemento llegó a proporcionar la mejor trabajabilidad, disminuyendo la permeabilidad muy poco.

#### **5.1.4. Influencia de la compactación en mezclas de hormigón poroso**

Las siguientes conclusiones particulares extraídas del estudio de la influencia de la compactación en mezclas de hormigón poroso dan por cumplido el objetivo particular 5 fijado para esta tesis:

- El método de compactación, así como el esfuerzo para compactar, utilizado, determinarán su comportamiento mecánico e hidráulico. Es importante encontrar un equilibrio ya que a mayor esfuerzo de compactación, incrementa su resistencia, pero disminuye su capacidad de infiltración, al colmatarse la mezcla.
- La compactación por impacto, que simula un rodillo compactador tambor, demostró los resultados mecánicos más altos, con una permeabilidad aceptable, siendo considerado el método óptimo para compactar mezclas de hormigón poroso, con 50 golpes.

- La varilla de apisonamiento, que simula un vibrador de hormigón, obtuvo los valores de permeabilidad más altos ya que este método tiende a acomodar la mezcla en el molde, más que a aplicar una fuerza para compactar. Por consiguiente, los resultados mecánicos fueron los más bajos ya que los puentes de interconexión del mortero entre las partículas de agregado eran muy delgados y débiles.

#### **5.1.5. Absorción del sonido con distintos agregados**

Las siguientes conclusiones particulares extraídas del estudio de absorción del sonido con distintos agregados dan por cumplido el objetivo particular 5 fijado para esta tesis:

- A mayor tamaño de la granulometría empleada, los valores de permeabilidad son más altos, sin importar el material empleado como agregado, puesto que a igualdad de dosificación, se generan más huecos que absorben el sonido.
- La absorción acústica que los pavimentos de hormigón poroso pueden otorgar está ligada principalmente a la granulometría empleada, así como al tipo de agregado utilizado. La mezcla con basalto 8-12mm representó los mejores niveles de absorción del sonido a altas y bajas frecuencias.
- La mezcla con pórfido 8-12mm tuvo los mejores resultados a una frecuencia entre 600-800Hz con los que se dice un pavimento trabaja normalmente. Teniendo en promedio un coeficiente de absorción general entre 0.04-0.2, considerada aceptable.
- Las imágenes por resonancia magnética son una herramienta eficaz que permiten tener un cálculo más preciso de la porosidad con la que cuentan las mezclas de hormigón poroso. Al mismo tiempo permitir ver la composición de la estructura interna de la mezcla, lo que conciente un entendimiento más claro del comportamiento mecánico, hidráulico, de seguridad y absorción del sonido que puede llegar a tener la mezcla analizada.

#### **5.1.6. Estudio de geopolímeros**

Las siguientes conclusiones particulares extraídas del estudio de geopolímeros dan por cumplido el objetivo particular 6 fijado para esta tesis:

- El realizar mezclas porosas con geopolímeros con la metodología PCD puede otorgar resultados mecánicos e hidráulicos muy buenos en una sola mezcla. Sin embargo, su dosificación es diferente a la realizada con el cemento, debido a la forma en que los componentes se comportan con el agregado.
- Mezclas porosas con metacaolín activado mediante un líquido reactivo, diseñadas con la metodología PCD, necesitan ser diseñadas con un contenido de huecos entre 20-30% para tener la porosidad adecuada que permita una buena permeabilidad. De lo contrario, por el comportamiento del geopolímero, la probeta puede colmatarse.
- Las mezclas de hormigón poroso tienden a formar puentes de conexión entre las partículas de agregado, mientras que los geopolímeros tienden a cubrir el agregado con el mortero.
- El basalto cambia las propiedades y la trabajabilidad de las mezclas con geopolímeros, y tiende a ser menos adhesivo, influyendo negativamente en la capacidad mecánica e hidráulica de las mezclas.

#### 5.1.7. Análisis multi-criterio

Las siguientes conclusiones particulares extraídas del análisis multi-criterio dan por cumplido el objetivo particular 7 fijado para esta tesis:

- La metodología PCD obtuvo un peso mayor de importancia que la metodología ACI 522R-10, concluyendo que la primera permite diseñar obteniendo mejores propiedades mecánicas, hidráulicas y de seguridad en un pavimento de hormigón poroso.
- Una relación arena-cemento (s/c) de 0.5, una relación agua-cemento (a/c) de 0.35, junto con una granulometría de 4-8mm, llegaron a ser los mejores parámetros de dosificación en mezclas de hormigón poroso con la metodología PCD, otorgando, principalmente, una relación mecánica-hidráulica buena.
- De acuerdo al análisis, el uso de superplastificante e inductor de aire se considera necesario para mejorar la trabajabilidad de la mezcla y proporcionar una relación mecánica-hidráulica aceptable en la misma.

- El análisis multi-criterio determinó que los métodos de compactación por impacto y varilla de apisonamiento otorgan los mejores resultados mecánicos e hidráulicos respectivamente. Sin embargo, se determina que, de acuerdo a la finalidad de mejorar la resistencia de las mezclas porosas manteniendo una buena permeabilidad, el método por impacto es recomendable.
- El material basalto, junto con una granulometría de 8-12mm tuvo la mejor relación en términos mecánicos, hidráulicos, de fricción y absorción del sonido.
- Sustituir 5% de cemento por metacaolín incrementa las propiedades mecánicas e hidráulicas. Sin embargo, el uso de geopolímeros, con la adecuada dosificación puede llegar a tener valores mecánicos muy altos, manteniendo buena permeabilidad.

## 5.2. Conclusiones generales

La presente tesis de investigación titulada “Estudio de superficies urbanas multifuncionales de hormigón poroso”, ha cumplido sus objetivos generales de partida, alcanzando las siguientes conclusiones generales:

- Se han estudiado de forma crítica el estado de la técnica de diferentes materiales, dosificaciones y procedimientos de construcción de pavimentos de hormigón poroso, cumpliendo con el objetivo general 1, y publicando un artículo de revisión crítica al respecto, siendo citado tres veces hasta el momento:

Elizondo-Martínez, Eduardo-Javier, Valerio-Carlos Andrés-Valeri, Daniel Jato-Espino, and Jorge Rodríguez-Hernandez. 2020. “Review of Porous Concrete as Multifunctional and Sustainable Pavement.” *Journal of Building Engineering* 27.

- Se ha desarrollado y validado mediante comparación una nueva metodología de dosificación de mezclas de hormigón poroso, en donde se mejoraron las propiedades mecánicas de las probetas, manteniendo propiedades hidráulicas aceptables, cumpliendo con el objetivo general 2, y publicando un artículo de investigación al respecto que ha sido citado dos veces hasta el momento:

Elizondo-martinez, Eduardo Javier, Valerio Carlos Andres-valeri, Jorge Rodriguez-herandez, and Daniel Castro-fresno. 2019. "Proposal of a New Porous Concrete Dosage Methodology for Pavements." *Materials* 12(3100): 1–16.

- Se ha determinado la cantidad y combinación óptima de aditivos y adiciones, aunándolas con las propiedades mecánicas, hidráulicas y de seguridad, cumpliendo con el objetivo general 3, y publicando un artículo de investigación al respecto que ha sido citado una vez hasta el momento:

Elizondo-Martínez, E.-J.; Andrés-Valeri, V.-C.; Rodríguez-Hernández, J.; Sangiorgi, C. Selection of Additives and Fibers for Improving the Mechanical and Safety Properties of Porous Concrete Pavements through Multi-Criteria Decision-Making Analysis. *Sustainability* **2020**, *12*, 2392.

- Se han estudiado diversas dosificaciones de diseño de mezclas de hormigón poroso con la metodología propuesta, maximizando la relación mecánica-hidráulica de las mezclas, cumpliendo con el objetivo general 2, y dando lugar a la publicación de un artículo de investigación:

E. J. Elizondo-Martínez, V.C. Andrés-Valeri, L. Juli-Gándara, J. Rodriguez-Hernandez, Multi-criteria optimum mixture design of porous concrete pavement surface layers, *Int. J. Pavements Eng.* (2020) 1-10. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1768254>

- Se ha analizado, a nivel laboratorio, diferentes métodos de compactación, con diversos esfuerzos, para determinar el procedimiento que otorga la mejor relación mecánica-hidráulica en mezclas de hormigón poroso con la metodología propuesta, cumpliendo con el objetivo general 3, y dando lugar a una publicación que se encuentra actualmente en revisión:

Eduardo-Javier Elizondo-Martínez, Alexandra Ossa-López, Jorge Rodriguez-Hernandez. Evaluation of the effect of different compaction methods in porous concrete pavements: correlation with strength and permeability. *Revista Journal of Materials in Civil Engineering*.

- Se ha estudiado la absorción del sonido en mezclas de hormigón poroso empleando diversos agregados y gradaciones, identificando los parámetros en los que se



obtiene una mayor absorción en relación con las capacidades mecánicas e hidráulicas de la mezcla, dando lugar a una publicación que se encuentra actualmente en revisión.

- Se ha analizado el diseño y uso de geopolímeros en mezclas porosas, evaluando su uso con la metodología propuesta en la presente tesis de investigación, identificando diferencias en el comportamiento con respecto al hormigón y parámetros de diseño, dando lugar a la publicación de un artículo científico.

Elizondo-Martínez, E.-J.; Tataranni, P.; Rodríguez-Hernández, J.; Castro-Fresno, D. Physical and mechanical characterization of sustainable and innovative porous concrete for urban pavements containing metakaolin. *Sustainability* **2020**, *12*, 4243.

En conclusión, la presente tesis ha probado la multifuncionalidad, en términos de resistencia mecánica, capacidad de infiltración, resistencia al deslizamiento y capacidad acústica de pavimentos de hormigón poroso creados con una nueva metodología de diseño, validando la hipótesis de partida y realizando un aporte original al diseño de superficies urbanas.

Finalmente, es importante destacar los beneficios que los pavimentos de hormigón poroso ofrecen a las zonas urbanas en términos económicos, sociales y ambientales, constituyendo una solución plenamente sostenible. Aún así, se presenta el gran inconveniente de la baja resistencia y durabilidad que presentan estos pavimentos en comparación con los de diseño convencional, debido fundamentalmente a la falta de experiencia y criterios de diseño. Como solución, la presente investigación ha logrado proporcionar conocimiento suficiente para tomar decisiones a favor de su correcto diseño y uso.

### 5.3. Recomendaciones

A continuación se presentan una serie de recomendaciones para el diseño y colocación de pavimentos de hormigón poroso, de acuerdo al estudio de la literatura y al análisis realizado en los capítulos anteriores:

- Es importante evaluar el tipo y la **intensidad del tráfico** de la zona donde se quiere instalar el pavimento de hormigón poroso. Esto permitirá un diseño eficiente del pavimento, incluidos los aditivos a emplear. Por ejemplo, si se quiere diseñar un pavimento poroso en un área peatonal, se puede implementar un diseño con microsílice, sustituyendo un porcentaje del cemento con este aditivo, disminuyendo el uso e impacto ambiental del cemento.
- Es necesario realizar una evaluación de la **geotecnia** del área donde se instalará el pavimento poroso. Esto con la finalidad de realizar un diseño con una compactación adecuada de la explanada, y se evite la falla estructural del mismo. Al mismo tiempo, el conocer el tipo de suelo donde se pretende instalar el pavimento poroso permitirá decidir el destino final del agua de lluvia captada y saber si es necesario instalar un sistema de impermeabilización inferior y drenaje o no. Por ejemplo, si en la zona donde se va a construir predominan las arcillas expansivas, y se diseña un pavimento poroso, dejando que infiltre el agua en el subsuelo, este material se expandería en contacto con el agua, llevando a la casi segura falla del pavimento y posibles accidentes viales.
- Es imprescindible contar con una herramienta de **control de calidad** desde el momento en que se comienza la construcción de un pavimento de hormigón poroso. Esto es debido a que este tipo de materiales son muy especiales y pueden llegar a ser delicados, en el sentido de que si el espacio de trabajo es muy sucio, o si el árido a emplear se mezcla con otros tamaños finos del entorno, o si la elección de materiales no es la adecuada en términos de calidad, el resultado final puede ser un pavimento colmatado o con una capacidad de infiltración muy limitada. Inclusive, la capacidad mecánica se puede ver afectada.
- Ligado al punto anterior, es importante realizar un **programa de mantenimiento** efectivo de los pavimentos para prolongar su vida útil lo más posible.

Entendiéndose como vida útil la capacidad de infiltración del pavimento, así como su propiedad acústica y fricción, dependiendo de las características añadidas en el diseño. Este programa de mantenimiento debe contener visitas de inspección, limpieza, mantenimiento preventivo, entre otros.

- Finalmente, es muy importante mantener una **humedad óptima** en el pavimento durante los primeros 28 días de realizado, con el fin de obtener la máxima resistencia mecánica posible. Esto puede lograrse cubriendo la superficie del pavimento con un plástico, para evitar la pérdida de humedad, así como el humedecimiento frecuente del pavimento con agua, cuando se instala in situ el pavimento. En muestras de laboratorio, se introduce la probeta en agua durante un periodo de 28 días. Se destaca, además la importancia del método de compactación que se utilice para satisfacer la función de permeabilidad, otorgando la resistencia suficiente al pavimento.

#### **5.4. Futuras líneas de investigación**

Las líneas de investigación sobre superficies urbanas multifuncionales de hormigón poroso, particularmente diseñados con la metodología PCD, ofrecen múltiples oportunidades de desarrollo a partir de la presente tesis de investigación. Se pueden mencionar:

- Validar las mezclas propuestas como integradoras de las ventajas estudiadas por separado en esta tesis.
- Normalizar ensayos mecánicos para muestras de hormigón poroso que permitan hacer una comparación fiable con otras metodologías y materiales.
- Evaluar más tipos de árido, así como diferentes granulometrías para estudiar y entender en profundidad su comportamiento en mezclas porosas.
- Normalizar los métodos de compactación en mezclas de hormigón poroso, de manera que sea posible obtener la máxima resistencia mecánica posible, manteniendo una capacidad de infiltración aceptable.

- Construir y monitorizar tramos piloto en zonas urbanas, que permitan la evaluación de la capacidad de infiltración, así como del comportamiento fotocatalítico, acústico, fricción y niveles de albedo de los pavimentos de hormigón poroso.
- Evaluar los niveles de albedo de los pavimentos de hormigón poroso comparándolos con otros materiales, identificando el beneficio en términos de temperatura. Al mismo tiempo, determinar la influencia del tipo de agregado y granulometría empleada, y su relación con la resistencia y permeabilidad del pavimento.
- Realizar un análisis de eficiencia fotocatalítica que permita evaluar la depuración del aire con pavimentos de hormigón poroso con aditivo de dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>). Al mismo tiempo, identificar el método de aplicación más conveniente del aditivo y su influencia en las propiedades de resistencia y permeabilidad de la mezcla.
- Desarrollo de una metodología para la medición eficiente del contenido de huecos presente en la estructura de mezclas de hormigón poroso, que permita observar su interconexión y tortuosidad y entender mejor el comportamiento mecánico, hidráulico y acústico de este tipo de mezclas.
- Realizar un análisis de ciclo de vida de pavimentos de hormigón poroso para evaluar su impacto ambiental, incluyendo un completo estudio de costes a lo largo de dicho ciclo de vida que permita evaluar y cuantificar su sostenibilidad frente a otras opciones de pavimentación urbana.
- Estudiar más en detalle otros materiales cementicios, como los geopolímeros, para entender su comportamiento, y poder diseñar mezclas porosas que otorguen las mejores propiedades posibles, mejorando la sostenibilidad ofrecida por el hormigón poroso.
- Desarrollar un catálogo de nuevas secciones de pavimentos urbanos multifuncionales, teniendo en cuenta las necesidades actuales de adaptación al cambio climático y la necesaria resiliencia de las ciudades de todo el mundo, tomando en consideración el necesario carácter sustentable de estas actuaciones.
- Mediante el uso de softwares estadísticos, realizar modelos de predicción que permitan evaluar comportamientos de los pavimentos, variando las cantidades de

sus componentes, y analizando la influencia de cada uno de ellos en estos pavimentos.



## **EXTENDED ABSTRACT**

El presente capítulo incluye la explicación de la estructura del documento y el capítulo V referente a las conclusiones, traducido íntegramente al inglés.

## Document Structure

The present document starts with the dedications and acknowledgements, following by the index of Contents, and index of Figures and Tables. After that, a section for notes and acronyms, and the thesis abstract, in spanish, english and italian, is included. The research work is exposed in five chapters.

The first chapter corresponds to the introduction, where the background, motivation and justification of the investigation are presented. In addition, the structure of the document, objectives and hypothesis are shown. Also, a brief explanation of the problems that have made sustainable drainage implementation a need in cities, especially permeable pavements, is included. At the same time, some sustainable drainage fundamentals are mentioned, where an explanation of the development of Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in Latinamerica, mainly in Mexico, Colombia, Chile and Brazil, is mentioned.

The second chapter presents the state-of-the-art review, which specifically explores the subject of research, porous concrete. The construction of porous concrete is studied, identifying its components separately, followed by a bibliographic study about its permeability and mechanical resistance. Finally, improvements are added that can be applied to the subject of study for use in the urban environment.

In the third chapter, methodology, the description of materials and dosages of porous concrete mixtures studied are presented, as well as an explanation of the tests that the samples were subjected to in order to study their permeability and mechanical resistance mainly, ending with some improvements added to the specimens with the use of additives. Likewise, other tests on safety and environmental issues are explained.

Subsequently, the results obtained from these tests and their discussion are presented in the fourth chapter, showing the different behaviors in hydraulic, mechanical, safety and environmental behavior, and with the improvements used. These results are analyzed in detail using statistical and multi-criteria methods, with the aim of selecting the most optimal mechanical, sustainable and safety system and dosages.



Finally, the fifth chapter shows the conclusions, both particular and general, that have been reached with the research. Ending with the mention of future lines of investigation related to porous concrete. At last, the bibliography used for the present investigation is presented, as well as the annexes employed.

## **Conclusions**

This chapter presents the particular and general conclusions obtained from the analysis of results in the present research thesis. At the same time, some recommendations and future lines of investigation are identified.

### **5.1. Particular conclusions**

Of the partial conclusions obtained from the discussion of the results of the different sections which this thesis consists, the following stand out:

#### **5.1.1. Comparison of dosage methods and economic study**

The following particular conclusions drawn from the comparison of methodologies consider the specific objectives 1 and 2 set for this thesis to be fulfilled:

- The multi-criteria analysis gave greater weight to the PCD methodology over the ACI 522R-10 methodology, concluding that the former provides better mechanical, hydraulic and safety properties to a porous concrete pavement.
- PCD mixes obtained 30% higher mechanical resistance compared to ACI 522R-10 mixes. However, its permeability was 40% lower. Even so, they exceed the minimum specifications required by American regulations to infiltrate 100m/day (0.012cm/s).
- To achieve greater mechanical resistance with the PCD methodology, it is necessary to increase the amount of mortar and decrease the amount of coarse aggregate (increase the voids in mineral aggregate), partially sacrificing the infiltration capacity.

The following particular conclusions drawn from the economic study fulfill the particular objective 3 set for this thesis:

- PCD mixes can be between 6 and 16% more expensive than ACI 522R-10 mixes, depending on the sand-cement (s/c) ratio used. This is because the PCD methodology uses more cement. However, it is considered viable since its long-term resistance is greater than that provided by ACI 522R-10 mixtures.
- Porous concrete made with the PCD methodology is cheaper than conventional concrete for pavements and asphalt.

### **5.1.2. Determination of the optimal dosage without additives**

The following particular conclusions drawn from the section on determining the optimal dosage without additives, have met the particular objective 2 set for this thesis:

- The addition of sand in PCD mixtures increases both its mechanical resistance and its permeability, due to the way of designing the dosage (creating a mortar instead of a cement paste). Additionally, the sand gives greater roughness to the surface of the mixture, managing to increase friction. A sand-cement (s/c) ratio of 0.5 demonstrated the greatest increase in mechanical capacity, as well as infiltration capacity.
- In order to achieve a greater infiltration capacity with the PCD methodology, the gradation and air voids must be increased. This can affect the mechanical capacity of the mix, but it can also improve the friction of the pavement, avoiding water films on the surface and improving the interaction between the tires and the pavement surface.
- The gradation and amount of cement are considered the main factors in influencing the results in this type of porous concrete mixtures. This is due to the fact that the gradations influences the internal structure of the mixture, determining the percentage of voids, as well as the mechanical resistance. Cement requires other factors, such as the amount of water and sand to be used, to ensure good adhesiveness of the mortar and to be able to connect the coarse aggregate particles properly, which is essential for strength.

### 5.1.3. Additives and additions study

The following particular conclusions drawn from the study of additives and additions consider that particular objective 4 set for this thesis has been fulfilled:

- The addition of carbon steel fibers did not represent any improvement in mechanical or permeability terms, compared to the control mixture. On the contrary, the values were lower. The length of the fibers, about 1cm, is considered insufficient to maintain adequate adhesion between the aggregate particles due to the high air void content presented in the mixtures.
- It is observed that the infiltrated water could oxidize the carbon steel fibers, altering their property and weakening the mixture, and the permanence of the metallic fibers on the surface could cause damage to the users of the pavements.
- The combination of polypropylene fibers, superplasticizer and air entraining, showed the greatest improvement in mechanical and hydraulic terms, in addition to acceptable values of skid resistance.
- Introducing titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ) in porous concrete mixtures represents a loss of mechanical and hydraulic capacities, where at higher amounts, higher losses.
- The  $\text{TiO}_2$  paste placed on the surface tends to cover it, reducing the permeability. A mixture of  $\text{TiO}_2$  with water tends to get inside the voids, clogging it; a mixture of  $\text{TiO}_2$ , water, cement and sand tends to be very dense and covers the surface of the mixture. A combination of  $\text{TiO}_2$ , water and cement came to provide the best workability, decreasing the permeability very little.

### 5.1.4. Influence of compaction in porous concrete mixtures

The following particular conclusions drawn from the study of the influence of compaction in porous concrete mixtures fulfill the particular objective 5 set for this thesis:

- The compaction method, as well as the effort employed, will determine its mechanical and hydraulic behavior. It is important to find a balance since the higher the compaction effort, increases its resistance, but decreases its infiltration capacity, clogging the mixture.

- The impact compaction, which simulates a drum roller compactor, demonstrated the highest mechanical results, with acceptable permeability, being considered the optimal method for compacting porous concrete mixtures, with 50 blows.
- The tamping rod method, which simulates a concrete vibrator, obtained the highest permeability values since this method tends to accommodate the mixture in the mold, rather than applying a compacting force. Consequently, the mechanical results were the lowest since the mortar bridges that interconnected the aggregate particles were very thin and weak.

### **5.1.5. Sound absorption with different aggregates**

The following particular conclusions drawn from the sound absorption study with different aggregates consider that the specific objective 5 set for this thesis has been accomplished:

- At bigger gradation employed, the permeability values are higher, regardless of the material used as an aggregate, since at the same dosage, more voids are generated that absorb sound.
- The acoustic absorption that porous concrete pavements can provide is mainly linked to the gradation employed, as well as the type of aggregate used. The mixture with 8-12mm basalt represented the best levels of sound absorption at high and low frequencies.
- The mixture with 8-12mm porphyry had the best results at a frequency between 600-800Hz with which a pavement is said to work normally. Having on average an overall absorption coefficient between 0.04-0.2, considered acceptable.
- Magnetic resonance imaging is an effective tool that allows a more precise calculation of the porosity of porous concrete mixtures. At the same time, it allows to see the composition of the internal structure of the mixture, which provides a better understanding of the mechanical, hydraulic, safety and sound absorption behavior that the analyzed mixture can have.

### 5.1.6. Geopolymer study

The following particular conclusions drawn from the study of geopolymers consider that the particular objective 6 set for this thesis has been satisfied:

- Performing porous blends with geopolymers employing the PCD methodology can give outstanding mechanical and hydraulic results in a single mixture. However, its dosage is different from that of cement, due to the way in which the components behave with the aggregate.
- Porous mixtures with metakaolin activated by a reactive liquid, designed with the PCD methodology, need to be designed with a void content between 20-30% to have the adequate porosity that allows a good permeability. Otherwise, due to the behavior of the geopolymer, the specimen can be clogged.
- Porous concrete mixtures tend to form connecting bridges between the aggregate particles, while geopolymers tend to cover the aggregate with the mortar.
- Basalt powder changes the properties and workability of the geopolymer mixtures, and tends to be less adhesive, negatively influencing the mechanical and hydraulic capacity of the mixtures.

### 5.1.7. Multi-criteria analysis

The following particular conclusions drawn from the multi-criteria analysis consider that the specific objective 7 set for this thesis has been accomplished:

- The PCD methodology obtained a higher weight of importance than the ACI 522R-10 methodology, concluding that the first one allows to design obtaining better mechanical, hydraulic and safety properties in a porous concrete pavement.
- A sand-cement (s/c) ratio of 0.5, a water-cement (a/c) ratio of 0.35, together with a gradation of 4-8mm, became the best dosing parameters in porous concrete mixtures with the PCD methodology, granting, mainly, a good mechanical-hydraulic relation.

- According to the analysis, the use of superplasticizer and air entraining is considered necessary to improve the workability of the mixture and provide an acceptable mechanical-hydraulic relation in it.
- The multi-criteria analysis determined that the impact compaction method and the tamping rod give the best mechanical and hydraulic results respectively. However, it is determined that, in order to improve the resistance of porous mixtures while maintaining a good permeability, the impact method is recommended.
- The basalt material, together with an 8-12mm gradation, had the best relation in mechanical, hydraulic, friction and sound absorption terms.
- Replacing 5% of cement with metakaolin increases mechanical and hydraulic properties. However, the use of geopolymers, with the proper dosage, can have high mechanical values, maintaining a good permeability.

## 5.2. General conclusions

The present research thesis entitled “Study of porous concrete multifunctional urban surfaces”, has fulfilled its general objectives, reaching the following general conclusions:

- The state-of-the-art of different materials, dosages and construction procedures for porous concrete pavements have been critically studied, complying with general objective 1, and publishing a critical review article in this regard, being cited three times at this moment:

Elizondo-Martínez, Eduardo-Javier, Valerio-Carlos Andrés-Valeri, Daniel Jato-Espino, and Jorge Rodríguez-Hernández. 2020. “Review of Porous Concrete as Multifunctional and Sustainable Pavement.” *Journal of Building Engineering* 27.

- A new methodology for dosing porous concrete mixtures has been developed and validated, where the mechanical properties of the specimens were improved, maintaining an acceptable hydraulic capacity, meeting general objective 2, and publishing a research article in this regard, which has been cited twice so far:

Elizondo-martinez, Eduardo Javier, Valerio Carlos Andres-valeri, Jorge Rodriguez-herandez, and Daniel Castro-fresno. 2019. “Proposal of a New Porous Concrete Dosage Methodology for

Pavements.” *Materials* 12(3100): 1–16.

- The optimal amount and combination of additives and additions has been determined, combining them with the mechanical, hydraulic and safety properties, accomplishing general objective 3, and publishing a research article in this regard, which has been cited one time at the moment:

Elizondo-Martínez, E.-J.; Andrés-Valeri, V.-C.; Rodríguez-Hernández, J.; Sangiorgi, C. Selection of Additives and Fibers for Improving the Mechanical and Safety Properties of Porous Concrete Pavements through Multi-Criteria Decision-Making Analysis. *Sustainability* **2020**, *12*, 2392.

- Various design dosages of porous concrete have been studied with the proposed methodology, maximizing the mechanical-hydraulic relation of the mixtures, fulfilling general objective 2, and leading to the publication of a research article:

E. J. Elizondo-Martínez, V.C. Andrés-Valeri, L. Juli-Gándara, J. Rodríguez-Hernandez, Multi-criteria optimum mixture design of porous concrete pavement surface layers, *Int. J. Pavements Eng.* (2020) 1-10. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1768254>

- Different compaction methods have been analyzed at laboratory scale, with various efforts, to determine the procedure that provides the best mechanical-hydraulic relation in porous concrete mixtures with the proposed methodology, accomplishing the general objective 3, and achieving a research article currently under review:

Eduardo-Javier Elizondo-Martínez, Alexandra Ossa-López, Jorge Rodríguez-Hernandez. Evaluation of the effect of different compaction methods in porous concrete pavements: correlation with strength and permeability. *Journal of Materials in Civil Engineering*.

- Sound absorption in porous concrete mixtures has been studied using various aggregates and gradations, identifying the parameters in which greater absorption is obtained in relation to the mechanical and hydraulic capacities of the mixture, leading to a research paper that is currently under review.
- The design and use of geopolymers in porous mixtures has been analyzed, evaluating their use with the proposed methodology in this research thesis,

identifying differences in the behavior with respect to cement concrete and design parameters, leading to the publication of a research paper:

Elizondo-Martínez, E.-J.; Tataranni, P.; Rodríguez-Hernández, J.; Castro-Fresno, D. Physical and mechanical characterization of sustainable and innovative porous concrete for urban pavements containing metakaolin. *Sustainability* **2020**, *12*, 4243.

In conclusion, this thesis has tested the multifunctionality, in terms of mechanical resistance, infiltration capacity, skid resistance and acoustic capacity of porous concrete pavements created with a new design methodology, validating the starting hypothesis and making an original contribution to urban surface design.

Finally, it is important to highlight the benefits that porous concrete pavements offer in urban areas in economic, social and environmental terms, constituting a fully sustainable solution. Nevertheless, the low resistance and durability presented by these pavements, in comparison with conventional ones, is presented, mainly due to the lack of experience and design criteria. As a solution, the present research has managed to provide sufficient knowledge to make decisions in favor of its correct design and use.

### 5.3. Recommendations

A series of recommendations for the design and placement of porous concrete pavements is presented, according to the study of the literature and the analysis carried out in the previous chapters:

- It is important to evaluate the type and **intensity of traffic** in the area where the porous concrete pavement is to be installed. This will allow an efficient design of the pavement, including the additives to be used. For example, if a porous pavement for a pedestrian area is to be installed, microsilica can be implemented in the design, replacing a percentage of cement with this additive, reducing the use and environmental impact of the cement.
- It is needed to carry out a **geotechnical** evaluation of the area where the porous pavement will be installed. This in order to make a design with an adequate compaction of the esplanade, avoiding the structural failure of it. At the same time,



knowing the type of soil where the porous pavement is to be installed will allow the final destination of the captured rainwater and knowing whether it is necessary to install a lower waterproofing and drainage system, or not. For example, if expansive clays predominate in the area, and a porous pavement that infiltrates the water to the subsoil is designed, the clays will expand in the contact with the water, leading to the almost certain failure of the pavement and possible road accidents.

- It is essential to have a **quality control** tool from the moment of the construction of the porous concrete pavement. This because these type of materials are very special and can be delicate, in the sense that if the workspace is dirty, or if the aggregate to be used is mixed with other fine sizes of the environment, or if the material selection does not comply with the quality needed, the final result may be a clogged pavement or with a limited infiltration capacity. Even the mechanical capacity can be affected.
- Linked to the previous point, it is important to carry out an effective **maintenance program** of the pavements to prolong their useful life as much as possible. Understanding as useful life the infiltration capacity of the pavement, as well as its acoustic and friction properties, depending on the characteristics added in the design. This maintenance program must contain inspection visits, cleaning, preventive maintenance, among others.
- Finally, it is important to maintain an **optimal humidity** in the pavement during the first 28 days of completion, in order to obtain the maximum possible mechanical resistance. This can be achieved by covering the pavement surface with plastic to prevent moisture loss, as well as frequent wetting of the pavement with water, when the pavement is installed in situ. In laboratory samples, the test tube is placed in water for a period of 28 days. Furthermore, the importance of the compaction method applied to satisfy the permeability function is highlighted, providing sufficient resistance to the pavement.

#### 5.4. Future lines of investigation

The research lines on porous concrete multifunctional urban surfaces, particularly designed with the PCD methodology, offer multiple development opportunities based on the present research thesis. It can be mentioned:

- Validate the proposed mixtures as integrators of the advantages studied separately in this thesis.
- Standardize mechanical tests for porous concrete samples that allow a reliable comparison with other methodologies and materials.
- Evaluate more types of aggregate, as well as different gradations to study and understand in depth their behavior in porous mixtures.
- Standardize the compaction methods in porous concrete mixtures, so that it is possible to obtain the maximum mechanical resistance as possible, maintaining an acceptable infiltration capacity.
- Build and monitor pilot sections in urban areas, which allow to evaluate the infiltration capacity, as well as the photocatalytic, acoustic, friction and albedo levels of porous concrete pavements.
- Evaluate the albedo levels of porous concrete pavements comparing them with other materials, identifying the benefit in terms of temperature. At the same time, determine the influence of the type of aggregate and gradation employed, and its relation with the resistance and permeability of the pavement.
- Carry out a photocatalytic efficiency analysis to evaluate air purification with porous concrete pavements with titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ). At the same time, identify the most suitable application method of this additive and its influence on the resistance and permeability properties of the mixture.
- Development of a methodology for the efficient measurement of the void content present in the structure of porous concrete mixtures, allowing to observe the interconnection and tortuosity, and have a better understanding the mechanical, hydraulic and acoustic behavior of these type of mixtures.

- Carry out a life cycle analysis of porous concrete pavements to assess their environmental impact, including a complete cost study throughout the mentioned life cycle that allows evaluating and quantifying the sustainability compared to other urban paving options.
- A detail study of other cementitious materials, such as geopolymers, to understand their behavior, and be able to design porous mixtures that provide the best possible properties, improving the sustainability offered by porous concrete.
- Develop a catalog of new multifunctional urban pavement sections, taking into account the current needs for adaptations to climate change and the necessary resilience of cities around the world, considering the necessary sustainable nature of these actions.
- Through the use of statistical softwares, perform prediction models that allow evaluating the behavior of pavements, varying the quantities of their components, and analyzing the influence of each one on these pavements.



## REFERENCIAS

- Aavik, Andrus, Tiit Kaal, and Maret Jentson. 2013. "Use Of Pavement Surface Texture Characteristics Measurement Results In Estonia." *XXVIII International Baltic Road Conference, Vilnius, Lithuania, 26-28 August 2013*: 1–10.
- ACI-Committee-318. 1999. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99) and Commentary (318R-99)*. Farmington Hills, Michigan.
- Adewumi, Adeshina A., Taoreed O. Owolabi, Ibrahim O. Alade, and Sunday O. Olatunji. 2016. "Estimation of Physical, Mechanical and Hydrological Properties of Permeable Concrete Using Computational Intelligence Approach." *Applied Soft Computing Journal* 42: 342–50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2016.02.009>.
- AENOR. 2010. *UNE-EN 12390-6: Hardened Concrete Testing. Part 6: Indirect Tensile Strength of Specimens*.
- AENOR. 2012. *UNE-EN 12697-26. Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Bituminous Mixtures. Part 26: Stiffness*.
- Agar-Ozbek, Ayda S., Jaap Weerheijm, Erik Schlangen, and Klaas Van Breugel. 2013. "Investigating Porous Concrete with Improved Strength: Testing at Different Scales." *Construction and Building Materials* 41: 480–90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.040>.
- Agar Ozbek, Ayda S., Jaap Weerheijm, Erik Schlangen, and Klaas Van Breugel. 2013. "Dynamic Behavior of Porous Concretes under Drop Weight Impact Testing." *Cement and Concrete Composites* 39: 1–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.012>.
- Ahern, J. 2013. "Urban Landscape Sustainability and Resilience: The Promise and Challenges of Integrating Ecology with Urban Planning and Design." *Landscape Ecology* 28(6): 1203–12.

- Al-harbi, Kamal M Al-subhi. 2001. "Application of the AHP in Project Management." *International Journal of Project Management* 19: 19–27.
- Al-Rubaei, Ahmed M., A.L. Stenglein, M. Viklander, and G.T. Blecken. 2013. "Long-Term Hydraulic Performance of Porous Asphalt Pavements in Northern Sweden." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 139: 499–505.
- Alvarez, Alex E. et al. 2006. "Synthesis of Current Practice on the Design, Construction, and Maintenance of Porous Friction Courses. Report Numb. FHWA/TX-06/0-5262-1." *Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office*: 21.
- Alvarez, Alex E., Amy Epps Martin, and Cindy Estakhri. 2011. "A Review of Mix Design and Evaluation Research for Permeable Friction Course Mixtures." *Construction and Building Materials* 25(3): 1159–66.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.038>.
- AMDE, A. M., and S. ROGGE. 2013. "Development of High Quality Pervious Concrete Specifications for Maryland Conditions." (February): 111.
- American Concrete Institute ACI Committee 211. 2002. "Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete Reported by ACI Committee 211." *American Concrete Institute* 02: 1–26.
- American Concrete Institute ACI Committee 522. 2006. "522R-06: Pervious Concrete."
- American Concrete Institute ACI Committee 522. 2010. *Report on Pervious Concrete*.
- Andrés-Doménech, Ignacio, Carmen Hernández-Crespo, Miguel Martín, and Valerio C. Andrés-Valeri. 2018. "Characterization of Wash-off from Urban Impervious Surfaces and SuDS Design Criteria for Source Control under Semi-Arid Conditions." *Science of the Total Environment* 612: 1320–28.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.011>.
- Andrés-Valeri, V. et al. 2016. "Laboratory Assessment of the Infiltration Capacity

- Reduction in Clogged Porous Mixture Surfaces.” *Sustainability (Switzerland)* 8: 751.
- Andres-Valeri, Valerio C., Luis Juli-Gandara, Daniel Jato-Espino, and Jorge Rodriguez-Hernandez. 2018. “Characterization of the Infiltration Capacity of Porous Concrete Pavements with Low Constant Head Permeability Tests.” *Water (Switzerland)* 10(4).
- Arredondo, R.M. 2017. “Inauguran La FQ y La UAM-X Una Planta Única En El Mundo Para Tratamiento de Agua En Xochimilco.” *Facultad de Química UNAM*.  
<https://quimica.unam.mx/inauguran-la-fq-y-la-uam-x-una-planta-unica-en-el-mundo-para-tratamiento-de-agua-en-xochimilco/>.
- Arup, L.F. 2013. “British Group: Journey to Success. Structural Engineering International.” *Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*. United Kingdom.
- Asadi, Somayeh, Marwa Hassan, John Kevern, and Tyson Rupnow. 2012. “Development of Photocatalytic Pervious Concrete Pavement for Air and Storm Water Improvements.” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2290: 161–67. <http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2290-21>.
- Asaeda, Takashi, and Vu Thanh Ca. 2000. “Characteristics of Permeable Pavement during Hot Summer Weather and Impact on the Thermal Environment.” *Building and Environment* 35(4): 363–75.
- Asdrubali, F., S. Schiavoni, and K. V. Horoshenkov. 2012. 19 *Building Acoustics A Review of Sustainable Materials for Acoustic Applications*.  
<http://journals.sagepub.com/doi/10.1260/1351-010X.19.4.283>.
- ASTM C260/C260M-10a. 2013. “Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete 1.” *American Society for Testing and Materials*. (February): 15–17.
- Ayuntamiento de Madrid. 2018. “Madrid Central. Información General.”  
<https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Movilidad-y-transportes/Madrid-Central-Zona-de-Bajas-Emisiones/Informacion-general/Madrid-Central-Informacion->

- General/?vgnnextfmt=default&vgnextoid=a67cda4581f64610VgnVCM2000001f4a900aRCRD&vgnnextchannel=0.
- Azzout, Y, S Barraud, F Cres, and E Alfakih. 1995. “Decision Aids for Alternative Techniques in Urban Storm Management.” *Water and Science Technology* 32(1).
- Bachmann, R. “Experience with Pervious Concrete Pavements in Germany - New Developments and Applications.” *Heidelberg Cement*: 56–79.
- Ball, J, R Jenks, and D Aubourg. 1998. “An Assessment of the Availability of Pollutant Constituents on Road Surfaces.” *Science of the Total Environment* 1209(2–3): 243–54.
- Ballari, M. M., M. Hunger, G. Hüsken, and H. J.H. Brouwers. 2010. “Modelling and Experimental Study of the NO<sub>x</sub> Photocatalytic Degradation Employing Concrete Pavement with Titanium Dioxide.” *Catalysis Today* 151(1–2): 71–76.
- Baruzzi, V, M Martini, and E Saltarelli. 2013. *Construir Ciudades Resilientes. Directrices Para La Adaptación Al Cambio Climático*.
- Batezini, R, F Curvo, and J Balbo. “Mechanistic Analysis of In-Situ Light-Traffic Pervious Concrete Pavement.”
- Bean, Eban Z., William F. Hunt, and David A. Bidelspach. 2007. “Field Survey of Permeable Pavement Surface Infiltration Rates.” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133(3): 249–55. <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9437%282007%29133%3A3%28249%29>.
- Beddoe, R., and H. Dorner. 2005. “Modelling Acid Attack on Concrete: Part I. The Essential Mechanisms.” *Cement and Concrete Research* 35: 2333–39.
- Behnood, Ali, Kho Pin Verian, and Mahsa Modiri Gharehveran. 2015. “Evaluation of the Splitting Tensile Strength in Plain and Steel Fiber-Reinforced Concrete Based on the Compressive Strength.” *Construction and Building Materials* 98(January 2018): 519–29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.124>.



- Bhutta, M. Aamer Rafique, K. Tsuruta, and J. Mirza. 2012. "Evaluation of High-Performance Porous Concrete Properties." *Construction and Building Materials* 31: 67–73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.024>.
- Bobylev, Nikolai. 2011. "Comparative Analysis of Environmental Impacts of Selected Underground Construction Technologies Using the Analytic Network Process." *Automation in Construction* 20(8): 1030–40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2011.04.004>.
- Bonicelli, Alessandra, Gilberto Martínez Arguelles, and Luis Guillermo Fuentes Pumarejo. 2016. "Improving Pervious Concrete Pavements for Achieving More Sustainable Urban Roads." *Procedia Engineering* 161: 1568–73.
- Bonicelli, Alessandra, Maurizio Crispino, Filippo Giustozzi, and M Shink. 2013. "Laboratory Analysis for Investigating the Impact of Compaction on the Properties of Pervious Concrete Mixtures for Road Pavements." *Advanced Materials Research* 723: 409–19.
- Bonicelli, Alessandra, Filippo Giustozzi, and Maurizio Crispino. 2015. "Experimental Study on the Effects of Fine Sand Addition on Differentially Compacted Pervious Concrete." *Construction and Building Materials* 91: 102–10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.012>.
- Bonicelli, Alessandra, Filippo Giustozzi, Maurizio Crispino, and Massimo Borsa. 2015. "Evaluating the Effect of Reinforcing Fibres on Pervious Concrete Volumetric and Mechanical Properties According to Different Compaction Energies." *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 19(2): 184–98. <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2014.939308>.
- Borgia, G. C. et al. 1996. "Quantitative Determination of Porosity: A Local Assessment by NMR Imaging Techniques." *Magnetic Resonance Imaging* 14(7–8): 919–21.
- Brake, Nicholas A., Hamid Allahdadi, and Fatih Adam. 2016. "Flexural Strength and Fracture Size Effects of Pervious Concrete." *Construction and Building Materials*

- 113: 536–43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.045>.
- Bulletin d'Information No. 199, Comité Européen du Béton/Fédération Internationale de la Précontrainte. 1991. *Evaluation of the Time Dependent Behaviour of Concrete*. Lausanne.
- Çalışkan, Halil, Bilal Kurşuncu, Cahit Kurbanoglu, and Şevki Yılmaz Güven. 2013. "Material Selection for the Tool Holder Working under Hard Milling Conditions Using Different Multi Criteria Decision Making Methods." *Materials and Design* 45: 473–79.
- Carbajo, J. et al. 2015. "Acoustic Properties of Porous Concrete Made from Arlite and Vermiculite Lightweight Aggregates." *Materiales de Construcción* 65: 1–11.
- Carino, N.J., and H.S. Lew. 1982. "Re-Examination of the Relation between Splitting Tensile and Compressive Strength of Normal Weight Concrete." *ACI J. Proc.* 79: 214–19.
- Ceballos-Martín, B.A. 2016. "Multi-Criteria Decision Models in Environments with Uncertainty: Comparative Study and Application (Modelos de Decisión Multi-Criterio En Entornos Con Incertidumbre: Estudio Comparativo y Aplicación)." Universidad de Granada.
- Chandrappa, Anush K., and Krishna Prapoorna Biligiri. 2016. "Pervious Concrete as a Sustainable Pavement Material-Research Findings and Future Prospects: A State-of-the-Art Review." *Construction and Building Materials* 111: 262–74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054>.
- Chandrappa, Anush K., AND Krishna Prapoorna Biligir. 2017. "Flexural-Fatigue Characteristics of Pervious Concrete: Statistical Distributions and Model Development." *Construction and Building Materials* 153: 1–15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.081>.
- Chang, J. J., W. Yeih, T. J. Chung, and R. Huang. 2016. "Properties of Pervious Concrete Made with Electric Arc Furnace Slag and Alkali-Activated Slag Cement."

- Construction and Building Materials* 109: 34–40.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.049>.
- Charlesworth, S.M. 2010. “A Review of the Adaptation and Mitigation of Global Climate Change Using Sustainable Drainage in Cities.” *Journal of Water and Climate Change* 1(3): 165–80.
- Chen, Yu, Ke-jin Wang, and Wen-fang Zhou. 2013. “Evaluation of Surface Textures and Skid Resistance of Pervious Concrete Pavement.” *Journal of Central South University* 20(2): 520–27. <http://link.springer.com/10.1007/s11771-013-1514-y>.
- Chen, Yu, Kejin Wang, Xuhao Wang, and Wenfang Zhou. 2013. “Strength, Fracture and Fatigue of Pervious Concrete.” *Construction and Building Materials* 42: 97–104.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.006>.
- Chindaprasirt, P. et al. 2008. “Cement Paste Characteristics and Porous Concrete Properties.” *Construction and Building Materials* 22(5): 894–901.
- Chopra, Manoj. 2007. “Construction and Maintenance Assessment of Pervious Concrete Pavements.”
- Chopra, M., Kakuturu, S., Ballock, C., Spence, J., and Wanielista, M. 2010a. “Determination of the Infiltration Rates and the Effect of Rejuvenation Methods for Pervious Concrete Pavements.” *Journal of Hydrologic Engineering* 15(6): 426–33.
- Chopra, M., Kakuturu, S., Ballock, C., Spence, J., and Wanielista, M. 2010b. “Effect of Rejuvenation Methods on the Infiltration Rates of Pervious Concrete Pavements.” *Journal of Hydrologic Engineering* 15(6): 426–33.
- Chu, L., T. F. Fwa, and K. H. Tan. 2017. “Evaluation of Wearing Course Mix Designs on Sound Absorption Improvement of Porous Asphalt Pavement.” *Construction and Building Materials* 141: 402–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.027>.
- Chung, Sang Yeop, Tong Seok Han, Se Yun Kim, and Tae Hyung Lee. 2014. “Investigation of the Permeability of Porous Concrete Reconstructed Using

- Probabilistic Description Methods.” *Construction and Building Materials* 66: 760–70.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.013>.
- CIRIA. 2001. *Sustainable Urban Drainage Systems, Best Practice Manual for England, Scotland, Wales and Northern Ireland*. London, UK: CIRIA C523; ISBN: 0 86017 523 5.
- Comisión Europea. 2000. *En Defensa de Nuestro Futuro. Actuaciones En Favor Del Medio Ambiente Europeo*. Oficina de. Luxemburgo.
- Coseo, Paul, and Larissa Larsen. 2015. “Cooling the Heat Island in Compact Urban Environments: The Effectiveness of Chicago’s Green Alley Program.” *Procedia Engineering* 118: 691–710.
- Ćosić, K., L. Korat, V. Ducman, and I. Netinger. 2015. “Influence of Aggregate Type and Size on Properties of Pervious Concrete.” *Construction and Building Materials* 78: 69–76.
- Coughlin, J. Patrick, Chelsea D. Campbell, and David C. Mays. 2012. “Infiltration and Clogging by Sand and Clay in a Pervious Concrete Pavement System.” *Journal of Hydrologic Engineering* 17(1): 68–73.
- Cros, Clement J. et al. 2015. “Effect of Weathering and Traffic Exposure on Removal of Nitrogen Oxides by Photocatalytic Coatings on Roadside Concrete Structures.” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 48(10): 3159–71.  
<http://dx.doi.org/10.1617/s11527-014-0388-2>.
- Cross, W, E Duke, J Kellar, and D Johnson. 2001. “Scanning Electron Microscopy and Other Techniques to Investigate Low-Strength Concrete.” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1775: 10–16.
- Crouch, L. K., Jordan Pitt, and Ryan Hewitt. 2007. “Aggregate Effects on Pervious Portland Cement Concrete Static Modulus of Elasticity.” *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(July): 561–68.

- Daniels, Benjamin et al. 2018. “Assessment of Urban Green Space Structures and Their Quality from a Multidimensional Perspective.” *Science of the Total Environment* 615: 1364–78.
- DCCS-UNAM. 2015. “La Recarga de Mantos Acuíferos Requiere Un Esfuerzo Integral.” *Boletín de la Dirección General de Comunicación Social de la Universidad Nacional Autónoma de México*. [http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2015\\_436.html](http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2015_436.html).
- Dougherty, M., M. Hein, B. Martina, and B. Ferguson. 2011. “Quik Surface Infiltration Test to Assess Maintenance Needs on Small Pervious Concrete Sites.” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 137: 553–63.
- Drake, J.A.P., and Andrea Bradford. 2013. “Assessing the Potential for Restoration of Surface Permeability for Permeable Pavements through Maintenance.” *Water Sci. Technol.* 68(9): 1950–58.
- ECOCRETO. 2011. “ECOCRETO’s Permeable Concrete (El Concreto Permeable ECOCRETO).” <http://www.ecocreto.com.mx/>.
- El-mikawi, Mohamed, and Ayman S Mosallam. 1996. “A Methodology for Evaluation of the Use of Advanced Composites in Structural Civil Engineering Applications.” Part B 27B(95): 203–15.
- Elizondo-Martinez, E.J., V.C. Andrés-Valeri, J. Rodriguez-Hernandez, and D. Castro-Fresno. 2020. 48 Lecture Notes in Civil Engineering *A New Design Methodology for Improving Porous Concrete Properties to Achieve Multifunctional and Sustainable Pavements*.
- Elizondo-Martínez, Eduardo-javier, Valerio-carlos Andrés-Valeri, Daniel Jato-espino, and Jorge Rodriguez-hernandez. 2020. “Review of Porous Concrete as Multifunctional and Sustainable Pavement.” *Journal of Building Engineering* 27.
- Elizondo-martinez, Eduardo Javier, Valerio Carlos Andres-valeri, Jorge Rodriguez-hernandez, and Daniel Castro-fresno. 2019. “Proposal of a New Porous Concrete Dosage Methodology for Pavements.” *Materials* 12(3100): 1–16.

- Environmental Protection Agency (EPA). 2000. "Introducción a La Ley de Agua." *Watershed Academy Web*: 1–101.  
[http://cfpub.epa.gov/watertrain/pdf/modules/Introduccion\\_a\\_la\\_Ley\\_de\\_Aqua\\_Limpia.pdf](http://cfpub.epa.gov/watertrain/pdf/modules/Introduccion_a_la_Ley_de_Aqua_Limpia.pdf).
- Eriskin, Ekinhan, Sebnem Karahancer, Serdal Terzi, and Mehmet Saltan. 2017. "Examination of the Effect of Superhydrophobic Coated Pavement under Wet Conditions." *Procedia Engineering* 187: 532–37.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.411>.
- Erismann, F, S O'Hara, C Kurz, and M Hansson. 2016. "The Benefits of Incorporating Admixtures into Mine Paste Backfill." In *Proceedings of the 19th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*, Gecamin, Santiago.
- Faraldos, Marisol. 2012. "Guía Práctica de La Fotocatálisis Aplicada a Infraestructuras Urbanas." : 1–77.  
[http://www.eptisa.com/descargas/articulos/conama2012\\_guia\\_practica.pdf](http://www.eptisa.com/descargas/articulos/conama2012_guia_practica.pdf).
- Fattah, Mohammed Y., Miami M. Hilal, and Huda B. Flyeh. 2019. "Assessment of Mechanical Stability Performance of Asphalt Mixture Using Superpave Gyrotory Compactor." *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements* 145(2): 04019004. <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/JPEODX.0000102>.
- Fernández-Barrera, A., D. Castro-Fresno, J. Rodríguez-Hernández, and M. Calzada-Pérez. 2008. "Infiltration Capacity Assessment of Urban Pavements Using the LCS Permeameter and the CP Infiltrometer." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 134: 659–65.
- Franceschini, Gaia, and Sandro Macchietto. 2008. "Model-Based Design of Experiments for Parameter Precision : State of the Art." *Chemical Engineering Science* 63: 4846–72.
- Fu, Tun Chi, Weichung Yeih, Jiang Jhy Chang, and Ran Huang. 2014. "The Influence of Aggregate Size and Binder Material on the Properties of Pervious Concrete."

- Advances in Materials Science and Engineering* 2014.
- Fwa, T. F., Y. S. Choo, and Yurong Liu. 2003. "Effect of Aggregate Spacing on Skid Resistance of Asphalt Pavement." *Journal of Transportation Engineering* 129(4): 420–26.
- Fwa, T. F., and G. P. Ong. 2007. "Wet-Pavement Hydroplaning Risk and Skid Resistance: Modeling." *Journal of Transportation Engineering* 133(10): 590–98.  
[http://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2007\)133:10\(590\)](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)0733-947X(2007)133:10(590)).
- Gandage, A.S. et al. 2016. "Study on Reduction of Pavement Noise Using Porous Concrete." : 12–21.
- Gardner, N.J., M.S. Cheung, and P.L. Sau. 1988. "Strength Development and Durability of Concretes Cast and Cured at 0°C." *ACI Mater. J.* 85: 529–36.
- Garrido-Jiménez, Francisco Javier, Francesc Magrinyà, and María Consuelo del Moral-Ávila. 2018. "Municipal Operating Costs and Revenues in Future Developments as a Function of Urban Planning Variables." *Journal of Urban Planning and Development* 144(1): 04017020. <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29UP.1943-5444.0000407>.
- Gerharz, B. 1999. "Pavements on the Base of Polymer-Modified Drainage Concrete." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 152(1–2): 205–9.
- Gerrits, Christopher, and William James. 2004. "Restoration of Infiltration Capacity of Permeable Pavers." *Global Solutions for Urban Drainage*: 1–16.
- Gesoğlu, Mehmet, Erhan Güneyisi, Ganjeena Khoshnaw, and Süleyman Ipek. 2014. "Investigating Properties of Pervious Concretes Containing Waste Tire Rubbers." *Construction and Building Materials* 63: 206–13.
- Ghashghaei, Hassan Tajik, and Abolfazl Hassani. 2016. "Investigating the Relationship between Porosity and Permeability Coefficient for Pervious Concrete Pavement by Statistical Modelling." *Materials Sciences and Applications* 7: 101–7.

- Gironas, J. 2015. "Towards a Sustainable Urban Drainage in Chile." *Centro de Desarrollo Urbano Sustentable*. <http://www.cedeus.cl/blog/hacia-un-drenaje-urbano-sustentable-en-chile/>.
- Giustozzi, F. 2016. "Polymer-Modified Pervious Concrete for Durable and Sustainable Transportation Infrastructures." *Construction and Building Materials* 111: 502–12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.136>.
- Gobierno del Estado de Sonora. 2017. "Boletín Oficial Tomo CXCIX Número 38 Secc III." <http://www.boletinoficial.sonora.gob.mx/boletin/images/boletinesPdf/2017/mayo/2017CXCIX38III.pdf>.
- Golroo, Amir, and Susan L. Tighe. 2011. "Alternative Modeling Framework for Pervious Concrete Pavement Condition Analysis." *Construction and Building Materials* 25(10): 4043–51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.040>.
- Golroo, Amir, and Susan L. Tighe. 2012. "Pervious Concrete Pavement Performance Modeling: An Empirical Approach in Cold Climates." *can. J. Civ. Eng.* 39(10): 1100–1112.
- Gonzalez, S. 2015. "El 19% de Acuíferos En México Están Sobreexplotados: INEGI." *Noticia de el periódico La Jornada*. <http://www.jornada.unam.mx/ultimas/2015/03/21/el-19-de-acuiferos-en-mexicoestan-sobreexplotados-inegi-8122.html>.
- Gracia-Rojas, J.P. 2015. *Desarrollo Sostenible: Origen, Evolución y Enfoques*. Bogotá, Colombia.
- Guevara, G. et al. 2011. "Effect of the Water/Cement Variation in Concrete." *School of Materials Engineering, Technological of Costa Rica* 25: 80–86.
- Gul, Muhammet, Busra Guven, and Ali Fuat Guneri. 2018. "A New Fine-Kinney-Based Risk Assessment Framework Using FAHP-FVIKOR Incorporation." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 53: 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.08.014>.



- Gunderson, J. 2008. "Pervious Pavements: New Findings about Their Functionality and Performance in Cold Climates." *Stormwater Magazine*.
- Guntakal, Shaik Niyazuddin, and Senthil Selvan. 2017. "Application of Pervious Concrete for Pavements: A Review." *Rasayan Journal of Chemistry* 10(1): 32–36.
- Harman, T, J D'Angelo, and J Bukowski. 2002. "Superpave Asphalt Mixture Design Workshop Workbook." *US Department of Transportation, Federal Highway Administration* (90).  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Superpave+Asphalt+Mixture+Design+Workshop+Workbook#0>.
- Hasan, M. R. et al. 2017. "A Comprehensive Study on Sustainable Photocatalytic Pervious Concrete for Storm Water Pollution Mitigation: A Review." *Materials Today: Proceedings* 4(9): 9773–76. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.265>.
- Haselbach, Liv. 2010. "Potential for Clay Clogging of Pervious Concrete under Extreme Conditions." *Journal of Hydrologic Engineering* 15: 67–69.
- Haselbach, Liv, Michelle Boyer, John Kevern, and Vernon Schaefer. 2011. "Cyclic Heat Island Impacts on Traditional Versus Pervious Concrete Pavement Systems." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2240: 107–15. <http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2240-14>.
- Hassan, Marwa, Somayeh Asadi, John T Kevern, and Tyson Rupnow. 2012. "Nitrogen Oxide Reduction and Nitrate Measurements on TiO<sub>2</sub> Photocatalytic Pervious Concrete Pavement." In *Construction Research Congress*, , 1920–30.
- Hatami, A M, M R Sabour, and A Amiri. 2018. "Recycling Process of Spent Bleaching Clay: Optimization by Response Surface Methodology." 4(1): 9–18.
- Henderson, Vimy, and Susan Tighe. 2012. "Evaluation of Pervious Concrete Pavement Performance in Cold Weather Climates." *International Journal of Pavement Engineering* 13(3): 197–208.

- Henderson, Vimy, Susan Tighe, and Jodi Norris. 2009. "Pervious Concrete Pavement." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2113(1): 13–21. <http://dx.doi.org/10.3141/2113-02>.
- Hesami, Saeid, Saeed Ahmadi, and Mahdi Nematzadeh. 2014. "Effects of Rice Husk Ash and Fiber on Mechanical Properties of Pervious Concrete Pavement." *Construction and Building Materials* 53: 680–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.070>.
- Hidayah, N.A.H., M. Hasanan, and P.J. Ramadhansyah. 2014. "Effect of Coarse Aggregate Sizes on Properties of Porous Concrete Paving Blocks." *Advanced Materials Research* 911(March).
- Horoshenkov, K. V., D. C. Hughes, and A. Cwirzen. 2003. "The Sound Speed and Attenuation in Loose and Consolidated Granular Formulations of High Alumina Cements." *Applied Acoustics* 64(2): 197–212.
- Hu, Liqun et al. 2017. "Temperature Characteristics of Porous Portland Cement Concrete during the Hot Summer Session." *Advances in Materials Science and Engineering* 2017.
- Huang, Baoshan, Hao Wu, Xiang Shu, and Edwin G. Burdette. 2010. "Laboratory Evaluation of Permeability and Strength of Polymer-Modified Pervious Concrete." *Construction and Building Materials* 24(5): 818–23. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.025>.
- Hunt, W. F., N. Kannan, J. Jeong, and P. W. Gassman. 2009. "Stormwater Best Management Practices: Review of Current Practices and Potential Incorporation in SWAT." *International Agricultural Engineering Journal* 18(1–2): 73–89.
- i.nova. 2016. "FYM-Italcementi Divulga Los Usos de Los Productos Fotocatalíticos Con Base Cemento." *i.nova*. [https://es.inova.net/es/home?p\\_p\\_id=101&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=maximized&\\_101\\_struts\\_action=%2Fasset\\_publisher%2Fview\\_content&\\_101\\_assetEntryId=5066380&\\_101\\_t](https://es.inova.net/es/home?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_assetEntryId=5066380&_101_t)

ype=content&\_101\_urlTitle=fym-italcemento-divulga-los-usos-de-los-productos-fotocataliticos-c.

- Ibrahim, Ahmed, Enad Mahmoud, Mohammed Yamin, and Varun Chowdary Patibandla. 2014. "Experimental Study on Portland Cement Pervious Concrete Mechanical and Hydrological Properties." *Construction and Building Materials* 50: 524–29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.022>.
- INE. 2016. "Cifras de Población a 1 de Julio de 2016. Datos Provisionales." *Instituto Nacional de Estadística*. <http://www.ine.es/prensa/np1010.pdf>.
- INEGI. 2015. "Principales Resultados de La Encuesta Intercensal 2015 Estados Unidos Mexicanos." *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. [https://web.archive.org/web/20151210212235/http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/encuestas/hogares/especiales/ei2015/doc/eic2015\\_resultados.pdf](https://web.archive.org/web/20151210212235/http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/encuestas/hogares/especiales/ei2015/doc/eic2015_resultados.pdf).
- International Water Association. 2017. "Cities of the Future." *IWA*. <http://www.iwa-network.org/programs/cities-of-the-future/> (January 8, 2018).
- IPCC. 2014. *Cambio Climático 2014. Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Resumen Para Responsables de Política*. Suiza.
- Izevbekhai, B.I. 2017. "Effect of Diamond Grinding on Pervious Concrete." *Congress on Technical Advancement 2017: Cold Regions Engineering - Proceedings of the 17th International Conference on Cold Regions Engineering Presented at the 1st Congress on Technical Advancement*: 25–36.
- Jafari, Khashayar, and Vahab Toufigh. 2009. "Interface between Tire and Pavement." 29(Cc): 1–10.
- Jang, J. G., Y. B. Ahn, H. Souri, and H. K. Lee. 2015. "A Novel Eco-Friendly Porous Concrete Fabricated with Coal Ash and Geopolymeric Binder: Heavy Metal Leaching Characteristics and Compressive Strength." *Construction and Building Materials* 79: 173–81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.058>.

- Jato-Espino, Daniel, Valerio C. Andrés-Valeri, Jorge Rodríguez-Hernandez, and Daniel Castro-Fresno. 2019. "Pavimentos Urbanos Permeables." *Revista de Obras Publicas* 166(3607): 32–36.
- Jato-Espino, Daniel, Elena Castillo-Lopez, Jorge Rodriguez-Hernandez, and Juan Carlos Canteras-Jordana. 2014. "A Review of Application of Multi-Criteria Decision Making Methods in Construction." *Automation in Construction* 45: 151–62.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.013>.
- Jato-espino, Daniel, Jorge Rodriguez-hernandez, Valerio Carlos Andrés-valeri, and Francisco Ballester-muñoz. 2014. "A Fuzzy Stochastic Multi-Criteria Model for the Selection of Urban Pervious Pavements." *Expert Systems With Applications* 41(15): 6807–17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2014.05.008>.
- Jiang, Wei et al. 2015. "Experimental Study on Filtration Effect and Mechanism of Pavement Runoff in Permeable Asphalt Pavement." *Construction and Building Materials* 100: 102–10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.055>.
- Jiménez Cisneros, Blanca, and José Galizia Tundisi. 2012. Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC(FCCyT) *Water Diagnosis in America*.  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Diagnóstico+del+agua+en+las+américas#0>.
- Kalamaras, G S et al. 2000. "Application of Multicriteria Analysis to Select the Best Highway Alignment." 15(4): 415–20.
- Karlessi, T. et al. 2009. "Development and Testing of Thermochromic Coatings for Buildings and Urban Structures." *Solar Energy* 83(4): 538–51.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.005>.
- Kayhanian, Masoud et al. 2012. "Permeability Measurement and Scan Imaging to Assess Clogging of Pervious Concrete Pavements in Parking Lots." *Journal of Environmental Management* 95(1): 114–23. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.09.021>.
- Kevern, J. T., V. R. Schaefer, and K. Wang. 2009. "Evaluation of Pervious Concrete

- Workability Using Gyrotory Compaction.” *Journal of Materials in Civil Engineering* 21(12): 764–70. [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:12\(764\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:12(764)).
- Kevern, J., K. Wang, and V. Schaefer. 2010. “Effects of Coarse Aggregate on the Freeze-Thaw Durability of Pervious Concrete.” *Journal of Materials in Civil Engineering* 22: 469–75.
- Kevern, J T. 2010. “Evolution of Portland Cement Pervious Concrete Construction.” *Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction* (December): 473–78.
- Kevern, John T, Liv Haselbach, and Vernon R. Schaefer. 2009. “Hot Weather Comparative Heat Balances in Pervious Concrete and Impervious Concrete Pavement Systems.” *Second International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands 7*: 1–9.
- Khankhaje, Elnaz et al. 2016. “Properties of Sustainable Lightweight Pervious Concrete Containing Oil Palm Kernel Shell as Coarse Aggregate.” *Construction and Building Materials* 126: 1054–65. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.010>.
- Khankhaje, E., Salim, M., Mirza, J., Salmiati, Hussin, M., Khan, R., and Rafieizonooz, M. 2017. “Properties of Quiet Pervious Concrete Containing Oil Palm Kernel Shell and Cockleshell.” *Applied Acoustics* 122: 113–20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.02.014>.
- Khankhaje, E., Rafieizonooz, M., Salim, M., Khan, R., Mirza, J., Siong, H., and Salmiati. 2018. “Sustainable Clean Pervious Concrete Pavement Production Incorporating Palm Oil Fuel Ash as Cement Replacement.” *Journal of Cleaner Production* 172: 1476–85.
- Kia, Alalea, Hong S. Wong, and Christopher R. Cheeseman. 2017. “Clogging in Permeable Concrete: A Review.” *Journal of Environmental Management* 193: 221–33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.018>.
- Kim, H. K., and H. K. Lee. 2010. “Influence of Cement Flow and Aggregate Type on the Mechanical and Acoustic Characteristics of Porous Concrete.” *Applied Acoustics*

- 71(7): 607–15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.02.001>.
- Kim, Yail J., Adel Gaddafi, and Isamu Yoshitake. 2016. “Permeable Concrete Mixed with Various Admixtures.” *Materials and Design* 100: 110–19.
- Kondo, Y., T. Ogasawara, and H. Kanamori. 2008. “Field Measurements and Heat Budget Analysis on Sensible Heat Flux From Pavement.” *Journal of Environmental Engineering(Transaction of AIJ)* 73(628): 791–797.  
<http://md1.csa.com/partners/viewrecord.php?requester=gs&collection=ENV&recid=13908719>.
- Korman, C. 2016. *Evaluación de Resistencia Mecánica y Permeabilidad de Concretos Permeables Como Adición de Agregado Común*. Foz de Iguazú, Brasil.
- Koupai, J.A., S.S. Nejad, S. Mostafazadeh-Fard, and K. Behfarnia. 2016. “Reduction of Urban Storm-Runoff Pollution Using Porous Concrete Containing Iron Slag Adsorbent.” *Journal of Environmental Engineering (United States)* 142(2): 1–7.
- Kramer, Matus. “La Construcción de Resiliencia En La Ciudad de México.” *100 resilient cities*. [http://www.conama.org/conama/download/files/conama2014/STs2014/1998969507\\_ppt\\_AKramer.pdf](http://www.conama.org/conama/download/files/conama2014/STs2014/1998969507_ppt_AKramer.pdf).
- Kuang, X., J. Sansalone, G. Ying, and V. Ranieri. 2011. “Pore-Structure Models of Hydraulic Conductivity for Permeable Pavement.” *Journal of Hydrology* 399(3–4): 148–57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.11.024>.
- Lackhoff, Marion et al. 2003. “Photocatalytic Activity of Semiconductor-Modified Cement - Influence of Semiconductor Type and Cement Ageing.” *Applied Catalysis B: Environmental* 43(3): 205–16.
- Laura Portugal, C.F. 2009. “Hydrology: Porous Concrete Pavements.” <http://soy-ingeniero-civil.blogspot.com/2009/03/hidrologia-pavimentos-de-concreto.html>.
- Leducq, D, and H Scarwell. 2017. “The New Hanoi: Opportunities and Challenges for Future Urban Development.” *Cities* 72: 70–81.

- Lee, Ming-gin, Yi-shuo Huang, Tao-kuang Chang, and Chun-hua Pao. 2011. "Experimental Study of Pervious Concrete Pavement." (218): 93–99.
- Legret, M. 2001. "Pollution et Impact d'eaux de Ruissellement de Chaussées." *Routes CR 27 Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)*.
- Li, H., J. T. Harvey, T. J. Holland, and M. Kayhanian. 2013. "The Use of Reflective and Permeable Pavements as a Potential Practice for Heat Island Mitigation and Stormwater Management." *Environmental Research Letters* 8(1).
- Li, H., M. Kayhanian, and J. Harvey. 2013. "Comparative Field Permeability Measurement of Permeable Pavements Using ASTM C1701 and NCAT Permeameter Methods." *Journal of Environmental Management* 118: 144–52.
- Li, Hui, John Harvey, and Zhesheng Ge. 2014. "Experimental Investigation on Evaporation Rate for Enhancing Evaporative Cooling Effect of Permeable Pavement Materials." *Construction and Building Materials* 65: 367–75.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.004>.
- Li, Jiusu, Yi Zhang, Guanlan Liu, and Xinghai Peng. 2017. "Preparation and Performance Evaluation of an Innovative Pervious Concrete Pavement." *Construction and Building Materials* 138: 479–85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.137>.
- Lian, C., and Y. Zhuge. 2010. "Optimum Mix Design of Enhanced Permeable Concrete - An Experimental Investigation." *Construction and Building Materials* 24(12): 2664–71. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.057>.
- Lim, E, KH Tan, and TF Fwa. 2013. "Effect of Mix Proportion on Strength and Permeability of Pervious Concrete for Use in Pavement." *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* 10(0): 1565–75.
- Lipper, B. 2016. "How to Develop a Resilience Strategy."  
<http://www.100resilientcities.org/how-to-develop-a-resilience-strategy/>.

- Liu, Qingquan, and Dongwei Cao. 2009. "Research on Material Composition and Performance of Porous Asphalt Pavement." *Journal of Materials in Civil Engineering* 21: 135–40.
- Lombardi, P, S Giordano, H Farough, and W Yousef. 2012. "Modelling the Smart City Performance." *Innovation: The European Journal of Social Science Research* 25(2): 137–49.
- López, J. 2004. "Porosidad Del Concreto." Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Malhotra, V M, and G G Carette. 1983. "Silica Fume Concrete - Properties, Applications and Limitations." *Concrete International* 50(5): 40–46.
- Mallick, R.B., P.S. Kandhal, L.A. Cooley, and D.E. Watson. 2000. National Center for Asphalt Technology *Design, Construction and Performance of New Generation Open-Graded Friction Courses; NCAT Report No. 2000-01*. Auburn, AL, USA.
- Marchioni, M., V. Andrés-Valeri, F. Giustozzi, and G. Becciu. 2016. "Laboratory Study on the Rainfall Influence over the Sediment Transport Dynamics on Pervious Pavements' Discharge." *WIT Transactions on the Built Environment* 165: 165–76.
- Martin, W., B. Putman, and A. Neptune. 2014. "Influence of Aggregate Graduation on Clogging Characteristics of Porous Asphalt Mixtures." *Journal of Materials in Civil Engineering* 26: 04014026.
- Martin, William D., Nigel B. Kaye, and Bradley J. Putman. 2014. "Impact of Vertical Porosity Distribution on the Permeability of Pervious Concrete." *Construction and Building Materials* 59: 78–84. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.034>.
- Masana, C. 2009. "Concrete Pavements: Resistance and Durability." *EMB Construcción journal*.  
<http://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=747&edi=33&xit=pavimentos-de-hormigon-durabilidad-y-resistencia>.
- Masatoshi, Nishioka, Nabeshima Minako, Wakama Satoshi, and Ueda. Junya. 2006.



- “Effects of Surface Temperature Reduction and Thermal Environment on High Albedo Coating Asphalt Pavement.” *Journal of Heat Island Institute International* 1.
- Matsuo, Y, K Morino, and E Iwatsuki. 2005. *A Study of Porous Concrete Using Electric Arc Furnace Oxidizing Slag Aggregate*.
- McDaniels, T.L. et al. 2015. “Towards Disaster-Resilient Cities: An Approach for Setting Priorities in Infrastructure Mitigation Efforts.” *Environment Systems and Decisions* 35(2): 252–63.
- Ministerio de Medio Ambiente. 2001. *Medio Ambiente En España*. España.
- Mohammed, A., A. Salih, and H. Raof. 2020. “Vipulanandan Constitutive Models to Predict the Rheological Properties and Stress–Strain Behavior of Cement Grouts Modified with Metakaolin.” *Journal of Testing and Evaluation* 48(5).
- Mohammed, Bashar S., Muhd Fadhil Nuruddin, and Yogeswary Dayalan. 2013. “High Permeable Concrete Incorporating Pozzolanic Materials-An Experimental Investigation.” *BEIAC 2013 - 2013 IEEE Business Engineering and Industrial Applications Colloquium*: 657–61.
- Mohammed, Bashar S et al. 2018. “Properties of Nano-Silica Modified Pervious Concrete.” *Case Studies in Construction Materials* 8: 409–22.  
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.03.009>.
- Molenaar, A.A., E.T. Hagos, and M.F. van de Ven. 2010. “Effects of Aging on the Mechanical Characteristics of Bituminous Binders in PAC.” *Journal of Materials in Civil Engineering* 22: 779–87.
- Molina, M, L Gutiérrez, and J Salazar. 2011. “Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) for the Arrangement Plan of the City of Bogotá.” *Environmental District Secretary*.
- Moujir, Y.F., and L.F. Castañeda. 2014. “Design and Application of Porous Concrete for Pavements.”

- [http://vitela.javerianacali.edu.co/bitstream/handle/11522/3082/Diseño\\_aplicacion\\_con\\_creto.pdf?sequence=1](http://vitela.javerianacali.edu.co/bitstream/handle/11522/3082/Diseño_aplicacion_con_creto.pdf?sequence=1).
- Mulder, K.F. 2007. "Innovation for Sustainable Development: From Environmental Design to Transition Management." *Sustainability Science* 2(2): 253–63.
- Nelson, James, Erwin Kohler, Aybike Öngel, and Bruce Rymer. 2008. "Acoustical Absorption of Porous Pavement." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2058: 125–32.  
<http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2058-15>.
- Ngohpok, Chanchai et al. 2017. "Mechanical Properties, Thermal Conductivity, and Sound Absorption of Pervious Concrete Containing Recycled Concrete and Bottom Ash Aggregates." *KSCE Journal of Civil Engineering* 00(0000): 1–8.
- Nicholls, J. 1997. *Review of UK Porous Asphalt Trials*. Crowthorne, Berkshire.
- Nicholls, J, and M Daines. 1992. "Spray Suppression by Porous Asphalt Proceedings of Second International Symposium on Road Surface Characteristics."
- NLT-175/98. 1998. "Resistance to Sliding Coefficient with the TRRL Pendulum."
- NLT-327/00. 2000. "Permeabilidad in Situ de Pavimentos Drenantes Con El Permeámetro LCS."
- NLT-335/87. 1987. "Medida de La Textura Superficial de Un Pavimento Por El Método Del Círculo de Arena."
- Norma Técnica de Servicio NS-085. 2009. "Design Criteria for Sewerage Systems (Criterios de Diseño de Sistemas de Alcantarillado)."  
<https://www.scribd.com/document/286096234/NS-085-Diseno-Alcantarillados>.
- Novotny, V. 2003. *Water Quality: Diffuse Pollution & Watershed Management*. 2nd editio. John Wiley and Sons, New York, USA.
- Obla, Karthik H. 2007. "Pervious Concrete for Sustainable Development." *Recent*

- Advances in Concrete Technology* (September): 151–74.  
<http://www.nrmca.org/research/pervious-recent-advances-in-concrete-technology0707.pdf>.
- ONU. 1992. 57 Naciones Unidas *Convención Marco de Las Naciones Unidas Sobre El Cambio Climático*. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>.
- ONU. 2017. “Objetivos de Desarrollo Sostenible. Objetivo 9: Construir Infraestructuras Resilientes, Promover La Industrialización Inclusiva y Sostenible, y Fomentar La Innovación.” <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>.
- Osborn, David, Marwa Hassan, Somayeh Asadi, and John R. White. 2014. “Durability Quantification of TiO<sub>2</sub> Surface Coating on Concrete and Asphalt Pavements.” *Journal of Materials in Civil Engineering* 26(2): 331–37.  
<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0000816>.
- Park, Seung Bum, and M. Tia. 2004. “An Experimental Study on the Water-Purification Properties of Porous Concrete.” *Cement and Concrete Research* 34: 177–84.
- Perales-Momparler, Sara, and Ignacio Andrés-Doménech. 2008. “Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible: Una Alternativa a La Gestión Del Agua de Lluvia.” *Universidad Politécnica de Valencia*.  
[https://www.researchgate.net/publication/237213737\\_Los\\_Sistemas\\_Urbanos\\_de\\_Drenaje\\_Sostenible\\_Una\\_Alternativa\\_a\\_la\\_Gestion\\_del\\_Agua\\_de\\_Lluvia](https://www.researchgate.net/publication/237213737_Los_Sistemas_Urbanos_de_Drenaje_Sostenible_Una_Alternativa_a_la_Gestion_del_Agua_de_Lluvia).
- Perales-Momparler, Sara, Ignacio Andrés-Doménech, and Enrique Escalante. 2008. “Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) En La Hidrogeología Urbana.” *Grupo TRAGSA Madrid. IX Simposio de Hidrogeología. AIH. Elche, Valencia.*: 1–12.  
<http://www.dina-mar.es/pdf/6-if-suds-2.pdf>.
- Pérez-Nicolás, María, Íñigo Navarro-Blasco, José M. Fernández, and José Ignacio Álvarez. 2017. “The Effect of TiO<sub>2</sub> Doped Photocatalytic Nano-Additives on the Hydration and Microstructure of Portland and High Alumina Cements.” *Nanomaterials* 7(10): 329. <http://www.mdpi.com/2079-4991/7/10/329>.

- PlaNYC. 2014. "PlaNYC Progress Report 2014. Critical Infrastructure and Services." *Transportation Research*.  
<http://www.nyc.gov/html/planyc/html/resiliency/transportation.shtml>.
- Priddle, R. 1999. *Energía y Desarrollo Sostenible*.
- PVT. 2016. "EcoDraining, Nuevo Pavimento Poroso Drenante." *PVT*.  
<https://pvt.es/ecodraining-nuevo-pavimento-poroso-drenante/>.
- Radlinska, Aleksandra et al. 2012. "Long-Term Field Performance of Pervious Concrete Pavement." *Advances in Civil Engineering* 2012(Figure 1).
- Ramadhansyah, Putra Jaya et al. 2014. "Porous Concrete Pavement Containing Nano-Silica: Pre-Review." 911: 454–58.
- Ramírez, Denise. 2012. "Azoteas Verdes ¿qué y Cuánto Necesitas Para Una?" *Dinero en Imagen*. <https://www.dineroenimagen.com/2012-11-09/10610> (November 12, 2019).
- Rangelov, Milena, Somayeh Nassiri, Liv Haselbach, and Karl Englund. 2016. "Using Carbon Fiber Composites for Reinforcing Pervious Concrete." *Construction and Building Materials* 126: 875–85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.035>.
- Ranieri, Vittorio, Pasquale Colonna, John Sansalone, and Alessio Sciddurlo. 2012. "Measurement of Hydraulic Conductivity in Porous Mixes." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2295: 1–10.  
<http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2295-01>.
- Raphael, J.M. 1984. "Tensile Strength of Concrete." *ACI J. Proc.* 81: 158–65.
- Raposeiras, Aitor C., Ángel Vega-Zamanillo, Miguel Ángel Calzada-Pérez, and Daniel Castro-Fresno. 2012. "Influence of Surface Macro-Texture and Binder Dosage on the Adhesion between Bituminous Pavement Layers." *Construction and Building Materials* 28(1): 187–92. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.029>.
- Rehan, Reeman Mohammed. 2016. "Cool City as a Sustainable Example of Heat Island

- Management Case Study of the Coolest City in the World.” *HBRC Journal* 12(2): 191–204. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1687404814000959>.
- Rehder, Benjamin, Kingsten Banh, and Narayanan Neithalath. 2014. “Fracture Behavior of Pervious Concretes: The Effects of Pore Structure and Fibers.” *Engineering Fracture Mechanics* 118: 1–16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.01.015>.
- Rizvi, Rabiah, Susan Louise Tighe, Vimy Henderson, and Jodi Norris. 2009. “Laboratory Sample Preparation Techniques for Pervious Concrete.” *In: Proc 88th annual meeting transportation res board*; (January 2009).
- Roberts, F.L. et al. 1996. “Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction.” *National Asphalt Paving Association Education Foundation. Lanham, MD*.
- Rodriguez-Bayon, J, J Rodriguez-Hernandez, E Gómez-Ullate, and D Castro-Fresno. 2011. “Sistemas Urbanos De Drenaje Sostenible.” *Escuela de Caminos, Canales y Puertos de Santander. Universidad de Cantabria*: 1–25.
- Rodríguez-Hernández, J., V. Andrés-Valeri, A. Ascorbe-Salcedo, and D. Castro-Fresno. 2016. “Laboratory Study on the Stormwater Retention and Runoff Attenuation Capacity of Four Permeable Pavements.” *Journal of Environmental Engineering* 142: 04015068.
- Rodríguez-Hernández, J., D. Castro-Fresno, Miguel A. Calzada-Pérez, and A. Vega-Zamanillo. 2011. *Firmes Permeables*.
- Rodriguez-Hernandez, Jorge et al. 2013. “Relationship between Urban Runoff Pollutant and Catchment Characteristics.” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 139(10): 833–40. <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0000617>.
- Rodríguez-Hernández, Jorge. 2008. “Estudio, Análisis y Diseño de Secciones Permeables de Firmes Para Vías Urbanas Con Un Comportamiento Adecuado Frente a La Colmatación y Con La Capacidad Portante Necesaria Para Soportar Tráficos Ligeros.”

- Rodríguez-Rojas, M. I. et al. 2018. “A Study of the Application of Permeable Pavements as a Sustainable Technique for the Mitigation of Soil Sealing in Cities: A Case Study in the South of Spain.” *Journal of Environmental Management* 205: 151–62.
- Rodríguez-Rojas, M. I., F. Huertas-Fernández, B. Moreno, and G. Martínez. 2017. “A Study of the Application of Permeable Pavements as a Sustainable Technique for the Mitigation of Soil Sealing in Cities: A Case Study in the South of Spain.” *Journal of Environmental Management* 205: 151–62.
- Rodríguez Becerra, Manuel, Henry Mance, Ximena Barrera Rey, and Carolina Garcia. 2015. 53 *Journal of Chemical Information and Modeling* *Cambio Climático: Lo Que Esta En Juego*.  
<http://www.manuelrodriguezbecerra.org/bajar/Cambioclimatico2015.pdf>.
- Sansalone, J., X. Kuang, and V. Ranieri. 2008. “Permeable Pavement as a Hydraulic and Filtration Interface for Urban Drainage.” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 134(5): 666–74. <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9437%282008%29134%3A5%28666%29>.
- Sansalone, J., X. Kuang, G. Ying, and V. Ranieri. 2012. “Filtration and Clogging of Permeable Pavement Loaded by Urban Drainage.” *Water Research* 46(20): 6763–74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2011.10.018>.
- Sansalone, J., B. Liu, and J. Kim. 2009. “Volumetric Clarifying Filtration of Urban Source Area Rainfall Runoff.” *Journal of Environmental Engineering* 135: 609–20.
- Santamouris, M. 2013. “Using Cool Pavements as a Mitigation Strategy to Fight Urban Heat Island - A Review of the Actual Developments.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26: 224–40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>.
- Sañudo-Fontaneda, Luis A., Valerio C A Andrés-Valeri, Jorge Rodriguez-Hernandez, and Daniel Castro-Fresno. 2014. “Field Study of Infiltration Capacity Reduction of Porous Mixture Surfaces.” *Water (Switzerland)* 6(3): 661–69.
- Sañudo-Fontaneda, Luis A., Jorge Rodriguez-Hernandez, Miguel A. Calzada-Pérez, and

- Daniel Castro-Fresno. 2014. "Infiltration Behaviour of Polymer-Modified Porous Concrete and Porous Asphalt Surfaces Used in SuDS Techniques." *Clean - Soil, Air, Water* 42(2): 139–45.
- Saucedo-Vidal, Artemio. 2010. "Concreto Hidráulico Permeable, Una Alternativa Para La Recarga de Los Mantos Acuíferos Del Valle de México." Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sell, B, N Nehls, and P Lyhs. "Permeable Concrete- Development, Implementation and Maintenance in Practice." *CEMEX*.
- Shanian, A., and O. Savadogo. 2006. "TOPSIS Multiple-Criteria Decision Support Analysis for Material Selection of Metallic Bipolar Plates for Polymer Electrolyte Fuel Cell." *Journal of Power Sources* 159(2): 1095–1104.
- Shen, Shihui, Maria Burton, Bertram Jobson, and Liv Haselbach. 2012. "Pervious Concrete with Titanium Dioxide as a Photocatalyst Compound for a Greener Urban Road Environment." *Construction and Building Materials* 35(699206): 874–83.  
<http://pureti.com/content/documents/WSU-TiO2-paper121011published-e-version---pervious-concrete.pdf>.
- Shen, Weiguo et al. 2013. "Investigation on Polymer-Rubber Aggregate Modified Porous Concrete." *Construction and Building Materials* 38: 667–74.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.006>.
- Silva, D. A., H. R. Roman, and P. J P Gleize. 2002. "Evidences of Chemical Interaction between EVA and Hydrating Portland Cement." *Cement and Concrete Research* 32(9): 1383–90.
- Skibniewski, Mirosław J., and Li-Chung Chao. 1992. "Evaluation of Advanced Construction Technology with AHP Method." *Journal of Construction Engineering and Management* 118(3): 577–93.
- De Sousa Luis, M, and P Gastao Ferreira. 2016. "Permeable Structure Permeability Assessment Taking into Consideration NBR 16416 Normative." *Artigo (Engenharia*

- Civil*), Universidade Católica de Brasília, Brasília.  
<https://repositorio.ucb.br/jspui/bitstream/123456789/8246/1/MatheusDeSousaLuisTC-CGRADUACAO2016.pdf>.
- Spatari, S, Z Yu, and F Montaldo. 2011. "Life Cycle Implications of Urban Green Infrastructure." *Environmental Pollution* 159(8–9): 2174–79.
- Suarez-Salazar, C. 1978. *Cost and Time in Construction (Costo y Tiempo En Edificación)*. 3rd ed. ed. Limusa. Mexico City.
- Sukontasukkul, Piti. 2009. "Use of Crumb Rubber to Improve Thermal and Sound Properties of Pre-Cast Concrete Panel." *Construction and Building Materials* 23(2): 1084–92. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.021>.
- Sumanasooriya, Milani S., and Narayanan Neithalath. 2011. "Pore Structure Features of Pervious Concretes Proportioned for Desired Porosities and Their Performance Prediction." *Cement and Concrete Composites* 33(8): 778–87.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.06.002>.
- Swe, Than Mar, Pitcha Jongvivatsakul, and Withit Pansuk. 2016. "Properties of Pervious Concrete Aiming for LEED Green Building Rating System Credits." *Engineering Journal* 20(2): 61–72.
- Tataranni, Piergiorgio, Giulia Maria Besemer, Villiam Bortolotti, and Cesare Sangiorgi. 2018. "Preliminary Research on the Physical and Mechanical Properties of Alternative Lightweight Aggregates Produced by Alkali-Activation of Waste Powders." *Materials* 10(7).
- Tennis, Paul D, Michael L Leming, and David J Akers. 2004. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, USA *Pervious Concrete Pavements*.
- Tho-In, Tawatchai, Vanchai Sata, Prinya Chindaprasirt, and Chai Jaturapitakkul. 2012. "Pervious High-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete." *Construction and Building Materials* 30(325): 366–71. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.028>.



- Tobón, Jorge I. et al. 2018. "Effect of Pyrogenic Silica and Nanosilica on Portland Cement Matrices." *Journal of Materials in Civil Engineering* 30(10): 1–10.
- Torres, Anthony, Jiong Hu, and Amy Ramos. 2015. "The Effect of the Cementitious Paste Thickness on the Performance of Pervious Concrete." *Construction and Building Materials* 95: 850–59.  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815302099>.
- Ulloa-Mayorga, Vivian Andrea et al. 2018. "Performance of Pervious Concrete Containing Combined Recycled Aggregates." *Ingeniería e Investigación* 38(2): 34–41.  
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/ingevinv/article/view/67491>.
- United Nations. 2017. "Sustainable Development Goals." *17 goals to transform our world*.  
<http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/> (January 8, 2018).
- USDA. 2011. "Rain Gardens." 07.
- Vancura, Mary E., Kevin MacDonald, and Lev Khazanovich. 2012. "Location and Depth of Pervious Concrete Clogging Material before and after Void Maintenance with Common Municipal Utility Vehicles." *Journal of Transportation Engineering* 138(3): 332–38. <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29TE.1943-5436.0000327>.
- Vardanega, P. J. 2014. "State of the Art: Permeability of Asphalt Concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering* 26(1): 54–64.  
<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0000748>.
- Vogel, Paul, Jeannette Orben, R Kern, and Vanessa Bik. 2018. "New Developments for Technical and Economic Optimization of Porous Concrete." *Proceedings of the 13th International Symposium on Concrete Roads, Berlin, Germany. 19-22 June 2018*.
- Wang, Yupeng, Umberto Berardi, and Hashem Akbari. 2015. "The Urban Heat Island Effect in the City of Toronto." *Procedia Engineering* 118: 137–44.
- Welker, A, J Jenkins, L McCarthy, and E Nemirovsky. 2013. "Examination of the Material Found in the Pore Spaces of Two Permeable Pavements." *Journal of Irrigation and*

- Drainage Engineering* 139(4): 278–84.  
<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0000543>.
- Winston, Ryan J. et al. 2016. “Maintenance Measures for Preservation and Recovery of Permeable Pavement Surface Infiltration Rate - The Effects of Street Sweeping, Vacuum Cleaning, High Pressure Washing, and Milling.” *Journal of Environmental Management* 169: 132–44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.12.026>.
- Wong, T, and R Brown. 2009. “The Water Sensitive City: Principles for Practice.” *Water and Science Technology* 60(3): 673.
- Woods-Ballard, B et al. 2015. Ciria (C697) *The SUDS Manual*. London and Dundee, UK.  
<http://www.persona.uk.com/A47postwick/deposit-docs/DD-181.pdf>.
- Wu, J., B. Yu, and M. Yun. 2007. “A Resistance Model for Flow through Porous Media.” *Transport in Porous Media* 71: 331–43.
- Wurst III, J.E., and B.J. Putman. 2013. “Laboratory Evaluation of Warm-Mix Open Graded Friction Course Mixtures.” *Journal of Materials in Civil Engineering* 25: 403–10.
- Xu, Gelong et al. 2018. “Investigation on the Properties of Porous Concrete as Road Base Material.” *Construction and Building Materials* 158: 141–48.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.151>.
- Yahia, Ammar, and K. Daddy Kabagire. 2014. “New Approach to Proportion Pervious Concrete.” *Construction and Building Materials* 62: 38–46.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.025>.
- Yang, Jing, and Guoliang Jiang. 2003. “Experimental Study on Properties of Pervious Concrete Pavement Materials.” *Cement and Concrete Research* 33(3): 381–86.
- Yang, Lei et al. 2018. “Effect of Superplasticizer Type and Dosage on Fluidity and Strength Behavior of Cemented Tailings Backfill with Different Solid Contents.” *Construction and Building Materials* 187: 290–98.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.155>.

- Yekkalar, M., L. Haselbach, and Q. Langfitt. 2018. “Impacts of a Pervious Concrete Retention System on Neighboring Clay Soils.” *Journal of Cold Regions Engineering* 32(1).
- Yilmaz, Erol et al. 2015. “Curing Time Effect on Consolidation Behaviour of Cemented Paste Backfill Containing Different Cement Types and Contents.” *Construction and Building Materials* 75: 99–111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.008>.
- Yusak, Mohd Ibrahim Mohd, Ramadhansyah Putra Jaya, Mohd Rosli Hainin, and Mohd Haziman Wan Ibrahim. 2016. “A Review of Microstructure Properties of Porous Concrete Pavement Incorporating Nano Silica.” *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences* 11(20): 11832–35.
- Zaetang, Yuwadee, Ampol Wongsas, Vanchai Sata, and Prinya Chindaprasirt. 2013. “Use of Lightweight Aggregates in Pervious Concrete.” *Construction and Building Materials* 48: 585–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.077>.
- Zhang, Xiaoling, and Huan Li. 2018. “Urban Resilience and Urban Sustainability: What We Know and What Do Not Know?” *Cities* 72: 141–48.
- Zhong, Rui, and Kay Wille. 2015. “Material Design and Characterization of High Performance Pervious Concrete.” *Construction and Building Materials* 98: 51–60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.027>.
- Zhong, Rui, and Kay Wille. 2016. “Compression Response of Normal and High Strength Pervious Concrete.” *Construction and Building Materials* 109: 177–87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.051>.



## ANEXOS

### Anexo 2: Fichas técnicas del cemento empleado



Fábrica El Alto (Morata de Tajuña). Madrid

EN 197-1 **CEM I 52,5 R**

www.valderivas.es

© 1993-2011

Cemento Portland tipo **CEM I** de alta resistencia **52,5 MPa** a 28 días con resistencia inicial elevada **R**.

Cemento imprescindible a la hora de elaborar hormigones de altas resistencias, muy adecuado para la fabricación industrial de elementos estructurales prefabricados que requieran la máxima resistencia.

Sus altas prestaciones lo hacen especialmente adecuado para la elaboración de hormigón pretensado, muy utilizado en obras públicas especiales, como puentes de hormigón pretensado, etc.

Fábrica El Alto (Morata de Tajuña), Madrid

**EN 197-1 CEM I 52,5 R****CARACTERÍSTICAS**

	Características del cemento	Norma	Habitual
<b>Componentes*</b>	Cenizas (%)	95-100	98
	Óxido (S) (%)	-	4
	Fosfatos (P) (%)	-	-
	Cenizas volantes (V) (%)	-	-
	Escoria volcánica (O) (%)	-	-
	Regulador de fraguado, "yeast" (%)	-	0
<b>Químicas</b>	Trisulfato de azufre (S <sub>3</sub> ) (%)	4 máx.	3,4
	Cenizas (C) (%)	0,10 máx.	0,01
	Pérdida por calcinación (%)	5 máx.	2,7
	Residuo insoluble (%)	3 máx.	1,3
<b>Físicas</b>	Superficie específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	-	4.750
	Expansión Le Chatelier (mm)	10 máx.	0
	Tiempo de inicio de fraguado (minutos)	45 máx.	120
	Tiempo final de fraguado (minutos)	-	175
<b>Mecánicas</b>	Compresión a 1 día (MPa)	-	26
	Compresión a 2 días (MPa)	30 máx.	45
	Compresión a 7 días (MPa)	-	49
	Compresión a 28 días (MPa)	52,5 mín.	63

\* Referidos al núcleo del cemento, excluido el regulador de fraguado.

La empresa se reserva el derecho de modificar sin previo aviso, alguno de los datos si el sistema arroja datos diferentes.

Impreso en papel ecológico

**PROPIEDADES**

- Elevadas resistencias mecánicas a todas las edades.
- Rápido endurecimiento, lo que lo convierte en un cemento apropiado para la elaboración de prefabricados.

**UTILIZACIÓN****Recomendado para la elaboración de:**

- Hormigón de alta resistencia.
- Hormigón en tiempo frío.
- Todo tipo de elementos prefabricados.
- Para la elaboración de hormigón en masa, armado y pretensado de altas resistencias mecánicas a cualquier edad.

**Precauciones para la puesta en obra:**

Cuidar la dosificación, el amasado y el curado, especialmente en climas secos a elevadas temperaturas, con el fin de evitar la desecación rápida causante de la retracción.

Ctra. Puente Argandoña-  
Chinchón, Km. 9,5  
28530 Morata  
de Tajuña (Madrid)  
Tel. 91 874 05 00  
Fax 91 873 90 56

www.valderrivas.es

c/ José Abascal, 58 - 28033 Madrid - Tel. 91 396 01 00 - Fax 91 396 02 54 - comercialista@valderrivas.es





# Impercem.

El único cemento que bloquea el paso de la humedad en la construcción, protegiendo toda tu obra.

El CPC 30R IMPERCEM® es un cemento Portland gris, que cumple con las características de un CPC 30R Extra, de uso general, mantiene las características de los cementos CPC 30R de CEMEX resistencia, fraguado y rendimiento, ofreciendo características impermeables.



## APLICACIONES

El cemento IMPERCEM® puede utilizarse en todo tipo de elementos y aplicaciones tanto estructurales como de mampostería como: Pisos, firmes, castillos, trabes, zapatas, losas, columnas, zarpeos, afines, pegado de blocks, entortados, etc. Su uso es recomendable para todo tipo de obras y especialmente para aquellas en las que los elementos de concreto estarán expuestos a ambientes húmedos, ya que brinda protección desde los cimientos, muros y techos, produciendo excelentes resultados en la protección contra la humedad.

**NOTA:** Es también recomendable para albercas, tanques de agua, cisternas o pilas, siempre y cuando se asegure que el elemento de concreto sea monolítico, para evitar las juntas frías que son puntos débiles para la filtración de agua, y el cálculo estructural se realice considerando la presión hidrostática.

El cemento IMPERCEM® permite producir mezclas muy fáciles de trabajar y con buena homogeneidad, lo que evita la segregación y ayuda a minimizar el sangrado del concreto, por lo que éste podrá ser manejado y colocado con mayor facilidad, proporcionando elementos más durables.

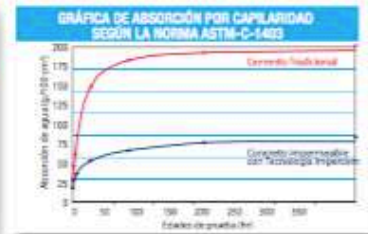
**IMPERCEM®** Como solución a problemas de humedad en la construcción:

El cemento IMPERCEM® puede utilizarse construcciones nuevas para brindar protección integral desde los cimientos, muros, trabes, dadas, techos y trabajos de mampostería. Así como también puede utilizarse para reparar problemas de humedad en construcciones existentes.

## CARACTERÍSTICAS

ESPECIFICACIONES MECÁNICAS	MÉTODO DE PRUEBA	RESULTADOS	UNIDADES	CONDICIÓN DEL RESULTADO
Resistencia a compresión a 3 días	NMX-C-061	20	N/mm <sup>2</sup>	Valor mínimo esperado
Resistencia a compresión a 28 días	NMX-C-061	30	N/mm <sup>2</sup>	Valor mínimo esperado
ESPECIFICACIONES FÍSICAS	MÉTODO DE PRUEBA	RESULTADOS	UNIDADES	CONDICIÓN DEL RESULTADO
Tiempo de fraguado inicial	NMX-C-059	45	Minutos	Valor mínimo esperado
Tiempo de fraguado final	NMX-C-059	600	Minutos	Valor máximo esperado
Contracción en autoclave	NMX-C-062	0.20	%	Valor máximo esperado
Expansión en autoclave	NMX-C-062	0.80	%	Valor máximo esperado

Los tiempos de fraguado inicial y final reportados en esta tabla, corresponden a la prueba realizada en la pasta de cemento, de acuerdo a la norma NMX-C-059. Estos tiempos pueden variar en la aplicación y bajo las condiciones climatológicas en las que se coloque el concreto.



## VENTAJAS

El cemento IMPERCEM® con respecto al cemento tradicional es la cualidad de repeler el agua, conservando las características de resistencia, rendimiento y tiempos de fraguado de los cementos tradicionales de CEMEX, y adicionalmente tiene los beneficios del cemento Extra (reducción de hasta un 80% de las grietas por contracción plástica, facilidad en el curado, mejora en el mezclado y trabajabilidad).

El uso del cemento impermeable evita:

- La aparición de salitre, moho, filtraciones
- El desprendimiento de aplanados o pintura de muros, y techos a causa de la humedad
- El deterioro de las instalaciones eléctricas
- El deterioro de las varillas

## MODO DE EMPLEO



1. Humedece y prepara una cama de arena (agregado fino) de 5 a 7 cm de altura.

2. Agregar el cemento IMPERCEM®, mezclar muy bien con la arena y formar un volcán o rodete.

3. Añadir la grava (agregado grueso) y el resto del agua.

4. Mezclar todos los materiales.

**NOTA:** Para la preparación de mezclas de mortero se sigue el mismo procedimiento anterior sólo que sin adicionar grava (paso 4). En caso de que las mezclas se realicen de forma mecánica, con una revolvedora, el procedimiento a seguir es el mismo que con el cemento convencional, la misma fuerza mecánica del motor ayudará a romper la cámara inicial que impone el cemento para entrar en contacto con el agua.

- Para la elaboración de concreto las proporciones recomendadas son:

APLICACIÓN	CEMENTO Bulto 50 kg	GRAVA Bote o Cubeta de 19 L	ARENA Botes	AGUA Botes
Muros y pisos	1	8.5	8.0	3.0
Castillos y dadas	1	6.5	5.5	2.5
Losas y zapatas	1	6.0	4.0	2.0
Columnas y techos	1	4.5	3.5	1.5

Estas mezclas proporcionan un concreto con el agua necesaria para obtener una consistencia manejable (reventamiento de 10 cm). Si requieres una mezcla más fluida, añade agua y cemento en una proporción de 1 bote de agua por un bote de cemento, hasta obtener la consistencia deseada. Estas proporciones pueden variar según la naturaleza de los agregados de la región, se recomienda con este cemento mantener las proporciones que regularmente se usan con el cemento convencional.

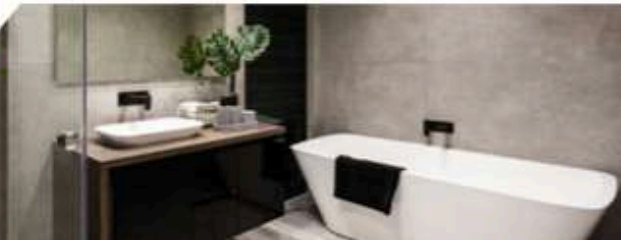
- Preparación de la mezcla:

La proporción recomendada para la preparación de dicho mortero es de 1:4, es decir, 1 parte de cemento con 4 partes de arena (esto considerando botes de 19 litros sin deformaciones), y añadiendo el agua necesaria para llegar a una consistencia adecuada en función de la superficie en que se colocará el mortero.

- Preparación de la superficie:

Antes de colocar el mortero con IMPERCEM® sobre un muro o techo con problemas de humedad es importante que éste se encuentre limpio y libre de polvo, y que se hayan retirado materiales colocados con anterioridad que puedan evitar la adecuada adherencia entre el nuevo mortero y la superficie a proteger.

Es conveniente picar o escarificar la superficie y usar un adhesivo para unir concreto nuevo con viejo, para asegurar el mejor contacto entre ambos materiales.





- **Cuidados durante la colocación:**  
En el caso de protección de muros el mortero elaborado con IMPERCEM® debe tener al menos 2 cm de espesor para evitar el paso del agua. Se recomienda que se dé cierta inclinación al entortado, el espesor mínimo debe ser de 3 cm en la parte más delgada y hasta 5-6 cm en su parte más gruesa, espesores mayores podrían comprometer la carga estructural. Es importante proteger los pretiles (unión de techo con muro), zonas que suelen ser punto débil para la filtración de la humedad. Se recomienda dar un sellado de las superficies con una llana, cerrando así las estructuras o poros que puedan quedar.
- **Cuidados posteriores a la colocación:**  
Es importante seguir las prácticas constructivas adecuadas respecto al proceso de curado, a fin de que el mortero no pierda agua de reacción y presente agrietamientos por contracción plástica (os que se presentan tras las primeras horas del colado cuando aún se encuentra fresco el concreto). En caso de aparecer grietas delgadas y no tan abundantes se recomienda sellarlas con una mezcla de cemento y agua (lechada).
- **NOTA:** En losas de concreto elaboradas con cemento IMPERCEM® cuando llega a presentarse un agrietamiento severo (grietas abiertas y abundantes) es necesario colocar un entortado siguiendo las recomendaciones que se indican en este apartado.



#### RECOMENDACIONES GENERALES /

Usa las prácticas constructivas adecuadas:

- Selecciona agregados duros, de tamaño adecuado y limpios (libres de arcillas, grasas y aceites, azúcares, melazas, materia orgánica, entre otros contaminantes).
- Usa agua limpia y observa cómo el IMPERCEM® trabaja desde el contacto con el agua.
- No mezcles este cemento con arenas, gravas u otros productos que hayan sido envasados en sacos de azúcar o melazas.
- No mezcles este cemento con otros, pues perderá su protección impermeable.
- Utiliza la cantidad de agua recomendada, no requiere una mayor cantidad de agua que un cemento convencional.

- Para preparar la mezcla selecciona una superficie dura y limpia que no absorba humedad.
- Coloca la mezcla de manera uniforme dentro del molde o de la cimbra previamente tratados con algún desmoldante y desaloja el aire atrapado mediante vibración o varillado.
- Deja en reposo la mezcla dentro del molde o cimbra el tiempo necesario hasta que alcance la madurez conveniente, mínimo 8 días en climas cálidos y 14 días en climas fríos.
- Mantén húmeda la superficie del colado, protegiéndolo de la evaporación aproximadamente unas 4 horas después del colado y aún después de descimbrar o desmoldar, durante el mayor tiempo posible.
- Se deben evitar las juntas frías en las mezclas de concreto o mortero, por lo que no deben pasar más de 30 minutos entre una capa y otra de material, en aplicaciones de mortero y entortados la aplicación debe hacerse en una sola ocasión cubriendo toda la superficie.

**RECOMENDACIONES PARTICULARES**

La aparición de grietas o fisuras ocasionadas por una pérdida rápida del agua del concreto que se observan en las superficies horizontales, así como los defectos en el acabado tales como agregados expuestos o exceso de aire atrapado, son fenómenos que ocasionan que el concreto pueda tener filtraciones.

Para disminuir la posibilidad de ocurrencia deben seguirse recomendaciones:

**Durante el colado de losas:**

- 1 Evita los colados en las horas de mayor radiación solar.
- 2 Aplica prácticas de compactación adecuadas como: vibrado, varillado o con un pisón baja grava, que garanticen la máxima remoción de aire atrapado en la estructura y que eviten la segregación de los materiales.
- 3 Deberá quedar un espesor de concreto mínimo de 5 cm sobre las mangueras del cableado eléctrico, varillas u otros objetos que queden ahogados en la losa.

**Durante el acabado de losas:**

- 1 El acabado del concreto consiste en enrasar, aplanar y allanar la superficie del concreto para darle la apariencia deseada.
- 2 El enrasado se realiza inmediatamente después de colocado el concreto, con la finalidad de darle el nivel deseado, posteriormente se deberá dejar que el concreto inicie a fraguar, durante este proceso aparecerá agua sobre la superficie, conocida como agua de sangrado, el aplanado deberá iniciarse inmediatamente después de que esta agua desaparezca, esto se identifica por la pérdida de brillo de la superficie. Si se desea dar un terminado a la superficie es en este momento en el que deberá aplicarse la operación de cepillado si se desea una superficie rugosa, o allanado si se desea una superficie pulida.
- 3 Si el acabado es pulido (operación de allanado), éste se deberá de hacer utilizando una lechada de cemento, en lugar de utilizar el cemento espolvoreado.

**Durante el curado:**

- 1 Evitar la exposición de la superficie del concreto a corrientes de aire, por lo que se deberá de cubrir cuando esto sea inevitable utilizando barreras contra el viento.
- 2 Aplica cualquier método convencional de curado que garantice la humedad del concreto, el método deberá asegurar que el concreto no se seque durante las primeras 24 horas y los primeros 15 días posteriores al colado.
- 3 Los métodos de curado convencionales para evitar la pérdida de humedad son:
  - a) Riego con agua.
  - b) Uso de plástico
  - c) Membranas de curado
- 4 Si se utiliza el riego con agua, como método de curado, se recomienda que se aplique durante 15 días y con la frecuencia necesaria para que la superficie no se seque por ningún periodo de tiempo. El curado debe realizarse al menos 3 veces al día y por lo menos 2 horas de exposición con agua.
- 5 Si se utiliza el plástico, es necesario sellar las orillas con la finalidad de que la corriente de aire no corra entre el plástico y el concreto.
- 6 Si se utiliza la membrana de curado, se deberá asegurar que quede perfectamente colocada como una pintura, de tal forma que quede una película uniforme sobre la losa.

**Prácticas adecuadas para reparaciones :**

Los muros o techos con problemas de humedad pueden protegerse con un mortero elaborado con cemento IMPERCEM®, aplicando un zarpeo o un entortado, respectivamente.



Para más información:  
[www.cemexmexico.com](http://www.cemexmexico.com)  
 Contacto:  
[dudas.impercem@cemex.com](mailto:dudas.impercem@cemex.com)  
 01 800 80CEMEX (2823638)



Construyendo un mejor futuro



## Anexo 2: Proceso de elaboración de mezclas de hormigón poroso



1.- Preparación de moldes con aceite para evitar que la mezcla se quede pegada dentro y facilitar desmolde.



2.- Pesaje de materiales a emplear que componen la mezcla de hormigón poroso.



3.- Vertido de materiales en hormigonera y mezclado de los mismos para la elaboración de mezclas de hormigón poroso.



4.- Mezcla de hormigón poroso vertida de hormigonera en recipiente para transportarla dentro del laboratorio.



5.- En cada molde pesar la cantidad necesaria de mezcla para una probeta de hormigón poroso.



6.- Compactación de probetas de hormigón poroso. El método de compactación, así como el esfuerzo empleado, puede variar dependiendo del estudio, así como del tamaño y forma de las probetas.





7.- Ejemplo de probetas de hormigón poroso tamaño Marshall ( $D=10.2\text{cm}$ ,  $h=6.5\text{cm}$ ), listas para ser sometidas a los diferentes ensayos planteados en laboratorio.

## Anexo 3: Fichas técnicas de los aditivos empleados

### A) Superplastificante – MasterEase 3850 BASF



**■ - BASF**

We create chemistry

## MasterEase 3850

**Aditivo superplastificante / reductor de agua de alta actividad para la producción de hormigones de baja viscosidad y reología mejorada con un buen mantenimiento de consistencia.**

**CAMPO DE APLICACIÓN**

MasterEase 3850 es un aditivo superplastificante / reductor de agua de alta actividad basado en la nueva tecnología de polímeros PAE exclusiva de BASF Construction Chemicals para la producción de hormigones de baja viscosidad incluso con reducidos contenidos de agua. Diseñado para mejorar la reología y con ello su trabajabilidad, bombeabilidad y la puesta en obra del hormigón fabricado.

MasterEase 3850 permite la fabricación de hormigones de elevada fluidez y de alta resistencia, con una buena trabajabilidad y un buen mantenimiento de consistencia.

Consultar con el Departamento Técnico cualquier aplicación no prevista en esta relación.

**PROPIEDADES**

- Gran poder reductor de agua.
- Mejora el acabado y la textura de la superficie del hormigón.
- Aumenta las resistencias iniciales y finales del hormigón.
- Buen mantenimiento de consistencia para cubrir los tiempos de transporte, sin retraso de fraguado.
- Facilita el bombeo y reduce el tiempo de aplicación y compactación.
- Dota al hormigón de un excelente comportamiento reológico, con reducida viscosidad y pegajosidad y ductilidad mejorada.
- Excelente cohesión.

**DOSIFICACIÓN**

Empleado como aditivo único, MasterEase 3850 se dosifica al 0,5 – 2,5 % sobre peso de cemento, en función del tipo de materiales y el tipo de hormigón a fabricar.

Dosificaciones diferentes a las recomendadas son posibles con ensayos previos que justifiquen su buen rendimiento.

Se recomienda en cada caso realizar los ensayos oportunos para determinar la dosificación óptima.

**MODO DE UTILIZACIÓN**

MasterEase 3850 se añade al hormigón durante su amasado, con la última parte del agua de amasado. Debe mezclarse un tiempo suficiente para garantizar la completa homogeneización del aditivo en toda la masa.

MasterEase 3850 es compatible con los plastificantes de la gama MasterPozzolith y MasterPolyheed de BASF.

MasterEase 3850 puede ser también añadido directamente al camión hormigonera en obra, para restablecer hormigones que haya perdido consistencia. En este caso, se debe asegurar la plena compatibilidad entre aditivos antes de la aplicación.

No añadir nunca el aditivo antes del agua de amasado, sobre el cemento y los áridos secos.

Consultar con el Departamento Técnico la compatibilidad entre aditivos antes de su utilización.

**PRESENTACIÓN**

MasterEase 3850 se a granel en cisterna, contenedores de 1050 kg, bidones de 210 kg y en garrafas de 25 kg.

**LIMPIEZA DE HERRAMIENTAS**

La limpieza de equipos y herramientas impregnadas de MasterEase 3850 puede realizarse con agua preferentemente caliente.

**CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO/ TIEMPO DE CONSERVACIÓN**

Almacenar en lugar fresco y seco y en sus envases originales herméticamente cerrados, con temperaturas superiores a +5° C.

MasterEase 3850 puede conservarse hasta 12 meses si se conserva adecuadamente.

MasterEase 3850  
Página 1 de 3  
Edición: 26/02/2019





We create chemistry

## MasterEase 3850

**Aditivo superplastificante / reductor de agua de alta actividad para la producción de hormigones de baja viscosidad y reología mejorada con un buen mantenimiento de consistencia.**

### MANIPULACIÓN Y TRANSPORTE

Para su manipulación deberán observarse las medidas preventivas usuales para el manejo de productos químicos por ejemplo usar gafas y guantes. No comer, beber ni fumar durante la aplicación. Lavarse las manos antes de una pausa y al término del trabajo.

La eliminación del producto y su envase debe realizarse de acuerdo con la legislación vigente y es responsabilidad del poseedor final.

Para más información, consultar la Hoja de Seguridad del producto.

### HAY QUE TENER EN CUENTA

- Se recomienda siempre la realización de ensayos previos a la utilización del aditivo.
- No emplear dosificaciones inferiores ni superiores a las recomendadas sin previa consulta con el Departamento Técnico.
- Consulta la compatibilidad entre aditivos

Propiedades	
Función principal:	Superplastificante / Reductor de agua de alta actividad.
Efecto secundario por sobredosificación:	Riesgo de disgregación a dosis elevadas.
Aspecto físico:	Líquido turbio amarillento.
Densidad, 20° C:	1,040 ± 0,02 g/cm <sup>3</sup>
pH, 20° C:	6,7 ± 1
Viscosidad Brookfield 20° C Sp00/100rpm:	< 35 cps.
Cloruros:	< 0,1%

Los datos técnicos reflejados son fruto de resultados estadísticos y no representan mínimos garantizados. Si se desean los datos de control, pueden solicitarse las "Especificaciones de Venta" a nuestro Departamento Técnico.



MARCADO CE DE PRODUCTO BAJO LA  
DIRECTIVA UE DE PRODUCTOS DE LA  
CONSTRUCCIÓN DE LA UNIÓN EUROPEA

MasterEase 3850  
Página 2 de 3  
Edición: 26/02/2019





We create chemistry

## MasterEase 3850

**Aditivo superplastificante / reductor de agua de alta actividad para la producción de hormigones de baja viscosidad y reología mejorada con un buen mantenimiento de consistencia.**

### NOTA:

La presente ficha técnica sirve, al igual que todas las demás recomendaciones e información técnica, únicamente para la descripción de las características del producto, forma de empleo y sus aplicaciones. Los datos e informaciones reproducidos, se basan en nuestros conocimientos técnicos obtenidos en la bibliografía, en ensayos de laboratorio y en la práctica.

Los datos sobre consumo y dosificación que figuran en esta ficha técnica, se basan en nuestra propia experiencia, por lo que estos son susceptibles de variaciones debido a las diferentes condiciones de las obras. Los consumos y dosificaciones reales, deberán determinarse en la obra, mediante ensayos previos y son responsabilidad del cliente.

Para un asesoramiento adicional, nuestro Servicio Técnico, está a su disposición.

BASF Construction Chemicals España, S.L. se reserva el derecho de modificar la composición de los productos, siempre y cuando éstos continúen cumpliendo las características descritas en la ficha técnica.

Otras aplicaciones del producto que no se ajusten a las indicadas, no serán de nuestra responsabilidad.

Oforgamos garantía en caso de defectos en la calidad de fabricación de nuestros productos, quedando excluidas las reclamaciones adicionales, siendo de nuestra responsabilidad tan solo la de reintegrar el valor de la mercancía suministrada.

Debe tenerse en cuenta las eventuales reservas correspondientes a patentes o derechos de terceros.

Edición: 26/02/2019

La presente ficha técnica pierde su validez con la aparición de una nueva edición

MasterEase 3850  
Página 3 de 3  
Edición: 26/02/2019

### CONTACTO

**BASF Construction Chemicals España, S.L.**

Carretera del Mig, 219  
08907 L'Hospitalet de Llobregat  
Barcelona

Tel: 93 261 61 00

Fax: 93 261 62 19

Basf-cc@basf-cc.es

[www.master-builders-solutions.basf.es](http://www.master-builders-solutions.basf.es)

**MASTER®**  
**» BUILDERS**  
SOLUTIONS

## B) Suspensión de nanosílice – MasterRoc MS 685 BASF



We create chemistry

### MasterRoc MS 685

#### Suspensión de nanosílice precipitada.

##### CAMPO DE APLICACIÓN

MasterRoc MS 685 es una mezcla líquida basada en una suspensión de nanosílice amorfa.

Estas partículas ultrafinas empiezan a reaccionar tan pronto como se incorporan en la mezcla. La textura del slurry es similar a la de la pasta de cemento y crea un mineral microscópico estable.

Muy efectivo en combinación con cenizas volantes. Esta mezcla proporciona una mejor cohesión, menor porosidad e incrementa la compacidad de la mezcla.

Aplicable en:

- Hormigón bombeado.
- Hormigón expuesto ante aguas blandas.
- Hormigón arquitectónico.
- Hormigón de altas prestaciones.
- Hormigón proyectado.
- Morteros de inyección.
- Hormigón autocompactante.

##### BASE DEL MATERIAL

Suspensión de nanosílice amorfa.

##### PROPIEDADES

- El precipitado de sílice amorfa empieza a reaccionar con carácter puzolánico tan pronto como es incorporado en la mezcla de cemento. En consecuencia, proporciona textura a la pasta.
- Debido a la mejora de textura, mejora la reología de la mezcla de hormigón (o mortero) y evita la migración del agua (efecto retenedor de agua).
- Mejora la cohesión.
- Reduce la presión de bombeo.
- Reduce la tendencia de segregación de la mezcla.
- Reduce la porosidad y la permeabilidad.
- Mejora la calidad del hormigón.
- Corrige el defecto de finos en la curva granulométrica.
- Mejora el acabado superficial.
- Excelente rendimiento con cenizas volantes.



##### MODO DE UTILIZACIÓN

MasterRoc MS 685 se incorpora en la mezcla con el agua de amasado o al final de la adición de ésta, después de un premezclado. No debe añadirse a la mezcla seca.

##### DOSIFICACIÓN

MasterRoc MS 685 se usa a dosificación entre el 0,5 - 5% sobre peso de cemento.

La dosificación varía de acuerdo con la cantidad de finos en la mezcla y en función de la reología requerida por la aplicación. Deben realizarse ensayos previos para determinar la oportuna dosificación.

##### PRESENTACIÓN

MasterRoc MS 685 se suministra en garrafas de 25 kg, bidones de 220 kg, contenedores de 1100 kg y a granel en cisternas.

##### LIMPIEZA DE HERRAMIENTAS

Las herramientas o equipos sucios de MasterRoc MS 685 pueden limpiarse con agua preferiblemente caliente.

MasterRoc MS 685  
Página 1 de 3  
Edición: 23/01/2017





We create chemistry

## MasterRoc MS 685

### Suspensión de nanosilice precipitada.

#### CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO / TIEMPO DE CONSERVACIÓN

Mantener el producto por encima de los 5° C y protegido de la incidencia directa del sol en sus envases originales correctamente cerrados.

El producto se almacena hasta seis meses si se almacena correctamente.

#### MANIPULACIÓN Y TRANSPORTE

Para su manipulación deberán observarse las medidas preventivas usuales para el manejo de productos químicos, por ejemplo usar gafas y guantes. Lavarse las manos antes de una pausa y al final del trabajo. No fumar, comer ni beber durante la aplicación.

La eliminación del producto y su envase debe realizarse según la legislación vigente y es responsabilidad del poseedor final.

No es un producto de mercancía peligrosa por carretera.

#### HAY QUE TENER EN CUENTA

No emplear dosificaciones inferiores ni superiores a las recomendadas sin previa consulta a nuestro Departamento Técnico

Se recomienda la realización de ensayos previos a la utilización del producto.

No añadir más agua sobre el mortero que pierda su consistencia ni reamasar.

Consulta la compatibilidad entre aditivos antes de su utilización.

Propiedades	
Aspecto físico:	Líquido blanco.
Densidad, 20° C:	1,134 ± 0,03 gr/cm <sup>3</sup>
pH, 20° C:	10 ± 1
Viscosidad, 20°C Brookfield Sp00/100rpm:	< 30 cps.
Residuo seco 130° C:	22 ± 1,5%
Cloruros:	< 0,1 %
Los datos técnicos reflejados son fruto de resultados estadísticos y no representan mínimos garantizados. Si se desean los datos de control, pueden solicitarse las "Especificaciones de Venta" a nuestro Departamento Técnico	

MasterRoc MS 685  
Página 2 de 3  
Edición: 23/01/2017

**MASTER®**  
**»BUILDERS**  
SOLUTIONS



We create chemistry

## MasterRoc MS 685

Suspensión de nanosilice precipitada.

### NOTA:

La presente ficha técnica sirve, al igual que todas las demás recomendaciones e información técnica, únicamente para la descripción de las características del producto, forma de empleo y sus aplicaciones. Los datos e informaciones reproducidos, se basan en nuestros conocimientos técnicos obtenidos en la bibliografía, en ensayos de laboratorio y en la práctica.

Los datos sobre consumo y dosificación que figuran en esta ficha técnica, se basan en nuestra propia experiencia, por lo que estos son susceptibles de variaciones debido a las diferentes condiciones de las obras. Los consumos y dosificaciones reales, deberán determinarse en la obra, mediante ensayos previos y son responsabilidad del cliente.

Para un asesoramiento adicional, nuestro Servicio Técnico, está a su disposición.

BASF Construction Chemicals España, S.L. se reserva el derecho de modificar la composición de los productos, siempre y cuando éstos continúen cumpliendo las características descritas en la ficha técnica.

Otras aplicaciones del producto que no se ajusten a las indicadas, no serán de nuestra responsabilidad.

Otorgamos garantía en caso de defectos en la calidad de fabricación de nuestros productos, quedando excluidas las reclamaciones adicionales, siendo de nuestra responsabilidad tan solo la de reingresar el valor de la mercancía suministrada.

Debe tenerse en cuenta las eventuales reservas correspondientes a patentes o derechos de terceros.

Edición: 23/01/2017

La presente ficha técnica pierde su validez con la aparición de una nueva edición

MasterRoc MS 685  
Página 3 de 3  
Edición: 23/01/2017

### CONTACTO

**BASF Construction Chemicals España, S.L.**

Carretera del Mig, 219

08907 L'Hospitalet de Llobregat

Barcelona

Tel: 93 261 61 00

Fax: 93 261 62 19

Basf-cc@basf-cc.es

[www.master-builders-solutions.basf.es](http://www.master-builders-solutions.basf.es)

**MASTER®**  
**» BUILDERS**  
SOLUTIONS

## C) Fibras de acero al carbono – MasterFiber 482 BASF



We create chemistry

### MasterFiber 482

Fibras de acero al carbono de alta resistencia para refuerzo estructural del hormigón/mortero convencional y de ultra altas prestaciones.

#### CAMPOS DE APLICACIÓN

MasterFiber 482 se utiliza generalmente en aquellas aplicaciones, donde se requiera el refuerzo estructural o la sustitución parcial o total de la armadura tradicional. En cada caso particular, cuando se considere la contribución estructural en los cálculos relativos a alguno de los estados límite últimos o de servicio, deberá verificarse el cumplimiento de los criterios especificados en el Anejo 14 de la EHE-08 según ensayo EN 14651.

Los campos de aplicación habituales son:

- Refuerzo estructural.
- Hormigón prefabricado.
- Hormigón proyectado.
- Hormigón de Altas Resistencias (HPC).
- Hormigón de Ultra Altas Resistencias (UHPC).

La elevada esbeltez de la fibra, unido a la altísima cuantía de fibra introducida en el hormigón por cada kg de fibra utilizado, proporciona una elevada ductilidad y refuerzo estructural a flexión, a tracción por flexión (y residual), tracción, cortante, etc. y control de la fisuración, incluso para muy pequeñas deformaciones.

Las propiedades tecnológicas que confiere al hormigón el empleo de MasterFiber 482, le hacen un componente imprescindible en la confección del Hormigón de Ultra Altas Prestaciones (UHPC). Consecuentemente, el empleo de MasterFiber 482 para la confección de UHPC, habilita la posibilidad de:

Eliminar o reducir la armadura tradicional del elemento resistente.

Reducir la sección resistente con la consecuente reducción de los costes asociados a la disminución de materiales empleados y peso del elemento estructural (cimentaciones, transporte, encofrados, materiales, etc.).

Aumento de la durabilidad.

Consultar con el Departamento Técnico cualquier aplicación no prevista en esta relación.



#### PROPIEDADES

- Gran capacidad para soportar cargas.
- Superiores propiedades mecánicas del hormigón, con mayor resistencia a flexión, tracción por flexión (residual) y cortante.
- Aumento de la tenacidad del hormigón, con mayor resistencia a impactos y esfuerzos puntuales.
- Excelente trabajabilidad.
- Control eficaz de la fisuración.
- Rotura dúctil del hormigón tras el fallo de la matriz pétreo.
- Rapidez, facilidad y calidad en la ejecución.
- Soluciones y detalles técnicos de calidad y económicamente rentables.

#### MODO DE UTILIZACIÓN

La fibra debe ser añadida como un componente más directamente en la amasadora, mezcladora o camión hormigonero al máximo de sus revoluciones, y dejar mezclar hasta que la fibra se disperse completamente en la masa.

Se recomienda que la adición de la fibra se realice de forma paulatina en la mezcladora para facilitar la dispersión.

MasterFiber 482  
Página 1 de 3  
Edición: 21/12/2018

**MASTER®**  
**BUILDERS**  
SOLUTIONS





We create chemistry

## MasterFiber 482

**Fibras de acero al carbono de alta resistencia para refuerzo estructural del hormigón/mortero convencional y de ultra altas prestaciones.**

### CONSUMO

Las dosificaciones habituales para aplicaciones convencionales de MasterFiber 482 están comprendidas entre los 10 y 40 kg/m<sup>3</sup> de hormigón.

Para su aplicación de Hormigones de Ultra Altas Resistencias, las dosis habituales se encuentran comprendidas entre 40 y 100 kg/m<sup>3</sup> de hormigón.

Se recomienda la realización de ensayos previos para verificar que el comportamiento reológico y la dispersión de la fibra en el hormigón-mortero sean los adecuados, especialmente cuando la dosificación de fibra es elevada.

### BASE DEL MATERIAL

MasterFiber 482 es una fibra de acero al carbono obtenida a partir de alambre trefilado en frío de hasta espesor muy reducido.

### CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO/ TIEMPO DE CONSERVACIÓN

MasterFiber 482 es un material totalmente inerte, por lo que no se degrada con el tiempo si se conserva adecuadamente en sus envases originales herméticamente cerrados libres de suciedad y evitando temperaturas altas.

### PRESENTACIÓN

MasterFiber 482 se presenta en cajas de 20 Kg.

### MANIPULACIÓN Y TRANSPORTE

Para su manipulación deberán observarse las medidas preventivas usuales para el manejo de productos químicos, por ejemplo usar gafas y guantes. Lavarse las manos antes de una pausa y al término del trabajo. No comer, beber y fumar durante la aplicación.

La eliminación del producto y su envase debe realizarse de acuerdo con la legislación vigente y es responsabilidad del poseedor final.

### HAY QUE TENER EN CUENTA

- Para adición en planta no añadir la fibra de acero como primer componente.
- Para adición a pie de obra se recomienda que el camión no esté cargado más de un 85% de su capacidad.
- En todos los casos se recomienda realizar una inspección visual con objeto de verificar que la mezcla es homogénea. De no ser así seguir amasando a velocidad máxima de rotación hasta que se consiga una perfecta distribución.

MasterFiber 482  
Página 2 de 3  
Edición: 21/12/2018

**MASTER®**  
**» BUILDERS**  
SOLUTIONS



We create chemistry

## MasterFiber 482

Fibras de acero al carbono de alta resistencia para refuerzo estructural del hormigón/mortero convencional y de ultra altas prestaciones.

Propiedades	
Material:	Fibra de acero al carbono
Resistencia a tracción:	> 3100 MPa
Longitud:	13 mm
Diámetro:	200 µm
Módulo elástico:	190 GPa
Esbeltez:	65

Los datos técnicos reflejados son fruto de resultados estadísticos y no representan mínimos garantizados. Si se desean los datos de control, pueden solicitarse las "Especificaciones de Venta" a nuestro Departamento Técnico.



MARCA CE DE PRODUCTO BAJO LA  
DIRECTIVA UE DE PRODUCTOS DE LA  
CONSTRUCCIÓN DE LA UNIÓN EUROPEA

### NOTA:

La presente ficha técnica sirve, al igual que todas las demás recomendaciones e información técnica, únicamente para la descripción de las características del producto, forma de empleo y sus aplicaciones. Los datos e informaciones reproducidos, se basan en nuestros conocimientos técnicos obtenidos en la bibliografía, en ensayos de laboratorio y en la práctica.

Los datos sobre consumo y dosificación que figuran en esta ficha técnica, se basan en nuestra propia experiencia, por lo que estos son susceptibles de variaciones debido a las diferentes condiciones de las obras. Los consumos y dosificaciones reales, deberán determinarse en la obra, mediante ensayos previos y son responsabilidad del cliente.

Para un asesoramiento adicional, nuestro Servicio Técnico, está a su disposición.

BASF Construction Chemicals España, S.L. se reserva el derecho de modificar la composición de los productos, siempre y cuando éstos continúen cumpliendo las características descritas en la ficha técnica.

Otras aplicaciones del producto que no se ajusten a las indicadas, no serán de nuestra responsabilidad.

Otorgamos garantía en caso de defectos en la calidad de fabricación de nuestros productos, quedando excluidas las reclamaciones adicionales, siendo de nuestra responsabilidad tan solo la de reingresar el valor de la mercancía suministrada.

Debe tenerse en cuenta las eventuales reservas correspondientes a patentes o derechos de terceros.

Edición: 21/12/2018

La presente ficha técnica pierde su validez con la aparición de una nueva edición.

MasterFiber 482  
Página 3 de 3  
Edición: 21/12/2018

### CONTACTO

**BASF Construction Chemicals España, S.L.**

Carretera del Mig, 219

08907 L'Hospitalet de Llobregat

Barcelona

Tel: 93 261 61 00

Fax: 93 261 62 19

Basf-cc@basf-cc.es

[www.master-builders-solutions.basf.es](http://www.master-builders-solutions.basf.es)

**MASTER®**  
**» BUILDERS**  
SOLUTIONS

## D) Fibras de polipropileno – MasterFiber 248 BASF



### MasterFiber 248

Fibra de polipropileno monofilamento resistente a los álcalis y destinada al refuerzo estructural de hormigón y productos derivados del cemento.

#### CAMPO DE APLICACIÓN

MasterFiber 248 es una fibra 100% de poliolefina tipo polipropileno, especialmente diseñada para su empleo en el refuerzo estructural de hormigón, hormigón proyectado y mortero.

MasterFiber 248 se aplica donde se requiera una mejora en la ductilidad del hormigón y mortero, así como un control eficaz de la fisuración por retracción.

Se emplea para la realización de:

- Pavimentos: como sustitución del mallazo de reparto – control de la fisuración por retracción.
- Hormigón proyectado como sustitución del mallazo de refuerzo.
- Prefabricados: como sustitución del mallazo estructural (total o parcial).

MasterFiber 248 también puede aplicarse en hormigón armado, ya que no presenta incompatibilidades frente al acero ni disminuye la adherencia entre la armadura y el hormigón.

Consultar con el Departamento Técnico cualquier aplicación no prevista en esta relación.

#### PROPIEDADES

- Reduce la formación de micro fisuras por retracción.
- Reduce la formación de fisuras.
- Aumenta la resistencia a flexotracción incrementando las resistencias residuales contempladas en el Anejo 14 de la EHE-08.
- Aumenta la ductilidad.
- Refuerzo contra el impacto.
- Refuerzo a la disgregación.
- Óptima dispersión en el hormigón.
- Disminuye la permeabilidad.
- Evitación de problemas de oxidación que se producen con el empleo de fibras metálicas.
- Resistente a la corrosión.
- Seguro y fácil de usar.
- Máxima adherencia matriz de hormigón – fibra.



#### DOSIFICACIÓN

Para el control de la fisuración por retracción en pavimentos y elementos prefabricados, las dosificaciones habituales están comprendidas entre 2 y 5 kg/m<sup>3</sup>.

Dosificaciones comprendidas entre los 3 y 10 kg/m<sup>3</sup> son factibles, aunque se recomienda la realización de ensayos previos para verificar que el comportamiento reológico y la dispersión de la fibra en el hormigón-mortero son los adecuados.

#### MODO DE UTILIZACIÓN

MasterFiber 248 se puede dosificar tanto en la planta de hormigón como a la llegada del camión a obra, asegurando un tiempo de mezclado suficiente para repartir la fibra por todo el hormigón (mínimo 5 minutos).

Incorporar la dosis de producto a la hormigonera como un componente más del hormigón, en cualquier momento de la mezcla o al final del mismo, pero nunca directamente sobre el agua antes de agregar el resto de componentes.

El producto no requiere ninguna precaución especial para su manejo.

MasterFiber 248  
Página 1 de 4  
Edición: 02/02/2017





We create chemistry

## MasterFiber 248

**Fibra de polipropileno monofilamento resistente a los álcalis y destinada al refuerzo estructural de hormigón y productos derivados del cemento.**

### CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO/ TIEMPO DE CONSERVACIÓN

MasterFiber 248 es un material totalmente inerte, por lo que no se degrada con el tiempo si se conserva adecuadamente en sus envases originales herméticamente cerrados libres de suciedad y evitando temperaturas altas.

### PRESENTACIÓN

MasterFiber 248 se suministra en bolsas de 4 kg, 6 kg y 150 kg.

### RECOMENDACIONES DE USO

- Con el fin de optimizar el rendimiento de las fibras estructurales MasterFiber 248 se hace recomendable el empleo de hormigón de consistencia fluida, esta consistencia debe conseguirse mediante el empleo de superplastificante de la gama MasterGlenium SKY y evitando la adición de agua y por lo tanto, el aumento de la R a/c, con el fin de evitar la flotación de las fibras.
- Se recomienda un ajuste de la dosificación de áridos para asegurar el recubrimiento de la fibra por la pasta del hormigón.

### MANIPULACIÓN Y TRANSPORTE

Para su manipulación deberán observarse las medidas preventivas usuales para el manejo de productos químicos, por ejemplo usar gafas y guantes. Lavarse las manos antes de una pausa y al término del trabajo. No comer, beber y fumar durante la aplicación.

La eliminación del producto y su envase debe realizarse de acuerdo con la legislación vigente y es responsabilidad del poseedor final.

### HAY QUE TENER EN CUENTA

- Se recomienda la realización de ensayos previos a la utilización del producto.
- No emplear dosificaciones superiores ni inferiores a las recomendadas sin previa consulta a nuestro Departamento Técnico.
- Por las características de superficie específica de las fibras, el uso de MasterFiber 248 implica una ligera pérdida de la consistencia del hormigón.

MasterFiber 248  
Página 2 de 4  
Edición: 02/02/2017

**MASTER®**  
**» BUILDERS**  
SOLUTIONS

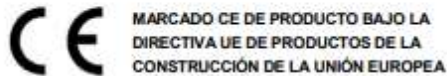


## MasterFiber 248

**Fibra de polipropileno monofilamento resistente a los álcalis y destinada al refuerzo estructural de hormigón y productos derivados del cemento.**

Propiedades	
Material:	Polipropileno (color negro).
Forma:	Monofilamentada grafilada.
Diámetro equivalente:	0,85 mm.
Frecuencia de la fibra (ud/kg):	41200
Longitud de fibra:	48 mm
Esbeltez:	56,5
Resistencia a tensión:	> 400 MPa. Según el método UNE-EN ISO 6892-1:2009
Densidad:	0,91 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad:	> 6,0 GPa. Según el método UNE-EN ISO 6892-1:2009
Módulo secante:	> 4,7 GPa. Según el método UNE-EN ISO 14889-2:2006
Temperatura de distorsión:	110° C
Temperatura de descomposición:	280° C
Inflamabilidad	No aplicable.
Resistencia a ácidos/álcalis	Excelente.

Los datos técnicos reflejados son fruto de resultados estadísticos y no representan mínimos garantizados. Si se desean los datos de control, pueden solicitarse las "Especificaciones de Venta" a nuestro Departamento Técnico.



MasterFiber 248  
Página 3 de 4  
Edición: 02/02/2017





We create chemistry

## MasterFiber 248

**Fibra de polipropileno monofilamento resistente a los álcalis y destinada al refuerzo estructural de hormigón y productos derivados del cemento.**

### NOTA:

La presente ficha técnica sirve, al igual que todas las demás recomendaciones e información técnica, únicamente para la descripción de las características del producto, forma de empleo y sus aplicaciones. Los datos e informaciones reproducidos, se basan en nuestros conocimientos técnicos obtenidos en la bibliografía, en ensayos de laboratorio y en la práctica.

Los datos sobre consumo y dosificación que figuran en esta ficha técnica, se basan en nuestra propia experiencia, por lo que estos son susceptibles de variaciones debido a las diferentes condiciones de las obras. Los consumos y dosificaciones reales, deberán determinarse en la obra, mediante ensayos previos y son responsabilidad del cliente.

Para un asesoramiento adicional, nuestro Servicio Técnico, está a su disposición.

BASF Construction Chemicals España, S.L. se reserva el derecho de modificar la composición de los productos, siempre y cuando éstos continúen cumpliendo las características descritas en la ficha técnica.

Otras aplicaciones del producto que no se ajusten a las indicadas, no serán de nuestra responsabilidad.

Otorgamos garantía en caso de defectos en la calidad de fabricación de nuestros productos, quedando excluidas las reclamaciones adicionales, siendo de nuestra responsabilidad tan solo la de reingresar el valor de la mercancía suministrada.

Debe tenerse en cuenta las eventuales reservas correspondientes a patentes o derechos de terceros.

**Edición: 02/02/2017**

La presente ficha técnica pierde su validez con la aparición de una nueva edición

### CONTACTO

**BASF Construction Chemicals España, S.L.**

Carretera del Mig, 219

08907 L'Hospitalet de Llobregat

Barcelona

Tel: 93 261 61 00

Fax: 93 261 62 19

Basf-cc@basf-cc.es

[www.master-builders-solutions.basf.es](http://www.master-builders-solutions.basf.es)

MasterFiber 248  
Página 4 de 4  
Edición: 02/02/2017

**MASTER®**  
**» BUILDERS**  
SOLUTIONS

## E) Modulador de viscosidad – MasterMatrix 175 BASF



We create chemistry

# MasterMatrix 175

**Aditivo modulador de viscosidad de nueva generación para hormigón autocompactante de alta robustez.**

### CAMPO DE APLICACIÓN

MasterMatrix 175 es un aditivo modulador de viscosidad de nueva generación especialmente indicado para la preparación de hormigones autocompactantes con bajo contenido de finos o que están confeccionados con áridos de granulometría discontinua, mejorando la cohesión, compacidad y la estabilidad de la masa.

MasterMatrix 175 permite la confección de hormigones autocompactantes, con un mayor rango de tolerancia a las variaciones de agua.

MasterMatrix 175 puede ser usado con todo tipo de cementos, y con una reducción del contenido de estos.

Consultar con el Departamento Técnico cualquier aplicación no prevista en esta relación.

### PROPIEDADES

- Gran poder cohesionante.
- Permite la confección de HAC con un mayor rango de tolerancia a las variaciones de agua.
- Permite conservar propiedades de compacidad en condiciones desfavorables.
- Disminuye el riesgo de disgregación manteniendo la unidad de todas las fases del hormigón.
- No produce retrasos de fraguado.
- Permite la confección de HAC con bajos contenidos de cemento.
- Facilita las tareas de puesta en obra.

### MODO DE UTILIZACIÓN

MasterMatrix 175 se adiciona al hormigón con la última parte del agua de amasado. No añadir sobre la masa seca de cemento y áridos.

Deberá consultarse la compatibilidad entre aditivos antes de su empleo, pues existen incompatibilidades con cierto tipo de productos.

### DOSIFICACIÓN

La dosificación recomendada de MasterMatrix 175 es del 0,5 – 0,8 % sobre peso de cemento.

MasterMatrix 175  
Página 1 de 2  
Edición: 09/12/2015

Estas dosificaciones son orientativas y deberán determinarse para cada caso concreto mediante ensayos representativos in situ.

### LIMPIEZA DE HERRAMIENTAS

La limpieza de equipos y herramientas que estén impregnadas de MasterMatrix 175 puede realizarse con agua abundante, preferiblemente caliente.

### PRESENTACIÓN

MasterMatrix 175 se presenta en garrafas de 25 kg, en bidones de 200 kg, contenedor de 1000 kg y a granel en cisterna.

Condiciones de almacenamiento/

Tiempo de conservación

Almacenar en lugar fresco y seco, con temperaturas entre +5° y +35° C. Proteger de las heladas.

En estas condiciones, MasterMatrix 175 puede almacenarse hasta 12 meses en sus envases originales herméticamente cerrados.

### MANIPULACIÓN Y TRANSPORTE

Para su manipulación deberán observarse las medidas preventivas usuales para el manejo de productos químicos, por ejemplo usar gafas y guantes. Lavarse las manos antes de una pausa y al término del trabajo. No comer, beber y fumar durante la aplicación.

La eliminación del producto y su envase debe realizarse de acuerdo con la legislación vigente y es responsabilidad del poseedor final.

Para más información, consultar la Hoja de Seguridad del producto.

### HAY QUE TENER EN CUENTA

- Se recomienda siempre la realización de ensayos previos a la utilización del aditivo.
- No emplear dosificaciones inferiores ni superiores a las recomendadas sin previa consulta con el Departamento Técnico.
- Consulta la compatibilidad entre aditivos antes de su utilización.





We create chemistry

## MasterMatrix 175

**Aditivo modulador de viscosidad de nueva generación para hormigón autocompactante de alta robustez.**

Propiedades	
Función principal:	Modulador de viscosidad para HAC.
Aspecto físico:	Líquido marrón claro.
Densidad (a 20° C):	1,000 ± 0,01 g/cm <sup>3</sup>
Viscosidad Brookfield 20° C Sp00/30rpm:	< 185 cps.
pH:	7 ± 1
Cloruros:	< 0,1%

Los datos técnicos reflejados son fruto de resultados estadísticos y no representan mínimos garantizados. Si se desean los datos de control, pueden solicitarse las "Especificaciones de Venta" a nuestro Departamento Técnico.



MARCADO CE DE PRODUCTO BAJO LA  
DIRECTIVA UE DE PRODUCTOS DE LA  
CONSTRUCCIÓN DE LA UNIÓN EUROPEA.

### NOTA:

La presente ficha técnica sirve, al igual que todas las demás recomendaciones e información técnica, únicamente para la descripción de las características del producto, forma de empleo y sus aplicaciones. Los datos e informaciones reproducidos, se basan en nuestros conocimientos técnicos obtenidos en la bibliografía, en ensayos de laboratorio y en la práctica.

Los datos sobre consumo y dosificación que figuran en esta ficha técnica, se basan en nuestra propia experiencia, por lo que estos son susceptibles de variaciones debido a las diferentes condiciones de las obras. Los consumos y dosificaciones reales, deberán determinarse en la obra, mediante ensayos previos y son responsabilidad del cliente.

Para un asesoramiento adicional, nuestro Servicio Técnico, está a su disposición.

BASF Construction Chemicals España, S.L. se reserva el derecho de modificar la composición de los productos, siempre y cuando éstos continúen cumpliendo las características descritas en la ficha técnica.

Otras aplicaciones del producto que no se ajusten a las indicadas, no serán de nuestra responsabilidad.

Otorgamos garantía en caso de defectos en la calidad de fabricación de nuestros productos, quedando excluidas las reclamaciones adicionales, siendo de nuestra responsabilidad tan solo la de reintegrar el valor de la mercancía suministrada.

Debe tenerse en cuenta las eventuales reservas correspondientes a patentes o derechos de terceros.

Edición: 09/12/2015

La presente ficha técnica pierde su validez con la aparición de una nueva edición.

MasterMatrix 175  
Página 2 de 2  
Edición: 09/12/2015

### CONTACTO

**BASF Construction Chemicals España, S.L.**

Carretera del Mig, 219  
08907 L'Hospitalet de Llobregat  
Barcelona

Tel: 93 261 61 00

Fax: 93 261 62 19

Basf-cc@basf-cc.es

[www.master-builders-solutions.basf.es](http://www.master-builders-solutions.basf.es)

**MASTER®**  
**» BUILDERS**  
SOLUTIONS



## F) Microsilíce – MasterRoc MS 610 BASF



The Chemical Company

# MasterRoc MS 610

Antes: Meyco MS 610

**Microsilíce densificada para hormigón y hormigón proyectado.**

### DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

MasterRoc MS 610 es una microsilíce en polvo de alta calidad y alto rendimiento para la fabricación de todo hormigones de altas prestaciones. Modifica la estructura porosa del hormigón haciéndola más densa y más resistente a cualquier tipo de influencia externa.

### CAMPOS DE APLICACIÓN

Aplicaciones de hormigón proyectado  
Hormigón prefabricado  
Hormigón preparado  
Hormigón de alta resistencia  
Hormigón submarino.  
Hormigón con bajo contenido de cemento  
Dovelas (TBM)

### CARACTERÍSTICAS Y BENEFICIOS

- Aumento de resistencias
- Mayor resistencia al ataque químico y mecánico
- Previene el sangrado y la segregación en el hormigón fresco
- Reduce el consumo de acelerante de fraguado
- Permite la proyección de espesores importantes

### PRESENTACIÓN

MasterRoc MS 610 se suministra en sacos de 20 kg y big-bags de 1000 kg y a granel.

Propiedades	
Aspecto	Polvo
Color	gris
Densidad aparente	0.55 - 0.7 kg/l
Contenido de cloruro	< 0.1%



MARCADO CE DE PRODUCTO BAJO LA  
DIRECTIVA UE DE PRODUCTOS DE LA  
CONSTRUCCIÓN DE LA UNIÓN EUROPEA

MasterRoc MS 610  
Página 1 de 2  
Edición: 01/02/2014

**MASTER®**  
**BUILDERS**  
SOLUTIONS

### COMBINACIÓN

Se recomienda el uso de superplastificantes para cualquier hormigón que contenga humo de sílice. Para la resistencia a las heladas, debe añadirse adicionalmente un agente inductor de aire.

### MEZCLADO

MasterRoc MS 610 se adiciona al hormigón durante el proceso de carga. El tiempo de mezcla debe ser como mínimo de 90 segundos. La dosificación recomendada es de 5 a 15% sobre el peso del cemento.

### ALMACENAMIENTO

Si almacena en lugar seco y en sacos originales herméticamente cerrados, MasterRoc MS 610 tiene una vida útil de al menos 12 meses.

### PRECAUCIONES DE SEGURIDAD

Evite el contacto con los ojos y el contacto prolongado con la piel. Si ocurre el contacto, lávese bien con agua y acuda a un médico.  
Para más información consulte la hoja de seguridad o a su representante local.



The Chemical Company

## MasterRoc MS 610

Antes: Meyco MS 610

**Microsilíce densificada para hormigón y hormigón proyectado.**

### NOTA:

La presente ficha técnica sirve, al igual que todas las demás recomendaciones e información técnica, únicamente para la descripción de las características del producto, forma de empleo y sus aplicaciones. Los datos e informaciones reproducidos, se basan en nuestros conocimientos técnicos obtenidos en la bibliografía, en ensayos de laboratorio y en la práctica.

Los datos sobre consumo y dosificación que figuran en esta ficha técnica, se basan en nuestra propia experiencia, por lo que estos son susceptibles de variaciones debido a las diferentes condiciones de las obras. Los consumos y dosificaciones reales, deberán determinarse en la obra, mediante ensayos previos y son responsabilidad del cliente.

Para un asesoramiento adicional, nuestro Servicio Técnico, está a su disposición.

BASF Construction Chemicals España, S.L. se reserva el derecho de modificar la composición de los productos, siempre y cuando éstos continúen cumpliendo las características descritas en la ficha técnica.

Otras aplicaciones del producto que no se ajusten a las indicadas, no serán de nuestra responsabilidad.

Otorgamos garantía en caso de defectos en la calidad de fabricación de nuestros productos, quedando excluidas las reclamaciones adicionales, siendo de nuestra responsabilidad tan solo la de reingresar el valor de la mercancía suministrada.

Debe tenerse en cuenta las eventuales reservas correspondientes a patentes o derechos de terceros.

Edición: 01/02/2014

La presente ficha técnica pierde su validez con la aparición de una nueva edición.

MasterRoc MS 610  
Página 2 de 2  
Edición: 01/02/2014

### CONTACTO

**BASF Construction Chemicals España, S.L.**

Carretera del Mig, 219

08907 L'Hospitalet de Llobregat

Barcelona

Tel: 93 261 61 00

Fax: 93 261 62 19

Basf-cc@basf-cc.es

[www.master-builders-solutions.basf.es](http://www.master-builders-solutions.basf.es)

**MASTER®**  
**» BUILDERS**  
SOLUTIONS

## G) Retardante – MasterSet R111 BASF



We create chemistry

# MasterSet R111

## Retardante de fraguado para hormigón.

### CAMPO DE APLICACIÓN

MasterSet R111 es un aditivo retardante que permite regular el tiempo de inicio y fin de fraguado del hormigón ajustando su dosificación, en función de las necesidades de la obra.

MasterSet R111 se utiliza entre otras aplicaciones:

- En elementos de gran volumen, minimizando la posible aparición de juntas frías.
- Hormigonado en tiempo caluroso. Permite aumentar el tiempo de trabajabilidad del hormigón.
- Transporte de hormigón a larga distancia.
- Especialmente indicado para hormigón compactado con rodillo (RCC).
- Adecuado para la fabricación de morteros de retoma para tratamiento de juntas frías, tanto en hormigones vibrados como compactados.
- Utilización de cementos de bajo calor de hidratación.
- Hormigones con adiciones puzolánicas.

Consultar con el Departamento Técnico cualquier aplicación no prevista en esta relación.

### PROPIEDADES

- Minimiza la aparición de fisuras producidas por retracción.
- El hormigón tratado con MasterSet R111 aumenta el tiempo abierto de puesta en obra.
- Aumenta las resistencias mecánicas a largo plazo.

### MODO DE UTILIZACIÓN

MasterSet R111 es un líquido que se añade al hormigón junto con el agua de amasado.

### DOSIFICACIÓN

La dosificación oscilará del 0,2% al 2,5% sobre material cementicio (cemento+adiciones) en función del retraso deseado y de las condiciones de la puesta en obra. Evitar sobredosificaciones.

Estas dosificaciones son orientativas y deberán determinarse mediante ensayos representativos.



### LIMPIEZA DE HERRAMIENTAS

Las herramientas y equipos impregnados de MasterSet R111 pueden limpiarse con agua preferiblemente caliente.

### PRESENTACIÓN

Se presenta en garrafas de 25 Kg, bidones de 220 kg, contenedores de 1100 kg y a granel en cisterna.

### CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO/ TIEMPO DE CONSERVACIÓN

Almacenar el producto en sus envases originales herméticamente cerrados, en lugar fresco y seco y protegido de las heladas y temperaturas extremas.

En caso de congelación, reconstituir el material a +30° C mediante métodos mecánicos.

No emplear aire.

Almacenado correctamente MasterSet R111 se conserva hasta 12 meses desde su fecha de fabricación.

MasterSet R111  
Página 1 de 3  
Edición: 28/08/2018

**MASTER®**  
**BUILDERS**  
SOLUTIONS



We create chemistry

## MasterSet R111

### Retardante de fraguado para hormigón.

#### MANIPULACIÓN Y TRANSPORTE

Sin riesgo químico. Se recomienda contemplar las medidas habituales para el manejo de productos químicos, como por ejemplo el uso de guantes de protección y gafas de seguridad. Lavarse las manos antes de una pausa y al término del trabajo. No comer, beber ni fumar durante la aplicación.

La eliminación del producto y su envase debe realizarse de acuerdo con la legislación vigente y es responsabilidad del poseedor final.

No se considera mercancía peligrosa en el transporte por carretera.

#### HAY QUE TENER EN CUENTA

- Se recomienda realizar ensayos previos.
- No utilizar dosificaciones inferiores ni superiores sin consultar a nuestro Departamento Técnico.
- Consulta la compatibilidad entre aditivos antes de su utilización.

Propiedades	
Función principal:	Retardador de fraguado.
Efecto secundario:	Retraso excesivo de fraguado por sobredosificación.
Aspecto físico:	Líquido transparente.
Densidad, 20° C:	1,122 ± 0,03 gr/cm <sup>3</sup>
pH:	7,3 ± 1
Viscosidad 20° C Brookfield Sp00/100rpm:	< 10 cps.
Contenido de cloruros:	< 0,1%
Los datos técnicos reflejados son fruto de resultados estadísticos y no representan mínimos garantizados. Si se desean los datos de control, pueden solicitarse las "Especificaciones de Venta" a nuestro Departamento Técnico.	



MARCADO CE DE PRODUCTO BAJO LA  
DIRECTIVA UE DE PRODUCTOS DE LA  
CONSTRUCCIÓN DE LA UNIÓN EUROPEA

MasterSet R111  
Página 2 de 3  
Edición: 28/08/2018

**MASTER®**  
**» BUILDERS**  
SOLUTIONS



We create chemistry

## MasterSet R111

Retardante de fraguado para hormigón.

### NOTA:

La presente ficha técnica sirve, al igual que todas las demás recomendaciones e información técnica, únicamente para la descripción de las características del producto, forma de empleo y sus aplicaciones. Los datos e informaciones reproducidos, se basan en nuestros conocimientos técnicos obtenidos en la bibliografía, en ensayos de laboratorio y en la práctica.

Los datos sobre consumo y dosificación que figuran en esta ficha técnica, se basan en nuestra propia experiencia, por lo que estos son susceptibles de variaciones debido a las diferentes condiciones de las obras. Los consumos y dosificaciones reales, deberán determinarse en la obra, mediante ensayos previos y son responsabilidad del cliente.

Para un asesoramiento adicional, nuestro Servicio Técnico, está a su disposición.

BASF Construction Chemicals España, S.L. se reserva el derecho de modificar la composición de los productos, siempre y cuando éstos continúen cumpliendo las características descritas en la ficha técnica.

Otras aplicaciones del producto que no se ajusten a las indicadas, no serán de nuestra responsabilidad.

Otorgamos garantía en caso de defectos en la calidad de fabricación de nuestros productos, quedando excluidas las reclamaciones adicionales, siendo de nuestra responsabilidad tan solo la de reingresar el valor de la mercancía suministrada.

Debe tenerse en cuenta las eventuales reservas correspondientes a patentes o derechos de terceros.

**Edición: 28/08/2018**

La presente ficha técnica pierde su validez con la aparición de una nueva edición.

MasterSet R111  
Página 3 de 3  
Edición: 28/08/2018

### CONTACTO

**BASF Construction Chemicals España, S.L.**

Carretera del Mig, 219  
08907 L'Hospitalet de Llobregat  
Barcelona

Tel: 93 261 61 00

Fax: 93 261 62 19

Basf-cc@basf-cc.es

[www.master-builders-solutions.basf.es](http://www.master-builders-solutions.basf.es)



## H) Includor de aire – MasterAir 169 BASF



We create chemistry

### MasterAir 169

Aditivo includor de aire para hormigón y mortero.

#### CAMPO DE APLICACIÓN

MasterAir 169 es un aditivo líquido aireante ideal para confeccionar morteros y hormigones de gran docilidad y plasticidad.

MasterAir 169 permite aumentar la cantidad de aire ocluido en morteros y hormigones, introduciendo pequeñas burbujas de aire de tamaño y espaciado controlado.

Consultar con el Departamento Técnico cualquier aplicación no prevista en esta relación.

#### PROPIEDADES

- Mejora el comportamiento frente a los ciclos hielo-deshielo.
- Proporciona una gran docilidad y plasticidad al hormigón y morteros.
- Ideal para compensar granulometrías deficientes y faltas de finos.
- Mejora y facilita la puesta en obra.

#### MODO DE UTILIZACIÓN

MasterAir 169 se adiciona como último componente de la mezcla, después de la adición de los aditivos plastificantes o superplastificantes. También puede añadirse directamente al camión hormigonera, respetando el tiempo necesario para su completa homogeneización.

En combinación con otros aditivos deberá asegurarse de su compatibilidad. (Consultar con el Departamento Técnico).

No debe adicionarse el producto sobre la masa seca.

#### DOSIFICACIÓN

La dosificación habitual de MasterAir 169 es de 0,1 a 3% sobre peso de cemento en función del contenido de aire requerido y de los materiales empleados. Dosificaciones superiores son posibles con ensayos previos.

#### LIMPIEZA DE HERRAMIENTAS

Las herramientas y equipos impregnados de MasterAir 169 pueden limpiarse con agua preferiblemente caliente.



#### PRESENTACIÓN

MasterAir 169 se suministra en garrafas de 25 kg, bidones de 200 kg, contenedores de 1000 kg y a granel en cisternas.

#### CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO/ TIEMPO DE CONSERVACIÓN

Evítese el almacenamiento a temperaturas inferiores a 0° C. En caso de congelación reconstituir a 30° C por agitación mecánica suave.

El tiempo de utilización de este producto es de 12 meses desde la fecha de fabricación conservado adecuadamente en sus envases originales correctamente cerrados y evitando temperaturas extremas.

#### MANIPULACIÓN Y TRANSPORTE

Para su manipulación deberán observarse las medidas preventivas usuales para el manejo de productos químicos, por ejemplo usar gafas y guantes. Lavarse las manos antes de una pausa y al término del trabajo. No comer, beber y fumar durante la aplicación.

La eliminación del producto y su envase debe realizarse de acuerdo con la legislación vigente y es responsabilidad del poseedor final.

Para más información, consultar la Hoja de seguridad del producto

MasterAir 169  
Página 1 de 3  
Edición: 25/01/2018

**MASTER®**  
**» BUILDERS**  
SOLUTIONS



We create chemistry

## MasterAir 169

**Aditivo inclusor de aire para hormigón y mortero.**

### HAY QUE TENER EN CUENTA

- Se recomienda la realización de ensayos previos a la utilización del producto.
- No emplear dosificaciones inferiores ni superiores a las recomendadas sin previa consulta con nuestro Departamento Técnico.
- Consultar compatibilidades previamente al empleo del aditivo en combinación con otros aditivos.
- El contenido de aire depende, además de la dosificación de aditivo, de los materiales empleados y del tiempo de amasado.

Propiedades	
Función principal:	Incluser de aire.
Función secundaria:	- - -
Efecto secundario:	Posible pérdida de resistencias a dosis elevadas.
Aspecto físico:	Líquido incoloro.
pH, 20° C:	11 ± 1
Densidad, 20° C:	1,000 ± 0,02 g/cm <sup>3</sup>
Viscosidad 20° C Brookfield Sp00/100rpm:	< 10 cps.
Contenido en cloruros:	< 0,1%
<p>Los datos técnicos reflejados son fruto de resultados estadísticos y no representan mínimos garantizados. Si se desean los datos de control, pueden solicitarse las "Especificaciones de Venta" a nuestro Departamento Técnico.</p>	



MARCADO CE DE PRODUCTO BAJO LA  
DIRECTIVA UE DE PRODUCTOS DE LA  
CONSTRUCCIÓN DE LA UNIÓN EUROPEA

MasterAir 169  
Página 2 de 3  
Edición: 25/01/2018





We create chemistry

## MasterAir 169

**Aditivo inclusor de aire para hormigón y mortero.**

### NOTA:

La presente ficha técnica sirve, al igual que todas las demás recomendaciones e información técnica, únicamente para la descripción de las características del producto, forma de empleo y sus aplicaciones. Los datos e informaciones reproducidos, se basan en nuestros conocimientos técnicos obtenidos en la bibliografía, en ensayos de laboratorio y en la práctica.

Los datos sobre consumo y dosificación que figuran en esta ficha técnica, se basan en nuestra propia experiencia, por lo que estos son susceptibles de variaciones debido a las diferentes condiciones de las obras. Los consumos y dosificaciones reales, deberán determinarse en la obra, mediante ensayos previos y son responsabilidad del cliente.

Para un asesoramiento adicional, nuestro Servicio Técnico, está a su disposición.

BASF Construction Chemicals España, S.L. se reserva el derecho de modificar la composición de los productos, siempre y cuando éstos continúen cumpliendo las características descritas en la ficha técnica.

Otras aplicaciones del producto que no se ajusten a las indicadas, no serán de nuestra responsabilidad.

Otorgamos garantía en caso de defectos en la calidad de fabricación de nuestros productos, quedando excluidas las reclamaciones adicionales, siendo de nuestra responsabilidad tan solo la de reintegrar el valor de la mercancía suministrada.

Debe tenerse en cuenta las eventuales reservas correspondientes a patentes o derechos de terceros.

Edición: 25/01/2018

La presente ficha técnica pierde su validez con la aparición de una nueva edición

MasterAir 169  
Página 3 de 3  
Edición: 25/01/2018

### CONTACTO

**BASF Construction Chemicals España, S.L.**

Carretera del Mig, 219

08907 L'Hospitalet de Llobregat

Barcelona

Tel: 93 261 61 00

Fax: 93 261 62 19

Basf-cc@basf-cc.es

[www.master-builders-solutions.basf.es](http://www.master-builders-solutions.basf.es)

**MASTER®**  
**» BUILDERS**  
SOLUTIONS



## Anexo 4: Ficha técnica del Dióxido de Titanio empleado



Product information

### AEROXIDE® TiO<sub>2</sub> P 25

#### Hydrophilic fumed titanium dioxide

##### Characteristic physico-chemical data

Properties and test methods	Unit	Value
Specific surface area (BET)	m <sup>2</sup> /g	35 - 65
pH value in 4% dispersion		3.5 - 4.5
Loss on drying* 2 hours at 105 °C	%	≤ 1.5
Tamped density*	g/l	100 - 180
Titanium dioxide based on ignited material	%	≥ 99.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> content based on ignited material	%	≤ 0.300
SiO <sub>2</sub> content based on ignited material	%	≤ 0.200
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> content based on ignited material	%	≤ 0.010
HCl content based on ignited material	%	≤ 0.300
Sieve residue (by Mocker, 45µm)	%	≤ 0.050

\* ex plant  
The data represents typical values (no product specification)

##### Registrations (substance or product components)

AEROXIDE® TiO<sub>2</sub> P 25

CAS-No.	13463-67-7
REACH (Europe)	registered
TSCA (USA) DSL (Canada)	registered
ENCS (Japan) IECSC (China) KECI (Korea)	registered
AICS (Australia)	registered

AEROXIDE® TiO<sub>2</sub> P 25 is a fine-particulate, pure titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) with high specific surface area and marked aggregate and agglomerate structure. Because of its high purity, high specific surface area, and unique combination of anatase and rutile crystal structure, the product is suitable for many catalytic and photocatalytic applications. Its structure also makes it suitable for use as an effective UV filter.

##### Applications and properties

###### Properties

- High specific surface area and high purity
- Crystalline TiO<sub>2</sub> with predominantly anatase structure
- Very good thermal and chemical stability
- Outstanding catalytic and photocatalytic efficiency
- Photoactive under UV-B radiation
- Heat-stabilizing effect in silicone elastomers through the influence of titanium dioxide on redox processes

###### Applications

- Raw material for catalyst substrates with high thermal and hydrothermal stability
- Efficient catalyst substrate with good thermal and hydrothermal stability
- Efficient photocatalyst for formulation of self-cleaning construction materials, such as concrete or mineral plasters
- Suitable for the construction of efficient dye-sensitized solar cells
- Efficient and overdyable heat stabilizer for silicone vulcanizates at process temperatures to more than 200 °C
- Improvement of the flammability protection of silicone vulcanizates
- Additive and raw material for ceramic and metal materials as bonding agent, sintering additive, or structural component

### Packaging and storage

AEROXIDE® TiO<sub>2</sub> P 25 is supplied in multiple layer 10 kg bags. We recommend to store the product in closed containers under dry conditions and to protect the material from volatile substances. AEROXIDE® TiO<sub>2</sub> P 25 should be used within 2 years after production.

### Safety and handling

A safety data sheet will be provided with your first delivery and with subsequent revisions. Additionally, the Product Safety Department of Evonik Resource Efficiency GmbH can be contacted via mail at [sds-hu@evonik.com](mailto:sds-hu@evonik.com) for specific questions. We recommend to read the safety data sheet carefully prior to use of the product.

This information and any recommendations, technical or otherwise, are presented in good faith and believed to be correct as of the date prepared. Recipients of this information and recommendations must make their own determination as to its suitability for their purposes. In no event shall Evonik assume liability for damages or losses of any kind or nature that result from the use of or reliance upon this information and recommendations. EVONIK EXPRESSLY DISCLAIMS ANY REPRESENTATIONS AND WARRANTIES OF ANY KIND, WHETHER EXPRESS OR IMPLIED, AS TO THE ACCURACY, COMPLETENESS, NON-INFRINGEMENT, MERCHANTABILITY AND/OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE (EVEN IF EVONIK IS AWARE OF SUCH PURPOSE) WITH RESPECT TO ANY INFORMATION AND RECOMMENDATIONS PROVIDED. Reference to any trade names used by other companies is neither a recommendation nor an endorsement of the corresponding product, and does not imply that similar products could not be used. Evonik reserves the right to make any changes to the information and/or recommendations at any time, without prior or subsequent notice.

#### Customer Service

##### Europe/ Middle-East/ Africa/ Latin America

**Evonik Resource Efficiency GmbH**  
Business Line Silica  
PB 010-A410  
Rodenbacher Chaussee 4  
63457 Hanau-Wolfgang  
Germany  
PHONE +49 6181 59 12532  
FAX +49 6181 59 712532  
[aerosil@evonik.com](mailto:aerosil@evonik.com)  
[www.aerosil.com](http://www.aerosil.com)

##### North America

**Evonik Corporation**  
Business Line Silica  
299 Jefferson Road  
Parsippany, NJ 07054-0677  
USA  
PHONE +1 800-233-8052  
FAX +1 973-929-8502  
[aerosil@evonik.com](mailto:aerosil@evonik.com)  
[www.aerosil.com](http://www.aerosil.com)

##### Asia (excluding Japan)

**Evonik (SEA) Pte. Ltd.**  
Business Line Silica  
3 International Business Park  
Nordic European Centre, #07-18  
Singapore 609927  
PHONE +65 6809-6877  
FAX +65 6809-6677  
[aerosil@evonik.com](mailto:aerosil@evonik.com)  
[www.aerosil.com](http://www.aerosil.com)

##### Japan

**NIPPON AEROSIL CO., LTD.**  
Marketing & Sales Division  
P.O. Box 7015  
Shinjuku Monolith 13F  
3-1, Nishi-Shinjuku 2-chrome  
Shinjuku-ku, Tokyo  
163-0913 Japan  
PHONE +81 3 3342-1789  
FAX +81 3 3342-1761  
[infonac@evonik.com](mailto:infonac@evonik.com)  
[www.aerosil.jp](http://www.aerosil.jp)

#### Technical Service

##### Europe/ Middle-East/ Africa/ Latin America

**Evonik Resource Efficiency GmbH**  
Business Line Silica  
HPC 911-221 A  
Rodenbacher Chaussee 4  
63457 Hanau-Wolfgang  
Germany  
PHONE +49 6181 59-3936  
FAX +49 6181 59 4489  
[technical.service.aerosil@evonik.com](mailto:technical.service.aerosil@evonik.com)  
[www.aerosil.com](http://www.aerosil.com)

##### North America

**Evonik Corporation**  
Business Line Silica  
2 Turner Place  
Piscataway, NJ 08855-0365  
USA  
PHONE +1 888 SILICAS  
PHONE +1 732 981-5000  
FAX +1 732 981-5275  
[technical.service.aerosil@evonik.com](mailto:technical.service.aerosil@evonik.com)  
[www.aerosil.com](http://www.aerosil.com)

##### Asia (excluding Japan)

**Evonik Specialty  
Chemicals (Shanghai) Co., Ltd**  
Business Line Silica  
55 Chungdong Road  
Xinzhuang Industry Park  
Shanghai 201108  
P.R. China  
PHONE +86 21 6119-1151  
FAX +86 21 6119-1075  
[technical.service.aerosil@evonik.com](mailto:technical.service.aerosil@evonik.com)  
[www.aerosil.com](http://www.aerosil.com)

##### Japan

**NIPPON AEROSIL CO., LTD.**  
Applied Technology Group  
3 Mita-Cho  
Yokkaichi, Mie  
510-0841 Japan  
PHONE +81 59 345-5270  
FAX +81 59 346-4657  
[infonac@evonik.com](mailto:infonac@evonik.com)  
[www.aerosil.jp](http://www.aerosil.jp)



## Anexo 5: Ficha técnica del Metacaolín empleado



# MasterLife MK 828

## Artificial Pozzolana (metakaolin)

### DESCRIPTION AND WHERE TO USE

MasterLife MK 828 is a manufactured pozzolanic mineral admixture produced by very carefully controlled calcination of kaolinitic clay. MasterLife MK 828 is a dehydroxylated aluminium silicate. Its general formula is  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ . It is an amorphous non-crystallised material, constituted of lamellar particles. MasterLife MK 828 is white in color and acts as a pozzolanic material.

MasterLife MK 828 increase concrete quality at the hardened state in two ways:

- Filling the capillary porosity between the cement particles during hydration due to his very high finesses;
- Increasing the formation of calcium silicate hydrate (CSH), by his pozzolanic activity with calcium hydroxide produced by the cement hydration.

### BENEFITS

MasterLife MK 828 allow to fix the free lime ( $Ca(OH)_2$ ) formed during the Portland cement hydration in concrete.

The transformation of free lime into stable and insoluble hydrates considerably reduces the negative effects of the presence of calcium hydroxide, such as carbonation, formation of efflorescence, aggregated alkali reaction.

The use of MasterLife MK 828 is recommended in all cases where a durable and resistant to medium-aggressive environments concrete is required, and for the realization of architectural floors or elements:

- high-strength concrete, for the design of structures characterized by a high ratio of slenderness, with reduced dimensions of the sections, and by elevated ceiling lights;
- high durable concretes against presence of sulphate, chlorides or potential of alkali/aggregate reaction;
- architectural concretes, colored or not, where a reduction in water absorption and reduction of carbonation efflorescence is required;
- concretes with high resistance to erosion and abrasion.

### DIRECTIONS FOR USE

MasterLife MK 828 is added during the mix preparation after the cements addition, then the needed water.

For a good mixing it is recommended to use a vertical axis mixer and a superplasticizer from the MasterGlenium line. After mixing for at least one minute, complete the addition of water to complete the required workability.

### Compatibility

MasterLife MK 828 is compatible with all admixtures of MasterPozzolith, MasterRheobuild e MasterGlenium line.

Chemical Composition	
SiO <sub>2</sub> : 55 %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 1,4 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 40 %	TiO <sub>2</sub> : 1,5 %
K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O : 0,8 %	CaO + MgO : 0,3 %
Loss of ignition (1050°C)	1 %
Fisical Characteristics - medium values	
Pozzolanic Index (Cap-pelle test)	1100 mg Ca(OH) <sub>2</sub> / g
Specific Area (BET)	17 m <sup>2</sup> /g
Water demand (Mash Cone)	900 g/kg
Specific gravity	2,4 g/cm <sup>3</sup>
Bulk density	
Loose	400 kg/m <sup>3</sup>
Tamped	800 kg/m <sup>3</sup>
Sieve Analysis	Lower than 80 microns: 95 %





## MasterLife MK 828

### Artificial Pozzolana (metakaolin)

#### DOSAGE

The recommended dosage rate for MasterLife MK 828 can range from 5 to 25% on binder weight, depending on the desired performances.

Other dosages may be recommended in special cases according to specific job site conditions.

In such cases please consult our Technical Service Department for advice.

#### PACKAGING AND STORAGE

MasterLife MK 828 is available in 25 kg bags.

Store the product in a dry and sheltered place. Do not use the product if bag is damaged.

From 10/12/1992 BASF Construction Chemicals Italia Spa operates under the Quality System in compliance with European Standard UNI-EN ISO 9001. The environmental management system of BASF Construction Chemicals Italia Spa is certified according to UNI-EN ISO 14001 and the System of Safety Management is certified according to OHSAS 18001. Environment sustainability: Partner Green Building Council since 2009.

**BASF Construction Chemicals Italia Spa**  
Via Vionale delle Corsi, 21 – 31100 Treviso – Italy  
T +39 0422 204251 F +39 0422 421822  
<http://www.master-builders-solutions.basf.it> e-mail: [infomac@basf.com](mailto:infomac@basf.com)

For further information, please consult your local BASF Construction Chemicals Italia Spa representative.

The technical advice on how to use our products, either written or verbally given, are based on the present state of our best scientific and practical knowledge, and no guarantee and/or implicit or explicit responsibility are assumed on final results of works executed by the use of our products.

The owner, his representative, or the contractor is responsible for checking the suitability of our products as to the intended use and area.

Supersedes all prior issues on this product:  
March 2018



