

**UNIVERSIDAD DE GRANADA**  
**E.T.S. DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS**



**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA HUMEDAD RELATIVA Y LA  
TEMPERATURA EN LA RETRACCIÓN POR SECADO DE  
HORMIGONES COMPACTADOS CON RODILLO (HCR) PARA  
PAVIMENTO**

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DEL PROGRAMA EN LA QUE SE INSCRIBE: INGENIERÍA DE LA  
CONSTRUCCIÓN Y DEL TERRENO

**TESIS DOCTORAL**

**JULIÁN ANDRÉS PULECIO DÍAZ**

Para la obtención del

**GRADO DE DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE GRANADA**

Programa Oficial de Doctorado en Ingeniería Civil (B23.56.1)

Granada, septiembre 2024

**UNIVERSIDAD DE GRANADA**  
**E.T.S. DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS**



**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA HUMEDAD RELATIVA Y LA  
TEMPERATURA EN LA RETRACCIÓN POR SECADO DE  
HORMIGONES COMPACTADOS CON RODILLO (HCR) PARA  
PAVIMENTO**

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DEL PROGRAMA EN LA QUE SE INSCRIBE: INGENIERÍA DE LA  
CONSTRUCCIÓN Y DEL TERRENO

**TESIS DOCTORAL**

**Julián Andrés Pulecio Díaz**

**Ingeniero Civil**

**Directores de Tesis:**

**Miguel del Sol Sánchez**  
**Doctor Ingeniero de Caminos,**  
**Canales y Puertos**

**Fernando M. Moreno Navarro**  
**Doctor Ingeniero de Caminos,**  
**Canales y Puertos**

**Granada, septiembre 2024**

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales  
Autor: Julián Andrés Pulecio Díaz  
ISBN: 978-84-1195-744-1  
URI: <https://hdl.handle.net/10481/103185>



A la memoria de mi papá Jorge Enrique Pulecio

*"A mi padre"*

*Autor: José Martí*

"Aquel que me enseñó a ser libre y firme,  
Aquel cuyo ejemplo sigue vivo en mí,  
Fue faro en mi noche y escudo en mi lucha,  
¡A ti, mi padre, hoy canto así!"

## TESIS COMO AGRUPACIÓN DE PUBLICACIONES

Esta tesis doctoral se fundamenta en una colección de artículos científicos publicados por el candidato, los cuales son pertinentes a su área de conocimiento. Para su realización, se cumplieron las siguientes condiciones requeridas:

- a) La tesis consiste en la compilación de tres investigaciones en un informe, que fueron publicadas por el estudiante doctoral en revistas de alto impacto adecuadas a su campo de conocimiento, tal como recomienda el Consejo Asesor de Escuelas Doctorales (CAED).
- b) Los artículos fueron publicados después de obtener los títulos de licenciatura y maestría.
- c) No han sido empleados en ninguna otra tesis anteriormente.
- d) Los coautores de las publicaciones declaran que estos artículos no han sido ni serán presentados en otras tesis, y se especifica además la contribución del estudiante doctoral a los mismos.
- e) La tesis doctoral integra dichos artículos científicos como capítulos en el documento.

El estudiante doctoral ha respetado todos los derechos de propiedad intelectual asociados a la divulgación de los artículos utilizados en su tesis.

A continuación, se citan los artículos científicos empleados en esta tesis, incluyendo su cuartil y factor de impacto (JIF) en el Journal Citation Reports (JCR) Science Edition:

1. J. Pulecio-Díaz, M. Sol-Sánchez, and F. Moreno-Navarro, "Influence of Service Conditions and Mix Design on the Physical-Mechanical Properties of Roller-Compacted Concrete for Pavement," *Materials* (Quartile: Q2) (JIF: 3.4), vol. 17, no. 3, p. 552, Jan. 2024, doi: 10.3390/ma17030552.
2. J. Pulecio-Díaz, M. Sol-Sánchez, and F. Moreno-Navarro, "Prediction of the Physical-Mechanical Properties of Roller-Compacted Concrete Pavements under Different Service and Mix Conditions Based on Cement and Water Content," *Materials* (Quartile: Q2) (JIF: 3.4), vol. 17, no. 3, p. 549, Jan. 2024, doi: 10.3390/ma17030549.
3. J. Pulecio-Díaz, M. Sol-Sánchez, and F. Moreno-Navarro, "Effects of Relative Humidity and Temperature on the Drying Shrinkage of Roller-Compacted Concrete Pavements," *Infrastructures* (Quartile: Q2) (JIF: 2.6) (Basel), vol. 9, no. 2, p. 22, Jan. 2024, doi: 10.3390/infrastructures9020022.

## Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis directores y tutores, Miguel del Sol Sánchez y Fernando M. Moreno Navarro, les reconozco su apoyo incondicional y su sabio liderazgo, que fueron fundamentales para alcanzar mis objetivos.

Asimismo, quiero extender mi gratitud a todos los miembros del LabIC.UGR, quienes, con generosidad, compartieron su tiempo durante mi estancia en Granada, España, enriqueciendo mi experiencia a través de conversaciones y colaboraciones valiosas.

Extiendo mi gratitud a la Universidad de Granada en España por su compromiso con la educación de alta calidad y su generosa política de ofrecerla de forma prácticamente gratuita a estudiantes extranjeros.

En Colombia, mi profundo agradecimiento a mis padres Jorge Enrique Pulecio y Aidy Diaz Charry, así como a mi hermano Jorge Enrique Pulecio Díaz y amigos Myriam Rocío Pallares Muñoz y Wilson Rodríguez Calderón, quienes infundieron en mí un profundo amor por mi labor.

Mi sincero agradecimiento a las directivas de la Universidad Cooperativa de Colombia en Ibagué y Medellín, cuyo permiso y apoyo fueron fundamentales para la culminación exitosa de este proyecto de vida.

## Índice General

|  |    |
|--|----|
| Lista de acrónimos .....   | 14 |
| Resumen.....   | 15 |
| Abstract .....   | 16 |
| 1. Introducción .....  | 17 |
| 1.1 Antecedentes .....   | 17 |
| 1.1.1 Importancia y Beneficios del HCR .....   | 17 |
| 1.1.2 Mejoras en los Beneficios del HCR.....   | 17 |
| 1.1.3 Conocimientos y Estudios Realizados sobre el HCR.....  | 18 |
| 1.1.4 Modelos y Herramientas Desarrolladas para el Diseño de HCR .....   | 19 |
| 1.1.5 Estudios sobre la Retracción del HCR.....  | 20 |
| 1.2 Justificación .....  | 22 |
| 2. Objetivos .....   | 25 |
| 3. Metodología .....   | 27 |
| 4. Resultados .....  | 29 |
| 4.1 Influencia de las Condiciones de Servicio y de Diseño en las propiedades físico-mecánicas del hormigón compactado con rodillo para pavimentos (Artículo 1).....  | 29 |
| 4.1.1 Resumen.....   | 29 |
| 4.1.2 Introducción .....   | 29 |
| 4.1.3 Materiales y Métodos .....   | 31 |
| 4.1.3.1 Materiales .....   | 31 |
| 4.1.3.2 Plan de ensayos.....   | 34 |
| 4.1.4 Resultados y Discusión .....   | 37 |
| 4.1.4.1 Efecto de las condiciones ambientales .....  | 37 |
| 4.1.4.2 Impacto del diseño de la mezcla en el rendimiento en diferentes condiciones ambientales.....   | 40 |
| 4.1.4.3 Impacto del curado del hormigón.....   | 43 |
| 4.1.4.4 Análisis paramétricos de las condiciones de servicio y diseño de mezclas.....  | 45 |
| 4.1.5 Conclusiones.....  | 47 |
| 4.1.6 Referencias.....   | 49 |
| 4.2 Predicción de las propiedades físico-mecánicas de pavimentos de hormigón compactado con rodillo bajo diferentes condiciones de servicio y de mezcla en función del contenido de cemento y agua (Artículo 2)..... | 54 |
| 4.2.1 Resumen.....   | 54 |
| 4.2.2 Introducción .....   | 54 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.2.3 Materiales y Métodos .....  | 56  |
| 4.2.3.1 Materiales, muestras y ensayos .....  | 57  |
| 4.2.3.2 Metodología de Superficie de Respuesta .....  | 61  |
| 4.2.4 Resultados y Discusión .....  | 63  |
| 4.2.4.1 Resultados de laboratorio .....   | 63  |
| 4.2.4.2 MSR en diferentes condiciones de servicio y mezcla.....   | 66  |
| 4.2.4.2.1 Modelo de respuesta por contenido de cemento .....  | 66  |
| 4.2.4.2.2 Modelo de respuesta basado en la relación agua-cemento .....  | 70  |
| 4.2.5 Conclusiones.....   | 72  |
| 4.2.6 Referencias.....  | 73  |
| 4.3 Efectos de la humedad relativa y la temperatura en la retracción por secado de pavimentos de hormigón compactado con rodillo (Artículo 3) ..... | 78  |
| 4.3.1 Resumen.....  | 78  |
| 4.3.2 Introducción .....  | 78  |
| 4.3.3 Metodología .....   | 81  |
| 4.3.3.1 Materiales y ensayos de laboratorio .....   | 82  |
| 4.3.3.2 Modelización computacional de ensayos de laboratorio .....  | 86  |
| 4.3.3.3 Modelización computacional y validación de los resultados de los pavimentos de HCR.....   | 89  |
| 4.3.4 Resultados y Discusión .....  | 91  |
| 4.3.4.1 Resultados de laboratorio .....   | 91  |
| 4.3.4.2 Validación de los modelos computacionales de laboratorio .....  | 93  |
| 4.3.4.3 Modelización computacional y validación de resultados mediante estadística inferencial.....   | 98  |
| 4.3.4.3.1 Modelización del comportamiento bajo carga en esquina.....  | 98  |
| 4.3.4.3.2 Influencia del tiempo de curado .....   | 100 |
| 4.3.5 Conclusiones.....   | 102 |
| 4.3.6 Referencias.....  | 103 |
| 5. Conclusiones.....  | 109 |
| 6. Futuras líneas de investigación .....  | 111 |
| 7. Referencias Bibliográficas .....   | 113 |

## Índice de Tablas

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1.1 Aplicaciones del HCR en países del mundo .....  | 18  |
| Tabla 4.1.1. Proporciones de hormigón compactado con rodillo con 12% de cemento, 5.65% de agua y 0.47 de relación agua-cemento. ....  | 33  |
| Tabla 4.1.2. Proporciones de hormigón compactado con rodillo con 16% de cemento, 5.65% de agua y 0.35 de relación agua-cemento. ....  | 33  |
| Tabla 4.1.3. Proporciones de hormigón compactado con rodillo con 12% de cemento, 5.00% de agua y 0.42 de relación agua-cemento. ....  | 34  |
| Tabla 4.2.1. Mezclas de hormigón compactado con rodillo (HCR). ....   | 59  |
| Tabla 4.2.2. Efecto del vapor de agua por kilogramo de aire (WA) y del contenido de cemento (C) en el módulo de rotura (Mr) a lo largo de 90 días utilizando la Metodología de Superficie de Respuesta. ....                            | 67  |
| Tabla 4.2.3. Efecto del vapor de agua por kilogramo de aire (WA) y del contenido de cemento (C) en el contenido de humedad a 10 mm de profundidad (w10) a lo largo de 90 días utilizando la Metodología de Superficie de Respuesta..... | 68  |
| Tabla 4.2.4. Efecto del vapor de agua por kilogramo de aire (WA) y del contenido de cemento (C) sobre la retracción por secado (s) a 90 días utilizando la Metodología de Superficie de Respuesta. ....                                 | 69  |
| Tabla 4.2.5. Ecuaciones de regresión múltiple en diferentes condiciones de servicio y contenido de cemento (C). ....  | 70  |
| Tabla 4.2.6. Efecto del vapor de agua por kilogramo de aire (WA) y de la relación agua-cemento (W/C) sobre la retracción por secado (s) durante 90 días utilizando la metodología de superficie de respuesta. ....                      | 71  |
| Tabla 4.2.7. Ecuaciones de regresión múltiple en diferentes condiciones de servicio y de relación agua-cemento (W/C). ....  | 72  |
| Tabla 4.3.1. Espesores, rigidez de la cimentación por área, módulo elástico y relación de Poisson del pavimento de hormigón compactado con rodillo (HCR).....   | 89  |
| Tabla 4.3.2. Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov para la tensión principal máxima en un pavimento sometido a carga en esquina con o sin condiciones de humedad relativa y temperatura. ....                                      | 102 |
| Tabla 4.3.3. Prueba de suma de rangos de Kruskal-Wallis de los resultados de la tensión principal máxima en el pavimento. ....  | 102 |
| Tabla 4.3.4. Prueba de suma de rangos de Kruskal-Wallis de los resultados de la tensión principal máxima en el pavimento bajo carga en esquina.....   | 102 |
| Tabla 4.3.5. Prueba post hoc de Mann-Whitney de los resultados de la tensión principal máxima en el pavimento bajo carga de esquina. ....   | 102 |

## Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.1. Alcance de la tesis doctoral.....   | 27 |
| Figura 4.1.1. Gradación para pavimento de hormigón compactado con rodillo, según PCA (2004).<br>.....   | 32 |
| Figura 4.1.2. Curvas humedad-densidad. COH: contenido óptimo de humedad, Dsm: densidad<br>seca máxima.....  | 33 |
| Figura 4.1.3. Plan de ensayos.....  | 34 |
| Figura 4.1.4. Gramos de vapor de agua por kilogramo de aire según diversas combinaciones de<br>humedad relativa (HR) y temperatura (T). Fuente: [40]. .....   | 35 |
| Figura 4.1.5. Muestras en cubo utilizadas para el ensayo de contenido de humedad: (a) muestras<br>con cinta aislante gris; (b) pesaje de la pieza de 10 mm; (c) piezas delgadas y gruesas selladas<br>entre sí con cinta amarilla; (d) muestras en el horno. ....                     | 36 |
| Figura 4.1.6. Una muestra de viga acondicionada a diferentes condiciones ambientales (a-c).<br>Ensayo de deformación por retracción libre (d). .....  | 36 |
| Figura 4.1.7. Ensayos de resistencia del hormigón compactado con rodillo: (a) ensayo de<br>resistencia a la compresión; (b) ensayo de resistencia a la flexión. ....  | 37 |
| Figura 4.1.8. Gramos de vapor de agua por kilogramo de aire frente al contenido de humedad<br>en los días 7, 28 y 90 en la mezcla de hormigón compactado con rodillo con un 12% de cemento<br>(mezcla de referencia).....   | 38 |
| Figura 4.1.9. Influencia de las condiciones ambientales medidas en gramos de vapor de agua por<br>kilogramo de aire sobre la deformación por retracción en las mezclas de hormigón compactado<br>con rodillo con 12% de cemento (mezcla de referencia) para los días 7, 28 y 90. .... | 39 |
| Figura 4.1.10. Influencia de las condiciones ambientales medidas en gramos de vapor de agua<br>por kilogramo de aire en la resistencia del hormigón para los días 7, 28 y 90 en la mezcla de<br>hormigón compactado con rodillo con un 12% de cemento (mezcla de referencia). ....    | 40 |
| Figura 4.1.11. Influencia del diseño de la mezcla de hormigón y del uso o no de un<br>superplastificante en el contenido de humedad de los.....   | 41 |
| Figura 4.1.12. Efecto del diseño de la mezcla de hormigón y del uso o no de un superplastificante<br>sobre la deformación por retracción medida para los.....   | 42 |
| Figura 4.1.13. Resultados del ensayo de compresión ( $f'c$ ) para diferentes diseños de mezcla y el<br>uso o no de un superplastificante tras 90 días de acondicionamiento en diferentes condiciones<br>ambientales (gramos de vapor de agua por kilogramo de aire). ....             | 42 |
| Figura 4.1.14. Resultados del módulo de rotura ( $M_r$ ) para diferentes diseños de mezcla y el uso<br>o no de un superplastificante tras 90 días de acondicionamiento en diferentes condiciones<br>ambientales (gramos de vapor de agua por kilogramo de aire). ....                 | 43 |
| Figura 4.1.15. Influencia del proceso de curado en la evolución del contenido de humedad de los<br>.....  | 44 |
| Figura 4.1.16. Impacto del curado del material en los resultados de retracción de los .....   | 45 |
| Figura 4.1.17. Efecto del proceso de curado sobre la resistencia estructural del hormigón<br>compactado con rodillo en diferentes periodos de acondicionamiento y bajo diversas<br>condiciones ambientales. $f'c$ : resistencia a la compresión, $M_r$ : módulo de rotura. ....       | 45 |
| Figura 4.1.18. Análisis paramétricos del contenido de humedad considerando diversos factores.<br>.....  | 46 |
| Figura 4.1.19. Análisis paramétricos que evalúan la influencia del diseño de la mezcla y las<br>condiciones ambientales en la retracción del hormigón compactado con rodillo.....   | 47 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.1.20. Análisis paramétricos de la resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) y del módulo de rotura ( $M_r$ ) en función de los parámetros de diseño y ambientales. W/C: relación agua-cemento.....                                       | 47 |
| Figura 4.2.1. Metodología de la investigación. ....  | 57 |
| Figura 4.2.2. Condiciones ambientales, incluida la humedad relativa (HR,%), la temperatura ( $^{\circ}C$ ) y los gramos de vapor de agua por kilogramo de aire. Fuente: [42]. ....   | 57 |
| Figura 4.2.3. Curvas humedad-densidad. COH: contenido óptimo de humedad, $D_{sm}$ : densidad seca máxima.....  | 59 |
| Figura 4.2.4. Gradación para pavimento de hormigón compactado con rodillo, según PCA (2004). ....  | 59 |
| Figura 4.2.5. Plan de ensayos.....   | 60 |
| Figura 4.2.6. Muestras en cubo para el ensayo de contenido de humedad. (a) Sellado con cinta adhesiva americana gris de alta resistencia, (b) las dos secciones de la muestra en cubo unidas con cinta amarilla, (c) muestras en el horno..... | 61 |
| Figura 4.2.7. Ensayos mecánicos. (a) Ensayo de deformación por retracción libre, (b) ensayo de resistencia a la flexión.....   | 61 |
| Figura 4.2.8. Diagrama de la metodología de superficie de respuesta (MSR). $M_r$ : módulo de rotura, WA: vapor de agua por kilogramo de aire, C: contenido de cemento, W/C: relación agua-cemento. ....  | 63 |
| Figura 4.2.9. Evolución del módulo de rotura ( $M_r$ ) con el vapor de agua por kilogramo de aire (WA) a lo largo de 90 días. C: contenido de cemento, W/C: relación agua-cemento. ....  | 64 |
| Figura 4.2.10. Evolución del contenido de humedad a 10 mm de profundidad ( $w_{10}$ ) con el vapor de agua por kilogramo de aire (WA) a lo largo de 90 días. C: contenido de cemento, W/C: relación agua-cemento. ....                         | 65 |
| Figura 4.2.11. Evolución de la retracción de secado ( $s$ ) con el vapor de agua por kilogramo de aire (WA) durante 90 días. C: contenido de cemento, W/C: relación agua-cemento. ....   | 66 |
| Figura 4.2.12. Efecto de los gramos de vapor de agua por kilogramo de aire (WA) y del contenido de cemento (C) en el módulo de rotura ( $M_r$ ) a lo largo de 90 días. ....  | 67 |
| Figura 4.2.13. Efecto de los gramos de vapor de agua por kilogramo de aire (WA) y del contenido de cemento (C) en el contenido de humedad a 10 mm de profundidad ( $w_{10}$ ) a lo largo de 90 días. ....                                      | 68 |
| Figura 4.2.14. Efecto de los gramos de vapor de agua por kilogramo de aire (WA) y del contenido de cemento (C) en la retracción por secado ( $s$ ) durante 90 días. ....   | 70 |
| Figura 4.2.15. Efecto de los gramos de vapor de agua por kilogramo de aire (WA) y de la relación agua-cemento (W/C) sobre la retracción por secado ( $s$ ) a lo largo de 90 días.....  | 71 |
| Figura 4.3.1. Comportamiento de la humedad relativa (HR), temperatura (T) y g de vapor de agua/kg de aire. Fuente: [32]. ....  | 81 |
| Figura 4.3.2. Gradación para pavimentos de hormigón compactado con rodillo (HCR). ....   | 82 |
| Figura 4.3.3. Procedimientos de laboratorio. ....  | 83 |
| Figura 4.3.4. Ensayo de contenido de humedad.....  | 84 |
| Figura 4.3.5. Ensayo de deformación por retracción libre.....  | 85 |
| Figura 4.3.6. Ensayo de resistencia a la compresión.....   | 86 |
| Figura 4.3.7. Ensayo de resistencia a la flexión.....  | 86 |
| Figura 4.3.8. Muestra de cubo para el ensayo de contenido de humedad por el método del elemento finito (MEF). ....   | 87 |
| Figura 4.3.9. Modelización computacional del ensayo de contenido de humedad. ....  | 87 |
| Figura 4.3.10. Modelización computacional del ensayo de deformación por retracción libre. .  | 88 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4.3.11. Muestra de viga utilizada para el ensayo de deformación por retracción libre empleando el método del elemento finito (MEF). .....   | 89  |
| Figura 4.3.12. Hormigón compactado con rodillo (gris oscuro), base (amarillo) y subrasante. .  | 90  |
| Figura 4.3.13. Curvas de desplazamiento-carga y módulos elásticos del material de hormigón compactado con rodillo sometido a diversas condiciones ambientales. ....  | 90  |
| Figura 4.3.14. Perfiles de humedad experimentales (Exp) con diferentes valores de humedad relativa y temperatura para condiciones ambientales húmedas y secas. ....  | 92  |
| Figura 4.3.15. Evolución de la deformación por retracción libre experimental (Exp) del material de hormigón compactado con rodillo en diferentes condiciones ambientales húmedas y secas. ....   | 93  |
| Figura 4.3.16. Evolución de los perfiles de humedad numéricos (empleando el método de los elementos finitos [MEF]) y experimentales (Exp) en diferentes condiciones de humedad relativa y temperatura. Resultados según la modelización ABAQUS. .... | 94  |
| Figura 4.3.17. Contenido de humedad después de 90 días para cubos de 100 mm × 100 mm × 100 mm: (a) condición ambiental de 85% HR y 25 °C; (b) condición ambiental de 20% HR y 25 °C; y (c) condición ambiental de 10% HR y 40 °C.....                | 95  |
| Figura 4.3.18. Evolución de la deformación por retracción libre numérica (empleando el método de los elementos finitos [MEF]) y experimental en diferentes condiciones de humedad relativa y temperatura. ....                                       | 96  |
| Figura 4.3.19. Deformación por retracción después de 90 días para vigas de 100 mm × 100 mm × 285 mm: (a) condición ambiente de 85% HR y 25 °C; (b) condición ambiente de 20% HR y 25 °C; y (c) condición ambiente de 10% HR y 40 °C. ....            | 97  |
| Figura 4.3.20. Tensión principal máxima (MPa) del pavimento bajo carga en esquina (a) sin estar sometido a condiciones ambientales de 85% HR y 25 °C y (b) estando sometido a condiciones ambientales de 85% HR y 25 °C. ....                        | 99  |
| Figura 4.3.21. Tensión principal máxima (MPa) del pavimento bajo carga en esquina (a) sin estar sometido a condiciones ambientales de 20% HR y 25 °C y (b) estando sometido a condiciones ambientales de 20% HR y 25 °C. ....                        | 99  |
| Figura 4.3.22. Tensión principal máxima (MPa) del pavimento bajo carga de esquina (a) sin estar sometido a una condición ambiental de 10% HR y 40 °C y (b) estando sometido a una condición ambiental de 10% HR y 40 °C. ....                        | 100 |
| Figura 4.3.23. Tensión principal máxima numérica del pavimento bajo carga en esquina sometido a diferentes condiciones de humedad relativa y temperatura empleando el método de los elementos finitos (MEF).....                                     | 101 |

## Lista de acrónimos

En esta tesis se utilizan las siguientes abreviaturas:

|            |   |
|------------|---|
| BC         | Pavimentos de losa no armados y sin pasadores                               |
| BCg        | Pavimentos de losa no armados y con pasadores                               |
| C          | Contenido de cemento  |
| CDP        | Modelado constitutivo de plasticidad dañada del hormigón                    |
| CEM II/A-M | Cemento compuesto Portland  |
| COH        | Contenido óptimo de humedad   |
| Dsm        | Densidad seca máxima  |
| E          | Módulo de elasticidad a la flexión  |
| $f'_c$     | Resistencia a la compresión   |
| FO         | Primer orden  |
| FO + TWI   | Primer orden con interacción  |
| GGBFS      | Escoria granulada de alto horno   |
| HCR        | Hormigón compactado con rodillo (Roller-Compacted Concrete (RCC))           |
| HR         | Humedad relativa  |
| HT         | Transferencia de calor  |
| JPCP       | Pavimentos de hormigón de losas (Jointed Plain Concrete Pavement)           |
| MEF        | Método del elemento finito  |
| Mr         | Modulo de rotura  |
| MSR        | Metodología de Superficie de Respuesta (Response Surface Methodology (RSM)) |
| PQ + TWI   | Cuadrático puro con interacción   |
| s          | Deformación por retracción  |
| SSS        | Saturado superficialmente seco  |
| T          | Temperatura   |
| W/C        | Relación agua-cemento   |
| WA         | Vapor de agua por kilogramo de aire   |
| w10        | Contenido de humedad  |

## Resumen

Este estudio se centró en el análisis del comportamiento mecánico y durabilidad del hormigón compactado con rodillo (HCR) utilizado en pavimentos frente a los principales modos de deterioro que afectan su rendimiento durante su vida de servicio. Estos deterioros son causados por múltiples factores, entre los que destacan las cargas del tráfico y en particular, las condiciones ambientales de la región donde son aplicados.

En base a estas consideraciones, el estudio desarrollado en la presente tesis doctoral se centró en comprender el impacto de diversas condiciones ambientales (humedad y temperatura) y condiciones de diseño en las características físicas y mecánicas del Hormigón Compactado con Rodillo (HCR) para mejorar su eficiencia y prolongar su vida útil en distintas zonas geográficas.

Para ello, se profundizó en el estudio de diferentes condiciones ambientales y diseños en las propiedades físicas y mecánicas del HCR a través de la reproducción de diferentes condiciones de humedad y temperatura para probetas de hormigón fabricadas con distintos valores de la relación agua-cemento, y variando la adición de un superplastificante. Además, se buscó evaluar el impacto del proceso de curado del HCR bajo diversas condiciones de humedad y temperatura. También, se buscó analizar el efecto de la retracción por secado en pavimentos de HCR bajo la influencia de carga vehicular, empleando para ello un modelo computacional calibrado con datos obtenidos en condiciones ambientales típicas a nivel de laboratorio.

El estudio reveló que un incremento en el contenido de cemento y la reducción de agua, mejora la resistencia a la tracción del material. Se observó que el proceso de curado es fundamental para aumentar la resistencia a la retracción a largo plazo, lo que resulta crucial para la estabilidad estructural del HCR. Además, se encontró una correlación logarítmica entre la retracción y la humedad relativa, subrayando la importancia de este factor en el rendimiento del HCR. Otro aspecto destacado fue el desarrollo de ecuaciones de regresión múltiple para calcular las propiedades físico-mecánicas del HCR bajo diferentes condiciones de servicio y mezclado. Utilizando la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), el estudio logró modelos con alta precisión (98-99%) para predecir cambios en la retracción y otros parámetros bajo diversas condiciones ambientales. Además, se subrayó la importancia de la retracción en el diseño estructural. Los modelos computacionales por el método de elementos finitos y los análisis estadísticos empleados en la investigación proporcionaron curvas de contenido de humedad y retracción por secado, resaltando la necesidad de considerar estos efectos en los cálculos de tensiones en los pavimentos de HCR. Los efectos ambientales pueden generar variaciones significativas en las tensiones de los pavimentos, lo que enfatiza la relevancia de estos modelos para predecir el rendimiento y la durabilidad de los pavimentos de HCR.

## Abstract

Roller-compacted concrete (RCC) used in pavements suffers diverse distress modes that affect its performance during service life. These are caused by multiple factors, including traffic loads and, in particular, the environmental conditions of the region where they are applied.

Based on these considerations, the research developed in this doctoral thesis focused on understanding the impact of various environmental (humidity and temperature) and design conditions on the physical and mechanical characteristics of RCC to improve its efficiency and prolong its service life in different geographical areas.

For this purpose, different environmental conditions and designs were studied on the physical and mechanical properties of RCC by reproducing different humidity and temperature conditions for concrete specimens manufactured with different water-cement ratio values and varying the addition of a superplasticizer. In addition, the impact of the RCC curing process under different humidity and temperature conditions was assessed. Finally, the effect of drying shrinkage in RCC pavements under the influence of vehicular loading was analyzed using a computational model calibrated with data obtained under typical environmental conditions at the laboratory level.

The research revealed that an increase in cement content and a reduction of water improves the tensile strength of the material. The curing process was critical to increasing the long-term shrinkage resistance, which is crucial for the structural stability of RCC. Moreover, a logarithmic correlation was found between shrinkage and relative humidity, underlining the importance of this factor in RCC performance. Another highlight was the development of multiple regression equations to calculate the physico-mechanical properties of RCC under different service and mixing conditions. Using the Response Surface Methodology (RSM), the study achieved models with high accuracy (98-99%) to predict changes in shrinkage and other parameters under various environmental conditions. In addition, the importance of shrinkage in structural design was stressed. Computational models by the finite element method and statistical analyses employed in the research provided moisture content and drying shrinkage curves, highlighting the need to consider these effects in RCC pavement stress calculations. Environmental effects can generate significant variations in pavement stresses, emphasizing the relevance of these models for predicting the performance and durability of RCC pavements.

# 1. Introducción

## 1.1 Antecedentes

El Hormigón Compactado con Rodillo (HCR) ha ganado reconocimiento en el ámbito de la pavimentación debido a sus múltiples beneficios y propiedades mecánicas. Desde sus primeras aplicaciones, el HCR ha sido objeto de numerosas investigaciones para optimizar su uso en diversas aplicaciones, especialmente en pavimentos [1], [2]. A continuación, se detallan los aspectos más importantes relacionados con su importancia, beneficios, investigaciones y desarrollos recientes.

### 1.1.1 Importancia y Beneficios del HCR

El HCR presenta varias ventajas significativas en comparación con los materiales de pavimentación convencionales, como los pavimentos de cemento Portland (PCC) y asfalto. Una de las principales ventajas del HCR es su costo inicial reducido, que puede ser tan solo el 62% de los costos asociados con las alternativas tradicionales [3]. Esta reducción en el costo es posible gracias al menor uso de cemento y a la posibilidad de incorporar materiales reciclados, lo que contribuye a una construcción más sostenible y económica [4]. Adicionalmente, los pavimentos de HCR requieren menos mantenimiento debido a su baja tendencia a la formación de juntas o grietas defectuosas, lo que se traduce en una reducción de los costos de mantenimiento a lo largo del tiempo [5].

Otra ventaja clave del HCR es su capacidad para soportar cargas de tráfico inmediatamente después de la compactación, lo que permite un uso más rápido del pavimento tras su colocación. Esto es especialmente útil en áreas con alto volumen de tráfico o donde se necesita un acceso rápido [6], [7]. Este comportamiento se debe a la alta densidad y compactación de los agregados, que proporciona una estructura resistente y duradera desde las etapas iniciales de su aplicación.

Desde el punto de vista de la sostenibilidad, el HCR destaca por su capacidad para incorporar una variedad de materiales reciclados y subproductos industriales. Investigaciones han demostrado que es posible utilizar áridos reciclados de hormigón [8], áridos de asfalto reciclado (RAP) [9], escoria de horno de arco eléctrico, escoria de siderurgia, y materiales reciclados de neumáticos en forma de gránulos de caucho, así como fibras de polipropileno [10]. Estos materiales pueden ser integrados en las mezclas de HCR sin comprometer significativamente las propiedades mecánicas del hormigón. Por ejemplo, el uso de escoria de horno de arco eléctrico ha mostrado valores de resistencia a la compresión comparables a los del hormigón convencional, entre 28 MPa y 37 MPa [11]. Asimismo, el empleo de caucho granulado mejora las propiedades mecánicas, como la resistencia a la compresión y flexión, en comparación con el HCR sin caucho granulado [12].

### 1.1.2 Mejoras en los Beneficios del HCR

Para mejorar los beneficios del HCR, se han explorado diversas estrategias que optimizan su desempeño sin comprometer sus propiedades mecánicas. Una de las principales áreas de investigación ha sido la utilización de áridos alternativos y el desarrollo de aditivos especiales. Por ejemplo, el uso de cenizas volantes [13], [14] y humo de sílice ha mostrado resultados prometedores en términos de mejorar la resistencia a la fisuración inducida por corrosión [15]. En otro estudio, se demostró que la adición de nano sílice a las mezclas de HCR reduce la

trabajabilidad, lo que puede ser beneficioso en aplicaciones donde se requiere una mezcla más rígida [16], [17].

Además, se ha investigado el uso de superplastificantes, como el superplastificante de naftaleno sulfonato de sodio, que ha demostrado reducir las retracciones totales y por secado durante los primeros días de curado [18]. Este tipo de aditivos mejora la plasticidad del HCR y contribuye a reducir la retracción por secado, que es un problema común en los pavimentos de hormigón.

El empleo de partículas de caucho modificadas también ha mostrado beneficios en términos de mejorar la durabilidad y resistencia a condiciones climáticas adversas. Un estudio encontró que la incorporación de partículas de caucho modificadas al HCR mejoró la plasticidad y las propiedades mecánicas, redujo el volumen de poros y aumentó la resistencia a la congelación [19]. Estos resultados indican que el volumen óptimo de partículas de caucho modificadas es del 5%, lo que permite mejorar el rendimiento del HCR en términos de resistencia a la compresión, flexión y retracción por secado.

### 1.1.3 Conocimientos y Estudios Realizados sobre el HCR

Hasta la fecha, se han realizado numerosos estudios para entender mejor la composición y aplicaciones del HCR en pavimentos. Los estudios han explorado la posibilidad de utilizar diferentes tipos de áridos alternativos y aditivos para mejorar las propiedades del HCR. Por ejemplo, se ha investigado el uso de escorias industriales, caucho granulado, y fibras sintéticas, mostrando resultados positivos en términos de resistencia mecánica y sostenibilidad [8], [9], [10], [20]. Además, estudios de laboratorio han demostrado que el HCR es menos susceptible a la formación de fisuras en etapas tempranas debido a su menor relación agua-cemento, reducción de retracción, y ganancia temprana de resistencia mediante compactación con rodillo [21].

En términos de aplicaciones (ver Tabla 1.1), los pavimentos de HCR han sido utilizados en diversos contextos, desde carreteras y áreas industriales hasta pistas de aeropuertos y áreas de servicios, debido a su eficacia y menores costos de mantenimiento a largo plazo. Por ejemplo, en aplicaciones viales, se ha observado que los pavimentos de HCR tienen costos de mantenimiento más bajos y una vida útil más larga en comparación con los pavimentos de hormigón convencionales [22], [23], [24], [25].

Tabla 1.1 Aplicaciones del HCR en países del mundo

|                  | <b>Puertos,<br/>instalaciones<br/>intermodales<br/>y áreas<br/>industriales<br/>pesadas</b> | <b>Áreas<br/>industriales<br/>ligeras</b> | <b>Áreas de<br/>servicio de los<br/>aeropuertos</b> | <b>Calles<br/>arteriales</b> | <b>Calles<br/>locales</b> | <b>Ensanchamiento<br/>y bermas</b> | <b>Instalaciones<br/>madereras, áreas<br/>de compostaje y<br/>patios de<br/>almacenamiento</b> |
|------------------|---|---|---|------------------------------|---------------------------|------------------------------------|--|
| Países africanos | x   | X   | x   | x                            | x                         |                                    |  |
| Australia        | x   | X   | x   | x                            | x                         |                                    |  |
| Canadá           | x   | X   | x   |                              |                           |                                    |  |
| China            | x   | X   | x   | x                            | x                         |                                    |  |
| República Checa  | x   | X   |   | x                            | x                         |                                    |  |
| Corea            | x   | X   | x   | x                            | x                         |                                    |  |
| Lituania         | x   | X   |   | x                            | x                         |                                    |  |
| Malasia          | x   | X   | x   | x                            | x                         |                                    |  |
| Corea del Sur    | x   | X   | x   | x                            | x                         |                                    |  |

|                | Puertos, instalaciones intermodales y áreas industriales pesadas | Áreas industriales ligeras | Áreas de servicio de los aeropuertos | Calles arteriales | Calles locales | Ensanchamiento y bermas | Instalaciones madereras, áreas de compostaje y patios de almacenamiento |
|----------------|--|----------------------------|--------------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------|---|
| Reino Unido    | x  | X                          | x                                    | x                 | x              |                         | x   |
| Estados Unidos | x  | X                          | x                                    | x                 | x              | x                       | x   |

#### 1.1.4 Modelos y Herramientas Desarrolladas para el Diseño de HCR

El desarrollo de metodologías y herramientas para el diseño de pavimentos de HCR ha sido un proceso continuo, con contribuciones significativas de diversas organizaciones e instituciones. El U.S. Army Corps of Engineers (USACE) desarrolló uno de los primeros enfoques empírico-mecanicistas para el diseño de pavimentos de HCR, considerando variables como el tráfico y las propiedades mecánicas del hormigón [26], [27]. Este enfoque ha servido de referencia para el diseño de pavimentos en puertos, instalaciones intermodales y áreas industriales.

La Portland Cement Association (PCA), a través de su software RCC-PAVE, amplió este enfoque incorporando variables adicionales como las características de las cargas de las ruedas y los neumáticos, permitiendo calcular espesores y esfuerzos críticos de flexión para diferentes configuraciones de vehículos [28], [29], [30]. Asimismo, el American Concrete Institute (ACI), en sus documentos ACI 325.12R-02 y ACI 330R-08, ha propuesto metodologías basadas en experiencias empíricas, aplicables a calles, caminos locales y estacionamientos, que requieren un número más limitado de datos de entrada [31].

La herramienta PavementDesigner de la ACPA ofrece un enfoque mecanístico-empírico gratuito, especializado en el diseño de pavimentos para calles arteriales y locales. Incluye parámetros de entrada personalizables y proporciona datos de salida como espesores recomendados y vida útil estimada [21], [32].

En la práctica actual, se ha adoptado el uso de metodologías para pavimentos de hormigón convencional, implementando una serie de recomendaciones. Por ejemplo, el método AASHTO 93, procesable a través del software WinPAS, diseñado originalmente para pavimentos de hormigón convencional, puede ajustarse para su uso con HCR aumentando el nivel de confiabilidad en un 5% [27], [33]. Para facilitar este ajuste, se desarrolló la herramienta de cálculo RCCP, gratuita y accesible desde cualquier navegador [34].

Otros programas como AirPave, desarrollado por la PCA, se especializan en pavimentos de aeropuertos, adaptando enfoques empírico-mecanicistas a las especificidades de las aeronaves [35], [36]. Por su parte, el LTPP InfoPave™ de la FHWA, que incluye la Guía 98 de la AASHTO, analiza pavimentos multicapa considerando variables climáticas adicionales [27].

El software StreetPave de la American Concrete Pavement Association (ACPA) se destaca por su enfoque en sistemas de pavimento multicapa de alta velocidad, considerando variables como el tráfico y el módulo elástico del hormigón [21].

Finalmente, el AASHTO MEPDG, implementado en DARWin-ME™, ofrece un enfoque exhaustivo para pavimentos de hormigón, destacando por la inclusión de datos de construcción, clima y tráfico [37], [38], [39], [40].

### 1.1.5 Estudios sobre la Retracción del HCR

Por otro lado, los HCR para pavimentos, a pesar de haber recibido menos atención investigativa en comparación con las estructuras masivas, especialmente en el ámbito de la retracción, ha adquirido una importancia creciente en las últimas décadas. Durante este período, se han identificado tres tipos principales de retracción en los HCR: química, autógena y por secado. En particular, se ha observado que la retracción por secado tiene impactos significativos en condiciones de humedades óptimas de mezcla y una gradación gruesa de agregados [41] durante los primeros 28 días [42]. Recientemente, se ha profundizado en la investigación del efecto de la proporción entre los agregados gruesos y finos en la retracción por secado del HCR, especialmente en diversos contextos de curado. Se descubrió que una mayor proporción de agregado reduce la retracción, debido a la restricción impuesta por estos agregados. Además, el estudio examinó las propiedades tanto en estado fresco como endurecido del HCR con distintas proporciones de mezcla, concluyendo que no hay diferencias significativas en las resistencias a compresión, tensión por flexión y tensión por división en los HCR endurecidos bajo diferentes condiciones de curado, según [43].

También, se ha explorado el análisis de los HCR con adiciones de escorias de alto horno, como remplazo parcial del cemento y sus repercusiones en la retracción con distintos orígenes de los agregados, encontrándose mejor comportamiento en calizas [44]. Además, se ha encontrado que la retracción a largo plazo del HCR con adición de escoria granulada de alto horno (GGBFS) bajo diversas exposiciones de temperatura [45], afecta significativamente al desarrollo de la resistencia del hormigón. A los 14 días, el hormigón curado a 50°C y 70°C mostró una mayor resistencia comparado con el curado a 25°C, debido a la aceleración en la cinética de desarrollo de la resistencia a temperaturas más altas. Además, La adición de GGBFS mostró una mayor variación en la resistencia en edades tempranas, especialmente a temperaturas más altas. A temperaturas bajas, la mezcla con GGBFS ganó resistencia más lentamente que la mezcla de cemento Portland ordinario (OPC); sin embargo, a temperaturas altas, el desarrollo de la resistencia en edades tempranas fue rápido, particularmente con niveles altos de GGBFS. Además, Los resultados mostraron que la temperatura tuvo un impacto considerable en el desarrollo de la deformación por retracción durante la exposición temprana al secado. Finalmente, existe un modelo multivariable para predecir la deformación por retracción del hormigón en base a la temperatura, el tiempo y el porcentaje de GGBFS. Este modelo puede estimar la deformación por retracción dentro del 95% del rango de predicción.

Asimismo, los HCR han incursionado en la mezcla con superplastificante de naftaleno sulfonato de sodio, hallándose durante el primer día de curado, retracciones totales y por secado menores a las HCR de control (sin superplastificante) [18]. Además, existe una fuerte correlación entre la temperatura interna y el comportamiento de retracción del HCR; a mayor temperatura interna, mayor deformación por retracción. Este estudio destaca la importancia de controlar la temperatura interna en el HCR superplastificado para minimizar la deformación por retracción.

Por otra parte, no todas las posibles soluciones a la retracción son prometedoras, es el caso de la adición de caucho de neumáticos que no ayudo, sino más bien, aumento un poco más la retracción por secado en comparación al HCR de control (sin caucho de neumático) [46]. Sin embargo, la adición de partículas de caucho modificadas al hormigón compactado con rodillo (HCR) mejoró la plasticidad y las propiedades mecánicas. También, redujo el volumen de poros y mejoró la resistencia a la congelación. Determinó que el volumen óptimo de partículas de caucho modificadas para añadir a la mezcla de HCR era del 5%. Analizaron el rendimiento en trabajo, las propiedades mecánicas y la durabilidad del HCR de caucho, mejorando el valor de

VC, la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, la retracción por secado y la resistencia a la congelación [19]. En relación con los condicionantes climáticos y su impacto en la retracción, no se proporciona información específica en la sección citada del documento.

En cuanto a las propiedades mecánicas y de permeabilidad del pavimento de hormigón compactado con rodillo (HCR) reforzado con distintos tipos de fibras sintéticas y de acero ondulado, se determinó que aumentar el volumen de fibras del 0.5% al 1% puede disminuir la retracción por secado y mejorar la resistencia a la flexión del HCR reforzado (FR-HCR). Sin embargo, se observó que la incorporación de fibras en las mezclas aumentaba tanto la susceptibilidad al agua como la porosidad. Estos efectos dependían considerablemente del tipo de fibra utilizada y de su geometría superficial. Además, la porosidad se incrementaba de forma notable al emplear fibras con una alta relación de aspecto [47].

Por otro lado, las propiedades térmicas in situ y el comportamiento de pavimentos de hormigón compactado con rodillo (HCR) en etapas tempranas se han estudiado en Louisiana, EE. UU. Estableciendo como propósito desarrollar un procedimiento de diseño de espesor de HCR basado en mecánica-empírica que pueda cuantificar el efecto combinado de la carga de tráfico y ambiental en HCR. Entre los hallazgos claves incluyen: HCR es menos susceptible a fisuras en etapas tempranas debido a una menor relación agua-cemento, reducción de retracción y ganancia temprana de resistencia por compactación con rodillo; y la necesidad de determinar el espaciado óptimo de juntas de corte para prevenir fisuras por retracción y ser costo-efectivo [21].

También, se han evaluado los esfuerzos y deformaciones en pavimentos de hormigón compactado con rodillo (HCR) en edades tempranas bajo condiciones climáticas reales. Encontrando que el esfuerzo total del hormigón estaba en tensión debido a la retracción de la losa de hormigón como resultado de una disminución en la temperatura del hormigón después de su fraguado final. Este esfuerzo total varió de tensión a compresión con el aumento de la temperatura del hormigón. Además, se observó que el esfuerzo inducido por la retracción en las primeras etapas de la losa HCR era relativamente pequeña [48].

Los estudios han mostrado que el comportamiento de los Hormigones Compactados con Rodillo (HCR) en servicio tienden a deteriorarse con el tiempo, especialmente bajo condiciones ambientales de temperatura moderada ( $25\pm 3^{\circ}\text{C}$ ) y humedad relativa media a baja ( $40\pm 3\%$ ) [49], [50]. Sin embargo, existe una necesidad crítica de comprender cómo estos hormigones se comportan en un rango más amplio de humedades relativas, ya que estas condiciones varían significativamente de una zona a otra y no siempre se mantienen en niveles medios a bajos [51]. Además, es importante considerar las variaciones en las mezclas estándar de HCR, que a menudo incluyen aditivos como reductores de agua y superplastificantes. Estos aditivos son cada vez más comunes en la producción de hormigón debido a sus beneficios en la cohesión, compactación y extensión de la trabajabilidad de los HCR [27].

Finalmente, el estudio de la retracción por secado en los Hormigones Compactados con Rodillo (HCR) ha sido un área de interés durante mucho tiempo. No obstante, hasta ahora, no se ha identificado una respuesta notable en distintos momentos, ya sea en fases avanzadas de madurez del material o inmediatamente después de su producción, especialmente bajo variaciones en la humedad relativa y la temperatura. Esta tesis Doctoral se propone abordar esta laguna, centrándose en cómo estas condiciones ambientales influyen en las propiedades físico-mecánicas, específicamente la retracción por secado de los HCR para pavimento.

## 1.2 Justificación

El hormigón compactado con rodillo (HCR) se ha empleado inicialmente en la construcción de presas y estructuras de control de agua [52]. Su uso se ha expandido a pavimentos de carreteras [53], autopistas, pistas de aeropuertos [54], [55], vías de ferrocarriles y tranvías, así como en áreas industriales [56] y de almacenamiento [24]. Además, el HCR se utiliza en la cimentación de edificaciones y en la construcción de canales de riego. Esta preferencia se debe a su capacidad para alcanzar elevadas resistencias con un menor contenido de cemento en comparación con los hormigones convencionales [7], reducción del tiempo y costo de construcción, una mayor durabilidad y una mayor sostenibilidad a través del uso de materiales alternativos. No obstante, se requiere de investigaciones adicionales para optimizar las mezclas [8], [57] y las técnicas de construcción de HCR para pavimento para aplicaciones específicas [20], [58].

El hormigón compactado con rodillo (HCR) ha sido objeto de estudio enfocado en su comportamiento frente a la retracción, un fenómeno comúnmente observado en estructuras masivas como presas de gravedad, presas de arco-gravedad y presas de arco. Demostrando hasta el momento, desarrollos encaminados en detectar el comportamiento a retracción del hormigón en etapas de construcción. Aplicando para ello formulaciones de generación de calor para simular la reacción de hidratación del hormigón, y las condiciones de contorno del problema térmico, mostrando lo que usualmente ocurre, cuando las presas son construidas en los meses fríos, que tienden a disipar más calor [59]. Adicionalmente, los descubrimientos se han centrado en encontrar formulaciones que contemplen la curación de grietas en el curso del proceso de hidratación [60], conllevando a establecer acercamientos importantes a la realidad.

Sin embargo, el hormigón compactado con rodillo (HCR) presenta un aspecto crítico relacionado con la retracción por secado. Se ha observado que este fenómeno puede causar deterioros significativos que afectan la vida útil de los pavimentos. Esta situación se agrava aún más cuando se combinan factores adicionales como las cargas del tráfico, defectos constructivos [27], y la influencia del medio ambiente, en particular la humedad relativa y la temperatura [50][51]. En este último, se ha evidenciado incidencias significativas en el desempeño del HCR con humedad relativa de  $40\pm 3\%$  y temperatura de  $25\pm 3^{\circ}\text{C}$ , que, en conjunto con la carga del tráfico y la retracción, provoca un rizado que da como resultado la elevación de la losa y la pérdida de contacto con el suelo. También, el esfuerzo inducido por la retracción por secado aumenta significativamente el desarrollo de la apertura de la grieta debido a la carga (hasta un 500% para un ancho de grieta de 0.5 mm). Además, debido a la retracción, la resistencia a la tracción en la superficie superior de los HCR, puede reducirse en aproximadamente un 50% [50].

Por lo tanto, surge la necesidad de investigar cómo diferentes condiciones de humedad relativa y la temperatura afectan la retracción por secado en los hormigones compactados con rodillo (HCR) utilizados para pavimentación, considerando diferentes características de diseño. Esta necesidad se debe a la urgencia de desarrollar estudios que reflejen más fielmente la realidad, dado que los criterios actuales de diseño de mezclas y pavimentos, específicamente de HCR, no incluyen en su evaluación la reducción del rendimiento causada por la retracción por secado del hormigón [27][61]. Esto establece un precedente importante para profundizar y realizar un estudio más detallado, considerando que el deterioro efectivamente se incrementa al tener en cuenta los efectos ambientales producidos por la humedad relativa y la temperatura [50].

Esta situación es contraproducente para los HCR, porque sus costos de reparación suelen ser más elevados, que aquellos pavimentos de hormigón convencional [27] de tipo JPCP -*Jointed Plain Concrete Pavement*- metodología de los Estados Unidos [62] o BC -*Chaussées á delles non armées et non goujonnées*- y BCg -*Chaussées á delles non armées et goujonnées*- Metodología

de Francia [63]. Además, las juntas que normalmente son para anticipar las grietas por retracción en pavimentos JPCP (BC y/o BCg), son poco frecuentes en los HCR, por distintas circunstancias, como la no instalación de dovelas (pasadores) [27], [64].

En este marco, esta tesis lleva a cabo un análisis detallado para entender cómo la humedad relativa y la temperatura afectan la retracción por secado, poniendo especial énfasis en las características físico-mecánicas del hormigón compactado con rodillo (HCR) usado en pavimentación. La investigación contempló varias composiciones de mezclas y evaluó el desempeño del HCR en dos etapas fundamentales: directamente tras su producción y durante las fases avanzadas de su maduración.



## 2. Objetivos

El objetivo principal de esta tesis consiste en evaluar el efecto de diferentes condiciones de humedad relativa y temperatura en la retracción por secado en el comportamiento físico-mecánico de hormigones compactados con rodillo (HCR) para pavimentos con distintos diseños de mezcla.

Con el fin de conseguir el objetivo principal, se marcan los siguientes objetivos específicos:

1. Evaluar el comportamiento físico-mecánico de distintos diseños de mezcla HCR para pavimento, sometidos a diversas condiciones de humedad relativa y temperatura
2. Definir los mejores diseños de mezclas según las distintas condiciones de humedad relativa y temperatura
3. Proponer ecuaciones de regresión múltiple para calcular las propiedades físico-mecánicas del HCR para pavimento bajo diferentes condiciones de servicio y de mezcla
4. Determinar el comportamiento mecánico de pavimentos de hormigón compactado con rodillo (HCR) bajo carga vehicular y variación de la humedad relativa y la temperatura en etapas avanzadas de madurez del material.



### 3. Metodología

La Figura 3.1 ilustra la metodología empleada para abordar los objetivos de investigación definidos en esta tesis doctoral. La investigación se estructuró en dos tareas principales: 1) estudio de laboratorio y 2) modelización computacional. Este trabajo incluye la experimentación en laboratorio con hormigón compactado con rodillo (HCR) para pavimentación, la modelación estadística utilizando la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) para el HCR, y la modelación del pavimento HCR mediante el método de elementos finitos (MEF), considerando los efectos ambientales y la carga vehicular.



Figura 3.1. Alcance de la tesis doctoral

La metodología específica de cada etapa se detalla en la sección 4, donde se presenta el compendio de artículos. La primera etapa de la investigación, enfocada en el trabajo de laboratorio, se describe en la sección 4.1. En esta fase, se analizó el efecto de una gama más amplia de condiciones ambientales y diferentes diseños de mezcla sobre las propiedades físicas y mecánicas del HCR. Para ello, se emplearon mediciones como la cantidad de vapor de agua por kilogramo de aire para aplicar los resultados de manera exhaustiva, lo que incluyó la experimentación con diversas composiciones, la modificación de la relación agua-cemento y la adición de un superplastificante. Se realizaron ensayos de laboratorio para evaluar el rendimiento, incluyendo la humedad, la retracción, la resistencia a la compresión y la evolución de la resistencia a la fractura por flexión durante periodos de curado de hasta 90 días [65].

La segunda etapa de la investigación, enfocada en la modelización computacional, se desarrolla en las secciones 4.2 y 4.3. En la sección 4.2, se presentan ecuaciones de regresión múltiple elaboradas a partir de un modelo estadístico basado en la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR). Estas ecuaciones están diseñadas para predecir las propiedades físico-mecánicas de pavimentos de hormigón compactado con rodillo, considerando diversas condiciones de servicio y mezcla, en función del contenido de cemento y agua. El análisis incluyó dos proporciones de cemento y dos de agua (una de ellas reducida con aditivo), combinadas con

cuatro variaciones de temperatura y humedad relativa. Se fabricaron muestras en forma de cubos y vigas, las cuales fueron sometidas a ensayos físico-mecánicos para evaluar parámetros como el contenido de humedad, la retracción y el módulo de rotura. Estos datos permitieron calibrar el modelo y definir las ecuaciones correspondientes [66].

En la sección 4.3 se analizó el efecto de la humedad relativa y la temperatura en la durabilidad de los pavimentos de hormigón compactado con rodillo (HCR) sometidos a cargas vehiculares. Para ello, se realizaron experimentos de laboratorio y modelación numérica mediante el método de los elementos finitos. Este proceso incluyó el desarrollo de modelos computacionales que simulan el comportamiento de la humedad y la retracción por secado a lo largo del tiempo.

La configuración de los modelos requirió la definición geométrica de los especímenes, las condiciones de contorno, y la evaluación de los resultados de tensión o flexión antes y después de producirse el fallo. Estos factores fueron fundamentales para desarrollar modelos avanzados de pavimentos que integraran la plasticidad dañada del hormigón, incorporando parámetros convencionales como la rigidez, el espesor de la capa, y la adherencia entre capas, así como el modelo de carga vehicular. Todo ello con el fin de lograr una representación más precisa y funcional de los esfuerzos en el pavimento.

Los resultados obtenidos fueron validados estadísticamente, demostrando la eficacia de los modelos para predecir la humedad y la retracción por secado [67].

Las secciones 5 y 6 presentan, respectivamente, las conclusiones generales derivadas de esta tesis doctoral y las futuras líneas de investigación sugeridas.

## 4. Resultados

### 4.1 Influencia de las Condiciones de Servicio y de Diseño en las propiedades físico-mecánicas del hormigón compactado con rodillo para pavimentos (Artículo 1)

Este capítulo está basado en la siguiente publicación: J. Pulecio-Díaz, M. Sol-Sánchez, and F. Moreno-Navarro, "Influence of Service Conditions and Mix Design on the Physical–Mechanical Properties of Roller-Compacted Concrete for Pavement," *Materials* (Quartile: Q2) (JIF: 3.4), vol. 17, no. 3, p. 552, Jan. 2024, doi: 10.3390/ma17030552.

#### 4.1.1 Resumen

Esta investigación se centra en el comportamiento del hormigón compactado con rodillo (HCR) utilizado en pavimentos, que es propenso a sufrir deterioros que afectan a su rendimiento. Estos deterioros se deben a diversas causas, entre las que se incluyen la carga de tráfico, los errores durante la construcción, el diseño de la mezcla y las condiciones ambientales. Entre ellas, las condiciones ambientales pueden tener un impacto muy variable en el comportamiento y la durabilidad del material, dependiendo de las condiciones asociadas a cada región. En consecuencia, este estudio pretende profundizar en el conocimiento del efecto que una gama más amplia de condiciones ambientales y diferentes diseños de mezcla tienen sobre las propiedades físicas y mecánicas del HCR. Se utilizaron mediciones como la cantidad de vapor de agua por kilogramo de aire para aplicar los resultados de forma exhaustiva. El análisis del HCR abarcó la experimentación con diferentes composiciones, la alteración de la cantidad de relación cemento-agua y la adición de un superplastificante. Se evaluó el impacto del curado en los materiales antes de someterlos a diversas condiciones de humedad y temperatura. Se realizaron ensayos de laboratorio para medir el rendimiento, incluida la humedad, la retracción, la resistencia a la compresión y la progresión de la resistencia a la fractura por flexión durante periodos de curado de hasta 90 días. Los resultados revelaron una correlación logarítmica entre la retracción y la humedad ambiental, que es el factor más determinante en el rendimiento. La optimización de la mezcla mediante el aumento del cemento y la reducción del agua mejoró la resistencia a la tracción del material. Además, se confirmó que el proceso de curado aumenta la resistencia a la retracción, especialmente a largo plazo, estableciéndolo como un elemento crucial para la estabilidad estructural del HCR, que es relativamente insensible a las variaciones de las condiciones ambientales.

#### 4.1.2 Introducción

La investigación reciente en pavimentos ha logrado notables avances, especialmente en lo que respecta a los pavimentos flexibles y rígidos, incluido el desarrollo de métodos de diseño estructural que van desde enfoques empíricos a mecanicistas; destacan las aportaciones de las metodologías norteamericanas y europeas. Además, se han introducido materiales innovadores y alternativos centrados en la sostenibilidad y la durabilidad [1]. Estos materiales ofrecen ventajas como la reducción de la contaminación, la capacidad de autorreparación y el apoyo a la implantación y carga de vehículos autónomos y eléctricos. También se han desarrollado para facilitar la interacción con el usuario y la transmisión eficiente de información para los gestores de infraestructuras viarias, con el objetivo de optimizar el mantenimiento y la conservación de las carreteras. Esto incluye desarrollos desde los aspectos funcionales hasta los estructurales. Destaca la aplicación de ensayos de rigidez superficial [2] utilizados para evaluar la capacidad de carga existente de los pavimentos y el diseño de nuevos pavimentos. También existe la opción

de realizar un análisis exhaustivo de los pavimentos existentes utilizando métodos tradicionales de cálculo retrospectivo, que se basan en la medición de la deflexión de la superficie del firme bajo cargas conocidas. Cuando se utilizan técnicas avanzadas de cálculo retrospectivo multinivel, se consigue una precisión aún mayor, incorporando algoritmos de optimización para determinar con mayor precisión los parámetros de las distintas capas del pavimento [3]. Además, se han implantado métodos innovadores que reducen las emisiones de carbono y el consumo de energía en relación con las técnicas de construcción.

No obstante, en la última década, el estudio de los materiales y el diseño estructural del hormigón compactado con rodillo para pavimentos (HCR) [4], [5], [6] ha aumentado sustancialmente debido a las necesidades actuales de los sectores de la industria y el comercio, que conllevan un mayor volumen de movilidad de vehículos [7], [8]. El pavimento de hormigón compactado con rodillo (HCR) se ha utilizado ampliamente en (i) plantas industriales y vías de acceso a aparcamientos; (ii) patios de embarque intermodales, puertos y muelles de carga; (iii) terminales de camiones/mercancías [9], [10], almacenamiento de mercancías a granel y centros de distribución; (iv) carreteras urbanas [11], [12] y rurales de bajo volumen; (v) zonas de estacionamiento de aeronaves [13]; (vi) zonas de carga militar a corto o largo plazo, bases de operaciones de avanzada o retaguardia y aeródromos; (vii) zonas de almacenamiento de vehículos de recreo; (viii) zonas de mantenimiento y compostaje de vehículos; (ix) grandes aparcamientos comerciales; (x) carreteras de parques públicos; (xi) carreteras madereras y de explotación forestal; (xii) arcenes de autopistas; y (xiii) carriles temporales de construcción rápida para desviar el tráfico. Por lo tanto, debido a las cargas vehiculares canalizadas en climas extremos [14], [15], [16], [17] y a las bajas o nulas velocidades de desplazamiento de los vehículos [18], un pavimento flexible, sería inadecuado para la vida útil de estos escenarios.

Las mezclas de HCR para pavimentos presentan la ventaja de contener menos cemento que el hormigón estructural estándar utilizado en otras aplicaciones de ingeniería civil [19]. Esto contribuye a una menor huella de carbono, convirtiéndolas en una opción más sostenible en comparación con el hormigón convencional [20]. No obstante, su uso todavía no alcanza el nivel de los pavimentos flexibles, ya que aún se requieren estudios adicionales sobre factores clave, como la necesidad de mejorar la textura y rugosidad de los HCR para pavimentos, aspectos relacionados con la resistencia al deslizamiento y la reducción del ruido, entre otros [21], [22], así como su durabilidad frente a la fisuración y las afecciones climáticas a corto y largo plazo [23], [24], [25], [26].

Los métodos más avanzados han demostrado el comportamiento de los HCR para pavimentos bajo distintas condiciones de curado, relacionando la temperatura con la resistencia a la compresión y la retracción [4], [27], [28], [29], [30]. En particular, se ha evidenciado que la retracción debida a un aumento de la temperatura ambiente debilita estos materiales, resultando en una menor durabilidad y una mayor susceptibilidad al fallo ante acciones climáticas [31], [32].

Por el contrario, otros estudios han afirmado que este fenómeno depende de factores como el diseño y la composición de las mezclas utilizadas. Por ejemplo, Gholami y Modarres [33] descubrieron que el uso de un determinado superplastificante podía modificar la resistencia del hormigón a la retracción. Al mismo tiempo, también se descubrió que la cantidad de agua durante la fabricación del HCR tenía un impacto sustancial en el comportamiento del material durante el fenómeno de retracción [34]. Además, estudios de campo determinaron que las tensiones de retracción dependen de otras acciones climáticas, causando un comportamiento variable del material (principalmente en las horas iniciales de construcción) debido a la dificultad

de mantener unas condiciones ambientales estables [23]. Sin embargo, la mayoría de estos estudios previos se centraron en evaluar sólo unas pocas condiciones ambientales específicas, y aún necesitan correlacionar el impacto de éstas y el efecto de modificar parámetros de diseño fundamentales, como el contenido de cemento. Además, las investigaciones previas se han centrado principalmente en estudiar el comportamiento del material tras 90 días de curado por inmersión [35] para eliminar los efectos de la no maduración del hormigón y su capacidad de succión a través de los poros iniciales [36]. Estos aspectos contribuyen a la falta de conocimientos sobre el comportamiento del HCR durante las horas iniciales de curado, cuando se produce el fenómeno más variable e influyente.

En este contexto, el estudio analiza el impacto de varias condiciones de servicio (humedad relativa, temperatura y gramos de vapor de agua por kilogramo de aire) y varios diseños de mezcla (diferentes contenidos de cemento, agua y aditivos) sobre el comportamiento del HCR, centrándose en el fenómeno de la retracción y la resistencia a la fisuración. Estos parámetros se seleccionaron debido a su relevancia a la hora de establecer la durabilidad del material [37], [38], [39]. Además, se evaluó el impacto sobre la resistencia a la compresión y el módulo de rotura como control de calidad. En consecuencia, esta investigación tiene como objetivo estudiar las variables físico-mecánicas con una influencia más significativa en el comportamiento del HCR para pavimento, buscando proporcionar el conocimiento para la selección de la mezcla más adecuada para el diseño y las condiciones de construcción, dependiendo de la zona de aplicación con diferentes condiciones ambientales [40]. Simultáneamente, este estudio pretende generar datos esenciales para la calibración de modelos de laboratorio, que reproduzcan con precisión las condiciones reales de los materiales de pavimento. Esta tarea es vital para un análisis y diseño efectivo de pavimentos, ya que permite considerar los impactos de la humedad y la retracción a través del análisis por el método de elementos finitos [32], [33], [34], [35]. Este enfoque contrasta con el habitual centrado en parámetros más convencionales, como la rigidez del material, el espesor, las condiciones de adherencia entre capas y la modelización de la carga del vehículo. Aunque estos aspectos son importantes, a menudo eclipsan la significativa influencia de la humedad y la retracción en el comportamiento y la durabilidad del pavimento.

#### 4.1.3 Materiales y Métodos

##### 4.1.3.1 Materiales

Se estudiaron tres tipos de mezclas de HCR para analizar el efecto de las condiciones ambientales seleccionadas en función de la cantidad de cemento utilizada para fabricarlas y la influencia de la adición de un superplastificante. Las mezclas evaluadas fueron (1) HCR estándar [41] con 12% de cemento, sin aditivo (denominado en este artículo HCR 12C); (2) HCR estándar con 16% de cemento (denominado HCR 16C); y (3) HCR estándar con 12% de cemento, con adición de un superplastificante de alta actividad por aditivo reductor de agua (denominado aditivo HCR 12C). La dosificación de cemento fue seleccionada en el rango comúnmente usado en el HCR comercial [41]. La dosis de superplastificante para la tercera mezcla fue del 0.5% del peso del cemento, según lo indicado por el fabricante (Master Builders Solutions, Beachwood, OH, EE.UU.).

El cemento tipo CEM II/A-M [42], clasificado como compuesto, constituye la base del material utilizado. Integra una mezcla, que varía en el rango de 80-88% de clínker y 12-20% de escoria granulada de alto horno (GGBFS), junto con adiciones como humo de sílice, puzolana, cenizas volantes, cenizas calcinadas y piedra caliza, con una proporción de hasta 5% de otros

componentes menores. El material establece restricciones específicas sobre su composición química, como el contenido de sulfatos, que debe ser igual o inferior al 4.0%, expresado como  $SO_3$ . También limita el contenido de cloruro, que no debe superar el 0.1%. En el aspecto físico, se caracteriza por un tiempo de fraguado no inferior a 60 min, una estabilidad de volumen no superior a 10 mm y una gravedad específica de 3.15. Mecánicamente, destaca con una resistencia a la compresión nominal de 42.5 MPa.

En cuanto a los áridos, se utilizó un tipo calizo con una gravedad específica combinada de 2.775. Este valor se especifica además con gravedades específicas de 2.840, 2.805, 2.805 y 2.732 para fracciones de áridos de 16/25, 10/16, 5.6/10 y 4/5.6, respectivamente [43], [44]. La absorción de agua combinada se registra en 0.472%, con valores individuales de 0.460, 1.020, 0.946 y 0.153% para las fracciones de áridos mencionadas. Los áridos se ajustan al espectro granulométrico definido por la Portland Cement Association en 2004 [45], [46], [47], como se ilustra en la Figura 4.1.1.

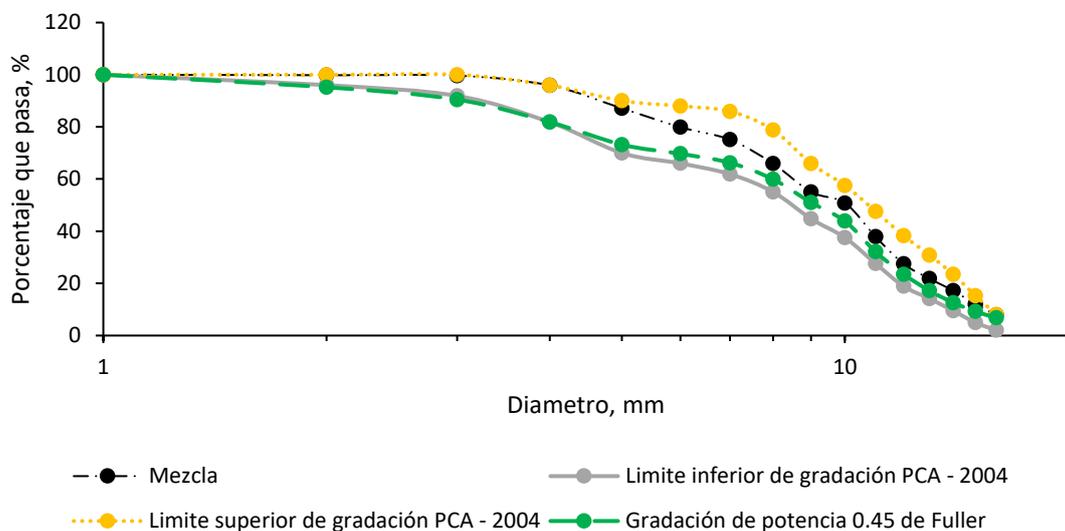
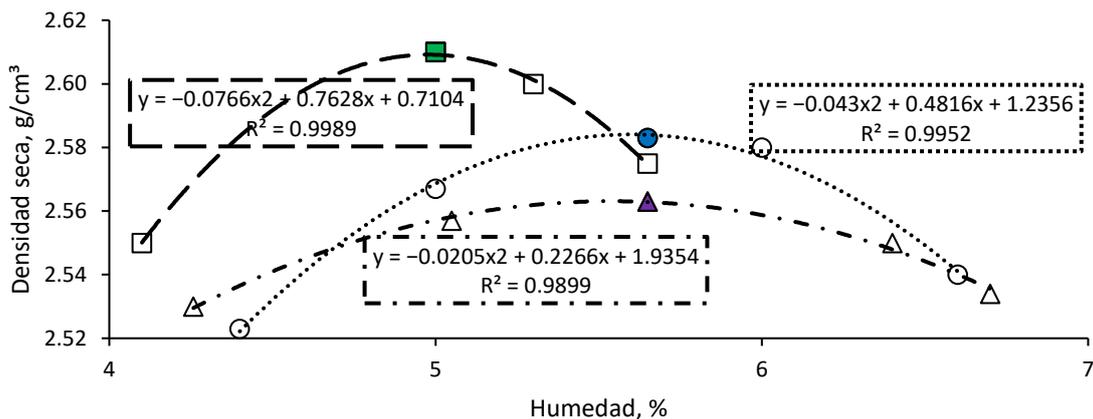


Figura 4.1.1. Gradación para pavimento de hormigón compactado con rodillo, según PCA (2004).

El contenido óptimo de humedad (COH) para fabricar las mezclas sin aditivos fue del 5.65% [48], y la densidad seca máxima ( $D_{sm}$ ) osciló entre 2.563 y 2.583  $g/cm^3$ ; estos parámetros se definieron por el método de compactación proctor (ASTM D1557-12) [49] (Figura 4.1.2), y permiten evaluar la influencia del cemento (entre 12% y 16%) sin variar el contenido de agua, al tiempo que se evalúa el impacto de reducir el contenido de agua de 5.65% a 5.00% mediante el uso de un superplastificante.

Las proporciones de la mezcla se determinaron utilizando el método de analogía de la compactación del suelo. Este método consiste en calcular los componentes del HCR en kilogramos, metros cúbicos y litros por metro cúbico. Los componentes calculados incluyen el cemento, el peso de los áridos secos, el peso saturado superficialmente seco (SSS) de los áridos, el agua absorbida, el agua en COH, el agua libre en COH, los aditivos y un contenido de aire del 1.5%, todo ello correlacionado con la relación agua-cemento. Los detalles de las mezclas utilizadas en la investigación están disponibles como referencia en las Tablas 4.1.1-4.1.3.



- 5.65% COH, 2.583g/cm<sup>3</sup> Dsm, Mezcla 12% Cemento ▲ 5.65% COH, 2.563g/cm<sup>3</sup> Dsm, Mezcla 16% Cemento
- 5% COH, 2.610g/cm<sup>3</sup> Dsm, Mezcla 12% Cemento ○ Mezcla con 12% Cemento, Agua
- △ Mezcla con 16% Cemento, Agua □ Mezcla con 12% Cemento, Aditivo/Agua

Figura 4.1.2. Curvas humedad-densidad. COH: contenido óptimo de humedad, Dsm: densidad seca máxima.

Tabla 4.1.1. Proporciones de hormigón compactado con rodillo con 12% de cemento, 5.65% de agua y 0.47 de relación agua-cemento.

| Material                 | Peso (kg/m <sup>3</sup> ) | Volumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) | Volumen (L/m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------|---------------------------|---|-----------------------------|
| Cemento                  | 288.958                   | 0.092                                     | 91.733                      |
| Peso de los áridos secos | 2,119.025                 | -   | -                           |
| Peso SSS de los áridos   | 2,129.000                 | 0.767                                     | 767.216                     |
| Agua absorbida           | 10.000                    | -   | -                           |
| Agua en COH              | 136.051                   | -   | -                           |
| Agua libre en COH        | 126.000                   | 0.126                                     | 126.051                     |
| 1.5% aire                | -                         | 0.015                                     | 15.000                      |
| <b>Total</b>             | <b>2,544.034</b>          | <b>1.000</b>                              | <b>1,000</b>                |

SSS: saturado superficialmente seco, COH: contenido óptimo de humedad.

Tabla 4.1.2. Proporciones de hormigón compactado con rodillo con 16% de cemento, 5.65% de agua y 0.35 de relación agua-cemento.

| Material                 | Peso (kg/m <sup>3</sup> ) | Volumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) | Volumen (L/m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------|---------------------------|---|-----------------------------|
| Cemento                  | 386.786                   | 0.123                                     | 122.789                     |
| Peso de los áridos secos | 2,030.627                 | -   | -                           |
| Peso SSS de los áridos   | 2,040.000                 | 0.735                                     | 735.210                     |
| Agua absorbida           | 10.000                    | -   | -                           |
| Agua en COH              | 136.584                   | -   | -                           |
| Agua libre en COH        | 127.000                   | 0.127                                     | 127.001                     |
| 1.5% aire                | -                         | 0.015                                     | 15.000                      |
| <b>Total</b>             | <b>2,553.996</b>          | <b>1.000</b>                              | <b>1,000</b>                |

SSS: saturado superficialmente seco, COH: contenido óptimo de humedad.

Tabla 4.1.3. Proporciones de hormigón compactado con rodillo con 12% de cemento, 5.00% de agua y 0.42 de relación agua-cemento.

| Material                 | Peso (kg/m <sup>3</sup> ) | Volumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) | Volumen (L/m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------|---------------------------|---|-----------------------------|
| Cemento                  | 293.247                   | 0.093                                     | 93.094                      |
| Peso de los áridos secos | 2,150.500                 | -   | -                           |
| Peso SSS de los áridos   | 2,161.000                 | 0.779                                     | 778.604                     |
| Agua absorbida           | 10.000                    | -   | -                           |
| Agua en COH              | 122.000                   | -   | -                           |
| Agua libre en COH        | 112.000                   | 0.112                                     | 112.038                     |
| Aditivo                  | 1.466                     | 0.001264                                  | 1.264                       |
| 1.5% aire                | -                         | 0.015                                     | 15.000                      |
| <b>Total</b>             | <b>2,567.377</b>          | <b>1.000</b>                              | <b>1,000</b>                |

SSS: saturado superficialmente seco, COH: contenido óptimo de humedad.

#### 4.1.3.2 Plan de ensayos

En esta investigación se analizaron las condiciones de servicio y el diseño de la mezcla considerando las propiedades físico-mecánicas de los pavimentos de HCR. El procedimiento que se siguió consta de varios pasos representados gráficamente en la Figura 4.1.3.

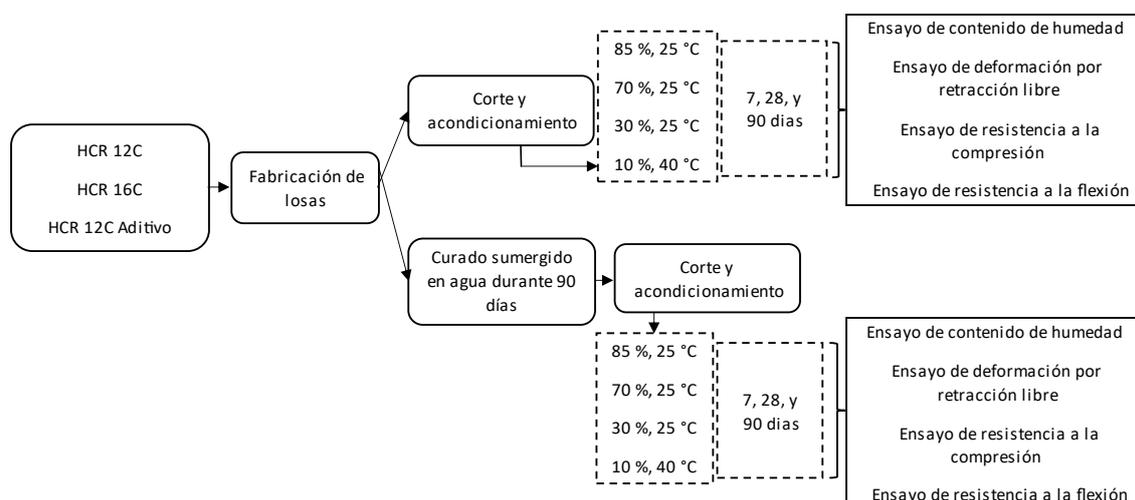


Figura 4.1.3. Plan de ensayos.

Siguiendo el plan de ensayos, el trabajo de laboratorio incluyó la fabricación de especímenes en moldes de 100 mm × 300 mm × 300 mm. Este procedimiento consistió en (1) preparación del molde, (2) fabricación de la mezcla de HCR, y (3) compactación de la mezcla de HCR en dos partes iguales con un período de compactación de 1 min (tiempo total del procedimiento de 4 min). El procedimiento de compactación se llevó a cabo con un sistema de compactador de placa NLT 173. Se utilizó esta norma porque refleja un proceso de compactación adecuado para los objetivos del proyecto [50], [51]. Además, representa el sistema de compactación de campo para mezclas asfálticas y HCR. Una vez endurecida la mezcla de HCR, las losas de hormigón (especímenes) se cortaron con un sistema de corte para proporcionar especímenes cúbicos (100 mm × 100 mm × 100 mm) y en forma de viga (100 mm × 100 mm × 285 mm) para los ensayos de laboratorio.

Los especímenes de cada tipo de mezcla (HCR 12C, HCR 16 y HCR 12C Aditivo) se separaron en dos grupos: (1) las que se acondicionarían directamente a diferentes condiciones ambientales (HR específica y temperatura) y (2) las que se someterían a un proceso de curado mediante

inmersión en agua a  $23 \pm 2$  °C durante 90 días antes de ser acondicionadas a diferentes condiciones ambientales (HR específica y temperatura).

Posteriormente, se seleccionaron cuatro condiciones ambientales, es decir, cuatro combinaciones de humedad relativa a dos temperaturas: (i) 85%, 25 °C; (ii) 70%, 25 °C; (iii) 30%, 25 °C; y (vi) 10%, 40 °C. Los periodos de acondicionamiento se establecieron en los días 0, 7, 28 y 90. Este acondicionamiento permite evaluar la influencia de la humedad a la misma temperatura y analizar al mismo tiempo el efecto de la temperatura para condiciones de agua similares. Estas condiciones se seleccionaron para correlacionar los resultados con los gramos de vapor de agua por kilogramo de aire en la atmósfera (Figura 4.1.4). Estas mediciones representan múltiples condiciones ambientales y permiten una aplicación más exhaustiva de los resultados. La figura 4.1.4 muestra un ejemplo de cómo una condición con un 70% de humedad relativa (HR) y una temperatura de 25 °C corresponde a unos 14 g de vapor de agua por kilogramo de aire, pero equivale a otras condiciones con aproximadamente un 90% de HR y 20 °C, y un 30% de HR y 42 °C.

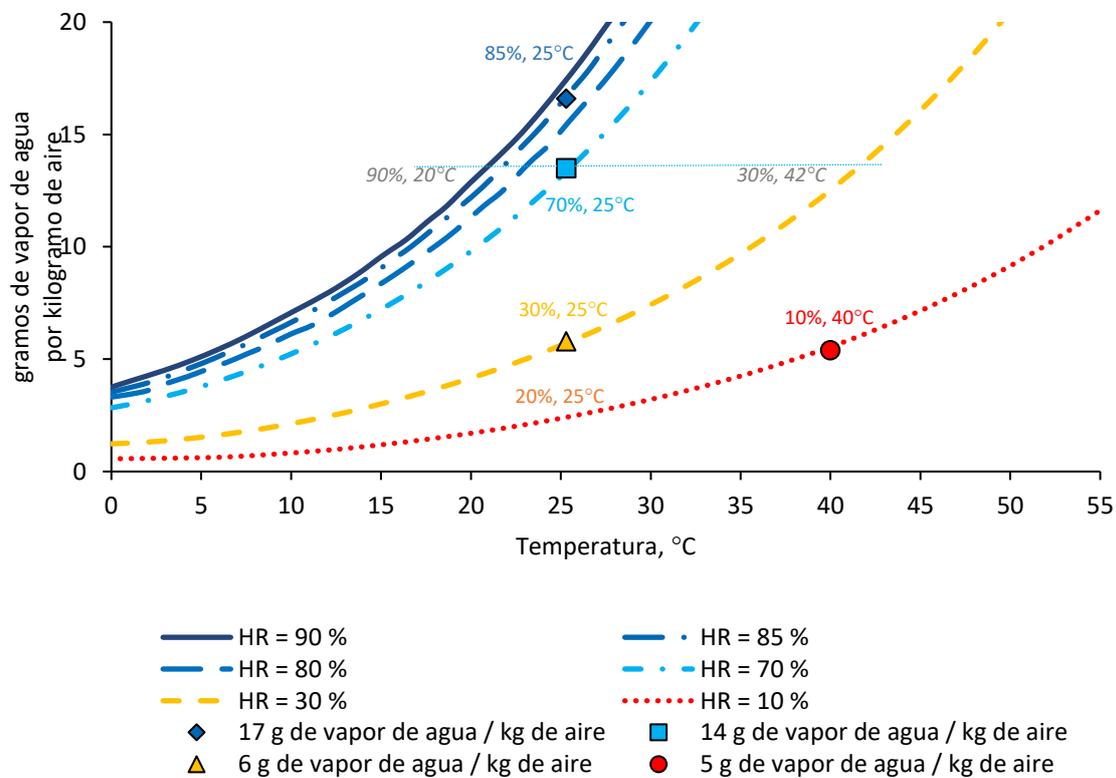


Figura 4.1.4. Gramos de vapor de agua por kilogramo de aire según diversas combinaciones de humedad relativa (HR) y temperatura (T). Fuente: [40].

En el plan de ensayos (Figura 4.1.3), se llevaron a cabo las siguientes pruebas para cada muestra: (i) determinación del contenido de humedad mediante un ensayo gravimétrico, (ii) medición de la retracción, (iii) ensayo de resistencia a la compresión, y (iv) cálculo del módulo de flexión a través de un ensayo de carga en tres puntos para analizar la capacidad de resistencia al agrietamiento.

El contenido de humedad de cada espécimen se determinó con el ensayo gravimétrico [35], [52] a intervalos de 0, 7, 28 y 90 días en tres réplicas por condición ambiental. Para este ensayo se utilizaron cubos de 100 mm × 100 mm × 100 mm. Se cortó una pieza delgada de 10 mm × 100

mm × 100 mm utilizando un sistema de corte adecuado, y las superficies laterales de 10 mm se sellaron con cinta aislante gris y se pesaron (peso inicial). La otra pieza cúbica (90 mm × 100 mm × 100 mm) también se selló con cinta aislante gris en todas sus superficies laterales. Después, ambas piezas (la delgada y la gruesa) se colocaron una encima de la otra por sus superficies sin sellar. Se utilizó cinta amarilla para mantener esta posición. Las muestras se sometieron a diferentes condiciones ambientales durante un periodo de control específico (7, 28 y 90 días). A continuación, se separaron las piezas delgada y gruesa para medir la evolución de la humedad relativa en la pieza delgada. Al final de este proceso, todos los especímenes se colocaron en un horno a  $110 \pm 5$  °C para medir el peso seco y determinar la evolución de la humedad de los especímenes. Este proceso se presenta en la figura 4.1.5.

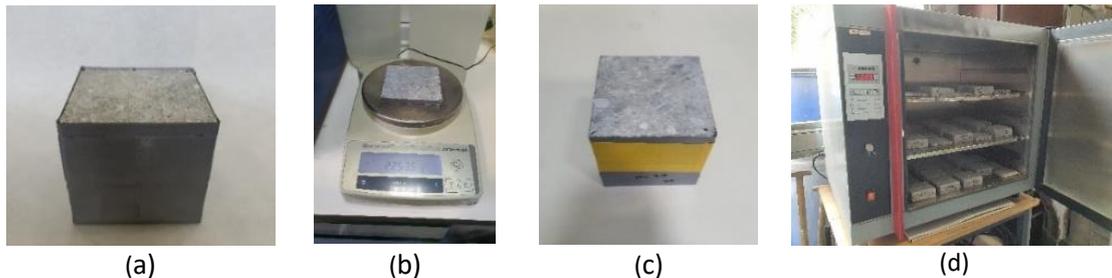


Figura 4.1.5. Muestras en cubo utilizadas para el ensayo de contenido de humedad: (a) muestras con cinta aislante gris; (b) pesaje de la pieza de 10 mm; (c) piezas delgadas y gruesas selladas entre sí con cinta amarilla; (d) muestras en el horno.

Las vigas cortadas de las losas se utilizaron para evaluar la susceptibilidad a la retracción en los especímenes. En primer lugar, las caras laterales de la viga se sellaron con cinta aislante (Figura 4.1.6 a,b) para evitar los efectos de tensión en su superficie y los efectos de compresión interna [35], [37], que se producen durante el proceso de secado. Por lo tanto, se midió la retracción (ASTM C157/C157M-17) [53] en los días 0, 7, 28 y 90 utilizando un marco fijo con un medidor de desplazamiento, es decir, midiendo periódicamente la deformación por retracción libre de cada probeta expuesta a las condiciones ambientales establecidas. La figura 4.1.6 muestra un resumen del procedimiento.

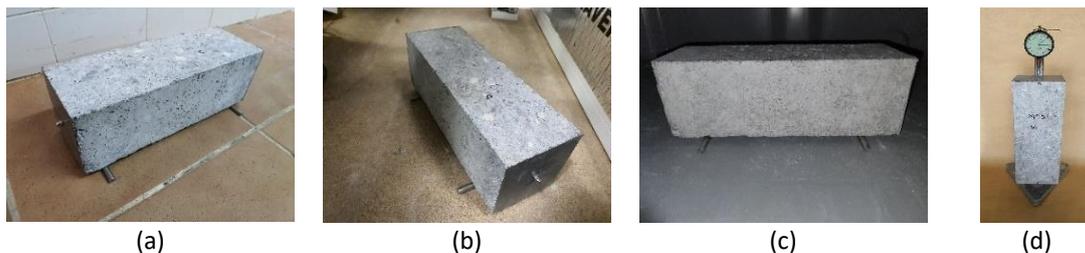
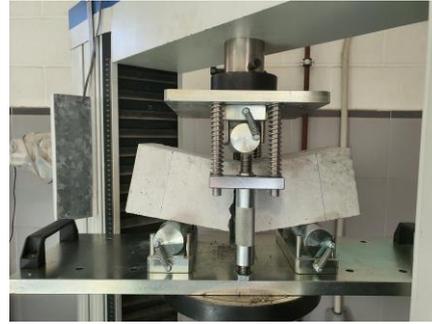


Figura 4.1.6. Una muestra de viga acondicionada a diferentes condiciones ambientales (a-c). Ensayo de deformación por retracción libre (d).

La resistencia a compresión de los especímenes cúbicos (ASTM C39/C39M-21 y BS EN 12390-3:2019-TC) [54], [55] y el módulo de rotura de las vigas con el ensayo de carga en punto central (ASTM C293/C293M-16) [56] se establecieron para evaluar el comportamiento estructural de cada HCR tras diversos estados de acondicionamiento (Figura 4.1.7). En el primer ensayo, la velocidad de carga empleada fue de 0.25 MPa/s, y los cubos seleccionados fueron previamente sometidos a acondicionamiento en diversas condiciones ambientales durante 90 días. En el segundo caso, la velocidad de carga fue de 0.02 MPa/s, y las vigas seleccionadas se sometieron previamente a acondicionamiento en diversas condiciones ambientales durante 90 días.



(a)



(b)

Figura 4.1.7. Ensayos de resistencia del hormigón compactado con rodillo: (a) ensayo de resistencia a la compresión; (b) ensayo de resistencia a la flexión.

#### 4.1.4 Resultados y Discusión

El análisis de los resultados y la discusión se dividen en diferentes secciones para evaluar (i) el efecto de las condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa), (ii) el impacto del diseño de la mezcla en el rendimiento en función de los gramos de vapor de agua por kilogramo de aire en la atmósfera, y (iii) la influencia de las condiciones de curado a través de los ensayos realizados, es decir, contenido de humedad, retracción, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión. Además, al final de esta sección se presenta un análisis paramétrico para determinar el peso de cada factor en el comportamiento de los materiales evaluados.

##### 4.1.4.1 Efecto de las condiciones ambientales

La Figura 4.1.8 presenta la influencia de las condiciones ambientales en la evolución del contenido de humedad entre los períodos 7, 28 y 90 días, para el caso del HCR con 12% de cemento y sin aditivo. Este gráfico muestra la variación del contenido de humedad en relación con el cambio en el contenido de agua ambiental (expresado como gramos de vapor de agua por kilogramo de aire), comparando los casos con 5, 6, 14 y 18 gramos de vapor de agua por kilogramo de aire. Cinco gramos representan la condición de 10% de HR y 40 °C, seis gramos 30% de HR y 25 °C, catorce gramos 70% de HR y 25 °C, y dieciocho gramos representan 85% y 25 °C. Estos valores permiten analizar la influencia de la temperatura comparando los casos con 5 y 6 g (humedad relativa similar, pero temperaturas diferentes) y el efecto de la humedad comparando los casos con 6, 14 y 18 g de vapor de agua por kg de aire. Dado que este análisis utiliza esta variable, podría permitir una interpretación más amplia de los resultados para otras condiciones ambientales.

Los resultados muestran una relación logarítmica entre la condición ambiental y el cambio en el contenido de humedad de los especímenes, indicando que este factor juega un papel esencial en el estado del hormigón. En este sentido, los resultados muestran una influencia limitada de la temperatura ambiente en comparación con los casos en los que cambió la humedad relativa, destacando los casos con una humedad relativa del 30% y del 70%.

Por otra parte, los resultados muestran que el contenido de humedad se mantuvo relativamente constante en los primeros siete días, cuando la curva tendía a ser plana. Sin embargo, a partir de ese momento, los valores disminuyeron notablemente en los casos con mayor temperatura y menor humedad (representados por los valores de gramos más bajos de vapor de agua por kilogramo de aire). Los resultados indicaron que las diferencias más significativas se observaron a medio y largo plazo (más allá de 28 días) para los casos entre 30% y 70% de humedad, a pesar de estar a la misma temperatura de acondicionamiento. Esto denota que la temperatura podría

afectar al comportamiento del hormigón a largo plazo, pero con un impacto menor que otros parámetros ambientales, como la humedad.

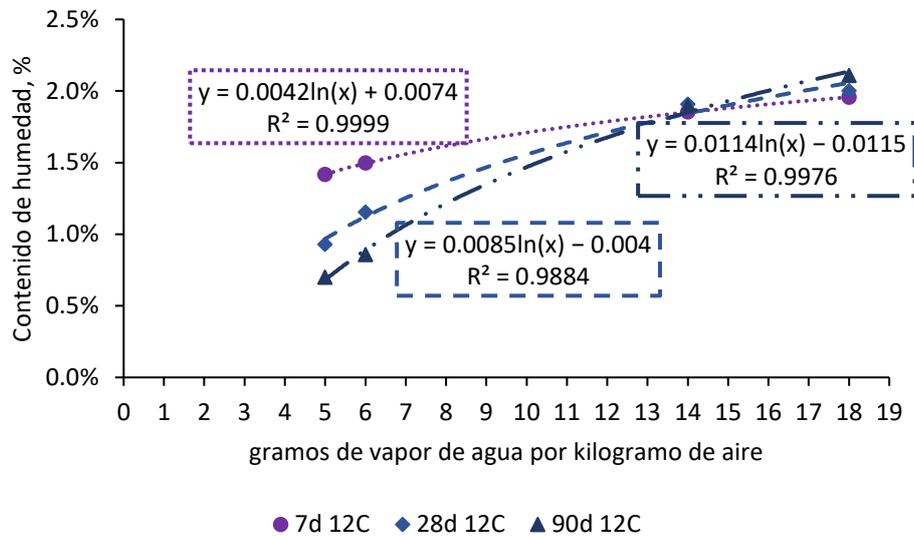


Figura 4.1.8. Gramos de vapor de agua por kilogramo de aire frente al contenido de humedad en los días 7, 28 y 90 en la mezcla de hormigón compactado con rodillo con un 12% de cemento (mezcla de referencia).

La Figura 4.1.9 muestra la correlación entre los gramos de contenido de agua por kilogramo de aire con los cambios en la deformación por retracción para diferentes periodos (7, 28 y 90 días, como tiempos representativos) para analizar la influencia de las condiciones ambientales en el comportamiento del hormigón. Este análisis se muestra para el caso del HCR de referencia con un 12% de cemento. En consonancia con los resultados anteriores, las condiciones ambientales tuvieron poca influencia en los valores de retracción a tiempos inferiores a siete días. Sin embargo, a largo plazo, la deformación de los especímenes en condiciones secas fue aproximadamente el doble que la de los especímenes en condiciones húmedas, lo que pone de manifiesto la relevancia de las condiciones ambientales siguiendo una tendencia exponencial/logarítmica.

Además, los resultados confirmaron que la temperatura afecta al comportamiento del hormigón, provocando una aceleración de la deformación al aumentar la temperatura de 25 °C a 40 °C en condiciones secas, representadas por los casos de 5 y 6 g de vapor de agua por kg de aire, respectivamente. Sin embargo, este hecho fue menos acentuado que en el caso de pasar del 30% de HR al 70%. Estos cambios fueron más notables a largo plazo, dando lugar a diferencias entre las condiciones húmedas y secas para la misma temperatura y en torno al 45-60% de HR. Por tanto, el parámetro más influyente en el rendimiento del hormigón fue el contenido de agua de la atmósfera, que se correlaciona con la propiedad de retracción. Esto permite extrapolar los resultados para una gama más amplia de condiciones de temperatura-humedad, que podrían tener lugar durante la vida útil de los pavimentos de hormigón compactado con rodillo.

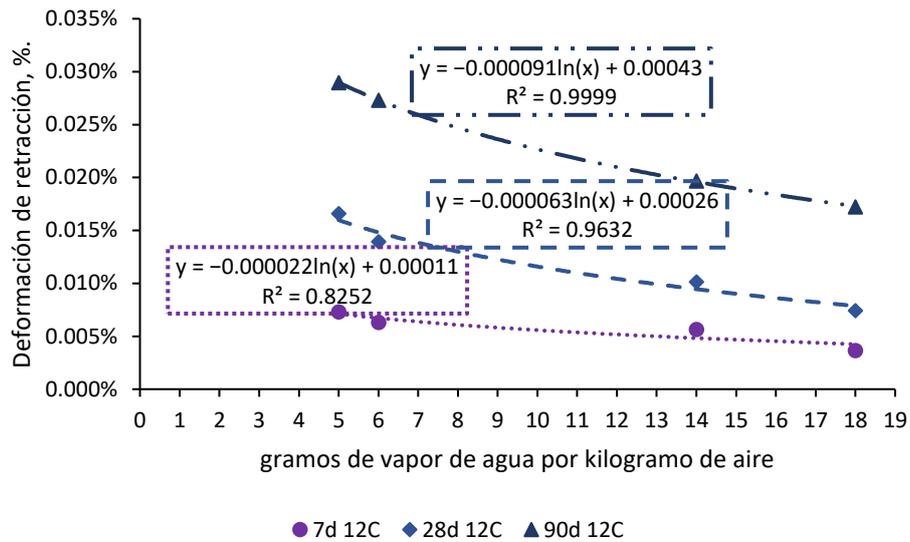


Figura 4.1.9. Influencia de las condiciones ambientales medidas en gramos de vapor de agua por kilogramo de aire sobre la deformación por retracción en las mezclas de hormigón compactado con rodillo con 12% de cemento (mezcla de referencia) para los días 7, 28 y 90.

La Figura 4.1.10 muestra la influencia de la temperatura-humedad ambiente (a través de gramos de vapor de agua por kilogramo de aire) en el desempeño estructural del HCR, representando los valores de la resistencia a la compresión ( $f'_c$ , en MPa) y flexión representada por el módulo de rotura ( $M_r$ , en MPa) después de 90 días de acondicionamiento. Este período fue seleccionado para evaluar estos parámetros en consonancia con los resultados anteriores, mostrando que corresponde al tiempo de evaluación más representativo.

Los resultados muestran que las condiciones ambientales estudiadas tuvieron poca influencia en la resistencia del material bajo esfuerzos de compresión y flexión. Sólo se obtuvo un ligero aumento de la resistencia del material con una mayor humedad relativa. Esto denota que las condiciones ambientales inciden fuertemente en un fenómeno como la retracción, pero tienen poca influencia en la resistencia en los periodos evaluados.

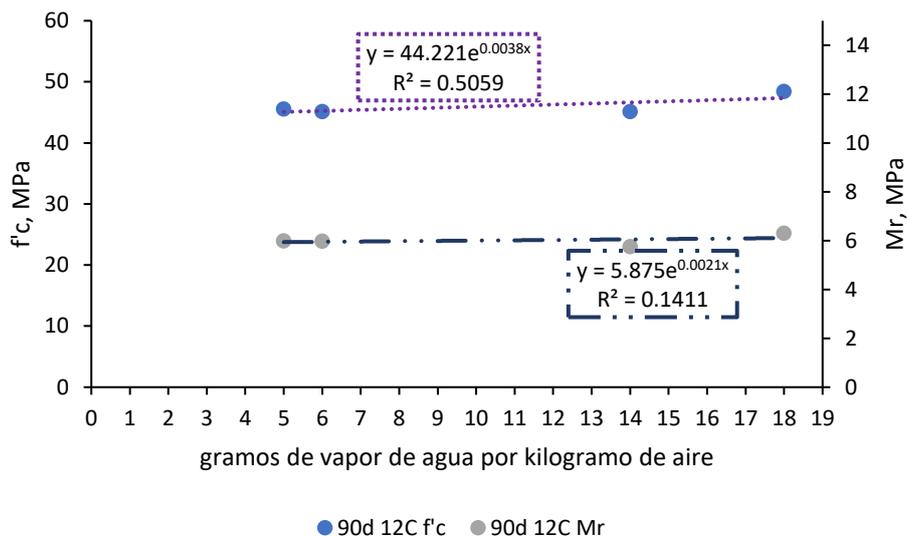


Figura 4.1.10. Influencia de las condiciones ambientales medidas en gramos de vapor de agua por kilogramo de aire en la resistencia del hormigón para los días 7, 28 y 90 en la mezcla de hormigón compactado con rodillo con un 12% de cemento (mezcla de referencia).

#### 4.1.4.2 Impacto del diseño de la mezcla en el rendimiento en diferentes condiciones ambientales

La figura 4.1.11 presenta los valores registrados para cada material con diferentes contenidos de humedad en función de la cantidad de cemento (12% frente a 16% de cemento) y del uso de un aditivo/agua (sólo con el HCR con 12% de cemento) para analizar la influencia del diseño de la mezcla. Esta evaluación se llevó a cabo después de 90 días bajo diversas condiciones ambientales (6, 14 y 18 g de vapor de agua por kg de aire). Estos periodos y condiciones ambientales se seleccionaron de acuerdo con resultados anteriores. Este gráfico también muestra que la mezcla de hormigón con una mayor dosificación de cemento dio lugar a un mayor valor de contenido de humedad, independientemente de la condición ambiental. Esto indica que el diseño de HCR con 16 % de cemento (HCR 16C) permite obtener un material con una mayor capacidad para retener la humedad a lo largo del tiempo, lo que podría, a su vez, permitir un mejor endurecimiento y maduración del hormigón. En general, este hecho fue más acentuado en condiciones húmedas, donde se reprodujo una mayor humedad ambiental.

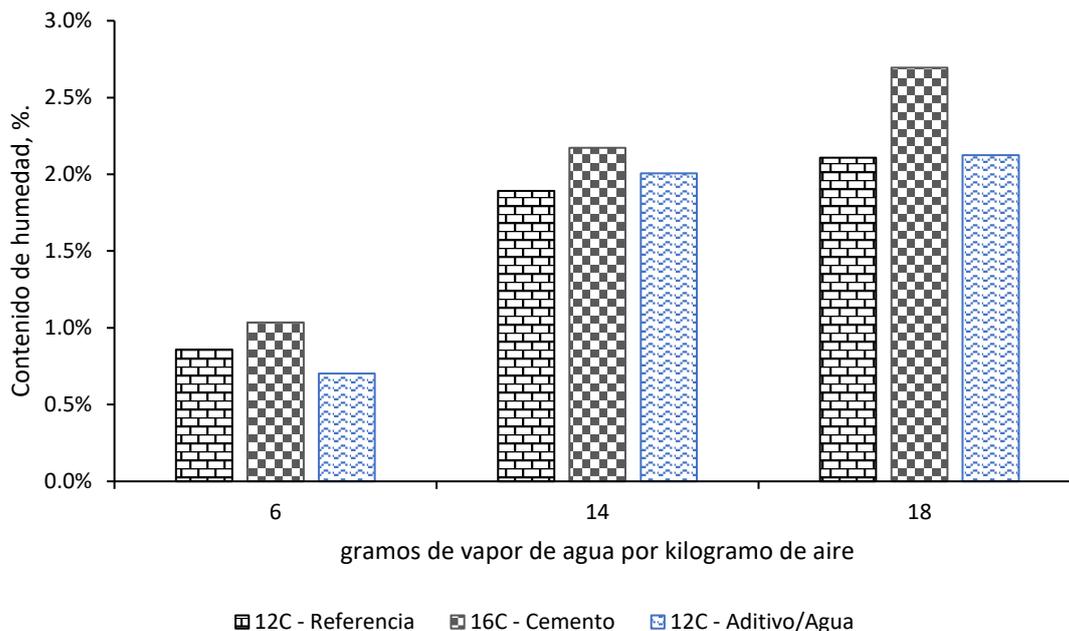


Figura 4.1.11. Influencia del diseño de la mezcla de hormigón y del uso o no de un superplastificante en el contenido de humedad de los especímenes tras 90 días de acondicionamiento en diferentes condiciones ambientales (gramos de vapor de agua por kilogramo de aire).

La figura 4.1.12 presenta los valores medios de la deformación por retracción medidos para los especímenes con diferentes mezclas de hormigón tras 90 días de acondicionamiento en diversas condiciones ambientales. Los resultados confirman que el fenómeno de retracción disminuyó al aumentar la humedad ambiental para todos los materiales evaluados. Esto fue más notable para las mezclas con mayor dosificación de cemento y el superplastificante (aditivo), ya que esos materiales proporcionaron una menor tendencia en la deformación por retracción. Para el primer caso, esto podría estar relacionado con la mayor capacidad de este material para retener agua, como se ha visto anteriormente, en comparación con el caso con menor contenido de cemento. Sin embargo, en ambos casos se utilizó la misma cantidad de agua durante la fabricación. En cuanto al caso de la mezcla con el aditivo, los resultados indicaron cómo esta solución podía mejorar la resistencia del HCR a la retracción, lo que podría estar relacionado con el uso de una menor dosificación de agua durante la fabricación del material.

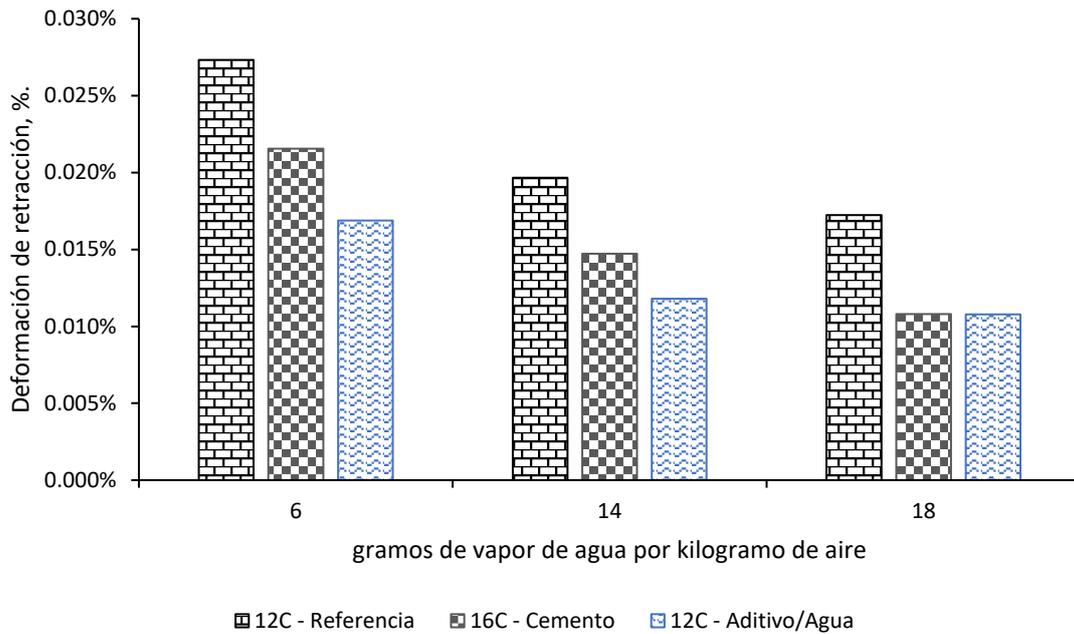


Figura 4.1.12. Efecto del diseño de la mezcla de hormigón y del uso o no de un superplastificante sobre la deformación por retracción medida para los especímenes tras 90 días de acondicionamiento en diferentes condiciones ambientales (gramos de vapor de agua por kilogramo de aire).

Las figuras 4.1.13 y 4.1.14 muestran los resultados medios de resistencia a la compresión y a la flexión registrados para cada mezcla en diversas condiciones de acondicionamiento durante 90 días. En general, el material con mayor dosificación de cemento mostró un ligero aumento de la resistencia, pero tal diferencia fue limitada en comparación con el análisis de otras propiedades, como la retracción.

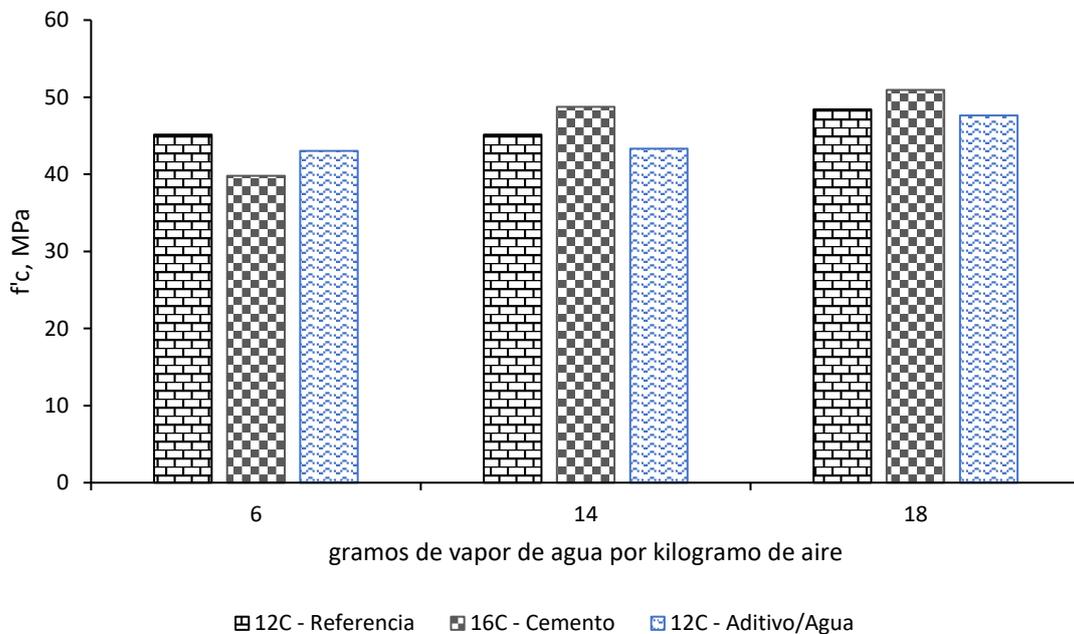


Figura 4.1.13. Resultados del ensayo de compresión ( $f'_c$ ) para diferentes diseños de mezcla y el uso o no de un superplastificante tras 90 días de acondicionamiento en diferentes condiciones ambientales (gramos de vapor de agua por kilogramo de aire).

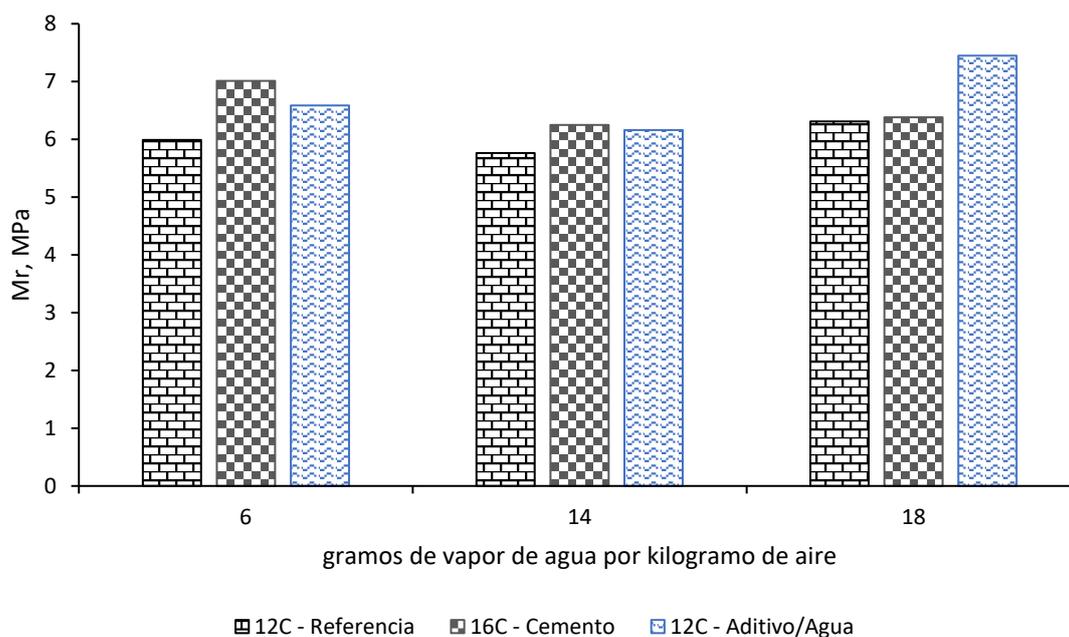


Figura 4.1.14. Resultados del módulo de rotura ( $M_r$ ) para diferentes diseños de mezcla y el uso o no de un superplastificante tras 90 días de acondicionamiento en diferentes condiciones ambientales (gramos de vapor de agua por kilogramo de aire).

#### 4.1.4.3 Impacto del curado del hormigón

Para evaluar la influencia de la aplicación de un proceso de curado al material, consistente en sumergir los especímenes en agua a  $23 \pm 2$  °C durante 90 días antes de ser acondicionadas a diferentes condiciones ambientales, en las Figuras 4.1.15-4.1.17 se presentan los valores medios registrados para el material de referencia (12% de cemento sin aditivos) con y sin ser sometido al proceso de curado. Este análisis se realizó para diferentes procesos de acondicionamiento expresados en gramos de vapor de agua por kilogramo de aire, correspondientes a cada condición ambiental.

Los resultados de la evolución del contenido de humedad (Figura 4.1.15) muestran que el proceso de curado influyó a corto plazo (en los primeros siete días), dando lugar a valores más elevados del contenido de agua en el hormigón para todas las condiciones ambientales. Además, esta tendencia persistió en el tiempo para los casos de estado húmedo (representados como los casos en torno a 18 g de vapor de agua por kg de aire), en los que se observó una variación reducida a lo largo del periodo de 90 días. Sin embargo, en los casos de estado seco, la evolución a lo largo del tiempo afectó tanto a los especímenes con y sin sometimiento al proceso de curado, dando lugar a resultados bastante similares para ambas situaciones al cabo de 90 días.

Los resultados actuales concuerdan con investigaciones anteriores (Figura 4.1.15), como la realizada por Jafarifar et al. [35], [37]. En esos estudios, la alteración del contenido de humedad en una atmósfera con una humedad relativa del 40% y una temperatura de 25 °C, correspondiente a 8 g de vapor de agua por kg de aire, dio lugar a una variación del 9-27% en un periodo que osciló entre 7 y 83 días.



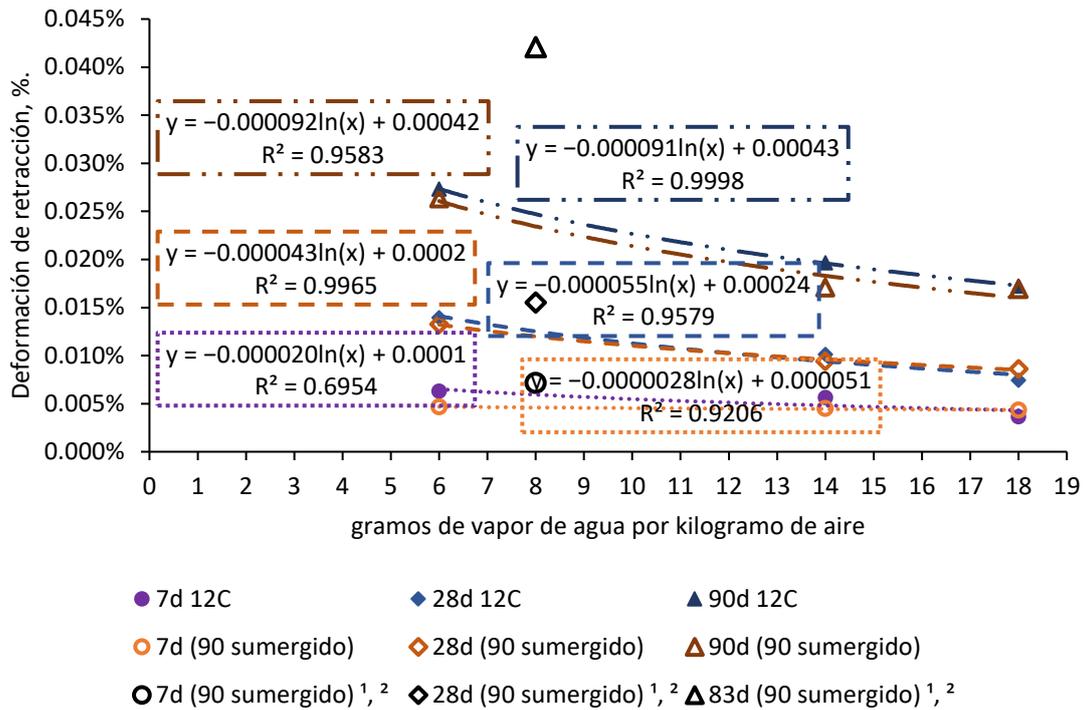


Figura 4.1.16. Impacto del curado del material en los resultados de retracción de los especímenes en diferentes periodos de acondicionamiento y bajo diversas condiciones ambientales. <sup>1</sup> [35], <sup>2</sup> [37].

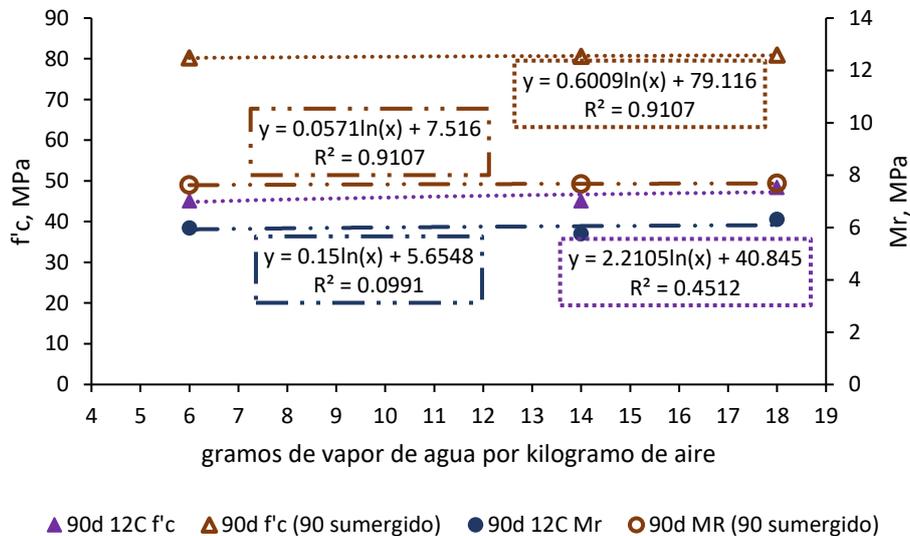


Figura 4.1.17. Efecto del proceso de curado sobre la resistencia estructural del hormigón compactado con rodillo en diferentes periodos de acondicionamiento y bajo diversas condiciones ambientales.  $f'_c$ : resistencia a la compresión, Mr: módulo de rotura.

#### 4.1.4.4 Análisis paramétricos de las condiciones de servicio y diseño de mezclas

Basándose en los resultados anteriores, las Figuras 4.1.18-4.1.20 muestran un análisis paramétrico para determinar las variables más influyentes en la evolución de las propiedades de las mezclas de HCR, tales como el contenido de humedad (Figura 4.1.18), la deformación por retracción (Figura 4.1.19) y la resistencia a la compresión/flexión (Figura 4.1.20). Los resultados se expresan en porcentaje de cambio al comparar la mezcla con 12 y 16% de contenido de

cemento, el uso de un superplastificante en comparación con el HCR de referencia sin aditivo, el aumento de la temperatura ambiente de 25 a 40 °C, el aumento de la humedad relativa de 30 a 70%, y el cambio de las condiciones ambientales de 6 a 18 g de vapor de agua por kg de aire.

Los resultados de la Figura 4.1.18 indican que el diseño de la mezcla y la temperatura de acondicionamiento tuvieron una influencia limitada en la variación del contenido de humedad de los especímenes. Por el contrario, la humedad ambiente fue la que más influyó en esta propiedad. Esto fue más notable cuando se incrementó el periodo de acondicionamiento y se aplicó el proceso de curado.

Esto concuerda con los resultados de retracción mostrados en la Figura 4.1.19, donde la humedad ambiental tuvo un notable impacto en la reducción de la tendencia a la deformación del hormigón en atmósfera húmeda, particularmente a largo plazo y al someter el material a un proceso de curado. En este caso, a diferencia de los resultados anteriores, el diseño de la mezcla influyó en esta propiedad (efecto comparable al de la presencia de condiciones húmedas), dando lugar a una reducción de la retracción cuando se utilizaba una mayor dosificación de cemento al tiempo que se reducía la dosificación de agua durante la fabricación utilizando un superplastificante. En general, estas tendencias se acentuaron ligeramente cuando se aplicó el proceso de curado.

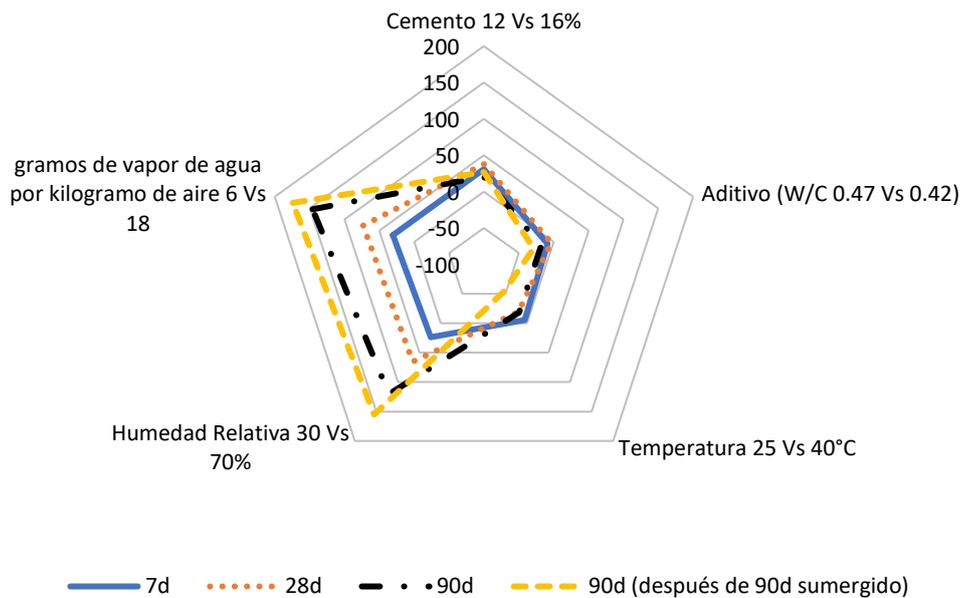


Figura 4.1.18. Análisis paramétricos del contenido de humedad considerando diversos factores.

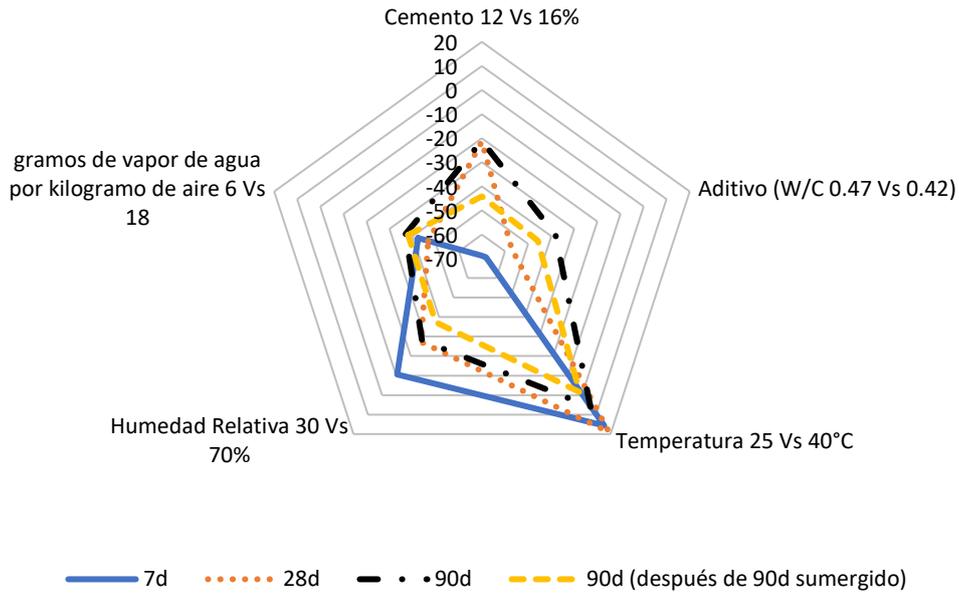


Figura 4.1.19. Análisis paramétricos que evalúan la influencia del diseño de la mezcla y las condiciones ambientales en la retracción del hormigón compactado con rodillo.

En cuanto a los resultados del rendimiento estructural del HCR, la Figura 4.1.20 muestra que los parámetros de diseño y ambiente tuvieron poca influencia en las propiedades de resistencia, destacando el notable impacto del proceso de curado.

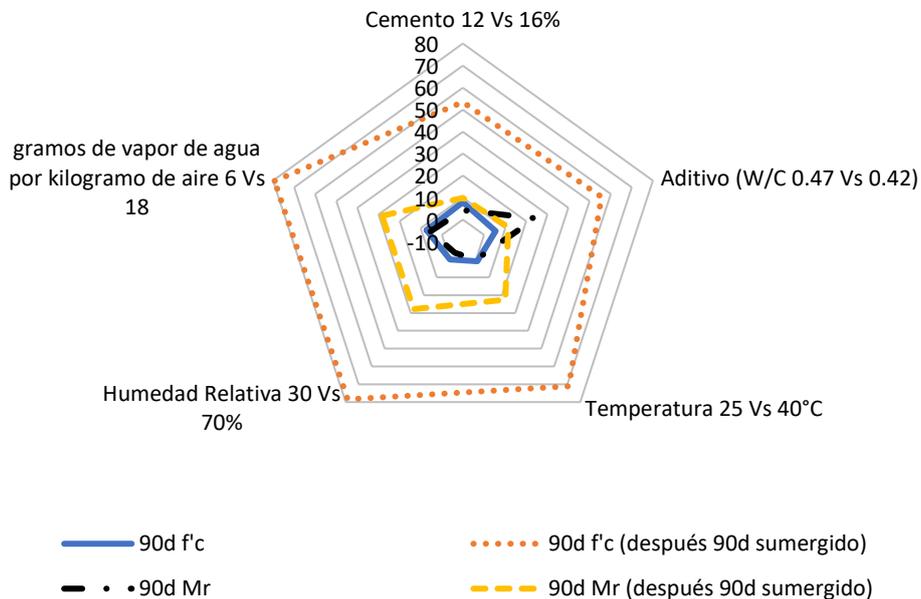


Figura 4.1.20. Análisis paramétricos de la resistencia a la compresión ( $f'c$ ) y del módulo de rotura ( $Mr$ ) en función de los parámetros de diseño y ambientales. W/C: relación agua-cemento.

#### 4.1.5 Conclusiones

La presente investigación evaluó la influencia de las condiciones ambientales de servicio y los factores de diseño de la mezcla en el comportamiento del HCR, evaluando propiedades como la evolución del contenido de humedad, la deformación por retracción, la resistencia a la

compresión y la resistencia al fallo por flexión. Esto se evaluó para diferentes periodos de acondicionamiento, estudiando la influencia de factores ambientales, como la temperatura y la humedad relativa, en materiales con cantidades variables de cemento y agua (utilizando un superplastificante) en el proceso de fabricación. A partir de los resultados, se extrajeron las siguientes conclusiones:

- Un ambiente húmedo, con valores de humedad superiores al 70%, proporcionó al espécimen una mayor capacidad de retención de humedad a lo largo del periodo estudiado, resultando valores de retracción en torno a la mitad de los registrados en condiciones secas, con humedades relativas inferiores al 30%.
- La deformación por retracción mostró una relación logarítmica con la variación en gramos de vapor de agua por kilogramo de aire, permitiendo predecir el comportamiento del HCR bajo una amplia combinación de valores de humedad-temperatura representados a través de dichos parámetros. Por el contrario, este factor apenas influyó en otras propiedades del HCR, como la resistencia a la compresión y la resistencia al fallo por flexión, en las que las condiciones ambientales tuvieron un impacto limitado sobre la resistencia del material.
- El diseño del HCR con una mayor dosificación de cemento dio lugar a una mayor capacidad de retención del contenido de humedad en los especímenes, lo que se tradujo en una reducción de la tendencia a la retracción. No obstante, esta reducción de la deformación del material fue más notable cuando se fabricó el HCR utilizando un superplastificante, lo que permitió reducir la dosificación de agua. En todos los diseños de mezcla, se observó poca influencia en la resistencia estructural a pesar de las variaciones en el diseño del material.
- El proceso de curado tuvo un mayor impacto en los especímenes en condiciones secas, lo que condujo a una mayor capacidad para retener el agua y mejorar el rendimiento del material. El curado de las muestras en condiciones húmedas tuvo un efecto limitado, pero permitió preservar la humedad retenida por el material.
- La influencia del proceso de curado fue más acentuada en las propiedades estructurales, permitiendo un aumento de las propiedades del material al tiempo que contribuyó ligeramente a una reducción de la deformación por retracción en el HCR a largo plazo.
- Los factores más relevantes para la propiedad de retracción fueron el uso de HCR en condiciones húmedas, la mejora del diseño del HCR utilizando una mayor dosificación de cemento y, sobre todo, el uso de un superplastificante, que permitió reducir el contenido de agua durante la fabricación y, por tanto, reducir la tendencia a la retracción.
- Se recomienda la posibilidad de ampliar esta investigación para analizar cómo influyen las propiedades físico-mecánicas de la mezcla de HCR en las condiciones de servicio, considerando la incorporación de otros aditivos en aplicaciones cotidianas. Además, se contempla la inclusión de materiales sostenibles, como áridos alternativos obtenidos a partir de hormigón reciclado, áridos reciclados de asfalto, escoria de horno de arco eléctrico, escoria de siderurgia y materiales reciclados de neumáticos, como gránulos de caucho y fibras de polipropileno.
- El registro de una relación directa entre la retracción y la humedad marca un punto de partida para aplicar los resultados en modelos de elementos finitos. Este proceso implica el desarrollo de modelos computacionales de laboratorio centrados en el comportamiento de la humedad y la retracción por secado a lo largo del tiempo. Para ello se requiere la configuración geométrica de los especímenes, las condiciones de contorno y los resultados de tensión o flexión antes y

después de que se produzca el fallo. Estos factores son de gran importancia a la hora de desarrollar un modelo de pavimento avanzado, que integre la plasticidad dañada en el hormigón, la incorporación de parámetros convencionales (como la rigidez), el espesor de la capa y la adherencia entre ellas, o el modelo de carga vehicular, para lograr una representación más precisa y funcional de los esfuerzos del pavimento. Esta última inclusión es crucial para la comparación con las funciones de transferencia o los modelos de comportamiento de los materiales utilizados en el diseño.

#### 4.1.6 Referencias

- [1] F. Moreno-Navarro, F. J. Sierra-Carrillo de Albornoz, M. Sol-Sánchez, and M. C. Rubio-Gómez, "MASAI: sustain-able, automated and intelligent asphalt materials. The way to the next generation of asphalt pavements," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 24, no. S1, pp. 486–505, 2023, doi: 10.1080/14680629.2023.2181007.
- [2] J. Fengier, A. Pozarycki, and T. Garbowski, "Stiff-plate bearing test simulation based on FWD results," in *Procedia Engineering*, 2013, pp. 270–277. doi: 10.1016/j.proeng.2013.04.037.
- [3] T. Garbowski and A. Pozarycki, "Multi-level backcalculation algorithm for robust determination of pavement layers parameters," *Inverse Probl Sci Eng*, vol. 25, no. 5, pp. 674–693, May 2017, doi: 10.1080/17415977.2016.1191073.
- [4] ACI COMMITTEE 325.10R-95, *State-of-the-art report on roller-compacted concrete pavements, manual of concrete practice*, vol. 91. 1994. doi: 10.14359/9760.
- [5] K. Ofori-Awuah, "State-of-the-art of roller compacted concrete pavement," in *Proceedings of the Materials Engineering Conference*, 1996, pp. 1439–1448.
- [6] I. Brotman, M. Crist, and J. Gaul, "Roller compacted concrete pavement: Properties, design, and construction," in *Geotechnical Special Publication*, 2007. doi: 10.1061/40913(232)4.
- [7] Z. Wu, M. Mahdi, and T. Rupnow, *Performance of thin RCC pavements under accelerated loading*. 2016. doi: 10.1007/978-3-319-42797-3\_48.
- [8] S. Williams, *Construction of roller-compacted concrete pavement in the Fayetteville shale play area, Arkansas*, no. 2408. 2014. doi: 10.3141/2408-06.
- [9] R. Mickevič and A. Vaitkus, "Application of roller-compacted concrete in freight terminals," *Mokslas: Lietuvos Ateitis*, vol. 12, Jan. 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.3846/mla.2020.13067>.
- [10] M. Smallridge and M. Elbaz, "RCC pavement success at mobile container terminal," in *Ports 2010: Building on the Past, Respecting the Future - Proceedings of the 12th Triannual International Conference*, 2010, pp. 901–911. doi: 10.1061/41098(368)93.
- [11] A. Vaitkus, R. Mickevič, and O. Šernas, "Roller Compacted Concrete – Best Practice Of Lithuania," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1202, no. 1, Nov. 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1202/1/012010>.
- [12] M. S. Hossain and H. C. Ozyildirim, "Roller compacted concrete pavement in Virginia," in *Airfield and Highway Pavements 2015: Innovative and Cost-Effective Pavements for a*

Sustainable Future - Proceedings of the 2015 International Airfield and Highway Pavements Conference, 2015, pp. 429–440. doi: 10.1061/9780784479216.039.

- [13] J. Novak, A. Kohoutkova, R. Chylik, and T. Trtik, “Study on pervious recycled aggregate fiber-reinforced concrete for airfield pavement,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 770, no. 1, Feb. 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/770/1/012040>.
- [14] A. H. Guha and G. J. Assaf, “Effects of different fillers on pavement deformation of hot mix asphalt in hot climates,” *Constr Build Mater*, vol. 261, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119898.
- [15] S. Zhao, J. Liu, P. Li, and T. Burrirt, “Asphalt binder adaption for climatic conditions in cold regions: Alaska experience,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, no. 1, 2017, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001709.
- [16] F. Moreno-Navarro, M. Sol-Sánchez, and M. C. Rubio-Gámez, “The effect of polymer modified binders on the long-term performance of bituminous mixtures: The influence of temperature,” *Mater Des*, vol. 78, pp. 5–11, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.04.018.
- [17] F. Moreno-Navarro, F. J. Sierra, M. Sol-Sánchez, M. C. Rubio-Gámez, M. Castillo, and E. Estévez, “High-Performance Sustainable Asphalt Mixtures for High-Volume Traffic Roads in Severe Climates,” *Sustainability*, vol. 12, no. 21, p. 8765, Oct. 2020, doi: 10.3390/su12218765.
- [18] F. Moreno, M. Sol, J. Martín, M. Pérez, and M. C. Rubio, “The effect of crumb rubber modifier on the resistance of asphalt mixes to plastic deformation,” *Mater Des*, vol. 47, pp. 274–280, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.12.022.
- [19] F. Vahedifard, M. Nili, and C. L. Meehan, “Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement,” *Constr Build Mater*, vol. 24, no. 12, pp. 2528–2535, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.003.
- [20] A. Modarres, S. Hesami, M. Soltaninejad, and H. Madani, “Application of coal waste in sustainable roller compacted concrete pavement-environmental and technical assessment,” *International journal of pavement engineering*, vol. 19, no. 8, pp. 748–761, 2018, doi: 10.1080/10298436.2016.1205747.
- [21] M. Adresi and G. Lacidogna, “Investigating the micro/macro-texture performance of roller-compacted concrete pavement under simulated traffic abrasion,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 12, 2021, doi: 10.3390/app11125704.
- [22] M. Adamu, B. S. Mohammed, N. Shafiq, and M. Shahir Liew, “Skid Resistance of nano silica modified roller compacted rubbercrete for pavement applications: Experimental methods and response surface methodology,” *Cogent Eng*, vol. 5, no. 1, p. 1452664, Jan. 2018, doi: 10.1080/23311916.2018.1452664.
- [23] T. Sok, Y. K. Kim, J. Y. Park, and S. W. Lee, “Evaluation of early-age strains and stresses in roller-compacted concrete pavement,” *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2021, doi: 10.1016/j.jtte.2020.04.007.

- [24] S. Saluja, K. Kaur, S. Goyal, and B. Bhattacharjee, "Long-Term Drying Shrinkage of GGBFS-Incorporated RCC under Various Temperature Exposures," *Journal of materials in civil engineering*, vol. 33, no. 6, 2021, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003746.
- [25] J. P. Won et al., "Long-term performance of high early -strength roller-compacted concrete for pavement," *Advances in concrete structural durability: proceedings of the 2nd international conference on durability of concrete structures ICDCS2010*, no. 2nd International Conference on Durability of Concrete Structures (ICDCS2010). pp. 165–171, 2010.
- [26] N. Ghafoori and Y. Z. Cai, "Laboratory-made roller compacted concretes containing dry bottom ash: Part II - Long-term durability," *ACI Mater J*, vol. 95, no. 3, pp. 244–251, 1998.
- [27] M. Abbasi, P. Shafigh, and M. R. Baharum, "The effect of coarse to fine aggregate ratio on drying shrinkage of roller compacted concrete pavement in different curing conditions," *Materiales de construcción*, vol. 71, no. 342, 2021, doi: 10.3989/mc.2021.03520.
- [28] N. Delatte and TRB, "Simplified design of roller-compacted concrete composite pavement," in *Pavement design and accelerated testing 2004*, no. 83rd Annual Meeting of the Transportation-Research-Board, 2004, pp. 57–65. doi: 10.3141/1896-06.
- [29] S. K. Rao, P. Sravana, and T. C. Rao, "Analysis on Strength and Fly Ash Effect of Roller Compacted Concrete Pavement Using M-Sand," *i-Manager's Journal on Structural Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 1–8, 2015, [Online]. Available: <https://www.proquest.com/scholarly-journals/analysis-on-strength-fly-ash-effect-roller/docview/1721936836/se-2?accountid=14542>
- [30] Ö. F. Keleş and M. V. Akpınar, "Strength properties of roller compacted concrete pavement (RCCP) under different curing methods," *Constr Build Mater*, vol. 324, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126530.
- [31] S. M. Hejazi, S. M. Abtahi, and F. Safaie, "Investigation of thermal stress distribution in fiber-reinforced roller compacted concrete pavements," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 45, no. 5, pp. 896–914, 2016, doi: 10.1177/1528083714542827.
- [32] N. Jafarifar, K. Pilakoutas, and T. Bennett, "The effect of shrinkage cracks on the load bearing capacity of steel-fibre-reinforced roller-compacted-concrete pavements," *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 49, no. 6, pp. 2329–2347, 2016, doi: 10.1617/s11527-015-0652-0.
- [33] N. Gholami and A. Modarres, "Shrinkage behaviour of superplasticised RCCP and its relationship with internal temperature," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 12–23, 2019, doi: 10.1080/10298436.2016.1244438.
- [34] A. Ueno, M. Ishida, K. Ohno, and K. Uji, "Properties of Extremely Dry Concrete made with Eco-cement and Recycled Coarse Aggregate," in *Sustainable Construction Materials and Technologies*, 2013.
- [35] N. Jafarifar, K. Pilakoutas, and T. Bennett, "Moisture transport and drying shrinkage properties of steel-fibre-reinforced-concrete," *Constr Build Mater*, vol. 73, pp. 41–50, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.039.

- [36] A. M. Lotphi and A. Modarres, "Effect of surface free energy on water absorption of roller-compacted concrete pavement containing calcium stearate powder," *Road Materials and Pavement Design*, 2022, doi: 10.1080/14680629.2022.2058987.
- [37] N. Jafarifar, "Shrinkage behaviour of steel-fibre-reinforced-concrete pavements," UK, 2012. Accessed: Jan. 26, 2021. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/29030273.pdf>
- [38] D. W. Pittman and S. A. Ragan, "Drying shrinkage of roller-compacted concrete for pavement applications," *ACI Mater J*, vol. 95, no. 1, pp. 19–26, 1998.
- [39] W. D. Palmer Jr, "Paving with Roller Compacted Concrete," *Concrete Construction*, vol. 50, no. 2, pp. 45-48,50, Feb. 2005, [Online]. Available: <https://www.proquest.com/trade-journals/paving-with-roller-compacted-concrete/docview/198081544/se-2?accountid=14542>
- [40] F. Tartarini, S. Schiavon, T. Cheung, and T. Hoyt, "CBE Thermal Comfort Tool: Online tool for thermal comfort calculations and visualizations," *SoftwareX*, vol. 12, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.softx.2020.100563.
- [41] M. Hashemi, P. Shafigh, M. R. Bin Karim, and C. D. Atis, "The effect of coarse to fine aggregate ratio on the fresh and hardened properties of roller-compacted concrete pavement," *Constr Build Mater*, vol. 169, pp. 553–566, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.216.
- [42] BOE, Real Decreto 256/2016, de 10 de junio, por el que se aprueba la Instrucción para la recepción de cementos (RC-16). Madrid: Ministerio de la Presidencia, 2016. Accessed: Nov. 10, 2022. [Online]. Available: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2016-6167>
- [43] ASTM, "ASTM C128 – 15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate," 2015. doi: 10.1520/C0128-15.
- [44] ASTM, "ASTM C127 – 15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate," 2015. doi: 10.1520/C0127-15.
- [45] Portland Cement Association, "Guide Specification for Construction of Roller-Compacted Concrete Pavements," Illinois, Jun. 2004. Accessed: Sep. 10, 2021. [Online]. Available: <https://www.chaneyenterprises.com/files/productdocs/Guidetorcc.PDF>
- [46] C. Chhorn and S. W. Lee, "Influencing compressive strength of roller-compacted concrete," *Proceedings of the institution of civil engineers-construction materials*, vol. 171, no. 1, pp. 3–10, 2018, doi: 10.1680/jcoma.16.00009.
- [47] ASTM, "ASTM C33/C33M – 18: Standard Specification for Concrete Aggregates," 2018. doi: 10.1520/C0033\_C0033M-18.
- [48] P. Shafigh, M. Hashemi, B. H. Nam, and S. Koting, "Optimum moisture content in roller-compacted concrete pavement," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 21, no. 14, pp. 1769–1779, 2020, doi: 10.1080/10298436.2019.1567919.
- [49] ASTM, "ASTM D1557 – 12: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup> ))," 2012. doi: 10.1520/D1557-12.

- [50] G. García-Travé, M. J. Martínez-Echevarria, M. C. R. Gámez, and F. M. Navarro, "Bituminous mix response to plastic deformations: Comparison of the Spanish NLT-173 and UNE-EN 12697-22 wheel-tracking tests | Análisis comparativo del comportamiento de una mezcla bituminosa frente a deformaciones plásticas, atendiendo a los ensayos NLT /," DYNA (Colombia), vol. 79, no. 174, pp. 51–57, 2012.
- [51] G. M. García Travé, Análisis comparativo del comportamiento mecánico de mezclas bituminosas : normativa NLT-normativa UNE-EN : para la obtención del título de Doctor por la Universidad de Granada. Editorial Universidad de Granada, 2013.
- [52] M. Asad, M. H. Baluch, and A. H. Al-Gadhib, "Drying shrinkage stresses in concrete patch repair systems," Magazine of Concrete Research, vol. 49, no. 181, pp. 283–293, 1997, doi: 10.1680/macr.1997.49.181.283.
- [53] ASTM, "ASTM C157/C157M – 17: Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete," 2017. doi: 10.1520/C0157\_C0157M-17.
- [54] ASTM, "ASTM C39/C39M – 21: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," 2021. doi: 10.1520/C0039\_C0039M-21.
- [55] British Standards Institution, "BS EN 12390-3:2019 - TC: Tracked Changes. Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens," 2020. [Online]. Available: <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=00000000030407444>
- [56] ASTM, "ASTM C293/C293M-16: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)," 2016. doi: 10.1520/C0293\_C0293M-16.

## 4.2 Predicción de las propiedades físico-mecánicas de pavimentos de hormigón compactado con rodillo bajo diferentes condiciones de servicio y de mezcla en función del contenido de cemento y agua (Artículo 2)

Este capítulo está basado en la siguiente publicación: Prediction of the Physical-Mechanical Properties of Roller-Compacted Concrete Pavements under Different Service and Mix Conditions Based on Cement and Water Content,” Materials (Quartile: Q2) (JIF: 3.4), vol. 17, no. 3, p. 549, Jan. 2024, doi: 10.3390/ma17030549

### 4.2.1 Resumen

El hormigón compactado con rodillo (HCR) para pavimentos ha experimentado problemas en su comportamiento físico-mecánico durante periodos prolongados debido a las condiciones ambientales y de curado in situ. En consecuencia, este estudio tiene como objetivo presentar ecuaciones de regresión múltiple para calcular las propiedades físico-mecánicas del HCR para pavimentos bajo diferentes condiciones de servicio y mezcla. Para ello, la investigación incluyó dos contenidos de cemento y dos de agua, uno reducido con aditivo, y cuatro combinaciones de temperatura y humedad relativa. Para la calibración del modelo y la definición de las ecuaciones, se fabricaron muestras cúbicas y de vigas para realizar ensayos físico-mecánicos, como el contenido de humedad, la retracción y el módulo de rotura. Los datos obtenidos en laboratorio se estudiaron con la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) para determinar las mejores ecuaciones de regresión. Los principales hallazgos determinaron que el comportamiento de una mezcla de HCR a un tiempo de exposición ambiental prolongado es posible porque los modelos de superficie y la MSR fueron consistentes con las diferentes condiciones de servicio y de mezcla. Los modelos mostraron una precisión del 98.99% en la detección de cambios de retracción de 12 a 16% de cemento con 5.65% de agua en condiciones ambientales de seco a húmedo. Del mismo modo, el contenido de humedad y el módulo de rotura tuvieron un ajuste del 98.27 al 98.88%. Por último, la retracción por secado, con mezclas de 12% de cemento y variaciones del contenido de agua con efectos de aditivos reductores de agua y superplastificantes, tuvo un ajuste del 94.87%.

### 4.2.2 Introducción

Los pavimentos han experimentado avances tecnológicos significativos en la evaluación de su comportamiento en diversas condiciones, como la variación de la carga de los vehículos, la velocidad, la calidad del material, el tipo de subrasante y las condiciones ambientales específicas. Estos avances incluyen capacidades como la autorreparación, el registro de datos del vehículo (es decir, velocidad y carga) [1] y la integración con vehículos autónomos y eléctricos.

Además, se han desarrollado valiosas herramientas para gestores de carreteras, constructores e ingenieros civiles, que permiten inspeccionar con mayor eficacia y precisión los pavimentos de las carreteras [2]. Estas herramientas utilizan escaneados tridimensionales y enfoques semiautomatizados para evaluar el estado de las superficies de las carreteras tanto cualitativa como cuantitativamente [3].

Por otro lado, se han establecido metodologías para evaluar la estructura de los pavimentos mediante ensayos de deflexión no destructivos [4]. También se han desarrollado metodologías de dimensionamiento de pavimentos basadas en criterios de rendimiento para identificar el desarrollo del deterioro a lo largo del tiempo desde una perspectiva estructural y para evaluar el estado funcional de los pavimentos [5], [6]. Estos enfoques tienen en cuenta los costes

anuales relacionados con el pavimento, como el diseño, la construcción, el mantenimiento, la restauración, el refuerzo, el reciclado y la reconstrucción [7], [8], [9].

Además, se han implantado métodos de construcción más respetuosos con el medio ambiente, que contribuyen a la sostenibilidad de las carreteras al reducir la generación de contaminantes [10].

Como tendencia observada en todo el mundo, muchos países han mostrado interés en la implantación de pavimentos de hormigón compactado con rodillo (HCR), adoptando esta categoría en diversas aplicaciones constructivas. Entre ellas, los puertos, las instalaciones intermodales [11], [12], las áreas industriales pesadas, las áreas industriales ligeras, las áreas de servicio de los aeropuertos, las calles arteriales, las calles locales, el ensanche o sobreechancho de carreteras, las bermas [13], las instalaciones madereras, los lugares de compostaje y los depósitos de almacenamiento se han destacado como las más adecuadas para la incorporación del HCR. Esta preferencia sugiere que estas zonas se consideran vitales o propicias para el uso de HCR.

Los sistemas de pavimento multicapa para carreteras de alta velocidad, una categoría importante en la construcción de carreteras, no son la especialidad del HCR debido a la necesidad de realizar más estudios sobre diversos factores cruciales. Entre ellos, destaca la mejora de la textura y rugosidad del pavimento de hormigón compactado con rodillo (HCR) en relación con la resistencia al deslizamiento y el ruido, entre otros aspectos [14], [15], debido a las limitaciones en la velocidad a la que pueden circular los vehículos. Esta consideración favorece diferentes estructuras, como los pavimentos flexibles, ya que proporcionan una mayor adherencia a la superficie de rodadura. Sin embargo, pueden ser menos resistentes a cargas estáticas, bajas velocidades [16] y climas extremos [17], [18], [19], [20].

Las mezclas de HCR para pavimentos presentan varias ventajas en comparación con los pavimentos de hormigón tradicionales, destacándose como una alternativa más sostenible [21]. Estas mezclas requieren menos cemento [22] y permiten la incorporación de materiales reciclados [23], [24], lo cual contribuye significativamente a las políticas de aumentar la huella verde y promueve una mayor sostenibilidad ambiental [25]. No obstante, su aplicabilidad no ha alcanzado el mismo nivel de popularidad que los pavimentos flexibles, debido a la necesidad de más investigación sobre su resistencia al agrietamiento y su comportamiento bajo diversas condiciones climáticas, tanto a corto como a largo plazo [26], [27].

Los estudios de campo han mostrado que factores meteorológicos como las fluctuaciones de temperatura, niveles de humedad y patrones de precipitación afectan las tensiones de retracción del material. Estas variaciones en las condiciones ambientales pueden generar un comportamiento variable en las mezclas de HCR, lo que destaca la dificultad de mantener condiciones de curado uniformes en aplicaciones del mundo real [26]. Por lo tanto, es fundamental evaluar el impacto de estos factores ambientales dinámicos en el desempeño de los pavimentos de HCR.

Sin embargo, la mayoría de las investigaciones publicadas se han centrado en la evaluación de escenarios climáticos específicos, haciendo hincapié en la necesidad de establecer correlaciones entre las condiciones ambientales y los parámetros clave de diseño, como el cemento y el contenido de agua. Su objetivo es desarrollar modelos predictivos que tengan en cuenta la compleja interacción entre estas variables y el comportamiento del material a lo largo del tiempo. Además, la mayoría de las investigaciones publicadas anteriormente se han centrado en estudiar la respuesta del material tras 90 días de curado sumergido bajo el agua [33] para

mitigar el impacto de la maduración incompleta del hormigón y su capacidad de succión de poros [34]. Este período de curado extendido permite una mejor comprensión de cómo se comporta el pavimento de HCR en sus etapas de desarrollo posteriores. Es esencial indicar que las horas iniciales de curado son igualmente significativas, ya que es cuando pueden ocurrir algunos de los fenómenos más variables e influyentes. Los rápidos cambios de temperatura y humedad durante esta fase inicial pueden afectar sustancialmente a la microestructura del material y, en consecuencia, a su comportamiento a largo plazo.

Las metodologías más avanzadas han revelado que el pavimento de HCR presenta problemas en su comportamiento físico-mecánico durante periodos prolongados debido a la influencia de las condiciones ambientales y de curado sobre el terreno y cuando no se aplican los protocolos de laboratorio adecuados [13], [26]. Esto es crítico en la determinación del contenido de humedad, la retracción y la resistencia a la flexión.

Por lo tanto, debido a la necesidad de correlacionar los parámetros que gobiernan el comportamiento del HCR para pavimentos, los modelos matemáticos y estadísticos han tenido contribuciones significativas, especialmente la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) [35]. Actualmente, esta metodología permite calcular las propiedades mecánicas convencionales de los hormigones antes de la fabricación y la falla del material [36], con la adición de microfibras sintéticas en condiciones de congelación-descongelación [37], así como la variabilidad de las propiedades físico-mecánicas considerando el contenido de cemento y la relación agua-cemento [38].

En consecuencia, esta investigación tiene como objetivo proponer ecuaciones de regresión múltiple para calcular las propiedades físico-mecánicas [39] del pavimento de HCR bajo diferentes condiciones de servicio (gramos de vapor de agua por kilogramo de aire) y de mezcla (contenido de cemento [40] y relación agua-cemento [26], [38]) para entender el comportamiento del hormigón compactado del pavimento durante un largo período, y debido a que afectan a la retracción por secado, se estudió la retracción por secado desde el inicio hasta después de un mes de fabricación.

#### 4.2.3 Materiales y Métodos

La metodología utilizada en este estudio consta de dos etapas detalladas en la Figura 4.2.1: (1) materiales, muestras y ensayos, y (2) Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) [41]. La primera describe la selección de materiales, fabricación de mezclas, elaboración y corte de especímenes y ensayos de laboratorio, y la segunda se refiere al tratamiento de la información utilizando el método estadístico inferencial MSR. La figura 4.2.2 muestra las condiciones ambientales evaluadas durante 90 días, que incluyen 5, 6, 14 y 17 g de vapor de agua/kg de aire, equivalentes en este orden al 85% de humedad relativa (HR) a una temperatura de 25 °C, 70% a 25 °C, 30% a 25 °C y 10% a 40 °C.

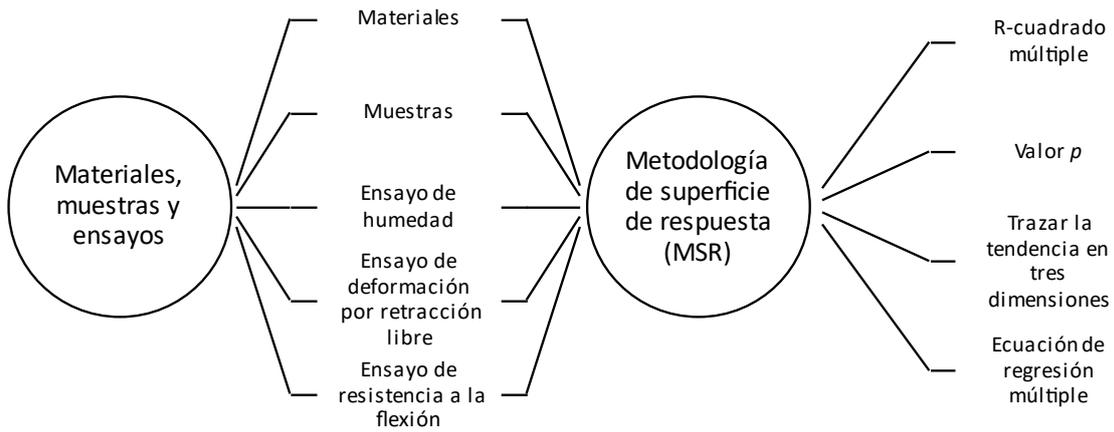


Figura 4.2.1. Metodología de la investigación.

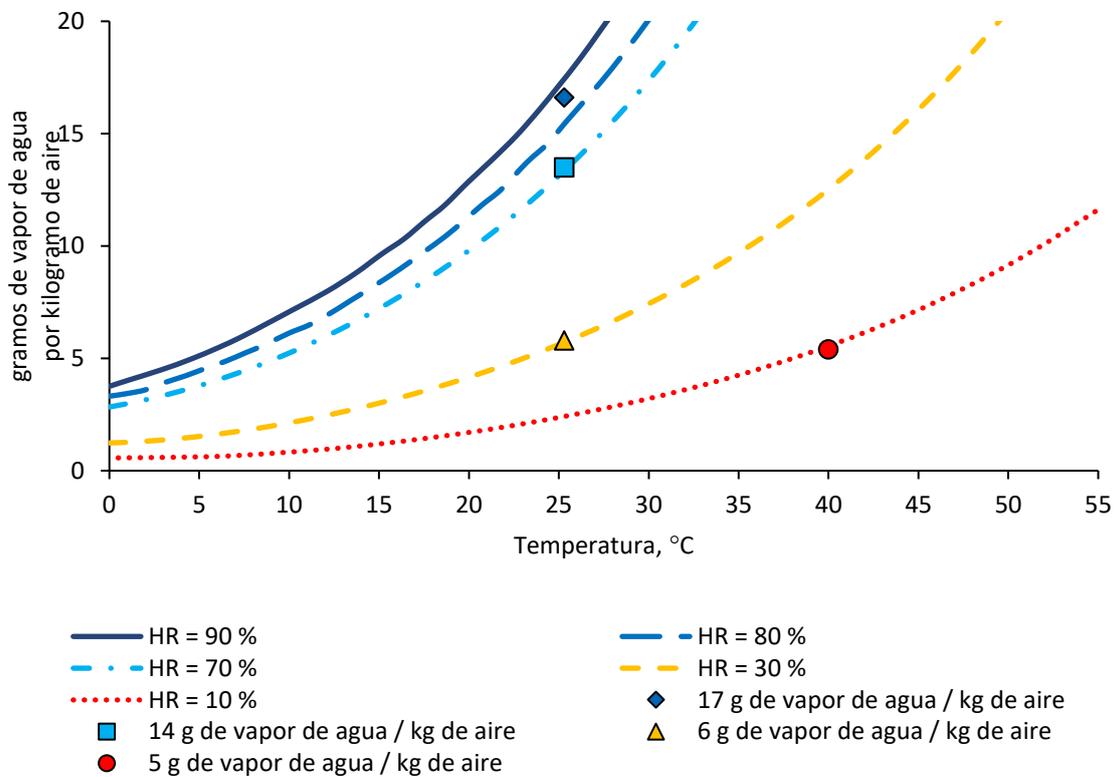


Figura 4.2.2. Condiciones ambientales, incluida la humedad relativa (HR,%), la temperatura (°C) y los gramos de vapor de agua por kilogramo de aire. Fuente: [42].

#### 4.2.3.1 Materiales, muestras y ensayos

Este estudio se centró en tres variedades de hormigón compactado con rodillo (HCR) destinadas a la pavimentación. El propósito era identificar la ecuación de regresión múltiple óptima, teniendo en cuenta factores como las condiciones ambientales, las cantidades de cemento y agua, y utilizando un superplastificante que actúa como reductor de agua en la mezcla. Se examinaron los efectos de modificar la proporción de cemento sin cambiar el contenido de agua y de disminuir el contenido de agua mediante aditivos sin limitar la cantidad de cemento.

Se utilizó un superplastificante siguiendo las dosis recomendadas por el fabricante. Contenía un porcentaje de agua más una cantidad mínima del aditivo, que era del 0.5% del peso del cemento.

El cemento Portland utilizado en este estudio fue del tipo CEM II/A-M, compuesto de 80 a 88% de clinker y 12 a 20% de escoria granulada de alto horno (GGBF), así como humo de sílice, puzolana, cenizas volantes, esquisto calcinado, piedra caliza y hasta 5% de otros componentes menores. El contenido de cemento se determinó de acuerdo con la revisión bibliográfica del HCR [43]. Por el contrario, el contenido de agua/cemento se estableció utilizando el método Proctor [21], [44], que consiste en un espécimen de hormigón compactado con rodillo (HCR) con una humedad predeterminada colocada en un molde en cinco capas. Cada capa se compacta con 56 golpes de un martillo de 44.48 N, cayendo desde una altura de 457.2 mm, generando aproximadamente una energía de compactación de 2,700 kN-m/m<sup>3</sup>. Posteriormente, se mide la densidad seca de la muestra compactada. Este procedimiento se repite con varias humedades de moldeo para trazar una curva que relacione estas humedades con las densidades secas correspondientes. Esta curva, conocida como curva de compactación, permitió identificar el contenido óptimo de humedad (COH) [45] del 5.65% sin aditivos y del 5% con aditivos y la densidad seca máxima para el ensayo de compactación de 2563 a 2610 g/cm<sup>3</sup> (Figura 4.2.3).

Se emplearon áridos de origen calizo con una gravedad específica media [46], [47] de 2.775. Las gravedades específicas variaron según las distintas fracciones de áridos: 2.840 para 16/25, 2.805 para 10/16, 2.805 para 5.6/10, y 2.732 para 4/5.6. La absorción total fue del 0.472%, con valores individuales de 0.460, 1.020, 0.946 y 0.153% para cada fracción. Estos áridos corresponden al rango granulométrico definido por la Portland Cement Association (PCA) en 2004, tal y como se representa en la Figura 4.2.4 [48], [49].

En base a los resultados obtenidos, se han definido los siguientes parámetros para cada mezcla de HCR, detallando su composición en la Tabla 4.2.1:

- HCR con 12% de cemento [43] y una relación agua-cemento de 0.47 (determinada según 5.65% de agua/12% de cemento).
- HCR con 16% de cemento y una relación agua-cemento de 0.35 (establecida según 5.65% de agua/16% de cemento).
- HCR con 12% de cemento [43], una mezcla de un superplastificante con un reductor de agua, y una relación agua-cemento de 0.42 (determinada según 5.0% de agua/12% de cemento).

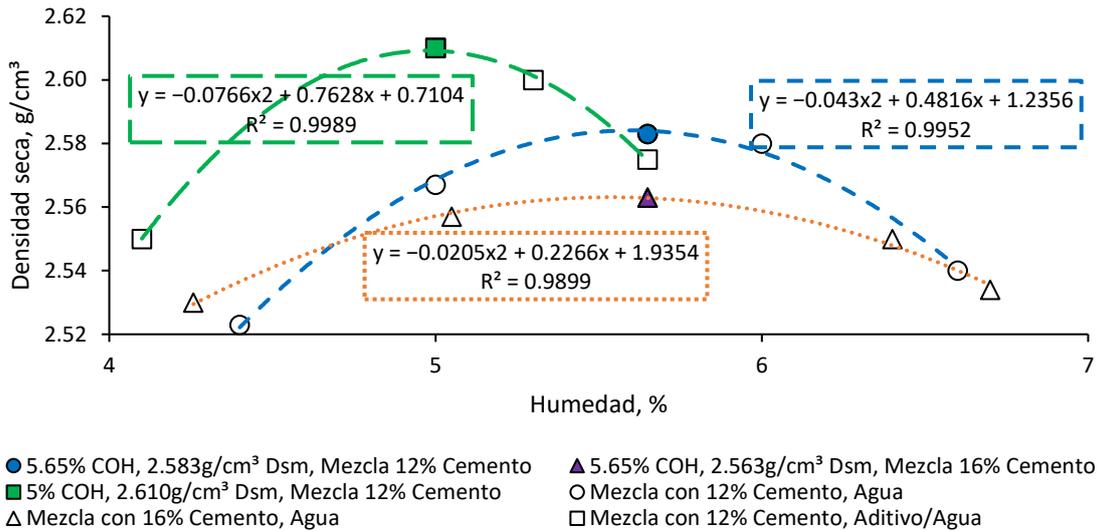


Figura 4.2.3. Curvas humedad-densidad. COH: contenido óptimo de humedad, Dsm: densidad seca máxima.

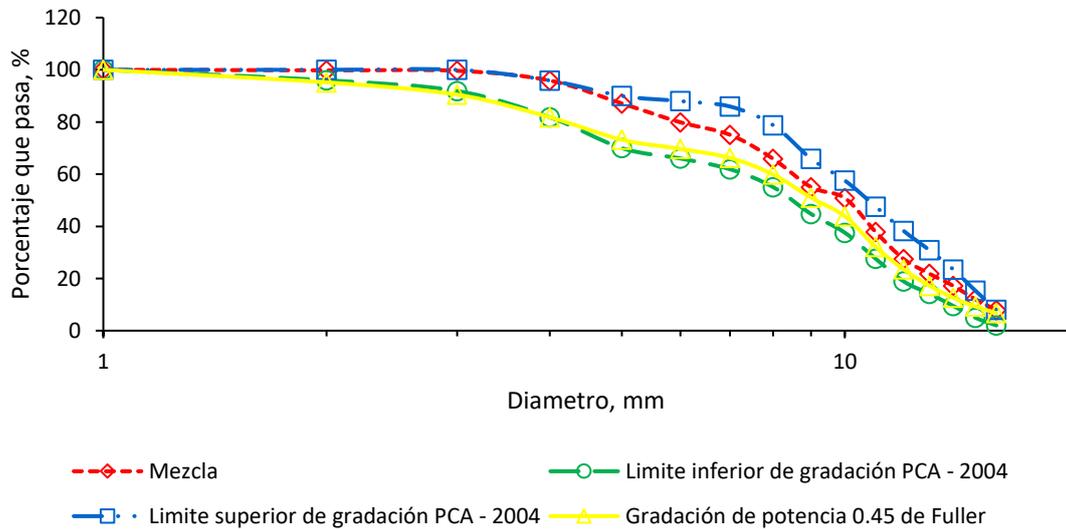


Figura 4.2.4. Gradación para pavimento de hormigón compactado con rodillo, según PCA (2004).

Tabla 4.2.1. Mezclas de hormigón compactado con rodillo (HCR).

| Material                 | W/C = 0.47     | W/C = 0.35     | W/C = 0.42     |
|--------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                          | Volumen (L/m³) | Volumen (L/m³) | Volumen (L/m³) |
| Cemento                  | 91.733         | 122.789        | 93.094         |
| Peso de los áridos secos | -              | -              | -              |
| Peso SSS de los áridos   | 767.216        | 735.210        | 778.604        |
| Agua absorbida           | -              | -              | -              |
| Agua en COH              | -              | -              | -              |
| Agua libre en COH        | 126.051        | 127.001        | 112.038        |
| Aditivo                  | -              | -              | 1.264          |
| 1.5% aire                | 15.000         | 15.000         | 15.000         |
| <b>Total</b>             | <b>1,000</b>   | <b>1,000</b>   | <b>1,000</b>   |

SSS: saturado superficialmente seco, COH: contenido óptimo de humedad, W/C: relación agua-cemento.

Las muestras se elaboraron y ensayaron según el procedimiento indicado en la figura 4.2.5. Se realizaron los siguientes pasos por muestra: (1) cada mezcla se fabricó utilizando una mezcladora rotatoria; (2) se construyeron moldes de 100 mm × 300 mm × 300 mm; (3) el hormigón se introdujo en los moldes en dos partes y se compactó con una placa vibratoria durante 1 min por capa. La maniobra completa duró 4 min; (4) una vez endurecidas las losas (100 mm × 300 mm × 300 mm), se desmoldaron y cortaron con una sierra eléctrica de diamante, obteniéndose cubos de 100 mm × 100 mm × 100 mm y vigas de 100 mm × 100 mm × 285 mm; (5) se prepararon las cámaras climáticas a 5, 6, 14 y 17 g de vapor de agua/kg de aire donde permanecieron durante 90 días y, posteriormente, se realizaron ensayos de contenido de humedad, deformación por retracción libre y resistencia a flexión.

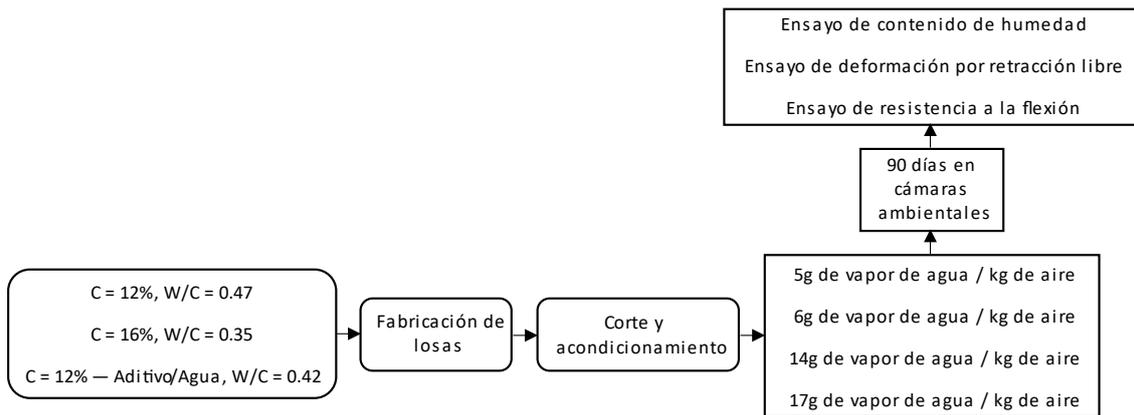


Figura 4.2.5. Plan de ensayos.

La determinación del contenido de humedad se realizó de acuerdo con los procedimientos descritos por Jafarifar et al. [33] y Asad et al. [50], que se consideran los enfoques más modernos y prácticos en la medición de la humedad mediante técnicas gravimétricas. El proceso se llevó a cabo de acuerdo con los siguientes pasos (1) se cortó el cubo de 100 mm × 100 mm × 100 mm en dos secciones, una con una altura de 10 mm y otra con una altura de 90 mm; (2) se pesó la sección de 10 mm de altura; (3) esta sección se selló con cinta adhesiva americana gris de alta resistencia en cuatro superficies (las superficies superior e inferior se dejaron libres); (4) a continuación, se pesó esta sección con la cinta adhesiva americana gris de alta resistencia; (5) posteriormente, se selló la sección de 90 mm de altura con cinta adhesiva americana gris de alta resistencia en cinco lados, excepto en el lado superior, porque tiene que estar en contacto con el lado inferior de la sección de 10 mm de altura; (6) las dos secciones del cubo se unieron con cinta de polivinilo amarilla; (7) cuando todas las muestras estuvieron listas, se introdujeron en una cámara climática; (8) las muestras se sacaron de las cámaras climáticas al cabo de 90 días, y la sección de 10 mm de altura se pesó sin la cinta de polivinilo amarilla; (9) posteriormente, las secciones de 10 mm de altura se pesaron sin la cinta adhesiva gris americana; (10) a continuación, se introdujeron en un horno hasta que se secaron, es decir, hasta alcanzar un peso constante; (11) por último, se calculó la humedad por día como la relación agua-peso sobre el peso seco. La figura 4.2.6 muestra los detalles del procedimiento.

Los ensayos de retracción [51] se realizaron durante un período de 90 días, con secciones de viga cuadradas de 100 × 100 mm y una altura de 285 mm. El procedimiento y el cálculo consistieron en los siguientes pasos (1) las vigas se sellaron con cinta adhesiva americana gris de alta resistencia en las caras laterales para evitar los efectos de tensión en la superficie de la viga y la compresión interna [33], [52], ya que suelen estar presentes en el proceso de secado; (2) se instalaron tornillos ciegos en las caras laterales de cada viga; (3) se realizó la primera medición

de las vigas en el marco fijo con un medidor de desplazamiento; (4) a continuación, se colocaron las vigas en las cámaras climáticas; (5) transcurridos 90 días, se sacaron las muestras de las cámaras climáticas para medirlas en el marco fijo con el mismo medidor de desplazamiento; (6) la deformación por retracción se calculó como la altura de la viga en estado húmedo menos la altura de la viga en estado seco sobre la altura de la viga en estado húmedo utilizando un equipo de medición de deformación libre observado en la Figura 4.2.7.

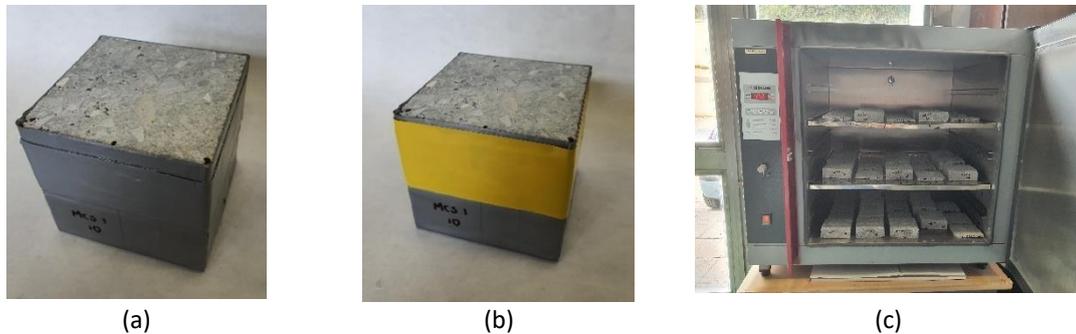


Figura 4.2.6. Muestras en cubo para el ensayo de contenido de humedad. (a) Sellado con cinta adhesiva americana gris de alta resistencia, (b) las dos secciones de la muestra en cubo unidas con cinta amarilla, (c) muestras en el horno.

Por último, se determinó el módulo de rotura de las vigas sometidas a ensayo de retracción con un dispositivo de carga de punto central y un sistema de soporte fijo y rodillos [53], [54]. El ensayo funcionó con una velocidad de carga de 0.02 MPa/s, y en éste se determinó el módulo de rotura en función de la carga máxima, la distancia del apoyo al plano de rotura y las dimensiones transversales de las vigas utilizando un equipo de medición de la resistencia a flexión observado en la Figura 4.2.7.

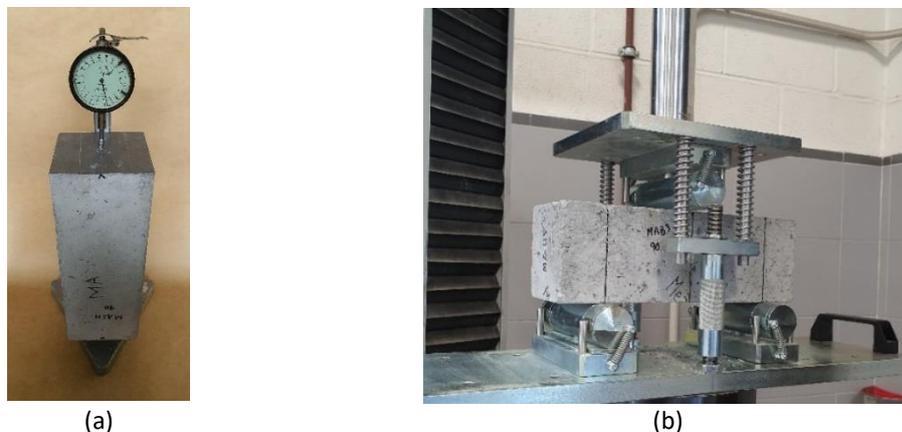


Figura 4.2.7. Ensayos mecánicos. (a) Ensayo de deformación por retracción libre, (b) ensayo de resistencia a la flexión.

#### 4.2.3.2 Metodología de Superficie de Respuesta

Los datos de la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) [55] se analizaron con el software "R-4.0.5", ya que es una herramienta práctica para la investigación y tiene una gran capacidad para procesar información utilizando métodos estadísticos avanzados. Se definieron las variables independientes y dependientes, estableciendo las primeras como los datos relacionados con el cemento y el vapor de agua por kilogramo de aire y las segundas, las determinadas en el laboratorio, incluyeron el contenido de humedad a 10mm de profundidad, el módulo de ruptura y la retracción por secado del hormigón compactado con rodillo (HCR) para pavimento durante 90 días.

El MSR utilizado en el estudio fue de primer orden (FO), de primer orden con interacción (FO + TWI), y cuadrático puro con interacción (PQ + TWI) modelos de función única. Las ecuaciones (1)-(3) son las regresiones múltiples que forman parte de cada modelo, respectivamente.

$$y = b_0 + b_1 \times x_1 + b_2 \times x_2 \quad (1)$$

$$y = b_0 + b_1 \times x_1 + b_2 \times x_2 + b_{12} \times x_1 \times x_2 \quad (2)$$

$$y = b_0 + b_{11} \times (x_1)^2 + b_{22} \times (x_2)^2 + b_{12} \times x_1 \times x_2 \quad (3)$$

Donde  $y$  es la respuesta o variable dependiente,  $x_1$  y  $x_2$  son las variables independientes,  $b_0$  define la interacción de la superficie con el eje de ordenadas, y  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_{12}$ ,  $b_{11}$  y  $b_{22}$  son los coeficientes parciales de regresión. Para el presente estudio, el contenido de humedad ( $w_{10}$ ), la deformación por retracción ( $s$ ) y el módulo de rotura ( $M_r$ ) fueron las variables dependientes;  $x_1$  y  $x_2$  fueron el vapor de agua por kilogramo de aire (WA), el contenido de cemento (C) o la relación agua-cemento (W/C).

Por lo tanto, los pasos aplicados para utilizar el MSR [56] se resumen en la Figura 4.2.8, donde se observa un diagrama de flujo que se inicia, declara y lee los datos de entrada (independientes) y de salida (dependientes). A continuación, se inicia un procedimiento condicional que verifica si el R-cuadrado múltiple es superior a 0.80 y el valor  $p$  es menor o igual a 0.05. Este proceso se lleva a cabo para elegir la mejor ecuación de regresión múltiple y la tendencia de los resultados mediante gráficos bidimensionales y tridimensionales. A continuación, se indican otros pasos del procedimiento:

- Establezca si los datos tienen un comportamiento de primer orden, cuadrático puro o de segundo orden, considerando la opción de interacción;
- Determinar qué modelo tiene el mejor ajuste. Se seleccionó el R-cuadrado múltiple como punto de referencia, ya que, si los datos se aproximan a 1, es posible establecer si las variables independientes afectan a las dependientes;
- Evaluar si las variables independientes diferían significativamente de las dependientes, predeterminado por un valor  $p$  inferior o igual a 0.05;
- Trazar la tendencia en tres dimensiones utilizando la función Plotly para comprender el comportamiento de los datos del estudio.

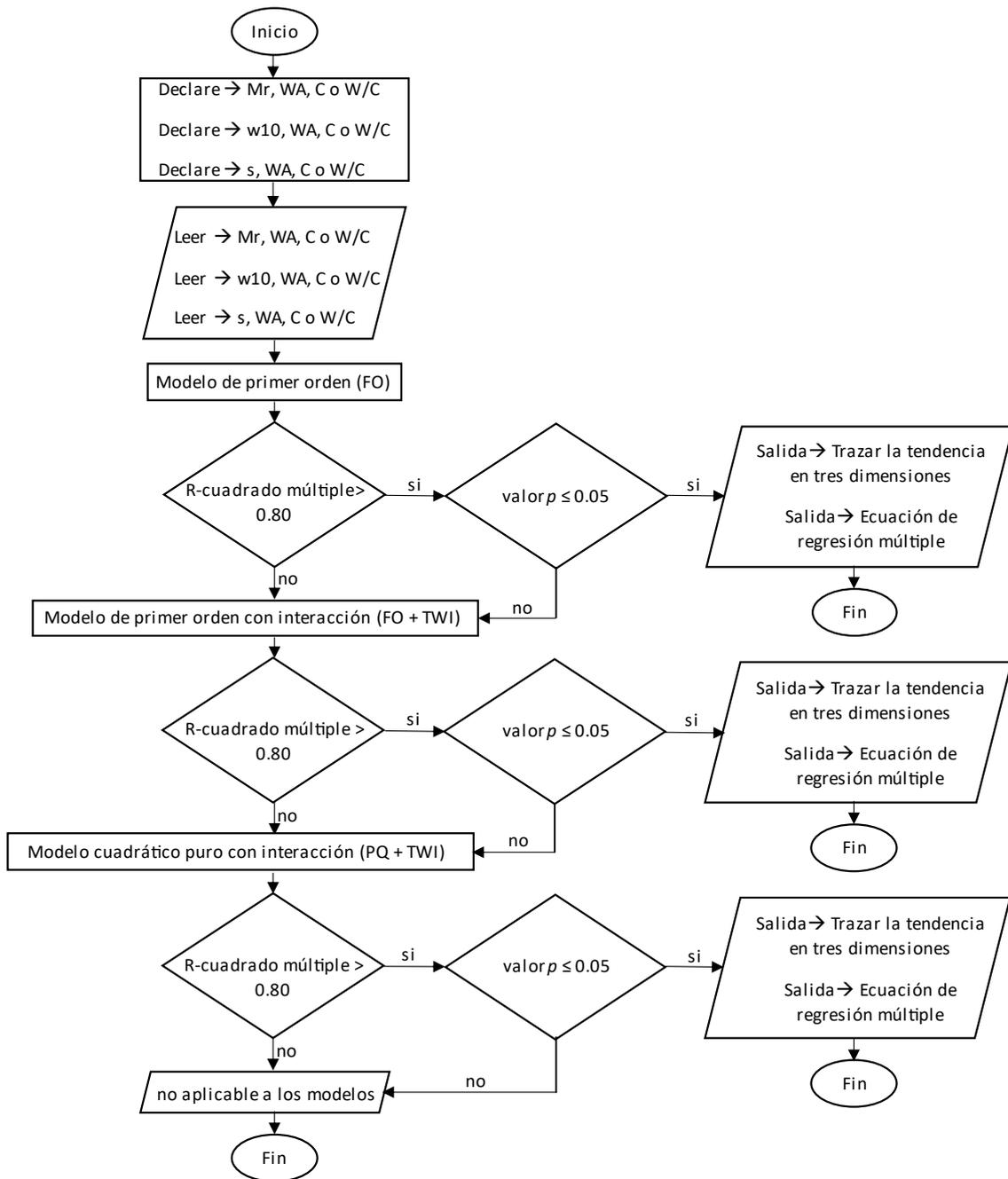


Figura 4.2.8. Diagrama de la metodología de superficie de respuesta (MSR). Mr: módulo de rotura, WA: vapor de agua por kilogramo de aire, C: contenido de cemento, W/C: relación agua-cemento.

#### 4.2.4 Resultados y Discusión

Los resultados se subdividieron en dos partes, (i) laboratorio y (ii) MSR, bajo diferentes condiciones de servicio (vapor de agua por kilogramo de aire) y mezcla de materiales (cemento, agua y aditivo/agua), explicando la respuesta de los modelos de superficie y las ecuaciones de regresión múltiple que mejor se ajustan a los datos de laboratorio.

##### 4.2.4.1 Resultados de laboratorio.

Los resultados de laboratorio en gramos de vapor de agua por kilogramo de aire (WA) frente al módulo de rotura en MPa (Mr) durante 90 días, según el contenido de cemento y la relación agua-cemento, se presentan mediante gráficos de dispersión (Figura 4.2.9). Los resultados

evolucionaron linealmente, con pendientes de crecimiento del 7 al 8% cuando el contenido de cemento fue del 16%. Sin embargo, cuando las HCR para pavimento se trabajaron con un 12% de cemento, los resultados mostraron que el gráfico no era lineal. Por lo tanto, se presenta la posibilidad de correlacionar el ambiente y el contenido de cemento con el módulo de ruptura, ya que los resultados del análisis unidimensional establecieron similitudes esenciales. El caso opuesto se observa al relacionar la mezcla de 12% de cemento más aditivo/agua.

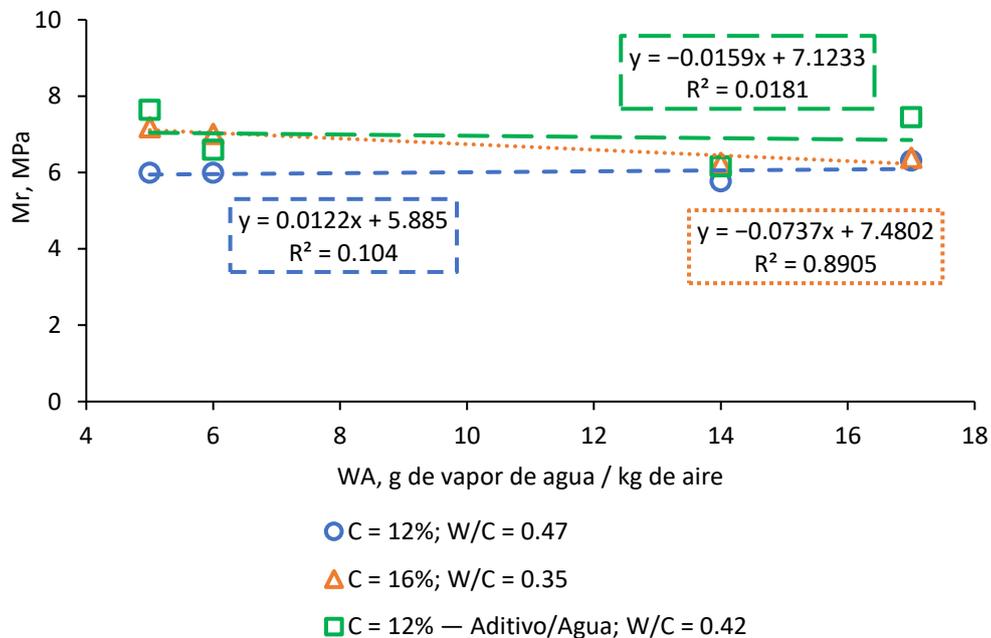


Figura 4.2.9. Evolución del módulo de rotura ( $M_r$ ) con el vapor de agua por kilogramo de aire (WA) a lo largo de 90 días. C: contenido de cemento, W/C: relación agua-cemento.

La figura 4.2.10 muestra la evolución del contenido de humedad a una profundidad de 10 mm ( $w_{10}$ ) con gramos de vapor de agua por kilogramo de aire (WA) según el contenido de cemento, la relación agua-cemento y la reducción de agua con aditivo/agua. Todos los resultados evolucionaron linealmente, excepto para el material con aditivo/agua. En el caso de este material, se observó que las pendientes de crecimiento se situaban en torno al 15-16% de humedad cuando las condiciones ambientales pasaban de secas a húmedas, y la mezcla funcionaba con un 16% de cemento y un 5.65% de agua ( $W/C = 0.35$ ). Por otro lado, las mezclas con un 12% de cemento obtuvieron pendientes de crecimiento del 12% y del 13 al 14% cuando el material se trabajó con un 5.65% ( $W/C = 0.47$ ) de agua y aditivo/5% de agua ( $W/C = 0.42$ ), respectivamente. Los resultados se ajustaron a los objetivos porque establecieron un punto de partida para diseñar ecuaciones de regresión múltiple en función de las condiciones ambientales representadas por gramos de vapor de agua por kilogramo de aire, cemento y contenido de humedad (véase la sección 4.2.4.2).

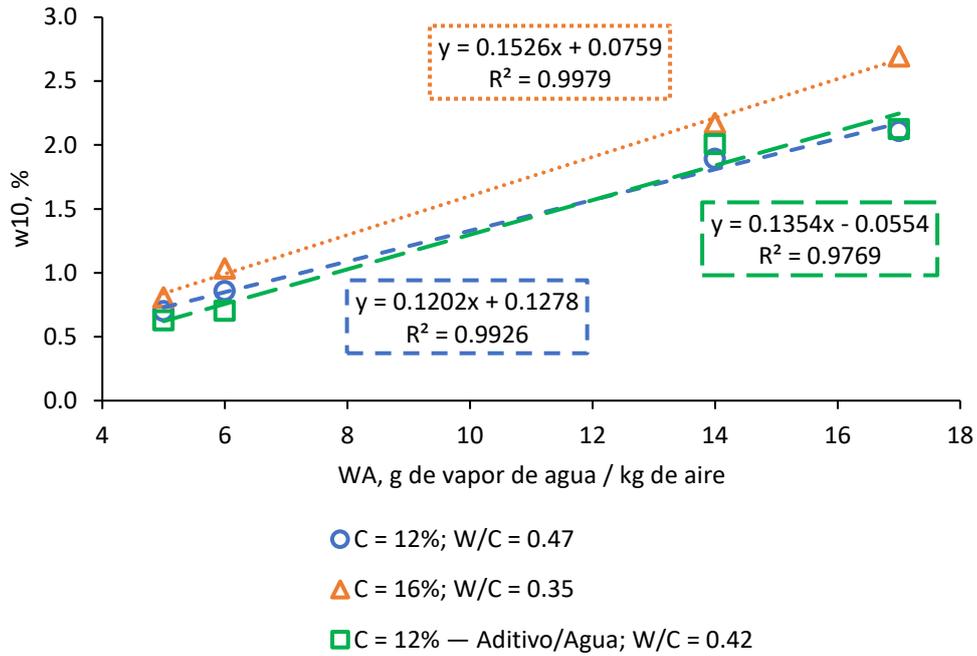


Figura 4.2.10. Evolución del contenido de humedad a 10 mm de profundidad ( $w_{10}$ ) con el vapor de agua por kilogramo de aire (WA) a lo largo de 90 días. C: contenido de cemento, W/C: relación agua-cemento.

La figura 4.2.11 muestra la evolución de la retracción por secado frente a gramos de vapor de agua por kilogramo de aire en función del contenido de cemento. Los resultados evolucionaron linealmente, obteniéndose una pendiente decreciente del 0.97% cuando el HCR para pavimento tenía un 12% de cemento y un 5.65% de agua (W/C = 0.47) en condiciones ambientales de seco a húmedo. Del mismo modo, cuando el HCR para pavimento trabajó con 16% de cemento y 5,65% de agua (W/C = 0.35), se registró un valor de 1.05%. Además, cuando el material trabajó con 12% de cemento y aditivo/5% de agua (W/C = 0.42), la pendiente fue de 0.86%. Los resultados responden al objetivo porque permiten observar, a partir de su comportamiento lineal, un punto de partida desde el que abordar la búsqueda de ecuaciones de regresión múltiple y, en consecuencia, la tendencia de los resultados (ver apartado 4.2.4.2).

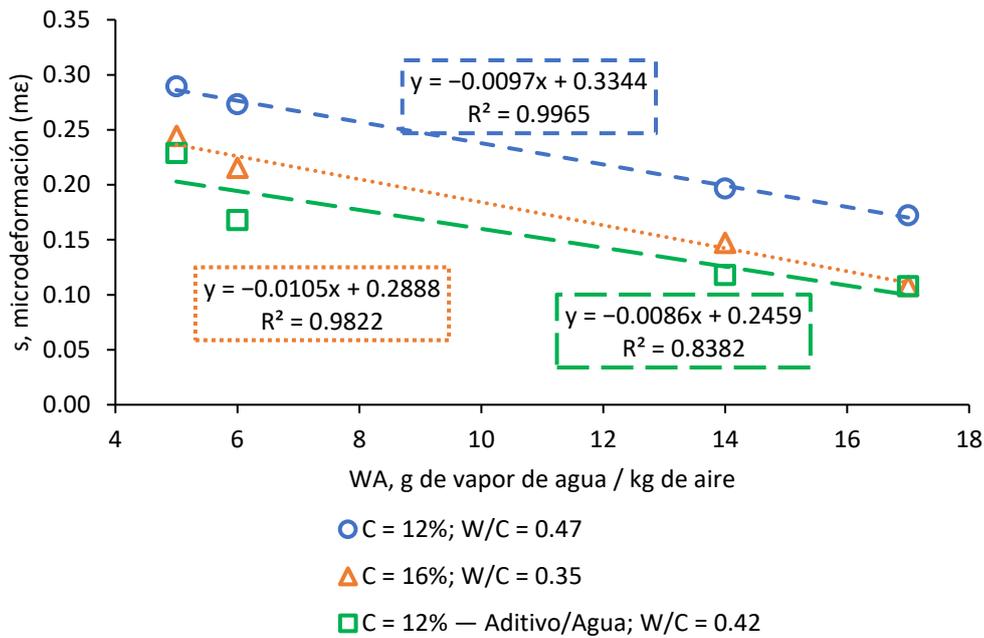


Figura 4.2.11. Evolución de la retracción de secado (s) con el vapor de agua por kilogramo de aire (WA) durante 90 días. C: contenido de cemento, W/C: relación agua-cemento.

#### 4.2.4.2 MSR en diferentes condiciones de servicio y mezcla

##### 4.2.4.2.1 Modelo de respuesta por contenido de cemento

Los resultados presentados en la Tabla 4.2.2 demuestran que el modelo cuadrático con interacción (PQ + TWI) es adecuado para determinar el módulo de rotura en función de las condiciones ambientales y del contenido de cemento, ya que el coeficiente de determinación R-cuadrado múltiple es igual a 0.9888, lo que indica una alta correlación entre las variables y la respuesta. Además, el valor  $p$  se utilizó para validar todas las variables del modelo, siendo inferior a 0.05 para las fuentes de variación del intercepto, el contenido de vapor de agua al cuadrado ( $WA^2$ ), el contenido de cemento al cuadrado ( $C^2$ ) y la interacción entre las variables ( $WA, C$ ). Estos resultados apoyan la idoneidad del vapor de agua sobre la cantidad de aire y el contenido de cemento como variables en el modelo MSR y confirman que impactan significativamente en el módulo de rotura bajo condiciones estándar de curado en campo de 90 días.

Es importante señalar que estos resultados concuerdan con la literatura existente en este campo, que ha señalado variaciones en el comportamiento del material y las condiciones de curado. Por ejemplo, se ha observado un comportamiento lineal en estudios con curado a 25°C durante 28 días [41]. Esto subraya la similitud entre el comportamiento registrado en este estudio y las observaciones previas, apoyando aún más la validez de los hallazgos obtenidos.

Tabla 4.2.2. Efecto del vapor de agua por kilogramo de aire (WA) y del contenido de cemento (C) en el módulo de rotura (Mr) a lo largo de 90 días utilizando la Metodología de Superficie de Respuesta.

| Fuente de variación                        | Estimación | Std. Error | Valor t | Valor p               | Diferencia significativa<br>(Sólo son significativos los valores $p \leq 0.05$ ) |
|--|------------|------------|---------|-----------------------|--|
| Intercepto                                 | 4.9462376  | 0.1016573  | 48.66   | $1.07 \times 10^{-6}$ | Si   |
| Cuadrático puro (WA, C)<br>WA <sup>2</sup> | 0.0130429  | 0.0013011  | 10.02   | 0.000557              | Si   |
| Cuadrático puro (WA, C) C <sup>2</sup>     | 0.0145394  | 0.0008686  | 16.74   | $7.46 \times 10^{-5}$ | Si   |
| Interacción en dos<br>direcciones (WA, C)  | -0.0222764 | 0.0019941  | -11.17  | 0.000366              | Si   |

Modelo: cuadrático puro con interacción (PQ + TWI); R-cuadrado múltiple: 0.9888; valor p: 0.0002337.

Una vez verificado el comportamiento del módulo de rotura (Mr) frente a los gramos de vapor de agua por kilogramo de aire (WA) y el contenido de cemento (C) como ecuación de regresión múltiple de tipo cuadrática pura con interacción (PQ + TWI), se procedió a su graficación. La Figura 4.2.12 muestra la tendencia de cada variable, determinando un mayor módulo de ruptura en el ambiente seco, es decir, en la superficie roja. Sin embargo, para condiciones ambientales intermedias localizadas en la superficie azul, se determinan valores inferiores del módulo de ruptura.

La figura 4.2.12 también muestra que el módulo de rotura permanece constante después de 16 g de vapor de agua/kg de aire y a partir del 12% de cemento. Sin embargo, de 6 a 12g de vapor de agua/kg de aire y de 12 a 16% de cemento, el módulo de rotura aumenta gradualmente. Por lo tanto, los resultados determinaron que las mezclas de HCR para pavimento tenían tendencias diferentes captadas por el modelo cuadrático puro con interacción (PQ + TWI), lo que conduce a una alternativa para calcular el comportamiento del material después de 90 días de fabricación.

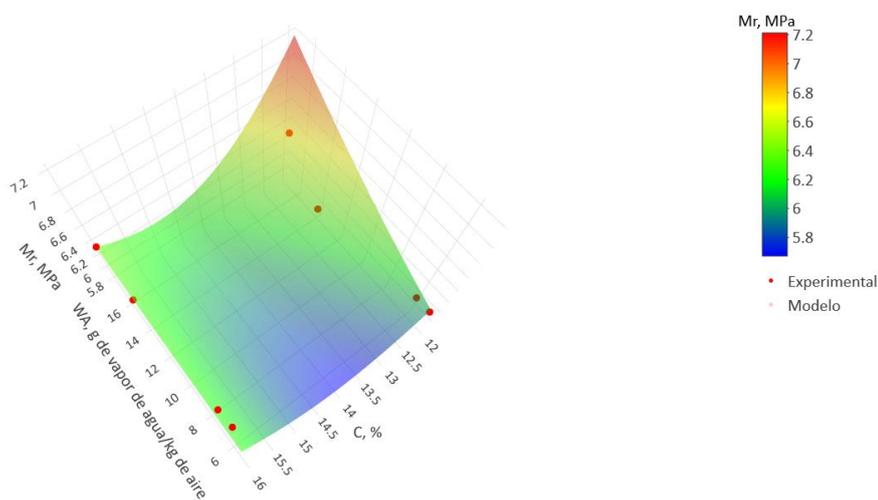


Figura 4.2.12. Efecto de los gramos de vapor de agua por kilogramo de aire (WA) y del contenido de cemento (C) en el módulo de rotura (Mr) a lo largo de 90 días.

Los resultados podrían ayudar para avanzar en el desarrollo del enfoque de cálculo retrospectivo multinivel [2], que aplica un algoritmo de optimización avanzado para establecer con precisión los parámetros de las capas de pavimento. Este enfoque se centra explícitamente en la determinación del módulo de rotura en capas de espesor fijo en pavimentos de hormigón compactado con rodillo (HCR).

La Tabla 4.2.3 presenta los resultados del ajuste del modelo para la humedad a una profundidad de 10 mm, considerando las fuentes de variación del intercepto junto con las variables vapor de agua por kilogramo de aire (WA) y contenido de cemento (C). Además, se muestran los valores  $p$  y el coeficiente de determinación R-cuadrado múltiple para cada variable y en el conjunto global del modelo. El modelo se caracteriza como de primer orden, con un coeficiente de determinación R-cuadrado múltiple de 0.9827, lo que indica un alto poder explicativo de las variables independientes sobre la humedad a 10 mm de profundidad. Además, el valor  $p$  es inferior a 0.05, lo que sugiere que el modelo es estadísticamente significativo. En este contexto, los resultados revelan que el contenido de cemento y las condiciones ambientales tienen un efecto lineal sobre la humedad a esta profundidad específica.

Tabla 4.2.3. Efecto del vapor de agua por kilogramo de aire (WA) y del contenido de cemento (C) en el contenido de humedad a 10 mm de profundidad ( $w_{10}$ ) a lo largo de 90 días utilizando la Metodología de Superficie de Respuesta.

| Fuente de variación | Estimación | Std. Error | Valor t | Valor $p$              | Diferencia significativa<br>(Sólo son significativos los valores $p \leq 0.05$ ) |
|---------------------|------------|------------|---------|------------------------|--|
| Intercepto          | -0.9069172 | 0.3113942  | -2.9124 | 0.03331                | Si   |
| WA                  | 0.1363643  | 0.0082556  | 16.5179 | $1.485 \times 10^{-5}$ | Si   |
| C                   | 0.0720525  | 0.0211486  | 3.4070  | 0.01911                | Si   |

Modelo: primer orden (FO); R-cuadrado múltiple: 0.9827; valor  $p$ :  $3.922 \times 10^{-5}$ .

La figura 4.2.13 presenta un modelo de superficie plana que relaciona gramos de vapor de agua por kilogramo de aire (WA), contenido de cemento (C) y contenido de humedad ( $w_{10}$ ) en porcentaje a lo largo de 90 días. Independientemente de las condiciones ambientales, puede observarse que a partir de un contenido de cemento del 12%, el contenido de humedad aumentó un 0.072% por cada unidad porcentual adicional de cemento. Estos resultados indican que la representación lineal de la superficie es adecuada para describir el modelo de regresión múltiple.

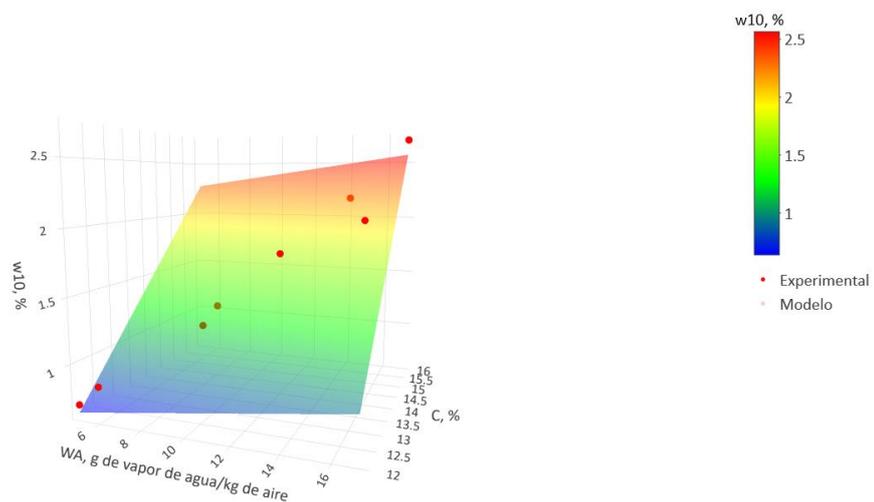


Figura 4.2.13. Efecto de los gramos de vapor de agua por kilogramo de aire (WA) y del contenido de cemento (C) en el contenido de humedad a 10 mm de profundidad ( $w_{10}$ ) a lo largo de 90 días.

La Tabla 4.2.4 verifica el modelo utilizado para calcular la retracción por secado, considerando como intercepto las fuentes de variación, es decir, los gramos de vapor de agua por kilogramo de aire (WA) y el contenido de cemento (C). Además, se evalúan los valores  $p$  y los coeficientes R-cuadrado múltiples para cada variable individual y el modelo en su conjunto, lo que confirma la idoneidad de la ecuación de regresión múltiple.

En esta ocasión, el modelo adoptado es de primer orden (FO), ya que el coeficiente R-cuadrado múltiple alcanza un valor de 0.9899, muy próximo a 1. Además, el valor  $p$  asociado es inferior a 0.05, lo que respalda la significación estadística del modelo. Además, el valor  $p$  asociado es inferior a 0.05, lo que respalda la significación estadística del modelo. Estos resultados indican que la ecuación más adecuada para calcular la retracción por secado es un modelo lineal de superficie, especialmente cuando se considera la interacción entre las condiciones ambientales y el contenido de cemento.

Tabla 4.2.4. Efecto del vapor de agua por kilogramo de aire (WA) y del contenido de cemento (C) sobre la retracción por secado (s) a 90 días utilizando la Metodología de Superficie de Respuesta.

| Fuente de variación | Estimación  | Std. Error | Valor t | Valor $p$              | Diferencia significativa<br>(Sólo son significativos los valores $p \leq 0.05$ ) |
|---------------------|-------------|------------|---------|------------------------|--|
| Intercepto          | 0.50085773  | 0.01933573 | 25.903  | $1.602 \times 10^{-6}$ | Si   |
| WA                  | -0.01006363 | 0.00051262 | -19.632 | $6.332 \times 10^{-6}$ | Si   |
| C                   | -0.01351872 | 0.00131320 | -10.294 | 0.0001487              | Si   |

Modelo: primer orden (FO); R-cuadrado múltiple: 0.9899; valor  $p$ :  $1.018 \times 10^{-5}$ .

La figura 4.2.14 presenta el modelo de superficie compuesto por los gramos de vapor de agua por kilogramo de aire (WA), el contenido de cemento en porcentaje (C) y la retracción de secado (s) en microstrain ( $m\epsilon$ ) a lo largo de 90 días. Se observó una superficie plana e inclinada, definiendo el contenido de cemento y la retracción por secado como linealmente relacionados. En consecuencia, para cada condición ambiental y a partir de un 12% de cemento, se calculó que la deformación por retracción disminuía en 0.013  $m\epsilon$  ( $0.013 \times 10^{-6}$ ) por cada unidad porcentual adicional de cemento. Los resultados determinaron que la superficie lineal representa adecuadamente el modelo de regresión múltiple.

Estos hallazgos podrían ayudar al desarrollo de una nueva versión de una herramienta semiautomatizada de inspección del estado de los pavimentos basada en escaneados de perfiles tridimensionales [3]. La retracción por secado y la humedad desempeñan un papel crucial en la microfisuración superficial de los pavimentos de hormigón compactado con rodillo (HCR), un aspecto esencial para su evaluación y mantenimiento.

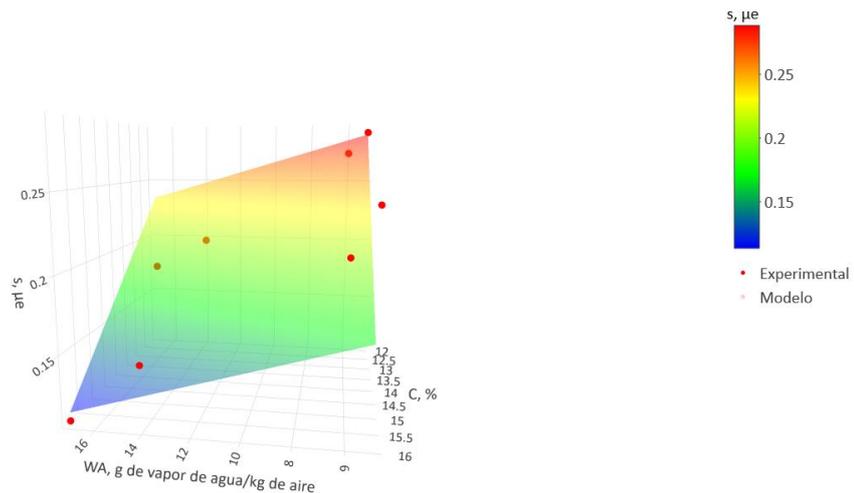


Figura 4.2.14. Efecto de los gramos de vapor de agua por kilogramo de aire (WA) y del contenido de cemento (C) en la retracción por secado (s) durante 90 días.

Finalmente, los resultados mostraron que los modelos superficiales determinados con los datos de laboratorio fueron validados exitosamente y permitieron calcular el comportamiento físico-mecánico de las mezclas HCR para pavimento a los 90 días. Para ello, en la Tabla 4.2.5 se muestran las ecuaciones de regresión múltiple correspondientes a cada modelo previamente estudiado, donde cada ecuación es función de una variable de mezcla y una variable de condición de servicio, como son el contenido de cemento en porcentaje (C) y los gramos de vapor de agua por kilogramo de aire (WA). Por lo tanto, los resultados cumplen el objetivo principal de la investigación, ya que todas las ecuaciones de regresión múltiple cumplen los requisitos estadísticos de R-cuadrado múltiple y valor  $p$ .

Tabla 4.2.5. Ecuaciones de regresión múltiple en diferentes condiciones de servicio y contenido de cemento (C).

| Ecuación  | Constantes de regresión  | R-cuadrado múltiple | Valor $p$              | Modelo   |
|---|--|---------------------|------------------------|----------|
| $Mr = b_0 + b_{11} \times (WA)^2 + b_{22} \times (C)^2 + b_{12} \times WA \times C$ | $b_0 = 4.9462376$<br>$b_{11} = 0.0130429$<br>$b_{22} = 0.0145394$<br>$b_{12} = -0.0222764$ | 0.9888              | 0.0002337              | PQ + TWI |
| $w_{10} = b_0 + b_1 \times WA + b_2 \times C$                                       | $b_0 = -0.9069172$<br>$b_1 = 0.1363643$<br>$b_2 = 0.0720525$                               | 0.9827              | $3.922 \times 10^{-5}$ | FO       |
| $s = b_0 + b_1 \times WA + b_2 \times C$  | $b_0 = 0.50085773$<br>$b_1 = -0.01006363$<br>$b_2 = -0.01351872$                           | 0.9899              | $1.018 \times 10^{-5}$ | FO       |

Mr: módulo de ruptura, WA: vapor de agua por kilogramo de aire, w10: contenido de humedad a 10mm de profundidad, s: retracción por secado, C: contenido de cemento, PQ + TWI: cuadrático puro con interacción, FO: primer orden.

#### 4.2.4.2.2 Modelo de respuesta basado en la relación agua-cemento

La Tabla 4.2.6 presenta los resultados obtenidos mediante MSR. Estos resultados abarcan varias fuentes de variación, como el intercepto, la cantidad de vapor de agua por kilogramo de aire (WA), la relación agua-cemento (W/C), las estimaciones de las constantes en la ecuación de regresión múltiple, los valores  $p$  y el coeficiente de determinación (R-cuadrado).

Es importante señalar que el único parámetro del estudio que cumple los criterios de ajuste es la retracción por secado ( $s$ ). El valor R-cuadrado se aproxima a 1, y el valor  $p$  es inferior a 0.05 para cada variable y el análisis global. Los resultados revelan que el modelo se ajusta adecuadamente a un modelo de orden de primer grado (FO).

Es relevante subrayar que el estudio logró alcanzar sus objetivos ya que el HCR para el pavimento con un contenido de cemento del 12%, incluyendo 5.65% o un 5% adicional de aditivo, concuerda con la ecuación de regresión múltiple de naturaleza lineal.

Tabla 4.2.6. Efecto del vapor de agua por kilogramo de aire (WA) y de la relación agua-cemento (W/C) sobre la retracción por secado ( $s$ ) durante 90 días utilizando la metodología de superficie de respuesta.

| Fuente de variación | Estimación | Std. Error | Valor t | Valor $p$ | Diferencia significativa<br>(Sólo son significativos los valores $p \leq 0.05$ ) |
|---------------------|------------|------------|---------|-----------|--|
| Intercepto          | -0.3977277 | 0.1131583  | -3.5148 | 0.0170134 | Si   |
| WA                  | -0.0091270 | 0.0012307  | -7.4159 | 0.0007021 | Si   |
| W/C                 | 1.5458007  | 0.2522270  | 6.1286  | 0.0016786 | Si   |

Modelo: primer orden (FO); R-cuadrado múltiple: 0.9487; valor  $p$ : 0.0005947.

La figura 4.2.15 ilustra la tendencia observada en la relación entre los gramos de vapor de agua por kilogramo de aire (WA), la relación agua-cemento (W/C) y la retracción por secado ( $s$ ) durante 90 días, considerando un contenido de cemento del 12% en el hormigón compactado con rodillo. Esto se compara con dos condiciones: 5.65% de agua (W/C = 0.47) y un aditivo que representa el 5% de agua (W/C = 0.42).

Los resultados muestran una evolución bajo una tendencia lineal al relacionar una cantidad estándar de cemento en la fabricación de hormigón compactado con rodillo, diferentes contenidos de agua y la inclusión de aditivos reductores de agua y superplastificantes. Para cada condición ambiental, se observa un incremento de 0.0618 mε ( $0.0618 \times 10^{-6}$ ) en la deformación por retracción por cada 0.04 de incremento en la relación agua-cemento.

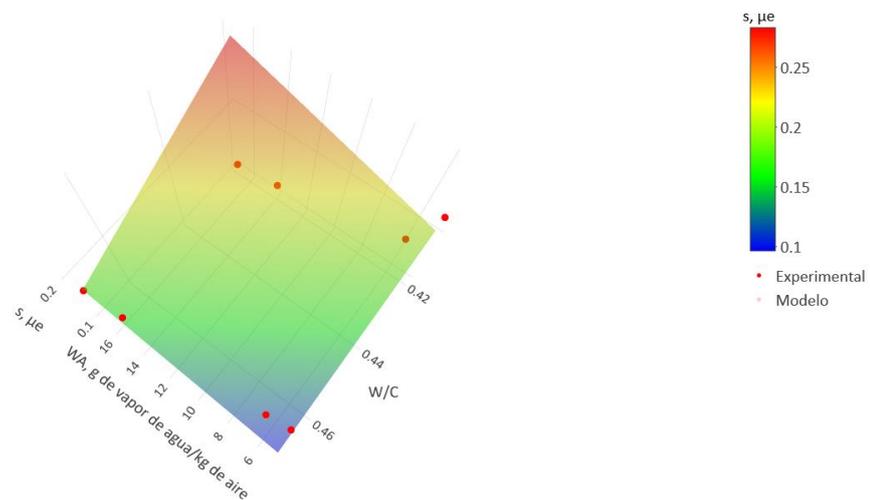


Figura 4.2.15. Efecto de los gramos de vapor de agua por kilogramo de aire (WA) y de la relación agua-cemento (W/C) sobre la retracción por secado ( $s$ ) a lo largo de 90 días.

Finalmente, los modelos de superficie calculados con la relación agua-cemento y los gramos de vapor de agua por kilogramo de aire (WA) fueron validados satisfactoriamente y permitieron calcular durante 90 días el comportamiento de la retracción por secado ( $s$ ) de las mezclas HCR

para pavimento bajo un contenido estándar de cemento del 12% y diversas cantidades de agua relacionadas con un aditivo reductor de agua y un superplastificante. Para ello, la Tabla 4.2.7 muestra las ecuaciones con sus respectivas constantes de regresión, R-cuadrado múltiple, valor  $p$  y modelo. Concretamente, los resultados responden al objetivo proponer ecuaciones de regresión múltiple para calcular las propiedades físico-mecánicas del HCR para pavimento bajo diferentes condiciones de servicio y de mezcla, ya que la ecuación de regresión cumplió los requisitos estadísticos del R-cuadrado y del valor  $p$ .

Tabla 4.2.7. Ecuaciones de regresión múltiple en diferentes condiciones de servicio y de relación agua-cemento (W/C).

| Ecuación                                     | Constantes de regresión | R-cuadrado múltiple | Valor $p$ | Modelo |
|--|-------------------------|---------------------|-----------|--------|
| $s = b_0 + b_1 \times WA + b_2 \times (W/C)$ | $b_0 = -0.3977277$      | 0.9487              | 0.0005947 | FO     |
|  | $b_1 = -0.0091270$      |                     |           |        |
|  | $b_2 = 1.5458007$       |                     |           |        |

s: retracción por secado, WA: vapor de agua por kilogramo de aire, W/C: relación agua-cemento, FO: modelo de primer orden.

#### 4.2.5 Conclusiones

La presente investigación creó ecuaciones de regresión múltiple para un período de cálculo de 90 días de las propiedades físico-mecánicas del hormigón compactado con rodillo (HCR) para pavimento en condiciones ambientales normales, como la cantidad de vapor de agua por kilogramo de aire, evaluando la evolución del contenido de humedad, la deformación por retracción y la resistencia a la flexión. Además, los materiales estudiados presentaban variaciones en la cantidad de cemento y agua en el proceso de fabricación. De los resultados obtenidos se extraen las siguientes conclusiones:

- Los resultados de laboratorio pueden ajustarse a las ecuaciones de regresión múltiple porque se aproximan a uno en el R-cuadrado, y el valor  $p$  de la prueba estadística es inferior a 0.05. Estos resultados determinaron un modelo cuadrático puro con interacción (PQ + TWI) para el módulo de rotura, similar al encontrado en los estudios del estado de la técnica, y un modelo de primer orden (FO) para la retracción por secado y el contenido de humedad.
- El estudio indica que el módulo de rotura del hormigón compactado con rodillo varía con los cambios en las condiciones ambientales y el contenido de cemento. Con un 12% de cemento, la resistencia disminuye un 4% en condiciones ambientales con 6-10 g de vapor de agua por kilogramo de aire, pero aumenta un 4.2% con 10-16 g de vapor. Aumentar el cemento al 16% reduce la resistencia al 8% en condiciones ambientales de 6-14 g de vapor, pero sólo al 1% en 14-16 g. Esto indica que la relación entre la resistencia y las condiciones ambientales no es lineal, lo que sugiere utilizar modelos de cálculo no lineales para realizar estimaciones precisas.
- En mezclas de hormigón compactado con rodillo (HCR) con un contenido de cemento del 12%, se ha registrado que la retracción por secado disminuye hasta un 14% con cada aumento de 3 a 4 g de vapor de agua por kilogramo de aire. Esta reducción es aún más significativa, alcanzando el 18%, cuando la proporción de cemento aumenta hasta el 16%. Este hallazgo es especialmente relevante cuando se contrasta con el comportamiento del contenido de humedad, ya que las mezclas con un mayor porcentaje de cemento tienden a absorber más agua de las condiciones ambientales. Por lo tanto, se concluye que el aumento del contenido de cemento del 12% al 16% en mezclas de HCR destinadas a pavimentación conduce a una disminución adicional de hasta el 4% en la retracción por secado por cada aumento de 3 a 4 g de vapor de agua por kilogramo de aire.

- La ecuación de regresión múltiple para calcular la retracción de secado en mezclas de 12% de cemento, 5.65% (W/C = 0.47) de agua y aditivo/5% de agua (W/C = 0.42) revela que la retracción disminuye en un 49% con cada aumento de 3 a 4 g de vapor de agua por kilogramo de aire cuando la relación agua-cemento es de 0.36. Sin embargo, en mezclas con una relación agua-cemento más alta, la retracción de secado disminuye en un 4% con cada aumento de 3 a 4 g de vapor de agua por kilogramo de aire. En mezclas con mayor contenido de agua (relación agua-cemento de 0.48), la reducción de la retracción puede llegar al 12%. Esto subraya la importancia de desarrollar una ecuación de regresión que considere mezclas con idéntico contenido de cemento pero que varíe la cantidad de agua y aditivos.
- Por último, existe la posibilidad de ampliar la investigación para analizar las propiedades físico-mecánicas de las mezclas de HCR en condiciones de servicio con otros aditivos en la práctica diaria. Asimismo, debería considerarse la integración de materiales sostenibles, como los áridos alternativos derivados del hormigón reciclado, los áridos de asfalto reciclado, escoria de horno de arco eléctrico, escoria de siderurgia y los materiales de neumáticos reciclados, como los gránulos de caucho y las fibras de polipropileno.

#### 4.2.6 Referencias

- [1] F. Moreno-Navarro, F. J. Sierra-Carrillo de Albornoz, M. Sol-Sánchez, and M. C. Rubio-Gómez, "MASAI: sustainable, automated and intelligent asphalt materials. The way to the next generation of asphalt pavements," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 24, no. S1, pp. 486–505, 2023, doi: 10.1080/14680629.2023.2181007.
- [2] T. Garbowski and A. Pożarycki, "Multi-level backcalculation algorithm for robust determination of pavement layers parameters," *Inverse Probl Sci Eng*, vol. 25, no. 5, pp. 674–693, May 2017, doi: 10.1080/17415977.2016.1191073.
- [3] T. Garbowski and T. Gajewski, "Semi-automatic Inspection Tool of Pavement Condition from Three-dimensional Profile Scans," *Procedia Eng*, vol. 172, pp. 310–318, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.004.
- [4] J. Fengier, A. Pozarycki, and T. Garbowski, "Stiff-plate bearing test simulation based on FWD results," in *Procedia Engineering*, 2013, pp. 270–277. doi: 10.1016/j.proeng.2013.04.037.
- [5] R. O. Rasmussen, J. M. Ruiz, D. K. Rozycki, and B. F. McCullough, *Constructing high-performance concrete pavements with FHWA HIPERPAV systems analysis software*, no. 1813. 2002.
- [6] AASHTO, *Mechanistic-empirical pavement design guide. A Manual of Practice*, American A. 2015.
- [7] H. R. Kerali, D. C. Wightman, E. E. Stannard, and ASCE, "Design and development of the HDM-4 software," in *Proceedings of the 1998 International Computing Congress on Computing in Civil Engineering*, Reston, VA, United States: ASCE, 1998, pp. 588–602. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0031641535&partnerID=40&md5=dd358506c68898b5a0ee6b9970546e9b>
- [8] D. Mrawira, W. J. Welch, M. Schonlau, and R. Haas, "Sensitivity analysis of computer models: World bank HDM-III model," *J Transp Eng*, vol. 125, no. 5, pp. 421–428, 1999, doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1999)125:5(421).

- [9] L. Kannemeyer and A. T. Visser, "Calibration of HDM-III performance models for use in pavement management of South African national roads," *Transp Res Rec*, no. 1508, pp. 31–38, 1995, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0029333857&partnerID=40&md5=ae899597ada8ce53cca8d11244dc5af3>
- [10] A. Sha et al., "Advances and development trends in eco-friendly pavements," *Journal of Road Engineering*, vol. 1, pp. 1–42, 2021, doi: 10.1016/j.jreng.2021.12.002.
- [11] M. Smallridge and M. Elbaz, "RCC pavement success at mobile container terminal," in *Ports 2010: Building on the Past, Respecting the Future - Proceedings of the 12th Triannual International Conference*, 2010, pp. 901–911. doi: 10.1061/41098(368)93.
- [12] R. Mickevič and A. Vaitkus, "Application of roller-compacted concrete in freight terminals," *Mokslas: Lietuvos Ateitis*, vol. 12, Jan. 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.3846/mla.2020.13067>.
- [13] Y. S. Kim, "Roller-compacted concrete shoulder construction on interstate highway in Georgia," *Transp Res Rec*, no. 2040, pp. 71–79, 2007, doi: 10.3141/2040-08.
- [14] M. Adresi and G. Lacidogna, "Investigating the micro/macro-texture performance of roller-compacted concrete pavement under simulated traffic abrasion," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 12, 2021, doi: 10.3390/app11125704.
- [15] M. Adamu, B. S. Mohammed, N. Shafiq, and M. Shahir Liew, "Skid Resistance of nano silica modified roller compacted rubbercrete for pavement applications: Experimental methods and response surface methodology," *Cogent Eng*, vol. 5, no. 1, p. 1452664, Jan. 2018, doi: 10.1080/23311916.2018.1452664.
- [16] F. Moreno, M. Sol, J. Martín, M. Pérez, and M. C. Rubio, "The effect of crumb rubber modifier on the resistance of asphalt mixes to plastic deformation," *Mater Des*, vol. 47, pp. 274–280, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.12.022.
- [17] A. H. Guha and G. J. Assaf, "Effects of different fillers on pavement deformation of hot mix asphalt in hot climates," *Constr Build Mater*, vol. 261, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119898.
- [18] S. Zhao, J. Liu, P. Li, and T. Burritt, "Asphalt binder adaption for climatic conditions in cold regions: Alaska experience," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, no. 1, 2017, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001709.
- [19] F. Moreno-Navarro, M. Sol-Sánchez, and M. C. Rubio-Gámez, "The effect of polymer modified binders on the long-term performance of bituminous mixtures: The influence of temperature," *Mater Des*, vol. 78, pp. 5–11, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.04.018.
- [20] F. Moreno-Navarro, F. J. Sierra, M. Sol-Sánchez, M. C. Rubio-Gámez, M. Castillo, and E. Estévez, "High-Performance Sustainable Asphalt Mixtures for High-Volume Traffic Roads in Severe Climates," *Sustainability*, vol. 12, no. 21, p. 8765, Oct. 2020, doi: 10.3390/su12218765.
- [21] A. Mardani-Aghabaglou, S. H. Bayqra, S. Ozen, M. G. Altun, Z. A. Faqiri, and K. Ramyar, "Review of research on designing methods and properties of roller compacted concrete mixtures," *Pamukkale university journal of engineering sciences-pamukkale universitesi*

- muhendislik bilimleri dergisi, vol. 26, no. 3, pp. 419–431, 2020, doi: 10.5505/pajes.2019.93530.
- [22] F. Vahedifard, M. Nili, and C. L. Meehan, “Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement,” *Constr Build Mater*, vol. 24, no. 12, pp. 2528–2535, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.003.
- [23] S. Debbarma and G. D. Ransinchung R.N., “Achieving sustainability in roller compacted concrete pavement mixes using reclaimed asphalt pavement aggregates – state of the art review,” *J Clean Prod*, vol. 287, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125078.
- [24] M. Selvam and S. Singh, “Material Selection and Mixture Proportioning Methods for Sustainable Roller-Compacted Concrete Pavements,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 34, no. 11, 2022, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004325.
- [25] A. Modarres, S. Hesami, M. Soltaninejad, and H. Madani, “Application of coal waste in sustainable roller compacted concrete pavement-environmental and technical assessment,” *International journal of pavement engineering*, vol. 19, no. 8, pp. 748–761, 2018, doi: 10.1080/10298436.2016.1205747.
- [26] T. Sok, Y. K. Kim, J. Y. Park, and S. W. Lee, “Evaluation of early-age strains and stresses in roller-compacted concrete pavement,” *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2021, doi: 10.1016/j.jtte.2020.04.007.
- [27] S. Saluja, K. Kaur, S. Goyal, and B. Bhattacharjee, “Long-Term Drying Shrinkage of GGBFS-Incorporated RCC under Various Temperature Exposures,” *Journal of materials in civil engineering*, vol. 33, no. 6, 2021, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003746.
- [28] M. Abbasi, P. Shafigh, and M. R. Baharum, “The effect of coarse to fine aggregate ratio on drying shrinkage of roller compacted concrete pavement in different curing conditions,” *Materiales de construcción*, vol. 71, no. 342, 2021, doi: 10.3989/mc.2021.03520.
- [29] Ö. F. Keleş and M. V. Akpınar, “Strength properties of roller compacted concrete pavement (RCCP) under different curing methods,” *Constr Build Mater*, vol. 324, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126530.
- [30] N. Delatte and TRB, “Simplified design of roller-compacted concrete composite pavement,” in *Pavement design and accelerated testing 2004*, no. 83rd Annual Meeting of the Transportation-Research-Board, 2004, pp. 57–65. doi: 10.3141/1896-06.
- [31] S. M. Hejazi, S. M. Abtahi, and F. Safaie, “Investigation of thermal stress distribution in fiber-reinforced roller compacted concrete pavements,” *Journal of Industrial Textiles*, vol. 45, no. 5, pp. 896–914, 2016, doi: 10.1177/1528083714542827.
- [32] N. Jafarifar, K. Pilakoutas, and T. Bennett, “The effect of shrinkage cracks on the load bearing capacity of steel-fibre-reinforced roller-compacted-concrete pavements,” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 49, no. 6, pp. 2329–2347, 2016, doi: 10.1617/s11527-015-0652-0.

- [33] N. Jafarifar, K. Pilakoutas, and T. Bennett, "Moisture transport and drying shrinkage properties of steel-fibre-reinforced-concrete," *Constr Build Mater*, vol. 73, pp. 41–50, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.039.
- [34] A. M. Lotphi and A. Modarres, "Effect of surface free energy on water absorption of roller-compacted concrete pavement containing calcium stearate powder," *Road Materials and Pavement Design*, 2022, doi: 10.1080/14680629.2022.2058987.
- [35] A. Aghaeipour and M. Madhkhan, "Mechanical properties and durability of roller compacted concrete pavement (RCCP)—a review," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 21, no. 7, pp. 1775–1798, 2020, doi: 10.1080/14680629.2019.1579754.
- [36] A. Ashrafiyan et al., "Classification-Based Regression Models for Prediction of the Mechanical Properties of Roller-Compacted Concrete Pavement," *APPLIED SCIENCES-BASEL*, vol. 10, no. 11, 2020, doi: 10.3390/app10113707.
- [37] K. Siamardi and S. Shabani, "Evaluation the effect of micro-synthetic fiber on mechanical and freeze-thaw behavior of non-air-entrained roller compacted concrete pavement using response surface methodology," *Constr Build Mater*, vol. 295, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123628.
- [38] E. Rahmani, M. K. Sharbatdar, and M. H.A.Beygi, "A comprehensive investigation into the effect of water to cement ratios and cement contents on the physical and mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP)," *Constr Build Mater*, vol. 253, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119177.
- [39] S. Husein Bayqra, A. Mardani-Aghabaglou, and K. Ramyar, "Physical and mechanical properties of high volume fly ash roller compacted concrete pavement (A laboratory and case study)," *Constr Build Mater*, vol. 314, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125664.
- [40] E. Rahmani, M. K. Sharbatdar, and M. H.A. Beygi, "Influence of cement contents on the fracture parameters of Roller compacted concrete pavement (RCCP)," *Constr Build Mater*, vol. 289, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123159.
- [41] H. Rooholamini, A. Hassani, and M. R. M. Aliha, "Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology," *Constr Build Mater*, vol. 159, pp. 517–529, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.002.
- [42] F. Tartarini, S. Schiavon, T. Cheung, and T. Hoyt, "CBE Thermal Comfort Tool: Online tool for thermal comfort calculations and visualizations," *SoftwareX*, vol. 12, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.softx.2020.100563.
- [43] M. Hashemi, P. Shafigh, M. R. Bin Karim, and C. D. Atis, "The effect of coarse to fine aggregate ratio on the fresh and hardened properties of roller-compacted concrete pavement," *Constr Build Mater*, vol. 169, pp. 553–566, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.216.
- [44] ASTM, "ASTM D1557 – 12: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)), 2012. doi: 10.1520/D1557-12.

- [45] P. Shafigh, M. Hashemi, B. H. Nam, and S. Koting, "Optimum moisture content in roller-compacted concrete pavement," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 21, no. 14, pp. 1769–1779, 2020, doi: 10.1080/10298436.2019.1567919.
- [46] ASTM, "ASTM C128 – 15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate," 2015. doi: 10.1520/C0128-15.
- [47] ASTM, "ASTM C127 – 15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate," 2015. doi: 10.1520/C0127-15.
- [48] C. Chhorn and S. W. Lee, "Influencing compressive strength of roller-compacted concrete," *Proceedings of the institution of civil engineers-construction materials*, vol. 171, no. 1, pp. 3–10, 2018, doi: 10.1680/jcoma.16.00009.
- [49] ASTM, "ASTM C33/C33M – 18: Standard Specification for Concrete Aggregates," 2018. doi: 10.1520/C0033\_C0033M-18.
- [50] M. Asad, M. H. Baluch, and A. H. Al-Gadhib, "Drying shrinkage stresses in concrete patch repair systems," *Magazine of Concrete Research*, vol. 49, no. 181, pp. 283–293, 1997, doi: 10.1680/mac.1997.49.181.283.
- [51] ASTM, "ASTM C157/C157M – 17: Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete," 2017. doi: 10.1520/C0157\_C0157M-17.
- [52] N. Jafarifar, "Shrinkage behaviour of steel-fibre-reinforced-concrete pavements," UK, 2012. Accessed: Jan. 26, 2021. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/29030273.pdf>
- [53] ASTM, "ASTM C293/C293M-16: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)," 2016. doi: 10.1520/C0293\_C0293M-16.
- [54] I. Brotman, M. Crist, and J. Gaul, "Roller compacted concrete pavement: Properties, design, and construction," in *Geotechnical Special Publication*, 2007. doi: 10.1061/40913(232)4.
- [55] A. I. Khuri and S. Mukhopadhyay, "Response surface methodology," *Wiley Interdiscip Rev Comput Stat*, vol. 2, no. 2, pp. 128–149, Mar. 2010, doi: 10.1002/wics.73.
- [56] R. V. Lenth, "Response-Surface Methods in R, Using rsm," *J Stat Softw*, vol. 32, no. 7, 2009, doi: 10.18637/jss.v032.i07.

### 4.3 Efectos de la humedad relativa y la temperatura en la retracción por secado de pavimentos de hormigón compactado con rodillo (Artículo 3)

Este capítulo está basado en la siguiente publicación: J. Pulecio-Díaz, M. Sol-Sánchez, and F. Moreno-Navarro, "Effects of Relative Humidity and Temperature on the Drying Shrinkage of Roller-Compacted Concrete Pavements," *Infrastructures* (Quartile: Q2) (JIF: 2.6) (Basel), vol. 9, no. 2, p. 22, Jan. 2024, doi: 10.3390/infrastructures9020022.

#### 4.3.1 Resumen

Los pavimentos de hormigón compactado con rodillo (HCR) han sido objeto de estudios centrados en su deterioro creciente a lo largo del tiempo debido a la influencia de la carga vehicular y los factores ambientales en condiciones de humedad y temperatura que van de medias a bajas (40% de humedad relativa y 25 °C de temperatura). Por lo tanto, es necesario comprender cómo se comportan en distintas condiciones de humedad relativa y temperatura, ya que estos parámetros varían en cada región geográfica. En este contexto, esta investigación se centró en analizar el efecto de la retracción por secado en los pavimentos de HCR bajo la influencia de la carga vehicular utilizando un modelo computacional calibrado con datos obtenidos en condiciones ambientales típicas. Para ello, se realizaron experimentos de laboratorio, se utilizó la modelización numérica y los resultados para los pavimentos de HCR se validaron mediante análisis estadístico. Los resultados revelaron modelos validados que proporcionaban curvas de contenido de humedad y de retracción por secado. Estos resultados también subrayan la importancia de considerar los efectos ambientales al calcular las tensiones del pavimento como variable de respuesta en los diseños estructurales. En particular, se destacan estos efectos ya que pueden generar cambios en las tensiones del pavimento de hasta un 10%, enfatizando la relevancia de los modelos propuestos en este estudio ya que consideran este fenómeno a la hora de predecir el comportamiento y la durabilidad de los pavimentos de HCR.

#### 4.3.2 Introducción

Los pavimentos son estructuras fundamentales que han contribuido significativamente a mejorar la calidad de vida de la sociedad, facilitando las conexiones entre comunidades con tiempos de viaje razonables, especialmente en comparación con las carreteras sin pavimentar. La investigación en este campo ha sido crucial, dando lugar a desarrollos notables, como el uso de materiales sostenibles y respetuosos con el medio ambiente, con capacidad de autorreparación, propiedades de deshielo durante el invierno [1], y la capacidad de recibir señales que identifican la velocidad y la carga de los vehículos [2]. Además, se ha avanzado en la evaluación in situ de las propiedades mecánicas de los pavimentos mediante técnicas no destructivas, lo que permite determinar su vida útil restante y los métodos adecuados para su rehabilitación [3], [4].

La investigación también se ha centrado en la mejora de las características superficiales para garantizar la comodidad y la seguridad de los usuarios y en la exploración de alternativas de construcción para reducir la huella de carbono [5]. Existe una gran variedad de pavimentos, cada uno con sus ventajas y limitaciones en función de su aplicación. Por ejemplo, los pavimentos flexibles son los más utilizados en todo el mundo en carreteras de alta velocidad, pero tienen limitaciones de carga lenta o estática [6]. Los pavimentos de losa, continuos y de hormigón compactado con rodillos (HCR) suelen ser más eficaces [7], [8].

Esto último ha obtenido una tendencia notoria a nivel mundial debido a que muchos países se inclinan por la implementación del HCR para pavimentos, adoptando esta modalidad en diferentes categorías. Precisamente, áreas tales como puertos, instalaciones intermodales [9], [10], áreas industriales pesadas, áreas industriales ligeras, áreas de servicio de aeropuertos, calles arteriales y calles locales se han posicionado como favoritas para dicha incorporación. Esta preferencia sugiere que estas zonas se consideran vitales o propicias para el HCR. Por el contrario, las categorías de ensanche (sobrecancho) y arcenes [11] y las instalaciones madereras, zonas de compostaje y patios de almacenamiento han sido notablemente menos populares, lo que podría estar relacionado con particularidades tecnológicas e infraestructurales o con las prioridades de cada país.

El estudio del HCR para pavimentos ha cobrado relevancia en las últimas décadas, específicamente en su comportamiento a la retracción, explorándose el análisis del HCR con adiciones de escoria de alto horno como reemplazo parcial del cemento y su repercusión en la retracción con diferentes orígenes de agregados, encontrándose mejor comportamiento en calizas [12]. Además, se ha encontrado que la retracción a largo plazo del HCR con adición de escoria granulada de alto horno (GGBFS) bajo diferentes exposiciones a temperatura [13] afecta significativamente al desarrollo de la resistencia del hormigón. A los 14 días, el hormigón curado a 50 °C y 70 °C mostró una mayor resistencia que el curado a 25 °C debido a la aceleración de la cinética de desarrollo de la resistencia a temperaturas más altas. Además, la adición de GGBFS mostró una variación más significativa en la resistencia a edades tempranas, especialmente a temperaturas más altas. A bajas temperaturas, la mezcla con GGBFS ganó resistencia más lentamente que la mezcla de cemento Portland ordinario. Sin embargo, a temperaturas más altas, el desarrollo de la resistencia a edades tempranas fue rápido, especialmente con niveles más altos de GGBFS. Además, los resultados mostraron que la temperatura influía considerablemente en el desarrollo de la deformación por retracción durante la exposición temprana al secado. Por último, existe un modelo multivariante para predecir la deformación por retracción del hormigón basado en la temperatura, el tiempo y el porcentaje de GGBFS. Este modelo puede estimar la deformación por retracción dentro del intervalo de predicción del 95%.

Por otra parte, no todas las soluciones posibles a la retracción son prometedoras, como en el caso de la adición de caucho de neumático, que no ayudó, pero aumentó ligeramente la retracción por secado en comparación con el HCR de control sin caucho de neumático [14]. Sin embargo, la adición de partículas de caucho modificado al HCR mejoró su plasticidad, propiedades mecánicas y resistencia a la congelación y redujo el volumen de poros. Los autores establecieron que el volumen óptimo de partículas de caucho modificado para añadir a la mezcla de HCR era del 5%, y analizaron el rendimiento de trabajo, las propiedades mecánicas y la durabilidad del HCR con caucho, la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, la retracción por secado y la resistencia a la congelación [15].

Al analizar las propiedades mecánicas y de permeabilidad de los pavimentos de HCR reforzados con diferentes tipos de fibras sintéticas y fibra de acero ondulada, los autores descubrieron que el aumento del volumen de fibra del 0.5 al 1% puede reducir la tasa de retracción por secado y mejorar la resistencia a la flexión del HCR reforzado con fibra. No obstante, la incorporación de fibras también incrementó la susceptibilidad al agua y la porosidad. Esta susceptibilidad dependía significativamente del tipo de fibra utilizada y de la geometría de su superficie. Además, la porosidad se elevaba al emplear fibras con una relación de superficie alta [16].

A la vez se estudiaron en Luisiana (EE.UU.) las propiedades térmicas in situ y el comportamiento de los pavimentos de HCR en su fase inicial, con el objetivo de desarrollar un procedimiento de

diseño de espesores de HCR basado en la mecánica empírica para cuantificar el efecto combinado del tráfico y las cargas ambientales sobre el HCR. Las principales conclusiones son las siguientes (i) El HCR es menos susceptible al agrietamiento en etapas tempranas debido a una menor relación agua-cemento, retracción reducida y ganancia temprana de resistencia por compactación con rodillo, y (ii) se requiere un espaciamiento óptimo de las juntas de corte para prevenir el agrietamiento por retracción y ser rentable [17].

Los antecedentes sobre el tema presentan algunas incidencias significativas en el comportamiento del HCR para pavimentos a corto [18] y largo plazo [19]. Asimismo, las acciones climáticas y las cargas de tráfico influyen en el fenómeno de la retracción del HCR, provocando curvaturas que dan lugar a la elevación de la losa y a la pérdida de contacto con el terreno. Asimismo, los estudios han demostrado que la tensión aumenta hasta un 500% para una anchura de fisura de 0,5 mm bajo una humedad relativa del 40% y una temperatura de 25 °C [20], [21]. No obstante, esta tensión depende de las condiciones climáticas, es decir, de las variaciones de humedad relativa y temperatura, particulares de cada zona, y de los valores medio-bajos (40% de humedad relativa y 25 °C de temperatura) o del hecho de que no siempre se den las condiciones en las que se centran la mayoría de los estudios. Por lo tanto, es necesario conocer el comportamiento del HCR para pavimentos en un rango de valores de humedad relativa, ya que la variación de este parámetro es particular de cada zona, y las condiciones de humedad relativa y temperatura medias-bajas no siempre están presentes.

En la actualidad, el diseño de los pavimentos de hormigón, y en concreto del HCR para pavimentos, no considera en sus criterios de dimensionamiento la disminución de prestaciones debida a la retracción por secado del hormigón [8], lo que conlleva un desconocimiento de su impacto en los pavimentos [22]. Esto es contraproducente para un pavimento de HCR [23], ya que su reparación suele ser mayor que la de los pavimentos de hormigón convencional [24], es decir la norma norteamericana para pavimentos de hormigón de losas (JPCP) [24], [25] o la norma francesa, incluyendo BC (Chaussées á delles non armées et non goujonnées (pavimentos de losa no armados y sin pasadores)) y BCg (Chaussées á delles non armées et goujonnées (pavimentos de losa no armados y con pasadores)) [26]. Debe tenerse en cuenta que las juntas usualmente utilizadas para anticipar grietas de retracción en pavimentos JPCP (BC o BCg) son poco frecuentes en HCR para pavimentos [8], [27].

De ahí que el enfoque alternativo capaz de representar la realidad sea el uso de modelos físicos a escala 1:1 o la modelización computacional. Esta última ha logrado históricamente resultados fiables en ingeniería de carreteras, como puentes, túneles y pavimentos [28], [29], [30]. Además, cuando se ha elegido el método correcto, se ha aplicado con éxito para encontrar las constantes de calibración necesarias para estudiar una estructura real.

Por último, el estudio de la retracción por secado en el HCR ha sido un área de interés durante mucho tiempo. Sin embargo, hasta ahora no se ha identificado una respuesta notable en diferentes momentos, como en estados avanzados de madurez del material, especialmente bajo variaciones de humedad relativa y temperatura. En consecuencia, este estudio pretende abordar esta laguna, centrándose en cómo estas condiciones ambientales influyen específicamente en la retracción por secado de los HCR para pavimentos. Además, también pretende contribuir al conocimiento del diseño estructural de pavimentos de HCR, ya que existen incertidumbres respecto a su comportamiento en condiciones diferentes a las típicas, es decir, en situaciones en las que la humedad relativa difiere del 40% y la temperatura varía de 25 °C [20], [21].

### 4.3.3 Metodología

La metodología se divide en tres pasos principales:

1. Materiales y ensayos de laboratorio: En este paso se describen detalladamente los materiales utilizados y los procedimientos de ensayo de laboratorio. Estos ensayos son esenciales para calibrar los resultados obtenidos en condiciones controladas.

2. Modelización computacional de los ensayos de laboratorio: En esta fase, la modelización computacional reproduce y analiza los resultados de los ensayos de laboratorio. Permite una comprensión más profunda de los datos obtenidos.

3. Modelización computacional y validación de los resultados del pavimento de HCR: En este último paso, el modelado computacional se utiliza para evaluar el rendimiento de un pavimento de HCR [31] en diferentes condiciones, incluyendo la carga de esquina y diversas condiciones ambientales, tales como (i) 85% de humedad relativa a 25 °C, (ii) 10% de humedad relativa a 40 °C, y (iii) 20% de humedad relativa a 25 °C. Estas condiciones reflejan los niveles específicos de vapor de agua en el aire (17, 5 y 4 g de vapor de agua por kilogramo de aire, respectivamente) (Figura 4.3.1). Este paso tiene por objeto determinar las tensiones máximas experimentadas por el pavimento bajo carga en las esquinas.

Por último, los resultados del pavimento de HCR se validan mediante métodos estadísticos inferenciales. Esta validación permite establecer el efecto de la configuración ambiental en el diseño estructural del pavimento de HCR.

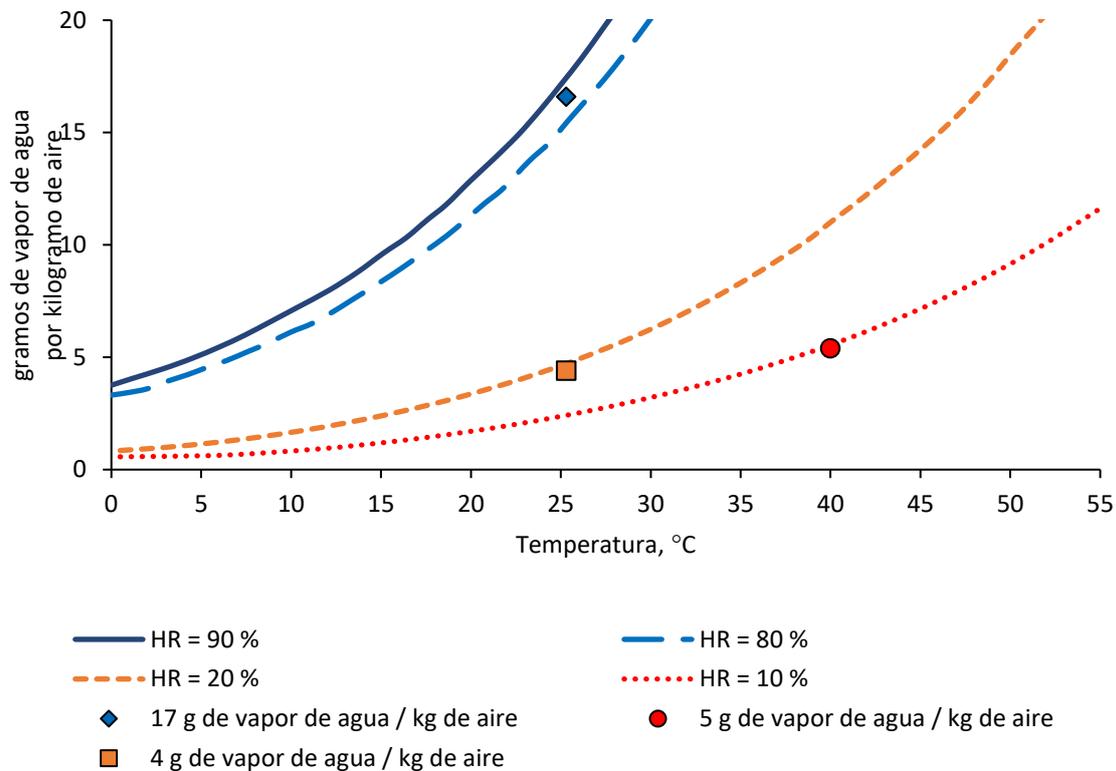


Figura 4.3.1. Comportamiento de la humedad relativa (HR), temperatura (T) y g de vapor de agua/kg de aire. Fuente: [32].

#### 4.3.3.1 Materiales y ensayos de laboratorio

La investigación se llevó a cabo utilizando una mezcla estándar de pavimento de HCR. Esta mezcla tenía un contenido óptimo de humedad (COH) de 5.65% [33] y una densidad seca máxima (Dsm) de 2.583 g/cm<sup>3</sup>, determinada con un ensayo de compactación Proctor (ASTM D1557-12) [34]. Los áridos utilizados fueron del tipo calizo, con una gravedad específica de 2.775 (ASTM C128-15) (ASTM. ASTM C127-15) [35], [36] y una absorción de 0.472%, y cumplían con la distribución granulométrica especificada en las normas de construcción de la PCA [37], [38], [39] (Figura 4.3.2).

El cemento era un compuesto Portland (CEM II/A-M (L-V 42.5 R)) [40], [41], constituido por > 80% de clínker, < 13% de cenizas volantes, > 6% de caliza y entre 0 y 1% de componentes menores.

Los ensayos de laboratorio se llevaron a cabo (como se muestra en la Figura 4.3.3), cumpliendo con los requisitos de modelado computacional posteriores. La modelación se realizó utilizando el software ABAQUS enfocado a analizar la retracción del HCR en pavimentos bajo diversas condiciones climáticas y cargas vehiculares en esquinas. Se realizaron los siguientes ensayos

- Un ensayo de contenido de humedad;
- Ensayo de retracción libre;
- Ensayo de resistencia a la compresión;
- Ensayo de resistencia a la flexión;
- Un ensayo de módulo elástico.

Estos ensayos se llevaron a cabo tras curar la mezcla de HCR sumergida en agua durante 90 días y después someterla a diversas condiciones climáticas durante diferentes periodos de exposición con intervalos de 0, 1, 4, 7, 14, 28, 42, 56, 70, 84 y 90 días. Se emplearon tres réplicas de especímenes por condición ambiental.

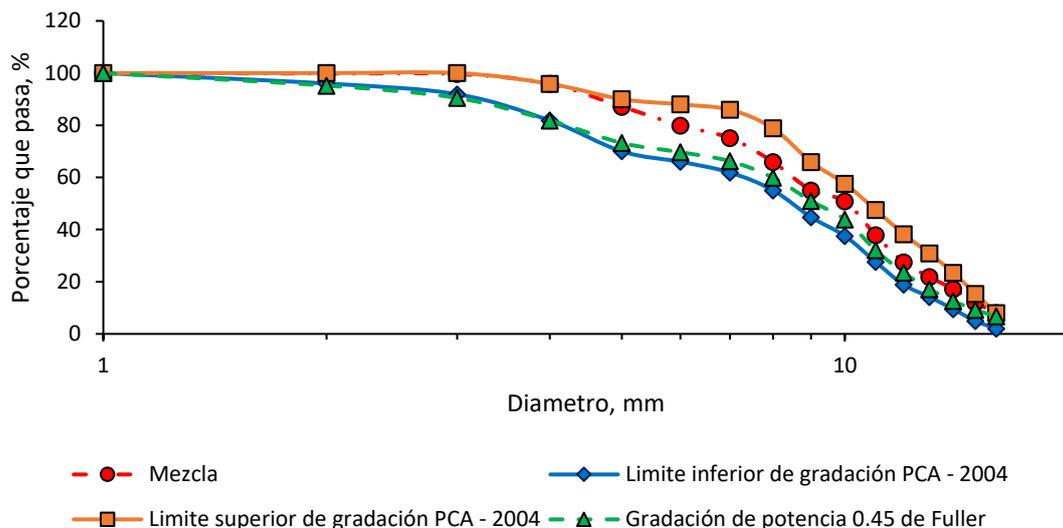


Figura 4.3.2. Gradación para pavimentos de hormigón compactado con rodillo (HCR).

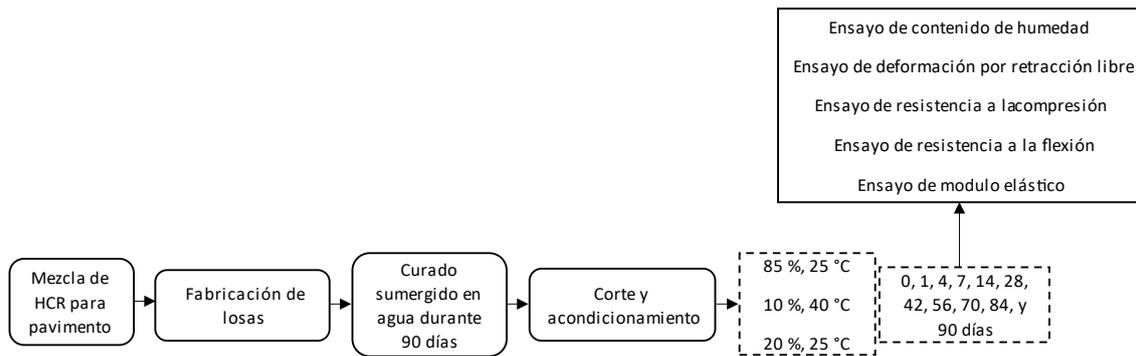


Figura 4.3.3. Procedimientos de laboratorio.

Siguiendo los procedimientos de laboratorio, se fabricaron especímenes con unas dimensiones de 100 mm × 300 mm × 300 mm siguiendo una serie de pasos bien definidos:

- La preparación de los moldes;
- Preparación de la mezcla de HCR;
- La compactación en dos fases iguales, con 1 min de consolidación por capa, totalizando 4 min con las maniobras. La compactación se realizó utilizando un compactador de placa con una superficie de contacto igual a la del molde [42], [43].

Una vez que la mezcla de HCR alcanzó la consistencia deseada, los especímenes se sometieron a un periodo de curado bajo el agua a una temperatura de  $23 \pm 2$  °C durante 90 días [20], [21], [44]. Posteriormente, se colocaron en varias condiciones ambientales controladas que mantenían niveles específicos de humedad relativa y temperatura de acuerdo con los intervalos de tiempo requeridos.

El contenido de humedad [44], [45] (Figura 4.3.4) de cada espécimen se determinó con un ensayo gravimétrico a intervalos de 0, 1, 4, 7, 14, 28, 42, 56, 70, 84 y 90 días en réplicas de tres muestras para cada condición ambiental. Esta medición se realizó en piezas de 10 mm de grosor (clasificadas ahora como secciones delgadas) cortadas de cubos (100 mm × 100 mm × 100 mm) obtenidos de muestras de 100 mm × 300 mm × 300 mm. Por tanto, el procedimiento continuó con los siguientes pasos: (1) Se pesó la sección delgada. (2) Se selló la sección delgada con cinta adhesiva americana gris en los cuatro lados, quedando libres las caras superior e inferior. (3) Se pesó la sección delgada con cinta adhesiva americana gris. (4) La sección restante, de 10 mm de altura, se selló con cinta adhesiva americana gris por las cinco caras, excepto la superior, ya que debe estar en contacto con la cara inferior de la sección delgada. (5) Las dos partes del cubo se unieron con cinta polivinílica amarilla para mantenerlo como un cubo completo y permitir el tránsito regular del contenido de humedad. Ayano et al. [46] realizaron un estudio sobre el impacto de los huecos en la transferencia de humedad en especímenes cortados. Compararon el coeficiente de difusión de humedad entre una pila de estos especímenes rebanadas y una muestra sólida, concluyendo que el efecto del hueco entre las rebanadas es mínimo. (6) Los cubos se colocaron en cámaras climáticas. (7) Los cubos se sacaron de las cámaras climáticas para medir el peso de las secciones delgadas. Para ello, se retiró la cinta de polivinilo amarilla y se registraron los pesos de las secciones delgadas. (8) A continuación, las piezas se volvieron a pegar con cinta nueva y se colocaron de nuevo en las cámaras. (9) Se repitieron los pasos desde el punto 7 hasta completar la medición del día 90. (10) A continuación, después del punto 9, se midieron los pesos de las secciones delgadas sin cinta gris americana adhesiva. (11) Las secciones delgadas se secaron en un horno a 110 °C hasta que alcanzaron un peso constante. (12) Por

último, el contenido diario de humedad ( $C(x_i - t)$ ) en las secciones delgadas se calculó de acuerdo con la ecuación (1), como sigue:

$$C(x_i - t) = \left[ 1 - \frac{(M_{ti} - M_{t(i-1)})}{p * \left( \frac{W_{oi} - W_{fi}}{p * h_i} \right) * h_i} \right] \quad (1)$$

Se calculó la diferencia entre el peso inicial ( $M_{ti}$ ) (correspondiente al día cero) y el peso medido en un día concreto ( $M_{t(i-1)}$ ). Posteriormente, esta diferencia se dividió por el producto de tres factores:

- La densidad de la sección delgada ( $p$ );
- La diferencia entre el peso de la sección delgada no encintada en el día cero ( $W_{oi}$ ) y en el día 90 ( $W_{fi}$ ), dividida por la multiplicación de la densidad ( $p$ ) y el espesor ( $h_i$ ) de la sección delgada;
- El espesor de la sección delgada ( $h_i$ ).

El resultado de esta división se restó de un valor de 1 (1 representa el 100% de saturación) (Ecuación (1)).

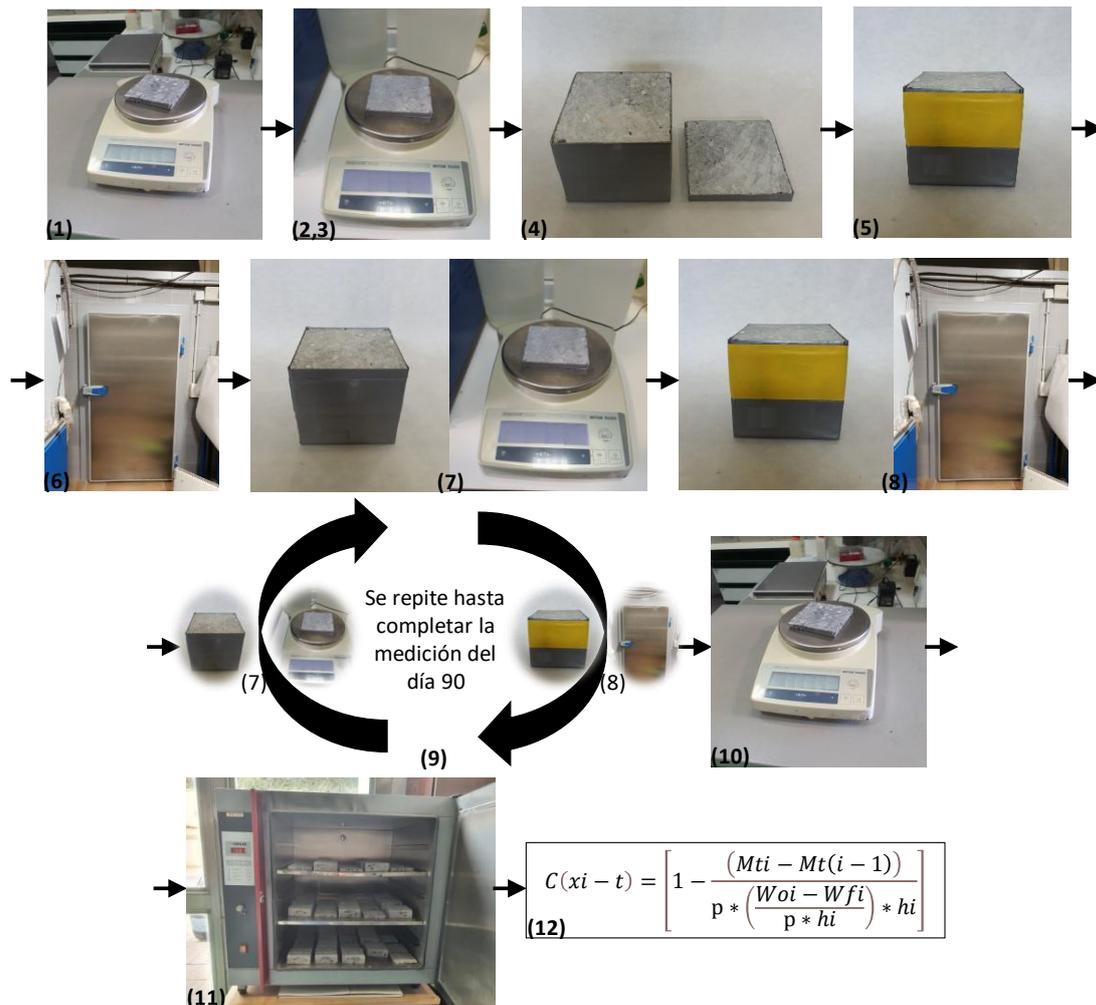


Figura 4.3.4. Ensayo de contenido de humedad.

Las vigas de retracción (Figura 4.3.5) (ASTM C157/C157M-17) [47] se obtuvieron cortando especímenes de dimensiones 100 mm × 100 mm × 285 mm a partir de especímenes de 100 mm × 300 mm × 300 mm. Como en el caso de los cubos, se sometieron a condiciones controladas de humedad relativa y temperatura, como se ilustra en la figura 4.3.4. Sin embargo, en este caso, las vigas sólo se sellaron por los lados para permitir su modelización computacional sin que se vieran afectadas por las tensiones superficiales y las compresiones internas, como se describe en el proceso de secado [20], [21], [44]. Esta metodología resultó crucial para medir con precisión la deformación debida a la retracción.

Los intervalos de tiempo de medición fueron coherentes con los aplicados a los cubos en relación con su contenido de humedad. El procedimiento de ensayo comprendía los siguientes pasos

- Medir el desplazamiento de las vigas con el marco fijo;
- Colocar las vigas en las cámaras climáticas;
- Sacar las vigas de las cámaras climáticas para medir su desplazamiento;
- Reposicionar las vigas en las cámaras climáticas.

Estos pasos se repitieron a intervalos de 0, 1, 4, 7, 14, 28, 42, 56, 70, 84 y 90 días. Una vez realizadas estas mediciones, se calculó la deformación diaria debida a la retracción tomando la diferencia entre la altura de la viga en estado húmedo y también en estado seco y dividiendo este valor por las dimensiones originales de la viga en estado húmedo.

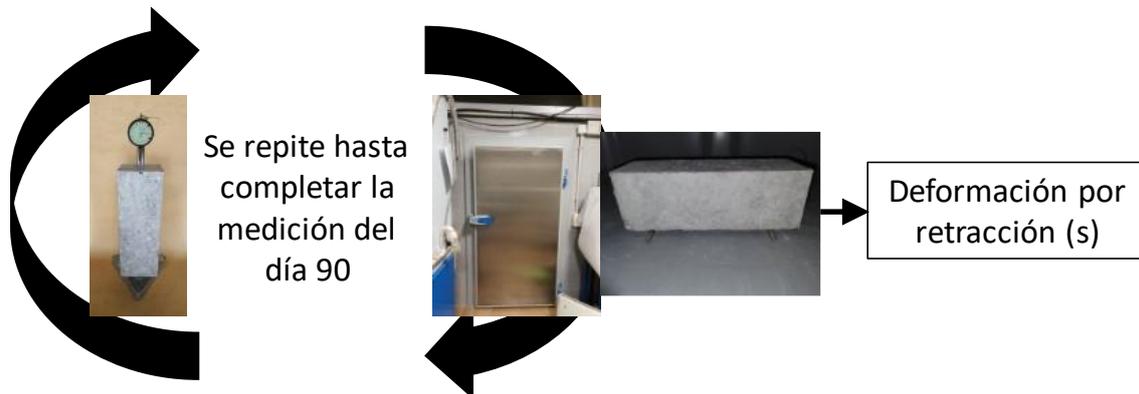


Figura 4.3.5. Ensayo de deformación por retracción libre.

Los ensayos de compresión, como se muestra en la Figura 4.3.6, se llevaron a cabo utilizando cubos (100 mm × 100 mm × 100 mm) que se obtuvieron a partir de losas de corte (100 mm × 300 mm × 300 mm) (ASTM C39/C39M-21) (BS EN 12390-3:2019-TC) [48], [49]. El procedimiento de ensayo se desarrolló de la siguiente manera:

- Los cubos se colocaron en cámaras climáticas durante 90 días;
- Se sometieron a un ensayo de compresión en una máquina universal con una velocidad de carga de 0.25 MPa/s;
- La resistencia a la compresión se determinó utilizando la carga máxima en la zona de contacto.



Figura 4.3.6. Ensayo de resistencia a la compresión.

Como se muestra en la Figura 4.3.7 (ASTM C78/C78M-21) [50], se evaluó el módulo de rotura y la elasticidad a flexión en especímenes sometidos a ensayos de retracción. Se utilizó una máquina universal con un dispositivo de carga de punto central y un sistema fijo de soporte y rodillos. Las vigas se ensayaron a una velocidad de carga de 0.02 MPa/s. Los cálculos para estos parámetros se basaron en:

- El módulo de rotura para la carga máxima, considerando la distancia del apoyo al plano de rotura y las dimensiones transversales de las vigas;
- El módulo elástico para la carga, considerando la luz, las dimensiones transversales y la deformación en las fibras inferiores de las vigas.

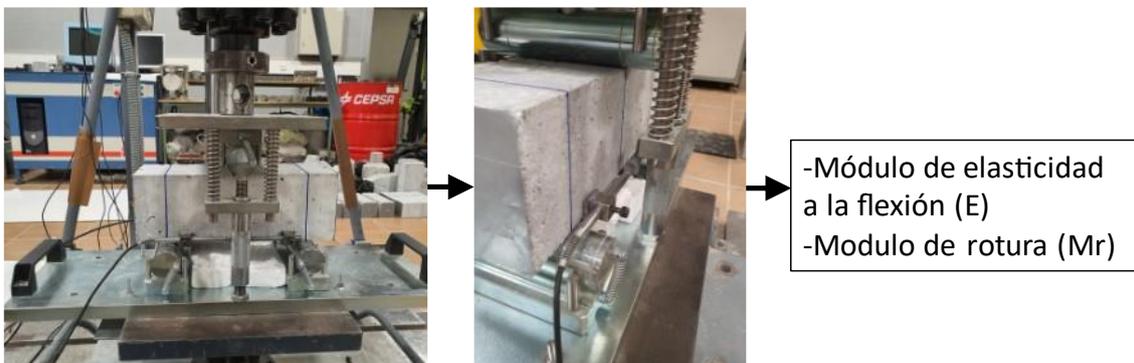


Figura 4.3.7. Ensayo de resistencia a la flexión.

#### 4.3.3.2 Modelización computacional de ensayos de laboratorio

Los resultados de los ensayos de contenido de humedad a través de las secciones de 10 mm de altura se analizaron utilizando modelos computacionales de elementos finitos sólidos de cálculo retrospectivo (Figura 4.3.8). El elemento finito utilizado en la investigación fue un elemento finito en forma de bloque (DC3D8) con tres grados de libertad por nodo (UX, UY y UZ) y un bloque de transferencia de calor lineal de ocho nodos. Además, el material se representó con el modelado térmico constitutivo. El modelado consistió (Figura 4.3.9) en lo siguiente (1) Se creó un cubo (100 mm × 100 mm × 100 mm) con un espacio de modelado 3D de tipo deformable y con forma sólida; (2) se seleccionaron los comportamientos del material; (3) en la sección de gestión de pasos, se seleccionaron los procedimientos iniciales, así como los de transferencia de calor (transitorios); (4) en la sección de edición de pasos, se definieron un intervalo de 90 días y

un aumento de tamaño; (5) se realizó la configuración del gestor de solicitud de campo de salida; (6) se aplicó la interacción de temperatura de caída y coeficiente de película en la superficie accesible al ambiente del cubo; (7) se configuró la carga para representar una saturación inicial del 100%; (8) se estableció la malla para definir el tipo de elemento, forma y técnica; (9) se configuró el trabajo para la comprobación y envío de datos; y (10) por último, se establecieron los resultados para determinar la temperatura (equivalente al contenido de humedad) en relación con el tiempo. El procedimiento se repitió hasta obtener resultados similares a los registrados en el laboratorio. Por lo tanto, la calibración se desarrolló cambiando las propiedades del material, específicamente la temperatura y la conductividad. Estas variables representaban el contenido de humedad y la difusividad de la humedad [51], respectivamente.

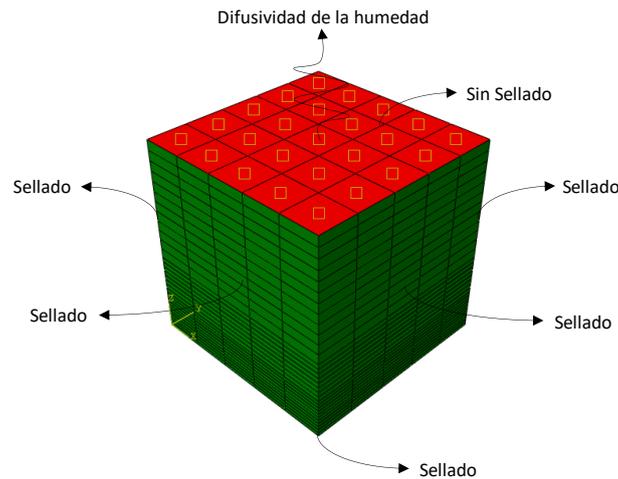


Figura 4.3.8. Muestra de cubo para el ensayo de contenido de humedad por el método del elemento finito (MEF).

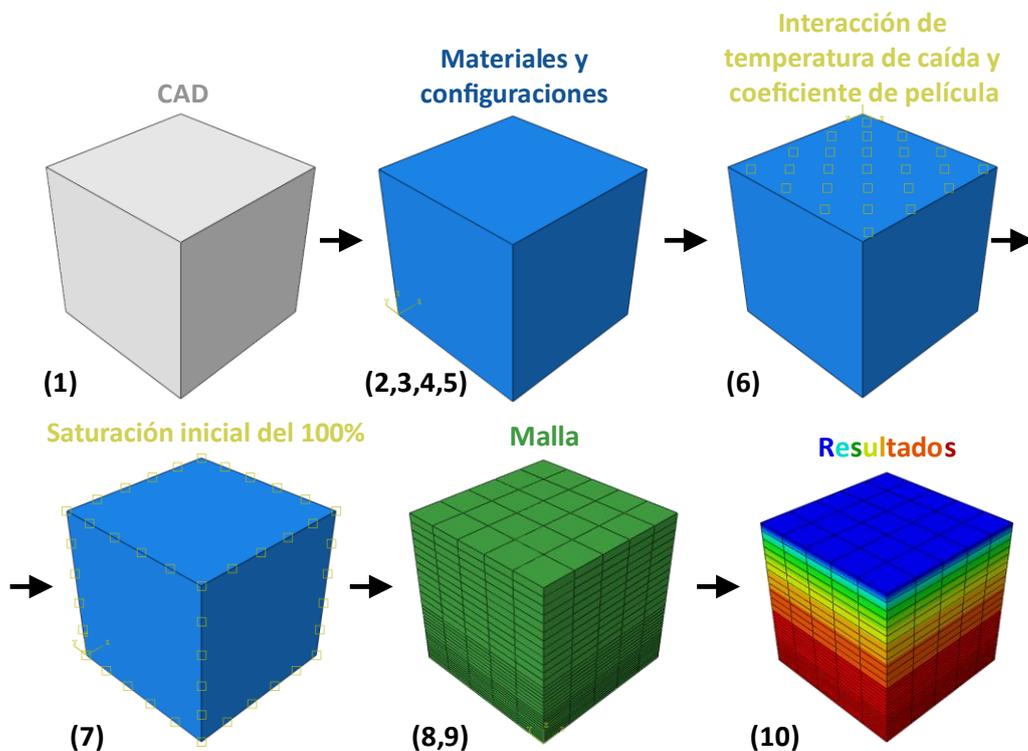


Figura 4.3.9. Modelización computacional del ensayo de contenido de humedad.

Basándose en los resultados de laboratorio de las vigas de ensayo de retracción por secado, se realizaron modelos de cálculo retrospectivo para calcular los coeficientes de retracción hídrica [21]. Los elementos finitos utilizados en la investigación fueron (i) un elemento finito de bloque (DC3D8) [52] con tres grados de libertad por nodo (UX, UY y UZ) y un bloque lineal de transferencia de calor de ocho nodos y modelado constitutivo térmico, y (ii) un bloque finito (C3D8) con tres grados de libertad por nodo (UX, UY y UZ), un bloque lineal de ocho nodos y modelado constitutivo de plasticidad dañada del hormigón (CDP) [53]. El modelado consistió (Figura 4.3.10) en lo siguiente: (1) Se creó inicialmente el modelo de viga con las propiedades de difusividad de humedad y contenido de humedad, calculadas en el modelo computacional del ensayo de contenido de humedad; (2) para el modelado mecánico, se eligió la viga con un espacio de modelado 3D, tipo deformable y forma sólida; (3) se seleccionaron los comportamientos de los materiales; (4) en la sección de gestor de pasos, se incluyeron los procedimientos iniciales así como los estáticos y generales; (5) en la sección de edición de pasos, se definió un intervalo de 90 días y el aumento de tamaño; (6) se llevó a cabo la configuración del gestor de solicitud de campo de salida; (7) se configuró la carga para representar una saturación inicial del 100%, las condiciones de contorno (Figura 4.3.11), el sistema de soporte ajustado al funcionamiento del ensayo marco de medición de la retracción de la viga y la evolución del contenido de humedad a lo largo de 90 días; (8) se estableció la malla para definir el tipo de elemento, la forma y la técnica; (9) se estableció el trabajo de comprobación y envío de datos; y (10) se establecieron los resultados para establecer la deformación (equivalente a la deformación por retracción) relativa al tiempo.

El procedimiento se repitió tantas veces como fue necesario hasta obtener resultados similares a los registrados en el laboratorio. Así pues, la calibración se desarrolló modificando las propiedades del material, concretamente el coeficiente de dilatación y la temperatura. Estas variables representaban los coeficientes de retracción hídrica y el contenido de humedad.

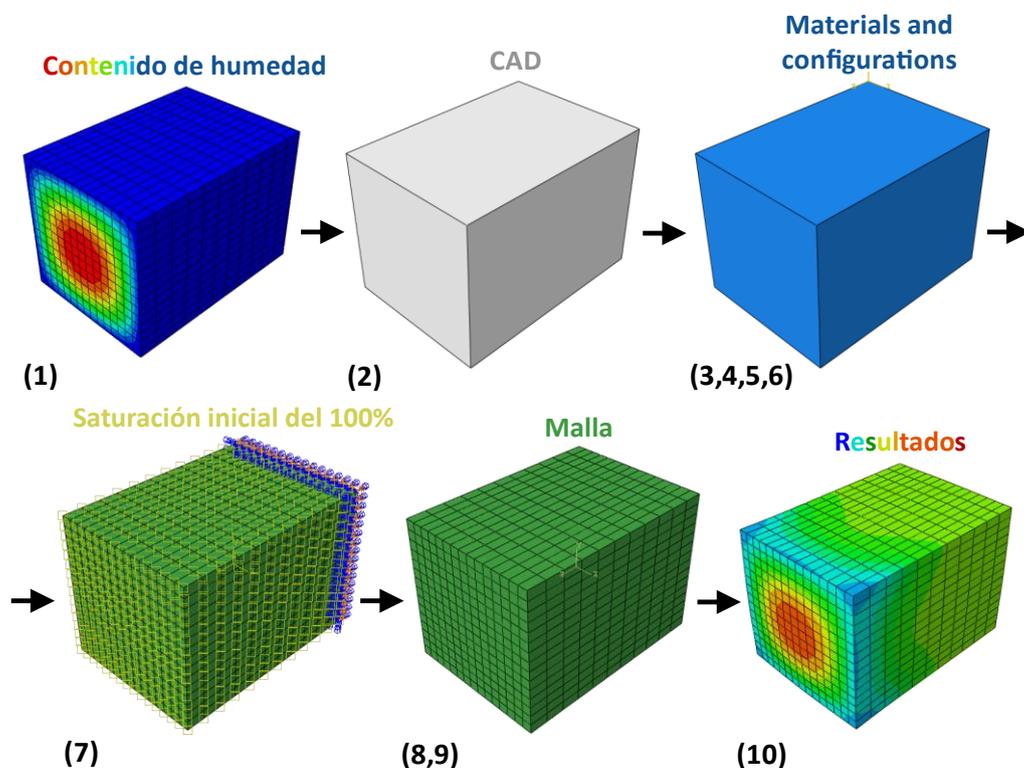


Figura 4.3.10. Modelización computacional del ensayo de deformación por retracción libre.

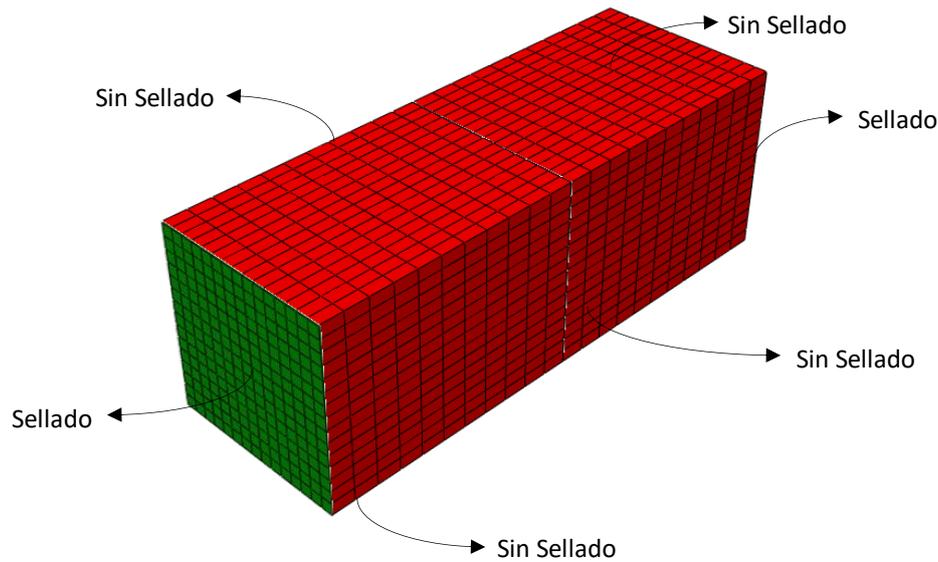


Figura 4.3.11. Muestra de viga utilizada para el ensayo de deformación por retracción libre empleando el método del elemento finito (MEF).

#### 4.3.3.3 Modelización computacional y validación de los resultados de los pavimentos de HCR

Se llevó a cabo una investigación en el campo de los pavimentos de HCR, que implicaba una estructura compuesta por una subrasante, una base tratada con cemento y una capa de HCR, con los espesores específicos detallados en la Tabla 4.3.1. Es esencial mencionar que la condición de contorno para la subrasante se consideró semi-infinita. En la Tabla 4.3.1, se proporciona información sobre el módulo elástico de la base, la rigidez de la cimentación por área de subrasante [54], la relación de Poisson (que no tiene un impacto significativo en el comportamiento del pavimento) [55], y los espesores de la estructura.

Además, la capa de HCR se diseñó con una forma rectangular basada en investigaciones previas [21], con dimensiones planas de 3.4 m × 20 m, un ancho que es común tanto en Estados Unidos [56] como en Europa [57] y una longitud que se seleccionó para considerar el comportamiento continuo del pavimento de HCR, como se ilustra en la Figura 4.3.12.

Tabla 4.3.1. Espesores, rigidez de la cimentación por área, módulo elástico y relación de Poisson del pavimento de hormigón compactado con rodillo (HCR).

| Capa              | Espesor, m    | Rigidez de la cimentación por área, MPa/m (MN/m <sup>3</sup> ) | Módulo elástico, MPa         | Relación de Poisson |
|-------------------|---------------|--|------------------------------|---------------------|
| HCR               | 0.20          | -  | 49,779 a 52,526 <sup>1</sup> | 0.18                |
| Base <sup>2</sup> | 0.15          | -  | 8,000                        | 0.30                |
| Subrasante        | Semi-infinito | 60   | -                            | -                   |

<sup>1</sup> El valor específico de cada mezcla se muestra en la figura 4.3.13, <sup>2</sup> Base tratada con cemento

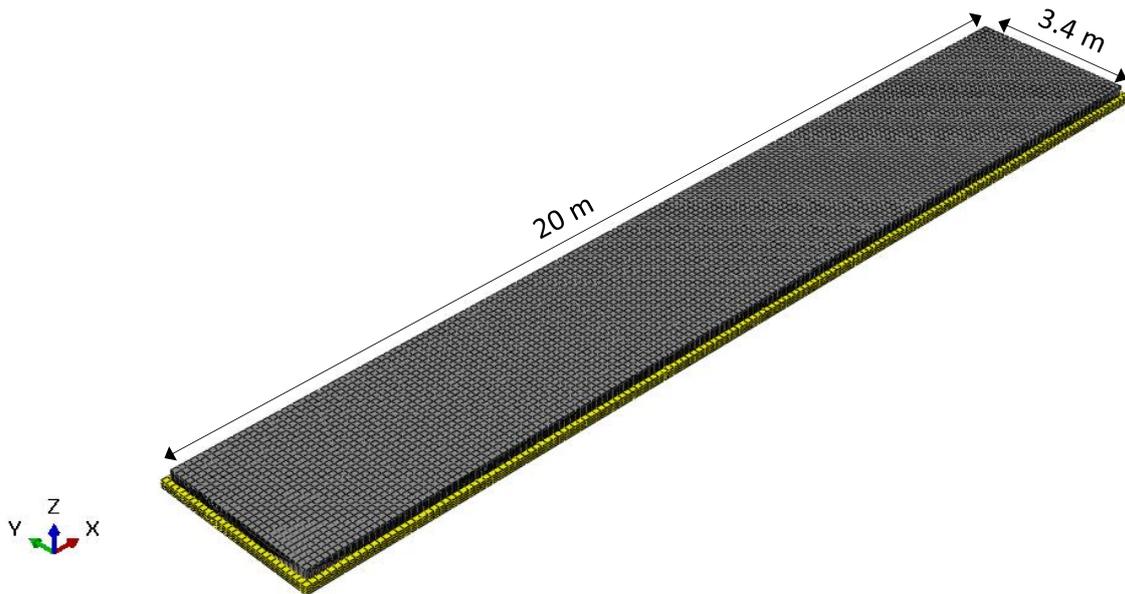


Figura 4.3.12. Hormigón compactado con rodillo (gris oscuro), base (amarillo) y subrasante.

En los ensayos de laboratorio se obtuvieron las curvas desplazamiento-carga y el módulo elástico y se representó el comportamiento mecánico de la mezcla de HCR. Las conclusiones derivadas de estos resultados se presentan en la sección de resultados.

En un enfoque adicional, el comportamiento del pavimento de HCR se modeló considerando ambas condiciones, es decir, con y sin la influencia de las condiciones ambientales. Se aplicó la carga de esquina, ya que ésta es una de las condiciones de diseño más críticas para los pavimentos de HCR. Basado en la historia y desarrollo del pavimento, este estudio implementó la siguiente configuración de carga del vehículo: un eje de diseño de 80 kN como en USA (usando la mitad del eje en la esquina del pavimento), una presión de contacto uniformemente distribuida de 0.700 MPa, un área de contacto rectangular de 0.120 m × 0.240 m, y una distancia entre neumáticos de 0.240 m.

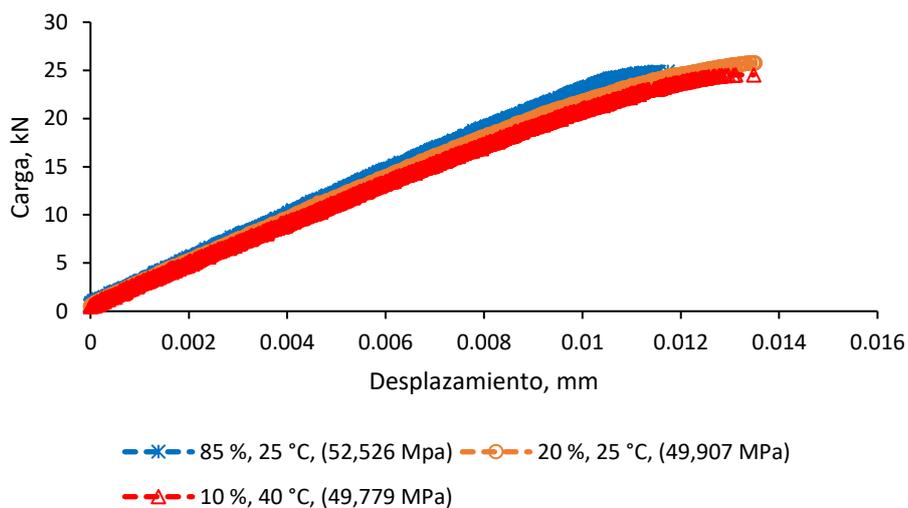


Figura 4.3.13. Curvas de desplazamiento-carga y módulos elásticos del material de hormigón compactado con rodillo sometido a diversas condiciones ambientales.

Para abordar esta investigación se propuso un modelo computacional del pavimento de HCR, considerando el contenido de humedad de secado y la deformación por retracción libre calculada en los cálculos retrospectivos. Se aplicó un modelo constitutivo que incorpora transferencia de calor (HT) y plasticidad dañada por el hormigón (CDP) para desarrollar el contenido de humedad y la carga vehicular [53].

Una vez completados los modelos, se aplicaron métodos estadísticos como alternativa para verificar los resultados obtenidos, buscando determinar si existían diferencias significativas en la tensión principal máxima del pavimento en función de diferentes valores de humedad relativa y temperatura. Como punto de partida, se realizó una exploración para determinar si los datos cumplían con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Para ello se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov [58], que se aplica especialmente a las muestras que comprenden más de 50 datos por grupo.

La prueba de la normalidad y la homogeneidad de las varianzas se basó en la hipótesis nula, que afirma que los valores siguen una distribución normal, lo que implica que las medias de la población son iguales. En caso contrario, se consideró la hipótesis alternativa.

Cuando los datos cumplían los supuestos de una distribución normal y una varianza homogénea, se utilizó una prueba ANOVA de dos factores [59] como método definitivo para determinar si existían diferencias significativas entre los grupos. En caso contrario, se utilizó la prueba de suma de rangos de Kruskal-Wallis [60], [61], complementada con la prueba post hoc de Mann-Whitney [62] como análisis posterior. Esta última se utilizó cuando había más de dos muestras independientes, varianzas no homogéneas y una población con distribución no normal.

La prueba post hoc de Mann-Whitney se utilizó para comparar pares de condiciones ambientales, y su hipótesis nula afirmaba que no había diferencias significativas entre las dos condiciones ambientales. Esta hipótesis se rechazaba si el valor de significación superaba el umbral de 0.05.

#### 4.3.4 Resultados y Discusión

##### 4.3.4.1 Resultados de laboratorio

La Figura 4.3.13 muestra las curvas desplazamiento-carga y los módulos elásticos del ensayo de resistencia a flexión para cada condición ambiental del material de HCR. Los resultados obtenidos fueron similares en comportamiento para cada condición ambiental ya que las gráficas presentaron un comportamiento constante desde el inicio hasta el final de la falla. Además, los módulos elásticos, es decir, las pendientes, mostraron ligeras diferencias, marginalmente menores en las muestras sometidas a curado en seco que en las curadas en húmedo, presentando variaciones de aproximadamente un 5% bajo las diferentes condiciones ambientales. Estos resultados sugieren que una reducción de la humedad relativa y de la temperatura afecta moderadamente a las propiedades del HCR. Por último, los resultados se refieren a mezclas con resistencias a compresión de 80.94, 77.23 y 80.22 MPa. Estas resistencias se determinaron mediante ensayos de compresión realizados en condiciones ambientales de 85% de humedad relativa a 25 °C, 10% de humedad relativa a 40 °C y 20% de humedad relativa a 25 °C, respectivamente.

La Figura 4.3.14 muestra los resultados de la evolución del contenido de humedad frente a los días de curado para los casos de ambiente húmedo y seco (es decir, a diferentes temperaturas y humedades relativas). Concretamente, se observaron diferencias de hasta el 80% entre las condiciones ambientales húmeda y seca. Además, en comparación con la condición intermedia

(valores de referencia o típicos), el porcentaje de variación fue del 26% para las condiciones húmedas y del 50% para las secas. Asimismo, la influencia de cualquier condición ambiental se acentuó en los primeros días, pero después de 50 días se registró un comportamiento estable. Los resultados muestran un efecto esencial sobre el material, ya que en el estudio se encontraron tres comportamientos del contenido de humedad a lo largo de 90 días. En consecuencia, se estableció la influencia de las tensiones del material sobre el pavimento de HCR, la cual se presenta y discute en las siguientes secciones. Finalmente, se obtuvieron consonancias esenciales con estudios anteriores [20], [44], como fue el caso de la condición intermedia, ya que mantuvieron comportamientos similares para cada situación estudiada y demostraron la adecuación y similitud de los resultados medidos en esta investigación y el efecto en cada condición ambiental.

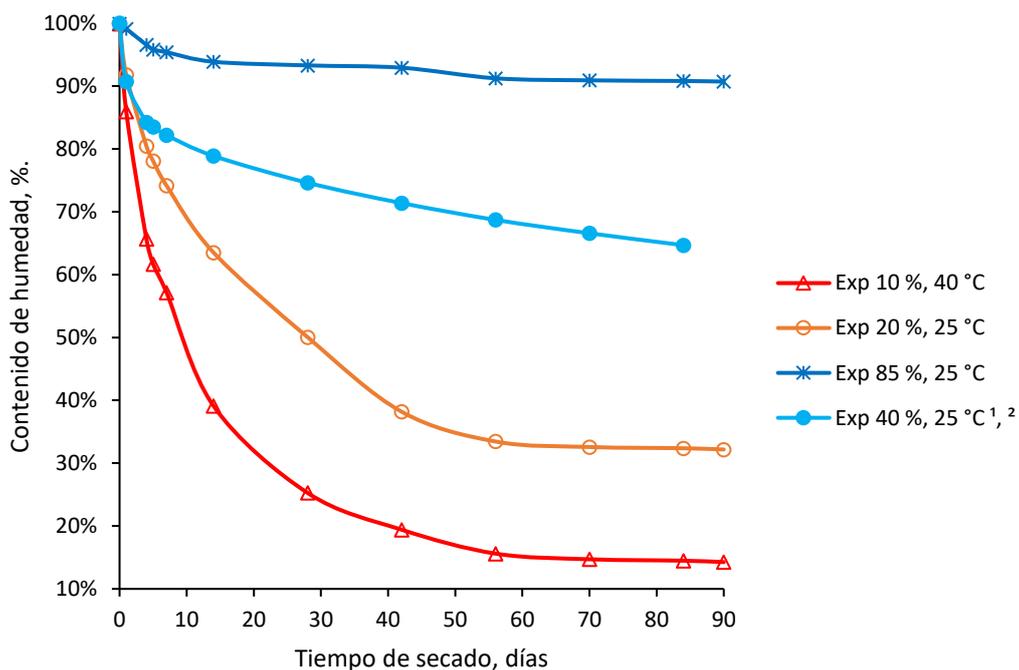


Figura 4.3.14. Perfiles de humedad experimentales (Exp) con diferentes valores de humedad relativa y temperatura para condiciones ambientales húmedas y secas. <sup>1</sup> [20], <sup>2</sup> [21].

La Figura 4.3.15 muestra los resultados de la evolución de la deformación por retracción libre frente a los días de curado para las condiciones ambientales húmeda y seca (a diferentes temperaturas y humedades relativas). La retracción debida al secado fue idéntica al principio para cada condición ambiental hasta el séptimo día. Después, las condiciones secas se separaron de las húmedas en aproximadamente un 52%. Posteriormente, la condición seca con 10% de HR a 40 °C se estabilizó y se separó de la de 20% de HR a 25 °C en el día 42, estableciendo una variación de hasta 30%. Este último hallazgo determinó que la temperatura a lo largo de 90 días fue la variable con mayor influencia en la retracción por secado, debido a que el contenido de agua por kilogramo de aire fue similar en todas las condiciones secas de este estudio. Este fenómeno se atribuye a un desarrollo más pronunciado de la retracción al inicio, como se evidencia en la Figura 4.3.15, consistente con hallazgos previos de Gholami et al. [19] y Saluja et al. [13]. Estos estudios indican que la exposición temprana al secado influye significativamente en el desarrollo de la deformación por retracción. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que las mezclas de HCR para pavimentos, después de un período de curado de 90 días sumergidas bajo el agua y expuestas al medio ambiente durante otros 90 días, tienden a estabilizarse en un

período más corto a temperaturas más altas. Este comportamiento sugiere un potencial de expansión, tema que merece un estudio más detallado.

Después de 90 días, las condiciones húmedas de 85% de HR a 25 °C y las condiciones secas de 20% de HR a 25 °C empezaron a estabilizarse, mostrando una variación del 64%. Esto permitió registrar que todas las condiciones ambientales estudiadas variaron entre 25 y 30%. Por lo tanto, este estudio determinó que el contenido de humedad y la retracción por secado que actúan sobre el material según el registro climático cambiaron después de siete días y alcanzaron la estabilidad de 42 a 90 días.

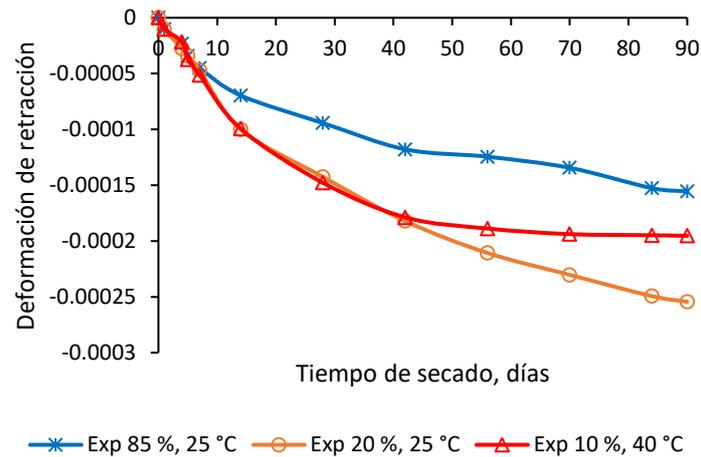


Figura 4.3.15. Evolución de la deformación por retracción libre experimental (Exp) del material de hormigón compactado con rodillo en diferentes condiciones ambientales húmedas y secas.

#### 4.3.4.2 Validación de los modelos computacionales de laboratorio

De acuerdo con los resultados de laboratorio y la modelización computacional por elementos finitos, la Figura 4.3.16 presenta la evolución del contenido de humedad frente a los días de curado para condiciones ambientales húmedas y secas. Los gráficos muestran una similitud esencial ya que las curvas numéricas intentan ajustarse sobre las experimentales, determinando que la validación fue exitosa. Por lo tanto, la condición de 85% HR a 25 °C fue la mejor para el modelo computacional calibrado en la investigación porque se igualó a la experimental. Las curvas de 20% HR a 25 °C y 10% HR a 40 °C eran comparables en los primeros días. Sin embargo, se separaron ligeramente hasta estabilizarse a los 90 días, determinando una variación del 2 al 3%, respectivamente. Estos resultados coinciden con los encontrados en estudios del estado de la técnica [44], ya que la medición de referencia (40% HR a 25 °C) obtuvo hasta un 9% de variación en los primeros días. Después, al cabo de 42 días, los resultados numéricos y experimentales se igualaron.

Estos resultados permitieron analizar cómo afectan las condiciones ambientales al contenido de humedad y su interacción con la retracción por secado, lo que, a su vez, contribuye a comprender las tensiones del pavimento y su impacto cuando se somete a la carga de vehículos.

La Figura 4.3.17a-c ilustra la distribución del contenido de humedad a los 90 días en dos condiciones ambientales diferentes: húmeda (85% HR a 25 °C) y seca (20% HR a 25 °C y 10% HR a 40 °C). En la Figura 4.3.17a, el contenido de humedad superficial en la condición ambiental húmeda coincide con las condiciones experimentales, registrándose un 86%. Por el contrario, en la Figura 4.3.17b-c, el contenido de humedad oscila entre el 16 y el 25% en condiciones secas.

Estos datos revelan un cambio significativo en la distribución de la humedad a profundidades de 10 a 15 mm en condiciones ambientales secas, donde los valores oscilan entre el 10 y el 15%. Además, al variar el contenido de humedad de la condición ambiental de curado, el cambio fue del 5%. En consecuencia, se concluye que la relación entre la humedad relativa y la temperatura en condiciones húmedas tuvo un impacto menor en comparación con una condición ambiental seca.

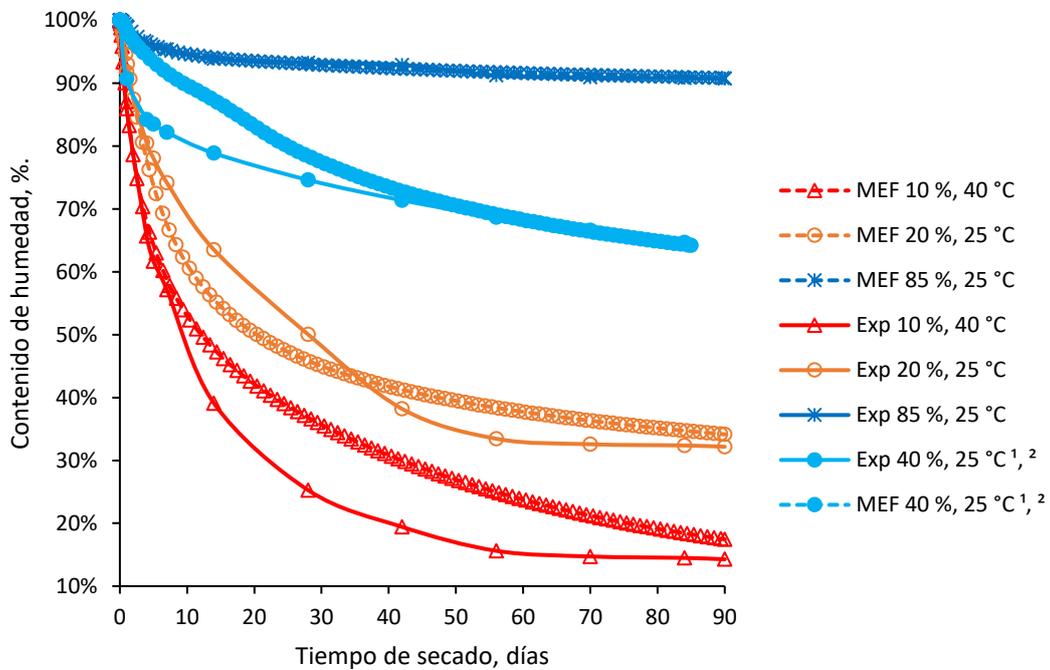
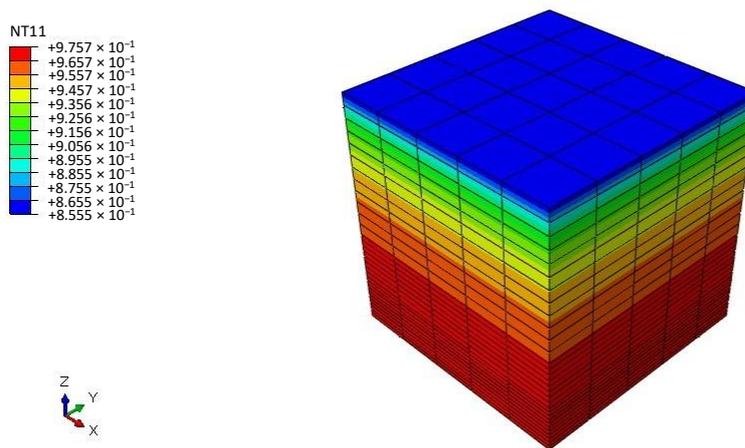
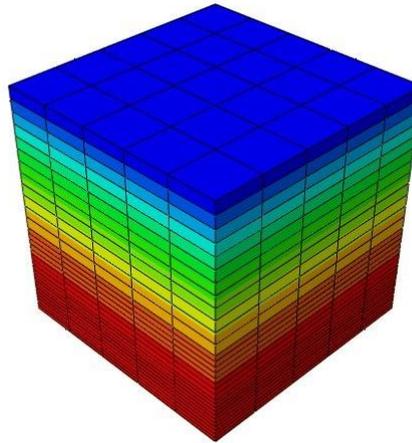
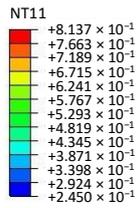


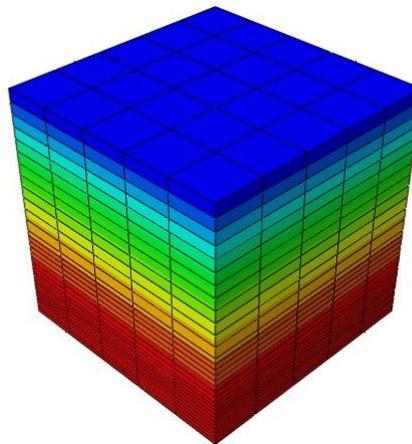
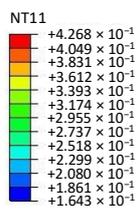
Figura 4.3.16. Evolución de los perfiles de humedad numéricos (empleando el método de los elementos finitos [MEF]) y experimentales (Exp) en diferentes condiciones de humedad relativa y temperatura. Resultados según la modelización ABAQUS. <sup>1</sup> [20]; <sup>2</sup> [21].



(a)



(b)



(c)

Figura 4.3.17. Contenido de humedad después de 90 días para cubos de 100 mm  $\times$  100 mm  $\times$  100 mm: (a) condición ambiental de 85% HR y 25 °C; (b) condición ambiental de 20% HR y 25 °C; y (c) condición ambiental de 10% HR y 40 °C.

La Figura 4.3.18 muestra la evolución de la deformación por retracción libre a lo largo de los días de curado desde una perspectiva experimental y numérica para condiciones ambientales húmedas y secas. Las curvas del modelado computacional basado en elementos finitos se asemejan a las obtenidas experimentalmente, concluyéndose que los modelos se validaron satisfactoriamente. En particular, las condiciones ambientales con un 85% de HR y 25 °C mostraron una curva de calibración óptima, prácticamente coincidente con los datos experimentales. Además, las curvas correspondientes a 20% HR y 25 °C fueron casi idénticas durante los primeros días, con una variación global del 4%. Por otro lado, las curvas correspondientes a 10% HR y 40 °C presentaron una ligera variación de hasta el 7% desde el inicio hasta el día 56. Después, mantuvieron una estabilidad constante hasta el día 56. Luego, mantuvieron una estabilidad constante hasta el último día de medición, mostrando un comportamiento coherente.

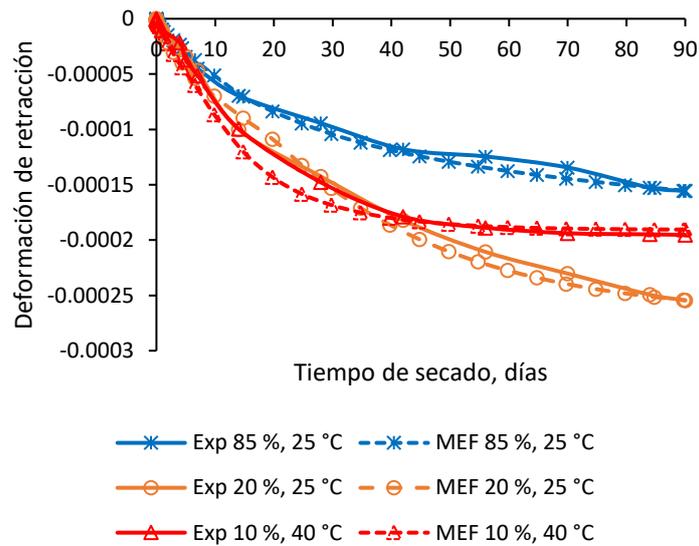


Figura 4.3.18. Evolución de la deformación por retracción libre numérica (empleando el método de los elementos finitos [MEF]) y experimental en diferentes condiciones de humedad relativa y temperatura.

En conjunto, los resultados de la deformación por retracción debida al secado indican que el material responde significativamente a las condiciones ambientales. Además, su interacción con el contenido de humedad es evidente, ya que los modelos concuerdan notablemente con los datos experimentales.

La Figura 4.3.19a-c representa la distribución de la deformación debida a la retracción libre durante un periodo de 90 días a lo largo del eje 3 del centro de la viga, que coincide con la dirección z del modelo para tres condiciones ambientales diferentes: húmedo (85% HR y 25 °C) y seco (20% HR y 25 °C, y 10% HR y 40 °C). En las condiciones ambientales húmedas (Figura 4.3.19a), la deformación debida a la retracción libre fue más significativa en el centro de la sección, extendiéndose a lo largo de la viga hasta el día 90. Por el contrario, cuando se curó en condiciones secas (Figura 4.3.19b-c), se detectó un comportamiento uniforme en todo el espécimen tras 90 días de exposición en estas condiciones ambientales. Este resultado coincide con los expresados en las Figuras 4.3.16 y 4.3.18, donde el contenido de humedad y la deformación por retracción se estabilizan después de 90 días. Entre las condiciones de 20% HR y 25 °C y 10% HR y 40 °C, no hubo cambios significativos en la distribución de la deformación por retracción a lo largo de la viga. Sin embargo, se observó un cambio considerable en el registro de retracción, alcanzando una variación del 30%. Por otro lado, en las condiciones ambientales de curado con 85% HR y 25 °C, la diferencia se manifestó en el extremo de la viga, registrándose un cambio de hasta el 64% en comparación con las condiciones en seco. Por consiguiente, la relación entre la humedad relativa y la temperatura en condiciones secas ejerce un efecto más significativo que en condiciones ambientales húmedas.

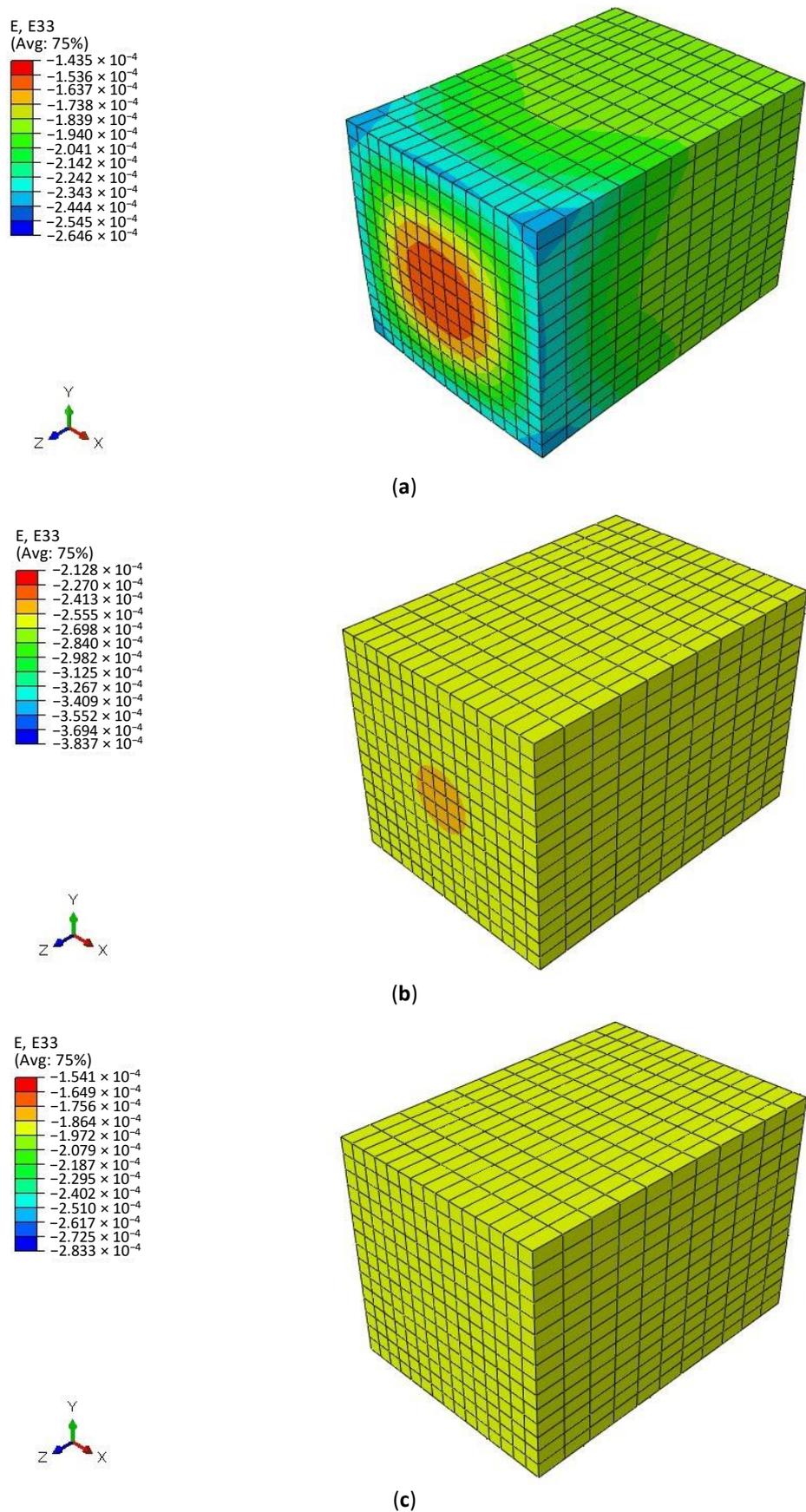


Figura 4.3.19. Deformación por retracción después de 90 días para vigas de 100 mm × 100 mm × 285 mm: (a) condición ambiente de 85% HR y 25 °C; (b) condición ambiente de 20% HR y 25 °C; y (c) condición ambiente de 10% HR y 40 °C.

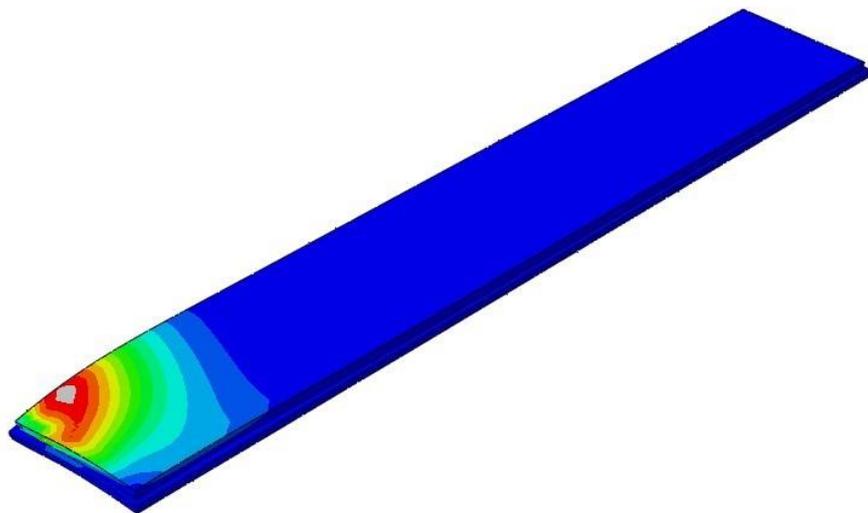
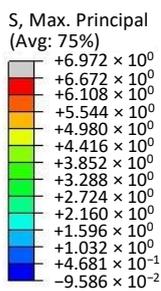
#### 4.3.4.3 Modelización computacional y validación de resultados mediante estadística inferencial

##### 4.3.4.3.1 Modelización del comportamiento bajo carga en esquina

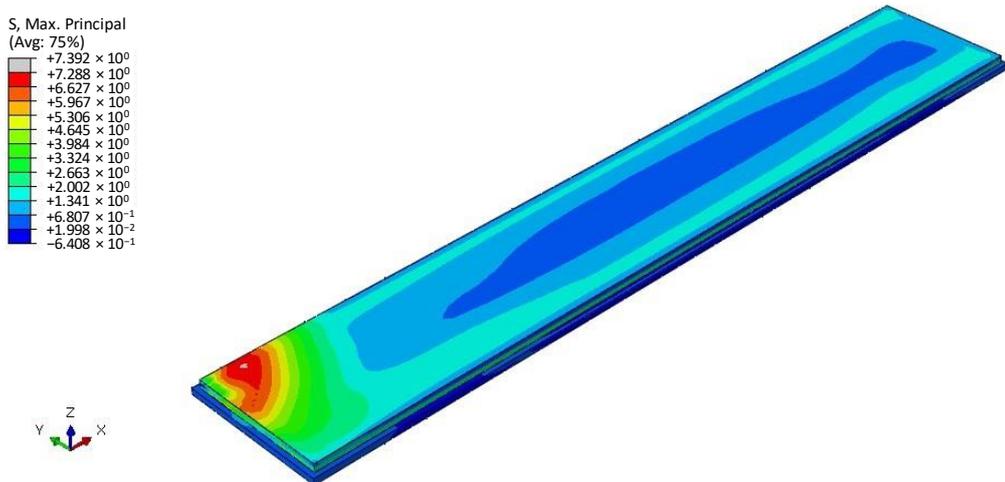
Las figuras 4.3.20-4.3.22 ilustran el comportamiento de los pavimentos HCR sometidos a cargas en las esquinas durante un análisis de un año, tanto con y sin considerar el efecto de las condiciones ambientales. En cada figura se presentan las tensiones principales máximas. Estas se relacionan con la deformación principal inelástica máxima del pavimento, es decir, el agrietamiento.

Las figuras 4.3.20a, 4.3.21a y 4.3.22a muestran que la distribución de tensiones era uniforme en todo el pavimento, excepto en las zonas alrededor de las cargas de esquina cuando no se tuvo en cuenta el impacto ambiental. Sin embargo, la distribución de esfuerzos varió a lo largo de la superficie del pavimento cuando se consideraron las condiciones climáticas (Figuras 4.3.20b, 4.3.21b, y 4.3.22b). Se encontró que las tensiones en las esquinas del pavimento experimentaban variaciones del 8.452% a 85% HR y 25 °C, 9.550% a 10% HR y 40 °C, y 9.577% a 20% HR y 25 °C.

Por tanto, es evidente que, al no considerar la influencia del entorno ambiental, se produjo un incremento anual de las tensiones principales máximas, coincidiendo con los análisis y reflexiones de diversos autores [63], especialmente en situaciones de trabajo en condiciones de 40% HR y 25 °C [20].

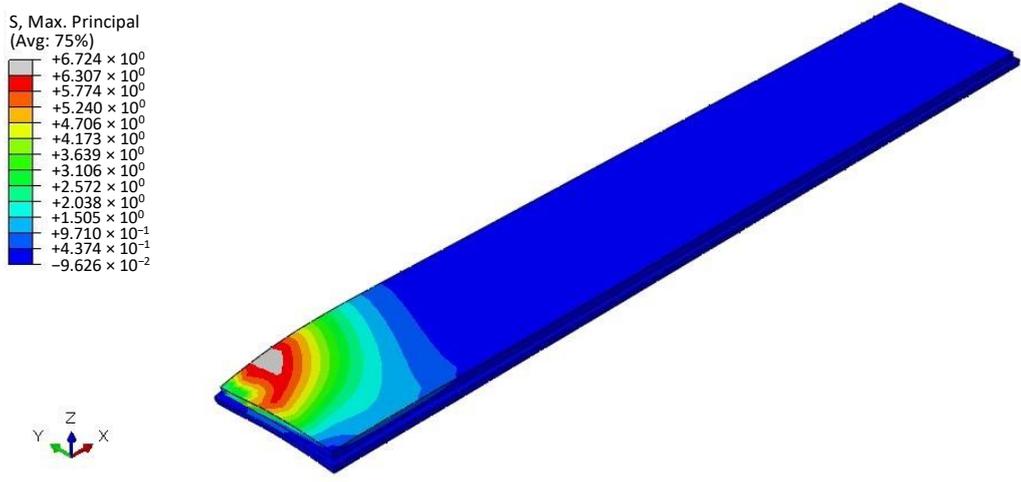


(a)

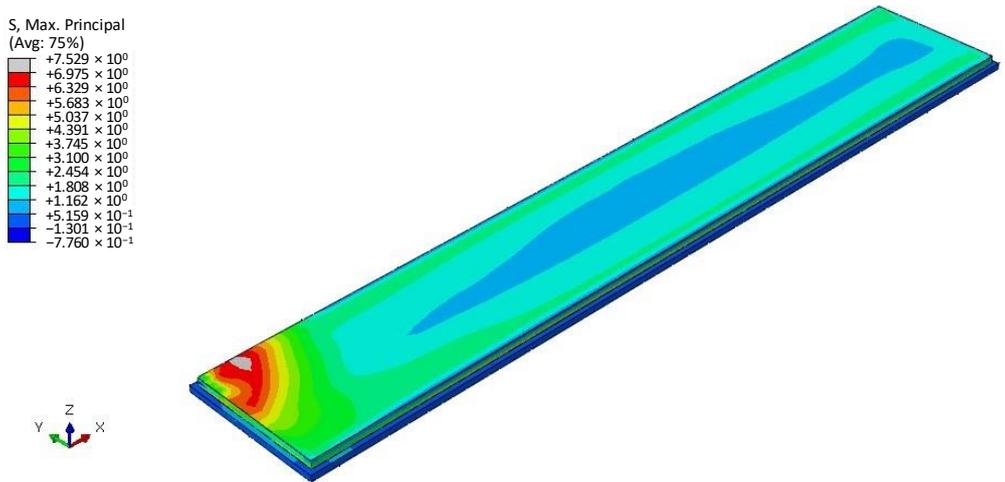


(b)

Figura 4.3.20. Tensión principal máxima (MPa) del pavimento bajo carga en esquina (a) sin estar sometido a condiciones ambientales de 85% HR y 25 °C y (b) estando sometido a condiciones ambientales de 85% HR y 25 °C.



(a)



(b)

Figura 4.3.21. Tensión principal máxima (MPa) del pavimento bajo carga en esquina (a) sin estar sometido a condiciones ambientales de 20% HR y 25 °C y (b) estando sometido a condiciones ambientales de 20% HR y 25 °C.

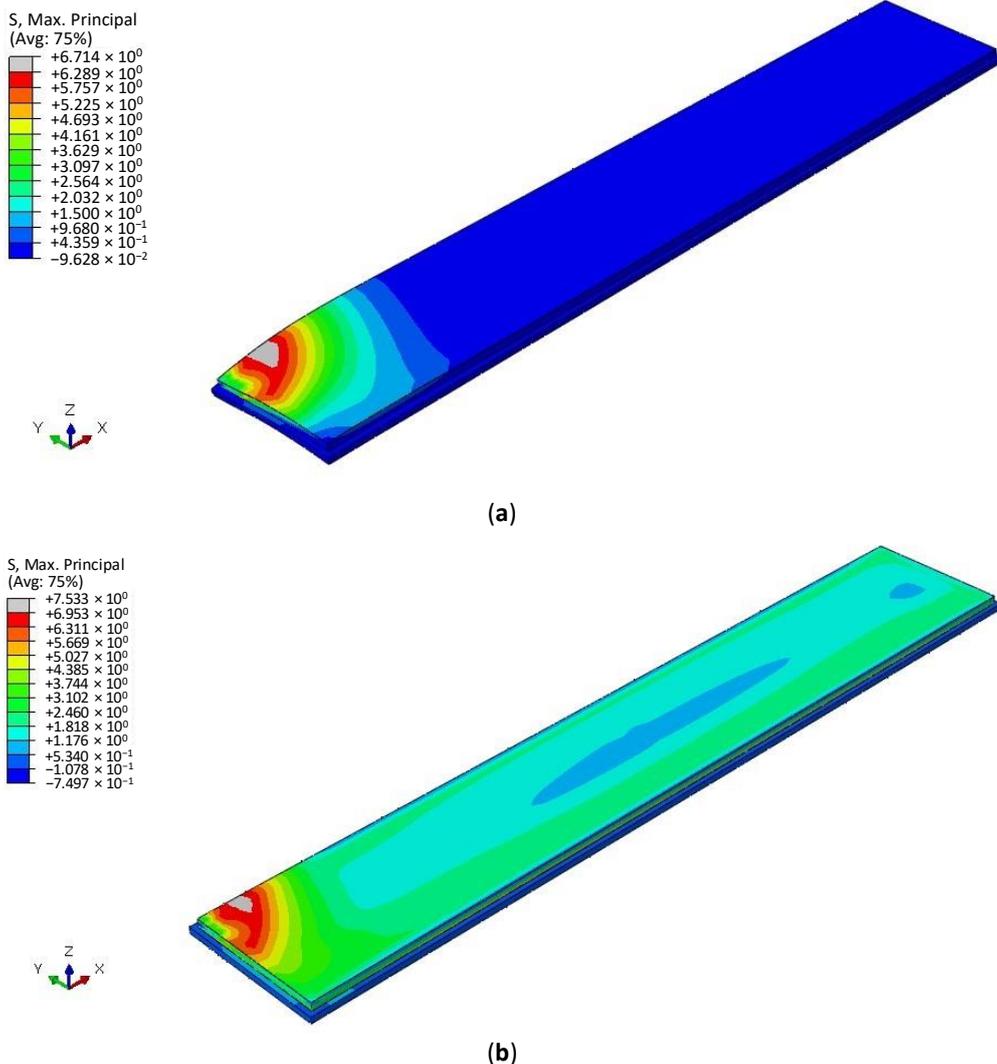


Figura 4.3.22. Tensión principal máxima (MPa) del pavimento bajo carga de esquina (a) sin estar sometido a una condición ambiental de 10% HR y 40 °C y (b) estando sometido a una condición ambiental de 10% HR y 40 °C.

#### 4.3.4.3.2 Influencia del tiempo de curado

La Figura 4.3.23 presenta la evolución de la tensión principal máxima en el pavimento tras aplicar una carga en curva a lo largo del periodo de curado, considerando condiciones ambientales y no ambientales. Los resultados muestran diferencias notables en las tensiones del pavimento cuando no se utilizó carga vehicular, con incrementos de hasta 158 veces en las condiciones de 85% HR y 25 °C, 220 veces en las condiciones de 20% HR y 25 °C, y un incremento de hasta 209 veces en las condiciones de 10% HR y 40 °C.

Sin embargo, es relevante señalar que estos incrementos de tensión se redujeron cuando la carga del vehículo se aplicó en la esquina del pavimento, registrándose un factor de incremento de 1.10 bajo la influencia de las condiciones ambientales. Esto se debe a que la carga en la esquina actúa en sentido contrario a la retracción provocada por el secado del material. Por lo tanto, este estudio revela que el pavimento sufre un impacto antes de que se aplique una carga vehicular en la esquina. Además, la carga simultánea en esta zona disminuyó significativamente las tensiones que podrían provocar el fallo del pavimento.

Las Figuras 4.3.20-4.3.22 ilustran el comportamiento de los pavimentos HCR sometidos a cargas de esquina durante un análisis de un año, con y sin considerar el efecto de las condiciones ambientales. En cada figura se presentan las tensiones principales máximas y se relacionan con la deformación principal inelástica máxima del pavimento, es decir, la fisuración.

Además, la Figura 4.3.23 pone de relieve que, cuando se somete a cargas ambientales, las tensiones del pavimento experimentan un efecto significativo a medida que las curvas se alejan de las condiciones no ambientales. Esta observación fue corroborada por el análisis de Kruskal-Wallis, que mostró que los valores  $p$  eran inferiores a 0.05, como se detalla en las Tablas 4.3.2-4.3.3. Sin embargo, los resultados difirieron al comparar las curvas en condiciones ambientales, ya que mostraron similitudes. Este hallazgo fue confirmado por las pruebas post hoc de Kruskal-Wallis y Mann-Whitney, en las que los valores  $p$  resultaron ser más significativos que 0.05, como se detalla en las Tablas 4.3.4-4.3.5, lo que indica que no se observó ningún efecto apreciable entre las diferentes condiciones ambientales.

Por lo tanto, los resultados sugieren que es posible analizar y diseñar un pavimento HCR con una condición intermedia, lo que implica un aumento de 200 veces en los esfuerzos debidos a la retracción y un aumento de 1.10 veces bajo cargas vehiculares en la esquina, con resultados que concuerdan con investigaciones anteriores [21].

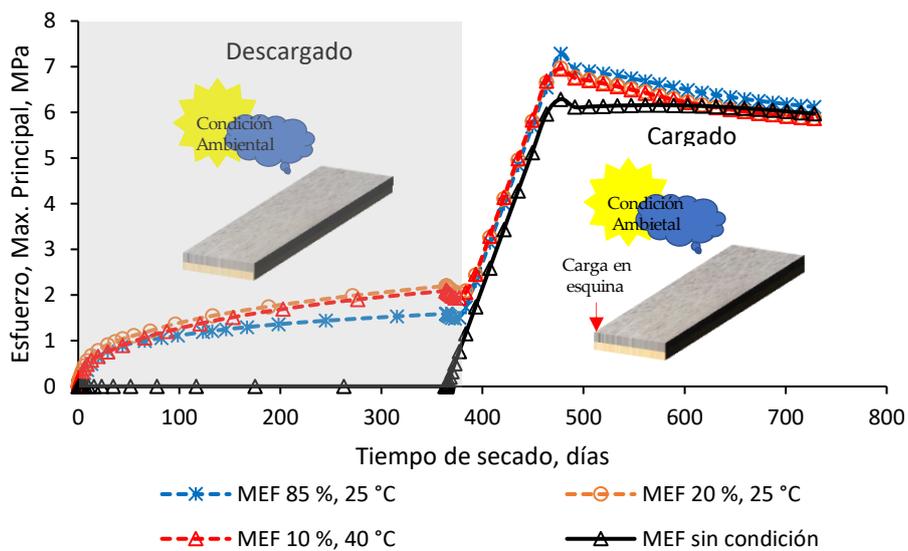


Figura 4.3.23. Tensión principal máxima numérica del pavimento bajo carga en esquina sometido a diferentes condiciones de humedad relativa y temperatura empleando el método de los elementos finitos (MEF).

Tabla 4.3.2. Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov para la tensión principal máxima en un pavimento sometido a carga en esquina con o sin condiciones de humedad relativa y temperatura.

| Con o sin condiciones de humedad relativa y temperatura | Valor $p$               | Sólo los valores $p > 0.05$ tienen una distribución normal |
|---|-------------------------|--|
| Con 85% HR, 25 °C                                       | $2.2 \times 10^{-16}$   | No   |
| Sin 85% HR, 25 °C                                       | $1.125 \times 10^{-14}$ | No   |
| Con 20% HR, 25 °C                                       | $1.162 \times 10^{-10}$ | No   |
| Sin 20% HR, 25 °C                                       | $1.17 \times 10^{-14}$  | No   |
| Con 10% HR, 40 °C                                       | $3.803 \times 10^{-11}$ | No   |
| Sin 10% HR, 40 °C                                       | $1.173 \times 10^{-14}$ | No   |

Tabla 4.3.3. Prueba de suma de rangos de Kruskal-Wallis de los resultados de la tensión principal máxima en el pavimento.

| Fuente de variación   | Chi-cuadrado | Grados de libertad | Valor $p$ | Diferencia significativa (Sólo los valores $p < 0.05$ son significativos) |
|---|--------------|--------------------|-----------|---|
| Tensión principal máxima de 0 a 728 días con o sin humedad relativa del 85% y temperatura de 25 °C  | 6.1184       | 1                  | 0.01338   | Si  |
| Tensión principal máxima de 0 a 728 días con o sin humedad relativa del 20% y temperatura de 25 °C. | 8.6954       | 1                  | 0.00319   | Si  |
| Tensión principal máxima de 0 a 728 días con o sin humedad relativa del 10% y temperatura de 40 °C  | 7.3343       | 1                  | 0.006765  | Si  |

Tabla 4.3.4. Prueba de suma de rangos de Kruskal-Wallis de los resultados de la tensión principal máxima en el pavimento bajo carga en esquina.

| Fuente de variación                         | Chi-cuadrado | Grados de libertad | Valor $p$ | Diferencia significativa (Sólo los valores $p < 0.05$ son significativos) |
|---|--------------|--------------------|-----------|---|
| Maximum principal stress from 0 to 364 days | 1.7387       | 2                  | 0.4192    | No  |

Tabla 4.3.5. Prueba post hoc de Mann-Whitney de los resultados de la tensión principal máxima en el pavimento bajo carga de esquina.

| Humedad Relativa y Temperatura | 10%, 40 °C | 20%, 25 °C |
|--------------------------------|------------|------------|
| 20%, 25 °C                     | 0.81       | -          |
| 85%, 25 °C                     | 0.81       | 0.81       |

#### 4.3.5 Conclusiones

La presente investigación evaluó los efectos de la humedad relativa y la temperatura en la retracción por secado de pavimentos de hormigón compactado con rodillo (HCR) sometidos a carga vehicular. Para ello, se realizaron ensayos de contenido de humedad y retracción por

secado durante 90 días. Además, a partir de los resultados experimentales, se desarrollaron modelos calibrados utilizando el método de los elementos finitos. También se llevó a cabo un análisis de los esfuerzos del pavimento mediante estadística inferencial. De los resultados obtenidos se extraen las siguientes conclusiones:

- El estudio valida la eficacia de los modelos del método de los elementos finitos para representar con precisión las curvas de contenido de humedad y de retracción por secado, manteniéndose dentro de los límites estándar (10% para el contenido de humedad y 7% para la retracción por secado). Este resultado es crucial para comprender cómo la humedad relativa y la temperatura afectan al hormigón compactado con rodillo utilizado en pavimentos en condiciones ambientales típicas.
- El estudio reveló que, en condiciones secas, la temperatura tiene una influencia más significativa que en condiciones húmedas. Esto se debe a la estabilización de la curva de retracción tras 56 días de curado en condiciones ambientales con un 10% de humedad relativa y 40°C, en contraste con condiciones ambientales con un 20% de humedad relativa y 25°C. Por tanto, esto coincide con el tiempo de estabilización de la humedad, que también es de 56 días.
- Los efectos ambientales son cruciales en el análisis de las tensiones máximas en los pavimentos: El esfuerzo aumenta en un factor de 1.10 con la carga vehicular y las condiciones ambientales, pero aumenta 158 veces en condiciones húmedas y 220 veces en condiciones secas sólo con los factores ambientales. Por lo tanto, la carga vehicular mitiga el impacto de la retracción y la humedad.
- En la práctica, es factible diseñar pavimentos de hormigón compactado con rodillo para condiciones ambientales intermedias, ya que no se encontraron diferencias significativas entre ambientes húmedos y secos. Los diseños deben considerar un incremento de 1.10 en el esfuerzo debido a la carga vehicular en las esquinas del pavimento.

#### 4.3.6 Referencias

- [1] P. Leiva-Padilla, F. Moreno-Navarro, G. Iglesias, and M. C. Rubio-Gamez, "A Review of the Contribution of Mechanomutable Asphalt Materials Towards Addressing the Upcoming Challenges of Asphalt Pavements," *Infrastructures (Basel)*, vol. 5, no. 3, p. 23, Feb. 2020, doi: 10.3390/infrastructures5030023.
- [2] F. Moreno-Navarro, F. J. Sierra-Carrillo de Albornoz, M. Sol-Sánchez, and M. C. Rubio-Gómez, "MASAI: sustainable, automated and intelligent asphalt materials. The way to the next generation of asphalt pavements," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 24, no. S1, pp. 486–505, 2023, doi: 10.1080/14680629.2023.2181007.
- [3] T. Garbowski and A. Pożarycki, "Multi-level backcalculation algorithm for robust determination of pavement layers parameters," *Inverse Probl Sci Eng*, vol. 25, no. 5, pp. 674–693, May 2017, doi: 10.1080/17415977.2016.1191073.
- [4] A. G. Karlaftis and A. Badr, "Predicting asphalt pavement crack initiation following rehabilitation treatments," *Transp Res Part C Emerg Technol*, vol. 55, pp. 510–517, 2015, doi: 10.1016/j.trc.2015.03.031.
- [5] T. Mattinzioli, M. Sol-Sanchez, F. Moreno-Navarro, M. C. Rubio-Gamez, and G. Martinez, "Benchmarking the embodied environmental impacts of the design parameters for

- asphalt mixtures,” *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 32, p. e00395, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.susmat.2022.e00395.
- [6] F. Moreno, M. Sol, J. Martín, M. Pérez, and M. C. Rubio, “The effect of crumb rubber modifier on the resistance of asphalt mixes to plastic deformation,” *Mater Des*, vol. 47, pp. 274–280, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.12.022.
- [7] A. Aghaeipour and M. Madhkhan, “Mechanical properties and durability of roller compacted concrete pavement (RCCP)—a review,” *Road Materials and Pavement Design*, vol. 21, no. 7, pp. 1775–1798, 2020, doi: 10.1080/14680629.2019.1579754.
- [8] D. Harrington, F. Abdo, W. Adaska, C. V Hazaree, and H. Ceylan, “Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements,” Aug. 2010. Accessed: Apr. 02, 2021. [Online]. Available: [http://lib.dr.iastate.edu/intrans\\_reports](http://lib.dr.iastate.edu/intrans_reports)
- [9] R. Mickevič and A. Vaitkus, “Application of roller-compacted concrete in freight terminals,” *Mokslas: Lietuvos Ateitis*, vol. 12, Jan. 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.3846/mla.2020.13067>.
- [10] M. Smallridge and M. Elbaz, “RCC pavement success at mobile container terminal,” in *Ports 2010: Building on the Past, Respecting the Future - Proceedings of the 12th Triannual International Conference*, 2010, pp. 901–911. doi: 10.1061/41098(368)93.
- [11] Y. S. Kim, “Roller-compacted concrete shoulder construction on interstate highway in Georgia,” *Transp Res Rec*, no. 2040, pp. 71–79, 2007, doi: 10.3141/2040-08.
- [12] S. Saluja, K. Kaur, S. Goyal, and B. Bhattacharjee, “Assessing the effect of GGBS content and aggregate characteristics on drying shrinkage of roller compacted concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 201, pp. 72–80, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.179.
- [13] S. Saluja, K. Kaur, S. Goyal, and B. Bhattacharjee, “Long-Term Drying Shrinkage of GGBFS-Incorporated RCC under Various Temperature Exposures,” *Journal of materials in civil engineering*, vol. 33, no. 6, 2021, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003746.
- [14] K. Jingfu, H. Chuncui, and Z. Zhenli, “Strength and shrinkage behaviors of roller-compacted concrete with rubber additives,” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 42, no. 8, pp. 1117–1124, 2009, doi: 10.1617/s11527-008-9447-x.
- [15] Z.-X. Li, Y.-Z. Chen, T.-T. Guo, F.-H. Huang, Y.-M. Chang, and X.-J. Niu, “Pavement Performance and Mechanism of Action for Modified Rubber Roller Compacted Concrete | 改性橡胶碾压混凝土路用性能及作用机理,” *Zhongguo Gonglu Xuebao/China Journal of Highway and Transport*, vol. 36, no. 5, pp. 39–48, 2023, doi: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2023.05.003.
- [16] A. Pourjahanshahi, H. Madani, and M. Emadi, “Assessing flexural and permeability performance of roller-compacted concrete pavement (RCCP) reinforcing with different types of synthetic fibres and crimped steel fibre,” *Australian Journal of Civil Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 167–181, Jul. 2023, doi: 10.1080/14488353.2022.2083409.
- [17] M. Mahdi, Z. Wu, Y. L. Liu, and M. G. Sobhani, “Investigation of In Situ Thermal Properties and Early-Age Pavement Behavior in the Design and Performance Evaluation of Roller Compacted Concrete Pavement in Louisiana, U.S,” *Transp Res Rec*, 2023, doi: 10.1177/03611981231161603.

- [18] T. Sok, Y. K. Kim, J. Y. Park, and S. W. Lee, "Evaluation of early-age strains and stresses in roller-compacted concrete pavement," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2021, doi: 10.1016/j.jtte.2020.04.007.
- [19] N. Gholami and A. Modarres, "Shrinkage behaviour of superplasticised RCCP and its relationship with internal temperature," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 12–23, 2019, doi: 10.1080/10298436.2016.1244438.
- [20] N. Jafarifar, K. Pilakoutas, and T. Bennett, "The effect of shrinkage cracks on the load bearing capacity of steel-fibre-reinforced roller-compacted-concrete pavements," *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 49, no. 6, pp. 2329–2347, 2016, doi: 10.1617/s11527-015-0652-0.
- [21] N. Jafarifar, "Shrinkage behaviour of steel-fibre-reinforced-concrete pavements," UK, 2012. Accessed: Jan. 26, 2021. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/29030273.pdf>
- [22] D. W. Pittman and S. A. Ragan, "Drying shrinkage of roller-compacted concrete for pavement applications," *ACI Mater J*, vol. 95, no. 1, pp. 19–26, 1998.
- [23] S. M. Hejazi, S. M. Abtahi, and F. Safaie, "Investigation of thermal stress distribution in fiber-reinforced roller compacted concrete pavements," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 45, no. 5, pp. 896–914, 2016, doi: 10.1177/1528083714542827.
- [24] AASHTO, *Mechanistic-empirical pavement design guide. A Manual of Practice*, American A. 2015.
- [25] AASHTO, *AASHTO (2008) Pavement Design Guide A Manual of Practice*. Washington DC, 2008.
- [26] LCPC-SETRA, *Chaussée En Béton, Guide Technique*. Paris: LCPC-SETRA, 2000. Accessed: Apr. 08, 2021. [Online]. Available: <https://en.calameo.com/read/001587962fa82bd755fe6>
- [27] D. W. Pittman and B. F. McCullough, "Development of a roller-compacted concrete pavement crack and joint spacing model," *Transportation Research Record*, no. 1568. National Research Council, Department of Civil Engineering, 238 Harbert Engineering Center, Auburn University, AL 36849, United States, pp. 52–64, 1997. doi: 10.3141/1568-07.
- [28] I. Adwan et al., "Asphalt pavement temperature prediction models: A review," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 9, 2021, doi: 10.3390/app11093794.
- [29] H. An, H. Liu, and H. Han, "Hybrid Finite-Discrete Element Modelling of Excavation Damaged Zone Formation Process Induced by Blasts in a Deep Tunnel," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/7153958.
- [30] A. Pizarro, S. Manfreda, and E. Tubaldi, "The science behind scour at bridge foundations: A review," *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 2, 2020, doi: 10.3390/w12020374.
- [31] M. Zdiri, N.-E. Abriak, M. B. Ouedzou, A. Loulizi, and J. Neji, "Numerical modeling of a roller compacted concrete pavement under vehicular loading," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 2, no. 5, pp. 188–195, 2009.

- [32] F. Tartarini, S. Schiavon, T. Cheung, and T. Hoyt, "CBE Thermal Comfort Tool: Online tool for thermal comfort calculations and visualizations," *SoftwareX*, vol. 12, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.softx.2020.100563.
- [33] P. Shafigh, M. Hashemi, B. H. Nam, and S. Koting, "Optimum moisture content in roller-compacted concrete pavement," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 21, no. 14, pp. 1769–1779, 2020, doi: 10.1080/10298436.2019.1567919.
- [34] ASTM, "ASTM D1557 – 12: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)), " 2012. doi: 10.1520/D1557-12.
- [35] ASTM, "ASTM C128 – 15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate," 2015. doi: 10.1520/C0128-15.
- [36] ASTM, "ASTM C127 – 15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate," 2015. doi: 10.1520/C0127-15.
- [37] Portland Cement Association, "Guide Specification for Construction of Roller-Compacted Concrete Pavements," Illinois, Jun. 2004. Accessed: Sep. 10, 2021. [Online]. Available: <https://www.chaneyenterprises.com/files/productdocs/Guidetorcc.PDF>
- [38] C. Chhorn and S. W. Lee, "Influencing compressive strength of roller-compacted concrete," *Proceedings of the institution of civil engineers-construction materials*, vol. 171, no. 1, pp. 3–10, 2018, doi: 10.1680/jcoma.16.00009.
- [39] ASTM, "ASTM C33/C33M – 18: Standard Specification for Concrete Aggregates," 2018. doi: 10.1520/C0033\_C0033M-18.
- [40] M. Hashemi, P. Shafigh, M. R. Bin Karim, and C. D. Atis, "The effect of coarse to fine aggregate ratio on the fresh and hardened properties of roller-compacted concrete pavement," *Constr Build Mater*, vol. 169, pp. 553–566, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.216.
- [41] Ministerio de Fomento, RC-16 Instrucción para la recepción de cementos. Madrid: Ministerio de la Presidencia, 2016. Accessed: Sep. 01, 2021. [Online]. Available: [https://www.mitma.gob.es/recursos\\_mfom/boea20166167.pdf](https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/boea20166167.pdf)
- [42] G. García-Travé, M. J. Martínez-Echevarria, M. C. R. Gámez, and F. M. Navarro, "Bituminous mix response to plastic deformations: Comparison of the Spanish NLT-173 and UNE-EN 12697-22 wheel-tracking tests | Análisis comparativo del comportamiento de una mezcla bituminosa frente a deformaciones plásticas, atendiendo a los ensayos NLT /," *DYNA (Colombia)*, vol. 79, no. 174, pp. 51–57, 2012.
- [43] G. M. García Travé, *Análisis comparativo del comportamiento mecánico de mezclas bituminosas : normativa NLT-normativa UNE-EN : para la obtención del título de Doctor por la Universidad de Granada*. Editorial Universidad de Granada, 2013.
- [44] N. Jafarifar, K. Pilakoutas, and T. Bennett, "Moisture transport and drying shrinkage properties of steel-fibre-reinforced-concrete," *Constr Build Mater*, vol. 73, pp. 41–50, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.039.

- [45] M. Asad, M. H. Baluch, and A. H. Al-Gadhib, "Drying shrinkage stresses in concrete patch repair systems," *Magazine of Concrete Research*, vol. 49, no. 181, pp. 283–293, 1997, doi: 10.1680/mac.1997.49.181.283.
- [46] T. Ayano and F. H. Wittmann, "Drying, moisture distribution, and shrinkage of cement-based materials," *Mater Struct*, vol. 35, no. 3, pp. 134–140, Apr. 2002, doi: 10.1007/BF02533581.
- [47] ASTM, "ASTM C157/C157M – 17: Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete," 2017. doi: 10.1520/C0157\_C0157M-17.
- [48] ASTM, "ASTM C39/C39M – 21: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," 2021. doi: 10.1520/C0039\_C0039M-21.
- [49] British Standards Institution, "BS EN 12390-3:2019 - TC: Tracked Changes. Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens," 2020. [Online]. Available: <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=000000000030407444>
- [50] ASTM, "ASTM C78/C78M – 21: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)," 2021. doi: 10.1520/C0078\_C0078M-21.
- [51] M. Asad, "Computational Modelling of shrinkage in repaired concrete," King Fahd University of Petroleum and Minerals, 1995. Accessed: Apr. 07, 2021. [Online]. Available: [https://eprints.kfupm.edu.sa/id/eprint/2591/1/S\\_M\\_F\\_14.pdf](https://eprints.kfupm.edu.sa/id/eprint/2591/1/S_M_F_14.pdf)
- [52] E. C. Pegg and H. S. Gill, "An open source software tool to assign the material properties of bone for ABAQUS finite element simulations," *J Biomech*, vol. 49, no. 13, pp. 3116–3121, 2016, doi: 10.1016/j.jbiomech.2016.07.037.
- [53] J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller, and E. Oñate, "A plastic-damage model for concrete," *Int J Solids Struct*, vol. 25, no. 3, pp. 299–326, 1989, doi: 10.1016/0020-7683(89)90050-4.
- [54] S. S. C. Liao, "Estimating the coefficient of subgrade reaction for plane strain conditions," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, vol. 113, no. 3, pp. 166–181, 1995, doi: 10.1680/igeng.1995.27812.
- [55] X. Hou and V. V. Silberschmidt, *Metamaterials with Negative Poisson's Ratio: A Review of Mechanical Properties and Deformation Mechanisms*. 2015. doi: 10.1007/978-3-319-17118-0\_7.
- [56] AASHTO, *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, 7th ed. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2018, 2018. Accessed: Nov. 11, 2022. [Online]. Available: <https://aashtojournal.org/2018/09/28/aashto-releases-7th-edition-of-its-highway-street-design-green-book/>
- [57] J. G. J. K. R. M. K. O. J. O. S. R. W. S. S. S. N. W. R. Brewer, "Geometric Design Practices for European Roads," Washington, D.C., 2001. [Online]. Available: [www.international.fhwa.dot.gov](http://www.international.fhwa.dot.gov)
- [58] D. J. Sheskin, *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures*. Chapman and Hall/CRC, 2003. doi: 10.1201/9781420036268.

- [59] B. Spangl, N. Kaiblinger, P. Ruckdeschel, and D. Rasch, "Minimal sample size in balanced ANOVA models of crossed, nested, and mixed classifications," *Commun Stat Theory Methods*, 2021, doi: 10.1080/03610926.2021.1938126.
- [60] P. K. Sahu, S. R. Pal, and A. K. Das, "Estimation and inferential statistics," *Estimation and Inferential Statistics*, pp. 1–317, Jan. 2015, doi: 10.1007/978-81-322-2514-0/COVER.
- [61] O. Korosteleva, *Nonparametric methods in statistics with SAS applications*. 2013. doi: 10.1201/b15387.
- [62] R. Ho, *Handbook of Univariate and Multivariate Data Analysis and Interpretation with SPSS*. Chapman and Hall/CRC, 2006. doi: 10.1201/9781420011111.
- [63] T. Sok, S. J. Hong, Y. K. Kim, and S. W. Lee, "Evaluation of load transfer characteristics in roller-compacted concrete pavement," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 21, no. 6, pp. 796–804, 2020, doi: 10.1080/10298436.2018.1511782.

## 5. Conclusiones

Esta tesis abordó la evaluación del efecto de la humedad relativa y la temperatura en la retracción por secado de hormigones compactados con rodillo (HCR) utilizados en pavimentos. Siguiendo los objetivos planteados, la investigación se desarrolló mediante una metodología detallada cuyos resultados más relevantes se han publicado en los artículos:

Influence of Service Conditions and Mix Design on the Physical–Mechanical Properties of Roller-Compacted Concrete for Pavement, en la revista *Materials*.

Prediction of the Physical-Mechanical Properties of Roller-Compacted Concrete Pavements under Different Service and Mix Conditions Based on Cement and Water Content, en la revista *Materials*.

Effects of Relative Humidity and Temperature on the Drying Shrinkage of Roller-Compacted Concrete Pavements, en la revista *Infrastructures*.

A partir de la investigación recogida en los citados artículos, se extraen las siguientes conclusiones:

1. Un ambiente caracterizado por altos niveles de humedad, específicamente superior al 70%, ha demostrado ser beneficioso para la retención de humedad en los especímenes estudiados, disminuyendo significativamente la retracción observada. En comparación, las condiciones secas con humedades relativas menores al 30% duplicaron los valores de retracción, destacando la importancia de la humedad ambiental en la preservación de las propiedades físicas del material.
2. Se ha observado que la deformación por retracción en el hormigón compactado con rodillo (HCR) sigue una relación logarítmica con la variación de vapor de agua por kilogramo de aire, lo que sugiere que estos parámetros pueden ser usados para predecir el comportamiento del HCR bajo una amplia gama de combinaciones de humedad y temperatura.
3. El incremento en la dosificación de cemento y la incorporación de superplastificantes han demostrado ser estrategias efectivas para mejorar la retención de humedad en los especímenes de HCR, reduciendo la tendencia a la retracción. Esta reducción es crucial para minimizar deformaciones no deseadas, asegurando la estabilidad del hormigón. Los resultados del estudio resaltan que estos factores son determinantes en el diseño de mezclas de hormigón más estables y duraderas, permitiendo el desarrollo de materiales que optimizan su rendimiento y longevidad sin comprometer la integridad estructural de las construcciones.
4. El proceso de curado en condiciones secas parece ser más crítico, ya que promueve una mayor retención de agua dentro del material, mejorando así el rendimiento general del hormigón. Por otro lado, el curado en ambientes húmedos, aunque tiene un impacto limitado, ayuda a mantener la humedad intrínseca del material, lo que podría ser beneficioso bajo ciertas condiciones de uso, como en lugares con una cantidad moderada de horas de sol, que corresponden a condiciones ambientales intermedias entre húmedas y secas.
5. En lo que respecta a la retracción por secado, se observó que ésta disminuye de manera significativa con incrementos en el contenido de humedad y de cemento. Este efecto es aún más pronunciado cuando se incrementa la proporción de cemento del 12% al 16%,

lo que resalta la influencia directa de la composición del material en su capacidad para responder a las condiciones ambientales.

6. Los análisis estadísticos mediante ecuaciones de regresión múltiple ajustan adecuadamente los resultados del laboratorio, con un R-cuadrado próximo a uno y un valor  $p$  menor a 0.05, lo que refuerza la validez de los modelos cuadráticos puros y de primer orden para describir el comportamiento del módulo de rotura y la retracción por secado, respectivamente.
7. Los modelos de elementos finitos han demostrado ser herramientas eficaces para simular las curvas de contenido de humedad y retracción por secado, proporcionando resultados que se mantienen dentro de los márgenes de error estándar aceptados, lo que es esencial para validar la precisión y la aplicabilidad de estos modelos en estudios de ingeniería.
8. La investigación concluye que la carga vehicular puede mitigar de manera significativa los efectos negativos de la retracción y la humedad sobre la estabilidad y durabilidad del pavimento. Los resultados sugieren que es posible diseñar pavimentos de HCR adecuados para condiciones ambientales intermedias, ya que las diferencias entre entornos húmedos y secos no son significativas. Por lo tanto, los diseños de pavimento deben optimizarse para soportar aumentos de esfuerzo de hasta 1.10 debido a las cargas vehiculares, especialmente en las esquinas, donde las tensiones son más intensas. Este enfoque integral destaca la importancia de tener en cuenta tanto las condiciones ambientales como las cargas vehiculares en la planificación y diseño de infraestructuras de pavimento duraderas y eficientes.

## 6. Futuras líneas de investigación

Basándose en los hallazgos y conclusiones de esta tesis doctoral, se proponen las siguientes futuras líneas de investigación:

- Se recomienda la posibilidad de ampliar esta investigación para analizar cómo influyen las propiedades físico-mecánicas de la mezcla de HCR en las condiciones de servicio, considerando la incorporación de otros aditivos en aplicaciones cotidianas. Además, se contemple la inclusión de materiales sostenibles, como áridos alternativos obtenidos a partir de hormigón reciclado, áridos reciclados de asfalto, escoria de horno de arco eléctrico, escoria de siderurgia y materiales reciclados de neumáticos, como gránulos de caucho y fibras de polipropileno.
- La presente investigación tiene el potencial de extenderse para explorar la creación de ecuaciones de regresión múltiple avanzadas. Dichas ecuaciones integrarían una amplia variedad de variables esenciales, incluyendo las condiciones ambientales y diversos aspectos de la composición del hormigón, tales como la concentración de cemento, la proporción agua-cemento, y la inclusión de materiales sostenibles en la mezcla. Estos materiales sostenibles podrían abarcar áridos derivados de hormigón y asfalto reciclados, escorias de hornos de arco eléctrico, residuos de procesos metalúrgicos y cenizas, así como materiales reciclados de neumáticos, como gránulos de caucho y fibras de polipropileno, evaluando su impacto en el comportamiento y las propiedades del hormigón a corto, mediano y largo plazo.
- Existe un potencial significativo para expandir la investigación actual al examinar cómo los cambios en la humedad del suelo afectan el estado de esfuerzo y deformación de los pavimentos de hormigón compactado con rodillo (HCR). Este análisis podría diferenciarse en función del tipo de suelo soporte, distinguiendo entre suelos finos y gruesos, considerando que cada uno interactúa de manera distinta con la humedad de la mezcla a lo largo del tiempo y bajo diversas condiciones ambientales.
- Es posible desarrollar modelos genéricos para evaluar el deterioro a través de ensayos, tanto en tiempo real como acelerados. Estos ensayos utilizan condiciones controladas de humedad relativa y temperatura. El propósito es establecer una correlación entre el número de cargas por eje, según los estándares americanos o europeos, y los esfuerzos de fatiga. Esto permitirá la creación de leyes de comportamiento, o funciones de transferencia, que son esenciales para el diseño empírico mecanicista de pavimentos de hormigón compactado con rodillo (HCR) que reflejen más fielmente las condiciones reales.



## 7. Referencias Bibliográficas

Este apartado incluye las referencias correspondientes a las secciones de 1. Introducción y 2. Metodología. Las referencias específicas de cada uno de los tres artículos que componen este compendio de publicaciones se encuentran al final de cada artículo.

- [1] M. Mahdi, M. G. Sobhani, Z. Wu, Y. Liu, and Z. Xie, *Development of a Fatigue Damage Model for Roller Compacted Concrete Pavement Based on In Situ Saw-Cut Beams and Accelerated Pavement Performance*, vol. 2676, no. 10. 2022. doi: 10.1177/03611981221089314.
- [2] F. Liu, C. Wu, J. Li, and X. Xu, "Structural Life Analysis of Roller-compacted Concrete Asphalt Pavement," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 781, no. 2, May 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/781/2/022099>.
- [3] J. E. Shoenberger, "Cost-effective surfacing for tracked-vehicle traffic," 1987.
- [4] A. Mardani-Aghabaglou, S. H. Bayqra, S. Ozen, M. G. Altun, Z. A. Faqiri, and K. Ramyar, "Review of research on designing methods and properties of roller compacted concrete mixtures," *Pamukkale university journal of engineering sciences-pamukkale universitesi muhendislik bilimleri dergisi*, vol. 26, no. 3, pp. 419–431, 2020, doi: 10.5505/pajes.2019.93530.
- [5] N. Delatte and TRB, "Simplified design of roller-compacted concrete composite pavement," in *Pavement design and accelerated testing 2004*, no. 83rd Annual Meeting of the Transportation-Research-Board, 2004, pp. 57–65. doi: 10.3141/1896-06.
- [6] K. Kokubu and Y. Anzaki, "State of the Art Report on Roller Compacted Concrete Pavements," *Concrete Journal*, vol. 27, no. 5, pp. 22–30, 1989, doi: 10.3151/coj1975.27.5\_22.
- [7] M. Selvam, M. N. Kumar, and S. Singh, "Comparative Analysis of Jointed Plain Concrete Pavement and Roller-Compacted Concrete Pavement," *Transp Res Rec*, 2023, doi: 10.1177/03611981231188722.
- [8] M. Selvam and S. Singh, "Material Selection and Mixture Proportioning Methods for Sustainable Roller-Compacted Concrete Pavements," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 34, no. 11, 2022, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004325.
- [9] S. Debbarma and G. D. Ransinchung R.N., "Achieving sustainability in roller compacted concrete pavement mixes using reclaimed asphalt pavement aggregates – state of the art review," *J Clean Prod*, vol. 287, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125078.
- [10] S. Pranav, S. Agganwal, E.-H. Yang, A. K. Sarkar, A. P. Singh, and M. Lahoti, "Alternative materials for wearing course of concrete pavements: A critical review," *Constr Build Mater*, vol. 236, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117609.
- [11] A. Aghaeipour and M. Madhkhan, "Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability," *Constr Build Mater*, vol. 141, pp. 533–541, Jun. 2017, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.03.019.

- [12] S. Debbarma, G. D. Ransinchung R.N, S. Singh, and S. K. Sahdeo, *Utilization of Waste Materials for Productions of Sustainable Roller-Compacted Concrete Pavements—A Review*, vol. 218. 2022. doi: 10.1007/978-981-16-9921-4\_28.
- [13] A. K. Mullick, "Use of fly ash in structural concrete: Part II - How much?," *Indian Concrete Journal*, vol. 79, no. 6, pp. 10–14, 2005.
- [14] S. Husein Bayqra, A. Mardani-Aghabaglou, and K. Ramyar, "Physical and mechanical properties of high volume fly ash roller compacted concrete pavement (A laboratory and case study)," *Constr Build Mater*, vol. 314, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125664.
- [15] R. B. Holland, K. E. Kurtis, and L. F. Kahn, "Effect of different concrete materials on the corrosion of the embedded reinforcing steel," in *Corrosion of Steel in Concrete Structures*, Elsevier, 2016, pp. 131–147. doi: 10.1016/B978-1-78242-381-2.00007-9.
- [16] M. Adamu, B. S. Mohammed, N. Shafiq, M. S. Liew, and W. S. Alaloul, "Effect of crumb rubber and nano silica on the durability performance of high volume fly ash roller compacted concrete pavement," *International Journal of Advanced and applied sciences*, vol. 5, no. 10, pp. 53–61, Oct. 2018, doi: 10.21833/ijaas.2018.10.008.
- [17] M. Adamu, B. S. Mohammed, N. Shafiq, and M. Shahir Liew, "Effect of crumb rubber and nano silica on the fatigue performance of roller compacted concrete pavement," *Cogent Eng*, vol. 5, no. 1, p. 1436027, Jan. 2018, doi: 10.1080/23311916.2018.1436027.
- [18] N. Gholami and A. Modarres, "Shrinkage behaviour of superplasticised RCCP and its relationship with internal temperature," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 12–23, 2019, doi: 10.1080/10298436.2016.1244438.
- [19] Z.-X. Li, Y.-Z. Chen, T.-T. Guo, F.-H. Huang, Y.-M. Chang, and X.-J. Niu, "Pavement Performance and Mechanism of Action for Modified Rubber Roller Compacted Concrete | 改性橡胶碾压混凝土路用性能及作用机理," *Zhongguo Gonglu Xuebao/China Journal of Highway and Transport*, vol. 36, no. 5, pp. 39–48, 2023, doi: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2023.05.003.
- [20] M. Selvam, S. Debbarma, S. Singh, and X. Shi, "Utilization of alternative aggregates for roller compacted concrete pavements – A state-of-the-art review," *Constr Build Mater*, vol. 317, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125838.
- [21] M. Mahdi, Z. Wu, Y. L. Liu, and M. G. Sobhani, "Investigation of In Situ Thermal Properties and Early-Age Pavement Behavior in the Design and Performance Evaluation of Roller Compacted Concrete Pavement in Louisiana, U.S," *Transp Res Rec*, 2023, doi: 10.1177/03611981231161603.
- [22] D. W. Pittman, "RCC pavement construction and quality control," 1988, pp. 438–453.
- [23] R. Mickevič and A. Vaitkus, "Application of roller-compacted concrete in freight terminals," *Mokslas: Lietuvos Ateitis*, vol. 12, Jan. 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.3846/mla.2020.13067>.
- [24] M. Smallridge and M. Elbaz, "RCC pavement success at mobile container terminal," in *Ports 2010: Building on the Past, Respecting the Future - Proceedings of the 12th Triannual International Conference*, 2010, pp. 901–911. doi: 10.1061/41098(368)93.

- [25] Y. S. Kim, "Roller-compacted concrete shoulder construction on interstate highway in Georgia," *Transp Res Rec*, no. 2040, pp. 71–79, 2007, doi: 10.3141/2040-08.
- [26] T. D. White, "Mix design, thickness design, and construction of roller-compacted concrete pavement," *Transp Res Rec*, pp. 1–6, 1986.
- [27] D. Harrington, F. Abdo, W. Adaska, C. V Hazaree, and H. Ceylan, *Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements*. 2010. Accessed: Apr. 02, 2021. [Online]. Available: [http://lib.dr.iastate.edu/intrans\\_reports](http://lib.dr.iastate.edu/intrans_reports)
- [28] I. K. Cisse and A. Sall, "Use of the Roller Compacted Concrete (RCC)," 2011. doi: 10.3233/978-1-60750-778-9-460.
- [29] S. S. Seehra, "Roller compacted concrete construction technique for rigid pavement projects," *Indian Concrete Journal*, vol. 78, no. 12, pp. 49–52, 2004.
- [30] D. Q. He, Y. M. Wang, and C. Lu, "Load Stress Analysis on BFRC-RCC Composite Pavement," 2012. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.226-228.1800.
- [31] S. K. Rao, P. Sravana, and T. C. Rao, "Design and Analysis of Roller Compacted Concrete Pavements for Low Volume Roads in India," *i-Manager's Journal on Civil Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 9–15, 2015, [Online]. Available: <https://www.proquest.com/scholarly-journals/design-analysis-roller-compacted-concrete/docview/1702050621/se-2?accountid=14542>
- [32] American Concrete Pavement Association (ACPA), "PavementDesigner," 2022, *American Concrete Pavement Association (ACPA), Washington, D.C.*: 1. Accessed: Sep. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.pavementdesigner.org/>
- [33] A. Nanni, D. A. Ludwig, and J. E. Shoenberger, "Physico-mechanical properties and load transfer efficiency of RCC pavement," *ACI Mater J*, vol. 93, no. 4, pp. 356–361, 1996.
- [34] J. A. Pulecio-Diaz, O. C. Valderrama-Riveros, M. Sol-Sanchez, and F. Moreno-Navarro, "Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP)," Aug. 20, 2024, *Ibagué*: 1. Accessed: Aug. 31, 2022. [Online]. Available: <https://ibaing.com/rccp/index.php>
- [35] M. R. K. Manesh, M. M. S. Babaki, and A. P. Tavandashti, "Examining the Effect of Weight and the Arrangement of Aircrafts' Wheels on Roller-Compacted Concrete (RCC) Pavement Design of Runways Using Finite Element Method," *Current World Environment*, vol. 10, no. Special Issue, pp. 574–579, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.12944/CWE.10.Special-Issue1.69>.
- [36] R. G. Packard, "Computer Program for Airport Pavement Design, SR031P," 1967, *Portland Cement Association*.
- [37] AASHTO, *Mechanistic-empirical pavement design guide. A Manual of Practice*, American A. 2015.
- [38] M. Rith, Y. K. Kim, and S. W. Lee, "Behavior of RCC-base composite pavement for heavy duty area," *Constr Build Mater*, vol. 175, pp. 144–151, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.194.
- [39] W. Brink, "Using AASHTOWare pavement ME design to establish pavement thicknesses for frost protection in different climate zones or regions," in *Airfield and Highway*

*Pavements 2019: Design, Construction, Condition Evaluation, and Management of Pavements - Selected Papers from the International Airfield and Highway Pavements Conference 2019*, 2019, pp. 43–51. doi: 10.1061/9780784482452.005.

- [40] L. Johanneck, D. Tompkins, T. Clyne, and L. Khazanovich, *Minnesota road research data for evaluation and local calibration of the mechanistic-empirical pavement design guide's enhanced integrated climatic model*, no. 2226. 2011. doi: 10.3141/2226-04.
- [41] L. S. Woo and 송시훈, "A Study on the Gradation Effect of the Property of Roller Compacted Concrete Pavement," *한국도로학회논문집*, vol. 17, no. 3, pp. 49–58, 2015.
- [42] D. W. Pittman and S. A. Ragan, "Drying shrinkage of roller-compacted concrete for pavement applications," *ACI Mater J*, vol. 95, no. 1, pp. 19–26, 1998.
- [43] M. Abbasi, P. Shafigh, and M. R. Baharum, "The effect of coarse to fine aggregate ratio on drying shrinkage of roller compacted concrete pavement in different curing conditions," *Materiales de construcción*, vol. 71, no. 342, 2021, doi: 10.3989/mc.2021.03520.
- [44] S. Saluja, K. Kaur, S. Goyal, and B. Bhattacharjee, "Assessing the effect of GGBS content and aggregate characteristics on drying shrinkage of roller compacted concrete," *Constr Build Mater*, vol. 201, pp. 72–80, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.179.
- [45] S. Saluja, K. Kaur, S. Goyal, and B. Bhattacharjee, "Long-Term Drying Shrinkage of GGBFS-Incorporated RCC under Various Temperature Exposures," *Journal of materials in civil engineering*, vol. 33, no. 6, 2021, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003746.
- [46] K. Jingfu, H. Chuncui, and Z. Zhenli, "Strength and shrinkage behaviors of roller-compacted concrete with rubber additives," *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 42, no. 8, pp. 1117–1124, 2009, doi: 10.1617/s11527-008-9447-x.
- [47] A. Pourjahanshahi, H. Madani, and M. Emadi, "Assessing flexural and permeability performance of roller-compacted concrete pavement (RCCP) reinforcing with different types of synthetic fibres and crimped steel fibre," *Australian Journal of Civil Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 167–181, Jul. 2023, doi: 10.1080/14488353.2022.2083409.
- [48] T. Sok, Y. K. Kim, J. Y. Park, and S. W. Lee, "Evaluation of early-age strains and stresses in roller-compacted concrete pavement," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2021, doi: 10.1016/j.jtte.2020.04.007.
- [49] N. Jafarifar, K. Pilakoutas, and T. Bennett, "Moisture transport and drying shrinkage properties of steel-fibre-reinforced-concrete," *Constr Build Mater*, vol. 73, pp. 41–50, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.039.
- [50] N. Jafarifar, K. Pilakoutas, and T. Bennett, "The effect of shrinkage cracks on the load bearing capacity of steel-fibre-reinforced roller-compacted-concrete pavements," *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 49, no. 6, pp. 2329–2347, 2016, doi: 10.1617/s11527-015-0652-0.
- [51] N. Jafarifar, "Shrinkage behaviour of steel-fibre-reinforced-concrete pavements," UK, 2012. Accessed: Jan. 26, 2021. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/29030273.pdf>

- [52] K. Ofori-Awuah, "State-of-the-art of roller compacted concrete pavement," in *Proceedings of the Materials Engineering Conference*, 1996, pp. 1439–1448.
- [53] S. Selvakumar and R. D. Norris, "Roller compacted concrete experience," *Road and Transport Research*, vol. 1, no. 3, pp. 74–85, 1992.
- [54] J. Novak, A. Kohoutkova, R. Chylik, and T. Trtik, "Study on pervious recycled aggregate fiber-reinforced concrete for airfield pavement," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 770, no. 1, Feb. 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/770/1/012040>.
- [55] M. S. Hossain and H. C. Ozyildirim, "Roller compacted concrete pavement in Virginia," in *Airfield and Highway Pavements 2015: Innovative and Cost-Effective Pavements for a Sustainable Future - Proceedings of the 2015 International Airfield and Highway Pavements Conference*, 2015, pp. 429–440. doi: 10.1061/9780784479216.039.
- [56] R. W. Piggott and O. O. Naas, "Roller compacted concrete pavements in British Columbia, Canada," 1985, pp. 31–47.
- [57] D. W. Pittman and G. L. Anderton, "Characteristics of Roller Compacted Concrete pavements in the United States," in *7th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, MAIREPAV 2012*, 2012.
- [58] R. W. Piggott, "Roller-compacted concrete for heavy-duty pavements: past performance, recent projects, and recommended construction methods," *Transp Res Rec*, pp. 7–12, 1986.
- [59] C. Ponce-Farfán, D. Santillán, and M. A. Toledo, "Thermal simulation of rolled concrete dams: Influence of the hydration model and the environmental actions on the thermal field," *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 3, 2020, doi: 10.3390/w12030858.
- [60] R. Lackner and H. A. Mang, "Chemoplastic material model for the simulation of early-age cracking: From the constitutive law to numerical analyses of massive concrete structures," *Cem Concr Compos*, vol. 26, no. 5, pp. 551–562, 2004, doi: 10.1016/S0958-9465(03)00071-4.
- [61] ACI, "ACI PRC-325.10-95: Report on Roller-Compacted Concrete Pavements (Reapproved 2001) - Spanish Language," 1995.
- [62] AASHTO, *AASHTO (2008) Pavement Design Guide A Manual of Practice*. Washington DC, 2008.
- [63] LCPC-SETRA, *Chaussée En Béton, Guide Technique*. Paris: LCPC-SETRA, 2000. Accessed: Apr. 08, 2021. [Online]. Available: <https://en.calameo.com/read/001587962fa82bd755fe6>
- [64] A. Aghaeipour and M. Madhkhan, "Mechanical properties and durability of roller compacted concrete pavement (RCCP)—a review," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 21, no. 7, pp. 1775–1798, 2020, doi: 10.1080/14680629.2019.1579754.
- [65] J. Pulecio-Díaz, M. Sol-Sánchez, and F. Moreno-Navarro, "Influence of Service Conditions and Mix Design on the Physical–Mechanical Properties of Roller-Compacted Concrete for Pavement," *Materials*, vol. 17, no. 3, p. 552, Jan. 2024, doi: 10.3390/ma17030552.

- [66] J. Pulecio-Díaz, M. Sol-Sánchez, and F. Moreno-Navarro, "Prediction of the Physical-Mechanical Properties of Roller-Compacted Concrete Pavements under Different Service and Mix Conditions Based on Cement and Water Content," *Materials*, vol. 17, no. 3, p. 549, Jan. 2024, doi: 10.3390/ma17030549.
- [67] J. Pulecio-Díaz, M. Sol-Sánchez, and F. Moreno-Navarro, "Effects of Relative Humidity and Temperature on the Drying Shrinkage of Roller-Compacted Concrete Pavements," *Infrastructures (Basel)*, vol. 9, no. 2, p. 22, Jan. 2024, doi: 10.3390/infrastructures9020022.