

Proyecto Fin de Máster
Máster Universitario en Sistemas de Energía
Térmica

Caracterización experimental de pavimentos fríos en
material hormigón

Autor: Paulo Javier García Melgar

Tutor: Servando Álvarez Domínguez

Maria del Carmen Guerrero Delgado

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Proyecto Fin de Máster
en Sistemas de Energía Térmica

Caracterización experimental de pavimentos fríos en material hormigón

Autor:

Paulo Javier García Melgar

Tutor:

Servando Álvarez Domínguez
Maria del Carmen Guerrero Delgado

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Proyecto Fin de Máster: Caracterización experimental de pavimentos fríos en material hormigón

Autor: Paulo Javier García Melgar

Tutor: Servando Álvarez Domínguez

Maria del Carmen Guerrero Delgado

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal

*A mi familia, por el apoyo aún en
la distancia.*

A mis amigos, mi familia elegida.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a los Prof. Dr Servando Álvarez Domínguez, Prof Dr. José Sánchez Ramos y Prof. Dr. Maria del Carmen Guerrero Delgado por brindarme la oportunidad y confianza en comenzar una nueva etapa junto a ellos. Sin su ayuda y apoyo este trabajo de investigación no hubiera sido posible y por brindarme innumerables conocimientos a lo largo de la realización del mismo y los años previos de clases.

De la misma forma, agradecer a mis compañeros del Grupo de Termotecnia, por abrirme las puertas y hacerme sentir como en casa desde el primer momento de llegada.

Finalmente, agradecer a mi familia y amigos, por ese apoyo fundamental en los momentos donde todo parece muy complicado y se necesita ese empujón de fuerzas para sobrellevarlo.

Paulo Javier García Melgar

Sevilla, 2024

RESUMEN

Actualmente vivimos en un mundo donde se lucha contra un calentamiento global que ha conseguido aumentar hasta 1°C la temperatura media. Este fenómeno ha ocasionado que las ciudades sufran olas de calor cada vez más usuales en términos de frecuencia, intensidad y duración. La diferencia de temperatura entre el área urbana y la zona rural más cercana se denomina Isla de Calor Urbana (UHI) y está relacionada con la densidad, la geometría urbana y los materiales usados para construcción de edificios y espacios urbanos. Este efecto impacta negativamente en la sociedad, afectando a la calidad del aire, el confort térmico y la economía debido a la necesidad de climatización en comercios y áreas residenciales. Los pavimentos desempeñan un papel esencial en el efecto UHI, ya que conforman la mayoría de las superficies urbanas. Debido a su usual color oscuro y bajo albedo, fomentan un aumento significativo en la temperatura de estas superficies, almacenando gran cantidad de energía calorífica que posteriormente es emitida al ambiente. Este trabajo tiene como objetivo proponer una solución basada en la naturaleza (Nature Based Solution) denominada pavimentos fríos. Se ha estudiado el comportamiento de los pavimentos si se mojan su superficie inferior con agua que previamente ha sido recolectada mediante lluvias. El fluido refrigera de forma natural, consiguiendo así una bajada significativa de la temperatura de los pavimentos con respecto al material convencional expuesto al sol. Se consigue recopilar el comportamiento experimental de diferentes tipos de pavimentos tanto en espesor, albedo y composición, aportando un guía de diseño que recopila las diferentes capacidades de refrigeración según la elección y aplicación del pavimento. Gracias a esta solución, en todos los casos ensayados se consigue que los pavimentos tengan una temperatura inferior a la del aire tanto en horas pico de radiación como en horas posteriores al eliminar el almacenamiento térmico de estas superficies. De esta forma, se consigue mejorar los indicadores de confort térmico para los ciudadanos y se contempla una mejora del efecto UHI, reduciendo la temperatura ambiente de las zonas urbanas usando recursos naturales y permitiendo adaptar los pavimentos a las necesidades de mitigación. Además, se realiza un modelo matemático que simula el comportamiento de los pavimentos y se valida en función de los datos recabados experimentalmente. Finalmente, gracias al modelo realizado y validado se caracterizan las propiedades termofísicas de las muestras ensayadas.

ABSTRACT

Cities are struggling with the consequences of global warming that increased the world average temperature by at least 1.1°C in the last four decades. This phenomenon is causing heat wave events more frequent, intense and long, converting urban areas into unwelcoming spaces for life, especially, during the summer months by aggravating the urban heat island (UHI) effect. Besides the anthropogenic released heat and low vegetation density in urban areas, this effect relies on the heat storage capacity of exposed mass. Therefore, the concept of thermal comfort and a healthy environment transcends the physical boundaries of buildings requiring that cities must provide solutions to guarantee the liveability of outdoor spaces. Outdoor pavements play an essential role in the UHI effect, as they represent 20-40% of the urban surface. Due to their usual dark colour and low albedo, they easily present high surficial temperature values being capable of storing a large amount of heat energy, that is subsequently released to the environment. The objective of this work is to propose a natural-based solution to cooling outdoor pavements as a strategy to mitigate the impact of the UHI effect on the outdoor temperature increase. This solution consists of using the collected water during the rainy season to cool the pavements through the conductive effect combined with the reflectivity capability of the pavement material. To test the concept of this technique a set of pavements was studied using two samples, a sample that was wetted with the rainwater and a dry sample, used as a reference. The water acts as a cooling fluid and passively is capable of reducing significantly the surficial temperature of the pavement up to 20°C with reference to the dry sample exposed to the sun. This work also presents the experimental behaviour of different types of pavements considering different thicknesses, albedos and compositions, providing a design guide that compiles the different cooling capacities according to the choice and application of the pavement. In all the cases evaluated, the water-cooled pavements reduced by 100% their overheating potential referred to the air temperature. Even was observed a substantial overcooling potential during solar peak hours, and extended daytime later hours, eliminating the thermal storage capability of these surfaces. Thus, is possible to point out that outdoor spaces with cooled pavements can improve the thermal comfort of individuals and simultaneously mitigate the UHI effect and its impacts. In resume, a strategy suitable for cities capable of offering sustainable solutions to recover livability in urban areas in a global warming scenario. In addition, a mathematical model that simulates the behavior of the pavements is developed and validated based on the data collected experimentally. Finally, thanks to the model developed and validated, the thermophysical properties of the tested samples are characterized.

ÍNDICE

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
Notación	xxiii
1 Introducción	1
1.1 Contexto	1
1.2 Pavimentos fríos	1
1.3 Confort térmico exterior	2
1.4 Propiedades termofísicas relevantes	4
1.5 Solución propuesta	5
1.6 Objetivos	6
2 Experimentación física	7
2.1 Banco de experimentación	7
2.1.1 Sección de placas metálicas	8
2.1.2 Sección de pavimentos	11
2.1.3 Sección de datos meteorológicos	16
2.1.4 Sistema de control y medida	16
2.2 Proceso y metodología de experimentación	17
2.2.1 Calendario de experimentación	18
2.2.2 Fase 1: Montaje y validación de datos	20
2.2.3 Fase 2: Pruebas de fabricantes y procedimiento de pruebas	22
2.2.4 Fase 3: Pesado de muestras en mojado	24
2.2.5 Indicadores de datos experimentales	25
2.3 Muestras para ensayar	26
2.3.1 Fabricante Sorigué	26
2.3.2 Fabricante SAS1900	27
2.3.3 Fabricante Mosaicos Solana	27
2.3.4 Fabricante Breinco	28
2.3.5 Fabricante Campo	28
2.3.6 Normalización de nomenclatura	28
3 Caracterización de propiedades	29
3.1 Metodología de caracterización de propiedades	29
3.1.1 Propiedades calculadas mediante experimentación	29
3.1.2 Propiedades calculadas mediante simulación	29
3.2 Caracterización de placas metálicas	30
3.2.1 Absortividad (Albedo)	30
3.2.2 Temperatura de cielo	31
3.2.3 Coeficientes de película convectivos	31

3.3	<i>Caracterización de pavimentos</i>	33
3.3.1	Propiedades en seco	33
3.3.2	Propiedades en mojado	40
3.3.3	Validación del modelo de simulación en experimentos húmedos.	41
4	Resultados y discusión	48
4.1	<i>Resultados experimentales</i>	48
4.1.1	Gráficas experimentales	48
4.1.2	Indicadores de sobrecalentamiento y subenfriamiento	49
4.2	<i>Resultados de caracterización térmica</i>	50
4.2.1	Resultados de placas metálicas	50
4.2.2	Resultados de pavimentos	51
4.2.3	Resumen de propiedades	56
5	Conclusiones y línea futura	57
5.1	<i>Conclusiones</i>	57
5.2	<i>Línea futura</i>	57
	Referencias	59
	Anexo A: Fotografías de pavimentos a ensayar	61
	Anexo B: Validación del modelo con otro fabricante	67
	Anexo C: Resultados experimentales de cada fabricante	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rangos de medida y precisión del sistema de control y monitoreo. Fuente: Elaboración propia	17
Tabla 2. Lista de pruebas del montaje de la sección de placas metálicas. Fuente: Elaboración propia.	20
Tabla 3. . Lista de pruebas del montaje de la sección de pavimentos. Fuente: Elaboración propia.	21
Tabla 4. Piezas recibidas por fabricante Sorigué. Fuente: Elaboración propia	26
Tabla 5. Piezas recibidas por fabricante SAS1900. Fuente: Elaboración propia	27
Tabla 6. Piezas recibidas por fabricante Mosaicos Solana. Fuente: Elaboración propia	27
Tabla 7. Piezas recibidas por fabricante Breinco. Fuente: Elaboración propia	28
Tabla 8. Piezas recibidas por el fabricante Campo. Fuente: Elaboración propia	28
Tabla 9. Resultados absortividad para día arbitrario muestra F2P1BL. Fuente: Elaboración propia.	37
Tabla 10. Resultados de rectas de regresión para varias absortividades en pavimento F2P1BL. Fuente: Elaboración propia.	39
Tabla 11. Propiedades del agua y aire para cálculod e propiedades húmedas. Fuente: Elaboración propia.	40
Tabla 12. . Coeficientes globales de transferencia en validación del modelo. Fuente: Elaboración propia.	43
Tabla 13. Cálculo de ceficientes de transferencia del lado del agua en función de k. Fuente: Elaboración propia.	43
Tabla 14 Media de propiedades tomadas en simulaciones para validación dle modelo. Fuente: Elaboración propia.	44
Tabla 15. Resultados de absortividades de placas negra y blanca. Fuente: Elaboración propia.	51
Tabla 16. Resultados de densidades y calor específico de pavimento en seco. Fuente: Elaboración propia.	51
Tabla 17. Resultados de absortividad y albedo de pavimentos en estado seco. Fuente: Elaboración propia.	52
Tabla 18. Pesos de muestras de fabricante 1 al hacer el pesado en mojado. Fuente: Elaboración propia.	53
Tabla 19. Porosidad de muestras de fabricante 1 al hacer el pesado en mojado. Fuente: Elaboración propia.	53
Tabla 20. Pesos de muestras de fabricante 2 al hacer el pesado en mojado. Fuente: Elaboración propia.	53
Tabla 21. Porosidad de muestras de fabricante 2 al hacer el pesado en mojado. Fuente: Elaboración propia.	54
Tabla 22. Pesos de muestras de fabricante 2 al hacer el pesado en mojado. Fuente: Elaboración propia.	54
Tabla 23. Porosidad de muestras de fabricante 3 al hacer el pesado en mojado. Fuente: Elaboración propia.	54
Tabla 24. Pesos de muestras de fabricante 4 al hacer el pesado en mojado. Fuente: Elaboración propia.	54
Tabla 25. Porosidad de muestras de fabricante 4 al hacer el pesado en mojado. Fuente: Elaboración propia.	54
Tabla 26. Pesos de muestras de fabricante 5 al hacer el pesado en mojado. Fuente: Elaboración propia.	55
Tabla 27. . Porosidad de muestras de fabricante 5 al hacer el pesado en mojado. Fuente: Elaboración propia.	55
Tabla 28. . Resumen de propiedades caracterizadas de todas las muestras estudiadas. Fuente: Elaboración propia.	

Tabla 29. . Coeficientes globales de transferencia en validación del modelo fabricante 2. Fuente: Elaboración propia. 68

Tabla 30. Cálculo de coeficientes de transferencia del lado del agua en función de k fabricante 2. Fuente: Elaboración propia. 68

Tabla 31 Media de propiedades tomadas en simulaciones para validación del modelo fabricante 2 . Fuente: Elaboración propia. 69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cargas térmicas sobre el ocupantes en sitiación 1. Fuente: Grupo de Termotecnia.	2
Figura 2. Índices de confort según cargas térmicas del ocupante. Fuente: Grupo de Termotecnia.	3
Figura 3. Cargas térmicas sobre el ocupantes en sitiación 2. Fuente: Grupo de Termotecnia	3
Figura 4. Intercambios radiantes y efecto de la pavimentación exterior. Fuente: Grupo Termotecnia.	4
Figura 5. Esquema de circulación del agua por debajo del pavimento. Fuente: Elaboración propia.	5
Figura 6. Localización de la bancada de ensayos dentro de Cartuja Qanat. Fuente: Elaboración propia	7
Figura 7. Modelo gráfico de la bancada experimental. Fuente: Elaboración propia	7
Figura 8. Fotografía real de la bancada experimental. Fuente: Elaboración propia.	8
Figura 9. Zoom de la sección A (placas) de la bancada experimental. Fuente: Elaboración propia.	9
Figura 10. Fotografía real de la sección A (placas) de la bancada experimental. Fuente: Elaboración propia.	9
Figura 11. Colocación de sensores de temperatura en placas. Fuente: Elaboración propia.	10
Figura 12. Día arbitrario de medidas de temperatura de placas. Fuente: Elaboración propia	10
Figura 13. Esquema de bloque de generación en placa blanca. Fuente: Elaboración propia.	11
Figura 14. Zoom de la sección (pavimentos) de la bancada experimental. Fuente: Elaboración propia.	12
Figura 15. Fotografía de sección B de la bancada experimental real. Fuente: Elaboración propia.	12
Figura 16. Fotografía del método de colocación del termopar en pavimentos. Fuente: Elaboración propia.	13
Figura 17. Gráfica de temperaturas de superficie inferior y superficie de un pavimento oscuro. Fuente: Elaboración propia.	13
Figura 18. Fotografía del estanque encontrado en Cartuja Qanat. Fuente: Elaboración propia.	14
Figura 19. Gráfica de funcionamiento de jets del estanque en varios días. Fuente: Elaboración propia.	14
Figura 20. Gráfico de comportamiento de temperatura de agua con jets apagados. Fuente: Elaboración propia.	15
Figura 21. Fotografía de pavimentos húmedos y esquema de rebosadero. Fuente: Elaboración propia.	15
Figura 22. Esquema de rebosadero y desagües de cubículo de metacrilato. Fuente: Elaboración propia.	16
Figura 23. Fotografía de posición de estaciones meteorológicas en la bancada. Fuente: Elaboración propia	16
Figura 24. Calendario de tareas de julio y agosto. Fuente: Elaboración propia	18
Figura 25. Calendario de tareas de septiembre y octubre. Fuente: Elaboración propia	19
Figura 26. Curva gráfica de día despejado. fuente: Elaboración propia.	19
Figura 27. Diagrama de flujo metodología de experimentación. Fuente: Elaboración propia	22
Figura 28. Gráfica de comprobación de funcionamiento de termopares entre pavimentos secos y húmedos. Fuente: Elaboración propia.	23
Figura 29. Gráfica de ejemplo de experimento húmedo (F3P1-00). Fuente: Elaboración propia.	24
Figura 30. Absorción de agua de hormigón en función de si tienen aditivos hidrofugantes o no. Fuente:[14]	25
Figura 31. Esquema de experimentación para cálculo de absortividad de placas. Fuente: Elaboración propia.	30

Figura 32. Órdenes de magnitud para despreciar la convección mixta. Fuente: Elaboración propia.	32
Figura 33. Datos de literatura de calor específico en función de la densidad. Fuente: [17]	34
Figura 34. Correlación de calor específico en función de la densidad. Fuente: Elaboración propia	34
Figura 35. Esquema de aislamiento del pavimento en seco. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura 36. Simulaciones en seco pavimento F2P1BL para varias absorptividades. Fuente: Elaboración propia.	38
Figura 37. Nube de puntos de simulaciones en seco para varias absorptividades pavimento F2P1BL. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura 38. Simulación en seco de pavimento F2P1BL con la absorptividad elegida. Fuente: Elaboración propia.	40
Figura 39. Nube de puntos de CD vs (Tsup-Tsa) de muestra 1. Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 40. Nube de puntos de CD vs (Tsup-Tsa) de muestra 2. Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 41. Nube de puntos de CD vs (Tsup-Tsa) de muestra 3. Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 42. Resultado de simulaciones de la muestra 1. Fuente: Elaboración propia.	44
Figura 43. Resultado de simulaciones de la muestra 2. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 44. Resultado de simulaciones de la muestra 3. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 45. Simulación con producto densidad por calor específico x2. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 46. Simulación con producto densidad por calor específico x4. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 47. Simulación con producto densidad por calor específico x8. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 48. Resultados experimentales muestra F1P1B. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 49. Resultados experimentales muestra F1P1G. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 50. Resultados experimentales muestra F1P1S. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 51. Indicadores de sobrecalentamiento y subenfriamiento de pavimentos en período ON. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 52. Indicadores de sobrecalentamiento y subenfriamiento de pavimentos en período OFF. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 53. Ejemplo de pavimento "water retaining".Fuente: [18]	58
Figura 54. Esquema de implementación de pavimentos fríos. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 55. Fotografía pavimento Siena Sorigué. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 56. Fotografía pavimento Gris Sorigué. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 57. Fotografía pavimento Negro Sorigué. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 58. Fotografía pavimento Antracita SAS1900. Fuente: Elaboración propia.	62
Figura 59. Fotografía pavimento Arenisca SAS1900. Fuente: Elaboración propia.	62
Figura 60. Fotografía pavimento Blanco SAS1900. Fuente: Elaboración propia.	62
Figura 61. Fotografía pavimento M88 Solana. Fuente: Elaboración propia	63
Figura 62. Fotografía pavimento MB108 Solana. Fuente: Elaboración propia	63
Figura 63. Fotografía pavimento M00 Solana. Fuente: Elaboración propia	63
Figura 64. Fotografía pavimento Black Breinco. Fuente: Elaboración propia	64
Figura 65. Fotografía pavimento White Breinco. Fuente: Elaboración propia	64
Figura 66. Fotografía pavimento Marfil Breinco. Fuente: Elaboración propia	64
Figura 67. Fotografía pavimento B1 Campo. Fuente: Elaboración propia	65

Figura 68. . Fotografía pavimento B2 Campo. Fuente: Elaboración propia	65
Figura 69. . Fotografía pavimento B3 Campo. Fuente: Elaboración propia	65
Figura 70. Nube de puntos de CD vs (Tsup-Tsa) de muestra 1 fabricante 2. Fuente: Elaboración propia	67
Figura 71. Nube de puntos de CD vs (Tsup-Tsa) de muestra 2 fabricante 2. Fuente: Elaboración propia	67
Figura 72. Nube de puntos de CD vs (Tsup-Tsa) de muestra 3 fabricante 2. Fuente: Elaboración propia.	68
Figura 73. Resultado de simulaciones de la muestra 1 fabricante 2. Fuente: Elaboración propia.	69
Figura 74. Resultado de simulaciones de la muestra 2 fabricante 2. Fuente: Elaboración propia.	70
Figura 75. Resultado de simulaciones de la muestra 3 fabricante 2. Fuente: Elaboración propia.	70
Figura 76. Simulación con producto densidad por calor específico x2 fabricante 2. Fuente: Elaboración propia.	71
Figura 77. Simulación con producto densidad por calor específico x4 fabricante 2. Fuente: Elaboración propia.	71
Figura 78. Simulación con producto densidad por calor específico x8 fabricante 2. Fuente: Elaboración propia.	72
Figura 79. Gráfica experimental pavimento F1P1B. Fuente: Elaboración propia.	74
Figura 80. Gráfica experimental pavimento F1P1G. Fuente: Elaboración propia.	74
Figura 81. Gráfica experimental pavimento F1P1S. Fuente: Elaboración propia.	75
Figura 82. Gráfica experimental pavimento F2P1AN. Fuente: Elaboración propia.	75
Figura 83. Gráfica experimental pavimento F2P1AR. Fuente: Elaboración propia.	76
Figura 84. Gráfica experimental pavimento F2P1BL. Fuente: Elaboración propia.	76
Figura 85. Gráfica experimental pavimento F3P100. Fuente: Elaboración propia.	77
Figura 86. Gráfica experimental pavimento F3P1MB108. Fuente: Elaboración propia.	77
Figura 87. Gráfica experimental pavimento F3P1M88. Fuente: Elaboración propia.	78
Figura 88. Gráfica experimental pavimento F4P1B3. Fuente: Elaboración propia.	78
Figura 89. Gráfica experimental pavimento F4P1B2. Fuente: Elaboración propia	79
Figura 90. Gráfica experimental pavimento F4P1B1. Fuente: Elaboración propia	79
Figura 91. Gráfica experimental pavimento F5P1BL Fuente: Elaboración propia	80
Figura 92. Gráfica experimental pavimento F5P1MF. Fuente: Elaboración propia	80
Figura 93. Gráfica experimental pavimento F5P1WH. Fuente: Elaboración propia	81

NOTACIÓN

α_{placa}	Absortividad de la placa
α	Absortividad del pavimento
Cp	Calor específico [J/kgK]
GH	Grados hora [°C h]
hc	Coefficiente de película convectivo [W/m ² K]
hforzada	Coefficiente de película convectivo forzado [W/m ² K]
hlibre	Coefficiente de película convectivo libre [W/m ² K]
hmixta	Coefficiente de película convectivo mixto [W/m ² K]
hr	Coefficiente radiante [W/m ² K]
hw	Coefficiente de película del lado del agua en pavimento [W/m ² K]
ICU	Isla de Calor Urbana
IECA	Instituto español del Cemento y sus Aplicaciones
Ig	Radiación Global Horizontal [W/m ²]
IRS	Índice de Reflectancia Solar
M	Masa [kg]
ρ	Densidad [kg/m ³]
Taire	Temperatura aire exterior [°C]
Tcielo	Temperatura de cielo [°C]
Tplaca	Temperatura superficial de la placa [°C]
Trad	Temperatura radiante del ambiente [°C]
Trocio	Temperatura de rocío del ambiente [°C]
Tsol-aire	Temperatura sol-aire [°C]
U	Coefficiente global de transferencia [W/m ² K]
UHI	Urban Heat Island
V	Volumen [m ³]
XPS	Aislamiento tipo poliestireno expandido

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto

Actualmente el planeta se enfrenta un reto crucial como es el cambio climático, transformando los patrones climáticos y consiguiendo implicaciones profundas en la vida, ecosistemas y, en general, en el futuro más próximo. Este fenómeno ha incrementado la temperatura media hasta 1.5°C teniendo consecuencias extremas tales como olas de calor cada vez más usuales en términos de frecuencia, intensidad y duración [1]. Como ejemplo, el verano de 2023 ha sido el más caluroso en España desde que se tienen registros climáticos [2]. Estas temperaturas tan extremas tienen una consecuencia directa en la habitabilidad de los ciudadanos y su propia salud, registrándose 2155 fallecimientos por causa directa atribuible al calor excesivo, el tercer verano con mayor mortalidad debida a esta condición. [3][4]

Otro fenómeno climatológico debido al cambio climático más preocupante es el efecto de Isla de Calor Urbana (ICU en español o UHI en inglés). La ICU se denomina la diferencia de temperatura entre el área urbana y la zona rural más cercana y está relacionada con la densidad, la geometría urbana y los materiales usados para construcción de edificios y espacios urbanos. Este efecto impacta negativamente en la sociedad, afectando a la calidad del aire, el confort térmico y la economía debido a la necesidad de climatización en comercios y áreas residenciales [5]. Igualmente, el calor presente y generado en entornos urbanos proviene principalmente de dos fuentes: la radiación solar original del sol y diversas fuentes de calor antropogénicas, como vehículos y sistemas de climatización. Este fenómeno es más pronunciado en las grandes ciudades, donde la inercia térmica de los edificios desempeña un papel crucial en la formación de la Isla de Calor Urbana. Las estructuras urbanas absorben y retienen la radiación solar durante el día, liberando la energía almacenada hacia el exterior durante la noche, lo que contribuye al fenómeno mencionado [6] [7]

Los pavimentos desempeñan un papel esencial en el efecto ICU, ya que conforman la mayoría de las superficies urbanas. Debido a su usual color oscuro y bajo albedo, fomentan un aumento significativo en la temperatura de estas superficies, almacenando gran cantidad de energía calorífica que posteriormente es emitida al ambiente [5]. Por esta razón, existe un creciente interés en la creación y aplicación de pavimentos con temperaturas superficiales más bajas, contribuyendo a mitigar la Isla de Calor Urbana y mejorando el confort térmico. Este trabajo tiene como objetivo proponer una solución basada en la naturaleza (*Nature Based Solution*) denominada pavimentos fríos.

1.2 Pavimentos fríos

A pesar de la ausencia de una definición oficial para pavimentos fríos, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) hace referencia a "pavimentos fríos" que incorporan diversas tecnologías ya establecidas, las cuales se están investigando como parte de sus iniciativas para reducir el efecto ICU. En consecuencia, se espera que los pavimentos fríos mantengan una temperatura superficial inferior a la de los pavimentos convencionales, presentando así el potencial de limitar las emisiones de calor sensible al ambiente [8].

Los pavimentos, al representar típicamente el 20-40% del área urbana, juegan un papel crítico en el efecto ICU. Por esta razón, actualmente existen numerosas líneas de investigación que buscan disminuir la temperatura superficial de los pavimentos y, en consecuencia, reducir las emisiones de calor desde los pavimentos a la atmósfera. Además, existen evidencias científicas que indican que la reducción de la temperatura superficial de los pavimentos exteriores urbanos reduce significativamente la temperatura ambiente [9].

Las tecnologías actuales de pavimentos fríos pueden desarrollarse en diferentes formas como pavimentos reflectantes, pavimentos evaporativos o incluso mediante la alteración de sus propiedades para el almacenamiento de calor. De estas, los dos primeros se han realizado ampliamente y se pueden denominar como la base convencional en los pavimentos fríos; mientras que el almacenamiento térmico por modificación e propiedades de almacenamiento de calor aún no se ha explorado en demasía considerándose aún en etapa de investigación [10].

La experimentación que se va a realizar en este trabajo no se enmarca en ninguna de las tres tecnologías actuales de pavimentos fríos que se pueden encontrar en la literatura. Aunque se explicará más adelante en las siguientes secciones, se va a estudiar la bajada de la temperatura superficial del pavimento si se hace pasar agua fría por su superficie inferior. La tecnología más cercana a esta experimentación se consideraría la de pavimentos evaporativos; sin embargo, no se emplaza en este marco ya que el agua nunca migraría a la superficie superior y, por ello, no existiría evaporación del agua. El beneficio principal de esto es que al evaporar el agua existe un consumo de esta drástico mientras que, sin evaporación, el consumo es mucho más reducido, consiguiendo una solución mucho más sostenible en vista al cambio climático y las sequías incipientes que acechan al planeta.

1.3 Confort térmico exterior

Para poder cuantificar el confort en el espacio urbano primero se debe definir las cargas térmicas que se encuentran sobre el ciudadano. En una situación de una persona en una estancia diáfana sin ninguna cubierta y recibiendo la radiación solar directa, las cargas térmicas y sus proporciones son las que se encuentran en la Figura 1.



OxO	Componente del Balance	Cuantía (W/m ²)	Porcentaje (%)
Cargas sobre el ocupante	1. Generación neta - respiración - sudoración imperceptible	59.96	24.8%
	2a.- Radiación Solar directa	46.14	49.6%
	2b.- Radiación solar difusa cielo	35.79	
	2e. Radiación difusa reflejada suelo adyacente	73.81	22.7%
	2f. Intercambio radiante cielo	-35.80	
	3b. Intercambio radiante de larga suelo adyacente	54.80	2.9%
	4 Convección (temperatura aire y velocidad del aire)	7.08	
Carga total		241.79	100%

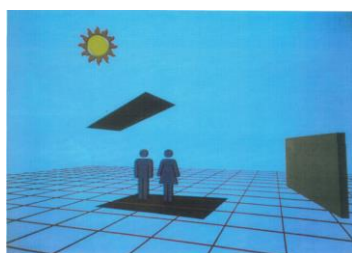
Figura 1. Cargas térmicas sobre el ocupantes en situación 1. Fuente: Grupo de Termotecnia.

Las cargas fundamentales corresponden a la generación neta del ocupante, principalmente debida a la respiración y sudoración de la persona, a la radiación solar directa del sol y radiación difusa del cielo, la radiación reflejada desde el suelo adyacente y la propia convección debida a la temperatura del aire y velocidad del aire. Se observa como la carga total se eleva a 250 W/m², siendo éste un indicador de confort térmico correspondiente a una situación extrema de disconfort y estrés térmico sobre el ocupante. Como se ve en la Figura 1, las cargas fundamentales del ocupante son las relacionadas a la radiación directa y difusa del sol representando casi el 50% de las cargas totales. La Figura 2 muestra la escala de valoración del índice de confort, donde se indica la carga térmica en función del grado de satisfacción de la persona en el exterior, pudiéndose observar que la persona se encuentra en un estado de calor sofocante. Así la primera situación de mejora que se propone es instalar una cubierta que bloquee casi por completo la radiación directa del sol y generando sombra para los ocupantes.

	Q (W/m ²)
Confortable	-50/50
Ligeramente cálido	50/85
Cálido	85/120
Caliente	120/150
Muy caliente/sofocante	>150

Figura 2. Índices de confort según cargas térmicas del ocupante. Fuente: Grupo de Termotecnia.

Por tanto, las cargas térmicas para la situación de mejora añadiendo la cobertura quedan tal y como se expone en la Figura 3. Se ve que se ha reducido casi en 100W/m² pero, aun así, sigue representando un confort muy caluroso y sofocante para el ocupante. En consecuencia, para analizar la siguiente solución a implementar se debe entender el resto de las cargas térmicas que suponen en composición un papel relevante. En la Figura 4 se representa un esquema de los intercambios radiantes que se encuentran en la situación 2. El ocupante recibe radiación procedente de la transmisión de la cubierta, la difusa del cielo, la reflejada del pavimento bajo cubierta y la reflejada del pavimento en zona adyacente. De estas radiaciones, las que suponen un mayor impacto son las reflejadas de las zonas adyacentes tanto en difusa como en su intercambio radiante reflejada, correspondiendo casi un 40% del total. En este dato se enmarca el objetivo de este trabajo, la búsqueda de soluciones para reducir estas cargas térmicas para poder reducir el índice y conseguir un mayor confort térmico; siendo una solución viable los pavimentos fríos definidos en el apartado 1.2.



4x4	Componente del Balance	Cuantía (W/m ²)	Porcentaje (%)	
Cargas sobre el ocupante	1. Generación neta - respiración - sudoración imperceptible	59.96	39.4%	
	2b.- Radiación solar difusa cielo	27.20	33.1%	
	2c. Radiación difusa cobertura	7.87		
	2d. Radiación difusa reflejada suelo cubierto	8.27		
	2e. Radiación difusa reflejada suelo adyacente	32.48		
	2f. Intercambio radiante cielo	-25.41		
	3a. Intercambio radiante de larga suelo cubierto	1.19		20.7%
	3b. Intercambio radiante de larga suelo adyacente	25.15		
	3c. Intercambio radiante larga cubierta	5.13		
	4 Convección (temperatura aire y velocidad del aire)	10.27	6.7%	
	Carga total		152.13	100%

Figura 3. Cargas térmicas sobre el ocupantes en situación 2. Fuente: Grupo de Termotecnia

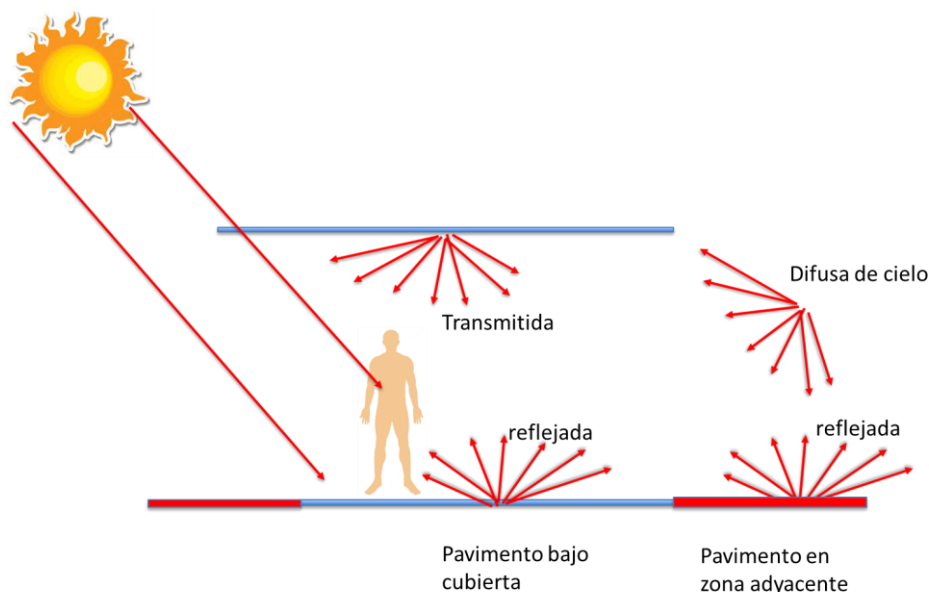


Figura 4. Intercambios radiantes y efecto de la pavimentación exterior. Fuente: Grupo Termotecnia.

1.4 Propiedades termofísicas relevantes

La cantidad de energía solar que un pavimento puede reflejar o absorber depende directamente de sus propiedades termofísicas, especialmente aquellas asociadas a la superficie superior del mismo. Estas propiedades incluyen el albedo, la emisividad, el índice de reflectancia solar, la conductividad térmica, la capacidad térmica, la difusividad térmica, la densidad y la permeabilidad. Al conocer estas propiedades, los pavimentos pueden ser evaluados en relación con la mitigación de la Isla de Calor Urbana [11].

El albedo corresponde al porcentaje de energía solar que se refleja por una superficie. Matemáticamente corresponde al complementario de la unidad de la absorptividad un material. Un alto albedo significa que posee gran capacidad de reflejar la radiación incidente y, en consecuencia, se consigue una reducción significativa de la temperatura de la superficie durante horas de sol. Sin embargo, existe un límite en el albedo permisible ya que a grandes valores de este podría afectar en el confort visual de las personas.

La emisividad (ϵ) es una medida de la superficie radiante o del nivel de calor generado por una superficie con respecto a su alrededor. Esta radiación es la correspondiente de un material que emite por tener una temperatura superior a 0 K (-273°C) y es una proporción con respecto a la energía liberada por un material cuya superficie fuera un cuerpo negro.

El índice de reflectancia solar es el efecto combinado de la absorptividad y emisividad de una superficie y puede ser calculada según una relación entre estas como se ve en las ecuaciones (1-1) y (1-2).

$$IRS = 123.97 - 141.35 X + 9.655 X^2 \quad (1-1)$$

$$X = (\alpha - 0.029 \epsilon) \frac{8.797 + h}{9.5205 \epsilon + h} \quad (1-2)$$

La conductividad térmica (k) mide el calor transferido por un cuerpo. Es un parámetro crucial ya que determina las condiciones térmicas de un material, pero también rige sus fisuras térmicas. Si se reduce la conductividad térmica se consigue reducir la transferencia de calor de este y, consecuentemente, reduce la ganancia de temperatura debida a la radiación solar y la convección con el aire ambiente.

El calor específico (c_p) es la cantidad de calor requerida para incrementar en una unidad la temperatura de un material sin que exista cambio de fase en el mismo. Se mide en J/kgK y describe la capacidad volumétrica de un material sólido en absorber y almacenar cierta cantidad de energía a una cierta temperatura.

La difusividad térmica es un parámetro que describe como se propaga el calor mediante el cuerpo de un material. Una gran difusividad térmica incrementa las temperaturas de una superficie, mientras que un valor bajo incrementa el almacenamiento térmico. Se rige por la ecuación

$$\alpha_{dif} = \frac{k}{\rho C_p} \quad (1-3)$$

La densidad en si no se considera una propiedad térmica, sin embargo, como se ha visto en la difusividad térmica tiene una influencia directa en el comportamiento térmico de un material. Además, un aumento de la densidad es directamente proporcional a una disminución de poros de aire dentro de un material y, con ello, en un aumento de temperatura de este.

La permeabilidad influye en el efecto de enfriamiento evaporativo de un material. Materiales muy permeables permiten que el agua migre por su interior, si esta llega hasta la superficie del mismo se evapora y consecuentemente reduce su temperatura. Esta propiedad da pie a explicar que cuando el agua migra por el material sus propiedades termofísicas varían ya que existe un intercambio de sustancias al cambiar el aire dentro de los poros por agua. Se debe hacer una distinción entre las propiedades en seco de los materiales frente a las propiedades si el mismo está húmedo.

1.5 Solución propuesta

La tecnología de pavimento frío propuesta a ser implementada se basa en la reducción de la temperatura superficial superior de los pavimentos mediante la circulación de agua fría por debajo de los pavimentos. Así, mediante el fenómeno de conducción, el pavimento se enfría mientras que, al no migrar a la superficie y no existir evaporación, el consumo de agua se reduce drásticamente. Como se puede comprobar en la Figura 5, el agua circularía por la superficie inferior de los pavimentos en unos canales que se forman gracias a la forma de los propios pavimentos que se construirían por medio de moldes especiales.

El agua que se usa a modo de refrigerante proviene de un sumidero de agua recolectada por las aguas pluviales de las épocas de lluvia. Esta agua se recolectaría en etapas donde no se necesita la refrigeración de los pavimentos y se mantendrían en un depósito enterrado que, al llegar la época de altas temperaturas se usaría para esta solución. Con esto, esta solución se convertiría en sostenible ya que no tendría uso de agua de la red urbana y se conseguiría un enfriamiento con un recurso obtenido en la naturaleza.

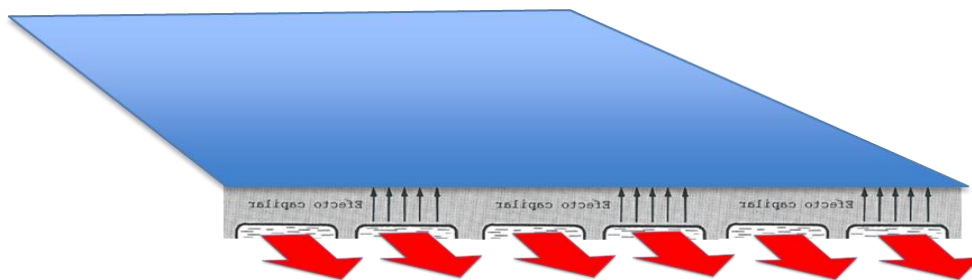


Figura 5. Esquema de circulación del agua por debajo del pavimento. Fuente: Elaboración propia.

1.6 Objetivos

El objetivo principal del trabajo es realizar una prueba de concepto del enfriamiento sensible de un pavimento al poner en contacto agua refrigerada. Así, se puede comprobar si el enfriamiento es suficiente como para mitigar el efecto de Isla de Calor Urbana sin necesidad de hacer uso del enfriamiento evaporativo y su consecuente gasto de agua. Para la prueba de concepto se realizará un montaje experimental que mida la viabilidad del concepto a pequeña escala. Se medirán las temperaturas de muestras de diferentes pavimentos tanto en seco para referencia como mojándolos por su superficie inferior y se recabará la información térmica de los mismos durante el verano de 2023. El agua que se usa proviene de un sumidero de agua correspondiente a un estanque que se enfría de manera natural usando jets que pulverizan el agua en un tamaño de gota grande que previene de la evaporación de este y reduciendo su temperatura cerca de su temperatura de bulbo húmedo.

La investigación se realizará mediante 4 fases claramente diferenciadas: primero se realizará una fase experimental donde se recabará toda la información necesaria para futuros cálculos como son las temperaturas de los pavimentos, la temperatura del agua y las condiciones climáticas del ambiente exterior. Después se pasará a una fase de modelización matemática del comportamiento de los pavimentos tanto directamente al sol en seco como cuando se encuentran humedecidos por su parte inferior. Posteriormente se realizará una validación del modelo comparando con los datos reales medidos en la fase experimental. Finalmente, gracias al modelo calibrado y validado, se caracterizarán las propiedades termofísicas de las muestras experimentadas.

Para llevar a cabo estos objetivos, el presente trabajo se organizará de la siguiente forma. En la sección 2 se explicará el proceso de la experimentación física, explicando tanto el montaje de la bancada experimental como de la metodología llevada a cabo en los experimentos y de las muestras de pavimentos usadas. En la sección 3 se expone tanto la caracterización de propiedades como la validación del modelo de cálculo usado en las simulaciones. En la sección 4 se encuentran los resultados recabados de los pavimentos usados, tanto los resultados puramente experimentales como es el comportamiento de los pavimentos en seco y húmedos al ambiente, como de las propiedades termofísicas calculadas y caracterizadas para estos. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones tomadas y la línea de investigación futura para continuar el estudio de pavimentos fríos.

2 EXPERIMENTACIÓN FÍSICA

2.1 Banco de experimentación

Para la realización del estudio de Nivel 1 referente a los pavimentos fríos se ha construido una bancada de ensayos expuesta al ambiente para recoger datos experimentales durante la estación de verano de 2022. La misma se encuentra localizada en el laboratorio urbano Cartuja Qanat emplazado en la avenida Tomas Alva Edison en la Isla de la Cartuja (Sevilla). En la Figura 6 se presenta la localización de la bancada de ensayos en una imagen en planta del laboratorio urbano.

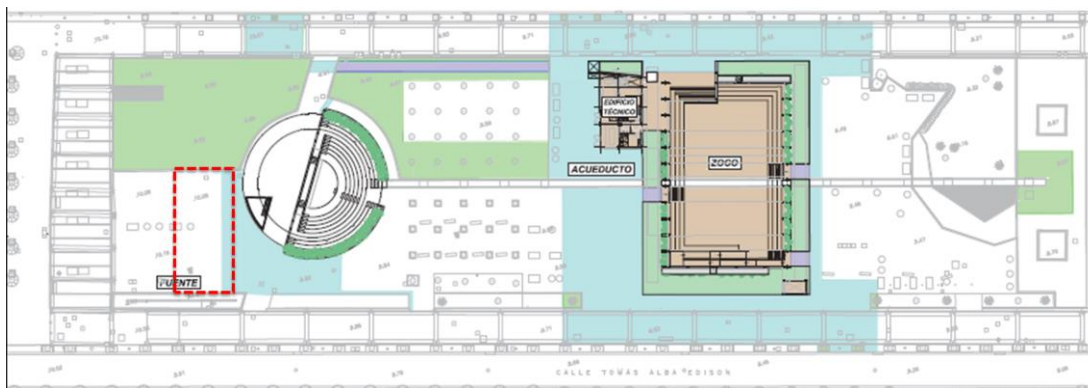


Figura 6. Localización de la bancada de ensayos dentro de Cartuja Qanat. Fuente: Elaboración propia

Los experimentos del prototipo de nivel 1 tienen como objetivo calcular las propiedades tanto radiantes (albedo) como termohigrométricas (densidad, calor específico y conductividad) de las muestras de pavimentos recibidas por los fabricantes.

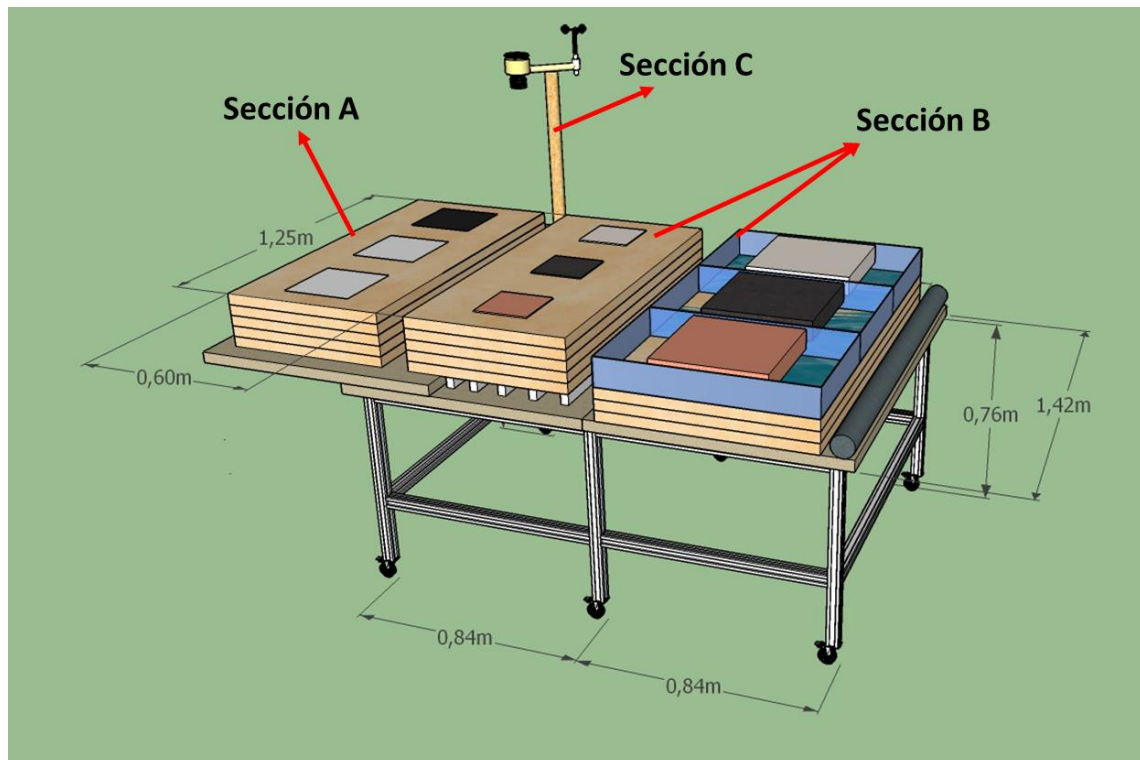


Figura 7. Modelo gráfico de la bancada experimental. Fuente: Elaboración propia



Figura 8. Fotografía real de la bancada experimental. Fuente: Elaboración propia.

Se presenta un modelo 3D de la bancada de experimentación además de imágenes de la bancada real instalada. Como se puede ver en la

Figura 7 la mesa se divide en tres secciones bien diferenciadas para recabar toda la información necesaria para los posteriores cálculos, y cuyas características se detallan a en los próximos subapartados. En la sección A se encuentran tres placas de aluminio aisladas en la zona inferior con 16cm de aislamiento de poliestireno extruido (XPS). Las placas son una de color negro mientras que las otras dos de color blanco; además una de las placas de color blanco posee un elemento de generación de calor. La sección B corresponde a la de ensayos de pavimentos y a su vez se subdivide en una zona de pavimentos de 20x20cm aislados también pro la superficie inferior y tres cubículos de metacrilato donde se colocan pavimentos de 40x40cm para poder hacer ensayos en seco y en mojado. Finalmente, la sección C corresponde a los aparatos de medida que se encargan de medir los datos climáticos a tiempo real. Para ello, se colocan en la propia bancada a una distancia de 50cm de altura una estación meteorológica y un anemómetro de precisión. En la Figura 8 se presenta una fotografía de la bancada experimental real con todas sus secciones anteriormente explicadas.

2.1.1 Sección de placas metálicas

En este apartado se va a describir con detalle la sección de la bancada de experimentación dedicada a las placas metálicas. Se instalan tres placas de aluminio de 0.5mm de grosor aisladas en la zona inferior con 16cm de aislamiento de poliestireno extruido XPS. Las placas son una de color negro y dos de color blanco buscando analizar la excitación producida por el clima. Se desea estudiar la diferencia debida al cambio de absorptividad entre placas principalmente justificadas por el cambio de color. Además, a una de las placas blancas se le instala un elemento generador de calor entre el aislante y la propia placa.

La finalidad de esta sección es hacer uso de los datos de temperatura alcanzados por las placas en un día tipo expuestas al sol y al aire ambiente. El objetivo es calcular tanto las absorptividades de ambas placas y definir las condiciones de contorno máxima y mínimas de esta propiedad. De igual forma se deben calcular la temperatura de cielo y los coeficientes de película que rigen la transmisión de calor, los cuales ayudarán a estimar los coeficientes de película de los pavimentos a ensayar posteriormente.

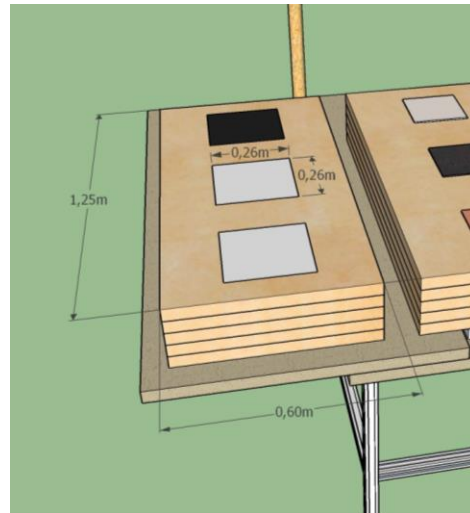


Figura 9. Zoom de la sección A (placas) de la bancada experimental. Fuente: Elaboración propia.

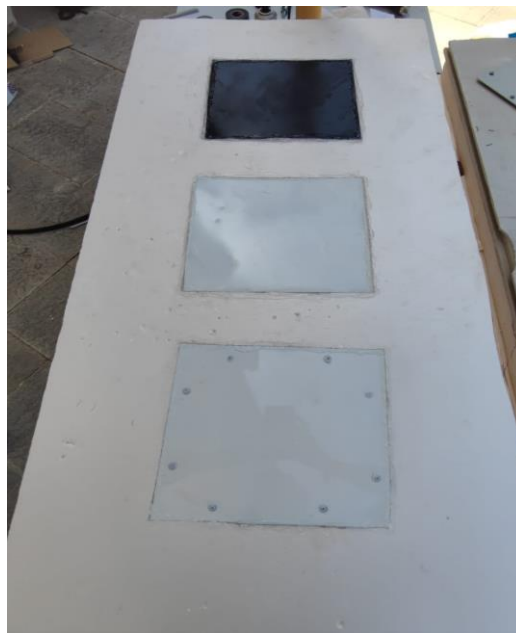


Figura 10. Fotografía real de la sección A (placas) de la bancada experimental. Fuente: Elaboración propia.

Las Figura 9 y Figura 10 muestran en detalle la instalación de las placas, aisladas con XPS en la parte inferior y laterales con el fin de obtener una medida fiable de la excitación de las placas expuestas. La medida se realiza con un termopar en el centro de la placa entre el aislamiento XPS y la placa tal y como se observa en la Figura 11.

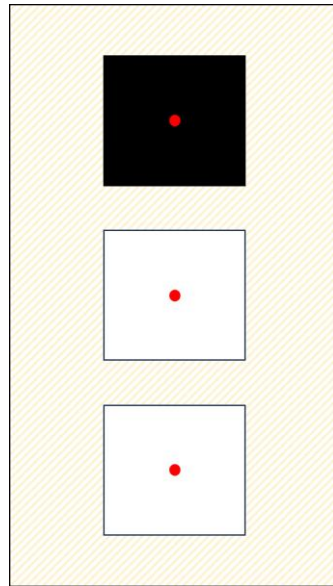


Figura 11. Colocación de sensores de temperatura en placas. Fuente: Elaboración propia.

A modo de demostración en la Figura 12 se presentan las temperaturas de las placas expuestas al ambiente en un día X despejado del verano 2023. Se comprueba fácilmente la gran diferencia de temperaturas que adquieren las dos placas de aluminio por el efecto de las diferentes absorptividades según el color ya que la ecuación que rige la temperatura de la superficie al estar aislados es la que se muestra en la ecuación (2-1).

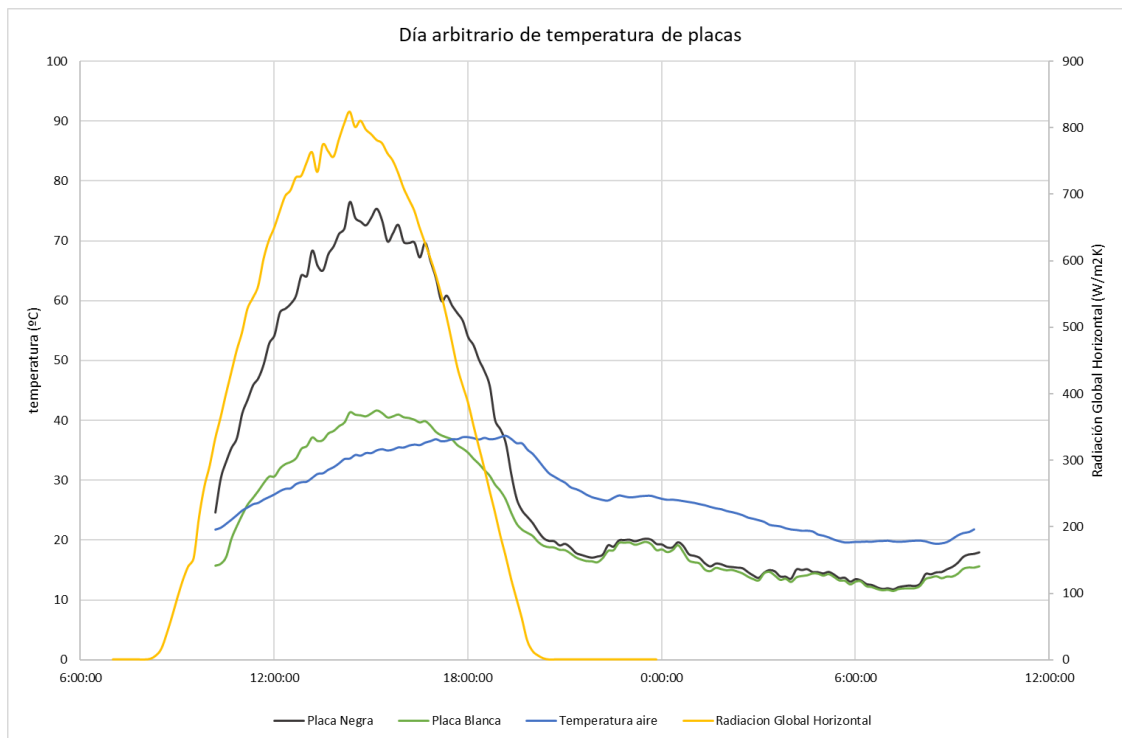


Figura 12. Día arbitrario de medidas de temperatura de placas. Fuente: Elaboración propia

$$0 = h_c \cdot (T_{placa} - T_{aire}) + h_r \cdot (T_{placa} - T_{rad}) - \alpha_{placa} \cdot I_G \tag{2-1}$$

Así se puede comprobar como de noche al no existir radiación, el efecto de la absorptividad se anula y ambas placas se colocan a igual temperatura superficial.

Anteriormente se ha hecho referencia a que una placa blanca consta de un elemento de generación de calor justo debajo de la misma para determinar la temperatura de cielo por las noches.

En la Figura 13 se muestra un esquema de la estructura instalada:

- 1) Capa de 16cm de aislante XPS
- 2) Capa de 2 cm de aislante lana de roca
- 3) Lámina de metacrilato
- 4) Manta eléctrica de 10W de potencia de 2cm de espesor
- 5) Placa de aluminio de 0,5mm de espesor
- 6) Placa de aluminio de 0,5mm de espesor

Desde la lámina de metacrilato hasta la placa de aluminio final están unidos como una estructura única gracias a varias escuadras con tornillos. La razón por la que se coloca doble placa de aluminio es para intentar mejorar la homogeneidad de transmisión del calor de la manta hasta la placa más exterior. Así, el termopar en vez de estar en contacto directo con el elemento generador de calor se sitúa entre ambas placas de aluminio consiguiendo una medida mucho más exacta.

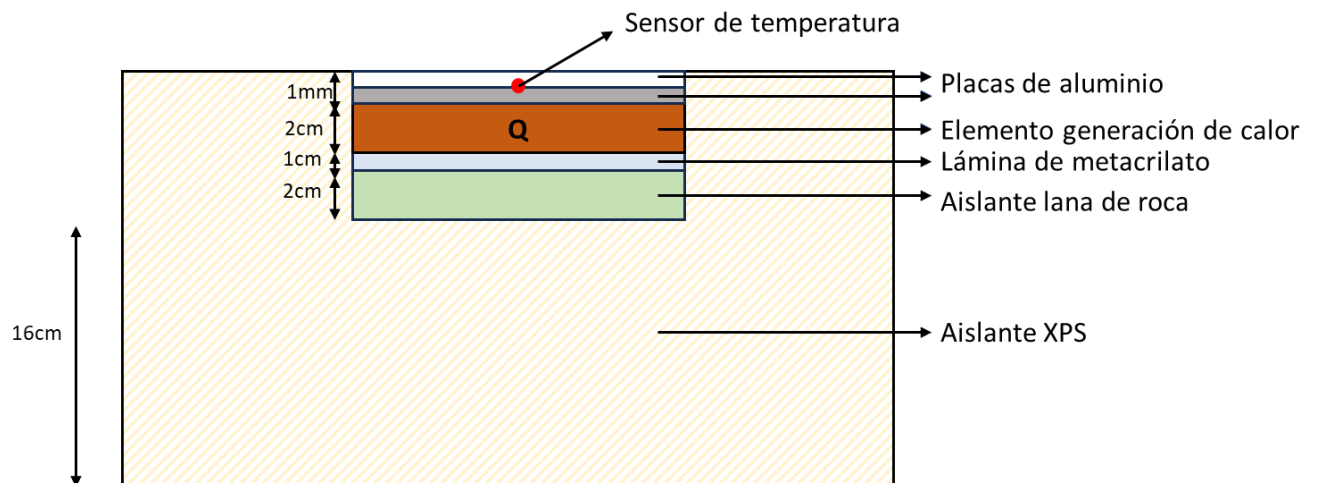


Figura 13. Esquema de bloque de generación en placa blanca. Fuente: Elaboración propia.

2.1.2 Sección de pavimentos

A continuación, se presenta la sección dedicada a los pavimentos propuestos a ensayo. Esta sección se subdivide en dos partes: la primera de ellas se basa en estudiar la excitación térmica de los pavimentos en el ambiente en seco mientras que la segunda está dedicada a analizar la excitación térmica cuando los pavimentos se mojan por su superficie inferior. La subdivisión de pavimentos en seco contiene los pavimentos de un tamaño de 20x20cm aislados en poliestireno extruido XPS mientras que la zona de pavimentos húmedos contiene tres cubículos de metacrilato donde se colocan pavimentos de 40x40cm. Cabe destacar que cada fabricante proporciona unas muestras de pavimentos de espesores distintos; por tanto, las medidas proporcionadas son de su sección y, en función, del fabricante tendrán un espesor específico. La zona con aislamiento XPS se mantienen secas para poder calcular la absorptividad de cada muestra, comparando y usando datos de las placas. Mientras tanto, la zona de pavimentos de 40x40cm se son rellenas de agua, registrándose las temperaturas superficiales de los pavimentos cuando se mojan por su superficie inferior. Así, se puede comparar la temperatura superficial de los mismos pavimentos en la misma condición ambiental: cuando están secos y cuando se encuentran húmedos. Gracias a estos resultados se podrá calcular la conductividad de cada muestra estudiada.

En las Figura 14 y Figura 15 se observan tanto el modelo 3D realizado para la sección de pavimentos como una fotografía real de la bancada experimental con los sensores de temperatura y sistema hidráulico instalados.

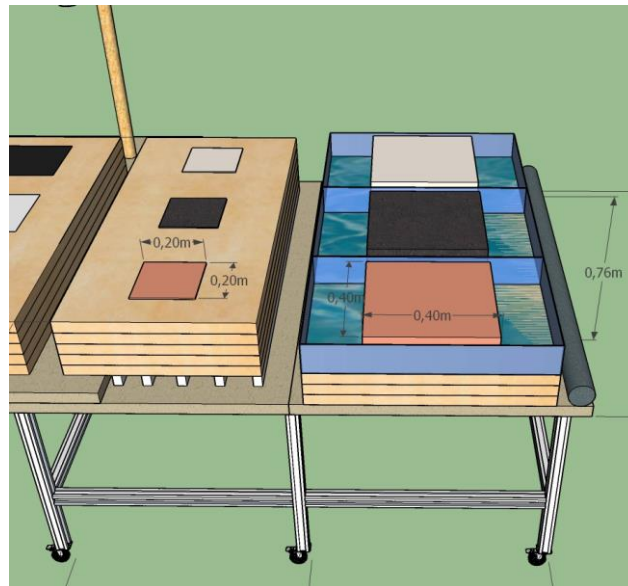


Figura 14. Zoom de la sección (pavimentos) de la bancada experimental. Fuente: Elaboración propia.

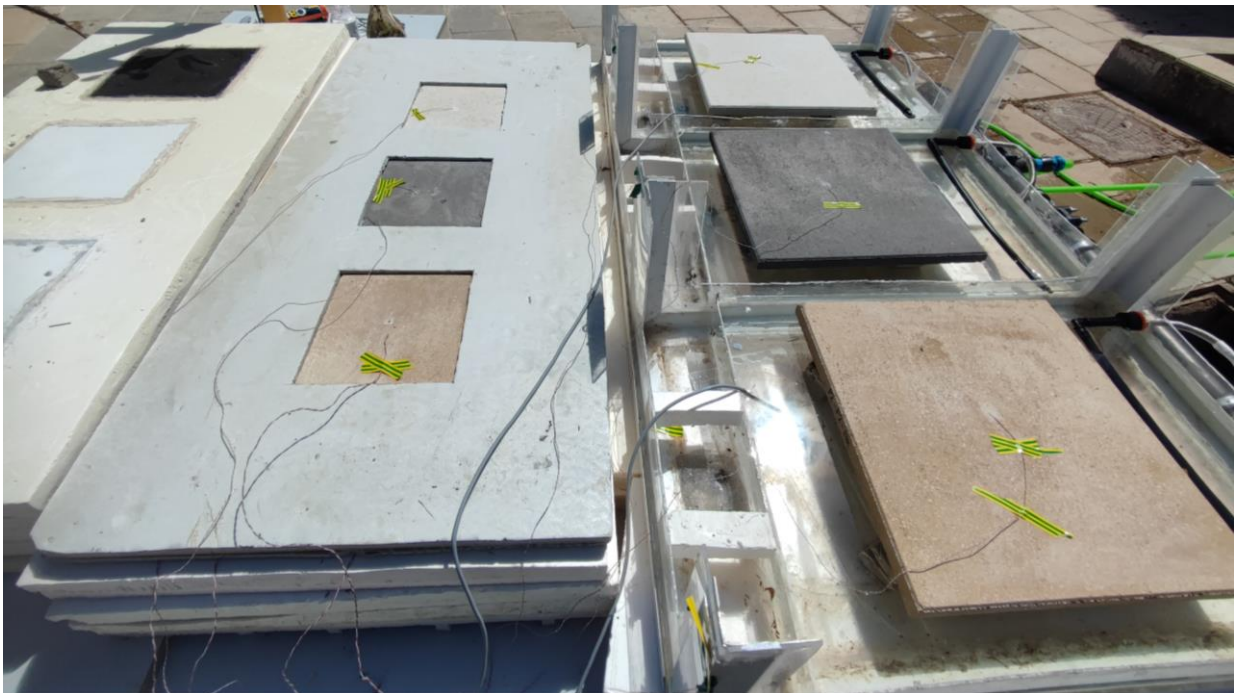


Figura 15. Fotografía de sección B de la bancada experimental real. Fuente: Elaboración propia.

La parte destinada al estudio en seco se compone de las muestras de pavimentos de tamaño 20x20 con 20cm de XPS tanto en los laterales como en la superficie inferior de los mismos. Se estudian los pavimentos de 3 en 3 siendo cada tanda del mismo fabricante ya que así se pueden comparar entre sí al estar excitados con las mismas condiciones ambientales.

Se monitorizan las temperaturas tanto de la superficie superior como inferior de los pavimentos usando termopares como sensor de temperatura. Los sensores se colocan en el centro de la pieza a medir en ambas superficies con la intención de minimizar al máximo el efecto de borde y que la medida sea lo más exacta posible.

La ubicación del termopar superior no es arbitraria y es mostrada en la Figura 16. Para conseguir una medida fiable la punta metálica del sensor no puede estar descubierta o mal instalada en el pavimento. Esto se debe a que el termopar consta de una conductividad mucho mayor que la del pavimento, incidiendo de forma directa el sol. Esto se traduce en un aumento desmesurado del termopar y mucho mayor que la del pavimento, no ofreciendo una temperatura real de la superficie. Por ello, se perfora la superficie del pavimento con una broca de 0.5 mm para hacer una pequeña incisión en la zona donde se coloca el termopar. Además, el orificio es rellenado instantáneamente con el propio polvo del pavimento al realizar la perforación, creándose una capa artificial del propio material y asemejándose lo máximo posible a la temperatura de la superficie del pavimento.



Figura 16. Fotografía del método de colocación del termopar en pavimentos. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 17 se grafica la excitación de ambas superficies para un día X del verano 2023, el cual fue soleado y con temperaturas altas. Se ha comprobado que a mayor espesor existe un mayor desfase entre la excitación de la superficie superior con respecto a la superficie inferior.

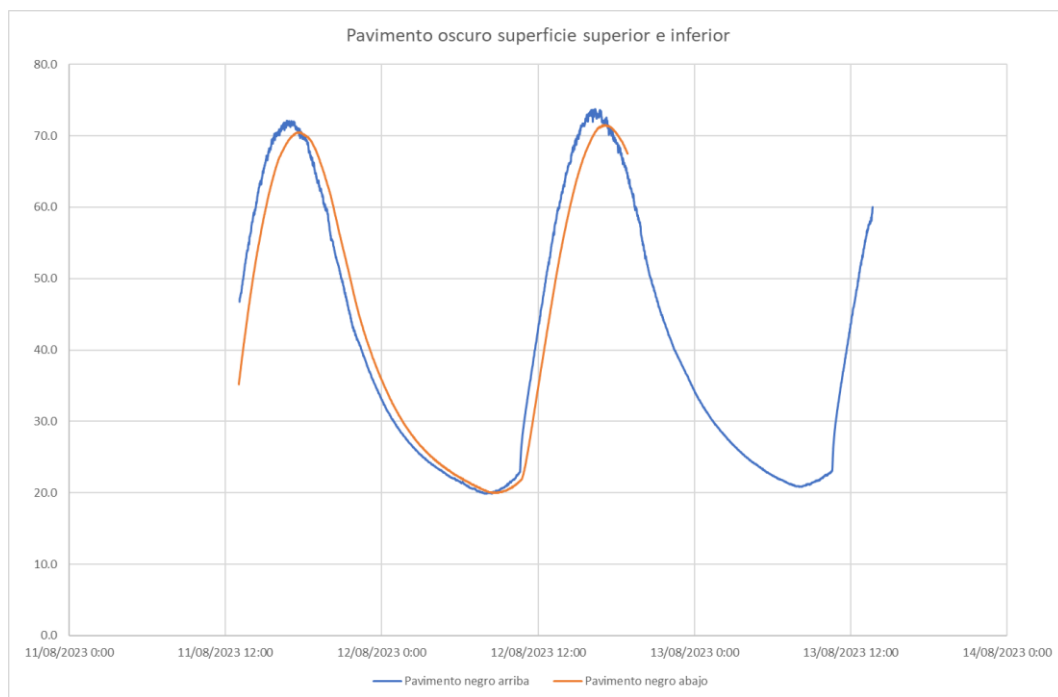


Figura 17. Gráfica de temperaturas de superficie inferior y superior de un pavimento oscuro. Fuente: Elaboración propia.

La parte destinada al estudio húmedo se compone de tres cubículos de metacrilato que se han sellado para garantizar la estanqueidad. Las cajas de metacrilato se sitúan en un soporte de XPS para que los pavimentos en la sección húmeda estén a la misma altura que los pavimentos en la sección seca, garantizando que no existan bucles de aire y que las condiciones ambientales sean similares. Para dar altura al propio pavimento se idea la construcción de cubos realizados mediante mortero.

El agua usada para la refrigeración de los experimentos viene de un sumidero de agua natural perteneciente al estanque del recinto Cartuja Qanat, fotografía de este en la Figura 18, el cual se mantiene refrigerada gracias al uso de jets que pulverizan el agua y la enfrían. Como se puede ver en la

Figura 19 y Figura 20 el uso de los jets para el enfriamiento del agua es vital ya que consigue una disminución en la temperatura en torno a 20 y 25 °C. En el período donde los jets se mantienen apagados se nota una subida notable en la temperatura del agua mientras que una vez que se programan los jets para que funcionen de 3 de la mañana a 6 de la tarde del día siguiente, la temperatura del agua del estanque se mantiene prácticamente constante y cercana a la temperatura de bulbo húmedo del aire exterior.



Figura 18. Fotografía del estanque encontrado en Cartuja Qanat. Fuente: Elaboración propia.

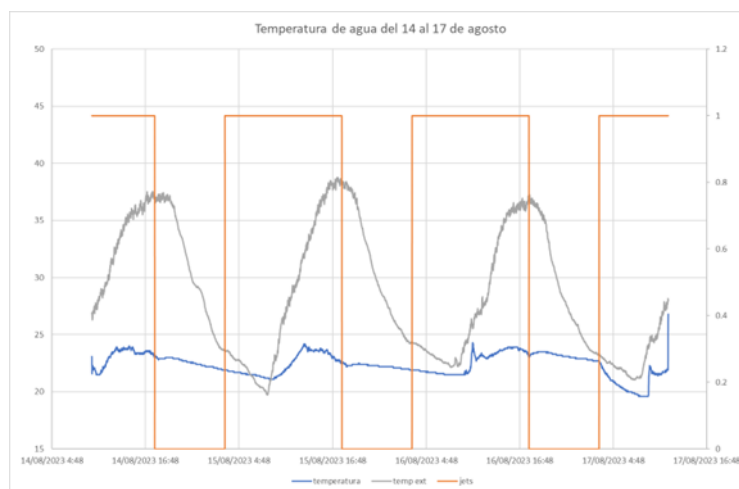


Figura 19. Gráfica de funcionamiento de jets del estanque en varios días. Fuente: Elaboración propia.

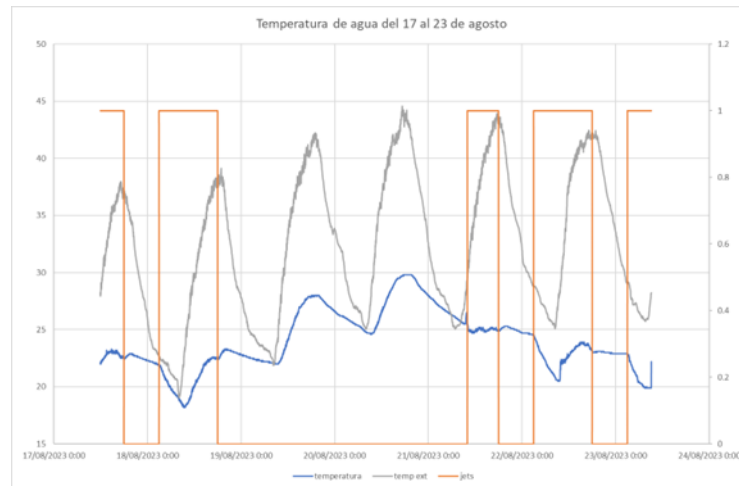


Figura 20. Gráfico de comportamiento de temperatura de agua con jets apagados. Fuente: Elaboración propia.

Además, para garantizar una automatización del proceso y que el pavimento se mantenga mojado a la altura establecida, se instala un rebosadero haciendo una división del cubículo, tal y como se observa en la Figura 22. El sistema de desagüe se compone en dos partes. La primera se encuentra dentro de la zona del rebosadero cuyo destino es la recirculación de vuelta al estanque. Mientras que el segundo desagüe se encuentra en el cubículo principal donde se encuentra el pavimento que posee un controlador programado. Este se activa una hora más tarde de cuando se acaban los experimentos húmedos, garantizando que el pavimento no esté en contacto con el agua y esté seco para mojarse de nuevo al día siguiente.



Figura 21. Fotografía de pavimentos húmedos y esquema de rebosadero. Fuente: Elaboración propia.

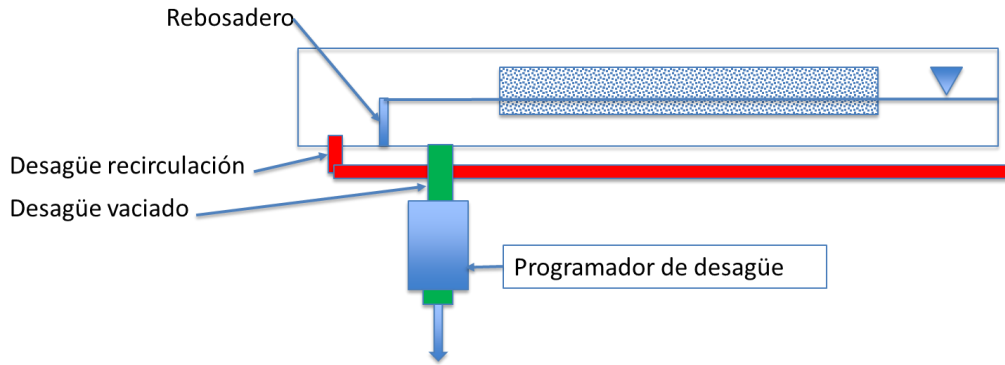


Figura 22. Esquema de rebosadero y desagües de cubículo de metacrilato. Fuente: Elaboración propia.

2.1.3 Sección de datos meteorológicos

Finalmente se detalla la sección dedicada a la recolección de datos meteorológicos. Durante todo el período de experimentación se han ido recabando los datos meteorológicos necesarios para conocer las condiciones ambientales en cada proceso experimental. Se compone por dos instrumentos de medida; la primera es una estación meteorológica que recaba datos sobre temperatura, humedad relativa, velocidad de viento temperatura de rocío. entre otras variables. El segundo instrumento es un anemómetro de precisión para tener una medida de velocidad de viento más exacta, ya que la medida ofrecida por la estación meteorológica no consta de la suficiente precisión. La estación meteorológica es el elemento PCE-FWS 20N de la marca *PCE* mientras que el anemómetro es el 4.3351.x0.141 de la marca *Thies Clima*. Como se ve en la Figura 23 los dos instrumentos meteorológicos se colocan a una altura de 50cm, con el fin de recabar datos y que no proyecten sombra sobre los experimentos ya explicados.



Figura 23. Fotografía de posición de estaciones meteorológicas en la bancada. Fuente: Elaboración propia

2.1.4 Sistema de control y medida

El sistema de monitorización se ha diseñado para recopilar los datos de las magnitudes a estudiar en cada una de las secciones determinadas: la temperatura de las placas, la temperatura de los pavimentos y los datos meteorológicos correspondientes a los días de ensayo.

Las temperaturas se miden usando termopares de tipo T que operan en un rango de -200°C a $+260^{\circ}\text{C}$ con una precisión de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Estos sensores están compuestos con un hilo de aleación de cobre y otro hilo de aleación de cobre-níquel (55%-45%) y se calibraron en el horno de metrología Fluke Calibration 9142 diseñado para enfriar desde -25°C y calentar hasta $+660^{\circ}\text{C}$ con una precisión de $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$. La medición se recoge gracias al datalogger RDXL6SD-USB de la marca *Omega* que recaban la información en intervalos de 1 minuto. Los sensores se colocaron en el centro de las superficies a medir para así disminuir el efecto borde y conseguir una medida fiable.

El agua del estanque que se usa para refrigerar se monitoriza gracias al datalogger RC-4 de la marca *Elitech* que, usando un termopar tipo J, recaba la información de la temperatura en un rango de -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$ con una precisión de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. La medición se recoge en intervalos de 1 min.

Las condiciones climáticas externas se miden ‘‘in situ’’ gracias a una estación meteorológica PCE-FWS 20N de la marca *PCE* y al anemómetro 4.3351.x0.141 de la marca *Thies Clima*. Gracias a estos instrumentos se consiguen una medida de temperatura de aire exterior con una precisión de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ en un rango de -40°C a 60°C . La humedad relativa del aire también es monitorizada, presentando una precisión de $\pm 4\%$ en humedades de entre 20 y 80% y $\pm 6\%$ en el resto con un rango entre 1% y 99%. Las mediciones de la estación meteorológica se realizan cada 5 minutos. Con respecto a la velocidad de viento el anemómetro tiene un rango de 0 a 75m/s con una precisión de $\pm 0,1\text{m/s}$. Las mediciones del anemómetro de precisión se realizan cada minuto.

Además, los experimentos cuentan con la estación meteorológica ubicada en X, ubicada a X distancia del prototipo sirviendo para re verificar y duplicar estas medidas. Esta estación meteorológica toma lecturas de la temperatura del aire exterior, la velocidad del viento y la humedad relativa a intervalos de 1 minuto con una precisión de $\pm 0,1\%$ para la temperatura y la velocidad del viento y de $\pm 1\%$ para la humedad relativa. También gracias a esta estación se recogen los datos de radiación global horizontal gracias al piranómetro de Kipp & Zonen CMP21 que devuelve una señal analógica que después se transforma en valores de radiación global horizontal. Por esta razón, la precisión de este aparato se encuentra en ± 7 a $14 \mu\text{V/W/m}^2$ y su rango es de 0 a 4000W/m^2 .

La información del sistema de control y medida se recaba en la Tabla 1.

Magnitud	Instrumento de medida	Rango	Precisión
Temperatura de superficie	Termopar, Tipo T	-200°C - $+260^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}$
Temperatura de agua	Termopar, Tipo J	-40°C - $+85^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}$
Temperatura de aire	PCE-FWS 20N estación meteorológica	-40°C - $+60^{\circ}\text{C}$	$\pm 1^{\circ}\text{C}$
Humedad	PCE-FWS 20N estación meteorológica	1%-99%	$\pm 4\%$ en rango de 20...80% $\pm 6\%$ en el resto de los rangos
Velocidad de viento	4.3351.x0.141 anemómetro	0m/s-75 m/s	$\pm 0,1 \text{m/s}$
Radiación Global Horizontal	CMP21 Kipp & Zonen piranómetro	0W/m^2 - $+4000 \text{W/m}^2$	± 7 a $14 \mu\text{V/W/m}^2$

Tabla 1. Rangos de medida y precisión del sistema de control y monitoreo. Fuente: Elaboración propia

2.2 Proceso y metodología de experimentación

En esta sección se desarrollará el proceso y la metodología de experimentación llevada a cabo para los estudios realizados. Primero se mostrará el calendario de las tareas realizadas durante el período del proyecto para posteriormente explicar con detalle cada una de las fases de desarrollo y de las tareas llevadas a cabo.

2.2.1 Calendario de experimentación

La realización del proyecto ha transcurrido desde principios de julio de 2023 hasta el 10 de octubre de 2023. Dentro de este período se encuentran dos fases del proyecto bien diferenciadas: la primera se basa en el montaje de la bancada de experimentación y la validación de datos para posteriormente dar paso a la segunda fase que representa las pruebas de cada una de las muestras de los fabricantes.

En las Figura 24 y Figura 25 se muestran gráficamente la distribución de las tareas en el período de realización del proyecto a modo de calendario. El color de las celdas corresponde a cada una de las tareas realizadas tanto de la fase 1 como de la fase 2 y se encuentran definidas en la leyenda de la figura.

Además, las X de cada celda representa si el día de estudio era un día despejado o no, ya que si el día no es despejado la experimentación de ese día específico no es válida. Por esta razón, después de hacer la primera ronda de experimentación de cada fabricante se hizo un estudio de la validez de los datos recogidos en función de las condiciones climáticas y se decidió repetir los experimentos para los fabricantes SAS y Solana y así tener certeza de que se tienen registrados resultados de experimentos válidos para el posterior estudio y caracterización de las muestras.

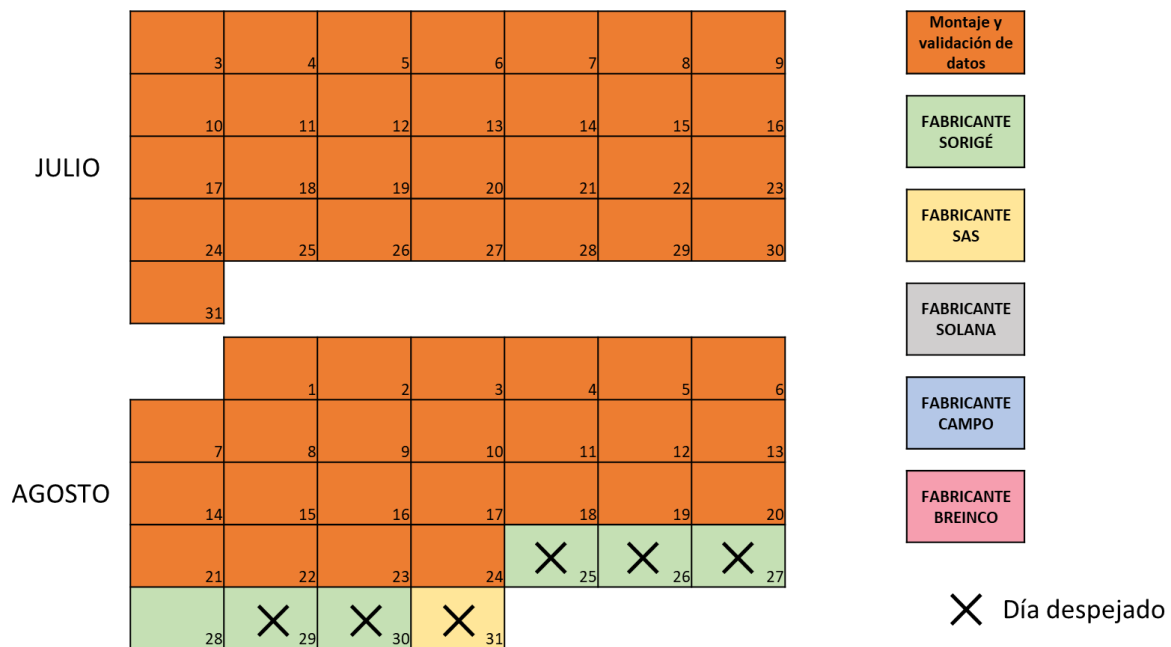


Figura 24 Calendario de tareas de julio y agosto. Fuente: Elaboración propia

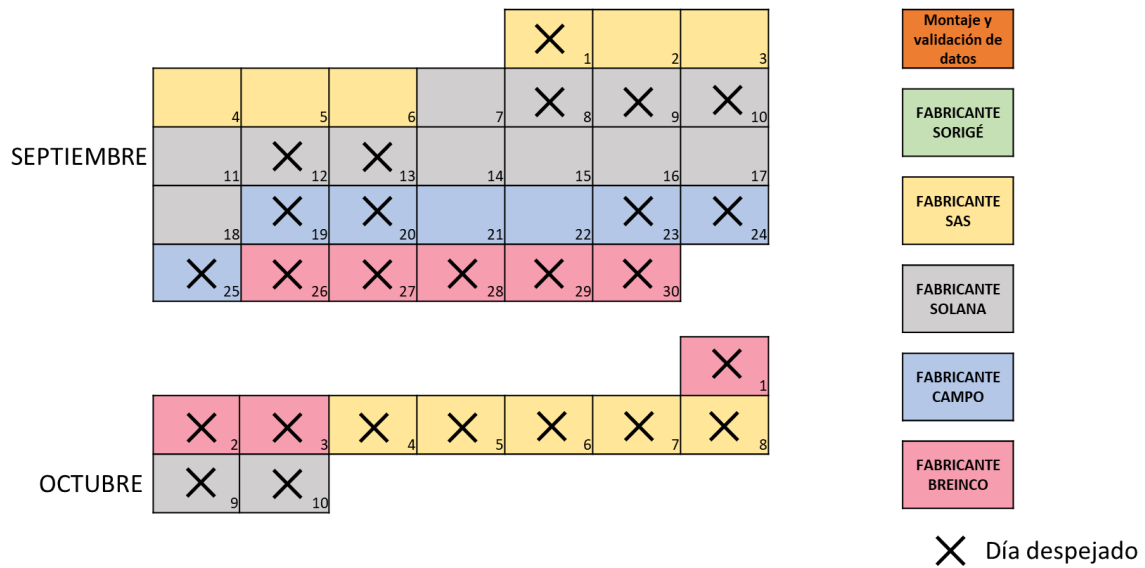


Figura 25. Calendario de tareas de septiembre y octubre. Fuente: Elaboración propia

Es muy importante hacer la distinción si un día es despejado o no ya que es una razón inequívoca para desechar ese día de experimentación o no. Si un día está nublado los datos medidos no son completamente fiables ya que esas nubes somborean las muestras estudiadas y la radiación no se puede contabilizar fielmente. Los días despejados en la fase de experimentación son 32 de 47 días totales representando un 68% de días despejados en toda la fase 2 del proyecto.

Para saber si un día es despejado o no se hace la comparativa entre la radiación teórica del día despejado con respecto a los datos meteorológicos reales recopilados. Así, si un día es completamente despejado ambas curvas deben ser muy parecidas en forma y magnitud, en cuanto aparecen nubes se ve perfectamente en la gráfica como la curva se riza y pierde su forma de campana. Para cada día se realiza la comparativa entre radiaciones para validar los datos de ese día de experimentación o desecharlos.

A modo de ejemplo en la Figura 26 se grafican dos días despejados del verano 2023. En el primer día, en la cima de la campana aún hay un poco de rizos y puede significar algo de nubosidad, pero realmente no llega a rizarse por completo como si fuera un día completamente nublado. En el segundo día graficado sin embargo se ve como ambas curvas coinciden en forma perfecta.

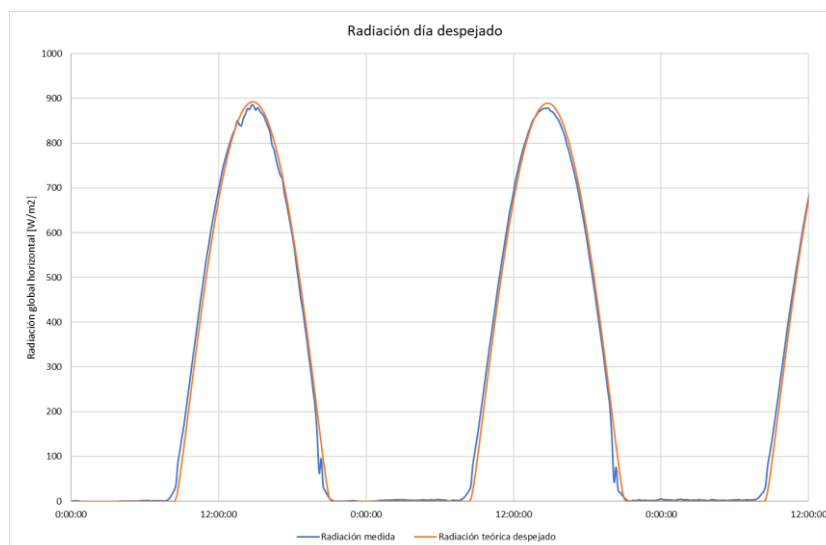


Figura 26. Curva gráfica de día despejado. fuente: Elaboración propia.

2.2.2 Fase 1: Montaje y validación de datos

La primera fase de experimentación se encarga del montaje de la bancada experimental y la correspondiente validación de todos los datos medidos en ella. Así, antes de comenzar los experimentos a las muestras de todos los fabricantes existe una fiabilidad de todos los sensores y de la metodología de experimentación a realizar. Aunque esta fase se retrasó y duró 53 días, el retraso en esta fase para asentar unas bases consiguió que la fase 2 fuera mucho más rápida y mecánica.

Se va a subdividir las pruebas realizadas por secciones de la bancada de experimentación enumerando tanto las pruebas realizadas de la sección de placas metálicas como de la sección de pavimentos tanto secos como húmedos

Número de prueba	Descripción
Prueba 1	Creación de sección con placas de 10x10cm sin generación de calor
Prueba 2	Cambio a placas de 20x20cm y prueba de elemento de generación de calor en placa de 25x25cm
Prueba 3	Instalación de un sensor automático de control de corriente eléctrica para configurar autoapagado del elemento de generación de calor
Prueba 4	Cambio del sensor de control de corriente por un controlador analógico de la corriente eléctrica
Prueba 5	Comprobación de termopares de la placa de generación de calor al no tener perfil de calor uniforme
Prueba 6	Normalización de tamaños de placas todas a 26x26cm
Prueba 7	Adición de placa de 5cm de acero entre elemento de generación de calor y placa de aluminio
Prueba 8	Eliminación de placa de 5cm de acero y colocación de doble placa de aluminio de 0.5mm de espesor
Prueba 9	Colocación de aislamiento de lana de roca y placa de metacrilato en la superficie inferior del elemento de generación de calor
Prueba 10	Instalación de la composición de la sección final

Tabla 2. Lista de pruebas del montaje de la sección de placas metálicas. Fuente: Elaboración propia.

De la prueba 1 a la prueba 9 se descartan por diversas razones haciendo uso del método de prueba y error e iterando posibles soluciones hasta llegar a la solución final. Algunas de las razones por las cuales se descartaron las pruebas pueden ser las siguientes. Como ejemplo, la prueba 7 se descarta por la gran diferencia de inercia térmica entre el acero y el aluminio. Esto ocasiona que nunca se llegue a régimen permanente, no pudiendo comparar los resultados entre las placas sin generación de calor y la placa con generación de calor. También hasta la prueba 6 no se tienen las 3 placas del mismo tamaño ya que se descubre que el tamaño de las placas influye en la transferencia de calor debido a la diferencia de longitud característica de placas. Finalmente, en la prueba 10 se comprueba que todos los sensores recaban información con la fiabilidad suficiente como para avanzar a la segunda fase de experimentación.

Número de prueba	Descripción
Prueba 1	Instalación de los pavimentos secos en la bancada
Prueba 2	Instalación de termopares en la superficie inferior de los pavimentos
Prueba 3	Pruebas de agujeros en superficie superior para comprobar que los pavimentos no fisuraban
Prueba 4	Primera prueba de termopares en superficie superior colocándolos en diversas zonas del pavimento
Prueba 5	Elección tanto del ángulo de incidencia del agujero como de la localización final de los termopares en superficie superior
Prueba 6	Comprobación de similitud en medidas de termopares superiores con respecto a inferiores
Prueba 7	Creación de los cubículos de metacrilato y sellado con silicona para impermeabilizar las superficies
Prueba 8	Creación de la instalación hidráulica y prueba de presión del agua en los tres cubículos de metacrilato
Prueba 9	Prueba de sellado de cubículos y nuevos sellados hasta completa impermeabilización
Prueba 10	Creación de cubos de mortero para elevar los pavimentos
Prueba 11	Instalación de pavimentos húmedos y colocación de termopares
Prueba 12	Comprobación de termopares con respecto a los pavimentos secos
Prueba 13	Instalación de sensores PT100 para medición de temperatura del agua
Prueba 14	Cambio de sensores individuales del agua en cada cubículo por un sensor de temperatura en bomba de succión del estanque
Prueba 15	Problema de desbordamiento de agua y necesidad de hacer experimentos manuales abriendo y cerrando las válvulas.
Prueba 16	Prueba de esquema de rebosadero y doble desagüe de agua para automatizar el proceso
Prueba 17	Creación de tapas de cartón para sellar la entrada de aire y hacer que el pavimento no tenga contacto con el viento exterior

Tabla 3. . Lista de pruebas del montaje de la sección de pavimentos. Fuente: Elaboración propia.

En este caso la sección de pavimentos tiene tanto sus pruebas para el módulo en seco como en el módulo húmedo. Es un proceso de aprendizaje constante donde cada vez que se avanza un paso se descubre un nuevo impedimento y se crea una solución a cada una, haciendo pruebas para ver si solventa el problema y, una vez solventado cada problema, se avanza hacia el siguiente paso.

Por ejemplo, la instalación de los termopares en la superficie superior de los pavimentos no es arbitraria ya que para que el termopar se coloque en contacto directo con la superficie no se puede utilizar ningún adhesivo. La razón de esto es por la diferencia de propiedades entre el adhesivo y el pavimento, teniendo el adhesivo un campo de temperaturas diferentes y el termopar no medir fielmente la superficie del pavimento. Así, se idea realizar un orificio con una broca de 0.5mm para que cupiera exactamente la punta del termopar y se rellene el hueco con el propio polvo del pavimento generado en la incisión. Con todo lo anterior se embebe el termopar en el propio pavimento y rodeado de su propio material, coincidiendo en propiedades y consiguiendo una medida fiable en el sensor de temperatura.

Hasta el último paso no se consigue un diseño robusto de los módulos ecos y húmedos y preparado para poder realizar los experimentos de manera iterativa y cíclica hasta que se experimentasen todas las muestras de pavimentos recibidas.

2.2.3 Fase 2: Pruebas de fabricantes y procedimiento de pruebas

Una vez la bancada experimental está montada y existe la seguridad de que los experimentos se puede realizar de manera consecutiva y con fiabilidad de los datos recogidos, se piensa en una metodología que asegure la correcta realización de estos. Por ello, en la Figura 27 se representa el diagrama de flujo del proceso de experimentación para cada fabricante.

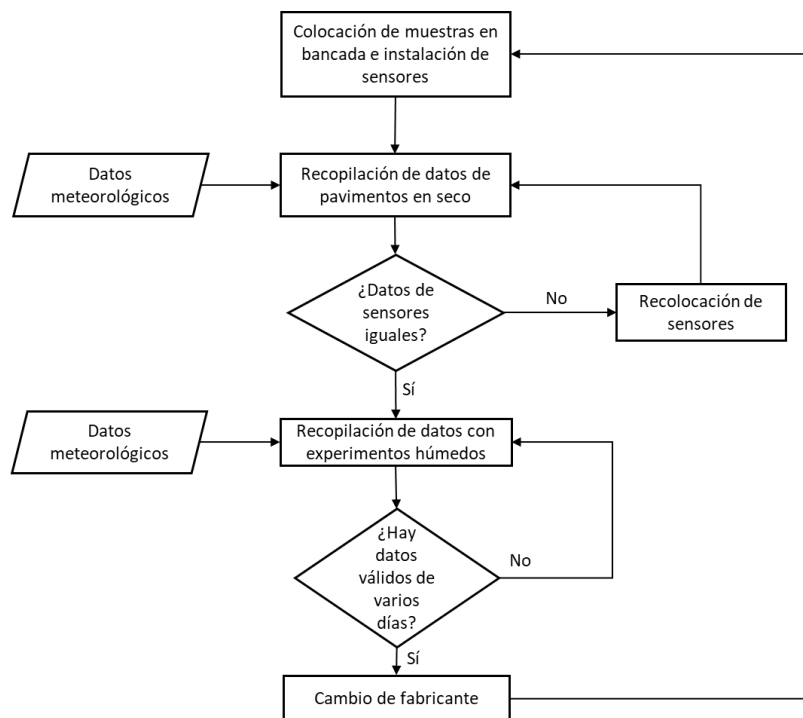


Figura 27. Diagrama de flujo metodología de experimentación. Fuente: Elaboración propia

El primer paso corresponde a la colocación de las muestras a ensayar en la bancada de experimentos y su consecuente sensorización. En esta situación inicial los pavimentos tanto de la sección de secos como de la sección de húmedos se abrazan de una camisa de aislamiento para que tengas las mismas condiciones de contorno y poder hacer una comparación fiable. Una vez se tienen todas las muestras colocadas y sensorizadas aisladas tanto en laterales como en la superficie inferior se dejan todo un día en el exterior para que, expuestos a las condiciones climáticas, se mida la temperatura superficial de cada muestra durante todo el día.

Al día siguiente se recaba toda la información de los sensores y se hace una comparación de los datos medidos en cada pareja de pavimentos de la misma tonalidad. Si las temperaturas no dan valores parecidos se considera que los sensores no están bien colocados y vuelve al paso anterior hasta que haya una medición fiable de los mismos. Cuando ya se tiene una seguridad de que los sensores miden correctamente la temperatura superficial de los pavimentos se pasa a los experimentos húmedos de los mismos.

Además de la comparación entre pavimentos de la sección seca con la sección húmeda exista una segunda comprobación correspondiente a las temperaturas de la superficie inferior y superior del pavimento seco. Gracias a los sensores colocados en ambas superficies de la muestra se realiza una doble confirmación de que los sensores tienen una correcta colocación y recaban datos fiables.

A modo de ejemplo en la Figura 17 se expone una gráfica de un pavimento de la sección seca para comprobar la instalación correcta de los sensores. Como se puede comprobar en la figura, la superficie superior y la inferior poseen un cierto desfase debido al espesor de la muestra y la propia inercia térmica del mismo. Para confirmar que son datos fiables se debe comprobar que el desfase es del orden correcto y que el máximo en la curva sea del mismo orden de magnitud en ambas superficies.

No obstante, en la Figura 28 se encuentra la confirmación de sensores entre los pavimentos de la sección seca y húmeda. En este caso no debe haber un desfase como en la Figura 17 sino que ambos pavimentos deben seguir una curva parecida en forma y magnitud a lo largo del día.

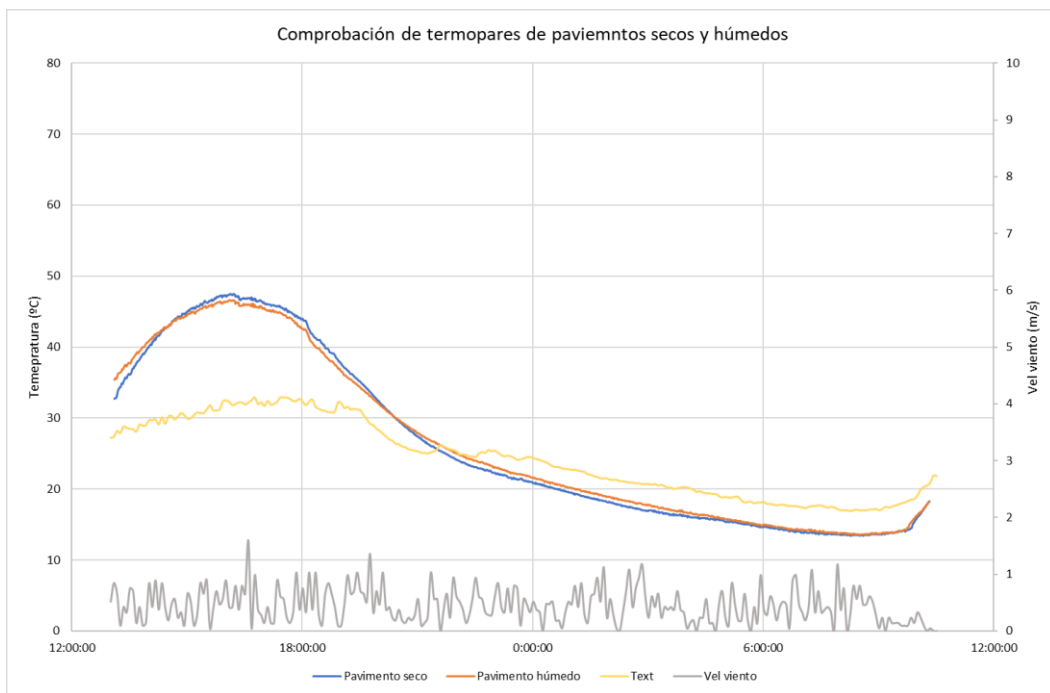


Figura 28. Gráfica de comprobación de funcionamiento de termopares entre pavimentos secos y húmedos. Fuente: Elaboración propia.

En este momento de la experimentación se debe retirar la camisa de aislamiento de los pavimentos de la sección húmeda y colocarlos a la altura necesaria gracias a los cubos de mortero realizados anteriormente. Además, se hace una prueba de agua llenando el cubículo de metacrilato para que exista la seguridad de que el nivel de agua se mantiene a la altura del pavimento deseada y que los desagües succionan lo suficiente para que no exista desbordamiento.

Los pavimentos se mantienen midiendo su temperatura durante todo el día, pero el agua sólo se activa de 14:00h a 18:00h siendo estas las horas de pico solar y donde existe una demanda crítica de climatización. Posteriormente, a las 19:00h se activa el segundo desagüe que es el encargado del vaciado completo del cubículo de metacrilato, manteniendo así el pavimento de nuevo seco hasta el día siguiente. Este período siguiente al mojado correspondería a un espacio de tiempo donde la demanda de climatización no es tan crítica debido a la reducción de la radiación, pero con una gran ocupación de las calles y, en consecuencia, una necesidad de confort térmico.

En la Figura 29 se representa una gráfica de una muestra arbitraria a modo de ejemplo de resultados del experimento húmedo. Como se puede comprobar ambos pavimentos se comportan de manera similar a lo largo de la mañana hasta llegar a las 14:00h aproximadamente que es cuando comienza el llenado del cubículo de metacrilato. En cuanto el agua toca la superficie inferior del pavimento se encuentra un cambio en la temperatura superficial superior del mismo y comienza un período de transición térmica donde comienza a refrigerarse el mismo. Esta bajada va continuando y es tan acusada que en cierto momento del experimento el pavimento llega a conseguir una temperatura menor incluso que el aire exterior que la rodea. A partir de las 18:00h se deja de llenar, pero no es hasta las 19:00h que se vacía el cubículo y empieza el pavimento de nuevo a estabilizarse con sólo la excitación del aire exterior y radiación solar. Por la noche ambas muestras se equilibran en una temperatura muy parecida.

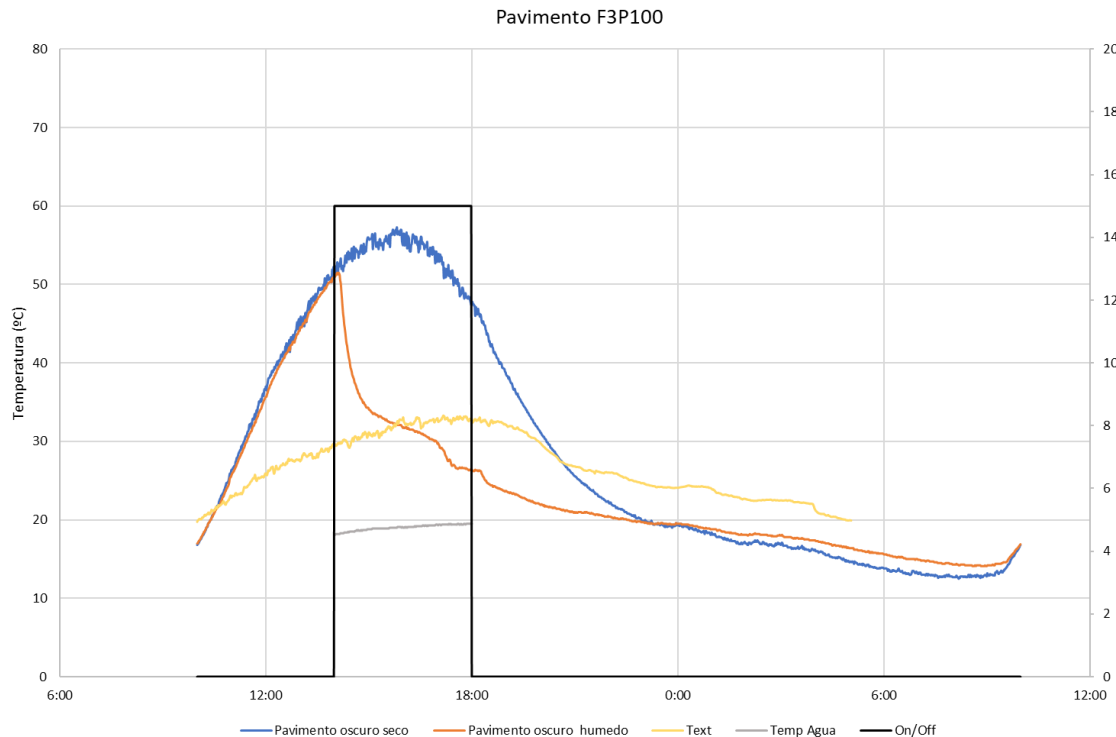


Figura 29. Gráfica de ejemplo de experimento húmedo (F3P1-00). Fuente: Elaboración propia.

Al cabo de varios días de experimentación húmeda se deben analizar los resultados recabados y comprobar que son medidas fiables y lógicas. Además, se comprueba que los días de experimentación corresponden a días despejados y soleados para poder validar los datos para su posterior uso en los análisis numéricos. Si se tienen varias tandas de datos válidos se pasa a otro fabricante. Para ello, se vuelve al paso 1 de la metodología.

Así, se va repitiendo esta metodología en bucle durante todo el período de experimentación hasta conseguir un estudio de todas las muestras recibidas de los fabricantes.

2.2.4 Fase 3: Pesado de muestras en mojado

Se conoce que cuando un sólido poroso se pone en contacto con un líquido, el agua migra hacia dichos poros y pasan de estar rellenos de aire a estar rellenos de agua. En consecuencia, al variar el interior de esos poros las propiedades del sólido en su totalidad varían. Es por eso por lo que esta fase se tuvo que llevar a cabo y es fundamental. Según una búsqueda bibliográfica se encuentra que el porcentaje de absorción de pavimento no tratados para su impermeabilización está entre un 6 al 12% mientras que los pavimentos impermeabilizados se encuentran en un 4%[12]. Esta información coincide con la información recibida por los fabricantes contactados. Según los fabricantes de los pavimentos a ensayar la absorción de agua se rige por la norma UNE 1339 e impone un máximo de 6% de absorción de agua en pavimentos comerciales[13]. Para ello, le añaden aditivos hidrofugantes en su composición en un orden de 0.6% a 1% en las capas del propio pavimento.

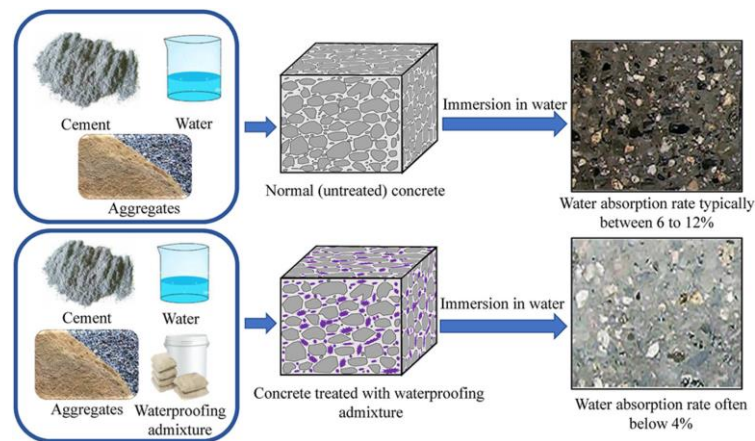


Figura 30. Absorción de agua de hormigón en función de si tienen aditivos hidrofugantes o no. Fuente:[14]

En la fase 3 de la experimentación se ha realizado un pesado de las muestras sumergiéndolas en agua en busca de calcular su porosidad y tener un indicativo para el posterior cálculo de propiedades de manera rigurosa. El procedimiento seguido para el cálculo de la porosidad de las muestras es el siguiente:

- Se pesa una primera vez en seco antes de sumergirlos en agua.
- Se sumergen solo hasta el 50% de la pieza apoyado en los cubos de mortero que hicimos en verano y se deja sumergido 30 min.
- Después de los 30 minutos se pesa de nuevo y se consigue el peso al 50%.
- Se sumerge al completo la pieza y se deja sumergido otros 30 min.
- Se pesa una última vez después de los 30 min consiguiendo el peso al 100%.

La razón por la cual se pesa tanto sumergido al 50% como sumergido al 100% es pro tener un valor indicativo de la porosidad en una situación más cercana a los experimentos húmedos realizados en la fase 2 de la experimentación.

2.2.5 Indicadores de datos experimentales

Para el posterior estudio de los datos recopilados se van a definir una serie de magnitudes que se calculan a partir de los resultados para poder caracterizar la experimentación de las muestras.

La primera magnitud por definir va a ser el parámetro que se va a utilizar para medir la diferencia entre temperaturas del pavimento en seco y húmedo. Para ello, se hace uso de los grados hora (GH) que mide el área entre ambas curvas de temperaturas diarias en un determinado período de tiempo. La expresión matemática está condicionada a que los datos experimentales medidos se encuentran en intervalos de 5 minutos, por eso para cada intervalo se calcula la diferencia positiva de temperaturas y se pondera para que en total se tenga el número de grados hora correspondientes al período.

$$GH_{seco-húmedo} = \frac{300}{3600} \sum_{i=1}^N (T_{pavseco} - T_{pavhumedo})_i \text{ [}^{\circ}\text{Ch]} \quad (2-2)$$

Para comparar las temperaturas de los pavimentos tanto húmedos como secos con respecto a la temperatura ambiente también se va a hacer uso de grados hora de manera análoga a la ecuación (2-2). Sin embargo, el enfoque que reciben estos grados horas va a ser un poco diferente. Lo primero que se debe hacer es una distinción entre los períodos donde el pavimento se encuentra a una temperatura superior a la del ambiente con respecto a los períodos donde el pavimento se encuentra a una temperatura inferior a la del ambiente. El primero de los nombrados períodos se denominará sobrecalentamiento (overheating potential) mientras que el segundo será subenfriamiento (overcooling potential). La misión en todo caso será intentar reducir al máximo el potencial de sobrecalentamiento y convertirlo en todo caso en el máximo potencial de enfriamiento posible ya que así se consigue que los pavimentos puedan usarse como solución natural para confort climático.

$$\text{Sobrecalentamiento} = \frac{300}{3600} \sum_{i=1}^N (T_{pav} - T_{aire})_i \text{ [}^{\circ}\text{Ch]} \quad (2-3)$$

$$\text{Subenfriamiento} = \frac{300}{3600} \sum_{i=1}^N (T_{aire} - T_{pav})_i \text{ [}^{\circ}\text{Ch]} \quad (2-4)$$

Para el cálculo de los indicadores se hará una división en dos períodos que se han denominado período ON (de 14:00 a 18:00) y período OFF (de 18:00 a 22:00). El período ON corresponde al período que se considera con condiciones climáticas más dramáticas, donde la radiación solar es máxima y la temperatura de aire exterior es muy alta. Además, en este período los ciudadanos en climas calurosos suelen mantenerse en casa resguardándose de las condiciones climáticas tan duras. Así, se toma la decisión de comenzar los experimentos húmedos a esta hora para comenzar a enfriar los pavimentos al haber menos tránsito de ciudadanos. Sin embargo, el período OFF corresponde al período donde las condiciones climáticas se empiezan a suavizar y los ciudadanos comienzan a salir por las calles de la ciudad. Es por esta razón que también se estudia este período y las consecuencias de haber mojado los pavimentos en el período OFF frente a los datos recogidos del pavimento en seco de referencia.

Como se ve en la Figura 29 el pavimento húmedo tendría en el período ON (de 14:00 a 18:00) un potencial de sobrecalentamiento x hasta que la curva cruza con la curva de temperatura ambiente que a partir de ahí comienza a tener un potencial de subenfriamiento hasta el final del experimento. A partir de ahí, en el período off el pavimento húmedo tendría en su totalidad potencial de subenfriamiento y nulo potencial de sobrecalentamiento. En contrapartida, el pavimento seco sin experimentar con el agua se comprueba que tiene un potencial de sobrecalentamiento en todo el período ON y prácticamente en la totalidad el período OFF (sólo al final del período cae por debajo de la temperatura ambiente)

2.3 Muestras para ensayar

Para poder realizar la caracterización experimental es necesario de disponer muestras de diferentes pavimentos de hormigón. Por ello, se contacta por medio del Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) y la asociación ANDECE a diferentes fabricantes para poder conseguir muestras de sus productos para poder estudiarlas. A dichos fabricantes se les explica la finalidad del experimento y aceptan mandar diferentes piezas tanto de composición, color y espesor variables.

Finalmente, 5 fabricantes diferentes aceptan mandar sus muestras para la experimentación. Dichos fabricantes son: Sorigué, SAS1900, Mosaicos Solana, Breinco y Campo. A continuación, se listarán todas las muestras recibidas por cada fabricante.

En el Anexo A se adjuntan imágenes de las diferentes piezas por fabricante.

2.3.1 Fabricante Sorigué

El fabricante Sorigué proporcionó 3 tipos de piezas y 2 unidades de cada una de ellas como se ve en la Tabla 4.

Cantidad	Dimensiones	Denominación
2 unidades	60x40x7 cm	Basalto SB
2 unidades	60x40x7 cm	Gris SB
2 unidades	60x40x7 cm	Siena SB

Tabla 4. Piezas recibidas por fabricante Sorigué. Fuente: Elaboración propia

De estas piezas se pudieron realizar experimentos a los tres tipos de piezas recibidas.

2.3.2 Fabricante SAS1900

El fabricante SAS1900 proporcionó 4 tipos de piezas y 2 unidades de cada una de ellas como se ve en la Tabla 5.

Cantidad	Dimensiones	Denominación
2 unidades	40x40x2.5 cm	Antracita
2 unidades	40x40x2.5 cm	Arenisca
2 unidades	40x40x2.5 cm	Blanca
2 unidades	40x40x2.5 cm	Bronce

Tabla 5. Piezas recibidas por fabricante SAS1900. Fuente: Elaboración propia

De estas piezas se pudieron realizar experimentos solo a las piezas antracita, arenisca y blanca.

2.3.3 Fabricante Mosaicos Solana

El fabricante Mosaicos Solana proporcionó 6 tipos de piezas y 2 unidades de cada una de ellas como se ve en la Tabla 6

Cantidad	Dimensiones	Denominación
2 unidades	60x40x4 cm	M-88
2 unidades	60x40x4 cm	MB-108
2 unidades	60x40x4 cm	MB-00
2 unidades	60x40x4 cm	VB-GRIS MEDIO
2 unidades	60x40x4 cm	VB-GRIS FUERTE
2 unidades	60x40x4 cm	VB-FLORESTA GRIS

Tabla 6. Piezas recibidas por fabricante Mosaicos Solana. Fuente: Elaboración propia

De estas piezas se pudieron realizar experimentos solo a las piezas M-88, MB-108 Y MB-00.

2.3.4 Fabricante Breinco

El fabricante Breinco proporcionó 9 tipos de piezas (6 de ellas de tipo Llosa Vulcano y 3 de ellas de tipo Acqua Pave) y 1 unidad de cada una de ellas como se ve en la Tabla 7.

Cantidad	Dimensiones	Denominación
1 unidad	40x40x3.5 cm	Llosa Vulcano Gris
1 unidad	40x40x3.5 cm	Llosa Vulcano Black
1 unidad	40x40x3.5 cm	Llosa Vulcano Desierto
1 unidad	60x40x3.5 cm	Llosa Vulcano White
1 unidad	60x40x3.5 cm	Llosa Vulcano Marfil
1 unidad	60x40x3.5 cm	Llosa Vulcano Black
1 unidad	30x20x10 cm	Acqua Pave Marfil
1 unidad	30x20x10 cm	Acqua Pave Mediterráneo
1 unidad	40x40x8 cm	Acqua Pave Gris

Tabla 7. Piezas recibidas por fabricante Breinco. Fuente: Elaboración propia

De estas piezas se pudieron realizar experimentos solo a las piezas correspondientes a Llosa Vulcano White, Marfil y Black.

2.3.5 Fabricante Campo

El fabricante Breinco proporcionó 6 tipos de piezas 2 unidades de cada una de ellas como se ve en la Tabla 8.

Cantidad	Dimensiones	Denominación
2 unidades	40x40x5 cm	B1 color Blanco
2 unidades	40x40x5 cm	B2 color Gris Santiago
2 unidades	40x40x5 cm	B3 color Gris Basalto
2 unidades	40x20x6 cm	L1 colormix Ceniza
2 unidades	40x20x6 cm	L2 colormix Marfil
2 unidades	40x20x6 cm	L3 colormix Cobre

Tabla 8. Piezas recibidas por el fabricante Campo. Fuente: Elaboración propia

De estas piezas se pudieron realizar experimentos solo a las piezas correspondientes B1 Blanco, B2 Gris Santiago y B3 Gris Basalto.

2.3.6 Normalización de nomenclatura

En vista a mantener la confidencialidad de los datos de los fabricantes, a partir de este momento en el presente trabajo se adoptará un código para cada muestra medida. Así, los datos presentados harán referencia a una muestra codificada y no se podrá relacionar a ningún fabricante en específico.

El código se basa en una correlación de letras y números para poder listar y organizarlas entre ellas. Se compone de 3 partes: PX-FX-COLOR. La primera corresponde al número de pieza, ya que, si se reciben dos muestras de cada pieza, se denominaría la primera como P1 y la segunda como P2. La segunda corresponde al fabricante ya que cada uno tiene asociado un número del 1 al 5; así, por ejemplo, si el fabricante Sorigué que correspondiera al número 1 tendría un F1 en su código. Finalmente, el tercer código corresponde al color del pavimento que varía en función del color de las muestras recibidas; por ejemplo, un color del fabricante Sorigué es gris así que tendría la simbología G. El código de la muestra de ejemplo elegida sería P1F1G.

3 CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES

En el presente apartado del trabajo se procederá a caracterizar las propiedades termohigrométricas tanto de las placas metálicas de la sección A como de los pavimentos de la sección B de la bancada de experimentación gracias a los datos obtenidos.

Según la revisión bibliográfica, las propiedades más importantes que caracterizan el comportamiento térmico son: su densidad, su calor específico, su absorptividad (y en consecuencia su albedo) y su conductividad térmica. Además, se debe caracterizar los mecanismos de transferencia de calor; por tanto, también se debe caracterizar los coeficientes de película convectivos y la denominada temperatura de cielo. Finalmente, para las propiedades de los pavimentos se hará distinción entre las propiedades de las muestras en seco y las propiedades de las muestras en mojado ya que como se ha expuesto previamente en el presente trabajo las propiedades varían cuando las muestras se exponen al contacto del agua.

3.1 Metodología de caracterización de propiedades

Para proceder a la caracterización de propiedades se debe hacer hincapié en la metodología que se va a llevar a cabo para cada una de las propiedades anteriormente indicadas. Así, se va a hacer distinción de las propiedades que se calculen directamente de datos experimentales recabados en los experimentos realizados de las propiedades que se calculen haciendo uso de un modelo de simulación que se describirá posteriormente.

3.1.1 Propiedades calculadas mediante experimentación

Las propiedades que se calculan directamente de datos recabados en los procesos de experimentación son de la sección de placas metálicas su absorptividad, coeficientes de película convectivos y temperatura de cielo que se calculan mediante las medidas de temperatura de la experimentación.

De la sección de pavimentos las propiedades calculadas mediante experimentación son su densidad y calor específico en seco, que se calculan mediante un pesado de las muestras y una relación matemática obtenida en la literatura y la porosidad en mojado, que se calcula mediante un pesado de las muestras humedeciendo el pavimento de diferente forma y durante cierto tiempo y luego calculándolo gracias a la variación en peso que experimenta.

3.1.2 Propiedades calculadas mediante simulación

Las propiedades que se calculan mediante simulaciones matemáticas se exponen en este apartado. Estas propiedades son tanto la absorptividad como la conductividad tanto en la situación en seco como en la situación en húmedo. Para ello, se debe definir el modelo de simulación del que se hace uso para poder obtener la temperatura del pavimento simulado con el cual se busca que se asemeje lo máximo posible de las temperaturas medidas experimentalmente gracias a la bancada.

3.1.2.1 Modelización

El modelo de simulación es un modelo matemático que resuelve la caracterización de cerramientos opacos en régimen transitorio. Para la completa descripción del modelo se van a definir los parámetros de entrada (inputs) y los parámetros de salida (outputs) del mismo.

Los inputs del modelo se subdividen en varios apartados:

- Datos temporales de la simulación y condiciones de contorno:

En este apartado se debe indicar el tiempo de simulación que son los intervalos de tiempo que se van a simular, el time step que es de 1 unidad de tiempo que se use y la temperatura inicial del muro como condición de contorno térmica.

- Propiedades del pavimento en cuestión:

En este apartado se deben definir las propiedades de las capas de pavimento. En el caso del presente trabajo se supone que el pavimento es unicapa y de propiedades homogéneas en el volumen de esta. Además, se debe definir el número de nodos de la capa, que son las subdivisiones que el modelo tiene en cuenta de la capa para hacer cálculos intermedios del espesor de la capa del pavimento. En este caso se decide fijar un número de 10 nodos ya que son suficientes para definir el comportamiento térmico interno de la transmisión de calor a través del pavimento. Las propiedades que se deben introducir en el modelo son el material, el espesor, la densidad, el calor específico, la conductividad térmica.

- Excitaciones en superficie superior e inferior del pavimento:

En este apartado se debe definir las excitaciones a las que se somete el pavimento tanto en su superficie superior como en su superficie inferior. Para definir una excitación se debe indicar la temperatura y el coeficiente de película convectivo-radiante a los cuales está expuesta la superficie en todo el período de tiempo en el que se va a realizar la simulación. Estas excitaciones serán diferentes en cada caso de estudio y, más concretamente en este trabajo se hará distinción entre las excitaciones de las simulaciones de los pavimentos en seco de las excitaciones de ellos pavimentos húmedos.

Los outputs o variables de salida del modelo son las temperaturas tanto de la superficie superior e inferior como de los nodos intermedios definidos, los calores transferidos al pavimento y los calores acumulados en todo el período de simulación. En este trabajo la variable de salida fundamental serán las temperaturas de los pavimentos en su superficie superior ya que es la temperatura de la que se tienen datos medidos de los experimentos y el objetivo será encontrar la propiedad correcta que haga que las medidas y las simulaciones coincidan.

3.2 Caracterización de placas metálicas

En esta sección se calcularán las propiedades termohigrométricas de las placas negra y blanca que representan los marcos de referencia y condiciones de contorno para, posteriormente, hacer uso de estas propiedades para calcular las propias de los pavimentos que se han experimentado. Se calcularán para cada placa su absorptividad, los coeficientes de película convectivos y la temperatura de cielo correspondiente al momento de estudio.

3.2.1 Absortividad (Albedo)

En este apartado se calcularán las absorptividades de las placas negra y blanca. Para ello, es necesario hacer uso de balances de energía donde la convección dominante sea la forzada ya que en ese caso el coeficiente de película forzado es igual para ambas placas y puede usarse como dato válido para ambos balances. Así, para que la convección dominante sea forzada es necesario que la velocidad de viento que llega a la superficie sea mayor de 0.4 m/s.

Por tanto, se hará uso de un procedimiento experimental donde las placas se verán expuestas a un ventilador que obliga al aire a tener una velocidad suficiente como para asumir convección forzada en ambas placas.



Figura 31. Esquema de experimentación para cálculo de absorptividad de placas. Fuente: Elaboración propia.

El primer paso para el procedimiento será la suposición de la absorptividad de placa negra de 0.96 ya que el color negro se comporta con una absorptividad tan alta que se puede asumir ese valor como válido.

Una vez se ha supuesto esa absorptividad se plantean los balances de energía como se ven en las ecuaciones (3-1) y (3-2).

$$0 = h_{forzada}(T_{placanegra} - T_{aire}) + h_r(T_{placanegra} - T_{cielo}) - \alpha_{placanegra} I_G \quad (3-1)$$

$$0 = h_{forzada}(T_{placablanca} - T_{aire}) + h_r(T_{placablanca} - T_{cielo}) - \alpha_{placablanca} I_G \quad (3-2)$$

De la ecuación (3-1) la única incógnita es el coeficiente de película forzada por tanto se puede despejar y, al tener calculado ese coeficiente, se puede despejar del balance de la ecuación (3-2) la absorptividad de la placa blanca.

3.2.2 Temperatura de cielo

La temperatura de cielo es un parámetro muy valioso en este ámbito de la ingeniería puesto que cuantifica el intercambio radiante con todos los componentes por encima de la superficie terrestre (nubes, espacio exterior, gases de la atmósfera, etc.). La temperatura de este complejo grupo de elementos equivale a la que necesita tener un cuerpo negro que emite la misma energía que emite todo el cielo visible sobre una superficie horizontal definida. Además, ocurre que durante la noche la radiación emitida es fundamentalmente en el rango infrarrojo y de una intensidad sustancialmente menor que durante el día, provocando así que la temperatura de cielo de noche siempre sea menor que la temperatura ambiente y, en consecuencia, convirtiendo al cielo en un sumidero de calor importante para posibles soluciones climáticas [15][16]

Aunque se haya descrito un procedimiento experimental para calcular la temperatura de cielo mediante la placa con generación de calor, éste solo es un prototipo y, al haber hecho pruebas y recogido los datos experimentales, se ha decidido no hacer uso en este proyecto de esa metodología y optar por una metodología más teórica. Para los siguientes prototipos del proyecto se volverá a realizar el experimento con generadores de calor más rigurosos para poder tener balances suficientes para el cálculo de temperatura de cielo.

El cálculo de temperatura de cielo teórica hará uso de la temperatura de rocío que se obtiene de los datos meteorológicos. Con esta temperatura se podrá calcular la emisividad del cielo y con ésta se calcula la temperatura de cielo de manera sencilla como se ve en la ecuación (3-4).

Se debe tener en cuenta que para hacer uso de este procedimiento el día estudiado debe ser completamente despejado. Por tanto, se acota los días de estudio para la caracterización de propiedades a sólo días completamente despejados.

$$\varepsilon_{cielo}^{claro} = 0.711 + 0.56 \left(\frac{T_{rocio}[^{\circ}C]}{100} \right) + 0.73 \left(\frac{T_{rocio}[^{\circ}C]}{100} \right)^2 \quad (3-3)$$

$$T_{cielo} = \varepsilon_{cielo}^{claro} \frac{1}{4} T_{aire} [K] \quad (3-4)$$

3.2.3 Coeficientes de película convectivos

La convección se define como el mecanismo de transferencia de calor a través de movimientos de masas de fluidos. Suele ser la dominante para transferencia de calor cuando hay líquidos y gases involucrados. Si el movimiento del fluido no es por medio de las fuerzas de flotación se denomina que es convección forzada mientras que si el movimiento del fluido se basa en las diferencias de densidades se llama convección libre.

Sin embargo, como se ve en la Figura 32 dependiendo del régimen de velocidad del fluido y la diferencia de temperatura entre placa y fluido, se puede denominar que la transferencia de calor sea predominantemente forzada o, a regímenes bajos, se crea una nueva tipología que es llamada la convección mixta. En esta convección la transferencia es una combinación tanto del mecanismo forzado como libre y no se puede despreciar ninguna de ellos ya que son del mismo orden de magnitud.

		Gr/Re2.2									
Velocidad	2	0.0007	0.0015	0.0022	0.0030	0.0037	0.0044	0.0052	0.0059	0.0067	0.0074
	1.8	0.0009	0.0019	0.0028	0.0037	0.0047	0.0056	0.0065	0.0075	0.0084	0.0093
	1.6	0.0012	0.0024	0.0036	0.0048	FORZADA		0.0085	0.0097	0.0109	0.0121
	1.4	0.0016	0.0032	0.0049	0.0065	0.0081	0.0097	0.0114	0.0130	0.0146	0.0162
	1.2	0.0023	0.0046	0.0068	0.0091	0.0114	0.0137	0.0160	0.0182	0.0205	0.0228
	1	0.0034	0.0068	0.0102	0.0136	0.0170	0.0204	0.0238	0.0272	0.0307	0.0341
	0.8	0.0056	0.0111	0.0167	0.0223	0.0278	0.0334	0.0390	0.0445	0.0501	0.0557
	0.6	0.0105	0.0210	0.0314	0.0419	0.0524	0.0629	0.0734	0.0838	0.0943	0.1048
	0.4	0.0256	0.0511	0.0767	0.1023	0.1279	0.1534	0.1790	0.2046	0.2301	0.2557
	0.2	0.1175	0.2350	0.3525	0.4700	MIXTA		0.8224	0.9399	1.0574	1.1749
	0.1	0.5398	1.0797	1.6195	2.1594	3.7789	4.3187	4.8586	5.3984		
	0.05	2.4804	4.9609	7.4413	9.9218	12.4022	14.8827	17.3631	19.8436	22.3240	24.8045
			5	10	15	20	25	30	35	40	45
		Diferencia temperatura (placa-aire)									

Figura 32. Órdenes de magnitud para despreciar la convección mixta. Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, para caracterizar la convección en placas con el ambiente se debe caracterizar los tres términos (convección mixta, forzada y libre). La ecuación que rige la dependencia entre los tres términos se ve representada en la ecuación (3-5) Así, se irán calculando cada uno de los términos por un procedimiento diferente.

$$h_{mixta}^4 = h_{forzada}^4 + h_{libre}^4 \quad (3-5)$$

Para el término de convección mixta sólo se necesita hacer un balance de energía en cada una de las placas. Siendo así el balance en placa negra el correspondiente a la ecuación (3-6) y el balance de la placa blanca el correspondiente a la ecuación (3-7). De cada balance la única incógnita son los coeficientes de película mixtos así que se resuelve la ecuación y se calculan. Se tiene en cuenta que el coeficiente radiante se supone constante y con un valor de $4.9 \frac{W}{m^2K}$.

$$0 = h_{mixta_{placanegra}}(T_{placanegra} - T_{aire}) + h_r(T_{placanegra} - T_{cielo}) - \alpha_{placanegra} I_G \quad (3-6)$$

$$0 = h_{mixta_{placablanca}}(T_{placablanca} - T_{aire}) + h_r(T_{placablanca} - T_{cielo}) - \alpha_{placablanca} I_G \quad (3-7)$$

Para calcular el término de convección libre se hace uso de la correlación de McAddams para placa plana caliente

$$Nu_L = 0.54 Ra_L^{\frac{1}{4}} \quad (3-8)$$

Para ello, se necesita calcular el número adimensional Rayleigh que el producto de los números adimensionales Grashof y Prandtl.

$$Ra = GrPr \quad (3-9)$$

$$Gr = \frac{\beta(T_{placa} - T_{aire})gV}{\nu^2} \quad (3-10)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3-11)$$

Siendo en este caso β el coeficiente de expansión volumétrica, g la aceleración de la gravedad, V la longitud característica al cubo, ν la viscosidad cinemática y α la difusividad térmica del aire. Además, la longitud característica corresponde al cociente entre área y perímetro ($L_c = \frac{A}{P}$).

Finalmente, al calcular el Nusselt ya sólo quedaría calcular el coeficiente convectivo libre como se ve en la ecuación (3-12).

$$Nu = \frac{h_{libre} L_c}{k} \quad (3-12)$$

El término de coeficiente convectivo forzado se calcula haciendo uso de la ecuación (3-5) ya que es la única incógnita consiguiendo así caracterizar todos los términos necesarios para definir la convección de las placas con el aire.

3.3 Caracterización de pavimentos

La presente sección se dedica a explicar el procedimiento de cálculo de las propiedades de las muestras de pavimentos estudiadas. Gracias a la experimentación realizada, se tienen datos suficientes para poder calcular las propiedades termohigrométricas de los pavimentos. Como se ha expuesto en el apartado 3.1 se hará una distinción entre las propiedades de los pavimentos en seco y las propiedades de los pavimentos húmedos.

Sin embargo, las propiedades de pavimentos húmedos se calcularán enfocadas a la validación del modelo de matemático de simulación. Este procedimiento será iterativo ya que mediante la validación del modelo se va eligiendo las propiedades a caracterizar que consiga ajustar los valores simulados al comportamiento real medido del pavimento.

3.3.1 Propiedades en seco

3.3.1.1 Densidad

La densidad es la propiedad más fácil de caracterizar ya que al saber las dimensiones de cada pieza sólo falta calcular su peso y con un simple cálculo se obtiene su densidad. Para ello, se pesa cada una de las muestras y, posteriormente se calcula la correspondiente densidad. Al tener varias piezas de cada color y fabricante, se realiza un promedio de densidades.

$$\rho = \frac{M}{V} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (3-13)$$

3.3.1.2 Calor específico

Para el cálculo del calor específico se hará uso de datos de la literatura ya que esta propiedad tiene una correlación directa con la densidad. Gracias a la Figura 33 se sabe la dependencia de la densidad con el calor específico de manera experimental en literatura.

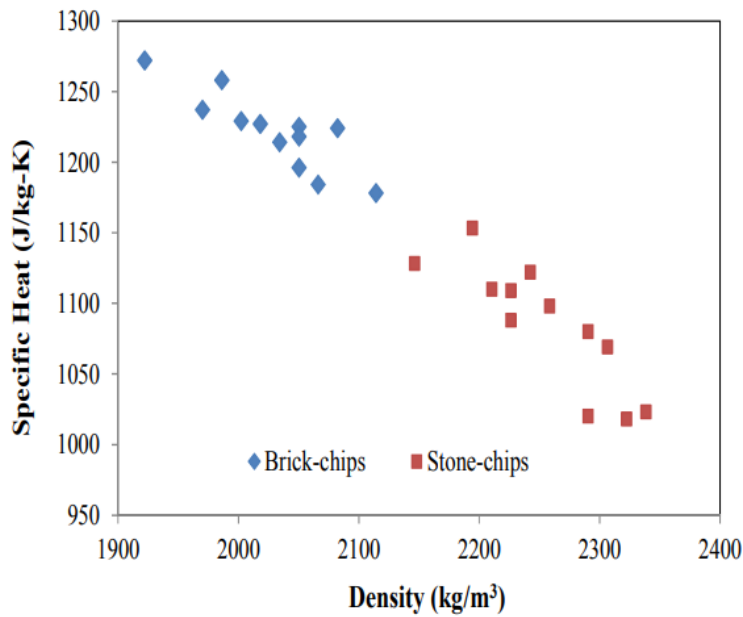


Figura 33. Datos de literatura de calor específico en función de la densidad. Fuente: [17]

Así, si se transforma estos datos en una gráfica y se añade una línea de tendencia se puede conseguir una correlación que calcule el calor específico (J/kgK) en función de la densidad (kg/m³) siempre que se encuentre en el rango estudiado.

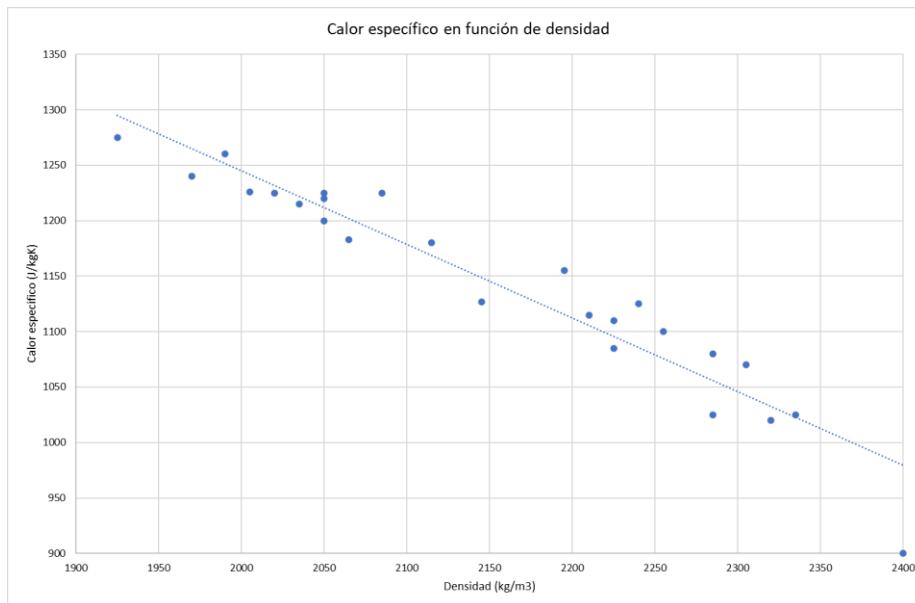


Figura 34. Correlación de calor específico en función de la densidad. Fuente: Elaboración propia

Por tanto, según se ve en la Figura 34 la correlación lineal que calcula el calor específico en función de la densidad es la ecuación (3-14).

$$C_p = -0.6638 \cdot \rho + 2572.5 \left[\frac{J}{kg K} \right] \tag{3-14}$$

3.3.1.3 Absortividad (albedo)

En este apartado la propiedad que se va a caracterizar es la absortividad de la superficie del pavimento. Así, gracias a esta propiedad también se tendría calculado el albedo ya que es el complementario a la unidad de éste (1-absortividad).

El procedimiento que se va a seguir para el cálculo de esta propiedad termohigrométrica será el siguiente: primero se calcularán los coeficientes de película convectivos de los pavimentos a partir de los previamente calculados de la sección de placas metálicas, luego se hace un cálculo directo de la absortividad para obtener una primera aproximación y finalmente se elige el valor exacto de absortividad haciendo simulaciones de diversas absortividades y se elige el valor que mejor se ajuste a la curva medida real.

3.3.1.3.1 Coeficientes de película de pavimentos

Lo primero será exponer los datos a partir de los cuales se calcularán los coeficientes de película convectivos de los pavimentos. Estos son: los coeficientes mixtos, forzados y libres tanto de la placa negra como de la blanca, la temperatura del pavimento medido y la temperatura de aire exterior en todo el período de estudio.

Primero, se debe hacer una media ponderada de los coeficientes de película forzados de ambas placas y, gracias a ese coeficiente de película forzado medio, se calcula el del pavimento según la ecuación (3-15).

$$h_{F_{pav}} = h_{F_{placas}} \cdot \left(\frac{L_{placas}}{L_{pav}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-15)$$

Una vez calculado el coeficiente de convección forzada, se calcula el coeficiente convección natural/libre se manera análoga al apartado 3.2.3.

$$Nu_L = 0.54 Ra_L^{\frac{1}{4}} \quad (3-16)$$

Para ello, se necesita calcular el número adimensional Rayleigh que el producto de los números adimensionales Grashof y Prandtl.

$$Ra = GrPr \quad (3-17)$$

$$Gr = \frac{\beta(T_{placa} - T_{aire})gV}{\nu^2} \quad (3-18)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3-19)$$

Siendo en este caso β el coeficiente de expansión volumétrica, g la aceleración de la gravedad, V la longitud característica al cubo, ν la viscosidad cinemática y α la difusividad térmica del aire. Además, la longitud característica corresponde al cociente entre área y perímetro ($L_c = \frac{A}{P}$).

Finalmente, al calcular el Nusselt ya sólo quedaría calcular el coeficiente convectivo libre como se ve en la ecuación (3-12).

$$Nu = \frac{h_{libre} L_c}{k} \quad (3-20)$$

3.3.1.3.2 Método directo para cálculo de absortividad

El siguiente paso para el cálculo de la absortividad es hacer un cálculo directo de la absortividad mediante términos matemáticos haciendo uso de las propiedades termohigrométricas y coeficientes de película calculados anteriormente. Se tiene una muestra de datos diarios de temperaturas de la superficie tanto inferior como superior de los pavimentos, pero el estudio se centrará de 12:00h a 17:00h que son las horas de mayor radiación solar. Se calculará el valor de absortividad para intervalos de 10 minutos y se elegirá un valor intuitivo como condición inicial para el siguiente método y definitivo de cálculo.

El cálculo directo se basa en calcular primero la temperatura radiante a la que está sometida el pavimento. Para ello, como se ve en la ecuación (3-21), se calcula a partir de la temperatura equivalente de la placa y su definición ya que al ser la placa de un espesor tan fino y de alta conductividad la temperatura equivalente corresponde a la temperatura medida en el experimento. Cabe destacar que en este paso no importa si se calcula usando los datos de la placa negra como de la placa blanca ya que la temperatura radiante es independiente y común.

$$T_{equivalente,placa} = T_{placa} = \frac{h_{cplaca}T_{aire} + h_r T_{rad}}{h_{crplaca}} + \frac{\alpha_{placa} * I_G}{h_{crplaca}} \quad (3-21)$$

La única incógnita de la ecuación (3-21) es la temperatura radiante; así pues, se calcula de manera directa. Una vez se tiene calculada la temperatura radiante, se debe calcular la temperatura equivalente del pavimento ya que será necesaria para el cálculo final de la absortividad.

$$T_{equivalente,pavimento} = \frac{h_{cpavimento}T_{aire} + h_r T_{rad}}{h_{crpavimento}} \quad (3-22)$$

Finalmente se debe hacer un balance de energía en la superficie superior del pavimento. Como el pavimento está aislado completamente en sus laterales y superficie inferior, el calor transferido en la superficie superior del pavimento se puede suponer nulo tal y como se expone en la Figura 35. Con esto, el balance de energía quedaría como en la ecuación (3-23); siendo la absortividad la única incógnita del balance.

$$0 = h_{crpavimento} \cdot (T_{pavimento} - T_{equivalente,pavimento}) - \alpha_{pavimento} \cdot I_G \quad (3-23)$$

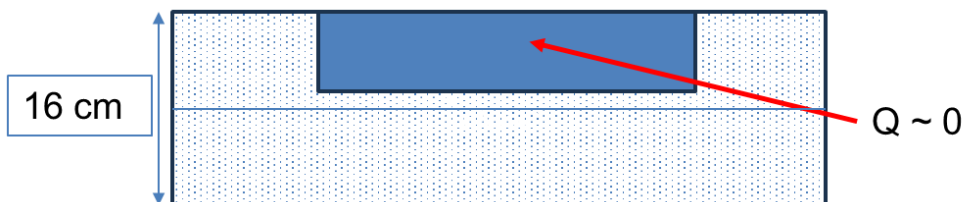


Figura 35. Esquema de aislamiento del pavimento en seco. Fuente: Elaboración propia.

Como se dijo previamente, se repetirá este procedimiento para cada intervalo de 10 minutos entre las 12:00h y las 17:00h de los días de experimentación. Con ello, los resultados de un día arbitrario para la muestra F2P1BL (correspondiente a una tonalidad clara) se ve en la Tabla 9.

Fecha y hora	T pav [°C]	I _G [W/m ²]	h mixta pavimento [W/m ² K]	h natural pavimento [W/m ² K]	h forzada pavimento [W/m ² K]	α pavimento
05/10/2023 12:00:00	31.50	626.68	15.60	4.02	15.58	0.24
05/10/2023 12:10:00	32.61	635.40	14.75	4.28	14.72	0.27
05/10/2023 12:20:00	34.00	656.03	13.54	4.51	13.50	0.29
05/10/2023 12:30:00	35.18	675.66	13.68	4.55	13.64	0.28
05/10/2023 12:40:00	36.23	692.44	14.39	4.71	14.35	0.31
05/10/2023 12:50:00	37.28	694.13	13.10	4.79	13.04	0.31
05/10/2023 13:00:00	38.35	711.88	13.00	4.84	12.93	0.31
05/10/2023 13:10:00	39.29	720.83	13.42	4.91	13.36	0.32
05/10/2023 13:20:00	40.26	739.16	13.86	5.02	13.80	0.34
05/10/2023 13:30:00	41.03	747.51	13.76	5.07	13.70	0.35
05/10/2023 13:40:00	41.81	757.78	15.12	5.13	15.07	0.37
05/10/2023 13:50:00	42.59	761.62	14.56	5.13	14.50	0.36
05/10/2023 14:00:00	43.24	762.32	14.93	5.19	14.88	0.38
05/10/2023 14:10:00	43.84	770.36	14.22	5.21	14.15	0.37
05/10/2023 14:20:00	44.28	769.78	14.28	5.24	14.22	0.38
05/10/2023 14:30:00	44.78	767.46	14.44	5.26	14.37	0.39
05/10/2023 14:40:00	45.15	764.83	14.04	5.29	13.96	0.39
05/10/2023 14:50:00	45.46	753.23	13.64	5.32	13.56	0.40
05/10/2023 15:00:00	45.69	745.65	13.68	5.33	13.60	0.41
05/10/2023 15:10:00	45.83	737.27	13.82	5.34	13.75	0.41
05/10/2023 15:20:00	45.88	725.50	14.80	5.33	14.74	0.44
05/10/2023 15:30:00	45.97	713.66	13.98	5.30	13.91	0.42
05/10/2023 15:40:00	45.98	692.01	12.76	5.30	12.66	0.41
05/10/2023 15:50:00	45.90	681.09	13.12	5.30	13.03	0.43
05/10/2023 16:00:00	45.91	662.93	13.57	5.22	13.50	0.43
05/10/2023 16:10:00	45.76	643.70	13.45	5.22	13.37	0.44
05/10/2023 16:20:00	45.43	623.46	14.27	5.20	14.20	0.47
05/10/2023 16:30:00	45.12	602.86	15.26	5.11	15.21	0.48
05/10/2023 16:40:00	44.82	579.78	15.05	5.08	15.00	0.48
05/10/2023 16:50:00	44.51	554.02	13.32	5.02	13.25	0.46
05/10/2023 17:00:00	43.95	529.48	15.40	4.94	15.36	0.50

Tabla 9. Resultados absorptividad para día arbitrario muestra F2P1BL. Fuente: Elaboración propia.

Una vez se tiene el cálculo de la absorptividad para cada intervalo de tiempo, se elige un criterio para elegir el valor intuitivo para proceder a las simulaciones. En este caso se ha elegido observar el instante de tiempo donde la temperatura del pavimento es máxima (en este caso 45.98°C a las 15:40h). Después se escoge la franja horaria de ± 1 horas del experimento y en todo ese intervalo se calcula la media de absorptividades. Esta decisión está tomada para hacer que la absorptividad represente al máximo el pavimento en su tramo de tiempo donde las condiciones climáticas son más desfavorables y hace que el pavimento se caliente más. En este caso la media de absorptividades da un valor de 0.42 y hace que se convierta en un primer valor intuitivo de absorptividad del pavimento.

3.3.1.3.3 Método inverso para cálculo de absorptividades

Finalmente, el método que devolverá el valor definitivo de absorptividad es el método inverso. Para ello, se hace uso de un modelo matemático de simulación que resuelve la caracterización de cerramientos opacos en régimen transitorio que se ha descrito en el apartado 3.1.2.

Para las simulaciones se debe caracterizar los inputs que se deben introducir en el modelo; por tanto, para los experimentos en seco son los siguientes:

- El tiempo de simulación será de 73 intervalos de 5 minutos cada uno y la temperatura inicial del pavimento el correspondiente a cada muestra a simular.

- Las propiedades serán las calculadas previamente de densidad y calor específico, mientras que la conductividad se tomará una inicial de 1.5 W/mK pero esto no será diferencial en el resultado ya que se ha realizado un estudio de sensibilidad y los se ha dado como resultado que en la situación en seco la propiedad dominante es la absorptividad (que se encuentra reflejada en la excitación superior) y no la conductividad. Así, una variación en la conductividad que se elija de ejemplo no supondrá un cambio sensible en la simulación.
- Las excitaciones del pavimento son las siguientes:
 - Como excitación inferior al estar el pavimento completamente aislado se utiliza el perfil de temperaturas del pavimento medidas experimentalmente y se impondrá un coeficiente de película de 1000 para suponer temperatura impuesta en esa superficie
 - Como excitación superior se utilizará la temperatura sol-aire a la que está sometida la superficie en cada intervalo de tiempo y el coeficiente convectivo-radiante ya calculado previamente.

$$T_{sol-aire} = \frac{h_{mixta} \cdot T_{aire} + h_{rad} \cdot T_{rad}}{h_{mixta} + h_{rad}} + \frac{\alpha_{pav} \cdot I_G}{h_{mixta} + h_{rad}} \quad (3-24)$$

Así, a través de una serie de simulaciones con diversas absorptividades se calculan las curvas de pavimentos correspondientes al período de experimentación y se comparan con los datos medidos del pavimento. En la Figura 36 se pueden ver representadas las diferentes curvas de absorptividades simuladas y los datos medidos del pavimento en cuestión.

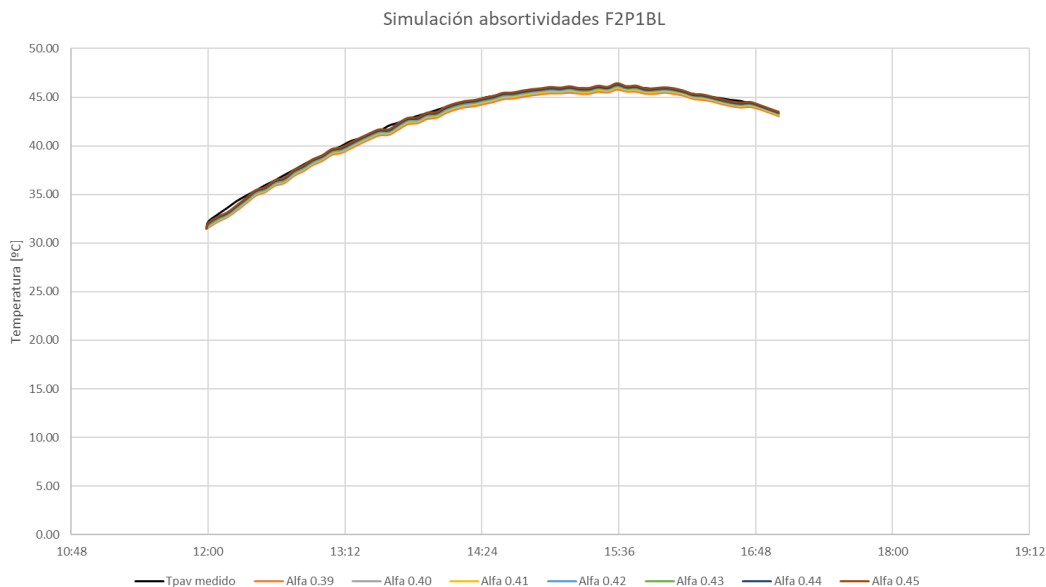


Figura 36. Simulaciones en seco pavimento F2P1BL para varias absorptividades. Fuente: Elaboración propia.

Cuando tenemos los valores tanto simulados como medidos, se pasa a la representación de cada pareja de valores en una nube de puntos. Así, se busca que la curva sea lo más parecida a una recta de 45° (correspondería a la perfecta concordancia entre simulación y medida). En la Figura 37 se puede encontrar dicha nube de puntos y la recta de 45° a modo de referencia.

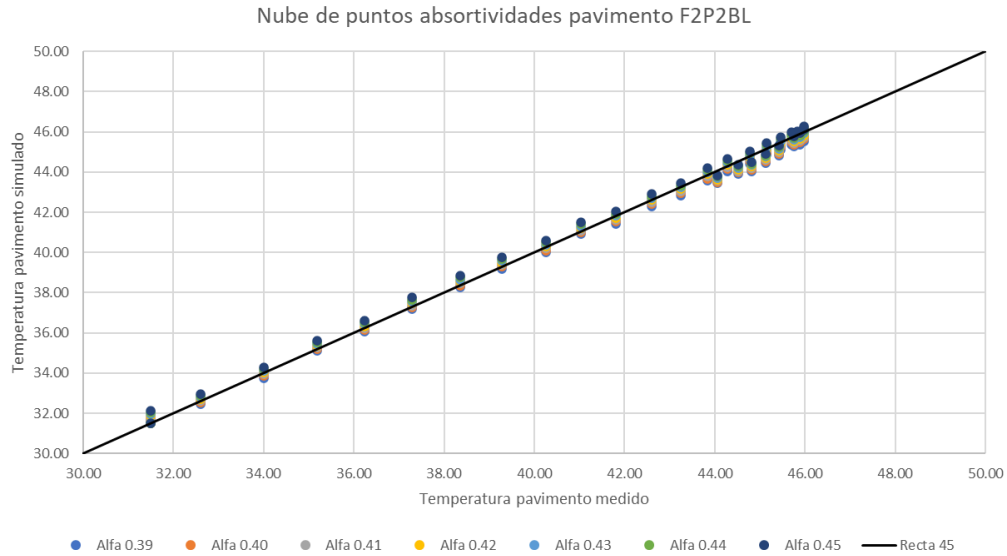


Figura 37. Nube de puntos de simulaciones en seco para varias absorptividades pavimento F2P1BL. Fuente: Elaboración propia.

Para la elección de la absorptividad que mejor ajusta a la curva de datos medidos se calcula una recta de regresión de tipo $Y=aX$ (con el término $b=0$) y se elige el valor de absorptividad que obtenga un valor de coeficiente a de 1 con un rango del orden de ± 0.0001 .

Absorptividad	Coef a	Coef b	R2
0.41	0.9919504	0	0.99998142
0.42	0.9940705	0	0.99997983
0.43	0.9961906	0	0.99997792
0.44	0.9983107	0	0.99997571
0.45	1.0004308	0	0.99997318
0.46	1.0025509	0	0.99997036
0.47	1.0046710	0	0.99996723

Tabla 10. Resultados de rectas de regresión para varias absorptividades en pavimento F2P1BL. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en la Tabla 10 el valor que hace que el coeficiente a sea más parecido a 1.0001 es un valor de absorptividad 0.45. Por tanto, este sería el valor seleccionado para la caracterización de este pavimento en seco.

A continuación, en la Figura 38 se expone la simulación del pavimento con su absorptividad seleccionada frente al pavimento medido.

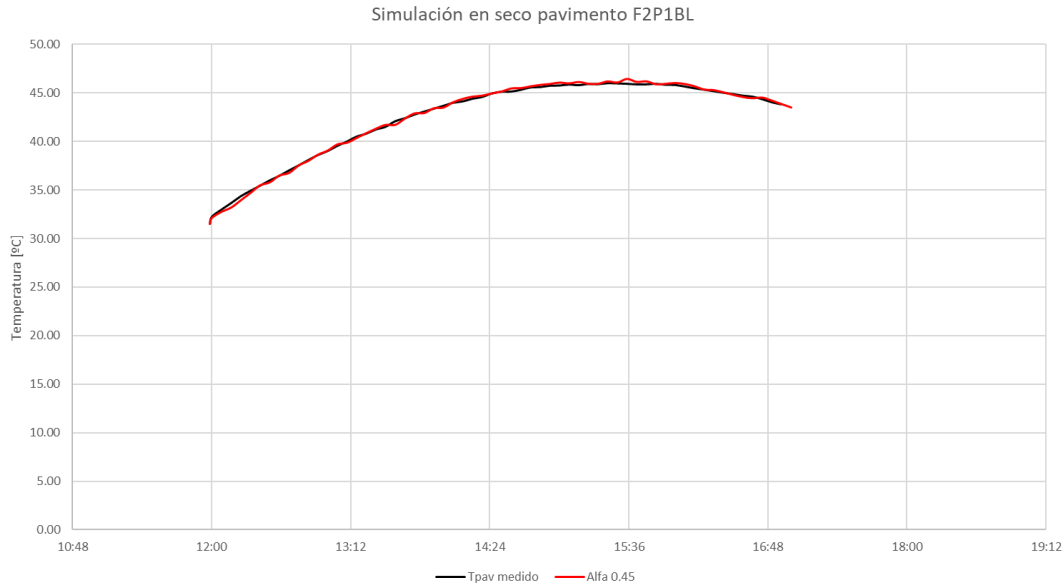


Figura 38. Simulación en seco de pavimento F2P1BL con la absorptividad elegida. Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.4 Conductividad

La conductividad térmica de los pavimentos en seco será una de las propiedades que se determinará mediante la validación del modelo de simulación en experimentos húmedos

3.3.2 Propiedades en mojado

A continuación, se pretende definir las propiedades de los pavimentos cuando se ponen en contacto con agua.

Como se expuso en puntos previos del presente trabajo, cuando el pavimento se moja el agua migra hacia los poros internos del mismo y el aire que se encontraba confinado en los poros se sustituye por agua. Por tanto, el cálculo de las propiedades en función del porcentaje de poros se calculará según las ecuaciones (3-25), (3-26) y (3-27).

$$\rho_{mojado} = \rho_{pav} + \%_{mojado} \cdot (\rho_{agua} - \rho_{aire}) \tag{3-25}$$

$$Cp_{mojado} = Cp_{pav} + \%_{mojado} \cdot (Cp_{agua} - Cp_{aire}) \tag{3-26}$$

$$k_{mojado} = k_{pav} + \%_{mojado} \cdot (k_{agua} - k_{aire}) \tag{3-27}$$

Siendo las propiedades del agua y aire las que se presentan en la tabla

Propiedades del agua		Propiedades del aire	
Densidad	1000 kg/m ³	Densidad	1.2 kg/m ³
Calor específico	4180 J/kgK	Calor específico	1012 J/kgK
Conductividad	0.6 W/mK	Conductividad	0.02 W/mK

Tabla 11. Propiedades del agua y aire para cálculo de propiedades húmedas. Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.1 Porosidad

Una vez calculados los pesos de los pavimentos mojados con el procedimiento indicado en el apartado 2.2.4, ya se tienen todas las variables para calcular la porosidad según la ecuación

$$Porosidad = 1 + \left(\frac{m_{seco} - m_{mojado}}{\rho_{agua} \cdot V_{pieza}} \right) \cdot 100 \quad (3-28)$$

3.3.2.2 Absortividad

La absortividad cuando el pavimento se encuentra en los experimentos húmedos se va a considerar que no se modifica con respecto a su propiedad en seco. La razón de esto se da porque se ha comprobado que el pavimento no presenta migración del agua hasta la superficie superior del mismo. Así, al no llegar el agua a la capa más superior, el color de la superficie no varía y, en consecuencia, la absortividad no se ve modificada.

La comprobación de esto se realiza de manera experimental comprobando de diversas maneras que, mientras los experimentos húmedos estaban en marcha, la superficie superior estaba seca. Se comprobó de manera visual y colocando una fina lámina de papel encima del pavimento, manteniéndose el papel completamente seco.

3.3.3 Validación del modelo de simulación en experimentos húmedos.

Una vez se tiene el modelo matemático, se debe realizar una validación de este para poder hacer uso de él en todas las situaciones que sean requeridas. Para ello, se tienen los datos medidos de los pavimentos como referencia. Se deben elegir las propiedades de los pavimentos que hagan entender la física del experimento y que devuelva el valor de output del modelo más parecido al comportamiento real.

Para la validación se van a realizar varias fases. La primera será el cálculo del coeficiente global de transferencia de las muestras expuesta al experimento. Posteriormente se caracterizarán las excitaciones superiores e inferiores, datos de entrada del modelo. Finalmente se pasará a la fase de simulaciones y comprobación de la validez del modelo con respecto a los datos medidos.

3.3.3.1 Caracterización de coeficiente global de transferencia

Se comienza calculando la propia conducción en la transferencia de calor en el pavimento en los experimentos húmedos cuando se pone en contacto con agua fría en su superficie inferior. La conducción se rige según la ecuación

$$CD = h_{cr} (T_{sup} - T_{sa}) \quad (3-29)$$

Así, la temperatura sol aire al suponer que la absortividad se mantiene constante e igual al pavimento en seco, es dato, el coeficiente de película convectivo radiante es el calculado a través de las placas y la temperatura superficial la medida en los sensores. La conductividad se calcula para cada intervalo de tiempo donde se realicen los experimentos.

Se dibujan los datos en una gráfica de CD vs (T_{sup}.T_{sa}) según una nube de puntos. Se conoce que la pendiente de la recta de regresión que generan esta nube de puntos es la correspondiente al coeficiente global de transferencia. En las Figura 39, Figura 40 y Figura 41 se encuentran las gráficas de las tres muestras de un mismo fabricante.

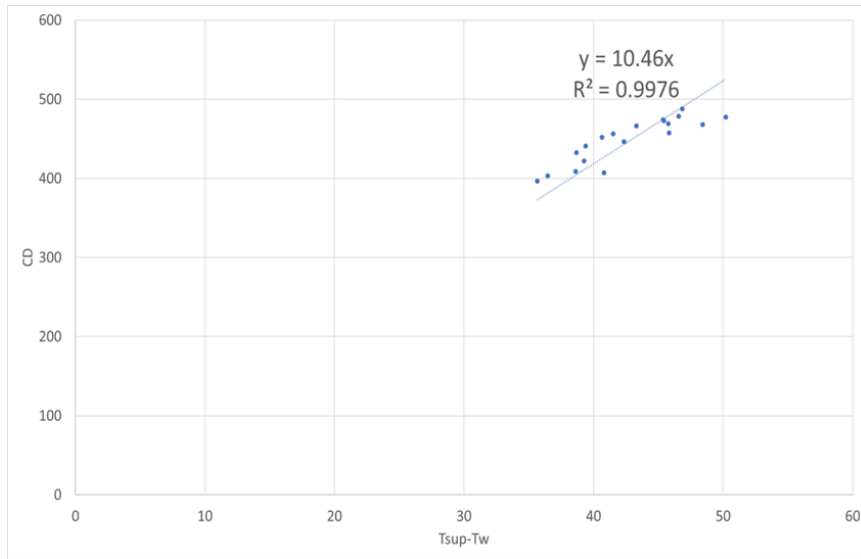


Figura 39. Nube de puntos de CD vs (Tsup-Tsa) de muestra 1. Fuente: Elaboración propia.

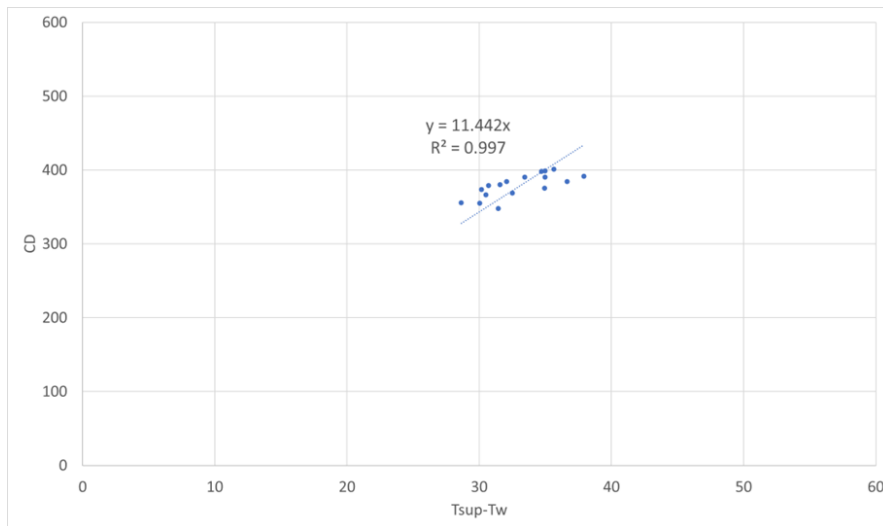


Figura 40. Nube de puntos de CD vs (Tsup-Tsa) de muestra 2. Fuente: Elaboración propia.

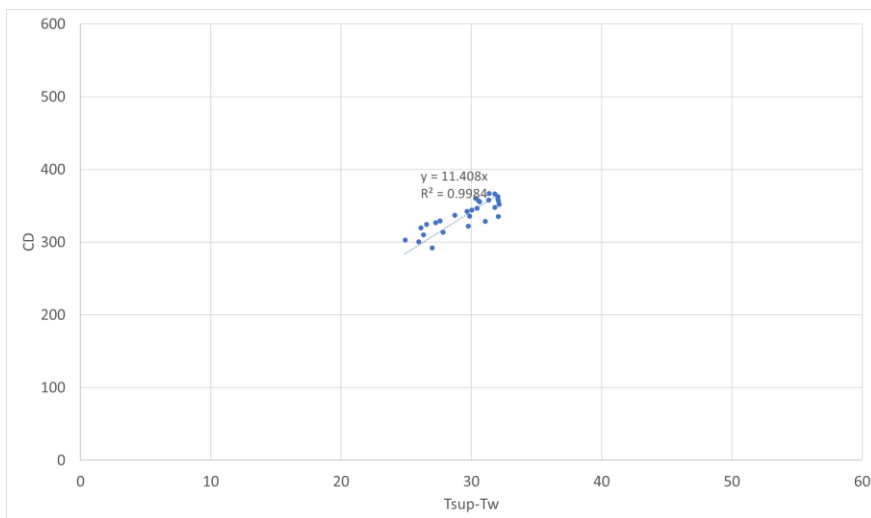


Figura 41. Nube de puntos de CD vs (Tsup-Tsa) de muestra 3. Fuente: Elaboración propia.

De las tres nubes de puntos se extrae el dato de coeficiente global de transferencia de las tres muestras. Se exponen los resultados en la Tabla 12.

Coeficiente global de transferencia [W/m ² K]	
Muestra 1	10.46
Muestra 2	11.442
Muestra 3	11.408

Tabla 12. . Coeficientes globales de transferencia en validación del modelo. Fuente: Elaboración propia.

Se comprueba que los coeficientes globales de transferencia son muy parecidos entre ellos. Este resultado es el esperable ya que al ser muestras del mismo fabricante salvo variaciones pequeñas por motivos de fabricación, las propiedades deben ser las mismas para los tres. Por esta razón, las tres muestras tienen el mismo coeficiente de transferencia para la experimentación húmeda.

3.3.3.2 Cálculo de excitaciones del modelo

En este apartado se calculan las excitaciones del modelo para poner tener definidas todas las entradas de este. Como se indicó en el apartado 3.1.2.1, las excitaciones necesarias son las de la superficies superiores e inferiores del pavimento. Las excitaciones superiores están completamente definidas mientras que de las excitaciones inferiores falta por saber el coeficiente de película agua-pavimento.

Del coeficiente de transferencia global se conoce que se rige según la ecuación (3-30).

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{cr}}\right) + \left(\frac{e}{k}\right) + \left(\frac{1}{h_w}\right)} \quad (3-30)$$

Des esta expresión se tienen dos variables desconocidas que son la conductividad térmica y el coeficiente de película agua-pavimento. Sin embargo, es conocido por literatura que la conductividad térmica se encuentra normalmente en un rango de 1 a 2 W/mK. Por esta razón, se realiza una aproximación del coeficiente de transferencia h_w suponiendo la conductividad del pavimento en ese rango.

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Conductividad (W/mK)	h (W/m ² K) U=10.46	Conductividad (W/mK)	h (W/m ² K) U=11.44	Conductividad (W/mK)	h (W/m ² K) U=11.41
1	254.1	1	-	1	-
1.2	123.4	1.2	-	1.2	-
1.4	90.27	1.4	436.2	1.4	320.7
1.6	75.13	1.6	195.3	1.6	186.9
1.8	66.46	1.8	145.8	1.8	141.1
2	60.84	2	121.3	2	118

Tabla 13. Cálculo de coeficientes de transferencia del lado del agua en función de k. Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados de la Tabla 13 se ve como en las tres muestras se tienen valores asumibles para $K=1.6$. Por tanto, después de realizar una búsqueda bibliográfica y entender que es un valor genérico de la conductividad térmica del hormigón, se toma como conductividad en seco de todas las muestras 1.6 y el coeficiente de película del lado del agua correspondiente a su muestra.

3.3.3.3 Simulaciones finales

Para la realización de las simulaciones finales se debe tener en cuenta que todas las muestras poseen las mismas propiedades. Por tanto, se toman una media entre las tres muestras para elegir las propiedades por las cuales se realizarán las simulaciones.

	U global	h cr	Espesor	Conductividad	h agua
Mínimo Muestras	10.46	15	0.025	1.6	75.1279
Máximo muestras	11.4	15	0.025	1.6	184.2424
Media	11	15	0.025	1.6	113.81

Tabla 14 Media de propiedades tomadas en simulaciones para validación dle modelo. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 14 se muestran las propiedades tomadas para las simulaciones que se expondrán posteriormente y para la validación del modelo matemático.

Además, se tiene que las excitaciones son las siguientes:

- Excitaciones superiores de la temperatura sol aire correspondiente a cada muestra y su coeficiente convectivo radiante en intervalos de 5 minutos.
- Excitaciones inferiores de la temperatura del agua medida y su coeficiente del lado del agua calculado en la Tabla 14 en intervalos de 5 minutos.

Con estos datos de entrada, las simulaciones para cada muestra quedarían en las Figura 42, Figura 43 y Figura 44

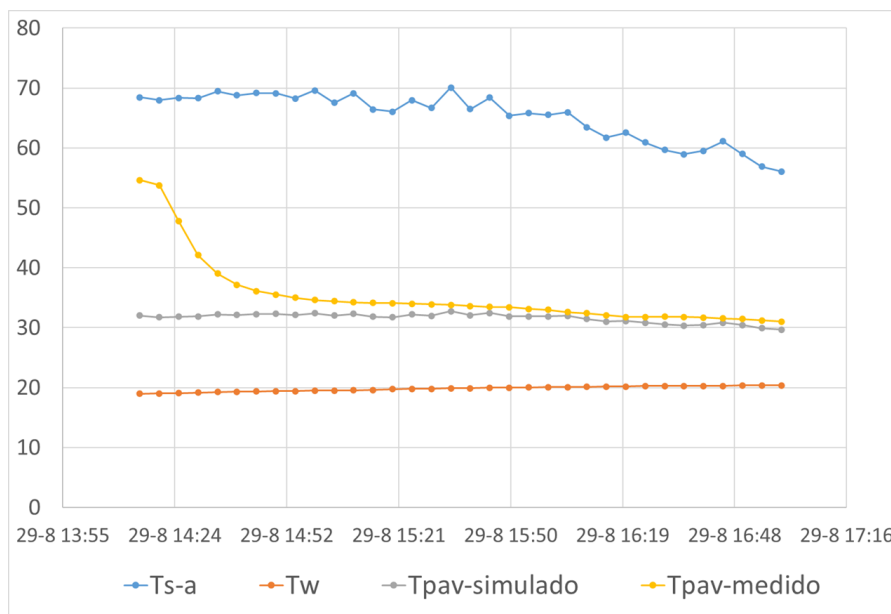


Figura 42. Resultado de simulaciones de la muestra 1. Fuente: Elaboración propia.

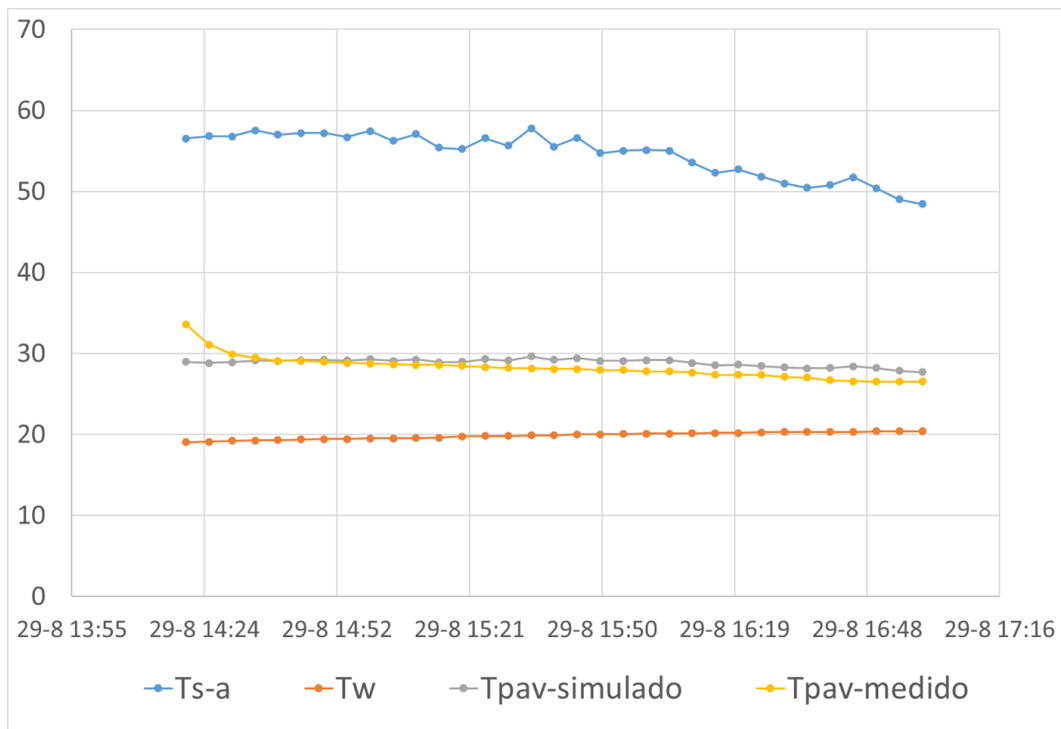


Figura 43. Resultado de simulaciones de la muestra 2. Fuente: Elaboración propia.

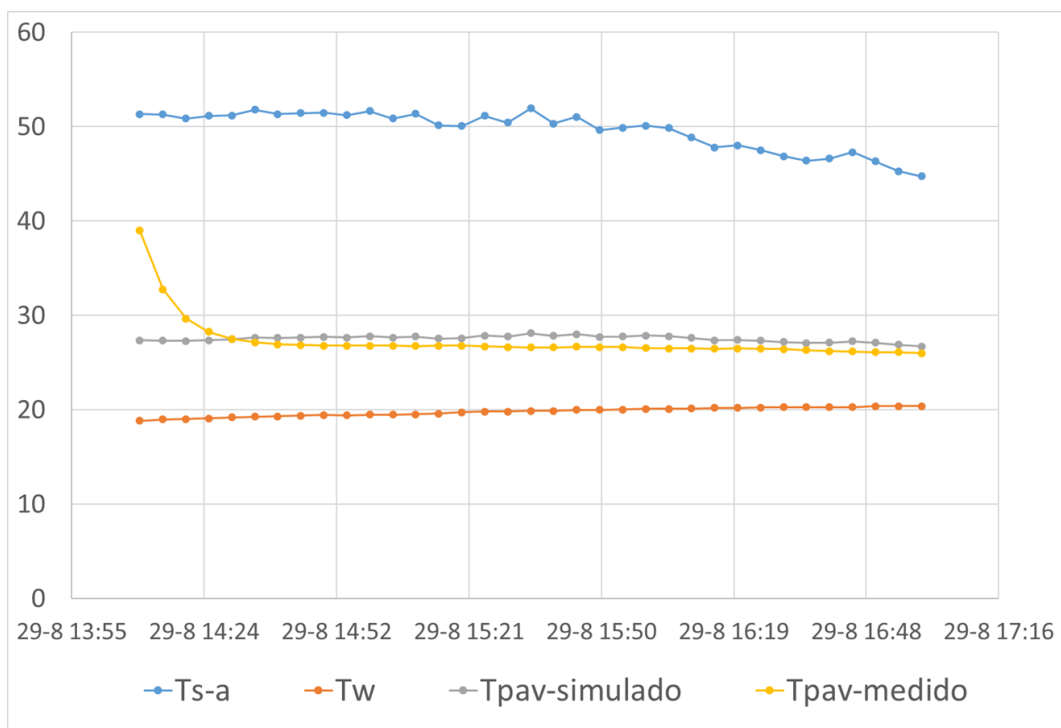


Figura 44. Resultado de simulaciones de la muestra 3. Fuente: Elaboración propia.

Se comprueba en las tres simulaciones que en el período de comienzo existe un transitorio que el modelo no calcula fielmente a la realidad. Sin embargo, una vez en el período permanente los datos simulados son muy parecidos a los medidos. Por tanto, se puede dar por válido el modelo para períodos permanentes de experimentación.

Finalmente, queda calcular el impacto que tendría considerar el efecto de propiedades húmedas comentado en el punto 3.3.2. Estas simulaciones se han tomado considerando las propiedades de los pavimentos en seco. En las Figura 45, Figura 46 y Figura 47 se calculará para la muestra 1 la simulación aumentando x2, x4 y x8 el producto de densidad por calor específico, simulando que el pavimento se encuentra cada vez más mojado.

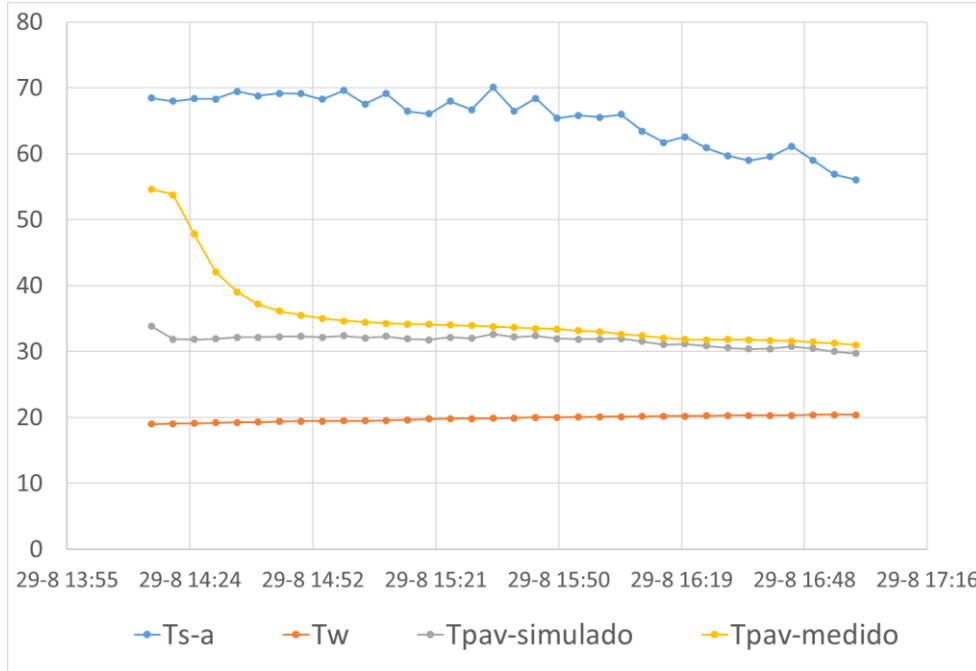


Figura 45. Simulación con producto densidad por calor específico x2. Fuente: Elaboración propia.

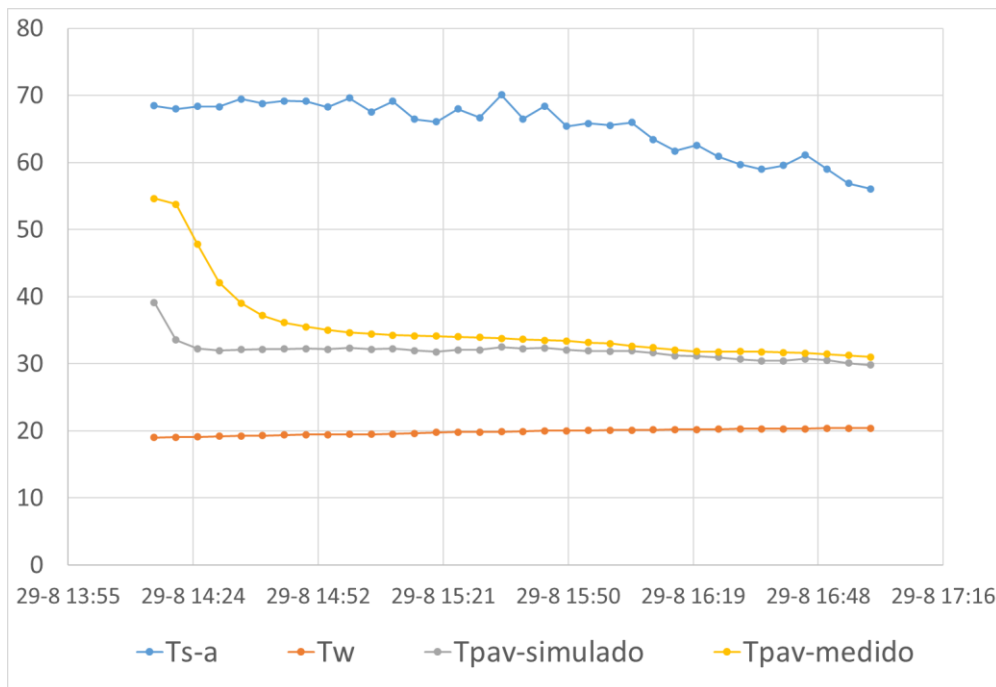


Figura 46. Simulación con producto densidad por calor específico x4. Fuente: Elaboración propia.

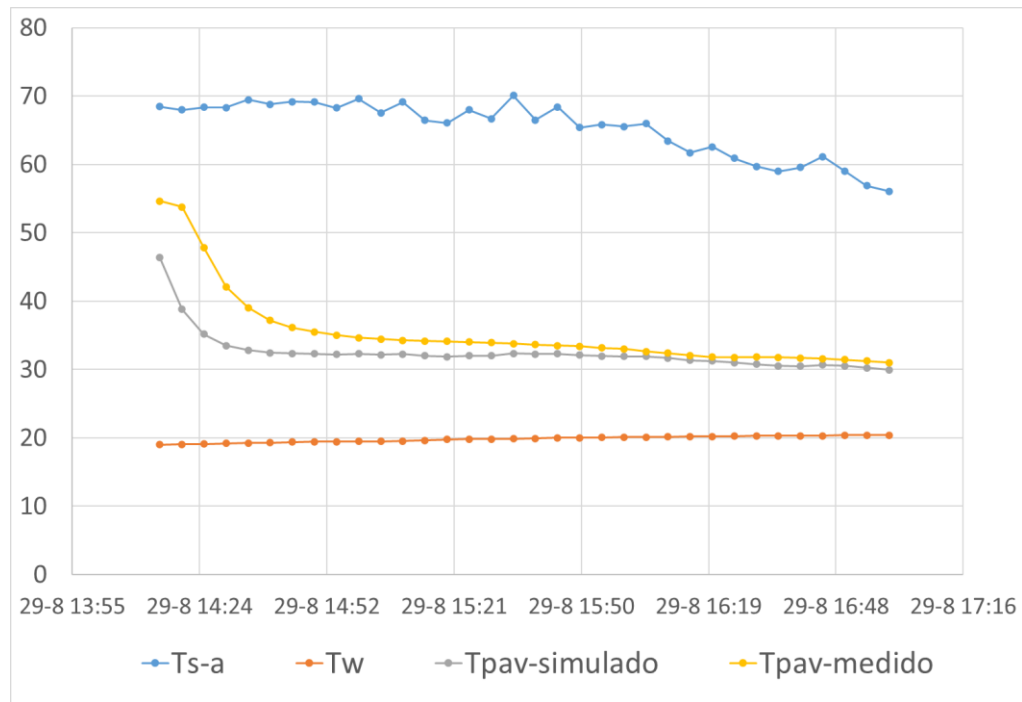


Figura 47. Simulación con producto densidad por calor específico x8. Fuente: Elaboración propia.

También se puede comprobar que variar el producto de densidad por calor específico sólo se ve influenciado en el transitorio del modelo y no en el permanente. En los tres casos el permanente se mantiene prácticamente igual y muy parecido al pavimento real medido. Por esta razón, al elegir los resultados para un permanente obviando el período transitorio de comienzo de llenado de los cubículos de metacrilato, se tomarán como valores finales los valores en seco; aunque se tendrá en cuenta para estudios y experimentaciones futuros esta variación de propiedades en mojado para afinar más los resultados.

Finalmente, se puede dar por válido el modelo matemático y se repite para cada muestra de cada fabricante. En el Anexo B se añade otra validación del modelo con un segundo fabricante que arroja los mismos resultados que el previamente presentado.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se va a exponer los resultados tanto de los datos exclusivamente experimentales como de la caracterización de propiedades definida en la sección 3. Para ello, se subdividirá en dos: la primera que representará a los datos experimentales y la segunda los datos de características de las placas y de los pavimentos tanto en seco como húmedos. Finalmente, se recopilarán todas las propiedades de cada muestra organizados por fabricante a modo de resumen.

4.1 Resultados experimentales

4.1.1 Gráficas experimentales

En este apartado se va a comenzar graficando de un día X del verano 2023 que sea despejado los resultados experimentales de las tres muestras de un fabricante como se ve en las Figura 48, Figura 49 y Figura 50.

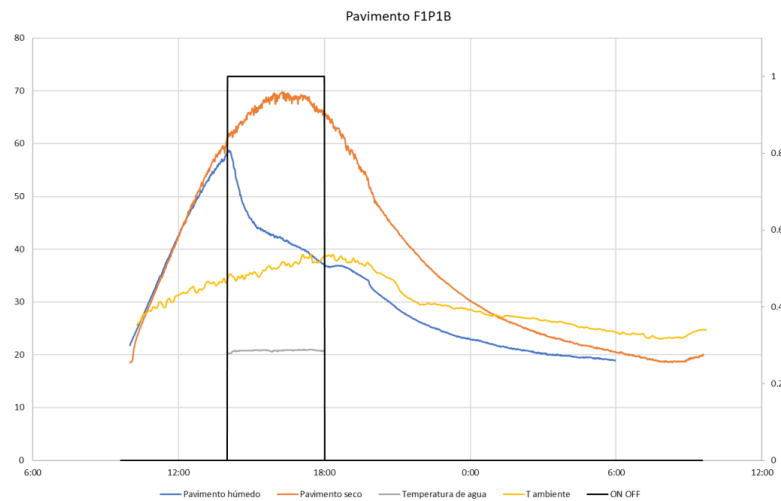


Figura 48. Resultados experimentales muestra F1P1B. Fuente: Elaboración propia.

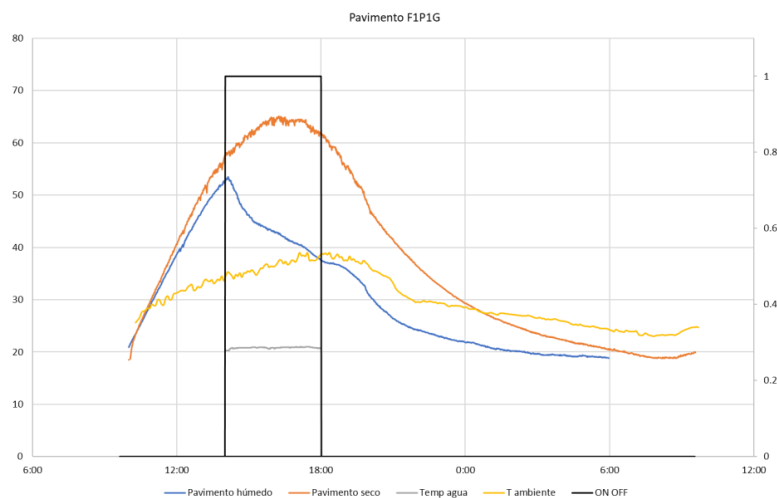


Figura 49. Resultados experimentales muestra F1P1G. Fuente: Elaboración propia.

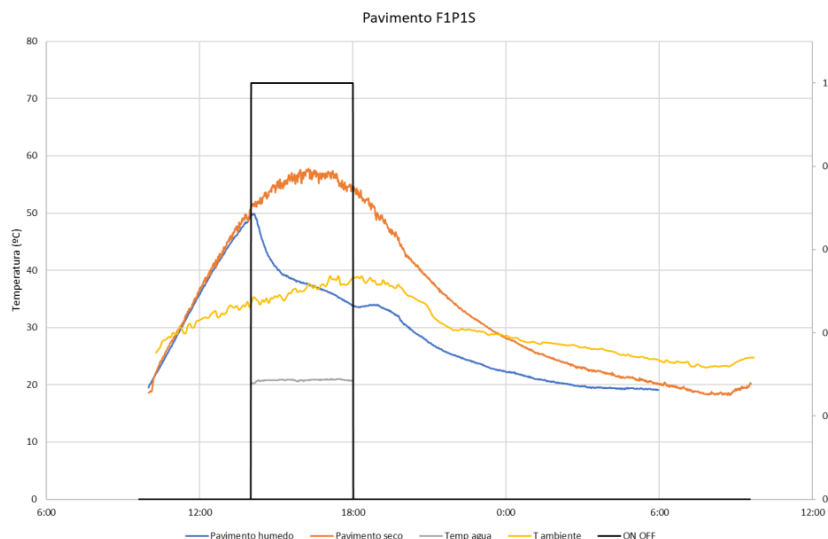


Figura 50. Resultados experimentales muestra F1P1S. Fuente: Elaboración propia.

En las gráficas las curvas son tanto de los datos medidos de cada pareja de pavimentos, la que se expone al experimento húmedo y la de en seco de referencia, la temperatura de aire exterior, la temperatura del agua de refrigeración y una curva de tipo escalón que representa el funcionamiento y no funcionamiento de la circulación de agua por el pavimento húmedo.

Se comprueba en las tres muestras que la tendencia es la misma, los pavimentos secos y húmedos siguen una trayectoria ascendente y muy parecida hasta que llegan las 14:00h y el agua comienza a circular. De manera muy veloz el pavimento húmedo reacciona al agua de refrigeración y presenta un abajada sustancial en la temperatura de la superficie superior del mismo con respecto a la referencia en seco. Además, una vez se deja de circular el agua por debajo del pavimento, los pavimentos húmedos se mantienen por debajo de la temperatura ambiente mientras que los secos no consiguen estar por debajo de la temperatura de aire exterior hasta bien entrada la noche. Estas conclusiones se calcularán de manera analítica y cuantitativa en el apartado 4.1.2.

Se añade en el Anexo C todas las gráficas experimentales de cada muestra de cada fabricante para mostrar que todas las muestras ensayadas presentan la misma tendencia y comportamiento aquí mostrada.

4.1.2 Indicadores de sobrecalentamiento y subenfriamiento

Tal y como se indicó en el apartado 2.2.5, las magnitudes que se van a utilizar para medir el comportamiento experimental de los pavimentos son los indicadores de sobrecalentamiento y subenfriamiento. Estos se calcularán tanto en el período ON como en el período OFF, obteniendo así un estudio del comportamiento de los pavimentos en las horas más críticas del día y donde más necesidad existe de esta solución climática.

Período ON 14:00-18:00h			Seco-Tamb		Húmedo-Tamb		Climatología	
Fabricante	Espesor [m]	GH (Seco-Húmedo) [°C h]	Sobrecalentamiento [°C h]	Subenfriamiento [°C h]	Sobrecalentamiento [°C h]	Subenfriamiento [°C h]	T aire media [°C]	
F1	F1B	0.07	92.62	119.70	0.00	27.26	0.19	36.52
	F1G	0.07	75.03	102.61	0.00	27.61	0.03	36.52
	F1S	0.07	65.33	74.10	0.00	11.88	3.11	36.52
F2	F2AN	0.025	87.14	86.05	0.00	7.75	8.84	33.90
	F2AR	0.025	82.37	57.52	0.00	0.11	24.95	33.90
	F2BL	0.025	69.64	40.89	0.00	0.56	29.31	33.90
F3	F3-00	0.04	83.20	85.92	0.00	9.96	7.24	31.76
	F3-88	0.04	72.11	75.66	0.00	6.56	3.00	31.45
	F3-108	0.04	65.19	69.13	0.00	9.07	5.12	33.73
F4	F4B3	0.05	93.76	89.70	0.00	5.33	9.39	29.83
	F4B2	0.05	78.27	60.10	0.00	3.31	21.49	29.83
	F4B1	0.05	79.62	54.65	0.00	0.80	25.76	29.83
F5	F5BL	0.05	64.03	76.22	0.00	14.37	2.18	34.83
	F5MF	0.05	71.14	54.44	0.00	1.09	17.79	34.83
	F5WH	0.05	61.32	49.43	0.00	2.28	14.17	34.83

Figura 51. Indicadores de sobrecalentamiento y subenfriamiento de pavimentos en período ON. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 51 se ven representados los indicadores de sobrecalentamiento y subenfriamiento de los pavimentos en el período ON correspondiente a las horas donde se circula el agua por debajo del pavimento. Se presentan los datos tanto del pavimento de referencia en seco como del pavimento en el experimento mojado. Los resultados son bastante prometedores ya que se ve a simple vista que en el caso del seco el indicador de sobrecalentamiento es muy alto mientras que el de subenfriamiento es nulo; sin embargo, en el caso del experimento que es caso de estudio de este trabajo, el indicador de sobrecalentamiento se reduce drásticamente. Además, en todos los casos en mayor o menor medida no sólo se reduce el sobrecalentamiento, sino que el indicador de subenfriamiento se hace positivo consiguiendo así un pavimento que se encuentra por debajo de la temperatura ambiente convirtiéndose en un pavimento frío.

Además, se comprueba que un parámetro decisivo para el efecto térmico del pavimento es su espesor. A menor espesor más es la relevancia del experimento húmedo y más se nota en los indicadores de subenfriamiento.

Fabricante		Espesor [m]	GH (Seco-Húmedo) [°C h]	Seco-Tamb		Húmedo-Tamb		Climatología
				Sobrecalentamiento [°C h]	Subenfriamiento [°C h]	Sobrecalentamiento [°C h]	Subenfriamiento [°C h]	T aire media [°C]
F1	F1B	0.07	77.43	65.26	0.00	0.00	12.16	35.28
	F1G	0.07	71.81	54.55	0.00	0.00	17.26	35.28
	F1S	0.07	55.76	35.42	0.00	0.00	20.34	35.28
F2	F2AN	0.025	32.48	11.66	7.25	0.00	28.07	31.07
	F2AR	0.025	30.42	4.10	9.39	0.00	35.71	31.07
	F2BL	0.025	24.84	3.20	8.92	0.00	30.56	31.07
F3	F3-00	0.04	41.26	15.56	2.81	0.00	28.50	29.46
	F3-88	0.04	39.69	28.78	0.00	0.00	10.91	29.73
	F3-108	0.04	39.50	24.21	0.17	0.00	15.47	32.17
F4	F4B3	0.05	50.30	28.21	0.01	0.00	22.10	28.81
	F4B2	0.05	41.35	14.27	0.93	0.00	28.00	28.81
	F4B1	0.05	41.83	14.49	0.39	0.00	27.73	28.81
F5	F5BL	0.05	50.13	22.34	0.45	0.00	28.23	31.01
	F5MF	0.05	44.42	9.97	3.22	0.00	37.67	31.01
	F5WH	0.05	41.70	11.02	1.75	0.00	32.43	31.01

Figura 52. Indicadores de sobrecalentamiento y subenfriamiento de pavimentos en período OFF. Fuente: Elaboración propia.

En este caso en la Figura 52 se representan los indicadores de sobrecalentamiento y subenfriamiento en el período OFF correspondiente a las horas posteriores a apagar la circulación de agua del pavimento. Se puede comprobar que, además de los resultados tan prometedores del período ON, la inercia térmica del pavimento al haber sido mojado de 14:00h a 18:00h convierte el pavimento en un pavimento frío en el resto del período. Así, en el caso de referencia el pavimento seco sigue siendo un elemento que crea discomfort térmico, mientras que en el caso del húmedo el pavimento no sólo deja de ser un arma climática, sino que se puede utilizar como herramienta para combatir las adversidades climáticas.

4.2 Resultados de caracterización térmica

4.2.1 Resultados de placas metálicas

Con respecto a las placas metálicas la única propiedad relevante que se va a exponer su resultado es la absorptividad tanto de la placa negra como de la placa blanca. La temperatura de cielo y los coeficientes de película no se expondrán ya que son variables calculadas en cada intervalo de tiempo estudiado y que se usan para calcular las demás propiedades de esta sección.

4.2.1.1 Absortividad (albedo)

La absorptividad y, en consecuencia, el albedo (el complementario), de las placas se encuentran en la Tabla 15.

Placa	Absortividad	Albedo
Blanca	0.24	0.76
Negra	0.96	0.04

Tabla 15. Resultados de absortividades de placas negra y blanca. Fuente: Elaboración propia.

Estas absortividades funcionan como condiciones de contorno de las absortividades que se van a estudiar. La placa negra con un valor de 0.96 corresponde al límite superior mientras que la placa blanca con un valor de 0.24 corresponde al límite inferior de absortividades posibles de los pavimentos estudiados.

4.2.2 Resultados de pavimentos

4.2.2.1 Propiedades secas

4.2.2.1.1 Densidad y calor específico

En la Tabla 16 se presentan los resultados de densidad y calor específico para los pavimentos en su estado seco según cada fabricante con su código correspondiente.

Fabricante	Espesor [m]	Densidad [kg/m ³]	Calor específico [J/kgK]	
F1B	0.07	2239.58	1094.75	
F1	F1G	0.07	2263.39	1080.29
	F1S	0.07	2264.88	1072.56
F2AN	0.025	1975	1255.27	
F2	F2AR	0.025	2200	1118.76
	F2BL	0.025	2037.5	1217.35
F3-00	0.04	2138.02	1156.36	
F3	F3-88	0.04	2268.23	1077.36
	F3-108	0.04	2348.96	1028.28
F4B3	0.05	2300	1058.09	
F4	F4B2	0.05	2293.75	1061.88
	F4B1	0.05	2268.75	1077.05
F5BL	0.05	2333.33	1037.86	
F5	F5MF	0.05	2233.33	1098.53
	F5WH	0.05	2304.17	1055.56

Tabla 16. Resultados de densidades y calor específico de pavimento en seco. Fuente: Elaboración propia.

Se comprueba que las densidades de cada muestra se encuentran en un rango muy parecido. Esto es un resultado esperable ya que los pavimentos de hormigón de uso comercial deben cumplir una serie de normativas y todos se encuentran en una horquilla de densidades parecidas. En consecuencia, como el calor específico se ha calculado a raíz de la densidad, también poseen la misma relación entre ellos.

4.2.2.1.2 Absortividad (albedo)

En la Tabla 17 se presentan los resultados de absortividades y albedo de los pavimentos estudiados en seco.

	Fabricante	Espesor [m]	Absortividad	Albedo
	F1B	0.07	0.8	0.2
F1	F1G	0.07	0.76	0.24
	F1S	0.07	0.56	0.44
	F2AN	0.025	0.79	0.21
F2	F2AR	0.025	0.56	0.44
	F2BL	0.025	0.45	0.55
	F3-00	0.04	0.67	0.33
F3	F3-88	0.04	0.51	0.49
	F3-108	0.04	0.47	0.53
	F4B3	0.05	0.6	0.4
F4	F4B2	0.05	0.42	0.58
	F4B1	0.05	0.39	0.61
	F5BL	0.05	0.64	0.36
F5	F5MF	0.05	0.46	0.54
	F5WH	0.05	0.41	0.59

Tabla 17. Resultados de absortividad y albedo de pavimentos en estado seco. Fuente: Elaboración propia.

Se puede ver en los resultados obtenidos como cada fabricante ha proporcionado muestras de colores muy diversos por tanto hacer una comparativa entre ellas no es muy útil. Sin embargo, entre muestras de fabricantes sí que se comprueba que ha proporcionado tres tonalidades distintas en mayor o menor grado de diferencia entre ellos.

4.2.2.1.3 Conductividad térmica

Se toma el valor de literatura de conductividad igual a 1.6 W/mK ya que se ha validado este en la validación del modelo presentada en el apartado 3.3.3.

4.2.2.2 Propiedades húmedas

4.2.2.2.1 Porosidad

En este apartado se va a presentar los resultados de la porosidad de las muestras estudiadas tanto si se mojan en el 50% de su volumen como si se inmergen al completo en agua. Para cada fabricante se va a exponer dos tablas: la primera será de los pesos de las muestras antes de mojar, mojadas al 50% y mojadas al 100%, la segunda será el porcentaje de poros calculado a partir de esos pesos.

- Fabricante 1

	Peso seco [kg]	Peso 50% [kg]
F1B	6.150	6.200
F1G	6.050	6.300
F1S	6.350	6.400

Tabla 18. Pesos de muestras de fabricante 1 al hacer el pesado en mojado. Fuente: Elaboración propia.

	Porosidad 50% [%]	Porosidad 100% [%]
F1B	2.79	2.79
F1G	9.93	9.93
F1S	2.79	4.57

Tabla 19. Porosidad de muestras de fabricante 1 al hacer el pesado en mojado. Fuente: Elaboración propia.

- Fabricante 2

	Peso seco [kg]	Peso 50% [kg]
F2AN	2.05	2.10
F2AR	2.25	2.20
F2BL	2.05	2.10

Tabla 20. Pesos de muestras de fabricante 2 al hacer el pesado en mojado. Fuente: Elaboración propia.

	Porosidad 50% [%]	Porosidad 100% [%]
F2AN	6.00	6.00
F2AR	1.00	1.00
F2BL	6.00	6.00

Tabla 21. Porosidad de muestras de fabricante 2 al hacer el pesado en mojado. Fuente: Elaboración propia.

- Fabricantes 3

	Peso seco [kg]	Peso 50% [kg]
F3-00	4.150	4.250
F3-88	4.500	4.550
F3-108	4.450	4.500

Tabla 22. Pesos de muestras de fabricante 2 al hacer el pesado en mojado. Fuente: Elaboración propia.

	Porosidad 50% [%]	Porosidad 100% [%]
F3-00	6.00	11.00
F3-88	4.12	6.00
F3-108	4.12	6.00

Tabla 23. Porosidad de muestras de fabricante 3 al hacer el pesado en mojado. Fuente: Elaboración propia.

- Fabricante 4

	Peso seco [kg]	Peso 50% [kg]
F4B3	3.3	3.35
F4B2	3.75	3.75
F4B1	3.7	3.75

Tabla 24. Pesos de muestras de fabricante 4 al hacer el pesado en mojado. Fuente: Elaboración propia.

	Porosidad 50% [%]	Porosidad 100% [%]
F4B3	4.12	10.37
F4B2	1.00	7.25
F4B1	4.12	7.25

Tabla 25. Porosidad de muestras de fabricante 4 al hacer el pesado en mojado. Fuente: Elaboración propia.

- Fabricante 5

	Peso seco [kg]	Peso 50% [kg]
F5BL	4.850	4.900
F5MF	4.550	4.600
F5WH	4.550	4.600

Tabla 26. Pesos de muestras de fabricante 5 al hacer el pesado en mojado. Fuente: Elaboración propia.

	Porosidad 50% [%]	Porosidad 100% [%]
F5BL	3.50	6.00
F5MF	3.50	6.00
F5WH	3.50	6.00

Tabla 27. . Porosidad de muestras de fabricante 5 al hacer el pesado en mojado. Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.2.2 Absortividad (albedo)

Como se indicó en el apartado 3.3.2.2, la absortividad de los pavimentos húmedos corresponde a su propiedad en seco. Por tanto, los resultados se encuentran en la Tabla 17.

4.2.2.2.3 Densidad, calor específico y conductividad térmica.

Como se ha propuesto en la validación del modelo matemático del apartado 3.3.3. las propiedades finales elegidas en húmedo de los pavimentos serán las elegidas en la situación en seco al no tener una sensibilidad directa en las simulaciones en la zona permanente de las mismas.

4.2.3 Resumen de propiedades

En este apartado se recopilará en modo resumen las propiedades de todas las muestras de cada fabricante caracterizadas tanto por medio experimentales como por medio de las simulaciones. Cabe destacar y recordar que finalmente las propiedades en seco y húmedo se consideran coincidentes en vista de la zona permanente de las simulaciones quedando abierto a mejora futura la caracterización del transitorio afinando mejor las propiedades en húmedo.

En la Tabla 28 se presentan todos los resultados recopilados de las propiedades termofísicas de las muestras de los fabricantes estudiados.

Fabricante	Espesor [m]	Densidad [kg/m ³]	Calor específico [J/kgK]	Conductividad [J/mK]	Absortividad	
F1B	0.07	2239.58	1094.75	1.6	0.8	
F1	F1G	0.07	2263.39	1080.29	1.6	0.76
	F1S	0.07	2264.88	1072.56	1.6	0.56
F2AN	0.025	1975	1255.27	1.6	0.79	
F2	F2AR	0.025	2200	1118.76	1.6	0.56
	F2BL	0.025	2037.5	1217.35	1.6	0.45
F3-00	0.04	2138.02	1156.36	1.6	0.67	
F3	F3-88	0.04	2268.23	1077.36	1.6	0.51
	F3-108	0.04	2348.96	1028.28	1.6	0.47
F4B3	0.05	2300	1058.09	1.6	0.6	
F4	F4B2	0.05	2293.75	1061.88	1.6	0.42
	F4B1	0.05	2268.75	1077.05	1.6	0.39
F5BL	0.05	2333.33	1037.86	1.6	0.64	
F5	F5MF	0.05	2233.33	1098.53	1.6	0.46
	F5WH	0.05	2304.17	1055.56	1.6	0.41

Tabla 28. . Resumen de propiedades caracterizadas de todas las muestras estudiadas. Fuente: Elaboración propia.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEA FUTURA

5.1 Conclusiones

A modo de conclusión de este trabajo, se han realizado la prueba de concepto de una tecnología de pavimentos fríos basándose en el enfriamiento latente y no evaporativo. Para ello, se ha realizado una bancada experimental y se han medido las temperaturas de estos haciendo pasar agua por debajo de los propios pavimentos y se ha comparado frente a un pavimento en seco que sirviera de referencia. Se ha contactado mediante ANDECE una serie de fabricantes de hormigón que han proporcionado muestras de sus productos para poder ser experimentados en el verano de 2023.

Con respecto a los datos experimentales recabados se comprueba que la prueba de concepto ha sido muy satisfactoria. En todos los casos experimentados se reduce el sobrecalentamiento del pavimento hasta un 100% consiguiendo así que el pavimento en mayor o menor medida se encuentre por debajo de la temperatura ambiente. Con estos datos se puede considerar el propio pavimento como un elemento pasivo de enfriamiento y deja de ser un enemigo frente al confort térmico de los ciudadanos. Además, este efecto perdura en el día, aunque el agua deje de circular por debajo del pavimento, consiguiendo que en todas las horas de pico solar y mayor estrés térmico el pavimento reduzca considerablemente su temperatura frente al seco de referencia.

Además, se ha realizado un modelo matemático que simula el comportamiento de los pavimentos en un clima determinado. Este modelo se ha validado con respecto a los datos medidos recabados experimentalmente. Gracias a este modelo validado y calibrado se pueden simular diferentes tipos de pavimentos en entornos climáticos diversos y estudiar los hipotéticos comportamientos térmicos que pudieran tener. Finalmente, gracias a los datos experimentales y el modelo matemático se ha podido caracterizar las propiedades termofísicas de todas las muestras estudiadas y conseguir un catálogo de indicadores de sobrecalentamientos y subenfriamiento en función de estas propiedades de diferentes hormigones.

5.2 Línea futura

Los prometedores resultados de la prueba de concepto abren la puerta a numerosas líneas de investigación que podrían comenzar a raíz de este trabajo. De hecho, se abren dos líneas de investigación en función de los pavimentos a estudiar:

- Pavimentos porosos de enfriamiento sensible.

Son los pavimentos estudiados en este trabajo. Se construirían como piezas prefabricadas con un canal donde circularía el agua por debajo. Es una solución fácil de construir y de montar ya que se formarían los canales ‘‘in situ’’ en obra. Se utilizaría agua tanto de drenantes pluviales como el propio almacenamiento de un depósito.

- Pavimentos ‘‘water retaining pavements’’

Son pavimentos completamente porosos que tienen la posibilidad de captación directa de agua en épocas de invierno y enfriamiento usando esa agua recolectada en verano. En este caso el agua se haría circular completamente por dentro del hormigón poroso consiguiendo llenar todos sus poros de agua y llegando por migración a la superficie. Por tanto, el enfriamiento sí sería evaporativo y tendría consumo de agua, pero se compensa por su gran posibilidad de captación de aguas pluviales durante las épocas de lluvia frente a los pavimentos porosos anteriores. Se añade en la Figura 53 una fotografía de este tipo de pavimento.



Figura 53. Ejemplo de pavimento "water retaining". Fuente: [18]

En ambos casos la solución a implementar sería algo parecido al esquema de la Figura 54. Donde se haría circular agua por debajo o dentro del pavimento en función de la elección de este para enfriar el pavimento en épocas de gran calor mientras que en épocas lluvias se recolectaría agua para su posterior uso. Si se usan pavimentos porosos de enfriamiento latente el agua se recolectaría por medio de un alcorque mientras que si se usan "water retaining pavements" toda la superficie de pavimentos recolectaría el agua y se conseguiría un mayor volumen de agua a utilizar.

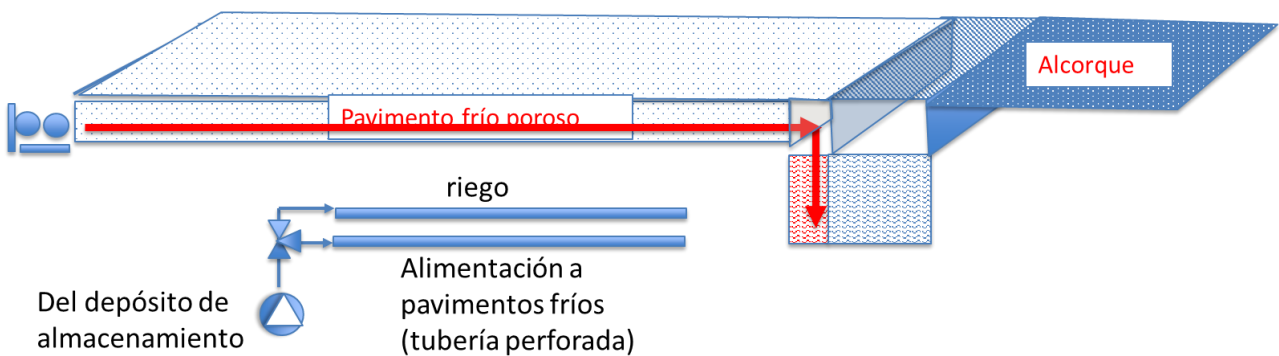


Figura 54. Esquema de implementación de pavimentos fríos. Fuente: Elaboración propia.

REFERENCIAS

- [1] Greenpeace, “Aumento de temperaturas y olas de calor.”
- [2] . Gobierno de España, “El verano de 2023 fue el tercero más cálido desde que hay registros,” 2023. [Online]. Available: www.miteco.gob.es
- [3] A. Rodríguez, “Una nueva aplicación monitoriza la mortalidad atribuida al calor en España,” *CSIC*, vol. 1, no. 6, American Chemical Society (ACS), pp. 416–419, Dec. 15, 2023. doi: 10.1021/envhealth.3c00134.
- [4] . Escuela Nacional de Sanidad, “Temperaturas umbrales de disparo de la mortalidad atribuible al calor en España en el período 2000-2009.” 2015. [Online]. Available: <http://publicaciones.isciii.es>
- [5] ADEME, “Urban cooling solutions Drawing inspiration from worldwide case studies to address variability in current and future climates,” 2021. [Online]. Available: www.carrenoir.com
- [6] T. R. Oke, G. T. Johnson, D. G. Steyn, and I. D. Watson, “Simulation of surface urban heat islands under ‘ideal’ conditions at night part 2: Diagnosis of causation,” *Boundary Layer Meteorol*, vol. 56, no. 4, pp. 339–358, 1991, doi: 10.1007/BF00119211.
- [7] C. García García, “Uso de pavimentos fríos como alternativa a la mitigación de la isla de calor urbana,” 2020.
- [8] K. Seifeddine, S. Amziane, E. Toussaint, and S. E. Ouldboukhitine, “Review on thermal behavior of cool pavements,” *Urban Climate*, vol. 51. Elsevier B.V., Sep. 01, 2023. doi: 10.1016/j.uclim.2023.101667.
- [9] T. Rahman, M. Zudhy Irawan, A. Noor Tajudin, M. Rizka Fahmi Amrozi, and I. Widyatmoko, “Knowledge mapping of cool pavement technologies for urban heat island Mitigation: A Systematic bibliometric analysis,” *Energy and Buildings*, vol. 291. Elsevier Ltd, Jul. 15, 2023. doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113133.
- [10] B. R. Anupam, U. C. Sahoo, A. K. Chandrappa, and P. Rath, “Emerging technologies in cool pavements: A review,” *Constr Build Mater*, vol. 299, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123892.
- [11] S. R. O. Aletba *et al.*, “Thermal performance of cooling strategies for asphalt pavement: A state-of-the-art review,” *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 8, no. 3. Chang’an University, pp. 356–373, Jun. 01, 2021. doi: 10.1016/j.jtte.2021.02.001.
- [12] Breinco, “Fabricante Breinco.” Accessed: Jan. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.breinco.com/es/pavimentos-de-exterior/>
- [13] UNE, “Norma UNE 1339,” 2004.
- [14] S. Jahandari, Z. Tao, M. A. Alim, and W. Li, “Integral waterproof concrete: A comprehensive review,” *Journal of Building Engineering*, vol. 78. Elsevier Ltd, Nov. 01, 2023. doi: 10.1016/j.job.2023.107718.
- [15] J. Velasco Ramón, “Análisis de la temperatura de cielo como sumidero de calor medioambiental y evaluación experimental del comportamiento energético de un sistema de disipación nocturna,” Sevilla, 2019.
- [16] G. A. Carvallo Vergara, “Modelación y construcción de un instrumento de medición de temperatura de cielo,” 2018. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11673/42664>
- [17] M. K. Howlader, M. H. Rashid, M. K. Howlader, M. H. Rashid, D. Mallick, and T. Haque, “Effects of aggregate types on thermal properties of concrete,” vol. 7, no. 7, 2012, [Online]. Available: www.arpnjournals.com

- [18] Vivienda. La revista de construcción, “Hormigones drenantes.” Accessed: Jan. 29, 2024. [Online]. Available: <http://www.revistavivienda.com.ar/actualidad/calendario/hormigones-drenantes>

ANEXO A: FOTOGRAFÍAS DE PAVIMENTOS A ENSAYAR

- Fabricante Sorigué



Figura 55. Fotografía pavimento Siena Sorigué. Fuente: Elaboración propia.



Figura 56. Fotografía pavimento Gris Sorigué. Fuente: Elaboración propia.



Figura 57. Fotografía pavimento Negro Sorigué. Fuente: Elaboración propia.

- Fabricante SAS1900

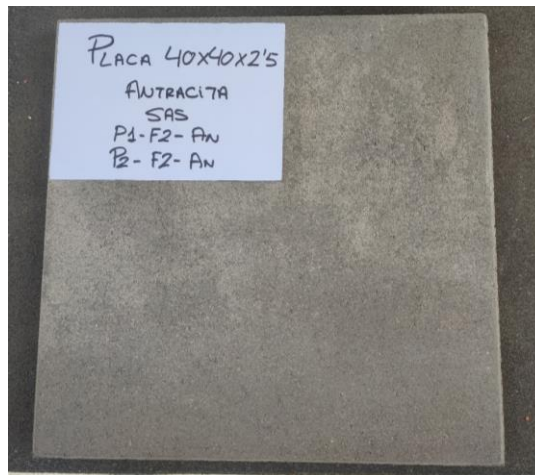


Figura 58. Fotografía pavimento Antracita SAS1900. Fuente: Elaboración propia.

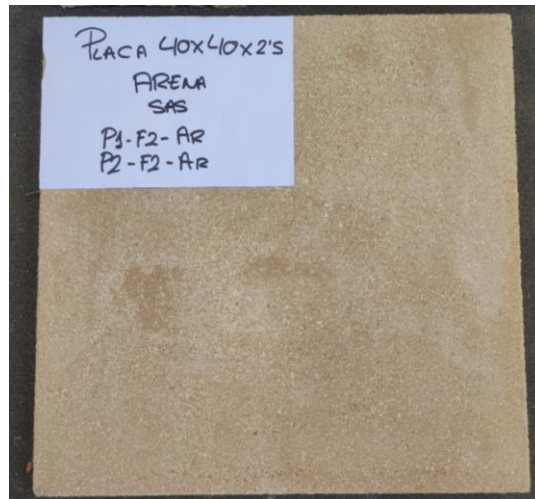


Figura 59. Fotografía pavimento Arenisca SAS1900. Fuente: Elaboración propia.

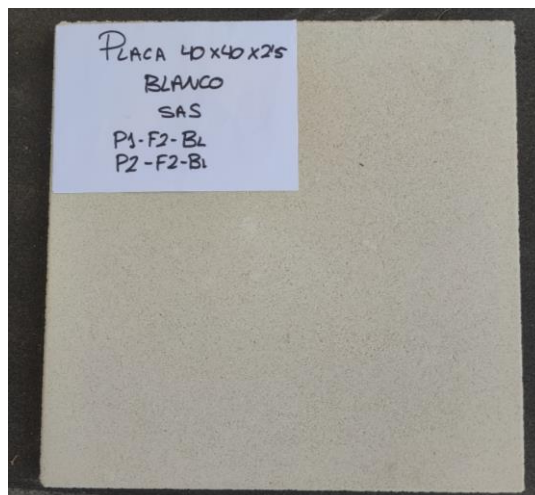


Figura 60. Fotografía pavimento Blanco SAS1900. Fuente: Elaboración propia.

- Fabricante Solana

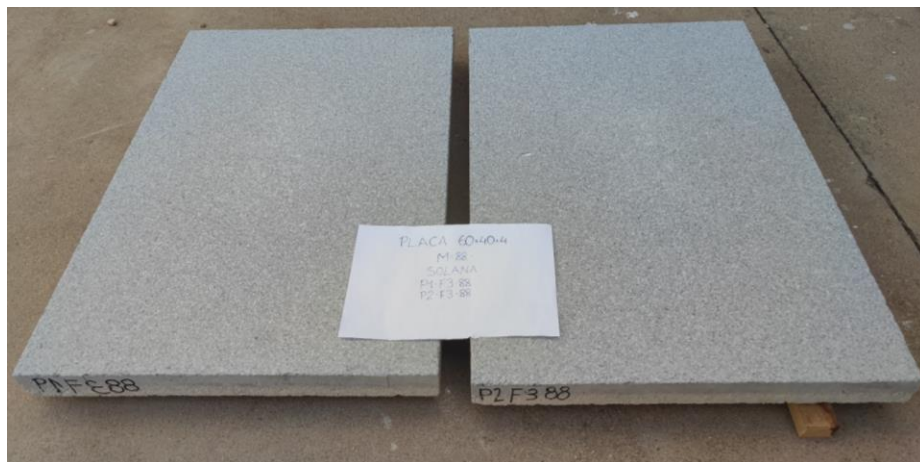


Figura 61. Fotografía pavimento M88 Solana. Fuente: Elaboración propia

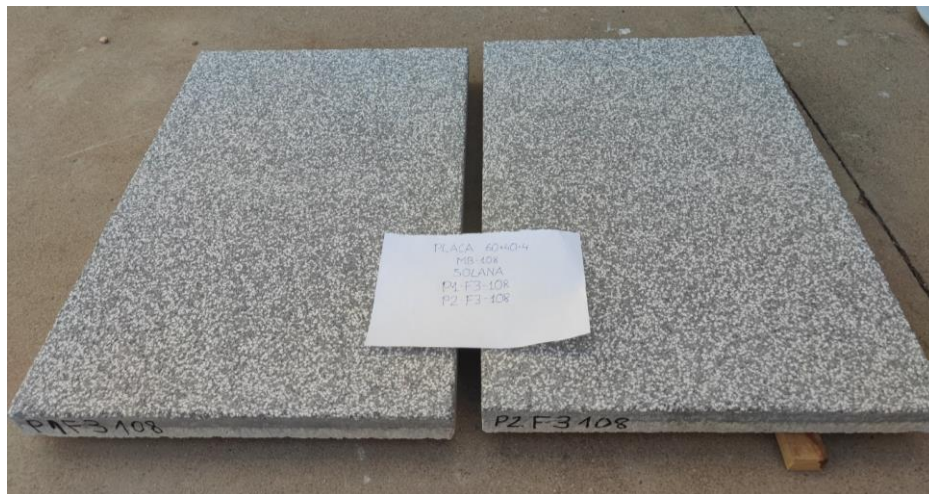


Figura 62. Fotografía pavimento MB108 Solana. Fuente: Elaboración propia



Figura 63. Fotografía pavimento M00 Solana. Fuente: Elaboración propia

- Fabricante Breinco



Figura 64. Fotografía pavimento Black Breinco. Fuente: Elaboración propia

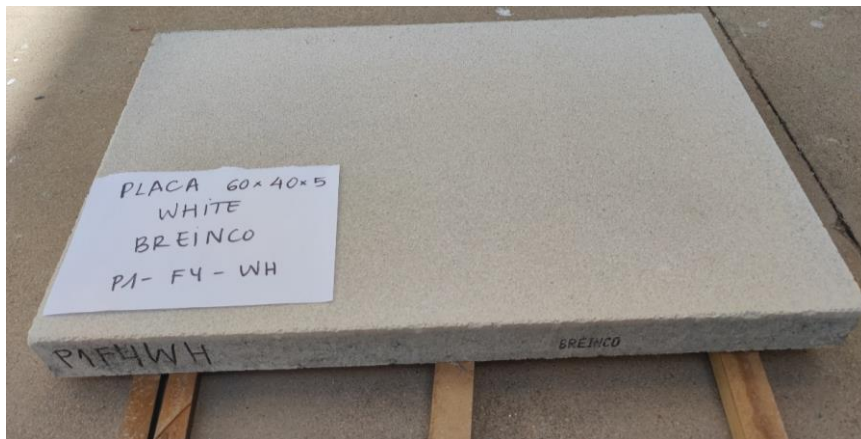


Figura 65. Fotografía pavimento White Breinco. Fuente: Elaboración propia



Figura 66. Fotografía pavimento Marfil Breinco. Fuente: Elaboración propia

- Fabricante Campo



Figura 67. Fotografía pavimento B1 Campo. Fuente: Elaboración propia



Figura 68. . Fotografía pavimento B2 Campo. Fuente: Elaboración propia



Figura 69. . Fotografía pavimento B3 Campo. Fuente: Elaboración propia

ANEXO B: VALIDACIÓN DEL MODELO CON OTRO FABRICANTE

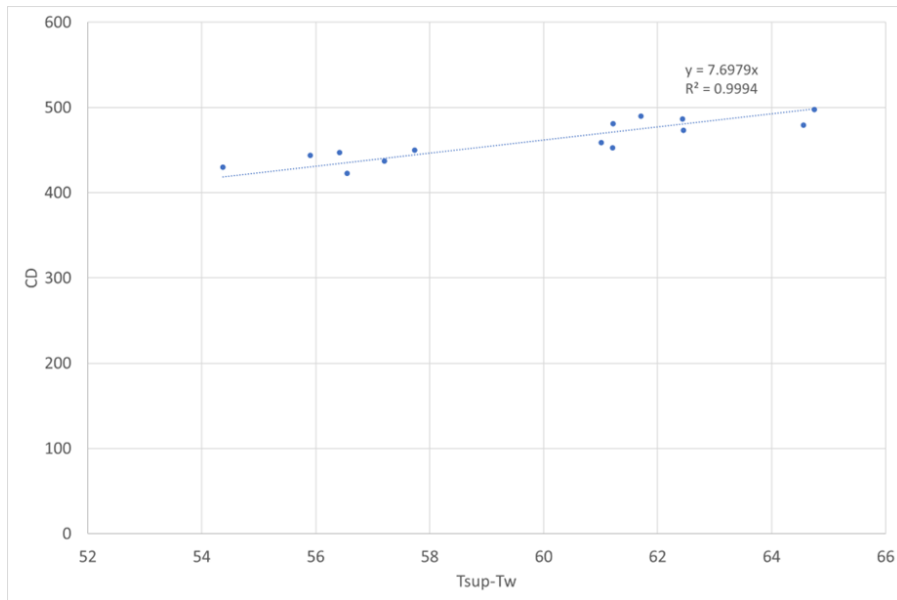


Figura 70. Nube de puntos de CD vs (Tsup-Tsa) de muestra 1 fabricante 2. Fuente: Elaboración propia

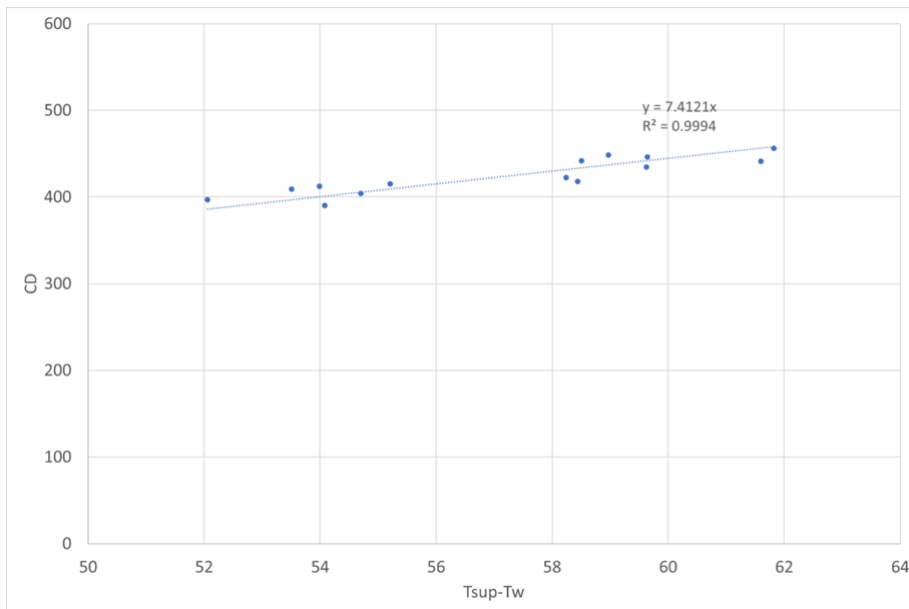


Figura 71. Nube de puntos de CD vs (Tsup-Tsa) de muestra 2 fabricante 2. Fuente: Elaboración propia

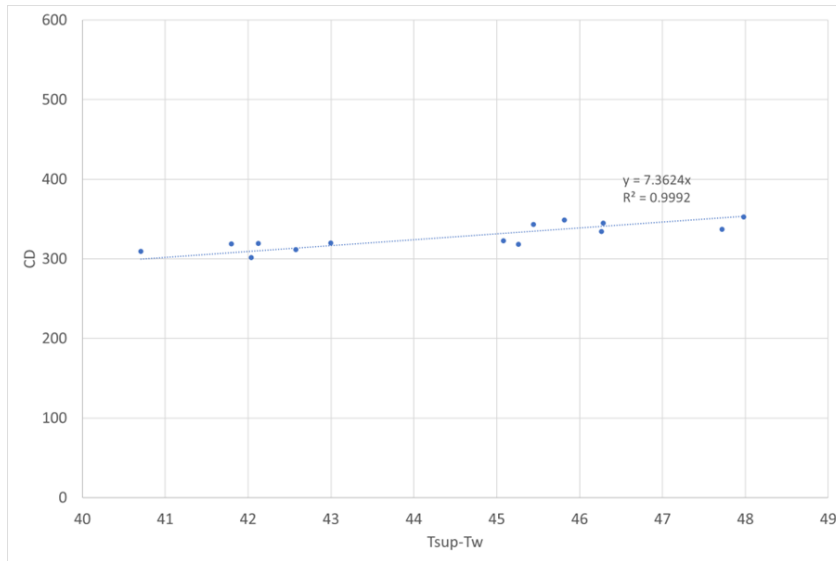


Figura 72. Nube de puntos de CD vs (Tsup-Tsa) de muestra 3 fabricante 2. Fuente: Elaboración propia.

Coeficiente global de transferencia [W/m2K]	
Muestra 1	7.6979
Muestra 2	7.4121
Muestra 3	7.3624

Tabla 29. . Coeficientes globales de transferencia en validación del modelo fabricante 2. Fuente: Elaboración propia.

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Conductividad (W/mK)	h (W/m2K) U=10.46	Conductividad (W/mK)	h (W/m2K) U=11.44	Conductividad (W/mK)	h (W/m2K) U=11.41
1	-	1	-	1	-
1.2	-	1.2	-	1.2	-
1.4	-	1.4	617.5	1.4	394.3
1.6	338.3	1.6	127.1	1.6	113.8
1.8	127.9	1.8	78.5	1.8	73.3
2	85.4	2	60.2	2	57

Tabla 30. Cálculo de coeficientes de transferencia del lado del agua en función de k fabricante 2. Fuente: Elaboración propia.

	U global	h cr	Espesor	Conductividad	h agua
Mínimo Muestras	7.36	12	0.07	1.6	113.81
Máximo muestras	7.69	12	0.07	1.6	338.33
Media	7.5	12	0.07	1.6	226

Tabla 31 Media de propiedades tomadas en simulaciones para validación del modelo fabricante 2 . Fuente: Elaboración propia.

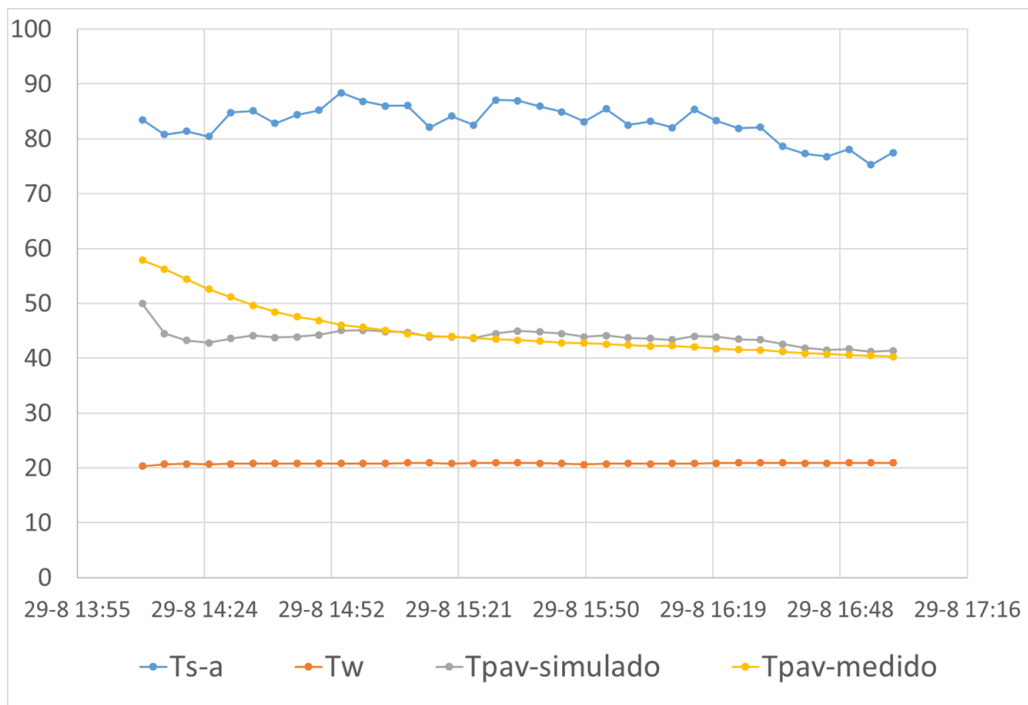


Figura 73. Resultado de simulaciones de la muestra 1 fabricante 2. Fuente: Elaboración propia.

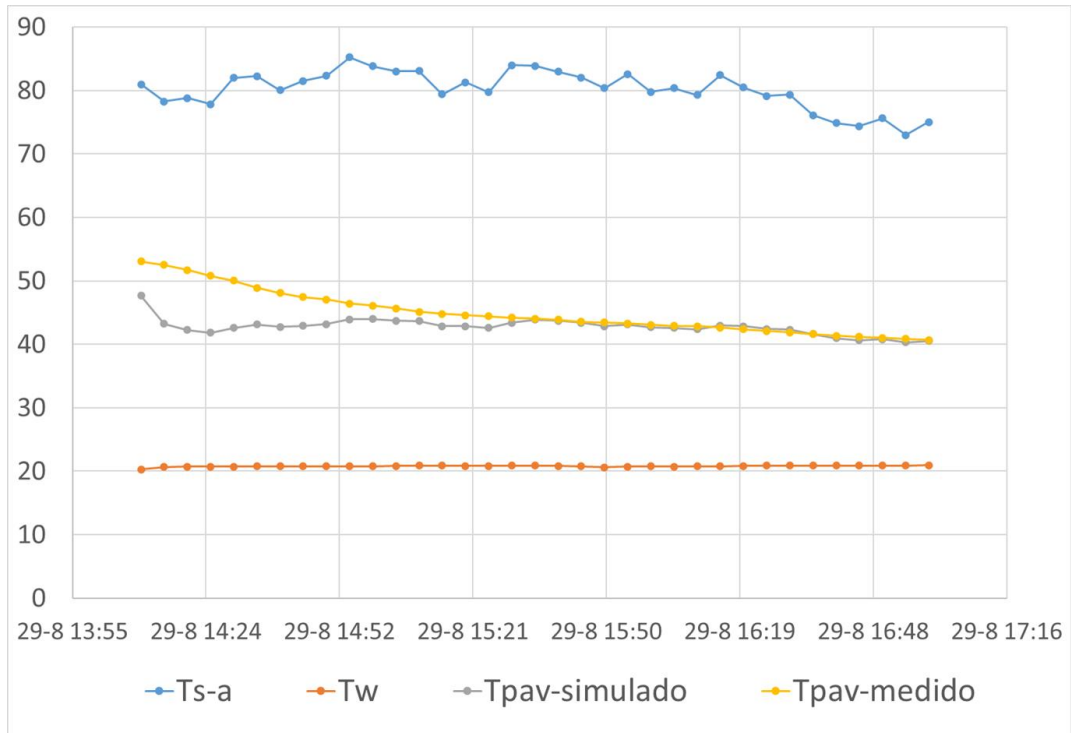


Figura 74. Resultado de simulaciones de la muestra 2 fabricante 2. Fuente: Elaboración propia.

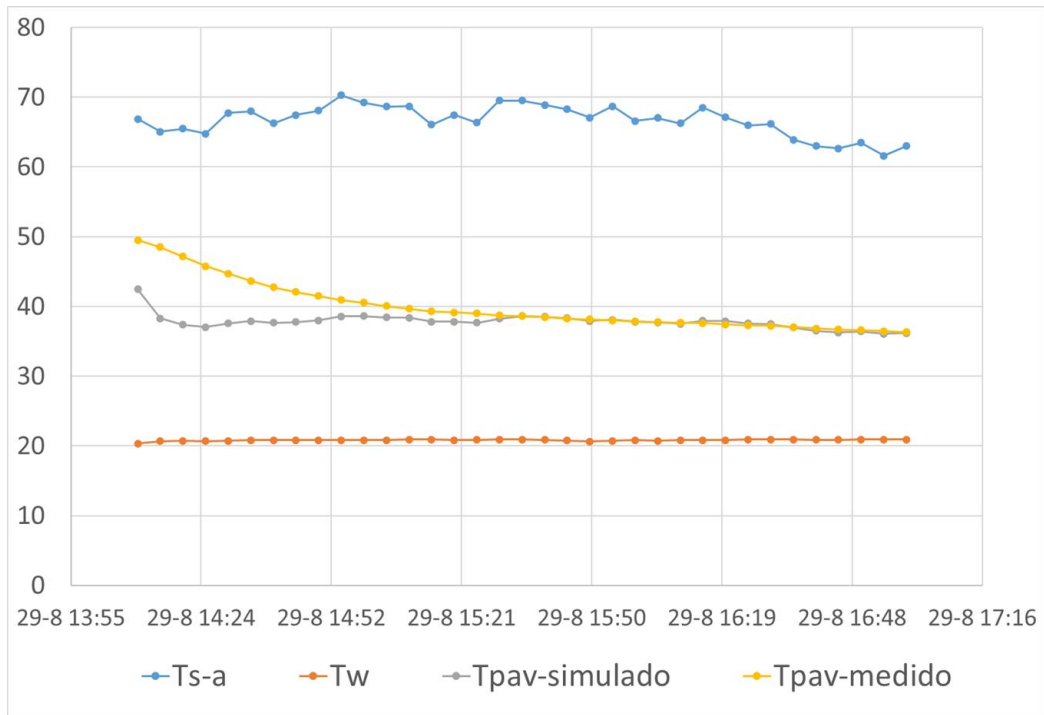


Figura 75. Resultado de simulaciones de la muestra 3 fabricante 2. Fuente: Elaboración propia.

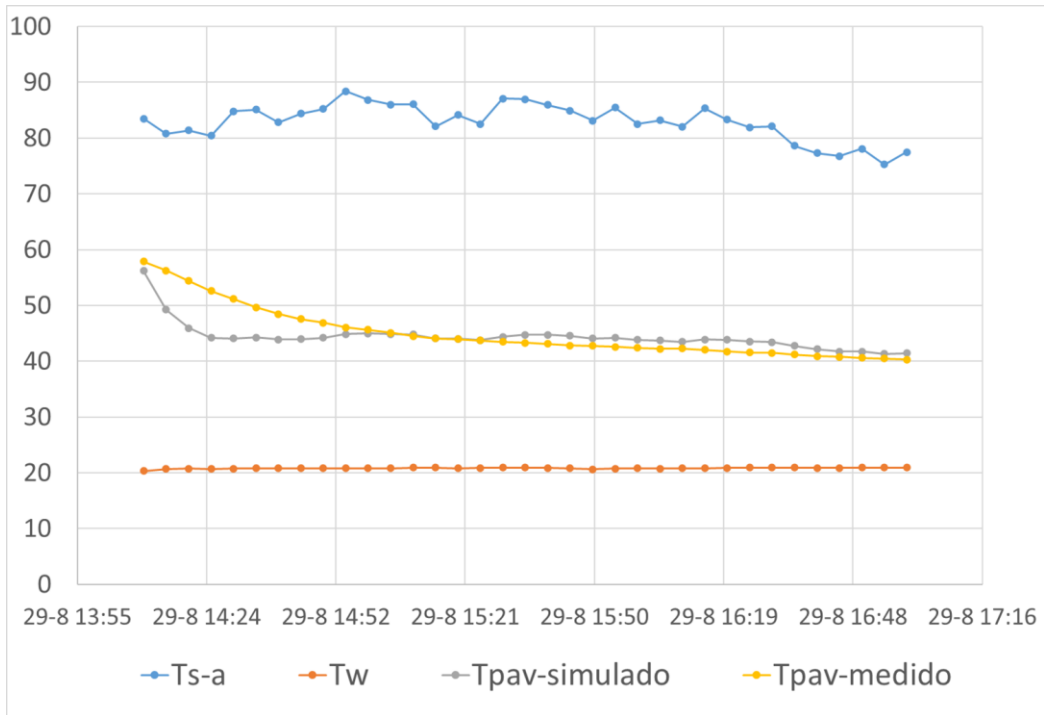


Figura 76. Simulación con producto densidad por calor específico x2 fabricante 2. Fuente: Elaboración propia.

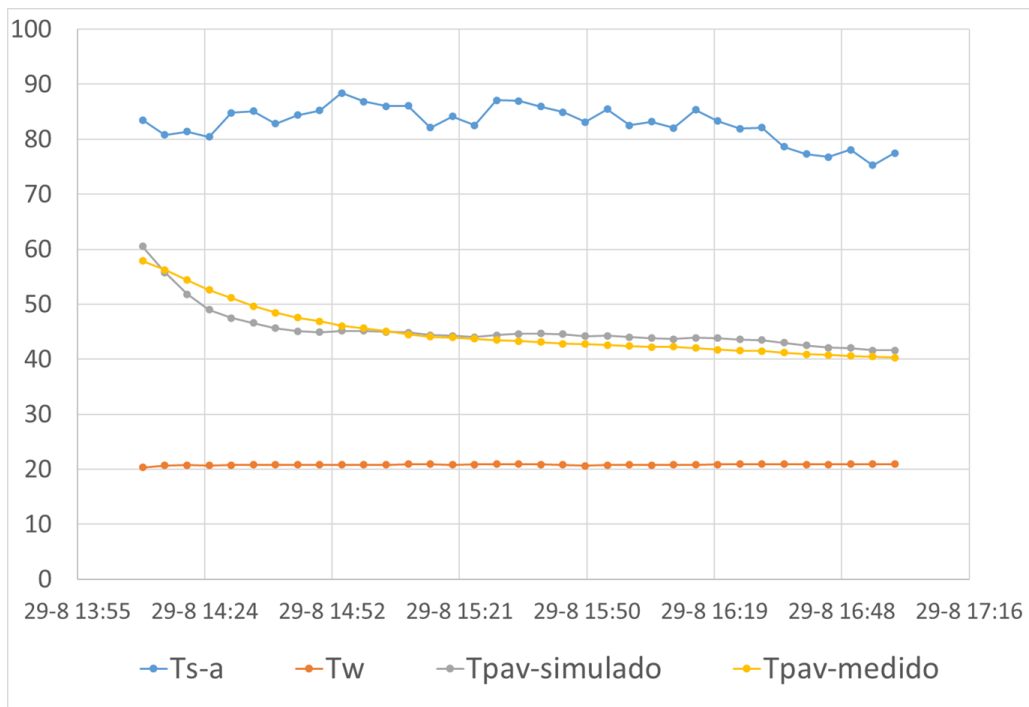


Figura 77. Simulación con producto densidad por calor específico x4 fabricante 2. Fuente: Elaboración propia.

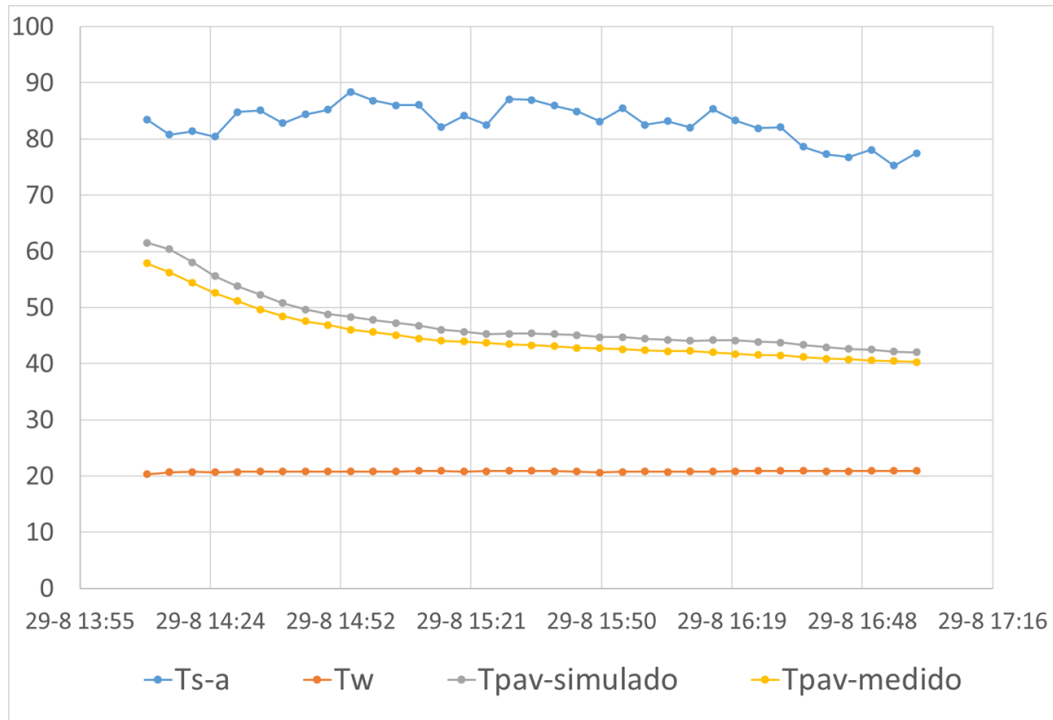


Figura 78. Simulación con producto densidad por calor específico x8 fabricante 2. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO C: RESULTADOS EXPERIMENTALES DE CADA FABRICANTE

- Fabricante 1.

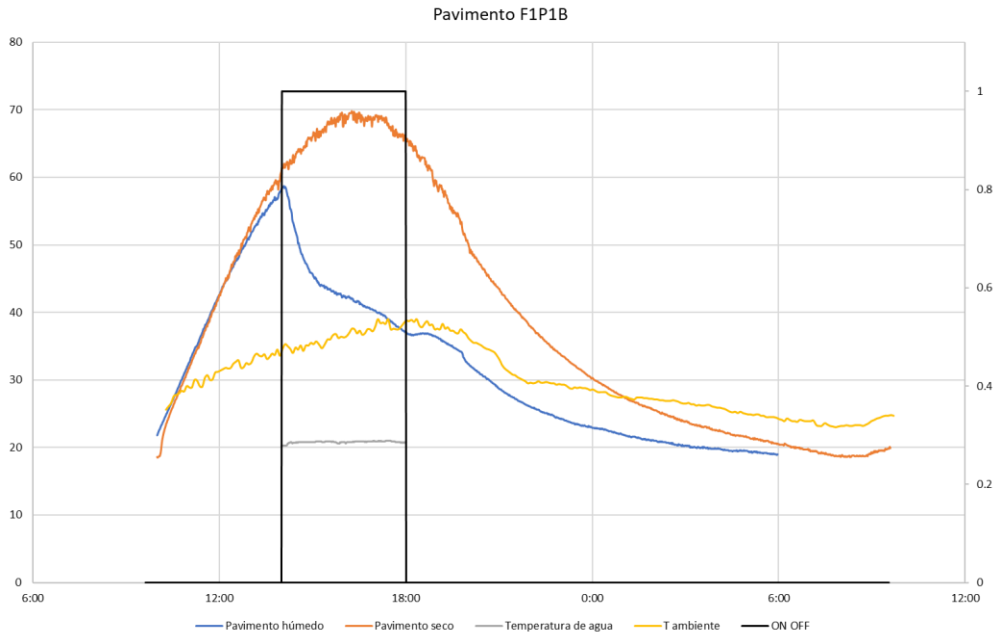


Figura 79. Gráfica experimental pavimento F1P1B. Fuente: Elaboración propia.

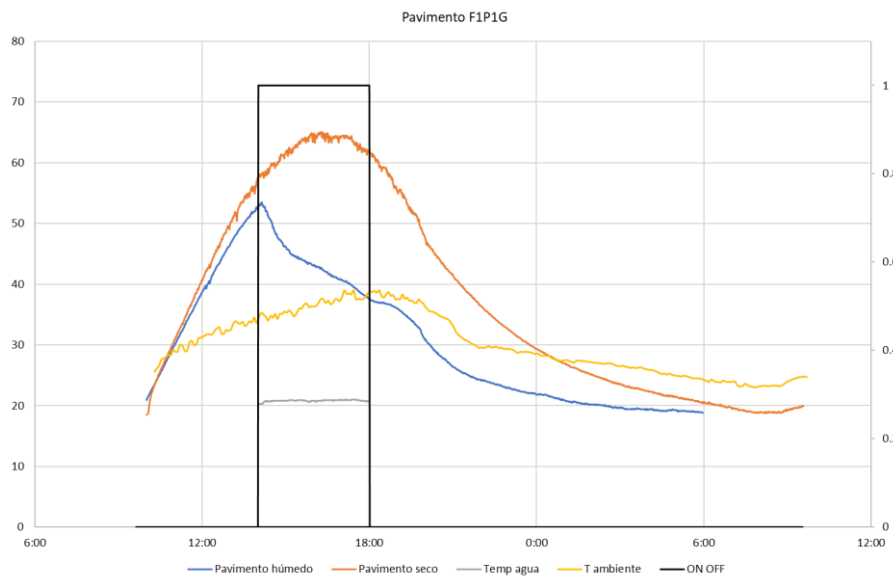


Figura 80. Gráfica experimental pavimento F1P1G. Fuente: Elaboración propia.

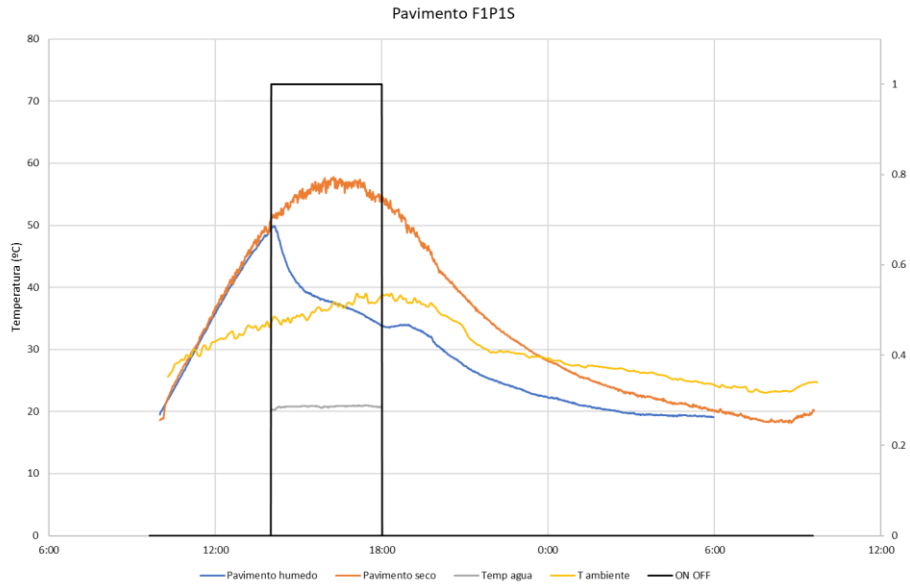


Figura 81. Gráfica experimental pavimento F1P1S. Fuente: Elaboración propia.

- Fabricante 2

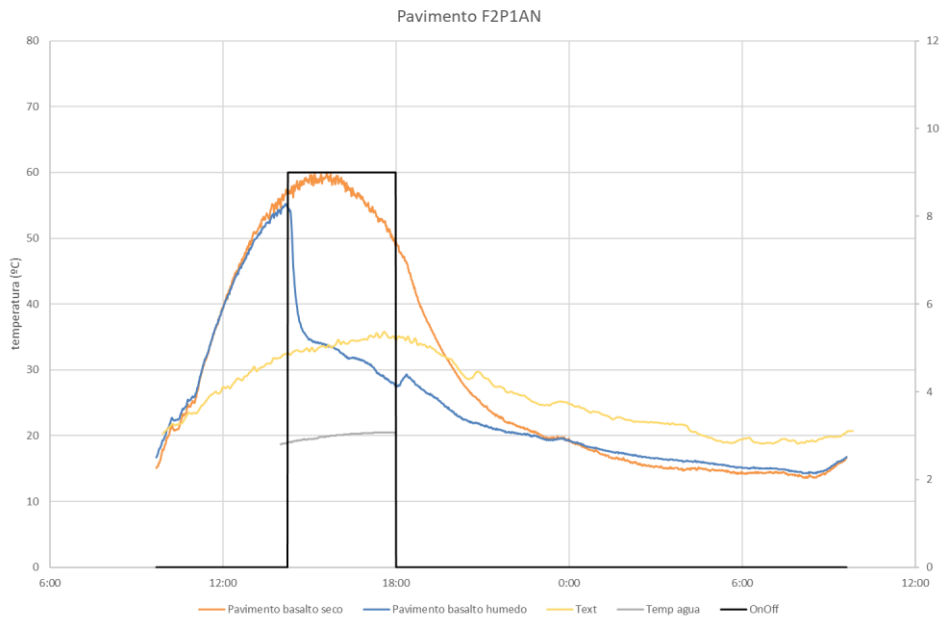


Figura 82. Gráfica experimental pavimento F2P1AN. Fuente: Elaboración propia.

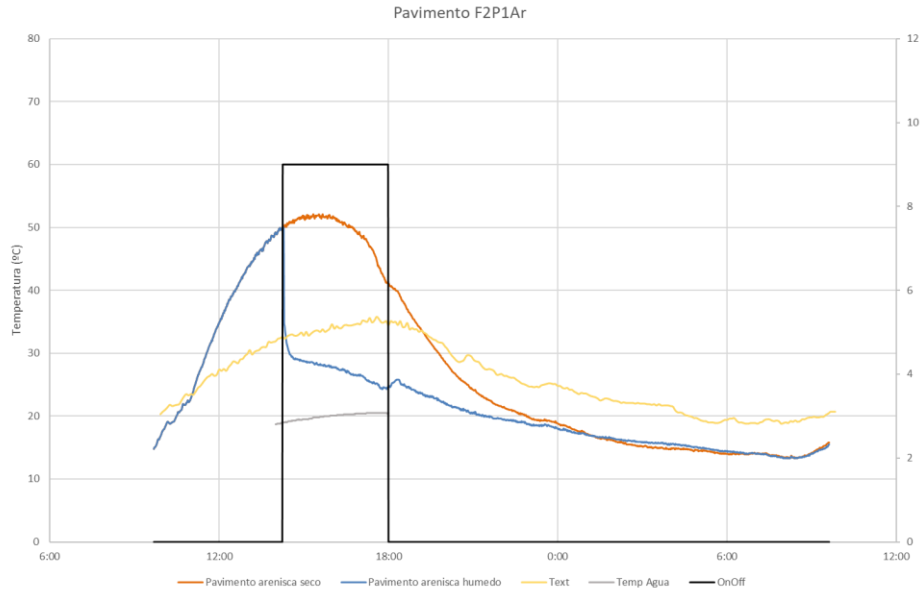


Figura 83. Gráfica experimental pavimento F2P1AR. Fuente: Elaboración propia.

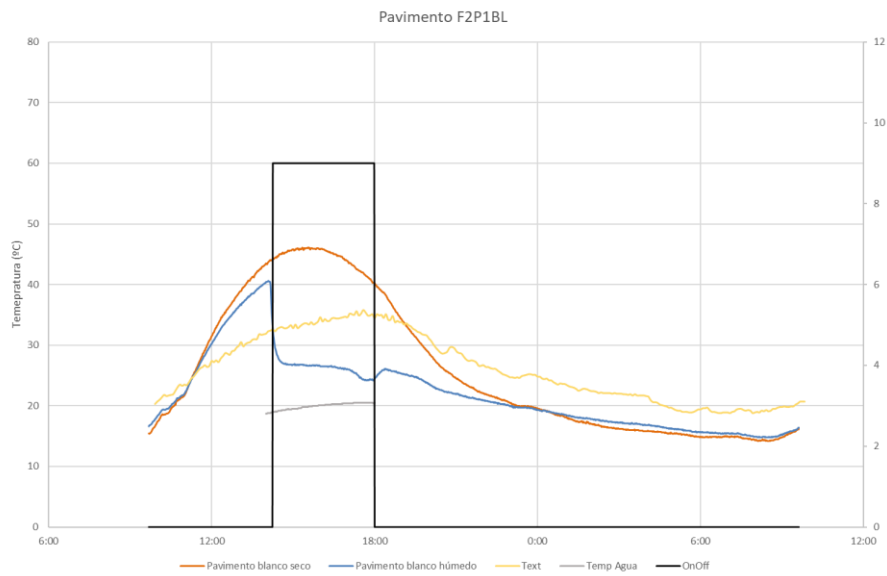


Figura 84. Gráfica experimental pavimento F2P1BL. Fuente: Elaboración propia.

- Fabricante 3

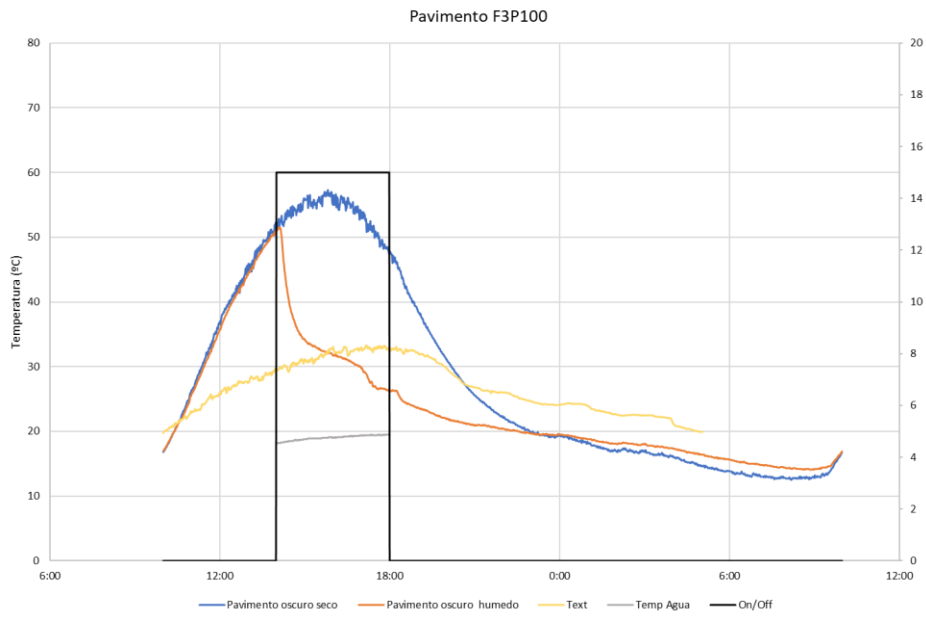


Figura 85. Gráfica experimental pavimento F3P100. Fuente: Elaboración propia.

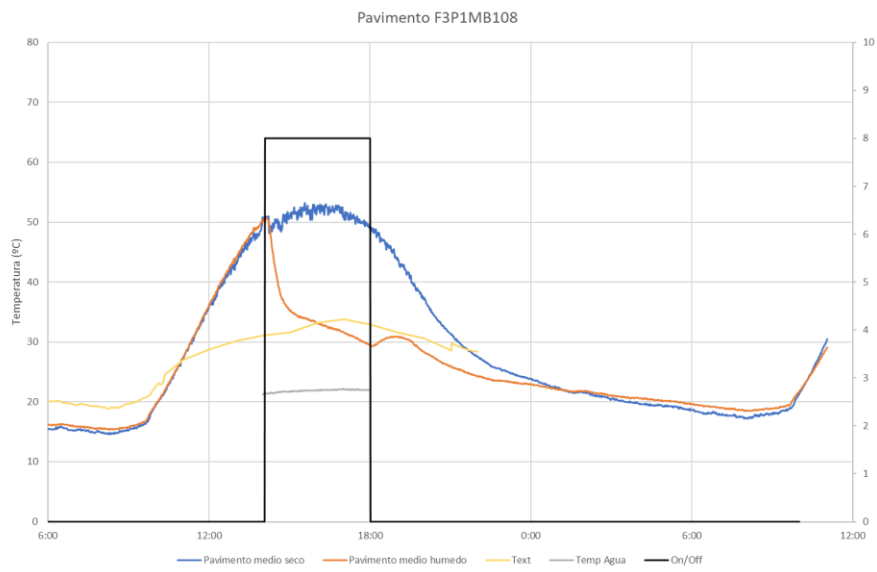


Figura 86. Gráfica experimental pavimento F3P1MB108. Fuente: Elaboración propia.

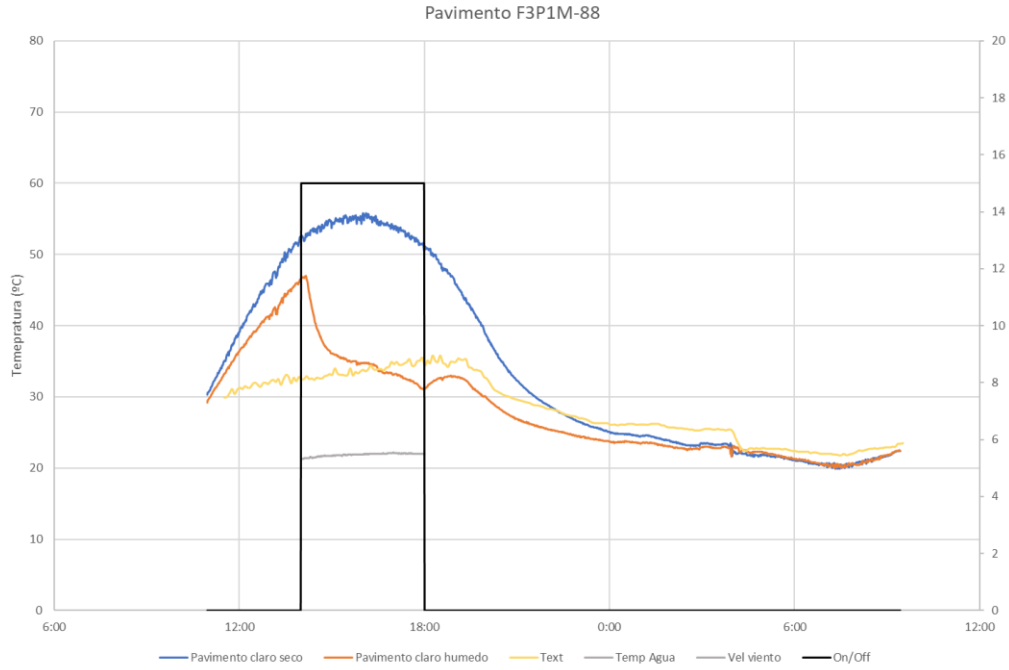


Figura 87. Gráfica experimental pavimento F3P1M88. Fuente: Elaboración propia.

- Fabricante 4

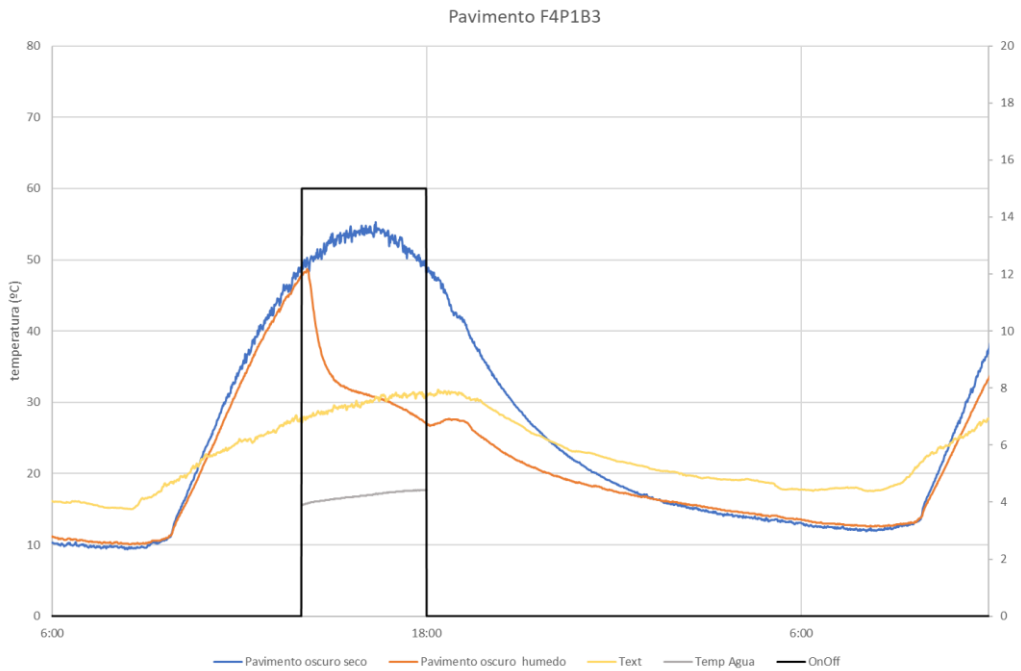


Figura 88. Gráfica experimental pavimento F4P1B3. Fuente: Elaboración propia.

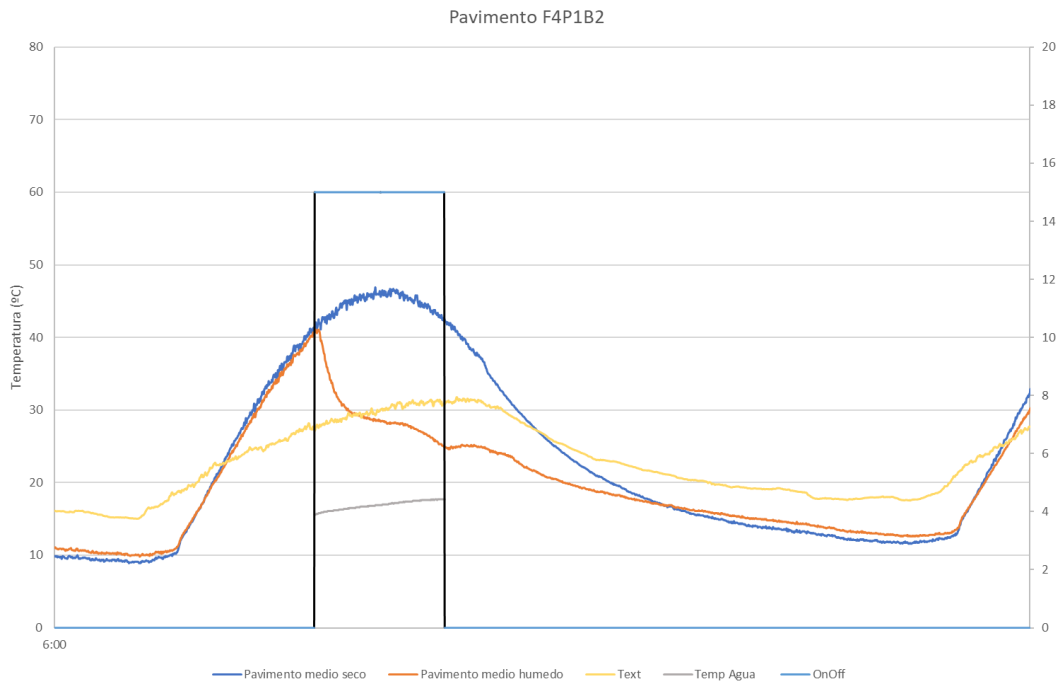


Figura 89. Gráfica experimental pavimento F4P1B2. Fuente: Elaboración propia

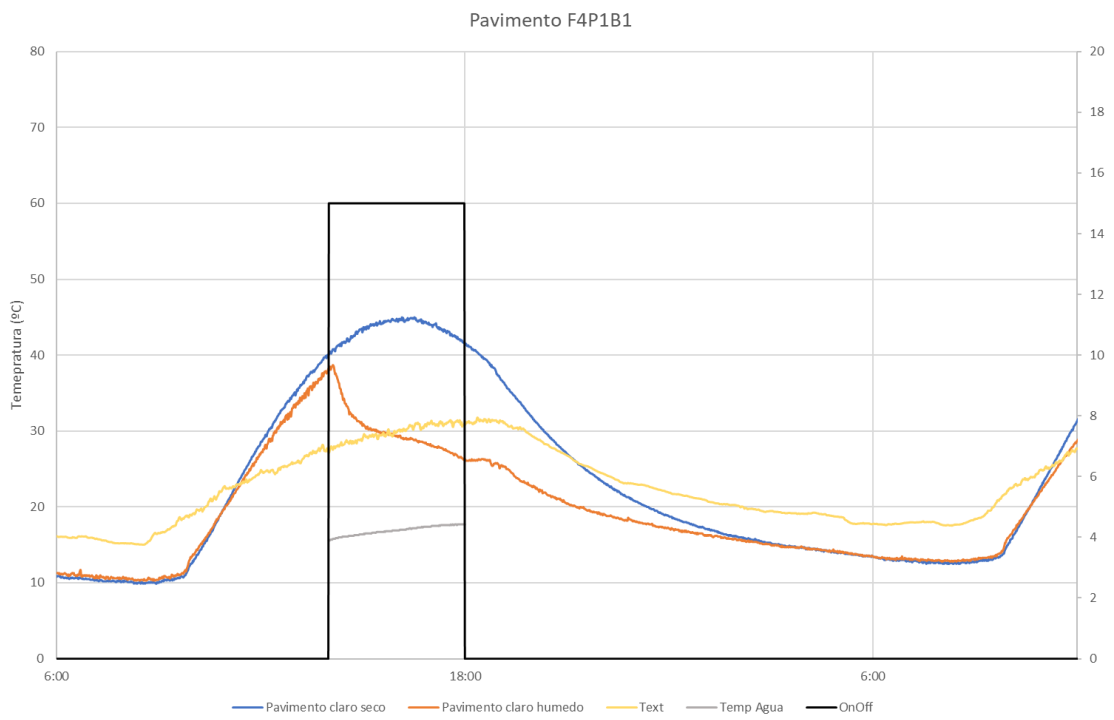


Figura 90. Gráfica experimental pavimento F4P1B1. Fuente: Elaboración propia

- Fabricante 5.

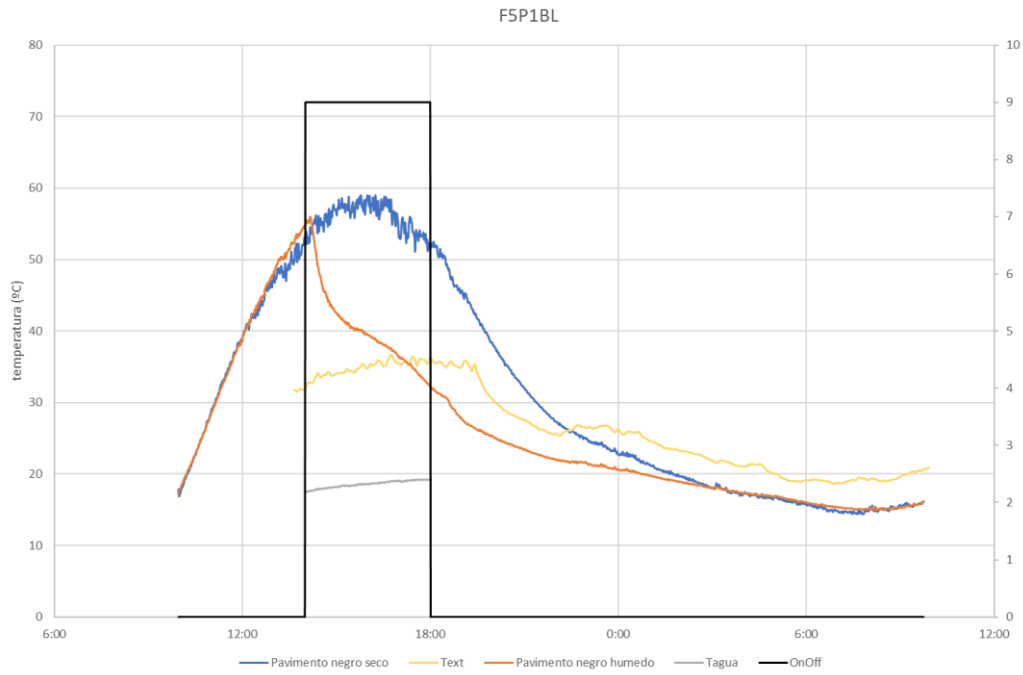


Figura 91. Gráfica experimental pavimento F5P1BL Fuente: Elaboración propia

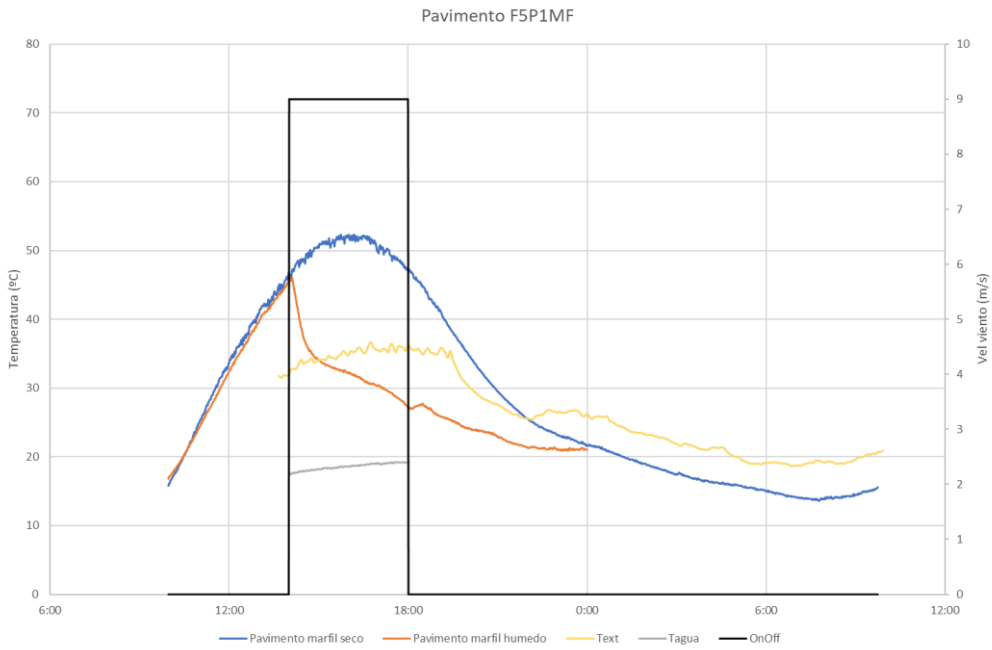


Figura 92. Gráfica experimental pavimento F5P1MF. Fuente: Elaboración propia

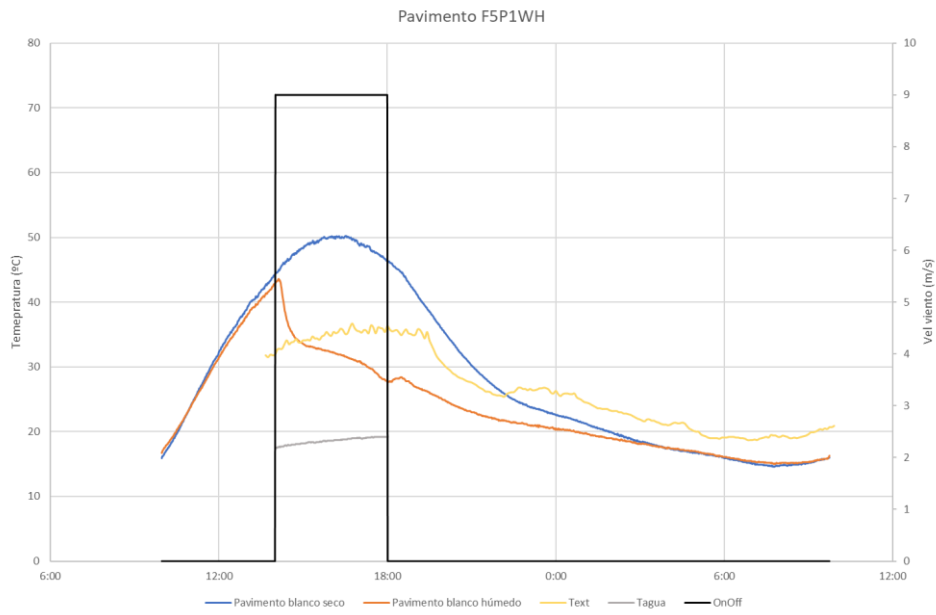


Figura 93. Gráfica experimental pavimento F5P1WH. Fuente: Elaboración propia