

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

Uso de pavimentos fríos como alternativa a la
mitigación de la isla de calor urbana

Autor: Carlos García García

Tutor: Servando Álvarez Domínguez

Co-tutor: MCarmen Guerrero Delgado

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

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

Uso de pavimentos fríos como alternativa a la mitigación de la isla de calor urbana

Autor:

Carlos García García

Tutor:

Servando Álvarez Domínguez

Co-tutor:

María del Carmen Guerrero Delgado

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2020

Proyecto Fin de Carrera: Uso de pavimentos fríos como alternativa a la mitigación de la isla de calor urbana

Autor: Carlos García García

Tutor: Servando Álvarez Domínguez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis profesores

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a los profesores del departamento de Termotecnia de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Servando Álvarez Domínguez, María del Carmen Guerrero Delgado y María del Carmen Pavón Moreno.

Y por supuesto, al apoyo incondicional de mi familia.

Carlos García García

Sevilla, 2020

Resumen

Este documento tiene la finalidad de evaluar y analizar diversas técnicas de pavimentos fríos para lograr reducir tanto la temperatura superficial, que conlleva la mitigación del fenómeno de la isla de calor urbana (UHI) y el aumento del confort térmico a través del decremento de la temperatura de sensación, y la temperatura en el interior del pavimento, exactamente en un punto a 10 cm de la superficie. Para facilitar la explicación de resultados se calcula cada uno de los parámetros citados anteriormente, de forma promedia en horas críticas a lo largo del día. Todo esto se realiza respecto a un caso base, para observar si las técnicas utilizadas son beneficiosas

Además, se añade una descripción del programa de simulación utilizado para la obtención de resultados de cada una de las técnicas, ``Fluent`` y una base de datos con vinculación de casos reales que contiene todos los casos simulados, ya que en este documento se han utilizado casos con aspectos específicos y de mayor interés. La base de datos contiene la diferencia de temperatura superficial, la mitigación de la UHI y el decremento de la temperatura de sensación de los casos respecto del caso base. Además, se ha implementado dicha base con fuentes de información e imágenes para observar que las técnicas que se han simulado se implementan en la realidad.

Índice

Agradecimientos	9
Resumen	11
Índice	13
Índice de Tablas	15
Índice de Figuras	17
1 INTRODUCCIÓN	20
1.1 Contexto	20
1.2 Pavimentos fríos	20
1.2.1 Pavimentos reflectantes	21
1.2.2 Pavimentos permeables	22
1.2.3 Pavimentos de almacenamiento de calor	24
2 METODOLOGÍA	28
2.1. Descripción general	28
2.2. Descripción del catálogo genérico de soluciones a estudio	28
2.2.1 Descripción de las tipologías de pavimentos	28
2.2.2. Descripción de parámetros térmicos	30
2.2.3. Descripción de un pavimento convencional y solución base	30
2.2.4. Tabla de rangos	32
2.3. Definición de las condiciones climáticas de diseño	35
2.4. Modelización	36
2.5. Evaluación	37
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
3.1. Caso base (convencional)	40
3.2. Pavimentos homogéneos no drenantes	41
3.2.1 Variación de la conductividad térmica y la densidad del pavimento	43
3.2.2 Variación de la reflectancia solar (albedo)	48
3.3 Pavimentos homogéneos porosos drenantes	53
3.3.1 Variación del tipo de riego con una fracción de huecos y diámetro de partículas medio	56
3.3.2 Variación de la fracción de huecos con un riego parcial y un diámetro de partículas medio	62
3.3.3 Variación del diámetro de la partícula con un riego parcial y una fracción de huecos media.	65
3.4. Pavimentos heterogéneos	69
3.4.1 Influencia de la distribución de la superficie exterior del pavimento	72
3.4.2 Variación de los tramos horario de riego ambos con riego parcial y con una alta variación geométrica de la superficie heterogénea (Caso 3)	75
4 BASE DE DATOS Y VINCULACIÓN A SOLUCIONES REALES	11
5 CONCLUSIONES	10
ANEXO	12
6 Referencias	25

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Clasificación de los pavimentos permeables.	22
Tabla 2-1. Cálculo de las propiedades térmicas del caso base.	31
Tabla 3-1. Tipos de pavimentos homogéneos no drenantes.	42
Tabla 3-2. Variación de los parámetros.	43
Tabla 3-3. Comparación del promedio de temperatura de los tres casos a diferentes horas.	44
Tabla 3-4. Reducción de la UHI respecto al caso base.	46
Tabla 3-5. Reducción de la temperatura de sensación respecto del caso base.	47
Tabla 3-6. Variación de la reflectancia solar respecto al caso base.	48
Tabla 3-7. Temperaturas promedio de los tres casos.	50
Tabla 3-8. Reducción de la UHI respecto del caso base.	52
Tabla 3-9. Reducción de la temperatura de sensación respecto del caso base.	52
Tabla 3-10. Alternativas pavimentos homogéneos drenantes.	55
Tabla 3-11. Evaluación de casos variando el tipo de riego.	56
Tabla 3-12. Temperaturas promedio de los distintos casos.	58
Tabla 3-13. Reducción de la UHI respecto del caso base.	61
Tabla 3-14. Reducción de la temperatura de sensación respecto del caso base.	61
Tabla 3-15. Evaluación de casos variando la fracción de huecos.	62
Tabla 3-16. Temperatura promedios del caso base y de las alternativas.	63
Tabla 3-17. Reducción de la UHI respecto del caso base.	65
Tabla 3-18. Reducción de la temperatura de sensación respecto del caso base.	65
Tabla 3-19. Evaluación de casos variando el diámetro de la partícula.	66
Tabla 3-20. Temperaturas promedio de los diferentes casos.	67
Tabla 3-21. Reducción de la UHI respecto del caso base.	68
Tabla 3-22. Reducción de la temperatura de sensación respecto del caso base.	69
Tabla 3-23. Propiedades de las diferentes superficies que componen la superficie heterogénea.	71
Tabla 3-24. Técnicas utilizadas para evaluar su impacto sobre la temperatura del pavimento.	71
Tabla 3-25. Tipos de variación geométrica de la superficie heterogénea.	72
Tabla 3-26. Temperaturas promedio de los diferentes casos.	73
Tabla 3-27. Reducción de la UHI respecto del caso base.	74
Tabla 3-28. Reducción de la temperatura de sensación respecto del caso base.	75
Tabla 3-29. Temperaturas promedio de lo diferentes casos.	77
Tabla 3-30. Reducción de la UHI respecto del caso base.	78
Tabla 3-31. Reducción de la temperatura de sensación respecto del caso base.	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Pavimento permeable discontinuo con celdas de hormigón rellenas de césped.	22
Figura 1-2. Pavimento permeable discontinuos con celdas de plástico.	23
Figura 1-3. Pavimento asfáltico poroso.	23
Figura 1-4. Pavimento de hormigón poroso.	24
Figura 1-5. Cambios de fase de los PCM.	24
Figura 1-6. Clasificación de los materiales de cambio de fase (PCM).	25
Figura 1-7. Estructura de un pavimento fotovoltaico.	26
Figura 2-1. Esquema de la metodología.	28
Figura 2-2. Clasificación de los pavimentos.	29
Figura 2-3. Pavimento homogéneo (izquierda), pavimento heterogéneo (derecha).	29
Figura 2-4. Ejemplos de pavimentos drenantes.	29
Figura 2-5. Geometría tipo	31
Figura 2-6. Curva granulométrica del hormigón	32
Figura 2-7. Tipología de pavimentos analizados	33
Figura 2-8. Balance de energía en pavimentos.	36
Figura 3-1. Geometría de los pavimentos homogéneos.	39
Figura 3-2. Geometría de los pavimentos heterogéneos.	40
Figura 3-3. Representación de la temperatura superficial y a 10 cm del caso base.	41
Figura 3-4. Comparación de la temperatura superficial del caso base y de baja conductividad térmica.	43
Figura 3-5. Comparación de las temperaturas superficiales del caso baso y de media conductividad térmica.	44
Figura 3-6. Temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del caso base y de baja conductividad térmica.	45
Figura 3-7. Temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del caso base y de conductividad térmica media.	46
Figura 3-8. Comparación de la temperatura superficial del caso base y del caso de baja absortividad.	49
Figura 3-9. Comparación de la temperatura superficial del caso base y del caso media absortividad.	49
Figura 3-10. Comparación de la temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del caso base y del caso de baja absortividad.	50
Figura 3-11. Comparación de la temperatura en un punto a 10 cm de la superfice del caso base y del caso de baja absortividad.	51
Figura 3-12. Comparación de la temperatura superficial del caso base con el caso 1 sin riego.	57
Figura 3-13. Comparación de la temperatura superficial del caso base con el caso 2 con riego parcial.	57
Figura 3-14. Comparación de la temperatura superficial del caso base con el caso 3 con riego continuo.	58
Figura 3-15. Temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del caso base y del caso 1 sin riego.	59

Figura 3-16. Temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del caso base y del caso 2 con riego parcial.	60
Figura 3-17. Temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del caso base y del caso 3 con riego continuo.	60
Figura 3-18. Comparación de la temperatura superficial del caso base y de los casos con variación de fracción de huecos	63
Figura 3-19. Comparación de la temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del caso base y de los casos con variación de la fracción de huecos.	64
Figura 3-20. Comparación de la temperatura superficial del caso base y de los casos con variación del diámetro de la partícula.	66
Figura 3-21. Comparación de la temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del caso base y de los casos con variación del diámetro de partícula.	68
Figura 3-22. Pavimento con variación geométrica de la superficie heterogénea.	70
Figura 3-23. Comparación de la temperatura superficial del caso base y de los tres tipos de distribución con variación geométrica de la superficie heterogénea.	73
Figura 3-24. Comparación de la temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del caso base y de los cosas con variación geométrica de la superficie heterogénea.	74
Figura 3-25. Comparación de la temperatura superficial del caso base y del caso de riego de 11:00 a 13:00.	76
Figura 3-26. Comparación de la temperatura superficial del caso base y del caso de riego de 11:00 a 17:00.	76
Figura 3-27. Comparación de la temperatura en un punto a 10 cm de la superfcie del caso base y del caso con un riego de 11:00 a 13:00.	77
Figura 3-28. Comparación de la temperatura en un punto a 10 cm de la superfcie del caso base y del caso con un riego de 11:00 a 17:00.	78
Figura 6-1. Selección de geometría.	12
Figura 6-2. Dimensiones.	13
Figura 6-3. "Sketches"	13
Figura 6-4. Realización del mallado.	14
Figura 6-5. Paso 1: Nombre del elemento.	15
Figura 6-6. Paso 2: Aplicación del elemento.	15
Figura 6-7. Paso 3: Resultado de la selación del elemento.	16
Figura 6-8. Pavimento.	16
Figura 6-9. Ocultar una capa del pavimento.	17
Figura 6-10. Interfaz.	17
Figura 6-11. Interfaz.	18
Figura 6-12. Creación de la interfaz.	18
Figura 6-13. "Energy" ON.	19
Figura 6-14. Elección del tipo de material.	19
Figura 6-15. Biblioteca de materiales de "Fluent".	20
Figura 6-16. Propiedades del material.	20
Figura 6-17. Formato de la tabla.	21

Figura 6-18. Comandos para importar la tabla.	21
Figura 6-19. Asignar materiales a las capas del pavimento.	21
Figura 6-20. Archivo de resultados.	22
Figura 6-21. Archivo de resultados.	22
Figura 6-22. Exportar resultados.	23
Figura 6-23. Zona porosa.	24
Figura 6-24. Parámetros que definen una zona porosa.	24

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto

La isla de calor urbano (UHI) es uno de los fenómenos más preocupantes relacionados con el microclima urbano. Este efecto se caracteriza principalmente por temperaturas urbanas más altas en comparación con las de las áreas rurales circundantes [1]. Las principales razones de este efecto son el crecimiento de la población y el rápido aumento de la urbanización, que puede causar una acumulación de aire cálido, así como temperaturas superficiales más cálidas [2]. El fenómeno de la isla de calor de calor tiene consecuencias graves, en consumo energético y en bienestar de las personas. Como consecuencia del mismo disminuye el confort térmico debido al aumento de la temperatura.

El calor contenido y generado en las ciudades proviene de dos fuentes principales, la primera es la radiación solar procedente del sol y la segunda de diversas fuentes de calor antropogénicas, como automóviles y sistemas de climatización. Este fenómeno se da en las grandes ciudades principalmente, ya que la inercia térmica de los edificios tiene un papel fundamental en el origen de la isla de calor urbana. Las estructuras urbanas absorben y almacenan radiación durante el transcurso del día, pero a lo largo de la noche la temperatura urbana disminuye y la energía almacenada en las estructuras urbanas es liberada al exterior.

La isla de calor urbano está altamente determinada por el diseño urbano, el tipo de materiales utilizado en el tejido urbano, el tipo y características de los pavimentos, la cantidad de calor antropogénico liberado, estructura y propiedades de las ciudades, el clima y las condiciones meteorológicas locales [3].

En dicha línea, los pavimentos en las ciudades cubren una parte muy alta del tejido urbano. El impacto de los pavimentos urbanos en el desarrollo de la isla urbana del calor es muy importante. Las superficies pavimentadas convencionales absorben la radiación solar y presentan una temperatura superficial considerablemente alta. De hecho, varios estudios recientes han demostrado que los pavimentos convencionales se encuentran entre las principales fuentes que aumentan la temperatura urbana. Por este motivo aumenta el interés del desarrollo y uso de pavimentos que presentan una temperatura superficial más baja, colaborando en la mitigación de la isla de calor urbano y en la mejora del confort térmico. Estos son denominados pavimentos fríos.

1.2 Pavimentos fríos

Actualmente, la definición de pavimento frío no está definido de una sola forma, pero en general se entiende como pavimento frío aquel que mantiene una temperatura superficial menor que un pavimento convencional.

Los pavimentos juegan un papel muy importante en el clima urbano debido a que ocupan el 20-40% de área de una ciudad típica. Su equilibrio térmico está determinado por la cantidad de radiación solar absorbida, la radiación infrarroja emitida, el calor transferido por convección al aire atmosférico, el calor almacenado en la masa del material y el calor transferido por conducción hacia el interior del pavimento. Esto provoca altas temperaturas superficiales de los pavimentos aumentando el calor sensible liberado a la atmósfera y por tanto contribuyen altamente al desarrollo de la isla urbana del calor.

Los pavimentos fríos se obtienen modificando y agregando nuevos materiales en pavimentos convencionales. Hay diferentes tipos de pavimentos fríos, cada uno de ellos realizan un proceso diferente, pero tienen el mismo objetivo, reducir la temperatura superficial del pavimento.

La investigación realizada en los últimos años ha permitido el desarrollo de tecnologías eficientes de pavimento, en el campo de la reflexión, permeabilidad y almacenamiento de calor para otros usos. Los pavimentos reflectantes tienen un albedo mayor que los pavimentos convencionales, reduciendo la temperatura superficial y la liberación de calor sensible. Los pavimentos permeables dejan pasar el agua a través de él aprovechando dos efectos, disminuir la temperatura del pavimento y disminuir la temperatura del aire mediante la evaporación

del agua (transferencia por convección). Los pavimentos de almacenamiento de calor aprovechan el calor transferido desde el exterior hacia el interior como energía para otros usos, como energía renovable.

Los pavimentos desarrollados actualmente presentan temperaturas superficiales más bajas y ayudan a la mitigación del efecto de isla de calor en las zonas urbanas. Debido al alto potencial de mitigación de los pavimentos fríos, se estudian en detalle los mismos en el marco del trabajo fin de Grado.

Existen diferentes tecnologías y métodos para disminuir la temperatura de la superficie de los pavimentos. Como materiales de alta reflectividad a la radiación solar, alta permeabilidad o alta capacidad térmicas, como los materiales de cambio de fase, a continuación, se detallan cada una de las técnicas.

1.2.1 Pavimentos reflectantes

Los pavimentos reflectantes son aquellos que utilizan materiales de superficie de alta reflectividad y emisividad a la energía solar para disminuir la radiación solar absorbida y aumentar la radiación infrarroja emitida [4]. Las técnicas de pavimento reflectante se aplican principalmente a hormigón y asfalto, también puede usarse para nuevos pavimentos. El uso de los pavimentos reflectantes para mitigar el efecto de la isla de calor urbano es la medida más rentable y fácil de usar, ya que cambiar la propiedad de albedo de un pavimento es relativamente sencillo. Para lograr un pavimento reflectante se puede cambiar tanto el albedo como la rugosidad de este [5] y por la aspereza. La finalidad de estos pavimentos es reflejar la mayor cantidad de radiación solar y no absorberla para disminuir la temperatura superficial, además disminuyen la necesidad de luz artificial durante la noche. Un inconveniente que tienen los pavimentos reflectantes es el aumento del deslumbramiento [6]. El albedo se puede aumentar agregando un revestimiento superficial de color claro y con agregados de color claro. A veces, no se pueden utilizar materiales de colores claros, se deben buscar otras técnicas como las pinturas o agregados de alta reflectancia infrarroja y pinturas o materiales termocrómicos.

Uno de los parámetros más investigados e importantes es el aumento del albedo o reflectancia solar. Este parámetro es el porcentaje de radiación solar que refleja una superficie respecto de la radiación solar total que incide en ella. Un albedo alto enfría el planeta, porque la radiación absorbida y aprovechada para calentarlo es mínima. Un albedo bajo calienta el planeta, porque la mayor parte de la luz es absorbida por el mismo.

Los revestimientos de los pavimentos actuales se realizan utilizando agregados y aglutinantes adecuados que se pueden mezclar o no. Si ambos componentes no se mezclan, el aglutinante se rocía sobre el pavimento existente y posteriormente se colocan los agregados en la parte superior y se presionan. Por otro lado, si ambos componentes se mezclan y luego se aplican sobre el pavimento. De esta forma se implementan las técnicas para aumentar la reflectancia en los pavimentos.

Un aspecto de interés que informa sobre la importancia y utilidad de estas técnicas es la cantidad de radiación solar que llega a la tierra. La radiación solar que llega a la tierra es nuevamente reemitida al espacio o, de diferentes formas. La mayor parte es reemitida al espacio en forma de radiación infrarroja, esta corresponde a la cantidad de calor que absorbe la superficie y luego la transfiere al exterior (incremento del fenómeno de la isla de calor urbano y discomfort térmico), otra parte son reflejadas por las nubes y una parte es reflejada por el suelo en forma de radiaciones cortas. Esta última es la que se quiere aumentar con respecto a la primera parte mencionada para disminuir la temperatura de la superficie y por consiguiente la temperatura del aire urbano.

La diferencia entre los revestimientos compuestos por pinturas o materiales claros y los compuestos por pinturas o materiales de alta reflectancia infrarroja es que los últimos se han desarrollado para aumentar la reflectancia infrarroja y disminuir la reflectancia de la luz visible en comparación con los revestimientos de colores claros.

La tercera técnica mencionada para aumentar la reflectancia, el uso de los materiales termocrómicos, cambia de color con la temperatura, normalmente pasan del color del producto al color transparente. Se ha demostrado que el cambio en el albedo, de menor valor a mayor valor, aumenta considerablemente con el aumento de la temperatura [7]. El uso de materiales termocrómicos es una posible solución para evitar descensos de temperaturas, mayores de lo normal, en la época de frío.

1.2.2 Pavimentos permeables

Los pavimentos permeables son pavimentos que contienen huecos, poros o rellenos que retienen el agua para obtener una evaporación de esta y disminuir su temperatura. La tasa de evaporación depende en gran medida de la cantidad de agua, la temperatura del pavimento y la humedad atmosférica.

Los pavimentos permeables, porosos, o que retienen agua presentan una alta permeabilidad y disminuye su temperatura superficial a través de la evaporación. Este tipo de pavimento presenta un albedo más bajo que las superficies impermeables [8]. Los pavimentos permeables mantienen una temperatura superficial que los pavimentos secos (impermeables) debido a que dividen al calor transferido por conducción, ya que una parte de ese calor es transferido al agua para el proceso de evaporación.

Un aspecto importante de estos pavimentos es la disponibilidad del agua. Tanto la localización del pavimento y el clima del lugar donde se ha implantado son aspectos a tener en cuenta para instaurarlo. Si estos pavimentos se implantan en zonas donde no hay ninguna fuente de agua cercana, es una gran desventaja. Son pavimentos que se implantan en parques o exteriores de zonas de ocio. En cuanto al clima, para climas cálidos y lluviosos el agua de la lluvia es utilizada para obtener un efecto frío, pero para climas cálidos y menos lluviosos se necesitan fuentes de agua. Una de las técnicas más usadas y que se va a estudiar en este documento, es rociar el pavimento con agua (riego).

Los pavimentos permeables pueden ser vegetales o no, y algunas de las técnicas más comunes son el hormigón poroso y permeable, pavimentos de asfalto poroso o de goma, hormigón y rejilla de plástico rellenas de gravas y adoquines de concreto entrelazados permeables [9]. Algunas de las técnicas de incorporar vegetales más habituales implican adoquines de cuadrícula de hormigón, el uso de celosías de diferentes tipos que permiten que crezca pasto en los intersticios, adoquines o césped reforzado. A continuación, se va a definir la clasificación que componen a los pavimentos permeables y sus características.

TIPOS DE PAVIMENTOS PERMEABLES	CLASIFICACIÓN
PAVIMENTOS PERMEABLES DISCONTINUOS	1. Césped o grava con refuerzos de hormigón o plástico. 2. Adoquines con ranuras abiertas o rellenas de grava o césped.
PAVIMENTOS PERMEABLES CONTINUOS	1. Mezcla bituminosa porosa. 2. Hormigón poroso.

Tabla 1-1. Clasificación de los pavimentos permeables.

- Pavimentos permeables discontinuos.

Los pavimentos discontinuos son aquellos compuestos de materiales impermeables que, a través de espacios, ranuras o huecos, dejan infiltrar el agua. Los huecos pueden estar rellenos de material drenante, grava o césped.

1. Césped o grava con refuerzos de hormigón o plástico.

Son pavimentos compuestos por un material impermeables (celdas de hormigón o de plástico) con huecos rellenos de césped o grava. El material drenante absorbe el agua para disminuir la temperatura de la superficie.



Figura 1-1. Pavimento permeable discontinuo con celdas de hormigón rellenas de césped.



Figura 1-2. Pavimento permeable discontinuos con celdas de plástico.

2. Adoquines con ranuras.

Bloques de hormigón (adoquines) con ranuras o huecos abiertos para la infiltración de agua de forma directa. Estos pavimentos retienen el agua en su interior para usar esa agua para cualquier uso, como usar esa agua residual para rociar otros pavimentos como se ha mencionado anteriormente.

- Pavimentos permeables continuos.

Los pavimentos continuos están compuestos por mezclas de materiales para obtener una porosidad homogénea por todo el pavimento. Su estructura permite la infiltración del agua de forma directa. Se diferencia en la porosidad del asfalto y del hormigón.

1. Mezcla bituminosa porosa.

Las mezclas bituminosas porosas mantienen un buen drenaje superficial. Dependiendo del tipo de betún utilizado para la fabricación del pavimento, se consiguen dos tipos de mezclas. Este tipo de mezcla hace referencia a un pavimento asfáltico convencional.

Mezcla **convencional** que está fabricado por un betún convencional (B 60/70) y **modificada** que está compuesta por un betún modificado con polímeros (BM-3b).



Figura 1-3. Pavimento asfáltico poroso.

2. Hormigón poroso.

Al igual que las mezclas bituminosas porosas, mantienen un buen drenaje superficial, además el hormigón poroso tiene como mínimo un 15% de huecos, pero no puede tener más de un 25% debido a que el pavimento pierde estabilidad [referencia].

Actualmente, hay dos tipos de pavimentos de hormigón porosos. Fabricado con cemento hidráulico como conglomerante de los áridos (**hidráulico**) y fabricado con aglomerantes sintéticos a base de resina (**sintético**).



Figura 1-4. Pavimento de hormigón poroso.

1.2.3 Pavimentos de almacenamiento de calor

La función de los pavimentos de almacenamiento de calor consiste en absorber el calor procedente de la radiación solar y conducirlo desde el exterior al interior mediante conducción para transferirlo a un elemento con menor temperatura. Permite tener una fuente de calor ``gratuita``.

En este documento se abarcan tres formas existentes para almacenar la energía:

- Pavimento de alta conductividad.

En un pavimento convencional se puede aumentar la conductividad añadiendo a la composición de este, Grafito. El Grafito aumenta la conductividad del pavimento y hace que se almacene calor en el interior del pavimento disminuyendo la temperatura superficial del pavimento y del aire urbano, pero tiene la desventaja del calor acumulado se transfiere, si no se transmite a otro material como una corriente de agua, al exterior horas después.

- Pavimentos impregnados con material de cambio de fase (PCM).

Los materiales de cambio de fase están considerados una de las formas de almacenamiento térmico más eficientes. El interés de este tipo de material se basa en el cambio de fase que se produce a temperatura constante, por lo cual está almacenando calor, pero a temperatura constante.

La función es almacenar calor en forma de calor latente.

El cambio de fase que se produce puede ser:

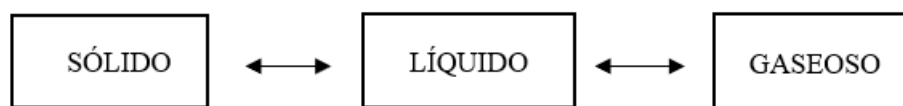


Figura 1-5. Cambios de fase de los PCM.

De los cambios de fase definidos anteriormente, el que se realiza es de sólido a líquido, ya que dicho proceso necesita una temperatura menor y presenta cambio de volumen menores. Los materiales de cambio de fase tienen una alta densidad energética, tienen la capacidad de almacenar 5-14 veces más calor por unidad de volumen que otros materiales por ejemplo agua o roca.

El rango de temperatura del proceso es de 20°C-80°C.

Estos materiales se utilizan con el fin de transmitir el calor absorbido a otro material (para calentar una corriente de agua), ya que ese calor absorbido al tiempo es liberado al exterior (cuando el material se enfría).

A continuación, se van a definir los materiales de cambio de fase que se utilizan actualmente y sus propiedades más características.

Los materiales de cambio de fase se clasifican en orgánicos, inorgánicos y mezclas eutécticas.

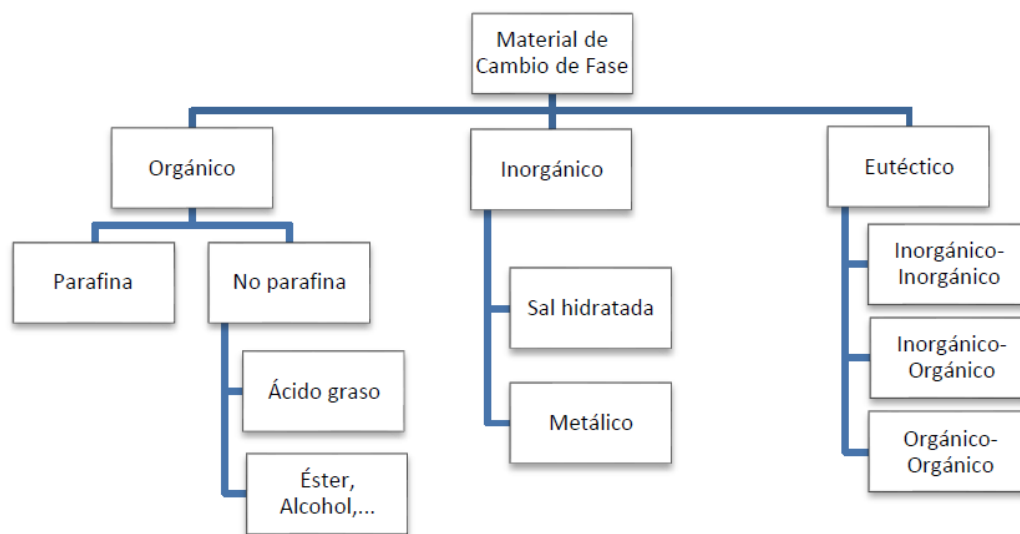


Figura 1-6. Clasificación de los materiales de cambio de fase (PCM).

Por otro lado, se va a describir los diferentes métodos de introducir este tipo de material en los pavimentos, hay tres modos:

1. Incorporación directa: Incorporación del material de cambio de fase de forma directa en la fabricación del hormigón.
2. Encapsulado: En lugar de incorporarlo de forma directa, se encapsula para evitar el contacto directo de los materiales constructivos con los materiales de cambio de fase. Hay dos formas de encapsular, macroencapsulados y microencapsulados cuya diferencia es el tamaño de la cápsula.
3. Inmersión: Este método se utiliza en pavimentos porosos. El material de cambio de fase fundido en caliente rellena los poros del pavimento y los rellena por capilaridad.

- Pavimento fotovoltaico.

Este tipo de pavimento está constituido por placas fotovoltaicas. Su función es similar a la de las placas solares habituales, almacenar calor. Los paneles solares se diseñan cada vez más pensando su integración arquitectónica. El pavimento solar son una solución perfecta, ya que constituyen una gama de vidrios tecnológicos activos que tienen la propiedad de generar energía eléctrica y pueden ser utilizados tanto en calles como en carreteras de nueva construcción como en reformas. La integración arquitectónica del pavimento fotovoltaico hace posible la creación de superficies acristaladas que, además de ser una novedad estética y funcional, generan energía eléctrica, permitiendo la autonomía eléctrica con los consiguientes ahorros energéticos.

La estructura de este tipo de pavimentos está compuesta por varias capas, siendo de interior a exterior: conectores, caja de conexiones, células de silicio monocristalino, PVB (Polivinil Butiral) y vidrio templado y ultratransparente. La figura 1-7 muestra la estructura de dicha tipología de pavimentos.

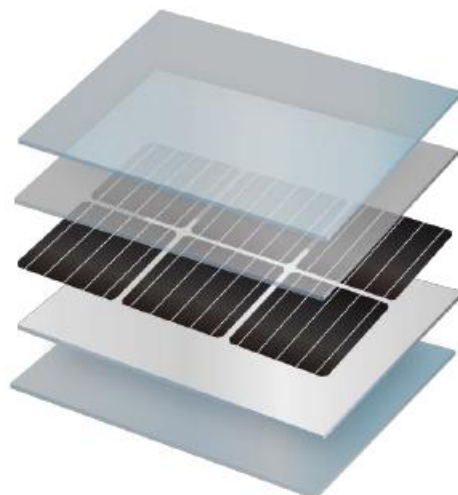


Figura 1-7. Estructura de un pavimento fotovoltaico.

2 METODOLOGÍA

2.1. Descripción general

La metodología llevada a cabo en el Trabajo Fin de Grado se muestra en la figura 2-1. El objetivo de la misma, tal y como se ha comentado anteriormente, es la creación de una base de datos general de pavimentos fríos, la cual permita establecer valores a los indicadores de mejora de confort y reducción de la isla de calor urbana en la ciudad de Sevilla asociados a posibles soluciones existentes. Las etapas que definen la metodología se describen a continuación. La etapa 1 consiste en la definición de un catálogo general de soluciones que contemplen todas las soluciones analizadas en la revisión del estado del arte realizada. Dicho catálogo general contempla diferentes soluciones geométricas, así como rangos de los diferentes parámetros característicos de los mismos. La etapa 2 consiste en, una vez definido el catálogo genérico y por tanto los parámetros requeridos para la simulación térmica de los mismos, realizar las simulaciones de cada uno de los casos que contemplan dicho catálogo en el software de simulación “Ansys Fluent” para un día climático tipo definido para la localidad de Sevilla. Una vez finalizada las simulaciones se procede a la evaluación y discusión de los resultados obtenidos en cada uno de los casos implementados. La etapa 3 consiste en la evaluación del impacto en los dos indicadores requeridos (confort y reducción de UHI) para cada uno de los casos simulados. Finalmente, en la etapa 4 se procede a la vinculación de cada uno de los casos del catálogo genérico con posibles soluciones reales de pavimentos fríos.

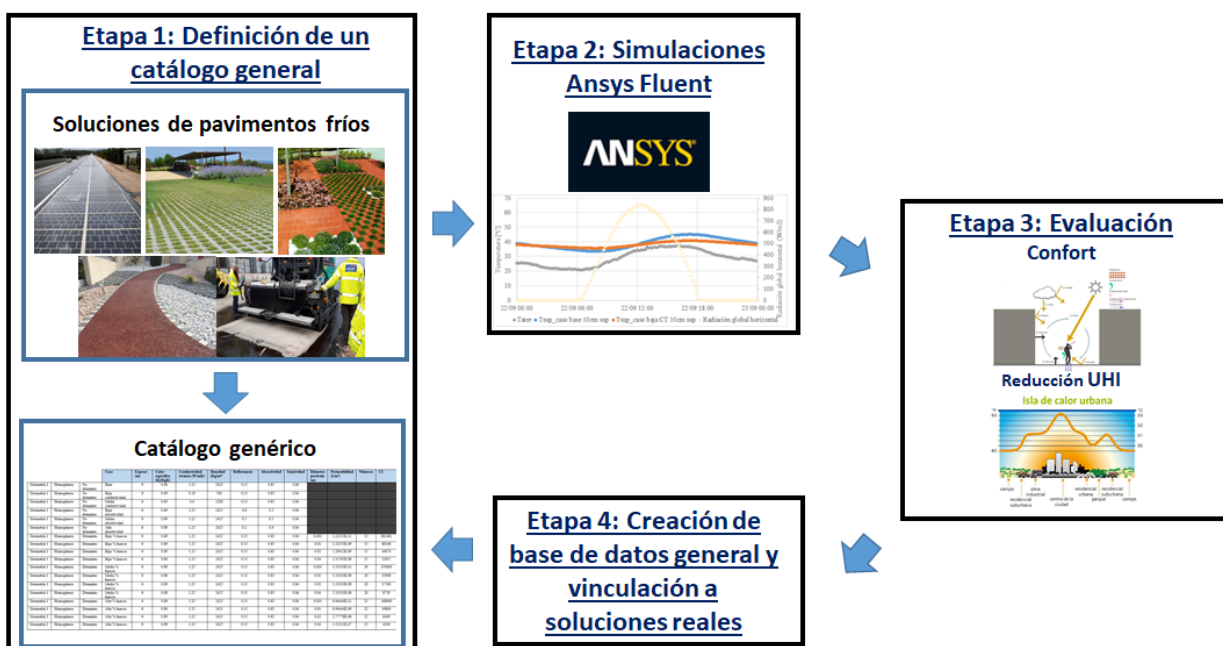


Figura 2-1. Esquema de la metodología.

2.2. Descripción del catálogo genérico de soluciones a estudio

2.1.1 Descripción de las tipologías de pavimentos

De las diferentes soluciones tecnológicas existentes estudiadas, la definición del catálogo general se realiza mediante la diferenciación de los pavimentos en las tipologías mostradas en la *Figura 2-2*, las cuales se diferencian básicamente en la composición y características de la capa base del pavimento.

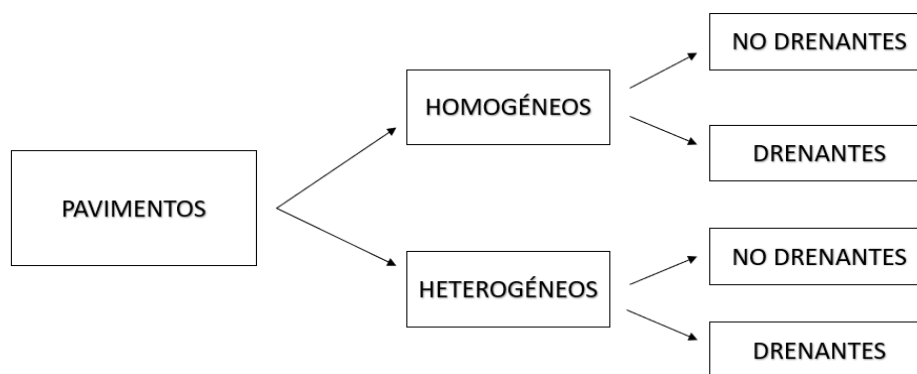


Figura 2-2. Clasificación de los pavimentos.

Se definen pavimentos homogéneos aquellos cuya capa base está formada por un único elemento y pavimentos heterogéneos aquellos en los que la capa base presenta una geometría diferenciada por diferentes composiciones materiales (por ejemplo hormigón y césped). La *Figura 2-3* muestra un ejemplo de pavimento asociada a cada tipología descrita.

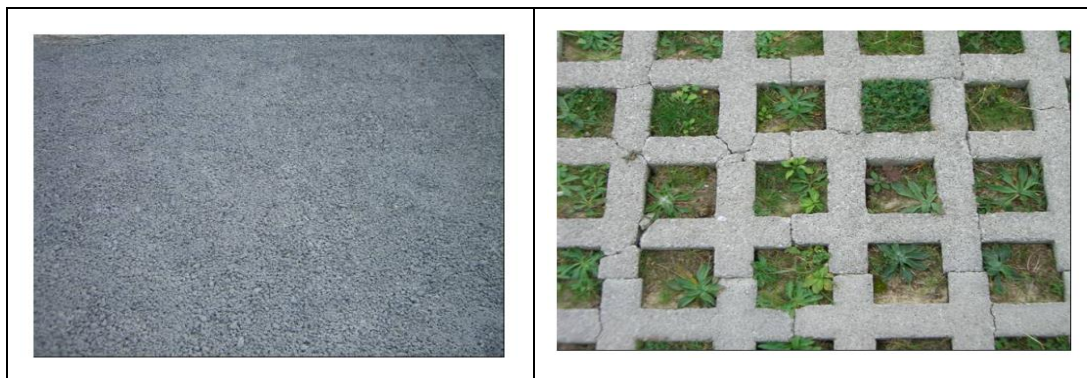


Figura 2-3. Pavimento homogéneo (izquierda), pavimento heterogéneo (derecha).

Los pavimentos no drenantes son aquellos que no permiten el flujo de un fluido a través de su capa superficial y los pavimentos drenantes son aquellos que sí lo permiten. Son pavimentos realizados con una mezcla de resinas y piedras de pequeña granulometría. Al ser completamente porosos permiten que se drene completamente todo el agua de lluvia y su aprovechamiento. Los pavimentos drenantes no solo reutilizan el agua, sino que evitan su transpiración o evaporación. De ese modo, se ahorra mucha cantidad de agua, que puede ser destinada al riego.



Figura 2-4. Ejemplos de pavimentos drenantes.

Los pavimentos drenantes (permeables) pueden ser continuos (homogéneos) o discontinuos (heterogéneos) compuesto por elementos modulares. Existen diversas tipologías, entre ellas: césped o gravas (con o sin refuerzo), bloques y baldosas porosas, pavimentos continuos porosos (asfalto, hormigón, resinas, etc). La *Figura 2-4* muestra varios ejemplos de uso de pavimentos drenantes en el entorno urbano.

2.2.2. Descripción de parámetros térmicos

La composición de un pavimento de cualquier tipología viene establecida por los siguientes parámetros térmicos:

- Calor específico: Capacidad que presenta un determinado material para almacenar calor.
- Conductividad térmica: La conductividad térmica nos da la medida de la capacidad de un determinado pavimento de transmitir el calor.
- Densidad: Relaciona el volumen y la masa del elemento. A mayor densidad, mayor inercia térmica del material.
- Reflectancia solar/Albedo: Porcentaje de radiación solar que refleja una superficie respecto de la radiación solar total que incide en ella.
- Absortividad: Cantidad de radiación absorbida por una superficie.
- Emisividad: Proporción de radiación térmica emitida por la superficie de un pavimento. Dicho parámetro se encuentra asociado a la temperatura del mismo.

Las propiedades de calor específico, conductividad térmica y densidad son aquellas que determinan la inercia térmica del material. La inercia térmica representa la capacidad que presenta un material para almacenar energía térmica recibida (calor), y liberarla progresivamente. La capacidad de almacenar energía de un material depende de su masa, su densidad y su calor específico. La reflectancia solar/albedo y la absortividad del material son propiedades ampliamente estudiadas en el diseño de materiales fríos para su uso en el entorno urbano. Un material de baja absortividad, lo que provocaría una alta reflexión de la radiación incidente, reduciendo con ello la temperatura superficial del pavimento y como consecuencia la temperatura ambiente.

Además de los parámetros térmicos descritos anteriormente, los pavimentos drenantes se caracterizan por los siguientes, los cuales determinan su composición:

- Porcentaje de huecos: La porosidad o fracción de huecos es una medida de espacios vacíos en un material, y es una fracción del volumen de huecos sobre el volumen total.
- Diámetro de la partícula: Determina la granulometría del material, así como las propiedades mecánicas del mismo.
- Permeabilidad: La permeabilidad es la capacidad que tiene un material de permitirle a un fluido que lo atraviese sin alterar su composición.
- C2: Coeficiente de resistencia inercial. Resistencia que ofrece el material a ser atravesado por un fluido.

La capacidad de infiltración de un material depende fundamentalmente del porcentaje de huecos del mismo y el tamaño de las partículas que determinan la granulometría del pavimento. Dichos parámetros determinan la permeabilidad y el coeficiente de resistencia inercial característico de mezclas porosas.

2.2.3. Descripción de un pavimento convencional y solución base

El impacto del catálogo de soluciones genéricas estudiadas se realizará comparando los indicadores obtenidos en dicha solución frente a una solución convencional, la cual será denominada caso base. El objetivo del caso base es caracterizar el comportamiento de los pavimentos convencionales, los cuales, como se ha comentado anteriormente, son constituidos por hormigón o asfalto. Estos generalmente presentan una alta absorción de la energía solar incidente, provocando alcanzar altas temperaturas superficiales y en consecuencia agravando el efecto de la isla de calor urbana. A continuación se describe el caso base establecido para la comparación de las diferentes soluciones genéricas con respecto a la solución convencional.

El caso base está constituido por una geometría tipo compuesta por cuatro capas con dimensiones y materiales diferentes, tal y como se observa en la *Figura 2-5*.

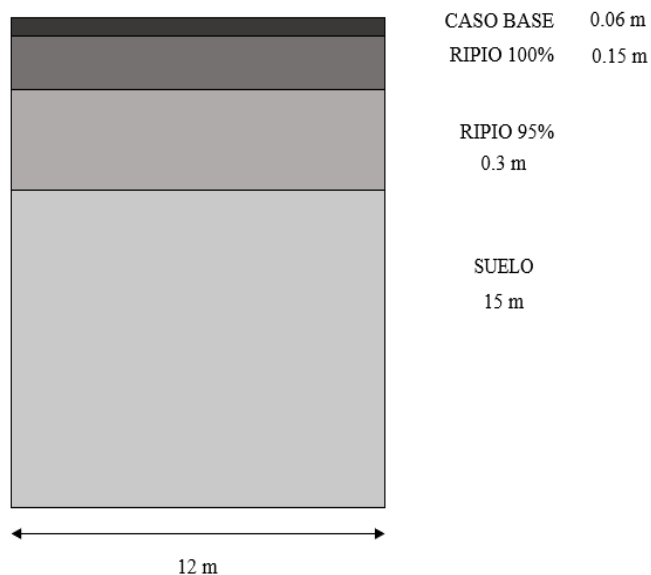


Figura 2-5. Geometría tipo

Cada una de las capas que componen el caso base presentan unas propiedades determinadas. En la *Figura 2-3*, la capa 1 hace referencia a la capa base, cuyas propiedades térmicas se han calculado como una media de las propiedades térmicas de un pavimento de hormigón convencional y uno de asfalto convencional, como se puede observar en la siguiente *Tabla 2-1*.

Tipos	Calor específico (Kj/KgK)	Conductividad térmica (W/mK)	Densidad (Kg/m ³)	Reflectancia (albedo)	Absortividad	Emisividad
Pavimento de hormigón	0.921	1	2400	0.2	0.8	0.88
Pavimento de asfalto	0.85	1.5	2450	0.1	0.9	0.8
Caso base	0.85	1.25	2425	0.15	0.85	0.84

Tabla 2-1. Cálculo de las propiedades térmicas del caso base.

Las propiedades térmicas de los materiales de las diferentes capas, definidas anteriormente, que componen el pavimento de estudio se ilustran en la *Tabla 2-2*.

Materiales	Espesor (m)	Conductividad térmica (W/mK)	Calor específico (Kj/KgK)	Densidad (Kg/m ³)
Caso base	0.06	1	0.92	2115
Ripio 100%	0.15	1.4	0.88	2000
Ripio 95%	0.3	1.4	0.88	2000
Suelo	15	1.25	0.89	2425

Tabla 2-2. Propiedades térmicas de las diferentes capas del pavimento.

Los diferentes estudios realizados se basarán en la modificación geométrica y de los materiales que componen la capa base o capa 1. En dichos estudios se realiza la hipótesis de que el resto de capas del pavimento permanecen idénticas a la solución convencional.

2.2.4. Tabla de rangos

En la sección presente se procede a definir el catálogo genérico que contempla un conjunto suficientemente amplio de soluciones desarrolladas o estudiadas por investigadores. Dicho catálogo se basa en definir casos generales definidos por la geometría y propiedades de la capa base. Tal y como se ha comentado anteriormente, en dichos estudios se realiza la hipótesis de que el resto de capas del pavimento permanecen idénticas a la solución convencional. Los parámetros definidos para cada caso a estudio serán los descritos anteriormente en el *Punto 2.2.2*. La *Figura 2-7* muestra el catálogo genérico de soluciones a estudio.

Respecto a los homogéneos no drenantes se analiza la variación de la temperatura superficial respecto al caso base de los casos denominados de media y baja conductividad. Dichos casos presentan una disminución de la densidad y la conductividad térmica tipo del material de la capa base. Los casos de homogéneos no drenantes denominados de baja a alta absorptividad presentan las mismas propiedades térmicas del caso base, siendo la diferencia de éstos únicamente la absorptividad del mismo. Estos casos pueden ser asociados a tratamientos superficiales del pavimento. Por otro lado, los pavimentos homogéneos drenantes se clasifican en casos que varían de un bajo porcentaje de huecos a un alto porcentaje de huecos, asimismo, dentro de cada categoría se distinguen diferentes niveles de diámetros de las partículas, tomadas de la granulometría del hormigón. Ambas propiedades determinarán diferentes niveles de permeabilidad y del coeficiente de resistencia inercial descrito en el *Punto 2.2.2*. Por último, en el caso de los pavimentos heterogéneos se analiza la variación de la distribución de la capa superficial, así como el impacto de aumentar el tramo horario del riego.

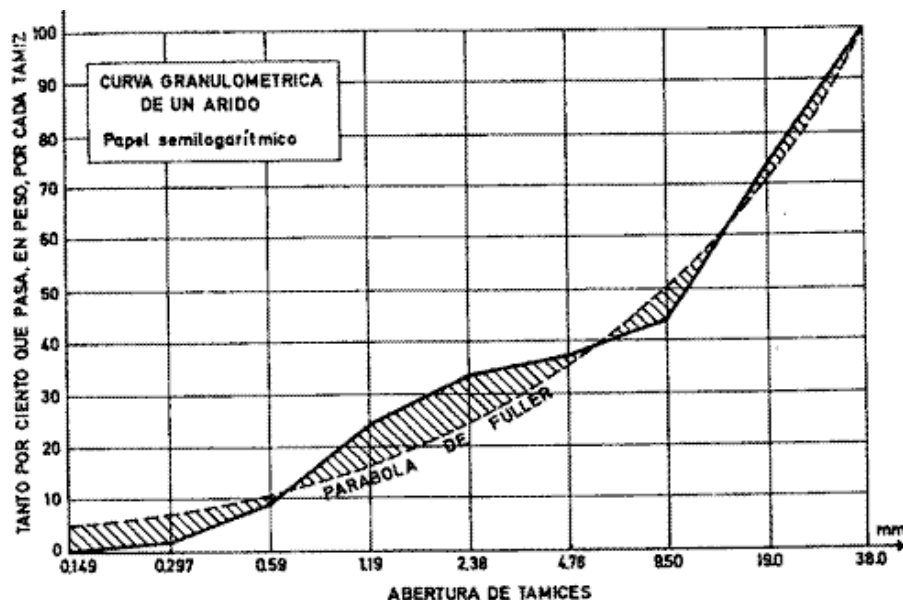


Figura 2-6. Curva granulométrica del hormigón

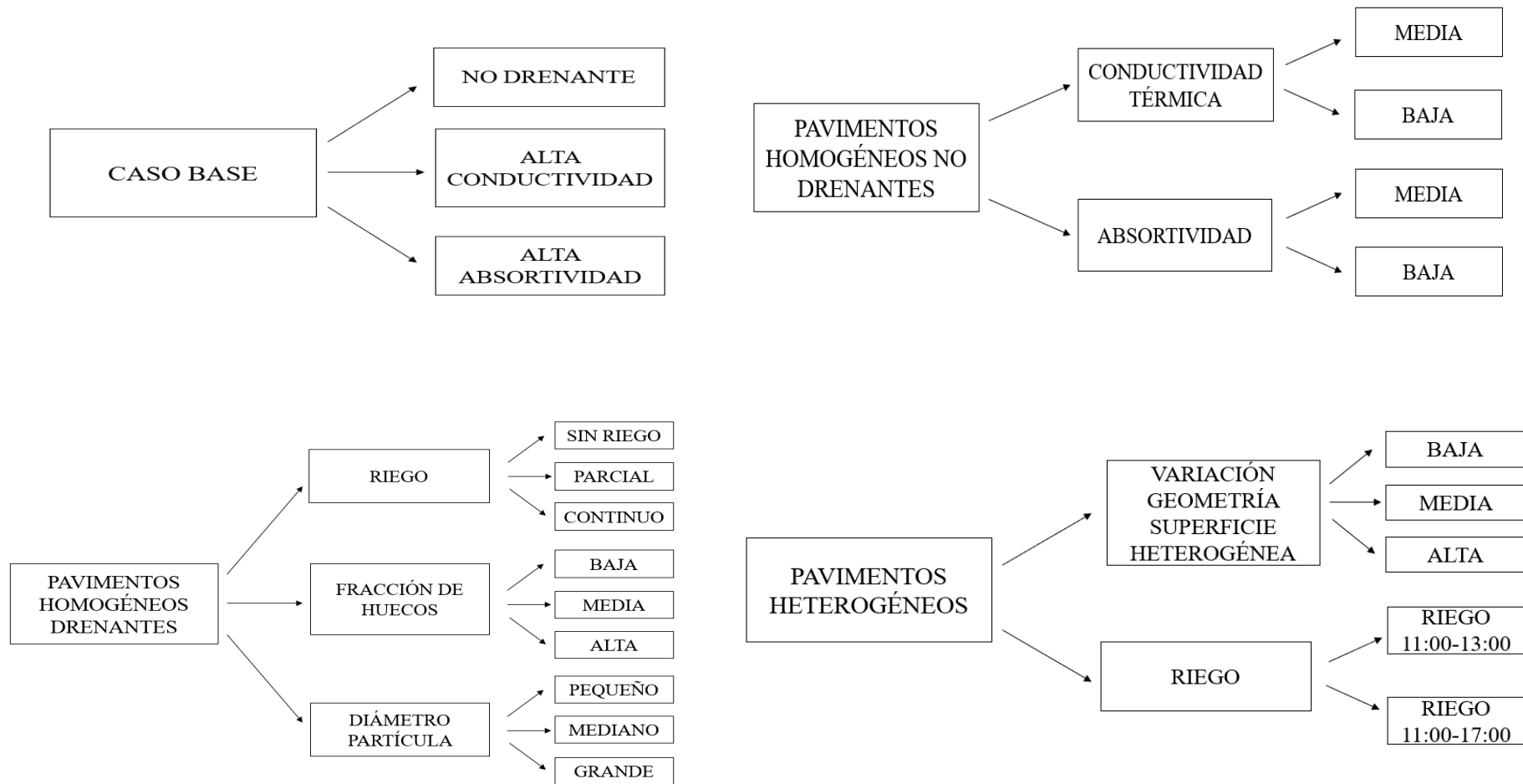


Figura 2-7. Tipología de pavimentos analizados

2.3. Definición de las condiciones climáticas de diseño

La evaluación de la evolución de la temperatura superficial de los casos descritos y el impacto de la misma será determinando en unas condiciones de diseño tipo. Dichas condiciones de diseño han sido determinadas en el marco del Proyecto CartujaQanat y son valores representativos y del lado de la seguridad asociado a las condiciones climáticas de la localidad de Sevilla.

A continuación, se enumeran las variables meteorológicas utilizadas y la terminología asociada a cada una de ellas:

- T-EXT: Temperatura exterior seca (°C).
- T-CIELO: Temperatura del cielo (°C).
- R-DIR-SH: Radiación solar directa sobre una superficie horizontal (W/m²).
- R-DIF-SH: Radiación solar difusa sobre una superficie horizontal (W/m²).
- HUM-ABS: Humedad absoluta (Kg agua/Kg aire).
- HUM-REL: Humedad relativa (%).

En la *Tabla 2-4* se incluyen los valores de las variables anteriores en el día de diseño.

Debido a la inercia térmica que presentan los pavimentos, las comparaciones se establecen siempre considerando el día completo. Los valores de temperatura superficial se calculan suponiendo que las condiciones exteriores mencionadas se repiten durante un número suficiente de días.

Se va a mostrar una tabla donde aparecen las variables meteorológicas para cada hora del día de diseño:

Hora	T-EXT (°C)	T-CIELO (°C)	R-DIR-SH (W/m ²)	R-DIF-SH (W/m ²)	HUM-ABS (Kg agua/Kg aire)	HUM-REL (%)
1	25.43	16.18	0.00	0.00	0.01	56.62
2	24.73	16.00	0.00	0.00	0.01	58.99
3	23.06	14.47	0.00	0.00	0.01	64.63
4	21.94	12.40	0.00	0.00	0.01	59.75
5	21.46	12.55	0.00	0.00	0.01	60.28
6	21.31	12.65	0.00	0.00	0.01	61.64
7	20.93	12.62	131.03	22.79	0.01	62.88
8	21.78	12.98	1145.30	0.00	0.01	59.66
9	24.14	13.87	2349.48	3.74	0.01	53.33
10	27.04	14.73	3470.07	2.44	0.01	44.64
11	29.66	15.59	4292.13	9.51	0.01	38.95
12	32.91	14.82	4744.16	42.66	0.01	27.35
13	34.52	14.24	5024.98	0.00	0.01	22.82
14	36.16	13.92	4786.58	0.00	0.01	19.34
15	36.77	12.83	4301.63	0.00	0.01	16.74
16	36.90	11.67	3512.49	0.00	0.01	15.55
17	36.98	10.52	2528.95	0.00	0.03	13.28
18	36.33	9.99	1206.10	0.00	0.01	14.18
19	34.58	11.82	63.03	9.29	0.01	17.69
20	31.96	14.35	0.00	0.00	0.01	28.10
21	30.39	13.41	0.00	0.00	0.01	30.60
22	29.10	13.29	0.00	0.00	0.01	32.73
23	28.38	13.09	0.00	0.00	0.01	34.52
24	27.63	13.69	0.00	0.00	0.01	37.66

Tabla 2-4. Condiciones climáticas-día de diseño.

La excitación se ha modelado con una temperatura sol-aire, la cual se define de diferente forma para cada una de las tipologías de pavimentos estudiadas. La temperatura sol-aire tiene en cuenta el impacto combinado de la temperatura ambiente y la influencia de la radiación solar (absorbida).

Para los pavimentos homogéneos no drenantes:

$$T_{eq} = \frac{h_{ce} \cdot T_{ae} + h_{re} \cdot T_{re}}{h_{ce} + h_{re}} \quad (\text{Ec.1})$$

$$T_{SA} = T_{eq} + \frac{\alpha \cdot I}{h_{cre}} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde la T_{ae} es la temperatura del aire, h_{ce} es el coeficiente convectivo, T_{re} es la temperatura del cielo, h_{re} es el coeficiente radiante, α es la absorptividad propia del pavimento, I es la radiación global incidente, h_{cre} es el coeficiente convectivo-radiante suma de el coeficiente convectivo y el radiante.

Para los pavimentos homogéneos drenantes:

$$T_{SA} = \frac{T_{bh} \cdot h_{ce} + T_{cielo} \cdot h_{rd}}{h_{ce} + h_{rd}} + \frac{\alpha \cdot I}{h_{ce} + h_{rd}} \quad (\text{Ec.3})$$

Donde T_{SA} representa la temperatura equivalente sol-aire, T_{bh} la temperatura de bulbo húmedo, T_{cielo} la temperatura de cielo, h_{ce} un coeficiente convectivo- evaporativo, h_{rd} coeficiente efecto radiante, α absorptividad, I radiación incidente.

2.4. Modelización

La superficie de un pavimento expuesta al sol está sometida a los flujos de calor de radiación solar incidente (H), intercambio radiante de larga (ΔR), intercambio por convección con el aire exterior (Cv) e intercambio por conducción hacia el interior del terreno (Cd). Además, dependiendo del tipo de superficie puede originarse un flujo de calor debido a la evaporación de agua en la superficie (E).

La temperatura de la superficie es el resultado del equilibrio que se establece entre los diferentes flujos de calor que se muestran en la *Figura 2-8*.

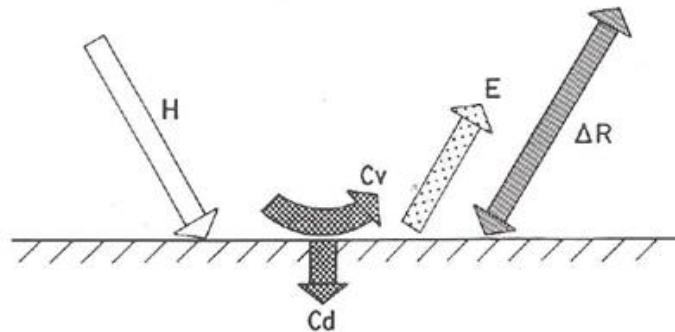


Figura 2-8. Balance de energía en pavimentos.

El equilibrio térmico en la superficie de un pavimento frío se expresa mediante el balance de los flujos de calor involucrados:

- Absorción de la radiación de corta longitud de onda procedente del sol.

$$q_{cr} = \alpha \cdot H \quad (\text{Ec.4})$$

Siendo α la absorptividad del pavimento en la banda de cortas longitudes de onda (función del color) y H la radiación solar (directa+difusa) incidente sobre la superficie.

- Intercambio por convección con el aire ambiente.

$$q_{cr} = h_c \cdot (T_p - T_a) \quad (\text{Ec.5})$$

donde h_c es el coeficiente de película ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), T_p la temperatura en la superficie del pavimento (K) y T_a la temperatura del aire (K).

- Intercambio radiante de larga longitud de onda.

$$q_{rl} = \sum_{j=1}^n C_j \cdot (T_p^4 - T_j^4) \quad (\text{Ec.6})$$

Siendo T_j la temperatura de las superficies vistas desde el pavimento. En general, el pavimento verá básicamente el cielo y la cobertura. Suponiendo que ambas superficies son prácticamente negras, el intercambio radiante puede escribirse:

$$q_{rl} = A \cdot \left(F_{p\text{-cielo}} \cdot (T_p^4 - T_{\text{cielo}}^4) + F_{p\text{-cobertura}} \cdot (T_p^4 - T_{\text{cobertura}}^4) \right) \quad (\text{Ec.7})$$

Siendo ε la emisividad del pavimento, en el infrarrojo.

- Conducción hacia el interior.

Depende del espesor y de las propiedades termofísicas del material. La inercia térmica del material, junto a la variación temporal de las excitaciones (principalmente radiación solar y temperatura) hace que la conducción deba ser estudiada en régimen transitorio. En cada instante de tiempo, el flujo por conducción vendrá dado por:

$$q_c = -K \frac{\partial T}{\partial y} \quad (\text{Ec.8})$$

siendo K la conductividad del material y $\frac{\partial T}{\partial y}$ el gradiente de temperaturas en la superficie.

El equilibrio de flujos de calores anterior proporciona la temperatura de equilibrio en la superficie del pavimento, la cual se formula según la siguiente ecuación:

$$\alpha \cdot H = h_c \cdot (T_p - T_a) + \sum_{j=1}^n C_j \cdot (T_p^4 - T_j^4) + a_0 \cdot T_p + a_1 \cdot T_p \cdot (t + \Delta t) \quad (\text{Ec.9})$$

La resolución del equilibrio de flujos descrito se llevará a cabo mediante la modelización y simulación de los casos comentados en el software Ansys Fluent. La evaluación se llevará a cabo mediante el uso de la geometría tipo descrita anteriormente y la variación de los parámetros característicos expuestos y descritos en el *Punto 2.2.3* para cada tipología de pavimento.

2.5. Evaluación

La evaluación de los diferentes casos tiene como objetivo la comparación de la temperatura superficial y la temperatura obtenida en un punto a 10 cm de la superficie entre cada uno de los diferentes casos modificados y el caso base. La evaluación del catálogo general consiste en el análisis de la influencia de la variación de cada uno de los parámetros descritos anteriormente. Para ello, se mostrarán resultados de la temperatura superficial y a la temperatura obtenida a 10 cm de la superficie del caso base y cada una de las diferentes tipologías de estudio. Además, se añadirán tablas con el valor de la temperatura superficial alcanzada en diferentes horas del día, con objetivo de analizar la evolución de la mismo. Por último, con el decremento de temperatura superficial obtenido en cada caso se procederá al cálculo de los dos indicadores objetivo: evaluación del confort y reducción del fenómeno de la isla de calor urbana.

A continuación, se describe la obtención de ambos indicadores, así como las hipótesis de cálculo realizadas.

Evaluación del confort (decremento de la temperatura de sensación).

A efectos de determinar la incidencia que las diferentes soluciones tienen en términos de confort, se utiliza el concepto de temperatura de sensación. Para ello, se han considerado varias situaciones de referencia (sin pavimentos fríos), cada una de las cuales lleva asociada una temperatura de sensación. Al introducir los pavimentos fríos, la mejora sobre el confort se realiza comparando las nuevas temperaturas de sensación con las de los casos de referencia, siendo las correlaciones propuestas para la evaluación del decremento de la temperatura de sensación son fuente propia, correspondiente al grupo de investigación de Termotecnia.

Los casos de referencia son:

- Para uso en zona adyacente a zona de paso:

- Dimensión característica de la zona de paso: 4 m y 8 m.
- Pavimento de referencia: Convencional del mismo color que el frío.

Utilizando un programa de confort térmico, se han obtenido unas correlaciones que permiten expresar directamente el incremento de temperatura de sensación, (en realidad decremento), en función de la reducción que se produce en la temperatura superficial cuando se pasa de un pavimento convencional a uno frío.

Las correlaciones son:

- Para dimensión característica igual a 4 m.

$$\Delta T_s = 0.175 \Delta T_p \quad (\text{Ec.10})$$

- Para dimensión característica igual a 8 m.

$$\Delta T_s = 0.05 \Delta T_p \quad (\text{Ec.11})$$

Siendo ΔT_s el incremento de temperatura de sensación e ΔT_p el incremento de temperatura del pavimento.

- Para el uso en zona de estancia:

- Dimensión característica de la zona de estancia (30m).
- Pavimento de referencia: Convencional del mismo color que el frío.

Al igual que en el caso anterior, se ha desarrollado una correlación para expresar el incremento de temperatura de sensación en función de la reducción de temperatura superficial cuando se pasa de un pavimento convencional a uno frío.

La correlación es:

$$\Delta T_s = 0.22 \Delta T_p \quad (\text{Ec.12})$$

En los estudios llevados a cabo se procederá al cálculo del decremento de la temperatura de sensación en las diferentes situaciones de referencia comentadas.

Evaluación de la reducción del fenómeno de la isla de calor urbano (UHI).

El fenómeno de la isla de calor urbana (UHI) es el causante del aumento de la temperatura del aire en las zonas urbanas respecto a las zonas rurales. Este fenómeno está relacionado con el balance térmico originado por la sustitución de tierra y vegetación por edificios, carreteras y otras infraestructuras lo que provoca el aumento de ganancias de calor y la disminución de las pérdidas térmicas. Uno de los principales causantes de este fenómeno son los materiales de construcción que absorben y almacenan el calor, por ejemplo, los materiales de construcción de los pavimentos.

Los pavimentos ocupan entre el 30-40% del entorno urbano y afectan al aumento del fenómeno de la isla de calor urbana. Emiten radiación térmica, transfieren calor por convección desde su superficie al aire y por conducción hacia el interior del suelo.

En nuestro proyecto, se va a analizar el impacto en la reducción de la UHI mediante un cálculo aproximado, en el que se expone el porcentaje de decremento de temperatura que ofrecen las técnicas utilizadas para la reducción de este fenómeno. El método de cálculo es el siguiente [10]:

1. El porcentaje que ocupan los materiales constructivos en las ciudades urbanas corresponde al 90%.
2. Dentro del 90%, el 30% se refiere a los pavimentos.
3. Por tanto, multiplicando ambos porcentajes, el método de cálculo aproximado es:

$$\Delta T_{UHI} = 0.27 \cdot \Delta T_p \quad (\text{Ec.13})$$

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los pavimentos homogéneos son aquellos que tienen una composición similar en la capa superficial. Para todos los casos analizados, se obtienen gráficas donde se comparan las siguientes variables: Temperatura exterior, Radiación global horizontal, Temperatura superficial (caso simulado) y Temperatura a una profundidad de 10 cm (caso simulado). También, se obtienen tablas con el promedio de las temperaturas en diferentes horas, las horas que se han calculado son: 7:00 de la mañana, 14:00 de la tarde, 19:00 de la tarde y 24:00 de la noche. Por último, con el decremento de temperatura superficial obtenido en cada caso se evalúa el impacto del confort y reducción del fenómeno de la isla de calor urbana mediante el uso de ecuaciones simples. La temperatura exterior se ha considerado una cercana al aeropuerto de Sevilla, ubicada en una zona rural, de manera que es posible evaluar el efecto de la isla de calor urbana explicada anteriormente.

Dentro de los pavimentos homogéneos, se distingue los drenantes y no drenantes. Al tener un comportamiento diferente, se va a realizar el análisis de los resultados de forma independiente. El último caso que se analiza son los pavimentos heterogéneos también de forma independiente.

Cada uno de los casos se modelan a través de ``Fluent`` y se obtiene una simulación de la temperatura superficial y una temperatura en un punto a 10 cm de la superficie. Los pavimentos tienen una geometría específica cada uno y en este proyecto se definen los pavimentos homogéneos tanto no drenantes como drenantes con la misma geometría y los pavimentos heterogéneos con la capa superficial distribuida en dientes de sierra.

Antes de explicar cada una de las variantes de pavimentos, se recuerda la geometría de los dos tipos de pavimentos genéricos.



Figura 3-1. Geometría de los pavimentos homogéneos.



Figura 3-2. Geometría de los pavimentos heterogéneos.

3.1. Caso base (convencional)

La simulación del caso base y demás variantes de pavimentos se realiza mediante unas condiciones de contorno propias de cada uno de ellos.

Cada uno tienen unas condiciones exteriores diferentes debido fundamentalmente a la absorptividad del pavimento.

En el proyecto, se han simulado cada uno de los casos de estudio bajo unas condiciones exteriores definidas por un coeficiente convectivo-radiante, común para todos los pavimentos, y una temperatura sol-aire que varía según la absorptividad de cada uno de los casos de estudio.

Las simulaciones se realizan para unas condiciones climáticas de un día de diseño, pero repetido siete veces para alcanzar el período establecido en los resultados de la simulación.

Como se ha mencionado anteriormente, los objetivos del proyecto son dos, en primer lugar, obtener la temperatura superficial del caso base y de un caso con variantes para observar como afecta al incremento del confort térmico y la reducción del fenómeno de la isla de calor urbana y en segundo lugar la temperatura de un punto a 10 cm de la superficie para observar si la variante utilizada afecta a la temperatura media del pavimento.

El pavimento correspondiente al "caso base" hace referencia a un pavimento convencional, sin ninguna técnica de enfriamiento y muy común en la actualidad. Se va a representar su temperatura superficial y su temperatura en un punto a 10 cm de la superficie.

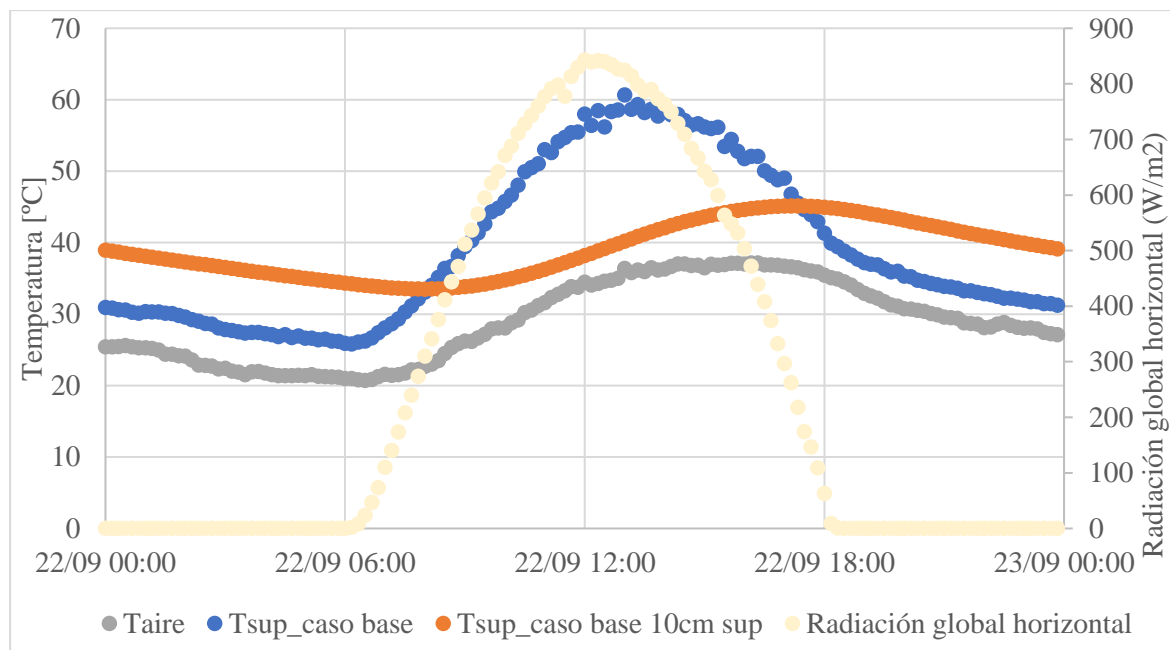


Figura 3-3. Representación de la temperatura superficial y a 10 cm del caso base.

Este formato de gráfica se va a usar para representar todos los resultados. La gráfica se compone de una representación de la temperatura superficial y a 10 cm (eje horizontal), la temperatura del aire correspondiente a una zona rural donde el fenómeno de la isla de calor no está presente/no afecta (eje vertical izquierdo) y la radiación global horizontal que está compuesta de la suma de la radiación directa, difusa y reflejada (eje vertical derecho).

Otro aspecto importante que se observan en ambas gráficas es la diferencia de temperatura que aparece entre la zona urbana (temperaturas superficiales) y la zona rural (temperatura del aire). Esto es debido a la estructura de una ciudad, personas, grandes edificios, circulación de vehículos, fábricas, etc.

A continuación, se procede a la descripción de los resultados obtenidos según la clasificación que se hizo en el *Punto 2.2.1*. En primer lugar, se describen los pavimentos homogéneos no drenantes, posteriormente los pavimentos homogéneos drenantes y por último los pavimentos heterogéneos.

Compararnos con estudios de pavimentos convencionales (tsuperficial alcanzada horas mas criticas)

3.2. Pavimentos homogéneos no drenantes

Los casos que se incluyen en este apartado son aquellos en los que se busca que el pavimento absorba la menos cantidad de radiación solar, por lo cual se evita la absorción de calor que calienta al pavimento directamente y en horas próximas es emitido al aire por inercia térmica.

También se modifican parámetros como la conductividad térmica y la densidad para observar el efecto que tiene en el pavimento.

Las distintas técnicas que se incluyen en esta sección son:

			Caso	Espesor (m)	Calor específico (Kj/KgK)	Conductividad térmica (W/mK)	Densidad (Kg/m ³)	Reflectancia	Absortividad	Emisividad
Geometría 1	Homogéneos	No drenantes	Base	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84
Geometría 1	Homogéneos	No drenantes	Baja conductividad	6	0.89	0.16	500	0.15	0.85	0.84
Geometría 1	Homogéneos	No drenantes	Media conductividad	6	0.89	0.6	1200	0.15	0.85	0.84
Geometría 1	Homogéneos	No drenantes	Baja absorptividad	6	0.89	1.25	2425	0.8	0.2	0.84
Geometría 1	Homogéneos	No drenantes	Media absorptividad	6	0.89	1.25	2425	0.5	0.5	0.84
Geometría 1	Homogéneos	No drenantes	Alta absorptividad	6	0.89	1.25	2425	0.1	0.9	0.84

Tabla 3-1. Tipos de pavimentos homogéneos no drenantes.

Todos los resultados se van a comparar con el caso base que hace referencia a un pavimento convencional y a partir de los valores de este, se van a ir modificando sus parámetros para ver diferentes variables de pavimentos y obtener un resultado final para analizar y discutir si es una solución viable para los objetivos de este proyecto.

3.2.1 Variación de la conductividad térmica y la densidad del pavimento

A partir de los valores del caso base, se van a modificar tanto la conductividad térmica y la densidad. Se van a obtener dos variantes de pavimentos. El primer pavimento se denomina de baja conductividad y el segundo de media conductividad. A continuación, se va a mostrar la reducción de ambos parámetros, conductividad y densidad, respecto al caso base.

Caso	Conductividad térmica (W/mk)	Densidad (Kg/m ³)
Base	1.25	2425
Baja conductividad térmica	0.16	500
Media conductivida térmica	0.6	1200

Tabla 3-2. Variación de los parámetros.

Se han disminuido ambos parámetros para observar la influencia sobre la temperatura superficial y a 10 cm de la superficie, los demás parámetros térmicos se mantienen constante.

La comparación se va a realizar por partes, primero se compara el caso base con el caso de baja conductividad térmica y posteriormente con el de media conductividad térmica. La idea es analizar los diferentes resultados de temperatura de menor a mayor conductividad térmica y densidad.

1. Temperatura superficial.

La modificación de los parámetros térmicos de los pavimentos tiene como objetivo obtener temperaturas superficiales menores respecto al pavimento convencional (caso base) pero se debe demostrar que las técnicas que se proponen en el texto son viables. Una disminución de la temperatura superficial tiene como finalidad aumentar el confort térmico y reducir la isla de calor urbana.

Se van a representar las temperaturas superficiales de ambas variantes de pavimentos respecto al caso base para realizar un análisis comparativo y evaluar si las técnicas son viables.

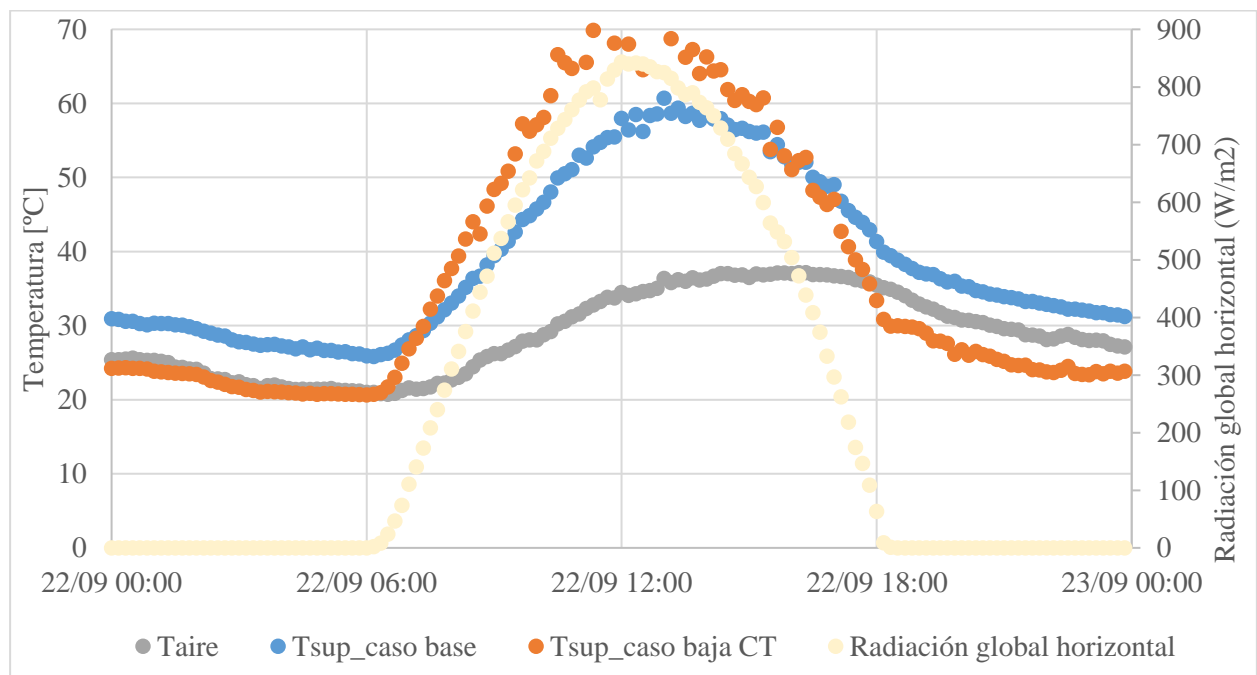


Figura 3-4. Comparación de la temperatura superficial del caso base y de baja conductividad térmica.

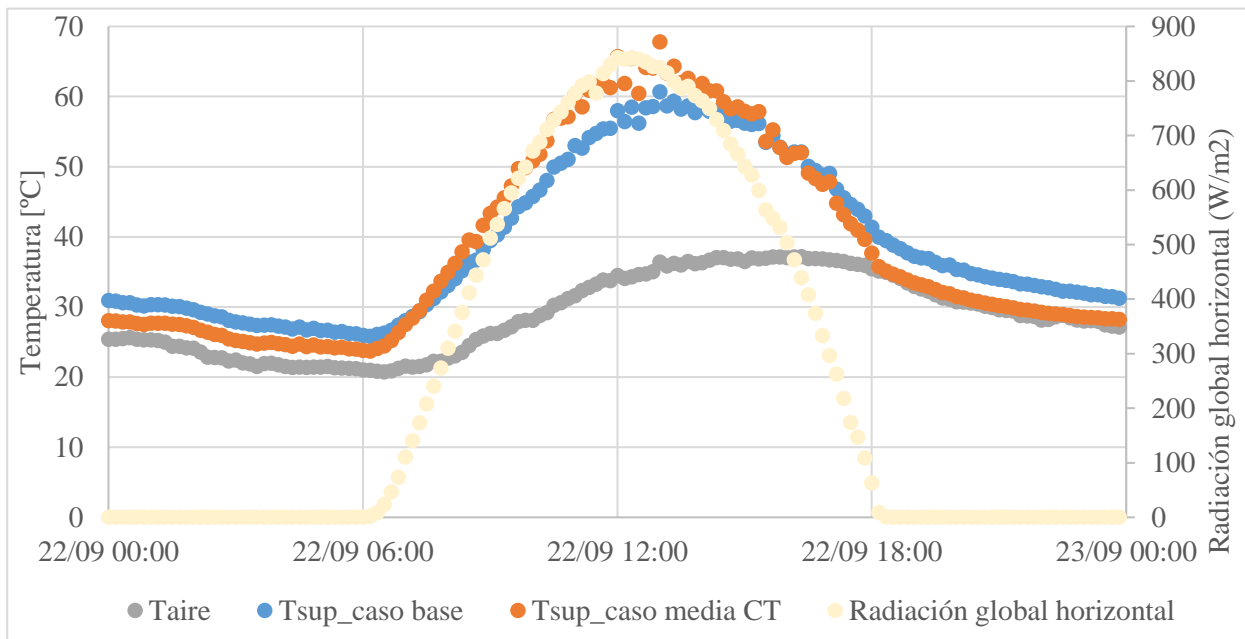


Figura 3-5. Comparación de las temperaturas superficiales del caso base y de media conductividad térmica.

En ambas gráficas (*Figura 3-4* y *Figura 3-5*) se observa como afecta la disminución de la conductividad térmica a la temperatura superficial del pavimento.

Los tramos en los cuales la radiación global es nula, correspondientes al horario de 00:00 a 6:00 de la madrugada y de 18:00 de la tarde a 24:00 de la noche, la temperatura superficial de los pavimentos con valores de conductividad térmica más bajos es menor que la temperatura superficial del caso base (mayor valor de conductividad térmica que ambas variantes).

Observando el tramo donde la radiación global no es nula, horario correspondiente de 6:00 de la mañana a 18:00 de la tarde, la temperatura superficial de los pavimentos con menores conductividad térmica es mayor que la temperatura superficial del pavimento base. En este tramo horario, las ciudades empiezan a funcionar, es decir, la gente comienza a moverse por las zonas urbanas de la ciudad.

La evaluación de la comparación tiene como resultado que un pavimento con mayor conductividad térmica tiene un promedio de temperatura máximo menor y un promedio de temperatura mínimo mayor que los pavimentos con las mismas propiedades térmicas pero menores conductividad térmica y densidad.

Para una mejor explicación, se va a ilustrar en una tabla los promedios de temperaturas a diferentes horas de los tres casos analizados anteriormente.

	Caso base	Caso baja CT	Caso media CT
	Tsuperficial	Tsuperficial	Tsuperficial
0:00	30.92	24.24	28.03
7:00	28.05	26.87	27.46
14:00	58.42	66.28	61.86
19:00	37.20	29.59	33.44

Tabla 3-3. Comparación del promedio de temperatura de los tres casos a diferentes horas.

Los pavimentos que tienen una transferencia de calor por conducción mayor, es decir, una conductividad térmica mayor, durante el día la temperatura de la superficie puede ser más alta que la del interior del pavimento y el calor se transfiere desde la superficie al interior del pavimento, mientras que por la noche el flujo de calor es adverso.

El pavimento base tiene un promedio de temperatura máximo mayor que las variantes con una conductividad térmica menor y al revés cuando se hace referencia a promedio de temperatura mínimo. Se van a mostrar dos casos de tramos donde la radiación solar es nula y donde no con el fin de demostrar la conclusión a la que se ha llegado.

Para las 14:00, donde la radiación global es total la temperatura promedio del caso base es de 58.42°C, del caso de baja conductividad térmica es de 66.82°C y del caso de media conductividad térmica es de 61.86°C.

Para las 19:00, donde la radiación global es nula, la temperatura promedio del caso base es de 37.20°C, del caso de baja conductividad térmica es de 29.59°C y del caso de media conductividad térmica es de 33.4°C.

Concluyendo, se observa de forma clara que para tramos de radiación solar nula la temperatura promedio disminuye conforme disminuye la conductividad térmica y para tramos con radiación solar la temperatura promedio aumenta disminuye conforme aumenta la conductividad térmica.

2. Temperatura en un punto a 10 cm de la superficie.

La variación de la temperatura en un punto a 10 cm de la superficie tiene como objetivo ver si debido a la aplicación de la técnica de enfriamiento, la temperatura media del pavimento (constante generalmente) se ve perjudicada.

Se van a comparar ambas técnicas, valor de baja conductividad y de media conductividad, con el caso base para ver el efecto que tiene disminuir la conductividad térmica en la temperatura media del pavimento.

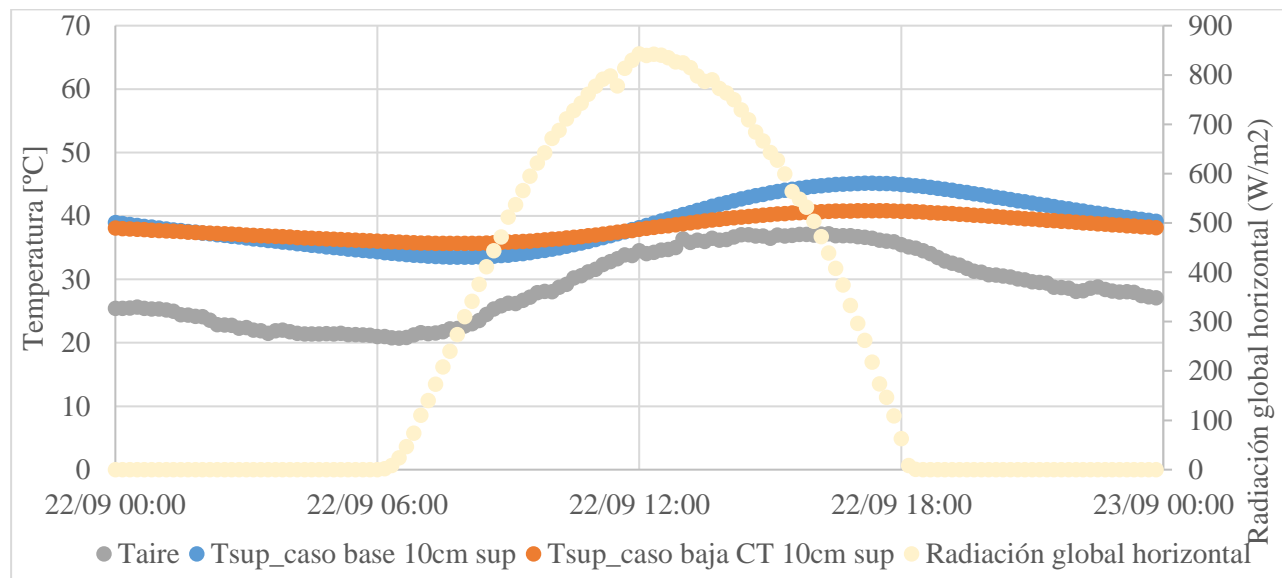


Figura 3-6. Temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del caso base y de baja conductividad térmica.

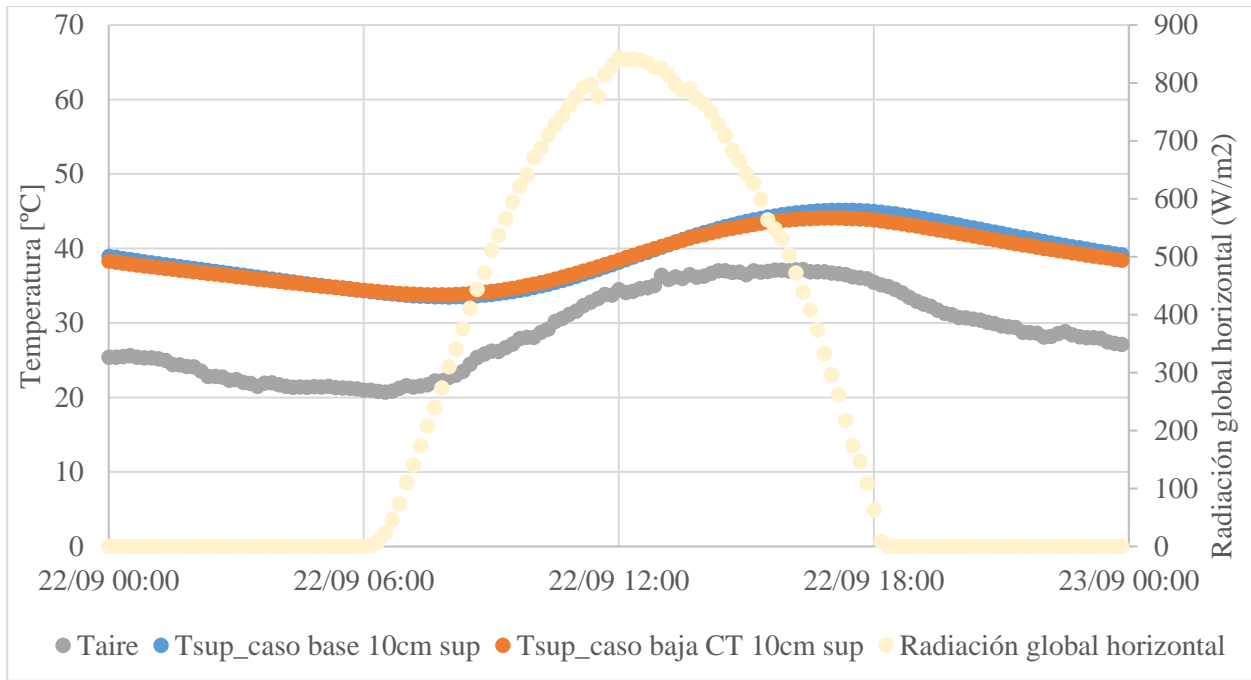


Figura 3-7. Temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del caso base y de conductividad térmica media.

Se observa que conforme la conductividad térmica, la temperatura media del pavimento se ve modificada.

Como conclusión general, la temperatura media del interior del pavimento es menor conforme la conductividad térmica disminuye. Esto es debido a que el calor por conducción es menor, es decir, la transferencia de la superficie al interior del pavimento es peor mientras menor es la conductividad térmica. Este efecto se ve conforme la radiación global es mayor, cuando el pavimento está expuesto a las condiciones climáticas más desfavorables.

3. Mitigación del fenómeno de la isla de calor urbana (UHI).

Un objetivo de este proyecto es sin duda la mitigación del fenómeno de la isla de calor urbana.

Partiendo de un pavimento convencional, común en las zonas urbanas, se van a modificar sus propiedades para observar si reduce este efecto y en que tramos horarios se produce.

La reducción de este fenómeno corresponde con el decremento de la temperatura superficial del pavimento entre los casos analizados.

A continuación, se va a observar como se reduce la isla de calor urbana entre los casos. En primer lugar, se va a mostrar el decremento o incremento, ya que puede que no lo reduzca si no que aumente el efecto, del caso base con el caso de media conductividad térmica y de baja conductividad térmica.

	MITIGACIÓN UHI	
	Caso baja CT	Caso media CT
0:00	1.80	0.78
7:00	0.32	0.16
14:00	-2.12	-0.93
19:00	2.06	1.02

Tabla 3-4. Reducción de la UHI respecto al caso base.

La reducción de la isla de calor urbana conforme disminuye la conductividad térmica, es favorable en horarios donde la radiación global es nula pero cuando la radiación global aumenta, horas en las cuales la actividad de la ciudad y la cantidad de personas en ella son mayores, se produce un efecto negativo. No es favorable disminuir la conductividad térmica para mitigar la isla de calor urbana. Para una explicación más clara, se va a diferenciar entre dos tramos donde la radiación incidente es diferente.

A las 14:00, la radiación global incidente es alta, la actividad urbana también por lo que conviene que la reducción de la UHI sea favorable. Ambos casos, para esta hora, tienen un decremento de temperatura negativo, es decir, incrementan este fenómeno, los valores son: para el caso de baja conductividad térmica, -2.12, y para el caso de media conductividad térmica -0.93. Esto es debido a lo que se ha explicado anteriormente, que conforme disminuye la conductividad térmica y la densidad del pavimento la temperatura superficial aumenta para una radiación global incidente alta.

A las 19:00, cuando la radiación global incidente es nula, el decremento de temperatura es positivo, por tanto, se reduce el efecto de la UHI. Para el caso de baja conductividad térmica, la reducción es de 2.06 y para el caso de media conductividad térmica es de 1.02. Para horas donde la radiación es nula, este tipo de pavimento es beneficioso.

4. Impacto en el confort térmico.

En este apartado se analiza el segundo objetivo principal del proyecto, el impacto de la variación de las propiedades térmicas del pavimento en el impacto del confort térmico. En este caso, la variación se realiza en la conductividad térmica.

El confort térmico es la manifestación subjetiva de conformidad o satisfacción con el ambiente térmico existente. Se puede decir que existe confort térmico respecto al ambiente térmico, cuando las personas no experimentan sensación de calor ni frío, es decir, cuando las condiciones de temperatura, humedad y movimiento del aire son favorables a la actividad que desarrollan.

El confort térmico se evalúa mediante el análisis de la temperatura de sensación. La temperatura de sensación es un índice que sirve para evaluar el confort térmico que experimenta un cuerpo humano bajo los efectos combinados de la temperatura, humedad y movimiento del aire.

Se va a analizar si disminuyendo la conductividad térmica del pavimento se produce confort o desconfort térmico.

Decremento Temperatura de Sensación (°C)						
ZONA DE PASO				ZONA DE ESTANCIA		
Dimensión Característica 4 m		Dimensión Característica 8 m		Dimensión Característica 30 m		
Media Conductividad	Baja Conductividad	Media Conductividad	Baja Conductividad	Media Conductividad	Baja Conductividad	
0:00	0.51	0.66	0.14	0.19	0.64	0.83
7:00	0.1	0.1	0.03	0.03	0.13	0.13
14:00	-0.6	-0.77	-0.17	-0.22	-0.76	-0.97
19:00	0.66	0.67	0.19	0.19	0.83	0.85

Tabla 3-5. Reducción de la temperatura de sensación respecto del caso base.

La evaluación del confort térmico no está descrita de una sola forma, si no que hay múltiples métodos para su cálculo. En nuestro proyecto se ha diferenciado entre las zonas de paso y de estancia de una ciudad, ya que es diferente la sensación térmica en cada una de estas. La diferencia entre la zona de paso y la zona de estancia es el tiempo de actividad en cada una de ellas, en una zona de paso el tiempo es menor que en una zona de estancia.

Se observa que los resultados del impacto del confort térmico tienen similitud con el impacto en la mitigación de la isla de calor urbana, debido a que la evaluación del confort térmico depende del resultado de la disminución de la temperatura superficial, al igual que la mitigación de la UHI.

Las zonas de paso tienen diferentes geometrías y, por tanto, tienen diferente impacto en la temperatura de sensación. En una zona de paso de 4 m la temperatura de sensación va a tener más influencia en las personas que una zona de paso de 8 m. Se observa en la *Tabla 3-5*, que se produce un incremento de la temperatura de sensación para horas donde la radiación global incidente es alta (14:00) y un decremento para horas donde la radiación es nula (19:00).

La zona de estancia corresponde a zonas donde el tiempo que se pasa en dicha zona es mayor, es decir, la cantidad de gente es mayor y el impacto del decremento de la temperatura de sensación es importante. Como se observa, la temperatura de sensación sufre un incremento en horas donde la radiación incidente es alta (14:00) y un decremento cuando la radiación es nula (19:00).

Concluyendo, la disminución de la conductividad térmica y densidad del pavimento no es una técnica totalmente viable debido a que aumenta la temperatura de sensación en horas críticas de actividad urbana.

3.2.2 Variación de la reflectancia solar (albedo)

La finalidad de este apartado es variar la reflectancia solar o albedo del pavimento del caso base para obtener los objetivos, la reducción del confort térmico y la mejora en el confort térmico.

Aumentar el albedo de los pavimentos ayuda a disminuir la temperatura de su superficie y a reducir la cantidad de calor sensible liberado a la atmósfera. Paralelamente, disminuye la necesidad de iluminación nocturna y aumenta la durabilidad de los pavimentos.

La modificación de la reflectancia solar o albedo lleva consigo la modificación de la absorptividad, ya que se recuerda la forma de calcular la absorptividad: $\text{Absorptividad} = 1 - \text{Reflectancia solar}$. La modificación de este parámetro hace referencia a la cantidad de radiación solar que refleja el pavimento y por tanto no lo absorbe.

Cómo en el caso anterior, se realizan dos variaciones de la reflectancia solar en un valor bajo y otro medio respecto del valor del caso base. A continuación, se muestran los valores para cada uno de los casos.

Caso	Reflectancia solar	Absorptividad
Base	0.15	0.85
Baja absorptividad	0.8	0.2
Media absorptividad	0.5	0.5

Tabla 3-6. Variación de la reflectancia solar respecto al caso base.

Como se observa en la *Tabla 3-6* y se ha mencionado anteriormente, se van a analizar un parámetro de absorptividad alto, medio y bajo para evaluar su impacto en el pavimento y por tanto en los objetivos. Los demás parámetros térmicos se mantienen constante.

Se procede a la comparación de casos y se realiza primero el caso base con el caso de baja absorptividad y posteriormente el caso base con el caso de media absorptividad. Se evalúan y analizan los resultados de la comparación.

1. Temperatura superficial.

El aumento de la reflectancia solar o albedo de un pavimento es un elemento fundamental en la disminución de la temperatura superficial de este. La cantidad solar reflejada por el pavimento no es absorbida por este y no hace que se caliente y transfiera esa energía en forma de calor al aire mediante convección.

A continuación, se muestra la variación de la temperatura superficial de ambos casos con el caso base.

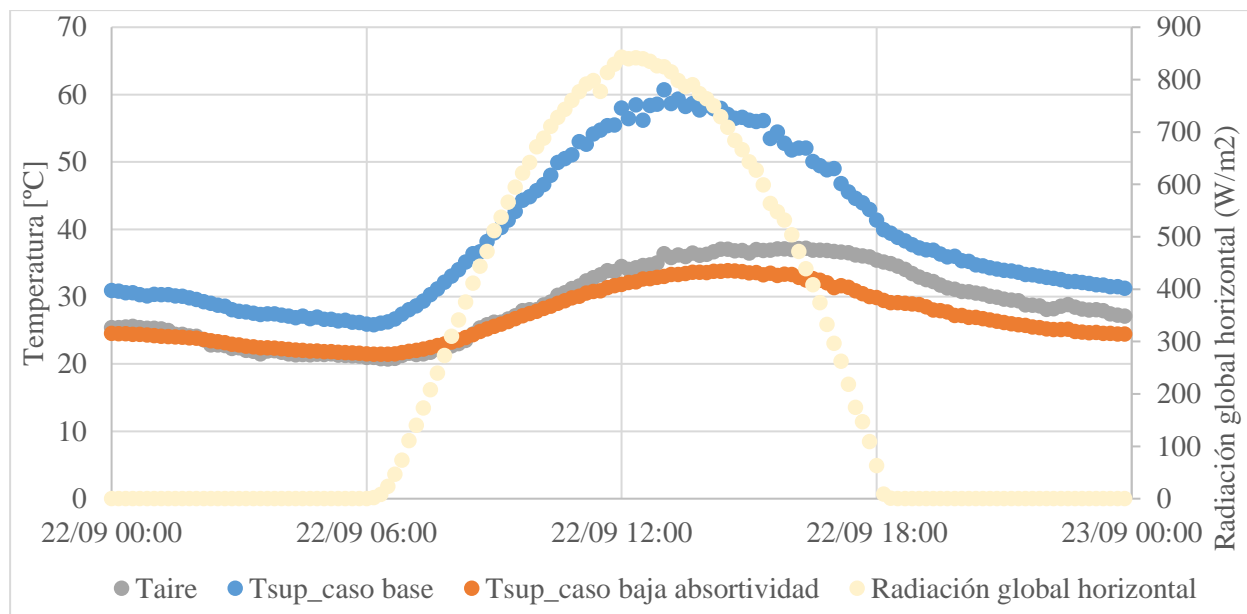


Figura 3-8. Comparación de la temperatura superficial del caso base y del caso de baja absorptividad.

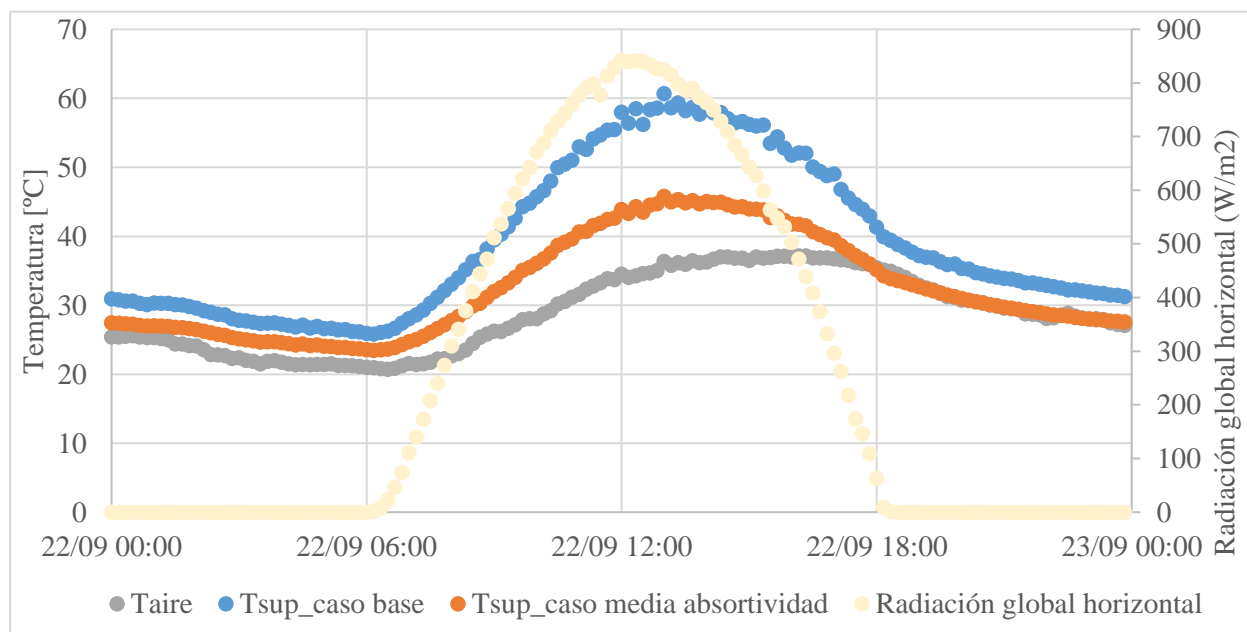


Figura 3-9. Comparación de la temperatura superficial del caso base y del caso media absorptividad.

Como se observan en ambas gráficas (*Figura 3-8* y *Figura 3-9*) la temperatura superficial disminuye con la disminución de la absorptividad del pavimento.

La diferencia de temperaturas es más grande conforme aumenta la radiación global, ya que el pavimento con mayor absorptividad está absorbiendo dicha radiación y aumentando su temperatura al contrario que el pavimento con menor absorptividad que la refleja y por tanto no la absorbe.

Además, se analizan las temperaturas promedio de diferentes horas para explicar de forma más clara el efecto beneficioso que tiene la reducción de la absorptividad en un pavimento.

	Caso base	Caso baja absortividad	Caso alta absortividad
	Tsuperficial	Tsuperficial	Tsuperficial
0:00	30.92	24.51	27.47
7:00	28.05	21.87	24.72
14:00	58.42	33.58	45.05
19:00	37.20	28.80	32.68

Tabla 3-7. Temperaturas promedio de los tres casos.

Se muestra que para una disminución de la absortividad tanto el promedio de temperatura máxima que se produce cuando hay radiación global sobre el pavimento (14:00) es menor y el promedio de temperatura mínima que se produce cuando no hay radiación global (0:00) también es menor.

A las 0:00, el valor de temperatura promedio varía con la variación de la absortividad de la siguiente forma: Para $\alpha=0.85$ (caso base) la temperatura promedio es de 30.92°C, para $\alpha=0.5$ (media absortividad) la temperatura promedio es de 27.47°C y para $\alpha=0.2$ (baja absortividad) la temperatura promedio es de 24.51°C.

A las 14:00, el valor de temperatura promedio varía con la variación de la absortividad de la siguiente forma: Para $\alpha=0.85$ (caso base) la temperatura promedio es de 58.42°C, para $\alpha=0.5$ (media absortividad) la temperatura promedio es de 45.05°C y para $\alpha=0.2$ (baja absortividad) la temperatura promedio es de 33.58°C.

Concluyendo, tanto la temperatura promedio máxima como la mínima es menor mientras menor es la absortividad del pavimento.

2. Temperatura en un punto a 10 cm de la superficie.

La temperatura media de un pavimento es un parámetro que suele ser constante. El aumento de temperatura del interior del pavimento afecta a los materiales constructivos del pavimento y por tanto a su estructura.

Se va a analizar el impacto que tiene la modificación de la absortividad en este aspecto.

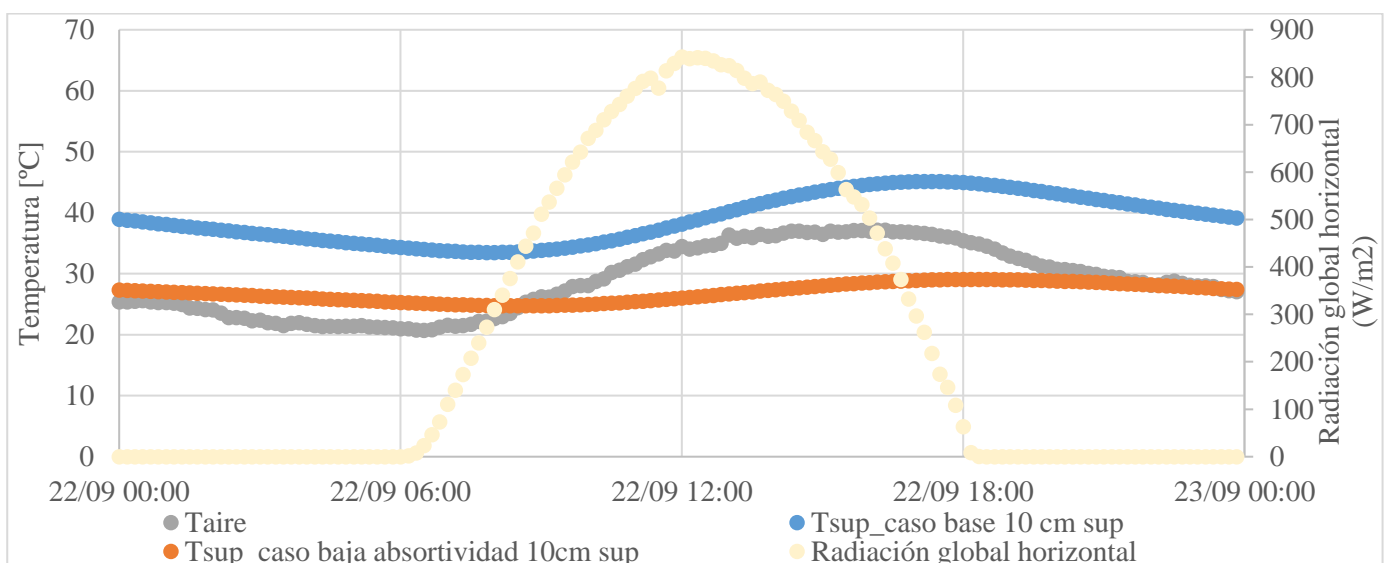


Figura 3-10. Comparación de la temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del caso base y del caso de baja absortividad.

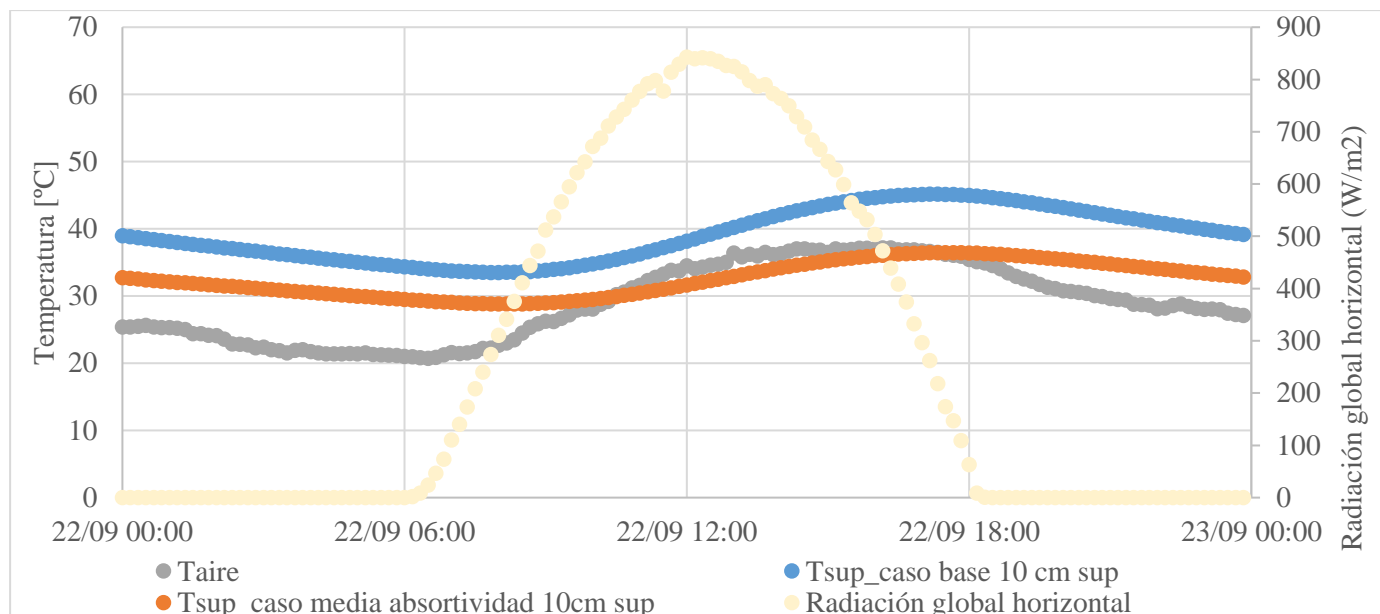


Figura 3-11. Comparación de la temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del caso base y del caso de baja absorptividad.

Se observa en ambas gráficas (*Figura 3-10* y *Figura 3-11*) la disminución de la temperatura del pavimento a lo largo del día, siendo esto muy beneficioso para las propiedades de los materiales que componen el pavimento y por tanto para su estructura.

Además, la disminución de la temperatura media del pavimento es un indicador de que va a disminuir la cantidad de calor que se acumula en el interior y que posteriormente es transferida al exterior por inercia térmica del pavimento.

3. Impacto en el fenómeno de la isla de calor urbana (UHI).

Son muchas las técnicas utilizadas para la reducción de la isla de calor urbana, pero una de las que mejores resultados ha obtenido es el aumento de la reflectancia solar o albedo, es decir, la reducción de la absorptividad del pavimento.

Además de una técnica que obtiene resultados favorables en cuanto a la mitigación de este fenómeno, no tiene un coste de operación y mantenimiento elevados por lo que es una técnica viable.

El aumento del albedo tiene un impacto muy significativo y positivo en la reducción del efecto de la isla de calor urbana, que no es más que el decremento de temperatura superficial entre dos tipos de pavimentos evaluados.

Se muestran el decremento de temperatura superficial del caso base con el caso de baja absorptividad térmica y con el caso de media absorptividad.

	MITIGACIÓN UHI	
	Caso baja absorptividad	Caso media absorptividad
0:00	1.73	0.93
7:00	1.67	0.90
14:00	6.71	3.61
19:00	2.27	1.22

Tabla 3-8. Reducción de la UHI respecto del caso base.

Se analiza el impacto y se observa que la reducción de la isla de calor urbana, decremento de temperatura, es mayor conforme la radiación global es mayor y se produce en el tramo horario donde la actividad de las zonas urbanas es mayor (más cantidad de personas).

No se va a diferenciar entre horas, ya que se aprecia que el decremento de temperatura es positivo en todos los horarios. El decremento es mayor conforme disminuye la absorptividad del pavimento que es igual al aumento de la reflectancia.

A través de la aplicación de esta técnica de enfriamiento se consigue uno de los dos objetivos principales, la mitigación del efecto de la isla de calor urbana.

4. Impacto en confort térmico.

El confort térmico tiene relación con la reducción de la isla de calor urbano, ya que van a seguir la misma línea ascendente.

Aunque nosotros evaluemos el efecto de la temperatura en el confort térmico, hay muchos más aspectos que influyen en dicha evaluación.

A continuación, se muestra como varía el confort térmico con la variación de la absorptividad del pavimento.

	Decremento de temperatura de sensación (°C)					
	ZONA DE PASO				ZONA DE ESTANCIA	
	Dimensión Característica 4 m		Dimensión característica 8 m		Dimensión característica 30 m	
	Media Absorptividad	Baja Absorptividad	Media Absorptividad	Baja Absorptividad	Media Absorptividad	Baja Absorptividad
0:00	0.6	1.12	0.17	0.32	0.76	1.41
7:00	0.58	1.08	0.17	0.31	0.73	1.36
14:00	2.34	4.35	0.67	1.24	2.94	5.46
19:00	0.79	1.47	0.23	0.42	0.99	1.85

Tabla 3-9. Reducción de la temperatura de sensación respecto del caso base.

Se observa en la *Tabla 3-9*, la importancia que tiene la disminución de la absorptividad de un pavimento (o aumento de la reflectancia solar) en el decremento de temperatura de sensación en horas donde hay radiación

(14:00) y en horas que es nula (19:00). Conforme disminuye la absorptividad, pasa de una absorptividad alta (caso base) a una absorptividad baja, el decremento de la temperatura de sensación es más significativo.

Afecta a todas las zonas descritas de igual manera, conforme disminuye la absorptividad, disminuye la temperatura de sensación. La técnica de disminuir la absorptividad del pavimento es una opción totalmente viable.

3.3 Pavimentos homogéneos porosos drenantes

Otra alternativa de pavimento frío son los denominados pavimentos homogéneos porosos drenantes. Estos pavimentos tienen la característica de filtrar el agua a través de ellos y utilizar el efecto evaporativo que se produce para disminuir la temperatura superficial y la temperatura del aire urbano.

Estos pavimentos están definidos por las mismas propiedades que los homogéneos no drenantes pero se incluyen propiedades diferentes como la porosidad, diámetro de partícula y fracción de huecos. Además, hay que tener en cuenta el tipo de riego que se va a realizar sobre la superficie del pavimento. Este tipo de riego puede ser sin riego, riego parcial y riego continuo.

Los pavimentos porosos tienen dos propiedades principales que son las que definen como tal el medio poroso, la permeabilidad y el coeficiente de resistencia inercial, así como el porcentaje de porosidad.

El parámetro de permeabilidad y sobre todo el coeficiente de resistencia inercial son difíciles de cuantificar para materiales existentes, solo pueden existir ciertos valores en la literatura, pero tampoco es muy común. Por ello, es necesario recurrir a la relación que muestra la ayuda de ANSYS sobre dichos parámetros y los diámetros característicos de las partículas, detallados en las ecuaciones siguientes.

$$\alpha = \frac{D_p^2 \cdot Fh^3}{150 \cdot (1-Fh)^2} \quad (\text{Ec.14})$$

$$C_2 = \frac{3.5 \cdot (1-Fh)}{D_p \cdot Fh^3} \quad (\text{Ec.15})$$

Donde D_p es el diámetro de la partícula media del material y Fh es la fracción de huecos de la zona porosa.

Al tratarse de un pavimento drenante toma relevancia el tratamiento del agua que se hace importante en la superficie, por este motivo se diferencia entre tres riegos. Existen dos escenarios de riego. Cuando el riego del pavimento es continuo el efecto que se produce es una lámina de agua constante sobre la superficie, siendo la temperatura de esta la temperatura de bulbo húmedo. Si el riego es parcial, el agua se evapora y se genera un microclima que afecta a la temperatura de la superficie y del aire urbano. La temperatura superficial está compuesta de la temperatura sol-aire como en los casos de pavimentos no drenantes pero hay que añadirle el efecto evaporativo, como muestra la siguiente ecuación.

$$T_{SA} = \frac{T_{bh} \cdot h_{ce} + T_{cielo} \cdot h_{rd}}{h_{ce} + h_{rd}} + \frac{\alpha \cdot I}{h_{ce} + h_{rd}} \quad (\text{Ec.16})$$

Donde T_{SA} representa la temperatura equivalente sol-aire, T_{bh} la temperatura de bulbo húmedo, T_{cielo} la temperatura de cielo, h_{ce} un coeficiente convectivo-evaporativo, h_{rd} coeficiente efecto radiante, α absorptividad, I radiación incidente. El fenómeno de evaporación es tratado como un fenómeno de convección con la superficie y el aire, con una temperatura equivalente que representa la temperatura de bulbo húmedo en las condiciones en las que se encuentra el aire y un coeficiente convectivo-evaporativo.

Además del riego, la influencia de este tipo de pavimento sobre la temperatura superficial también depende de otros parámetros como la permeabilidad, diámetro de partículas y fracción de huecos. Se van a modificar el diámetro de las partículas y la fracción de huecos obteniendo diferentes valores de permeabilidad para cada uno de los tipos. A continuación, se muestra en la *Tabla 3-6* todas las variantes que se han analizado.

			Caso	Espesor (m)	Calor específico (Kj/KgK)	Conductividad térmica (W/mK)	Densidad (Kg/m ³)	Reflectancia	Absortividad	Emisividad	Diámetro partícula (m)	Permeabilidad (1/m ²)	%huecos
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Bajo % huecos –Sin Riego	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.001	1.32353E-11	15
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Bajo % huecos – Riego Parcial	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.001	1.32353E-11	15
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Bajo % huecos – Riego Continuo	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.001	1.32353E-11	15
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Bajo % huecos –Sin Riego	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.01	1.32353E-09	15
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Bajo % huecos – Riego Parcial	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.01	1.32353E-09	15
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Bajo % huecos - Riego Continuo	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.01	1.32353E-09	15
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Bajo % huecos –Sin Riego	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.02	5.29412E-09	15
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Bajo % huecos – Riego Parcial	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.02	5.29412E-09	15
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Bajo % huecos - Riego Continuo	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.02	5.29412E-09	15
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Bajo % huecos –Sin Riego	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.04	2.11765E-08	15
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Bajo % huecos – Riego Parcial	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.04	2.11765E-08	15
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Bajo % huecos - Riego Continuo	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.04	2.11765E-08	15
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Medio % huecos –Sin Riego	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.001	3.33333E-11	20
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Medio % huecos –Riego Parcial	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.001	3.33333E-11	20
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Medio % huecos –Riego Continuo	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.001	3.33333E-11	20
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Medio % huecos –Sin Riego	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.01	3.33333E-09	20
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Medio % huecos -Riego Parcial	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.01	3.33333E-09	20
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Medio % huecos –Riego Continuo	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.01	3.33333E-09	20
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Medio % huecos –Sin Riego	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.02	1.33333E-08	20
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Medio % huecos -Riego Parcial	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.02	1.33333E-08	20
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Medio % huecos –Riego Continuo	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.02	1.33333E-08	20
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Medio % huecos –Sin Riego	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.04	5.33333E-08	20
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Medio % huecos -Riego Parcial	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.04	5.33333E-08	20
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Medio % huecos –Riego Continuo	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.04	5.33333E-08	20
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Alto % huecos –Sin Riego	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.001	6.94444E-11	25
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Alto % huecos –Riego Parcial	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.001	6.94444E-11	25
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Alto % huecos –Riego Continuo	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.001	6.94444E-11	25
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Alto % huecos –Sin Riego	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.01	6.94444E-09	25

Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Alto % huecos –Riego Parcial	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.01	6.94444E-09	25
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Alto % huecos –Riego Continuo	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.01	6.94444E-09	25
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Alto % huecos –Sin Riego	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.02	2.77778E-08	25
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Alto % huecos –Riego Parcial	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.02	2.77778E-08	25
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Alto % huecos –Riego Continuo	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.02	2.77778E-08	25
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Alto % huecos –Sin Riego	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.04	1.11111E-07	25
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Alto % huecos –Riego Parcial	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.04	1.11111E-07	25
Geometría 1	Homogéneos	Drenantes	Alto % huecos –Riego Continuo	6	0.89	1.25	2425	0.15	0.85	0.84	0.04	1.11111E-07	25

Tabla 3-10. Alternativas pavimentos homogéneos drenantes.

Los tres parámetros que se han modificado y se van a evaluar su impacto en la temperatura superficial, la temperatura en un punto a 10 cm de la superficie, la reducción del fenómeno de la isla de calor urbana y el aumento en el confort térmico son el tipo de riego, el diámetro de la partícula y la fracción de huecos.

Como se muestra en la *Tabla 3-10*, se han realizado muchas variaciones pero para su simplificación se han elegido para su análisis: un primer caso con una fracción de huecos y un diámetro de partículas medio variando el tipo de riego (sin riego, riego parcial, riego continuo), un segundo caso con un riego parcial y un diámetro de partícula medio variando su fracción de huecos (bajo, medio, alto) y un tercer caso con un riego parcial y una fracción de huecos variando el diámetro de la partícula (bajo, medio, alto). Al igual que en el análisis de los pavimentos homogéneos no drenantes, todos los casos mencionados anteriormente se van a comparar con el caso base.

3.3.1 Variación del tipo de riego con una fracción de huecos y diámetro de partículas medio

Como se ha mencionado anteriormente, se analiza el impacto del tipo de riego en un pavimento con una fracción de huecos y un diámetro de partículas medio con el caso base que va a ser un caso donde no existe el riego. Los parámetros que se analizan son la temperatura superficial, temperatura en un punto a 10 cm de la superficie, la reducción del fenómeno de la isla de calor urbana y el aumento del confort térmico.

A continuación, se informa del caso analizado tomado de la *Tabla 3-10*.

Caso	Riego	Fracción de huecos (%)	Diámetro partículas
Base	Sin riego	Sin fracción de huecos	Sin diámetro partículas
Caso 1	Sin riego	20	0.01
Caso 2	Riego parcial	20	0.01
Caso 3	Riego continuo	20	0.01

Tabla 3-11. Evaluación de casos variando el tipo de riego.

La comparación se va a realizar en el siguiente orden: primero el pavimento poroso sin riego con el pavimento del caso base, después el pavimento poroso con riego parcial con el pavimento del caso base y por ultimo el pavimento poroso con riego continuo con el pavimento del caso base.

1. Temperatura superficial.

Como se observa en la *Tabla 3-11*, hay tres casos descritos donde se varía el riego y se comparan los tres casos con el caso base que corresponde a un pavimento convencional, un pavimento sin riego, sin huecos y sin diámetro de partículas.

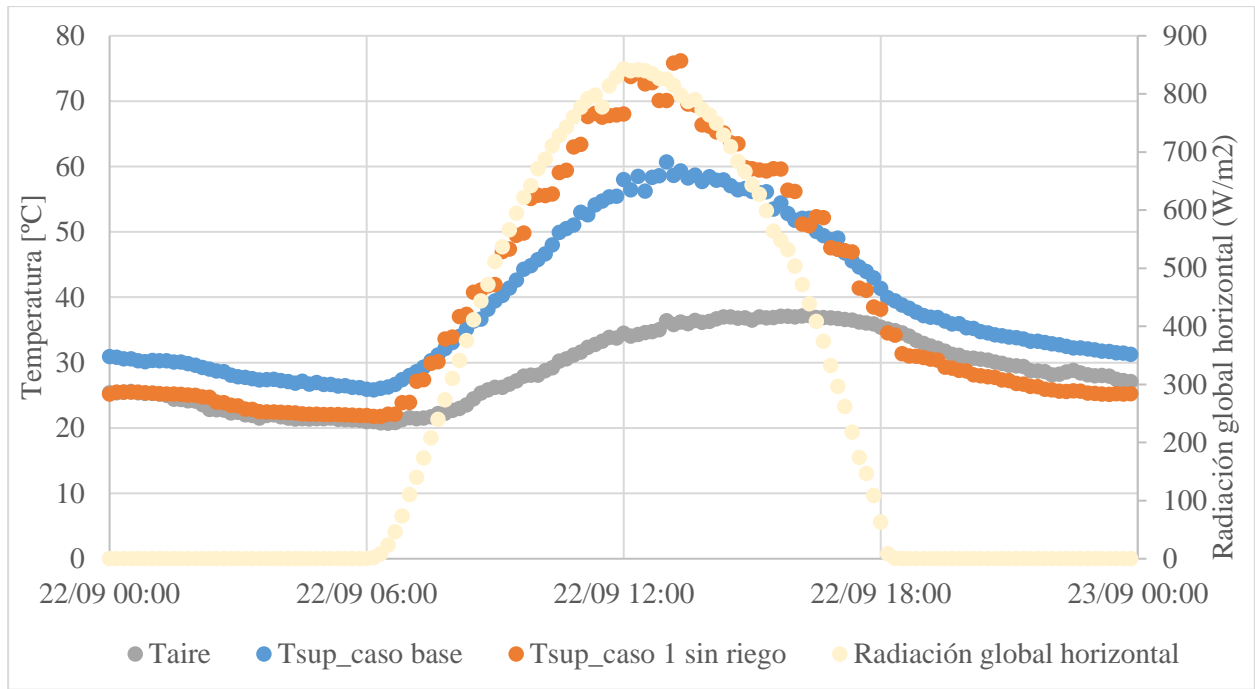


Figura 3-12. Comparación de la temperatura superficial del caso base con el caso 1 sin riego.

Se observa que un pavimento poroso sin riego se comporta de forma similar que los pavimentos de baja conductividad y densidad. La temperatura superficial en horas donde la radiación global es nula, es menor en pavimentos porosos sin riego que en pavimentos no porosos sin riego, al contrario que en horas donde la radiación global es incidente en las superficies. Es decir, los pavimentos porosos sin riego tienen temperatura promedio máxima mayor y temperatura promedio mínima menores que el pavimento del caso base (no poroso).

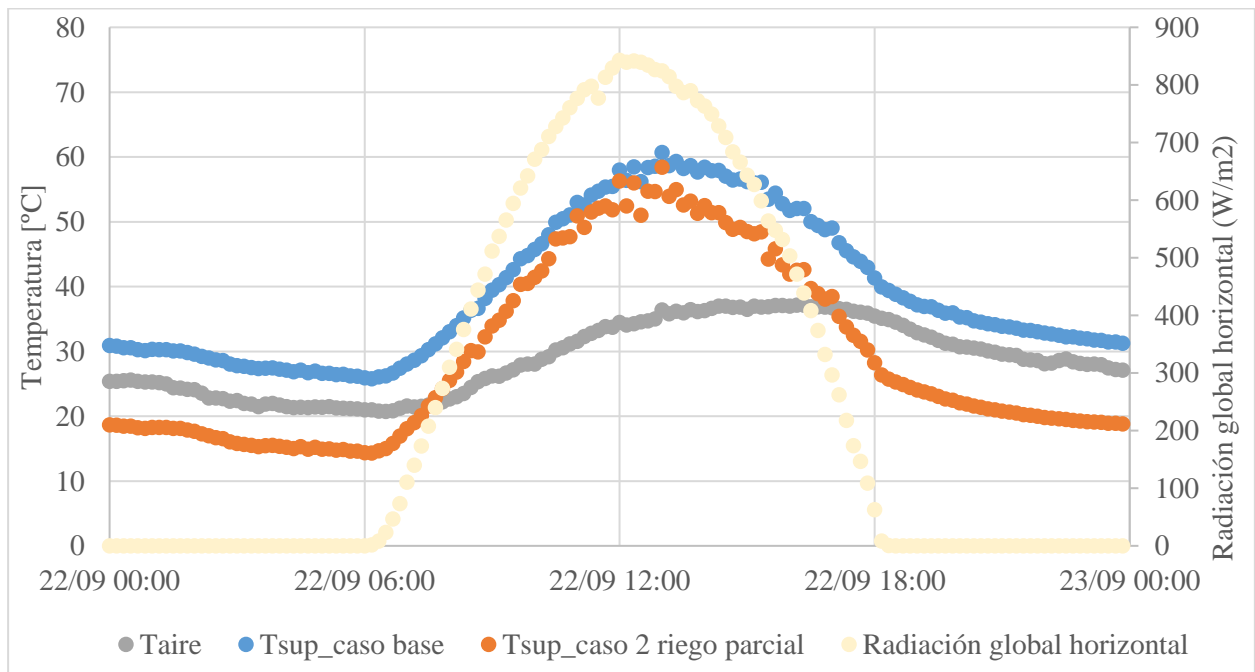


Figura 3-13. Comparación de la temperatura superficial del caso base con el caso 2 con riego parcial.

Se observa como afecta el fenómeno de evaporación del agua procedente del riego. Las horas donde más relevantes son las que corresponden a la mayor incidencia de radiación global, en las cuales la temperatura superficial de los pavimentos porosos con riego parcial es menor que la temperatura superficial del caso base. En las horas donde la incidencia de radiación es nula, la temperatura superficial del pavimento poroso con riego continuo es menor que la temperatura superficial del caso base. Esto es debido a que la temperatura del agua es

menor que la temperatura del pavimento, enfriandola y disminuyendo su temperatura. Además, cuando se produce esta acción, se produce la evaporación del agua creando un microclima, transfiriendo por convección al aire urbano.

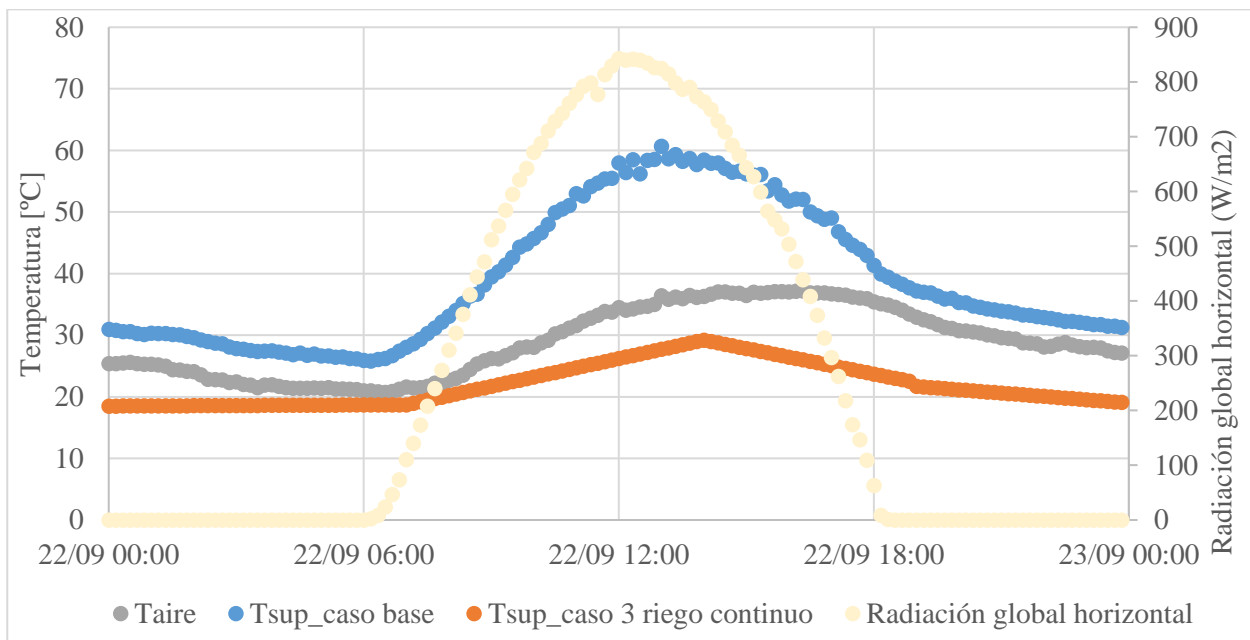


Figura 3-14. Comparación de la temperatura superficial del caso base con el caso 3 con riego continuo.

Al realizar un riego continuo, la temperatura superficial disminuye aún más debido a que la cantidad de agua evaporada es mayor que en el riego parcial. Uno de los aspectos claves es que la temperatura sol-aire pasa a depender únicamente de la temperatura de bulbo húmedo y no depende de ningún otro parámetro.

Por otro lado, se va a mostrar la temperatura promedio para facilitar la explicación y observar con mayor claridad como afecta los diferentes tipos de riego a la temperatura de la superficie del pavimento.

	Caso base	Caso 1 riego parcial	Caso 2 riego parcial	Caso 3 riego continuo
	Tsuperficial	Tsuperficial	Tsuperficial	Tsuperficial
0:00	30.92	25.19	18.65	18.49
7:00	28.05	23.93	18.08	18.70
14:00	58.42	66.18	52.48	29.20
19:00	37.20	30.77	24.06	21.68

Tabla 3-12. Temperaturas promedio de los distintos casos.

Se observa lo que se ha descrito anteriormente, la temperatura superficial disminuye en función del aumento del riego. Se toman dos horarios de referencia, el primero con la radiación global incidente (14:00) y el segundo con la radiación global nula (19:00).

A las 14:00, la radiación global incidente y la actividad en la ciudad son plenas. La *Tabla 3-12* muestra la disminución de temperatura conforme aumenta el riego. El caso base, sin riego y no poroso, tiene una temperatura superficial de 58.42°C, el caso 1, sin riego, pero poroso, muestra una temperatura superficial de 66.18°C. Con esto se demuestra que no es conveniente un pavimento con menor densidad y conductividad térmica (poroso) frente a un pavimento sin riego y no poroso. El caso 2, con riego parcial y poroso, muestra una temperatura superficial de 52.48°C, menor que la temperatura superficial de los dos casos citados anteriormente. Por último, el caso 3, con riego continuo y poroso, la temperatura superficial es de 29.30°C siendo mucho menor

a los tres casos anteriores. Concluyendo, el riego de los pavimentos es una buena técnica para la reducción de la temperatura superficial.

Para una temperatura donde la incidencia de la radiación global es nula, la temperatura superficial disminuye en el siguiente orden: caso base 37.20°C, caso 1 sin riego 30.77°C, caso 2 con riego parcial 24.06°C y caso 3 con riego continuo 21.68°C. Esto tiene mucha relación con el siguiente apartado, debido a que el pavimento en su interior va a estar a una temperatura inferior con respecto al caso base y la inercia térmica por tanto será menor.

2. Temperatura en un punto a 10 cm de la superficie.

Se analiza el impacto de la filtración del agua en el interior del pavimento, concretamente en un punto a 10 cm de la superficie. La temperatura media de un pavimento es un parámetro que suele ser constante. El aumento de temperatura del interior del pavimento afecta a los materiales constructivos del pavimento y por tanto a su estructura. Además, el almacenamiento de calor en el interior de un pavimento es una desventaja en horas posteriores a la incidencia de la radiación sobre la superficie.

Se van a comparar, al igual que en el apartado anterior, los tres casos frente al caso base para analizar su impacto en la temperatura interior del pavimento.

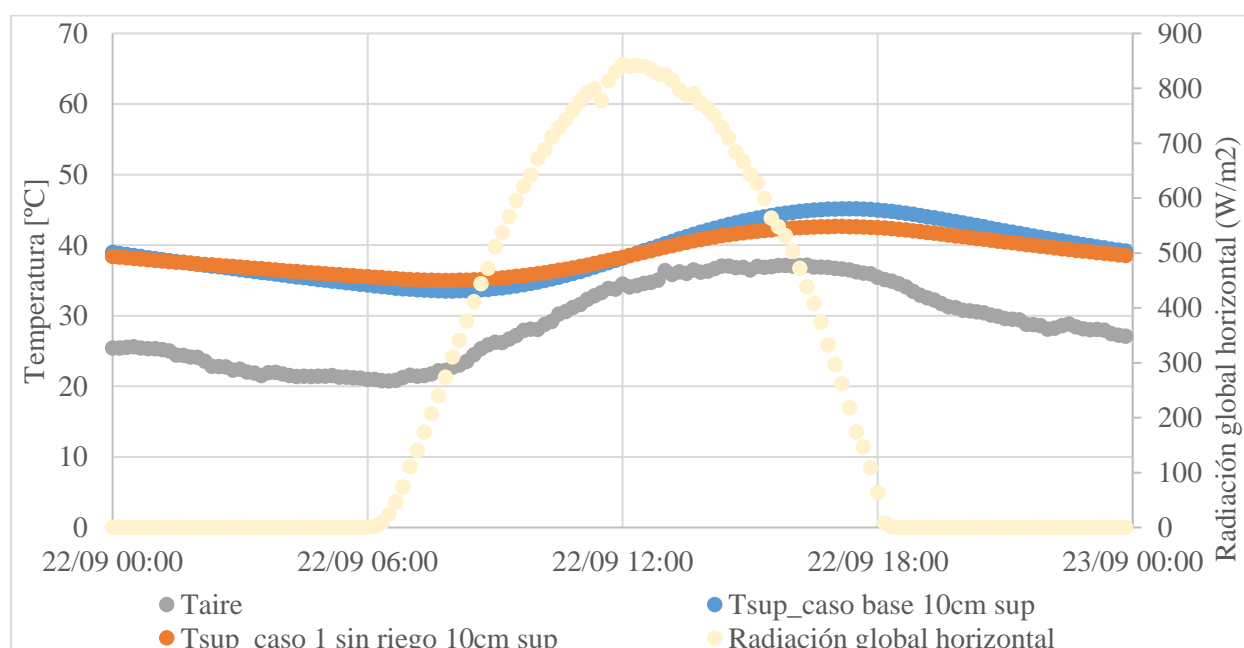


Figura 3-15. Temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del caso base y del caso 1 sin riego.

Se observa que la temperatura del interior del pavimento no varía en gran medida, en algún tramo horario la temperatura superficial del caso 1 sin riego es menor que la temperatura superficial del caso base. Hay que tener en cuenta, aunque en este proyecto no se va a abarcar, que la resistencia de un pavimento poroso es menor que un pavimento no poroso (caso base) por lo que hay que analizar si merece la pena la reducción de temperatura a la hora de instalar dicha técnica.

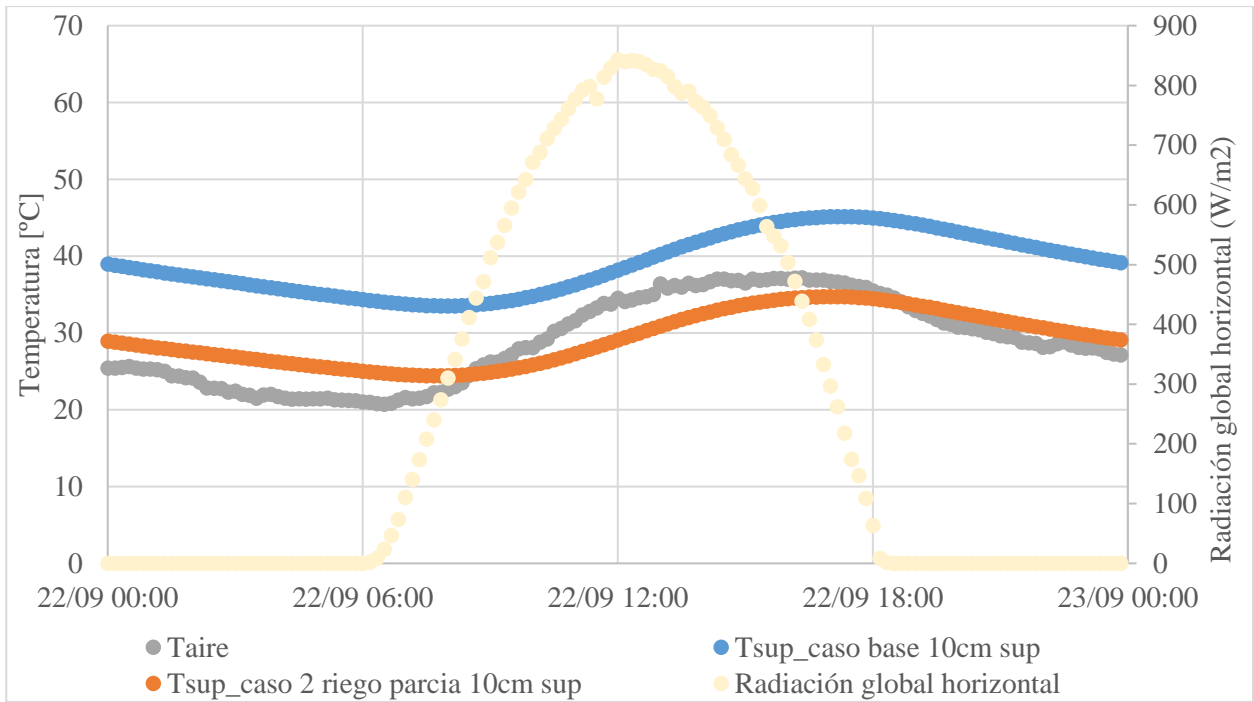


Figura 3-16. Temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del caso base y del caso 2 con riego parcial.

Se observa que hay una gran diferencia de temperatura entre la temperatura del interior del pavimento del caso 2 con riego parcial frente al caso base. Esto es beneficioso para la estructura del pavimento, ya que a mayor temperatura interior del pavimento los materiales y la estructura del pavimento se ven afectados.

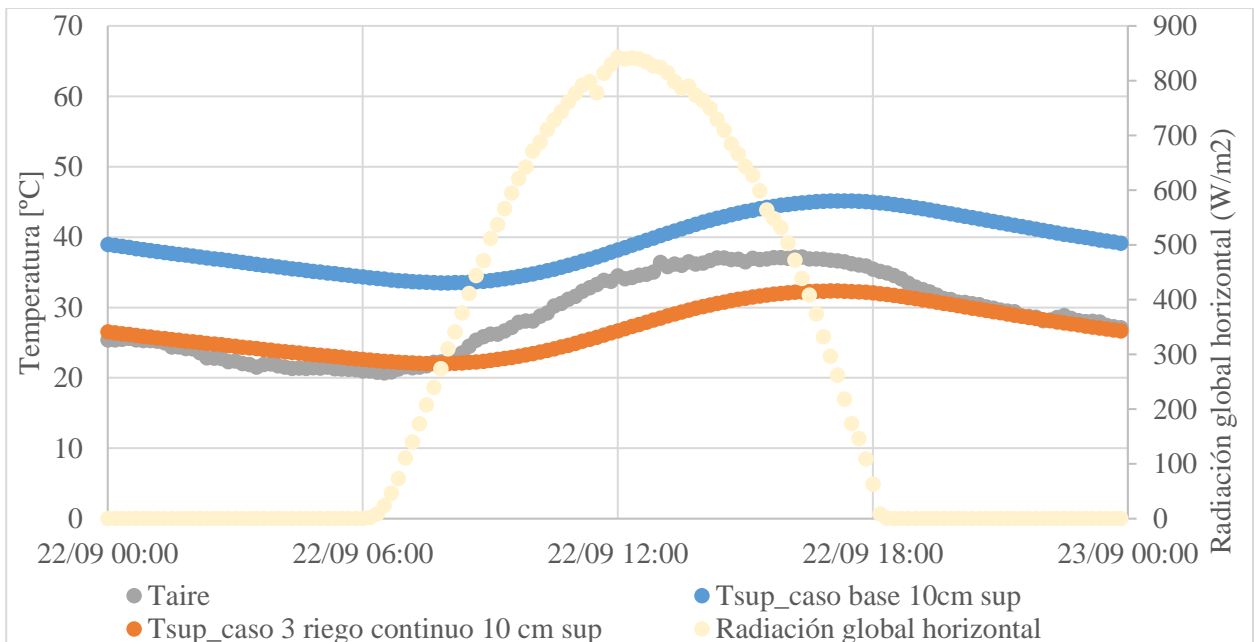


Figura 3-17. Temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del caso base y del caso 3 con riego continuo.

La tendencia es disminuir la temperatura conforme aumenta el riego en el pavimento. Se observa en la *Figura 3-16* y *Figura 3-17* como la distancia entre ambas líneas se incrementa conforme aumenta el riego, siendo esto una disminución de la temperatura interior entre ambos casos frente al caso base.

Concluyendo, el aumento del riego sobre un pavimento poroso es beneficioso para disminuir la temperatura del interior del pavimento y por tanto disminuir la inercia térmica de este en horas posteriores a la incidencia de la radiación.

3. Impacto en el fenómeno de la isla de calor urbana (UHI).

El impacto del riego en la reducción del fenómeno de la isla de calor urbana se va a analizar mediante el cálculo del decremento de temperatura superficial de los diferentes escenarios de riego, sin riego, riego parcial y riego continuo.

MITIGACIÓN UHI			
	Caso 1 sin riego	Caso 2 riego parcial	Caso 3 riego continuo
0:00	1.55	3.31	3.36
7:00	1.11	2.69	2.52
14:00	-2.10	1.60	7.89
19:00	1.74	3.55	4.19

Tabla 3-13. Reducción de la UHI respecto del caso base.

Se observa en la *Tabla 3-13*, los resultados obtenidos para cada uno de los tipos de riego utilizados para obtener un decremento de temperatura superficial frente al caso base. Se van a analizar dos horarios con diferente radiación global.

A las 14:00, cuando la radiación global incidente y la actividad urbana de la ciudad son altas, se dan dos tipos de escenarios dependiendo del tipo de riego. El caso 1 sin riego funciona como un pavimento con menor conductividad térmica y densidad que el pavimento correspondiente al caso base, por tanto, tiene un decremento de temperatura negativo, es decir se produce un incremento de este fenómeno lo que no es beneficioso. Para los casos 2 y 3, con riego parcial y con riego continuo respectivamente, el decremento es positivo y por tanto, se reduce el efecto de la UHI. La reducción es mayor conforme el riego aumenta.

4. Impacto en confort térmico.

Se evalúa el impacto del riego en el decremento de la temperatura de sensación.

Decremento Temperatura de Sensación (°C)									
	ZONA DE PASO						ZONA DE ESTANCIA		
	Dimensión Característica 4 m			Dimensión Característica 8 m			Dimensión Característica 30 m		
	Sin Riego	Riego Parcial	Riego Continuo	Sin Riego	Riego Parcial	Riego Continuo	Sin Riego	Riego Parcial	Riego Continuo
0:00	1.00	2.15	2.18	0.29	0.61	0.62	1.26	2.70	2.73
7:00	0.72	1.74	1.64	0.21	0.50	0.47	0.91	2.19	2.06
14:00	-1.36	1.04	5.11	-0.39	0.30	1.46	-1.71	1.31	6.43
19:00	1.13	2.30	2.72	0.32	0.66	0.78	1.41	2.89	3.41

Tabla 3-14. Reducción de la temperatura de sensación respecto del caso base.

Se observa en la *Tabla 3-14*, la importancia que tiene el riego en el decremento de temperatura de sensación en horas donde hay radiación (14:00) y en horas que es nula (19:00). Conforme aumenta el riego, pasa de un riego parcial a continuo, el decremento de la temperatura de sensación es más significativo. No interesa modificar un pavimento homogéneo no drenante (caso base) a un pavimento homogéneo drenante sin aplicar riego.

Afecta a todas las zonas descritas de igual manera, a mayor riego, mayor es el decremento de la temperatura de sensación. Por tanto, la utilización de la técnica de riego sobre los pavimentos es una opción totalmente viable.

3.3.2 Variación de la fracción de huecos con un riego parcial y un diámetro de partículas medio

En este apartado se analiza el impacto de la variación de la fracción de huecos en el cálculo de la temperatura superficial, temperatura en un punto a 10 cm de la superficie, la reducción del fenómeno de la isla de calor y el aumento del confort térmico. Se varía en tres valores, bajo, medio y alto y se compara con el caso base que no es poroso por tanto su fracción de huecos es nula.

Caso	Riego	Fracción de huecos (%)	Diámetro partículas
Base	Sin riego	Sin fracción de huecos	Sin diámetro partículas
Caso 1 porcentaje huecos bajo	Riego parcial	15	0.01
Caso 2 porcentaje huecos medio	Riego parcial	20	0.01
Caso 3 porcentaje huecos alto	Riego parcial	25	0.01

Tabla 3-15. Evaluación de casos variando la fracción de huecos.

La comparación se va a realizar en el siguiente orden: primero el pavimento poroso sin riego con el pavimento del caso base, después el pavimento poroso con riego parcial con el pavimento del caso base y por último el pavimento poroso con riego continuo con el pavimento del caso base.

1. Temperatura superficial.

Se analiza la influencia de la variación de la fracción de huecos de un pavimento con un valor bajo, medio y alto, en la temperatura superficial del pavimento con respecto al caso base.

Una aclaración importante es que no se va a desglosar cada uno de los casos frente al caso base, como se ha realizado a lo largo del documento, debido a que la variación de la fracción de huecos no es un factor determinante debido a que no al cambiar la fracción de huecos no varía la temperatura superficial.

A continuación se muestra la variación de la temperatura superficial respecto a la variación de la fracción de huecos.

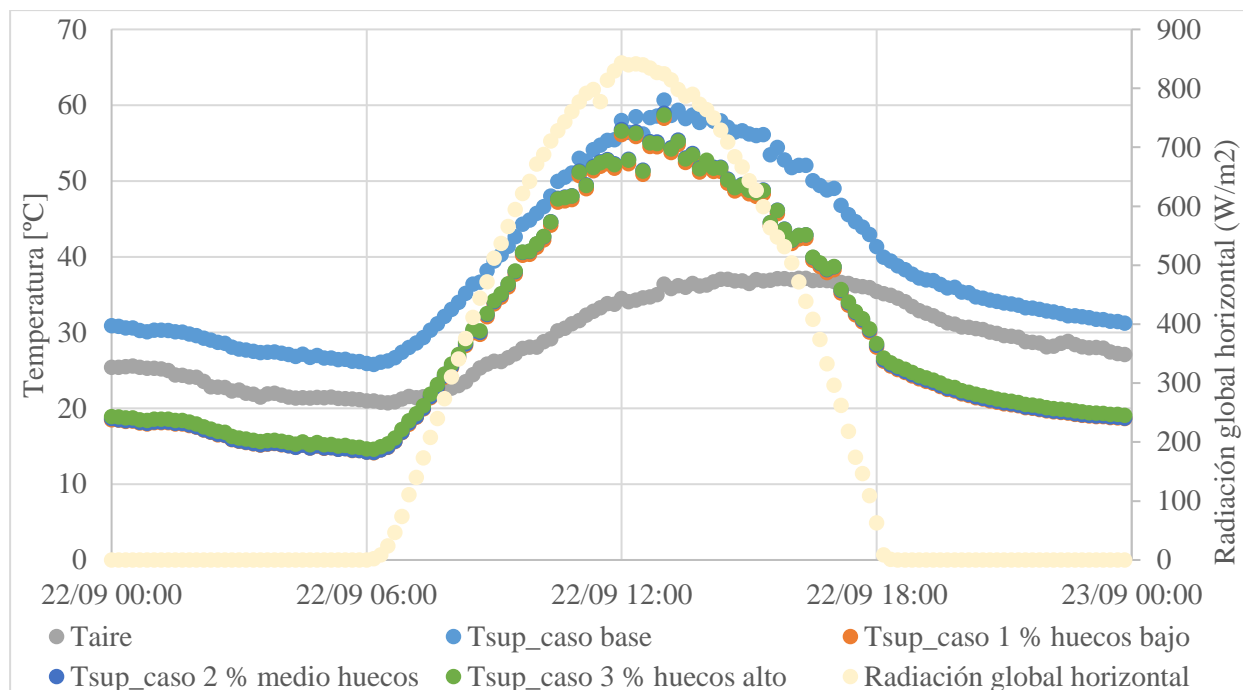


Figura 3-18. Comparación de la temperatura superficial del caso base y de los casos con variación de fracción de huecos

Como se observa en la *Figura 3-18*, los casos donde se ha variado la fracción de huecos no se diferencian a lo largo del día, sus temperaturas superficiales son muy próximas entre sí. Por tanto, se demuestra que la variación de la fracción de huecos en un pavimento no es determinante para obtener diferentes resultados de la temperatura superficial.

Además, la variación de la fracción de huecos en un pavimento no puede ser un valor alto, menor que 30%, debido a que la estructura del pavimento pierde resistencia, ya que el pavimento disminuye en conductividad térmica y densidad.

Para observar de forma más precisa el cambio de temperatura superficial, aunque sea mínimo, entre los casos de variación de fracción de huecos se muestra en la siguiente tabla las temperaturas promedio a diferentes horarios.

	Caso base	Caso 1 porcentaje huecos bajo	Caso 2 porcentaje huecos medio	Caso 3 porcentaje huecos alto
	Tsuperficial	Tsuperficial	Tsuperficial	Tsuperficial
0:00	30.92	18.48	18.65	18.92
7:00	28.05	17.91	18.08	18.35
14:00	58.42	52.31	52.48	52.75
19:00	37.20	23.89	24.06	24.33

Tabla 3-16. Temperatura promedios del caso base y de las alternativas.

La temperatura superficial aumenta, como se observa en la *Tabla 3-16*, conforme aumenta el porcentaje de huecos. Esto es debido a que la conductividad térmica y la densidad disminuyen, por lo que se obtienen mayores temperaturas promedio máximas y menores temperaturas promedio mínimas.

A las 14:00, se obtienen las temperaturas promedio máximas y se observa como los valores frente al caso base, 58.42°C , van aumentando conforme aumenta el porcentaje de huecos y por tanto disminuyen la conductividad térmica y la densidad. Para el caso 1 de porcentaje de huecos bajo, la temperatura superficial es de 52.31°C , para el caso 2 de porcentaje de huecos medio es de 52.38°C y para el caso 3 de porcentaje de huecos alto es 52.75°C .

A las 19:00, se obtienen las temperaturas promedio mínimas, pasa el efecto contrario, la temperatura superficial disminuye conforme la fracción de huecos aumenta.

2. Temperatura en un punto a 10 cm de la superficie.

Se analiza el impacto de la variación de huecos en el interior del pavimento. Como en los apartados anteriores, se quiere conseguir que la temperatura interior del pavimento sea menor que en el caso base, ya que es beneficioso para la estructura y materiales de este. Además, se consigue disminuir la inercia térmica propia del pavimento, otro aspecto beneficioso para obtener los objetivos del proyecto.

Al igual que en el apartado anterior, se van a representar las tres alternativas (porcentaje de huecos bajo, medio, alto) frente al caso base en la misma gráfica debido a que el cambio en la temperatura interior es prácticamente nulo entre los tres casos. Frente al caso base, si hay una diferencia de temperatura importante.

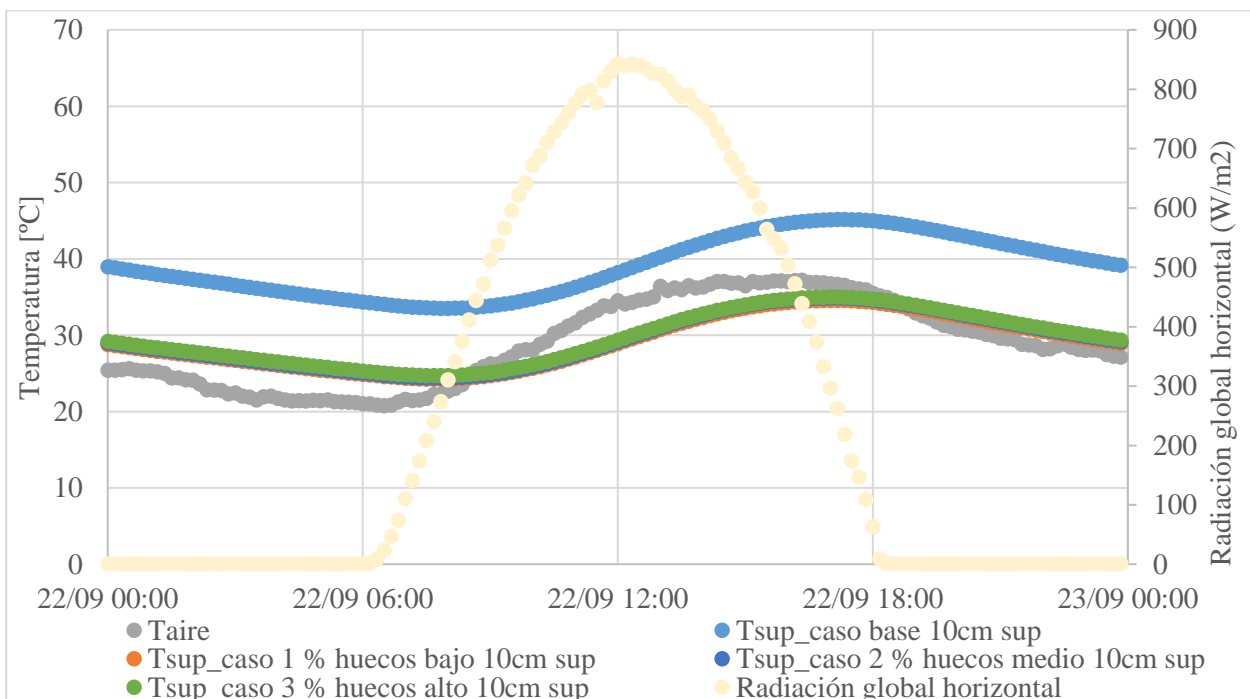


Figura 3-19. Comparación de la temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del caso base y de los casos con variación de la fracción de huecos.

Como se observa en la *Figura 3-19*, la diferencia de temperatura interior del pavimento al variar la fracción de huecos es casi nula, por tanto, para modificar la temperatura en el interior del pavimento no es un factor importante la variación de la fracción de huecos.

3. Impacto en el fenómeno de la isla de calor urbana (UHI).

Se va a evaluar el impacto en la mitigación de la UHI al variar la fracción de huecos manteniendo constante el riego (riego parcial) y el diámetro medio de las partículas (diámetro de valor medio).

	MITIGACIÓN UHI		
	Caso 1 porcentaje huecos bajo	Caso 2 porcentaje huecos medio	Caso 3 porcentajes huecos alto
0:00	3.36	3.31	3.24
7:00	2.74	2.69	2.62
14:00	1.65	1.60	1.53
19:00	3.60	3.55	3.48

Tabla 3-17. Reducción de la UHI respecto del caso base.

Como se observa en la *Tabla 3-17*, la mitigación del fenómeno de la isla de calor urbana es beneficioso, pero no está relacionado con la variación de la fracción de huecos en el pavimento, si no en el riego que se realiza sobre este. Como se muestra, la variación de la reducción de este fenómeno entre los casos es insignificante por tanto se demuestra que no es un parámetro crítico para el análisis de la mitigación de la UHI.

4. Impacto en confort térmico.

Se evalúa el impacto de la variación de la fracción de huecos en el decremento de la temperatura de sensación.

Decremento Temperatura de Sensación (°C)									
ZONA DE PASO						ZONA DE ESTANCIA			
Dimensión Característica 4 m			Dimensión Característica 8 m			Dimensión Característica 30 m			
Bajo Porcentaje e Huecos	Medio Porcentaje Huecos	Alto Porcentaje Huecos	Bajo Porcentaje Huecos	Medio Porcentaje Huecos	Alto Porcentaje Huecos	Bajo Porcentaje Huecos	Medio Porcentaje Huecos	Alto Porcentaje Huecos	
0:00	2.18	2.15	2.10	0.62	0.61	0.60	2.74	2.70	2.64
7:00	1.77	1.74	1.70	0.51	0.50	0.49	2.23	2.19	2.13
14:00	1.07	1.04	0.99	0.31	0.30	0.28	1.34	1.31	1.25
19:00	2.33	2.30	2.25	0.67	0.66	0.64	2.93	2.89	2.83

Tabla 3-18. Reducción de la temperatura de sensación respecto del caso base.

La variación del porcentaje de huecos en un pavimento no es clave a la hora de reducir la temperatura de sensación. Como se ha mencionado anteriormente, los tres casos tienen un riego parcial que hace que la temperatura de sensación disminuya. Se observa en la *Tabla 3-18*, que para todas las zonas el efecto es favorable, pero como se ha mencionado, es debido a la aplicación del riego en el pavimento.

Concluyendo, la aplicación de la variación de la fracción de huecos es una opción viable siempre que se aplique riego sobre la superficie.

3.3.3 Variación del diámetro de la partícula con un riego parcial y una fracción de huecos media.

En este apartado se va a variar el diámetro de la partícula, modificando la granulometría del pavimento,

manteniendo constante el riego, con un riego parcial, y la fracción de huecos, con una fracción de huecos media.

Se quiere analizar el impacto que tiene la variación del diámetro de la partícula en la temperatura superficial del pavimento, la temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del pavimento, la reducción del fenómeno de la isla de calor urbana y el aumento del confort térmico. Como se ha mencionado, se van a variar en tres valores, bajo, medio y alto que se muestra en la siguiente tabla.

Caso	Riego	Fracción de huecos (%)	Diámetro partículas
Base	Sin riego	Sin fracción de huecos	Sin diámetro partículas
Caso 1 diámetro bajo	Riego parcial	20	0.001
Caso 2 diámetro medio	Riego parcial	20	0.01
Caso 3 diámetro alto	Riego parcial	20	0.02

Tabla 3-19. Evaluación de casos variando el diámetro de la partícula.

1. Temperatura superficial.

Se analiza la influencia de la variación del diámetro de la partícula de un pavimento con un valor bajo, medio y alto, en la temperatura superficial del pavimento con respecto al caso base.

Una aclaración importante es que no se va a desglosar cada uno de los casos frente al caso base, como se ha realizado a lo largo del documento, debido a que la variación del diámetro de la partícula no es un factor determinante debido a que al cambiar el diámetro de la partícula no varía la temperatura superficial.

A continuación se muestra la variación de la temperatura superficial respecto a la variación del diámetro de la partícula.

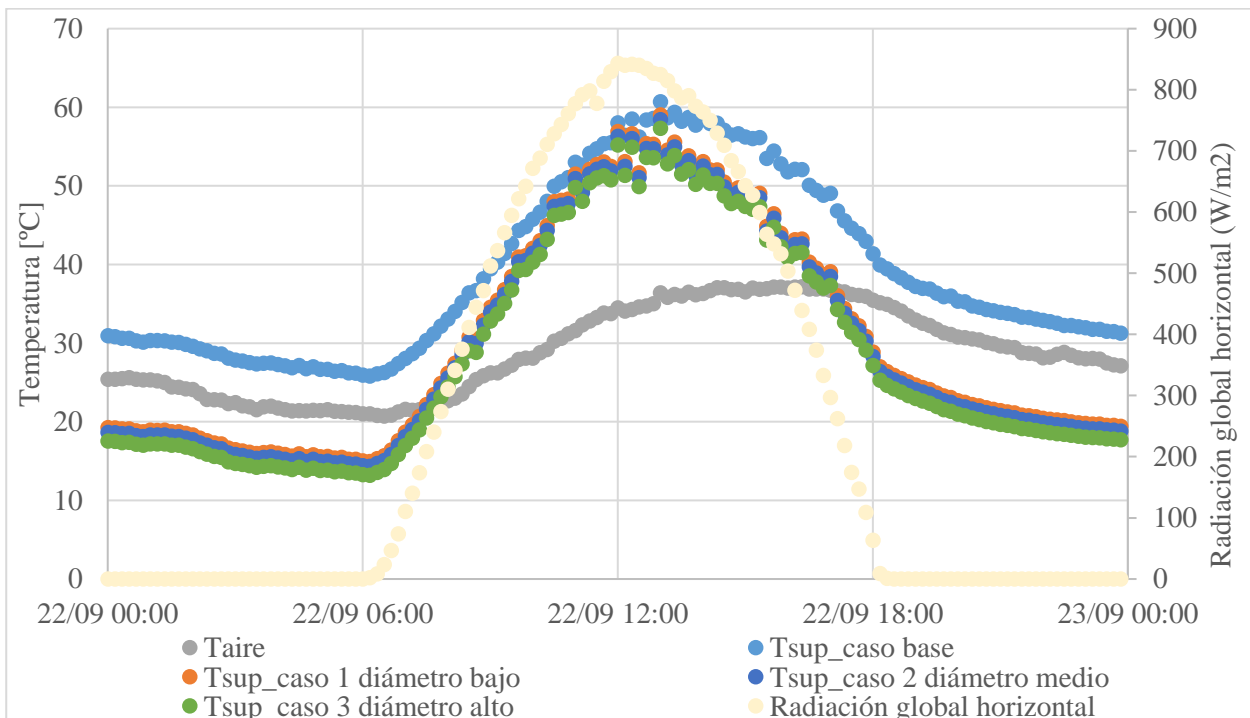


Figura 3-20. Comparación de la temperatura superficial del caso base y de los casos con variación del diámetro de la partícula.

Como se observa en la *Figura 3-20*, la temperatura superficial conforme aumenta el diámetro de la partícula es menor, aunque son diferencias de temperaturas pequeña. Realmente el efecto en la reducción de la temperatura superficial la provoca el efecto del riego parcial sobre el pavimento, el diámetro de la partícula no afecta apenas

en reducir la temperatura superficial.

Para observar este efecto, se informa de las temperatura promedios de los diferentes casos para facilitar la explicación y visión de este efecto.

	Caso base	Caso 1 diámetro bajo	Caso 2 diámetro medio	Caso 3 diámetro alto
	Tsuperficial	Tsuperficial	Tsuperficial	Tsuperficial
0:00	30.92	19.25	18.65	17.52
7:00	28.05	18.68	18.08	16.95
14:00	58.42	53.08	52.48	51.35
19:00	37.20	24.66	24.06	22.93

Tabla 3-20. Temperaturas promedio de los diferentes casos.

Como se ha mencionado anteriormente, se observa que la temperatura de la superficie disminuye, aunque no en un valor grande, conforme aumente el diámetro de la partícula. Como aumenta siempre, en horarios con radiación nula y con radiación incidente, se analizará el aumento de la temperatura superficial en el horario de mayor actividad, 14:00.

A las 14:00, la temperatura superficial del caso base, correspondiente a un pavimento convencional no poroso, es de 58.42°C, la temperatura superficial del caso 1 con un diámetro de partícula bajo es de 53.08°C, disminuyendo la temperatura superficial frente al caso base, pero aumentando el diámetro de partícula se consigue una reducción mayor. Para el caso 2 con un diámetro de partícula medio, la temperatura superficial es de 52.48°C y caso 3 con un diámetro de partícula alto, la temperatura superficial es de 51.35°C.

Concluyendo, se demuestra como disminuye la temperatura superficial aumentando el diámetro de la partícula debido a que aumenta la permeabilidad, filtrándose mayor cantidad de agua en la capa exterior como se observa en la *Ecuación 14*.

- Temperatura en un punto a 10 cm de la superficie.

Se analiza el impacto de la variación del diámetro de partícula en la temperatura del interior del pavimento. Como en los apartados anteriores, se quiere conseguir que la temperatura interior del pavimento sea menor que en el caso base, ya que es beneficioso para la estructura y materiales de este. Además, se consigue disminuir la inercia térmica propia del pavimento, otro aspecto beneficioso para obtener los objetivos del proyecto.

Al igual que en el apartado anterior, se van a representar las tres alternativas (diámetro de partícula bajo, medio, alto) frente al caso base en la misma gráfica debido a que el cambio en la temperatura interior es prácticamente nulo entre los tres casos. Frente al caso base, si hay una diferencia de temperatura importante.

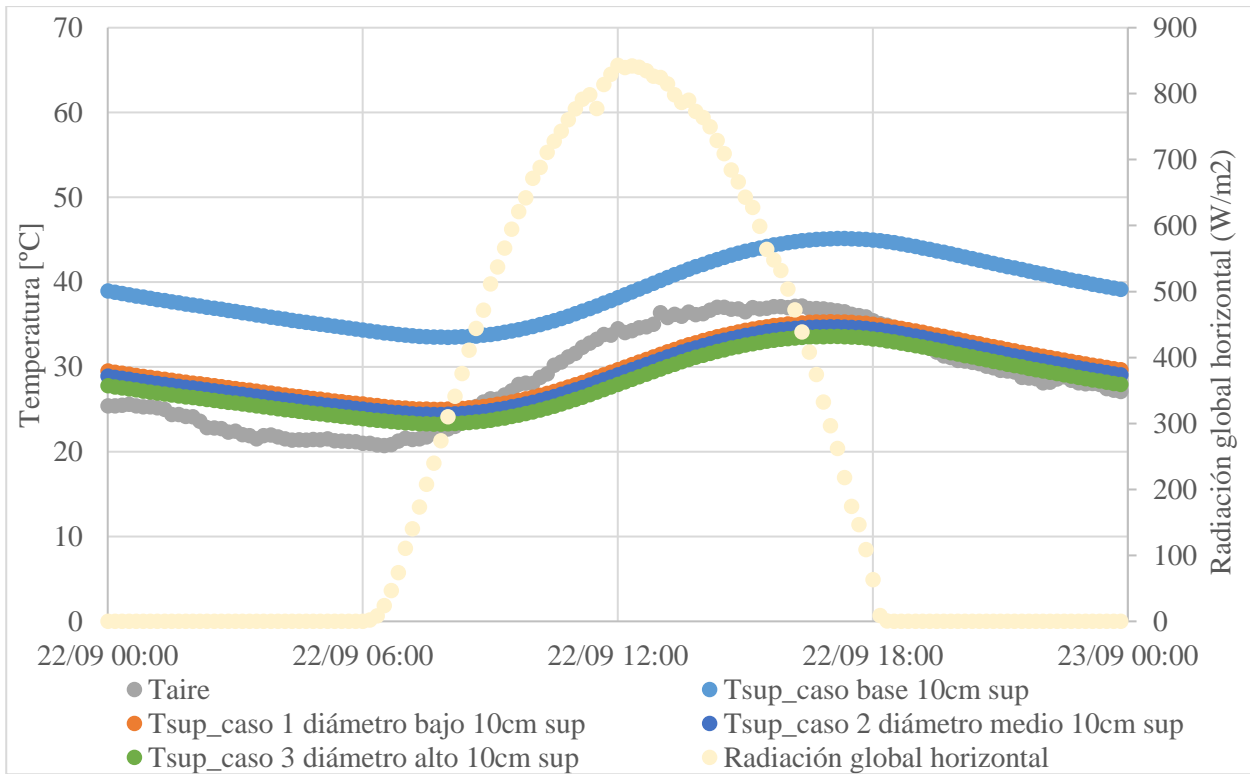


Figura 3-21. Comparación de la temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del caso base y de los casos con variación del diámetro de partícula.

Se observa en la *Figura 3-21*, la temperatura en el interior del pavimento disminuye conforme aumenta el diámetro de la partícula, por tanto, el aumento de la partícula con un riego parcial y una fracción de huecos media es beneficioso para la disminución de la temperatura interior. La disminución de la temperatura interior del pavimento es beneficioso para los materiales que componen la estructura del pavimento y para disminuir la inercia térmica de este. Al aumentar el diámetro de la partícula, aumenta la permeabilidad que es la cantidad de fluido que se filtra a través de un pavimento, por lo que reduce la temperatura interior de este, como se observa en la *Ecuación 14*.

3. Impacto en el fenómeno de la isla de calor urbana (UHI).

En este apartado, se va a evaluar el impacto de la variación del diámetro medio de la partícula con la reducción del fenómeno de la isla de calor urbana.

MITIGACIÓN UHI			
	Caso 1	Caso 2	Caso 3
0:00	3.15	3.31	3.62
7:00	2.53	2.69	3.00
14:00	1.44	1.60	1.91
19:00	3.39	3.55	3.86

Tabla 3-21. Reducción de la UHI respecto del caso base.

No se va a diferenciar en horas debido a que el decremento de temperatura superficial siempre es positivo, dando lugar a una reducción del efecto de la UHI de todos los casos en todos los horarios analizados. Se observa que

el decremento de mayor conforme el diámetro medio de la partícula aumenta, debido a que aumenta la permeabilidad y por tanto la cantidad de agua que se filtra en el pavimento lo que es muy beneficioso para la reducción de la temperatura superficial.

4. Impacto en confort térmico.

Se evalúa el impacto de variar el diámetro de la partícula en el decremento de la temperatura de sensación.

Decremento de la Temperatura de sensación (°C)									
ZONA DE PASO						ZONA DE ESTANCIA			
Dimensión Característica 4 m			Dimensión Característica 8 m			Dimensión Característica 30 m			
Partícula Pequeña	Partícula Media	Partícula Grande	Partícula Pequeña	Partícula Media	Partícula Grande	Partícula Pequeña	Partícula Media	Partícula Grande	
0:00	2.1	2.35	2.54	0.6	0.67	0.73	2.64	2.95	3.19
7:00	1.7	1.94	2.14	0.49	0.56	0.61	2.13	2.44	2.69
14:00	0.99	1.24	1.43	0.28	0.35	0.41	1.25	1.56	1.8
19:00	2.25	2.5	2.69	0.64	0.71	0.77	2.83	3.14	3.39

Tabla 3-22. Reducción de la temperatura de sensación respecto del caso base.

El aumento del diámetro medio de la partícula de un pavimento poroso está relacionado directamente con la permeabilidad. Al aumentar el diámetro de la partícula, aumenta la permeabilidad.

Se observa en la *Tabla 3-22*, que para cualquier tramo horario el aumento del diámetro de la partícula es favorable, además de que se aplica un riego parcial. Al aumentar la permeabilidad, la cantidad de agua que se filtra es mayor lo que produce una disminución de la temperatura superficial y por consiguiente, un decremento de la temperatura de sensación.

Concluyendo, la técnica de aumentar el diámetro de la partícula es una opción viable pero siendo necesario un riego sobre la superficie del pavimento, ya que si se aumenta la permeabilidad se debe aplicar riego.

3.4. Pavimentos heterogéneos

Los pavimentos heterogéneos son pavimentos cuya capa exterior (superficie) está compuesta por diferentes materiales, al contrario que los pavimentos homogéneos cuya capa exterior está formada por el mismo material.

En este documento se lleva a cabo una distribución de dientes de sierra en la construcción de los pavimentos heterogéneos. La finalidad es observar como influye esta distribución en la reducción de la temperatura superficial, la temperatura en el interior del pavimento, la mitigación del fenómeno de la isla de calor urbana y el aumento del confort térmico. A continuación, se muestra el tipo de pavimento con esta distribución.



Figura 3-22. Pavimento con variación geométrica de la superficie heterogénea.

En primer lugar, se evalúa la influencia de variar la superficie heterogénea del pavimento. Se realizan tres geometrías diferentes del pavimento base, en los cuales se ha visto modificada la superficie con una distribución de menos a más significativa y observar si la distribución es beneficiosa para los objetivos.

Por otro lado, se analiza el impacto del riego con una geometría de la superficie heterogénea con dos tipos de riego. Ambos riego son parciales con la diferencia de las horas de riego. En un primer caso, el tramo horario está comprendido entre las 11:00-13:00 y el segundo caso de 11:00-17:00. Se aumenta las horas de riego del primer caso al segundo caso en la horas más críticas del día, ya que la radiación global incidente y la actividad urbana son altas.

A continuación, se exponen todos los casos correspondientes a pavimentos heterogéneos que se han analizado.

			Caso	Espesor (m)	Calor específico (Kj/KgK)	Conductividad térmica (W/mK)	Densidad (Kg/m ³)	Reflectancia	Absortividad	Emisividad	Diámetro partícula (m)	Permeabilidad (1/m ²)	%huecos
Geometría 2	Heterogéneos	Drenantes	Hormigón ligero	6	0.89	0.6	1200	0.15	0.85	0.84			
Geometría 2	Heterogéneos	Drenantes	Césped y grava	6	0.89	0.6	1200	0.15	0.85	0.84	7	1.9851E-10	58772.64

Tabla 3-23. Propiedades de las diferentes superficies que componen la superficie heterogénea.

TÉCNICAS	CASO 1	CASO 2	CASO 3
Variación de la geometría de la superficie heterogénea	Baja variación de la geometría de la superficie heterogénea.	Media variación de la geometría de la superficie heterogénea.	Alta variación de la geometría de la superficie heterogénea.
Aumento del tramo horario de riego parcial sobre el pavimento	Tramo de riego parcial de 11:00-13:00	Tramo de riego parcial de 11:00-17:00	

Tabla 3-24. Técnicas utilizadas para evaluar su impacto sobre la temperatura del pavimento.

3.4.1 Influencia de la distribución de la superficie exterior del pavimento

Como se ha mencionado anteriormente, a continuación se analiza la influencia geométrica para este tipo de pavimentos. Para ello se evalúan las tres configuraciones que se muestran en la siguiente tabla.




CASO 1	CASO 2	CASO 3
		

Tabla 3-25. Tipos de variación geométrica de la superficie heterogénea.

Se observa en la *Tabla 3-25*, la diferencia en la distribución de la superficie de cada uno de los pavimentos que se analizan para obtener un resultado del impacto de esta técnica en los diferentes objetivos.

Los materiales que componen cada una de las superficies son hormigón, césped y grava o arena.

En esta primera evaluación no se va a tener en cuenta el riego del pavimento. El pavimento únicamente cambia la distribución de la superficie exterior (heterogénea).

- Temperatura superficial.

Se analiza el impacto que tiene la variación de la geometría de la superficie heterogénea del pavimento, ver los beneficios o inconvenientes que tiene la disposición de esta técnica en el pavimento.

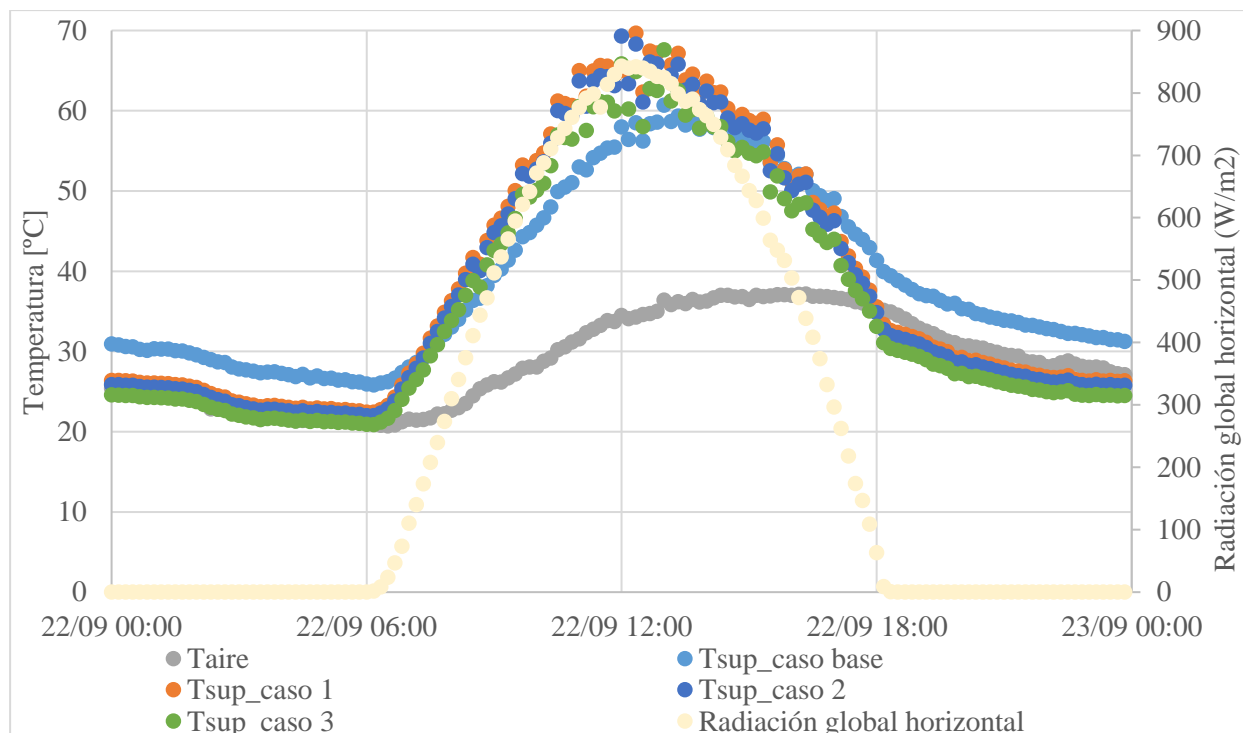


Figura 3-23. Comparación de la temperatura superficial del caso base y de los tres tipos de distribución con variación geométrica de la superficie heterogénea.

Se observa en la *Figura 3-23*, la poca variación que sufre la superficie de los pavimentos en su temperatura superficial con el cambio de la distribución. Por el contrario, en horas donde la radiación global incidente es mayor, horas críticas, la temperatura superficial del pavimento aumenta y en horas donde la radiación es nula, la temperatura superficial disminuye. Esto es debido a una mayor variación de la geometría de la superficie heterogénea, la superficie exterior está dividida en un mayor número de adoquines pequeños, lo que promueve una mayor transferencia de calor por conducción entre el hormigón y el césped siendo esto, como se puede observar, favorable para la disminución de la temperatura superficial.

Se observa de forma más clara en la siguiente tabla de temperaturas promedio.

	Caso base	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	Tsuperficial	Tsuperficial	Tsuperficial	Tsuperficial
0:00	30.92	26.39	25.86	24.57
7:00	28.05	27.29	26.74	25.40
14:00	58.42	63.70	62.42	59.30
19:00	37.20	31.56	30.93	29.39

Tabla 3-26. Temperaturas promedio de los diferentes casos.

Concluyendo, el cambio en la distribución de la superficie exterior del pavimento sin aplicar ningún tipo de riego es favorable en comparación con el mismo tipo de pavimento (heterogéneo) con menor número de adoquines, pero desfavorable si se compara con el pavimento del caso base.

- Temperatura en un punto a 10 cm de la superficie.

La temperatura en un punto interior del pavimento se analiza para obtener resultados de como varía la temperatura media debido a que es un inconveniente para la estructura del pavimento un aumento de esta temperatura.

A continuación, se muestra la variación de la temperatura interior (a 10 cm de la superficie) del pavimento aplicando los tres tipos de distribuciones.

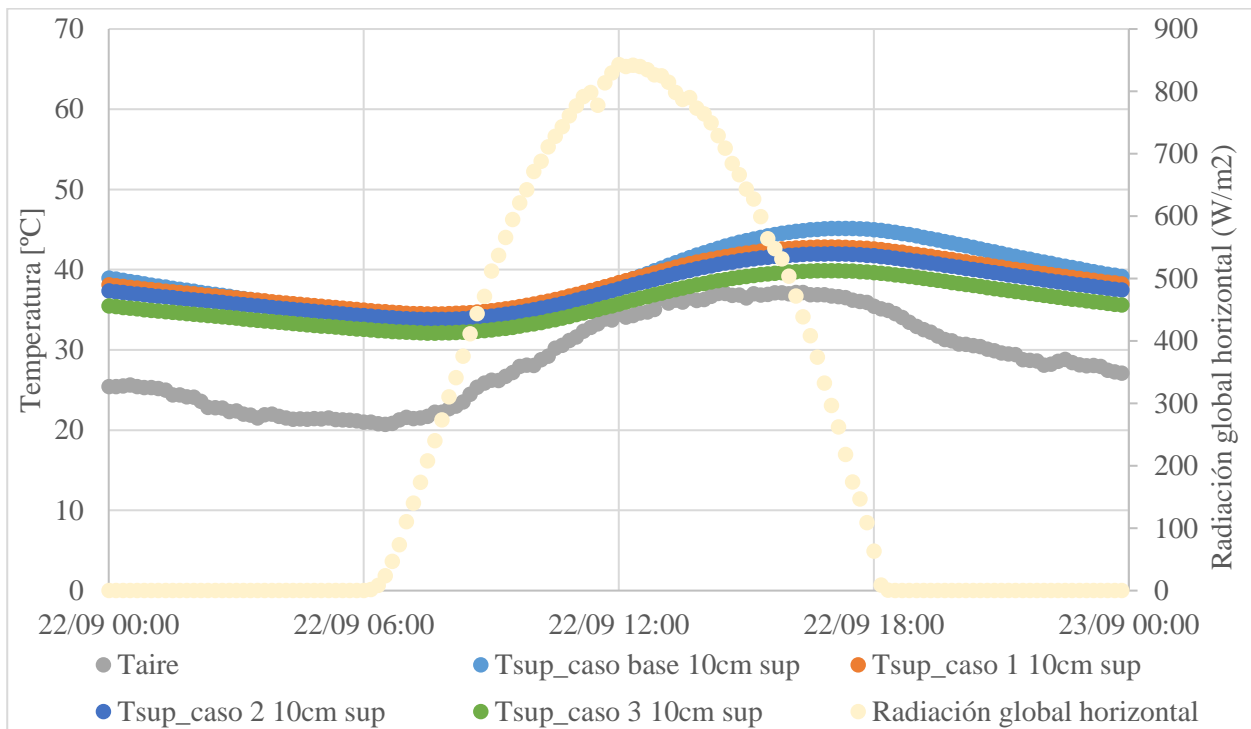


Figura 3-24. Comparación de la temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del caso base y de los casos con variación geométrica de la superficie heterogénea.

Se observa en la *Figura 3-24*, que se produce una disminución de la temperatura interior del pavimento conforme aumenta la variación de la geometría de la superficie heterogénea.

La presencia de arena y césped en la geometría de la superficie heterogénea reduce la absorción por parte del terreno y la temperatura interior media disminuye. Esto es beneficioso para la estructura y materiales del pavimento, ya que un aumento de la temperatura media del interior puede conllevar problemas en el pavimento.

-Mitigación del fenómeno de la isla de calor urbano (UHI).

El impacto de la aplicación de esta técnica en la mitigación de la UHI se va a analizar a continuación.

	MITIGACIÓN UHI		
	Caso 1	Caso 2	Caso 3
0:00	1.22	1.37	1.71
7:00	0.21	0.35	0.71
14:00	-1.42	-1.08	-0.24
19:00	1.52	1.69	2.11

Tabla 3-27. Reducción de la UHI respecto del caso base.

Se observa en la *Tabla 3-27*, que la reducción de este fenómeno se logra en horas donde la radiación incidente es nula (19:00) y se incrementa en horas donde la radiación incidente es alta (14:00).

A las 14:00, horas donde la radiación incidente es alta, no se consigue mitigar el efecto de la UHI, se produce un incremento de este. Conforme aumenta la distribución en dientes de sierra el incremento de la UHI se va

reduciendo pero no se consigue un decremento. Para el caso 1 de baja distribución el incremento es -1.42, para el caso 2 media distribución es -1.08 y para el caso 3 alta distribución es -0.24. Esto es debido a la transferencia de calor que se produce desde una superficie a otra, disminuyendo la temperatura del cómputo general.

A las 19:00, horas donde la radiación es nula, se consigue un decremento de la UHI con respecto al caso base. El decremento es mayor conforme mayor es la distribución del pavimento. Para el caso 1 baja distribución es de 1.52, para el caso 2 media distribución es de 1.69 y para el caso 3 alta distribución es de 2.11.

4. Impacto en confort térmico.

Se evalúa el impacto de variar la geometría de la superficie heterogénea en el decremento de la temperatura de sensación.

Decremento Temperatura de Sensación (°C)									
ZONA DE PASO							ZONA DE ESTANCIA		
Dimensión Característica 4 m			Dimensión Característica 8 m			Dimensión Característica 30 m			
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 1	Caso 2	Caso 3
0:00	0.79	0.88	1.11	0.23	0.25	0.32	1.00	1.11	1.40
7:00	0.13	0.23	0.46	0.04	0.07	0.13	0.17	0.29	0.58
14:00	-0.92	-0.70	-0.15	-0.26	-0.20	-0.04	-1.16	-0.88	-0.19
19:00	0.99	1.10	1.37	0.28	0.31	0.39	1.24	1.38	1.72

Tabla 3-28. Reducción de la temperatura de sensación respecto del caso base.

Se observa en la *Tabla 3-28*, que el incremento de la temperatura de sensación a las 14:00, al igual que la mitigación de UHI, disminuye conforme la variación geométrica de la superficie heterogénea es más notable. A las 19:00, se produce un decremento de la temperatura de la temperatura de sensación.

Esto es debido a la reducción de absortividad que proporciona el césped y la arena en el pavimento y por tanto, almacena menos calor en el interior del pavimento.

3.4.2 Variación de los tramos horario de riego ambos con riego parcial y con una alta variación geométrica de la superficie heterogénea (Caso 3)

Se evalúan dos tramos horarios de riego, ambos con riego parcial, y con una distribución alta de dientes de sierra. Los tramos horarios que se evalúan son dos: en el primer caso, el tramo horario es de 11:00-13:00 y en el segundo caso, el tramo horario es de 11:00-17:00.

El riego es el principal factor de variación de los parámetros que se analizan, es determinante a la hora de reducir la temperatura superficial.

Se analizan la reducción de la temperatura superficial, la temperatura en un punto a 10 cm de la superficie, la reducción del fenómeno de la isla de calor urbana y el incremento del confort térmico.

1. Temperatura superficial.

El efecto del riego en un pavimento es beneficioso respecto a la reducción de su temperatura. Se van a realizar dos tipos de riego parcial, cada uno con un tramo de riego diferente. En el primer caso, se realiza un riego con un tramo horario de 11:00 a 13:00 y en el segundo caso, se realiza un riego con un tramo horario de 11:00-17:00.

En primer lugar se analiza el caso de riego de 11:00 a 13:00 y seguidamente el caso de riego de 11:00 a 17:00.

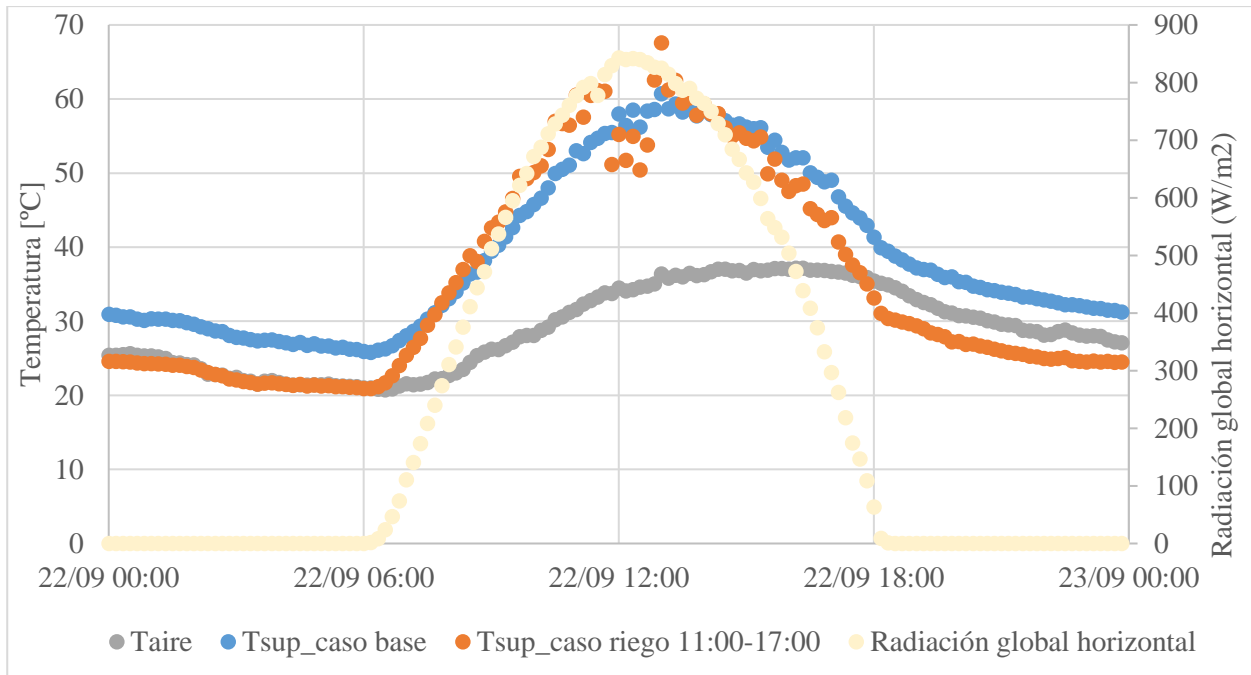


Figura 3-25. Comparación de la temperatura superficial del caso base y del caso de riego de 11:00 a 13:00.

Se observa en la *Figura 3-25*, la discontinuidad que se produce en el tramo horario donde se realiza el riego del pavimento y como se reduce la temperatura superficial del pavimento. El riego se produce en horas críticas, que es donde aumenta la radiación incidente además de la actividad urbana en la ciudad.

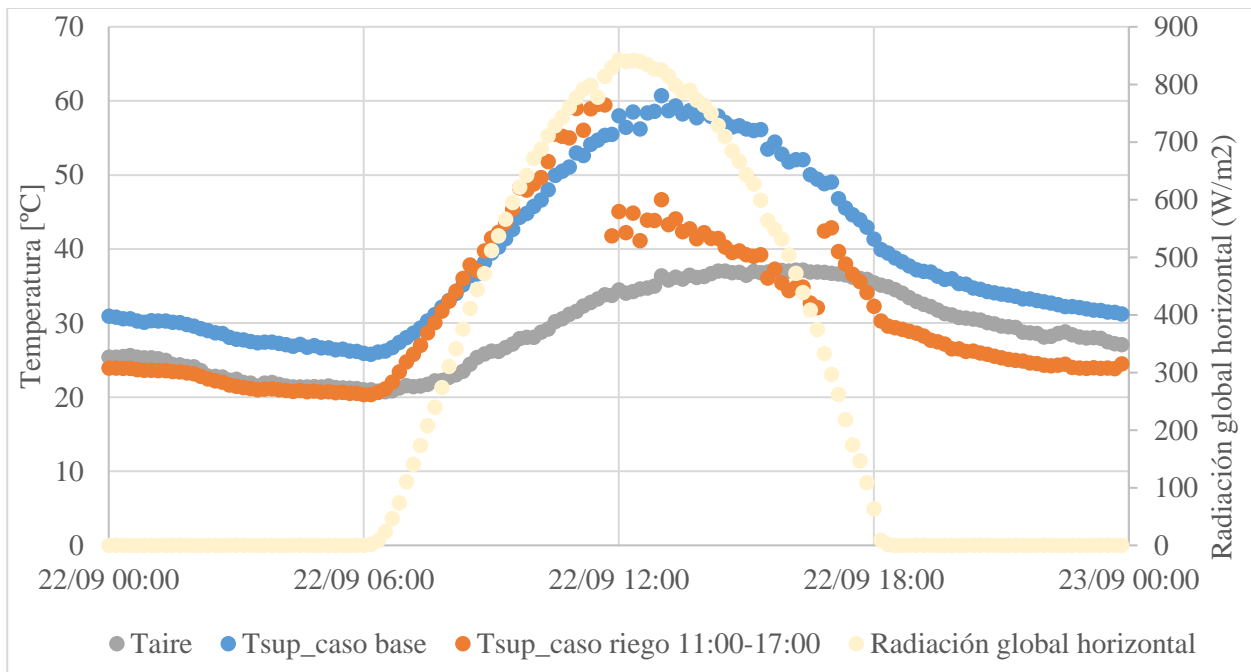


Figura 3-26. Comparación de la temperatura superficial del caso base y del caso de riego de 11:00 a 17:00.

Se muestra en la *Figura 3-26*, que al aumentar el riego, se pasa de realizar un riego de 11:00 -13:00 a un riego de 11:00 a 17:00, y aumentando así la reducción de la temperatura superficial. Se observa que la discontinuidad en el tramo que se realiza el riego es mayor que en el caso anterior debido al aumento de las horas de riego.

La diferencia entre ambos casos se va observa de forma más clara y visible en la siguiente tabla.

	Caso base	Caso riego de 11:00-13:00	Caso riego de 11:00-17:00
	Tsuperficial	Tsuperficial	Tsuperficial
0:00	30.92	24.57	23.94
7:00	28.05	25.40	24.75
14:00	58.42	59.30	42.22
19:00	37.20	29.39	28.63

Tabla 3-29. Temperaturas promedio de lo diferentes casos.

Se observa en la *Tabla 3-29*, el impacto que tiene el aumento del riego en la disminución de la temperatura superficial. A las 14:00, en el riego de 11:00-13:00, no tiene un impacto beneficioso, ya que aumenta la temperatura en dicha hora pero si se observa el caso de riego de 11:00-17:00 se corrige de forma satisfactoria, disminuyendo la temperatura superficial del pavimento. A las 19:00, el riego que se ha aplicado ha disminuido la temperatura interior del pavimento que posteriormente por inercia térmica enfría la superficie exterior.

Concluyendo, se observa que la técnica de riego disminuye la temperatura superficial.

- Temperatura en un punto a 10 cm de la superficie.

La temperatura en un punto interior del pavimento se analiza para obtener resultados de como varía la temperatura media debido a que es un inconveniente para la estructura del pavimento un aumento de esta temperatura.

A continuación, se muestra la variación de la temperatura interior (a 10 cm de la superficie) del pavimento aplicando dos tipos de riego parcial. En primer lugar, se compara el caso base con el caso de riego de 11:00 a 13:00 y seguidamente el caso base con el caso de riego de 11:00-17:00.

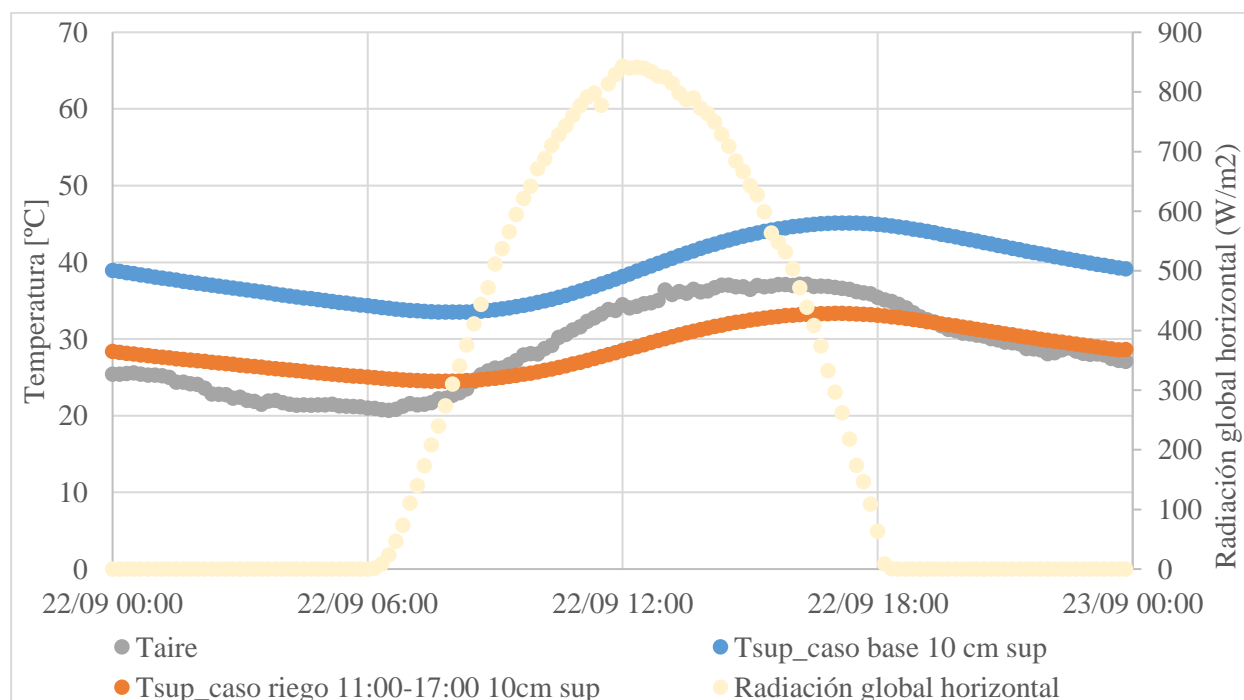


Figura 3-27. Comparación de la temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del caso base y del caso con un riego de 11:00 a 13:00.

Se observa que se produce una gran variación en la temperatura interior del pavimento con la aplicación de riego sobre este. El agua de riego se filtra en el interior del pavimento lo que hace que la temperatura interior se mantenga a una temperatura menor comparada con un pavimento que no se riega.

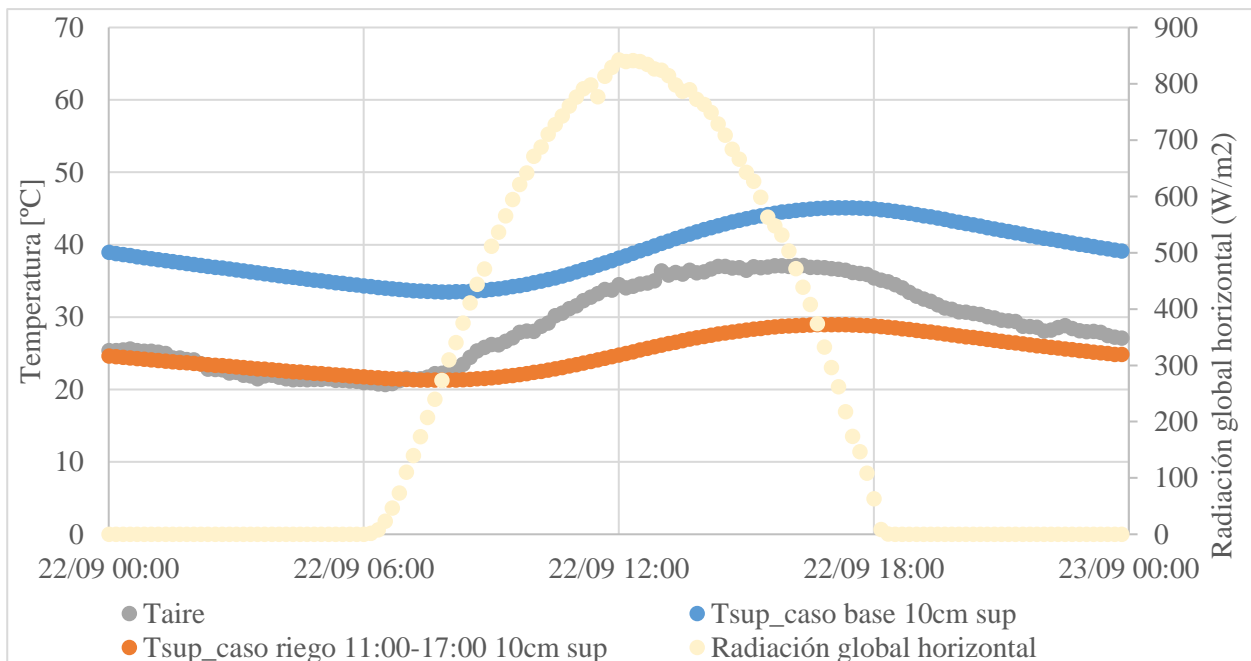


Figura 3-28. Comparación de la temperatura en un punto a 10 cm de la superficie del caso base y del caso con un riego de 11:00 a 17:00.

Como se observa, conforme el tramo horario de riego se amplía, la temperatura del interior del pavimento se reduce, lo que es beneficioso para la estructura de este.

Concluyendo, la técnica de riego es beneficiosa para reducir la temperatura interior del pavimento y para las propiedades de este, que no se ven reducidas por un aumento de la temperatura que es perjudicial. Además, no se aprecia una discontinuidad en los tramos en los horarios de riego debido a la inercia térmica que tiene el pavimento en su interior, por tanto, la temperatura interior es una temperatura media, aunque se haya calculado en un punto a 10 cm de la superficie.

3. Mitigación del fenómeno de la isla de calor urbana (UHI).

Se analiza el impacto del aumento del tramo horario del riego en la mitigación de la UHI.

	MITIGACIÓN UHI	
	Caso 1 riego 11:00-13:00	Caso 2 riego 11:00-17:00
0:00	1.71	1.89
7:00	0.71	0.89
14:00	-0.24	4.37
19:00	2.11	2.32

Tabla 3-30. Reducción de la UHI respecto del caso base.

Se observa en la *Tabla 3-30*, que el efecto del riego es favorable para reducir la temperatura superficial y por tanto, mitigar el efecto de la UHI.

Se han analizado dos tipos de tramos horarios de riego, uno de 11:00-13:00 y otro de 11:00-17:00, cuya finalidad es ver como aumentando el tiempo de riego el beneficio en horas críticas (horas de alta incidencia de radiación solar y actividad urbana) aumenta.

A las 14:00, hora donde la radiación solar es alta, utilizando el riego en un horario de 11:00-13:00 no se consigue mitigar el efecto de la UHI en horas siguientes (-0.24) y si se aumenta el riego en un horario de 11:00-17:00 el efecto se consigue reducir significativamente (4.37).

Por otro lado, a las 19:00 (hora donde la radiación es nula), el efecto del riego hace efecto debido a que el agua se ha filtrado en el interior del pavimento, ha disminuido su calor y este en horas posteriores, transfiere el calor por conducción a la superficie exterior enfriándola. Para el caso de riego de 11:00-13:00 se obtiene una reducción del 2.11 y para el caso de riego de 11:00-17:00 una reducción de 2.32.

Concluyendo, conforme aumenta el riego de una superficie, el beneficio respecto a la mitigación del efecto de la isla de calor urbana es totalmente favorable.

4. Impacto en confort térmico.

Se evalúa el impacto que tiene aumentar el tramo horario del riego en el decremento de la temperatura de sensación.

	Decremento Temperatura de Sensación (°C)					
	ZONA DE PASO				ZONA DE ESTANCIA	
	Dimensión Característica 4 m		Dimensión característica 8 m		Dimensión Característica 30 m	
	Riego 11:00-13:00	Riego 11:00-17:00	Riego 11:00-13:00	Riego 11:00-17:00	Riego 11:00-13:00	Riego 11:00-17:00
0.00	1.11	1.22	0.32	0.35	1.40	1.54
0.29	0.46	0.58	0.13	0.17	0.58	0.73
0.58	-0.15	2.83	-0.04	0.81	-0.19	3.56
0.79	1.37	1.50	0.39	0.43	1.72	1.89

Tabla 3-31. Reducción de la temperatura de sensación respecto del caso base.

Se observa, al igual que en el apartado anterior, que para cada zona de estancia el riego de 11:00-13:00 no es suficiente para disminuir la temperatura de sensación en horas críticas (14:00). Conforme aumenta el horario de riego, la temperatura de sensación decrece. Hay que tener en cuenta la disponibilidad en cada zona de si se puede llevar a cabo el riego, debe tener un punto accesible de agua y no debe encontrarse mucha multitud de gente en la zona.

Concluyendo, el riego de las superficies de zonas de paso y de zonas de estancia es totalmente beneficioso para el decremento de la temperatura de sensación.

4 BASE DE DATOS Y VINCULACIÓN A SOLUCIONES REALES

Las diversas técnicas analizadas y evaluadas en este proyecto se han recopilado en una base de datos.

en dicha base de datos se han recogido valores de la diferencia de temperatura superficial, mitigación del fenómeno de la isla de calor urbana (UHI), decremento de la temperatura de sensación en los tres tipos de estancia descritos a las 14:00 y a las 19:00. la finalidad de presentar los valores a esta hora es debido a que a las 14:00 se evalúa el confort térmico y a las 19:00 se evalúa la mitigación de la UHI.

Además, se han comparado las técnicas simuladas en el documento con tipos de pavimentos reales mediante links e imágenes. todo esto se encuentra recogido en el anexo tipo excel que complementa a la memoria del trabajo fin de grado.

5 CONCLUSIONES

El objetivo de este documento es evaluar diferentes procedimientos de reducción de la temperatura superficial, así como la del interior del pavimento (los resultados se han obtenido en un punto a 10 cm de la superficie). Esta reducción conlleva a su vez a la mitigación de dos fenómenos: la isla de calor urbana (UHI) y la temperatura de sensación.

Se han estudiado diversas técnicas variando parámetros térmicos, parámetros de la estructura (porosidad) y la geometría de la superficie exterior del pavimento base, del cuál se ha partido para determinar si las técnicas son beneficiosas o no.

Por un lado, los pavimentos homogéneos no drenantes han sido modificados en la conductividad térmica y en la absorptividad de su superficie exterior. En el primer caso, se ha comprobado que no es una técnica beneficiosa para los objetivos que se buscan, al contrario que el cambio de la absorptividad, donde sí se han obtenido resultados satisfactorios.

Por otro lado, en los pavimentos homogéneos drenantes se ha variado tanto el porcentaje de huecos como el diámetro de la partícula, además de aplicar riego sobre su superficie exterior. Este último procedimiento se considera determinante en este tipo de pavimentos, consiguiendo siempre resultados favorables, independientemente de que el riego sea parcial o continuo.

Por último, en los pavimentos heterogéneos se han analizado dos aspectos, el impacto de la variación de la geometría de la superficie exterior y el aumento del tramo horario de riego sobre esta. En el primero, se ha comprobado que los resultados mejoran al aumentar la distribución, pero no logran los objetivos debido a que no se aplica riego. Respecto al segundo caso, el aumento del tramo horario donde se aplica el riego y una alta distribución en la geometría de la superficie dan lugar a resultados beneficiosos.

ANEXO

En este apartado, se va a proceder a la explicación del procedimiento de cálculo.

Las partes que se utilizan son, por orden, ``GEOMETRY``, ``MESH`` y ``FLUENT``.

1. GEOMETRY.

En este apartado, se describe la geometría del pavimento del cuál se va a realizar el estudio.

Hay dos pestañas principales:

- **Modeling:** En esta pestaña se definen los denominados ``Sketch`` que son las diferentes geometrías que hemos definido y que componen el pavimento. Además, se define el plano de dibujo, en nuestro caso es el plano XY.
- **Sketching:** Dentro de esta pestaña hay varios apartados, dos de los cuales se van a utilizar para la resolución de los casos y de los cuales se hablará a continuación.

Los pasos que se han llevado a cabo son los siguientes:

- Hay diferentes geometrías que se pueden utilizar, pero como nuestro caso es un pavimento, la geometría que se va a utilizar es la de rectángulo. Dentro de la ventana ``Sketching`` en el apartado ``Draw`` se selecciona ``Rectangle``.

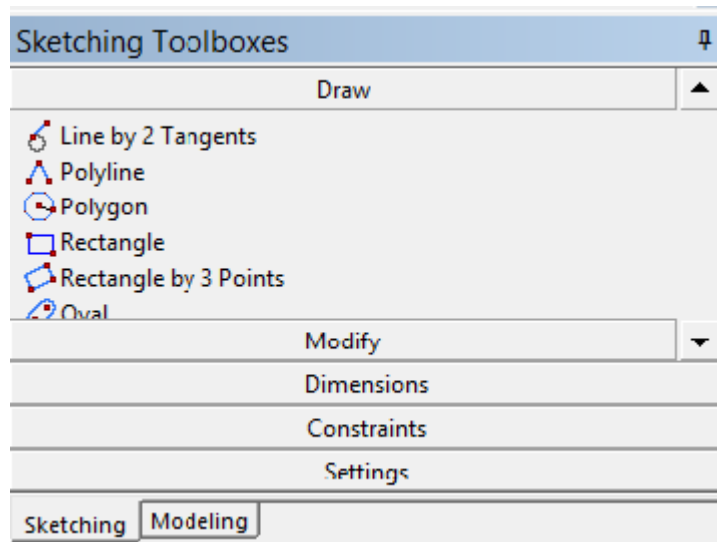


Figura 0-1. Selección de geometría.

- Para definir el rectángulo, se introducen las dimensiones (X e Y, ya que estamos en 2D) en la ventana de ``Sketching``, apartado ``Dimensions``, se seleccionan las dimensiones ``Horizontal`` y ``Vertical`` correspondientes al ancho y alto del rectángulo. Por último, se seleccionan dos puntos de un lado del rectángulo y se introduce la medida correspondiente.

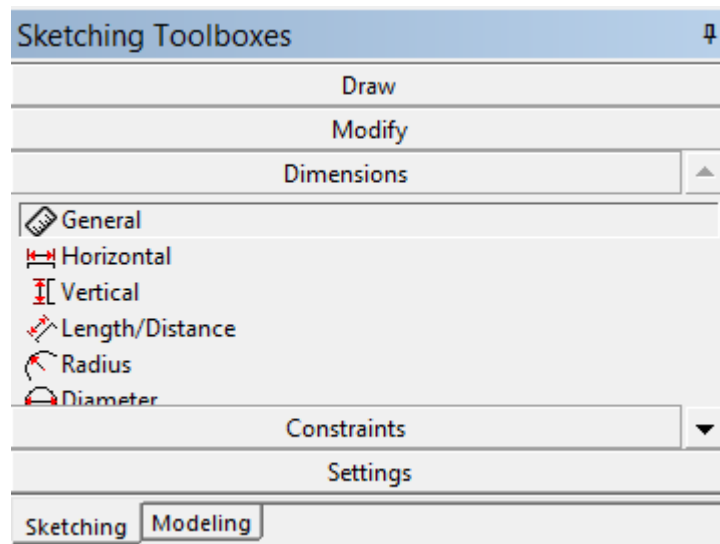


Figura 0-2. Dimensiones.

- En la pestaña “Modeling” se reflejan todas las partes de nuestro pavimento, los denominados “Sketch”. Como ejemplo, se ilustrará un pavimento de estudio para verlo.

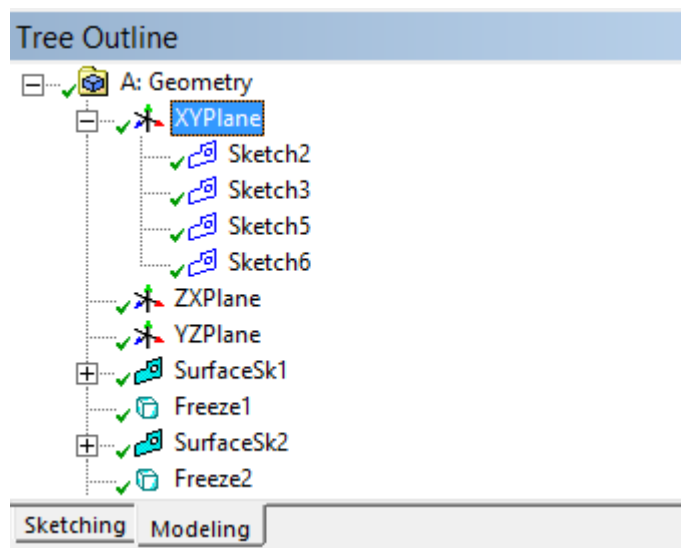


Figura 0-3. "Sketches"

2. MESH.

La función principal del mallado es simular el pavimento para su estudio.

En primer lugar, se define la dimensión del mallado, mientras más pequeño sea el mallado más exacto será el resultado.

En nuestro caso, el mallado será de 0.25 metros.

Para realizar el mallado, en la pestaña “Details of Mesh” se modifican varios aspectos.

En el apartado “Physics Preferences” se selecciona “CFD” porque...

Además, en el apartado “Element Size” se define la dimensión del mallado, como se ha mencionado anteriormente, el mallado será de 0.25 metros.

Por último, se genera el mallado en “Generate Mesh”.

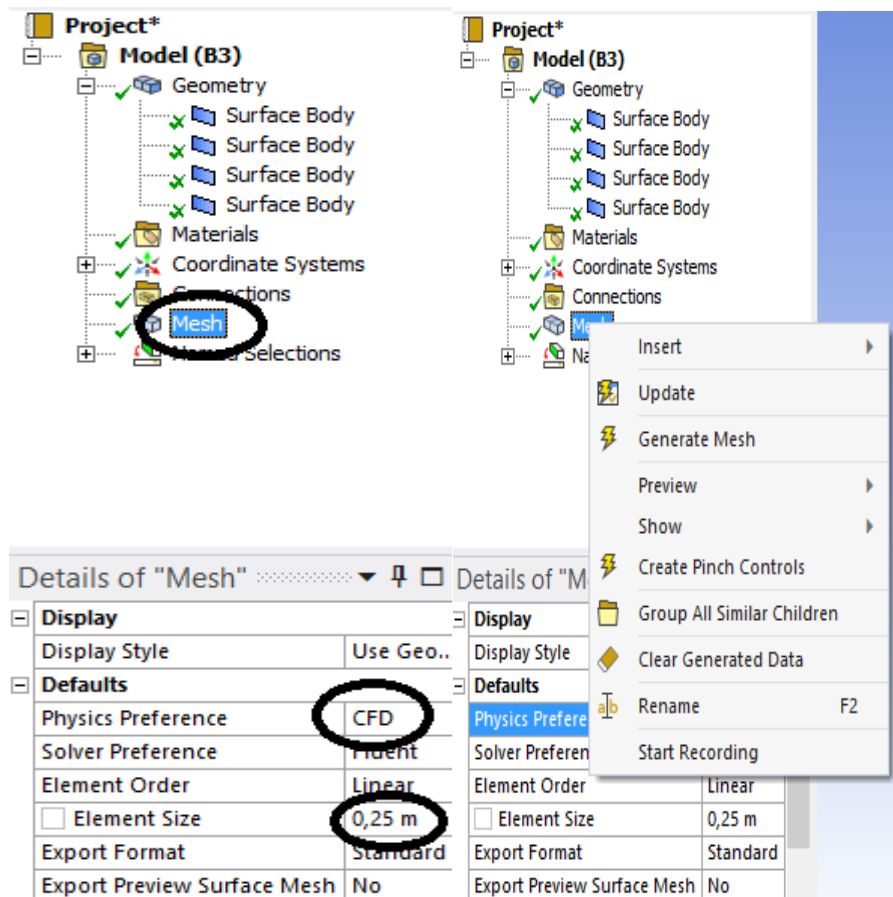


Figura 0-4. Realización del mallado.

En el mallado, se definen las capas del pavimento, la superficie exterior e interior y las interfaces entre las capas del pavimento.

Para definir una superficie, puede ser un cuerpo, una cara, una línea o un vértice, se pulsa con botón izquierdo en "Model (B3)", luego en "Insert" y finalmente en "Named Selection".

Una vez definido, se selecciona y se nombre la parte del pavimento.

Para cualquier elemento del pavimento se realiza de la siguiente forma:

Se selecciona el elemento ya nombrado y en la pestaña "Details of Selection", en el apartado "Geometry" se pulsa "Apply".

Se propone un ejemplo que se ha realizado en el programa, que consiste en definir una cara de un pavimento.

Se ilustrará el ejemplo con imágenes de su realización para una mejor explicación.

- PASO 1:**
 En este paso, se selecciona el nombre del elemento ya nombrado, en nuestro caso se denomina como "CAPA 4".

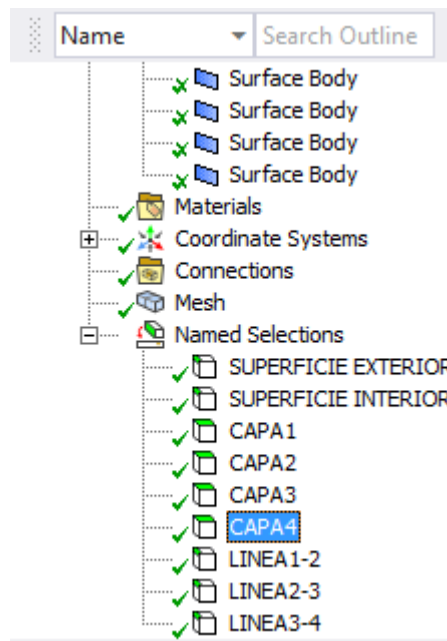


Figura 0-5. Paso 1: Nombre del elemento.

- **PASO 2:**

En la pestaña "Details of Selection", en el apartado "Geometry" se selecciona el elemento y se pulsa "Apply".

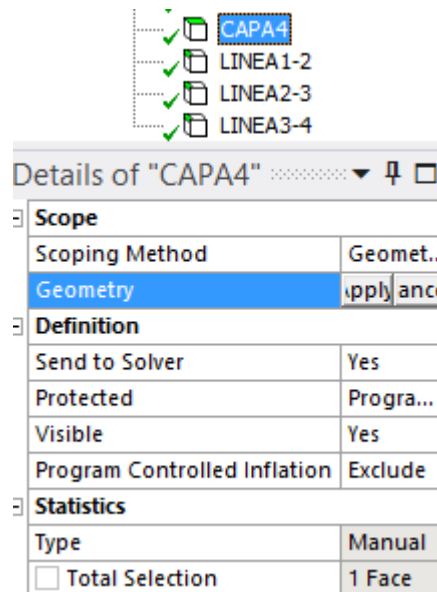


Figura 0-6. Paso 2: Aplicación del elemento.

- **PASO 3:**

Por último, se pulsa sobre el nombre del elemento y el resultado es el siguiente.

Un aspecto a tener en cuenta en la siguiente ilustración es el tipo de superficie que se ha seleccionado, ya que es una cara, si fuera un cuerpo, línea o vértice se seleccionaría su correspondiente símbolo que aparece en la parte superior de la imagen. Esta selección se debe hacer al principio del PASO 1.

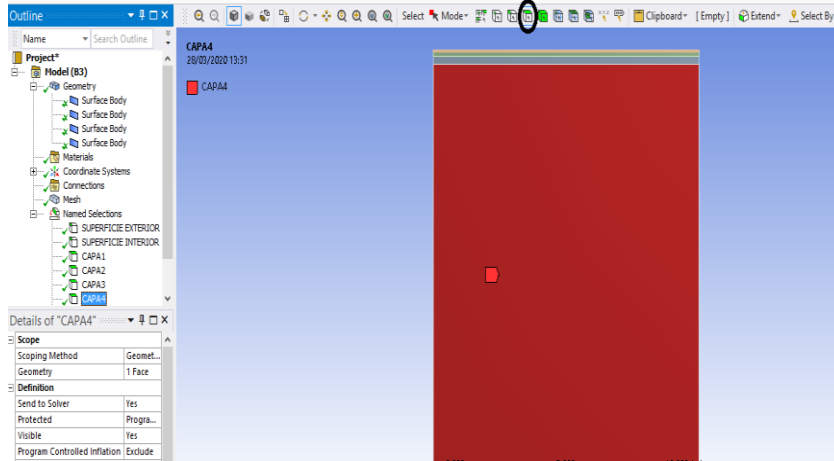


Figura 0-7. Paso 3: Resultado de la selección del elemento.

Otro aspecto de interés e importante es la definición de las interfaces entre las capas.

Se van a definir las interfaces del siguiente pavimento.

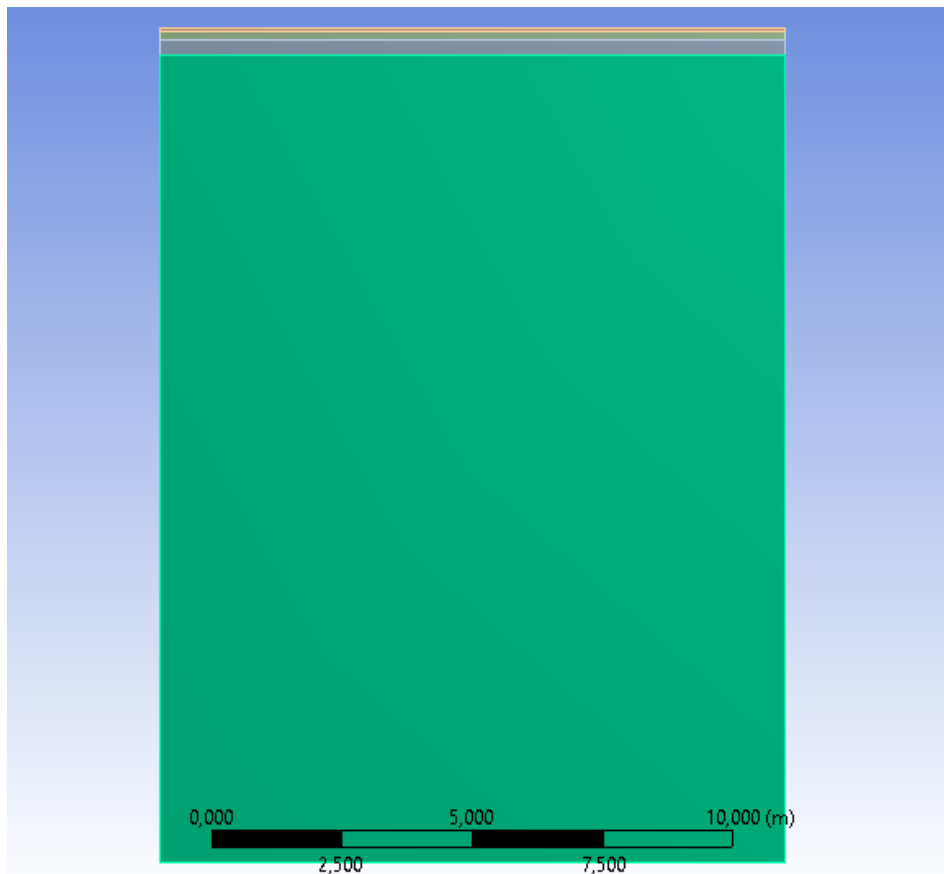


Figura 0-8. Pavimento.

Para crear una interfaz se ocultan las capas menos una de las dos en las cuales se va a crear la interfaz.

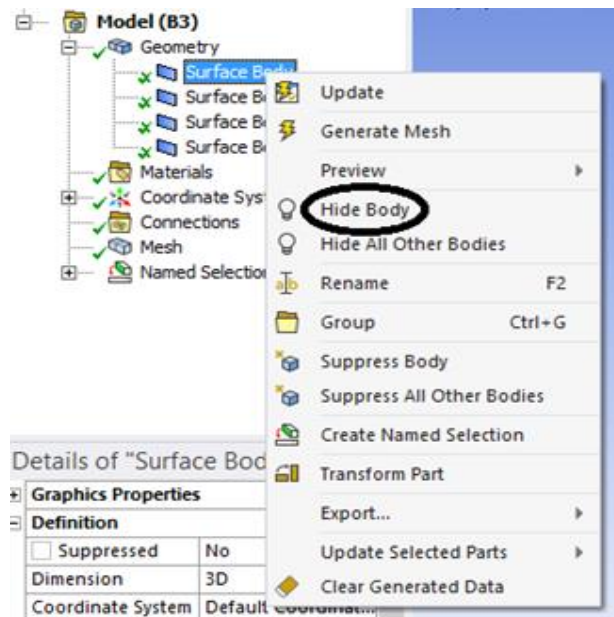


Figura 0-9. Ocultar una capa del pavimento.

El siguiente paso es definir una superficie nueva, como se ha hecho en el paso anterior pero en lugar de una cara se elige el elemento correspondiente a una línea.

Acto seguido, se ocultan las capas menos la capa contigua a la que no se ha ocultado anteriormente.

Se pulsa sobre la línea creada y se selecciona "Add to Current Selection".

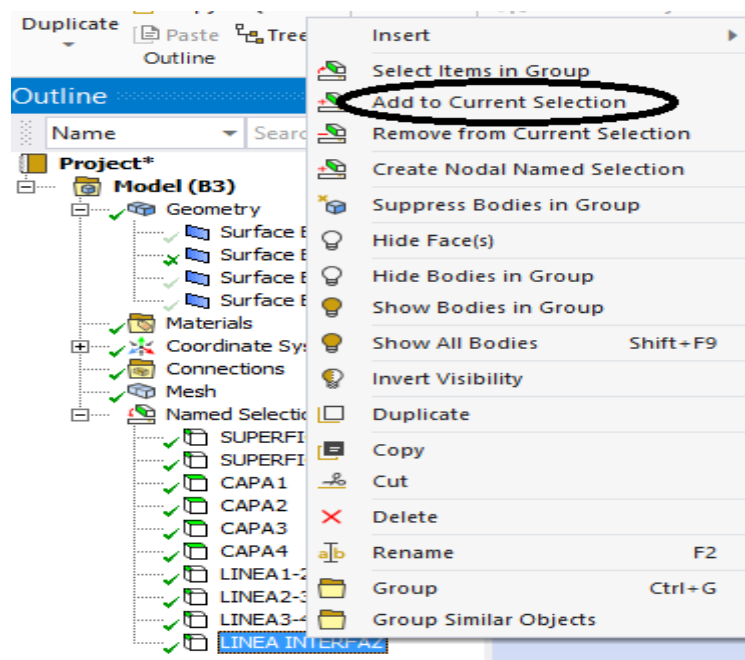


Figura 0-10. Interfaz.

Por último, se pulsa sobre la línea contigua con la otra capa que se ocultó al principio y se pulsa sobre el símbolo "+".

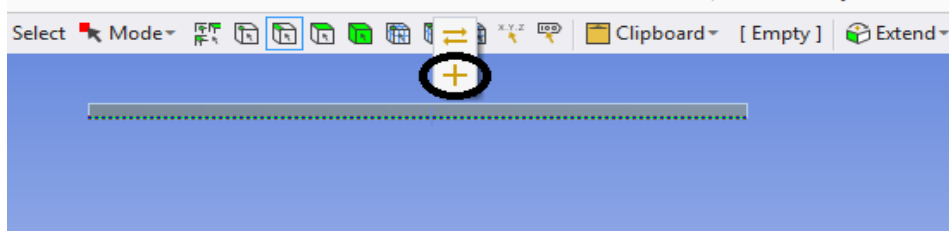


Figura 0-11. Interfaz.

Una vez definidas las distintas líneas, en "Fluent" (programa que se explica en el siguiente apartado) para terminar de definir las interfaces hay que realizar un último paso.

En "Fluent" se describen las diferentes líneas de interfaces que se han añadido para cada una de las superficies, para cada superficie se añaden dos líneas para componer una interfaz. Una vez en "Fluent", pulsamos en la parte superior en "Interfaces", "Mesh" y se abre una pestaña donde se muestran las diferentes líneas definidas en el apartado anterior. Seleccionamos ambas líneas, se nombra y se pulsa "Autocreate".

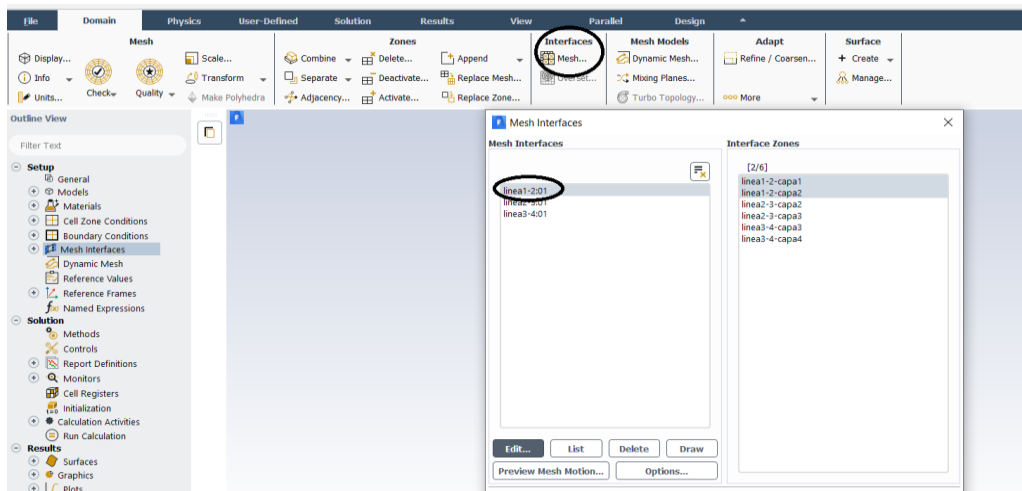


Figura 0-12. Creación de la interfaz.

3. FLUENT.

La principal función de "Fluent" consiste en la introducción de características del pavimento (tipo de material, condiciones exteriores) y su simulación para la obtención de resultados.

Antes de empezar a introducir las características del pavimento, se debe cambiar en el apartado "Models", el comando "Energy" de OFF a ON para que funcione.

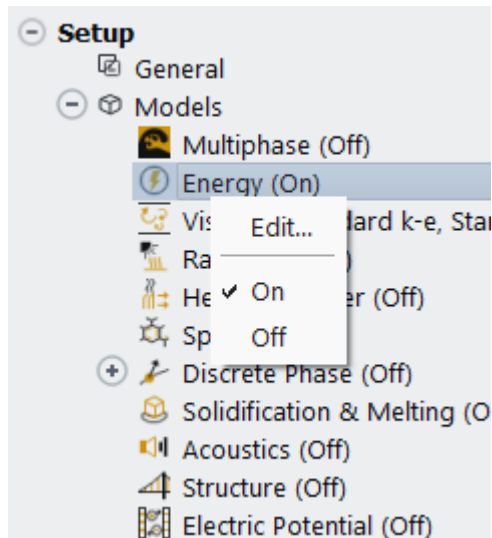


Figura 0-13. "Energy" ON.

Los diferentes pasos que se llevan a cabo en este apartado son los siguientes:

- DEFINICIÓN DE MATERIALES.

El pavimento puede tener varias capas y ser de diferentes materiales. La forma de definir los materiales es la siguiente.

En el apartado "Materials" aparece la elección del tipo de material del pavimento, fluido o sólido.

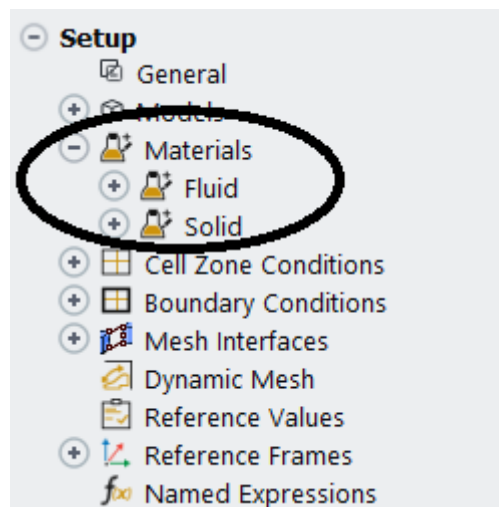


Figura 0-14. Elección del tipo de material.

Se va a elegir como tipo de material un sólido. Una vez elegido, se debe cargar un material de la biblioteca de "Fluent" y cambiar las propiedades de ese material por las propiedades del material que se va a utilizar, ya que si no el programa no simula bien el caso.

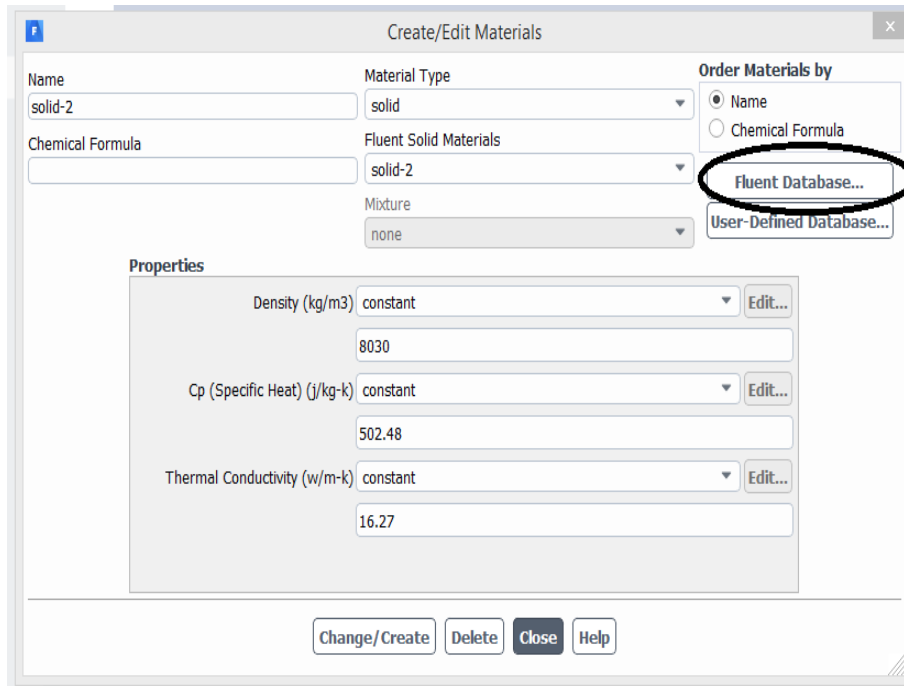


Figura 0-15. Biblioteca de materiales de "Fluent".

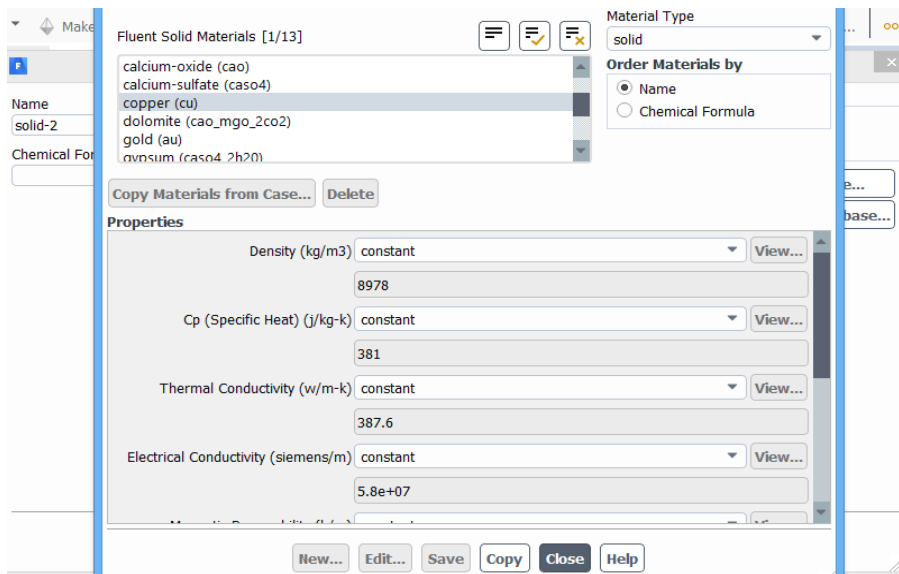


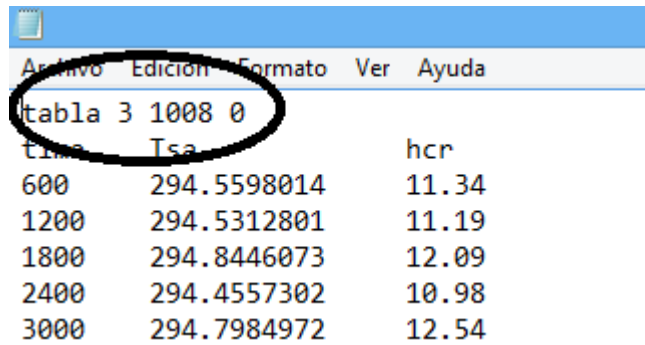
Figura 0-16. Propiedades del material.

Una vez introducido el material, como se observa en la Ilustración 11 se pulsa "Change/Create" y se crea el material con el nombre que viene por defecto en "Fluent" pero con las propiedades del material de estudio.

- **IMPORTAR TABLAS EN "FLUENT".**

Para la simulación, se ha importado una tabla con las condiciones del aire exterior, temperatura exterior sol-aire y coeficiente radiante-convectivo.

En primer lugar, se va a proceder a la explicación de la estructura que debe tener el archivo de la tabla que se va a importar.



Time	Tsa	hcr
600	294.5598014	11.34
1200	294.5312801	11.19
1800	294.8446073	12.09
2400	294.4557302	10.98
3000	294.7984972	12.54

Figura 0-17. Formato de la tabla.

La parte superior de la tabla indica, en orden, el número de columnas y el número de datos que tiene cada columna.

Para importar la tabla, hay que ir a la consola del programa e introducir los siguientes comandos:

```

Console
done.
file

/file> read-transient-table
transient-table file name ["C:\Users\Carlos\Desktop\SIMULACIONPROYECTO1\PROYECTOSIMULACIONINICIAL-1_files\dp0\FLU\Fluent\SYS.set"]
CASO3

```

Figura 0-18. Comandos para importar la tabla.

El último comando hace referencia al nombre de la tabla.

La tabla debe estar en una carpeta denominada ``Fluent``.

Dentro de la carpeta del caso de estudio hay una carpeta con el nombre de ``dp0``, al abrir esta carpeta, hay otra con el nombre de ``FLU`` y por último la mencionada anteriormente. En esta última debe de estar la tabla que se quiere importar.

- ASIGNAR MATERIALES A LAS CAPAS DEL PAVIMENTO.

Se designan los materiales a las diferentes capas del pavimento.

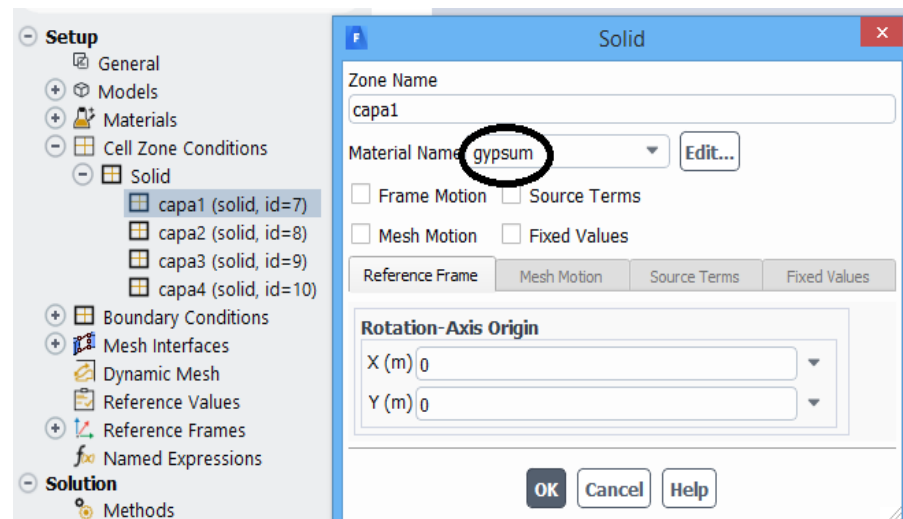


Figura 0-19. Asignar materiales a las capas del pavimento.

- CONDICIONES DE LA SUPERFICIE EXTERIOR.

Se van a fijar condiciones a dos superficies del pavimento, la superficie exterior e interior.

Estas dos superficies se han definido anteriormente en el apartado del mallado.

- CREAR ARCHIVO PARA RESULTADOS.

Una vez definido las superficies de estudio, se crearán los denominados "Report Definitions" para obtener los resultados.

En "Report Definitions" se crea un archivo nuevo en "New", luego "Surface Report" y por último "Area-Weighted Average".

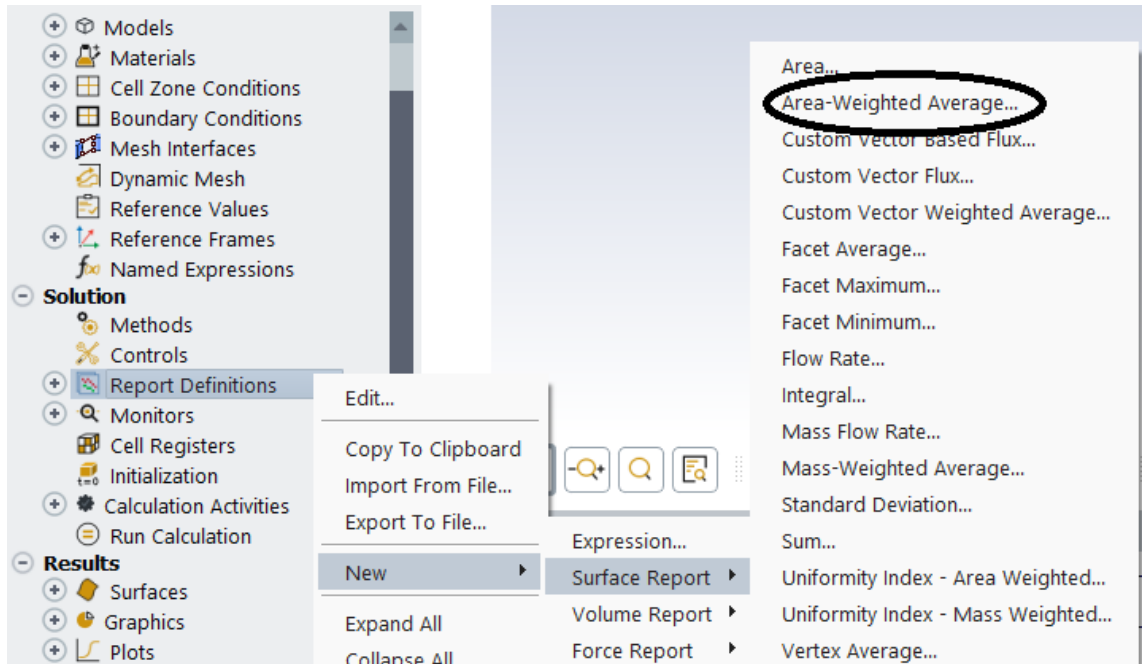


Figura 0-20. Archivo de resultados.

A continuación, se abre una ventana donde sale el nombre que se le quiere poner al archivo, la variable que se quiere obtener (en nuestro caso va a ser la temperatura) y por último la superficie donde se quiera obtener.

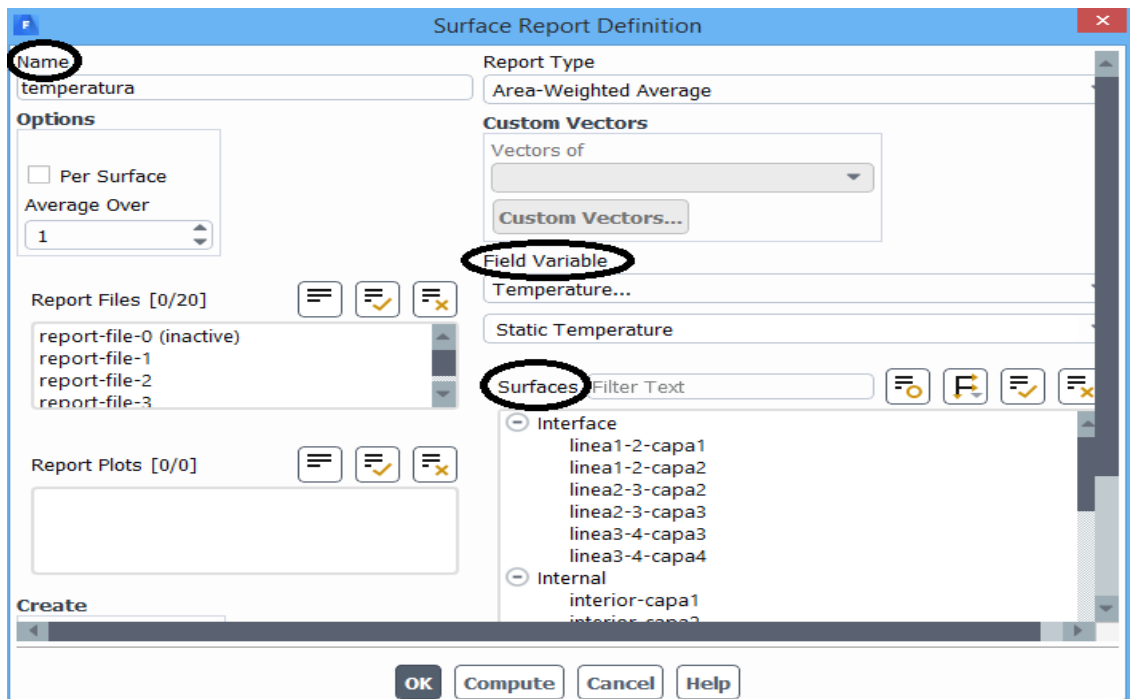


Figura 0-21. Archivo de resultados.

- EXPORTAR RESULTADOS.

Para exportar archivos, dentro del apartado ``Monitors`` se crea el archivo que se quiera exportar en ``Report Files``.

En primer lugar, se crea un nuevo archivo en ``New`` y se abre una ventana donde, a un lado quedan los archivos de ``Report Definitions``. Se selecciona el archivo que se quiera estudiar y se pulsa ``Add``.

Además, se puede cambiar el nombre del archivo para cuando se exporte no salga con el nombre por defecto de ``Fluent``.

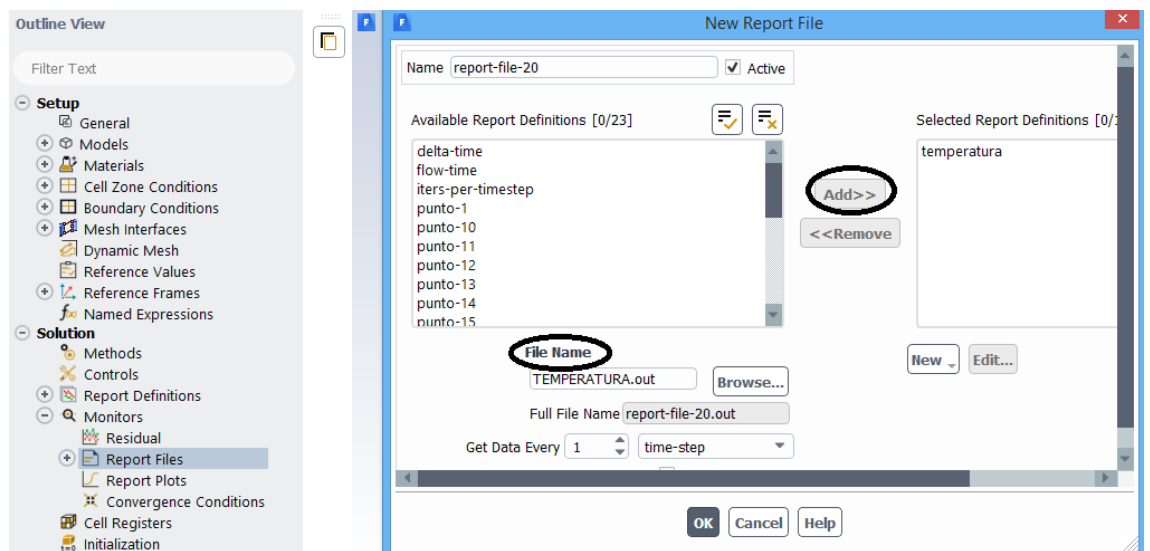


Figura 0-22. Exportar resultados.

Para terminar la simulación, se pulsa sobre ``Initialization`` y dentro de ``Run Calculation`` en ``Calculate``.

- **ZONA POROSA.**

Este último apartado va a describir el proceso para definir una zona porosa y poder simular en ``Fluent`` pavimentos drenantes.

Una vez definida las capas, se pulsa sobre la capa superficial y se cambia el tipo de capa que es, en lugar de elegir sólido se selecciona fluido.

Se abre una ventana que tiene el siguiente formato:

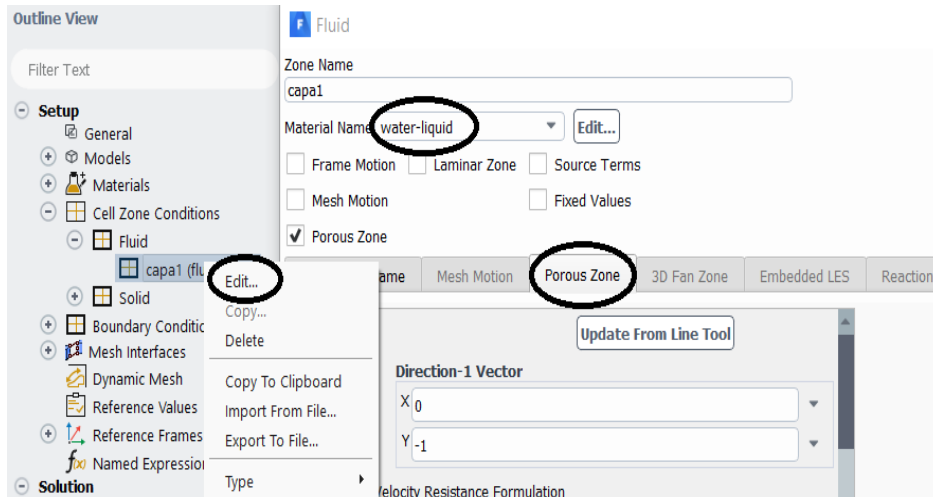


Figura 0-23. Zona porosa.

Se pulsa sobre la capa que se quiere modificar y se pulsa ``Edit``, se abre una pestaña donde hay que seleccionar el fluido que se va a filtrar por la capa y el método que se va a utilizar que es ``Porous Zone``.

En este apartado se piden varios parámetros que se van a describir a continuación.

Para obtener la simulación de una zona porosa se deben definir la dirección del flujo en nuestro caso en la dirección x e y, la x tiene valor 0 y la y -1 debido a que el flujo va hacia el interior del pavimento, la permeabilidad, un coeficiente denominado C2, la porosidad del pavimento que se calcula con la siguiente ecuación: Porosidad=1-%huecos.

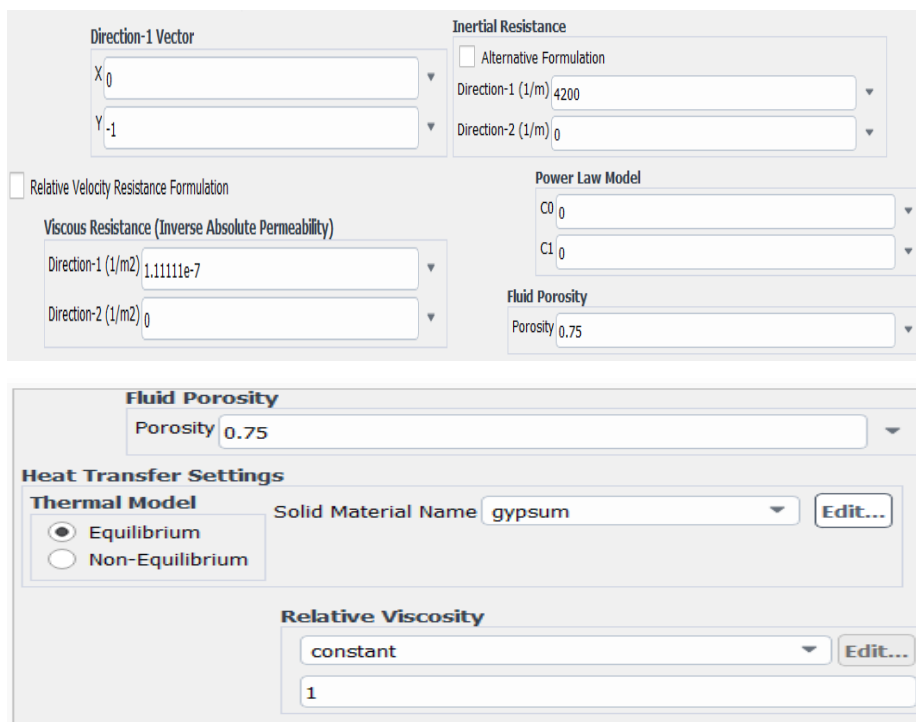


Figura 0-24. Parámetros que definen una zona porosa.

6 REFERENCIAS

- [1] Santamouris M. Energy and Climate in the Urban Built Environment. James James Sci Publ 2001.
- [2] Bahi H, Mastouri H, Radoine H. Review of methods for retrieving urban heat islands. Mater Today Proc 2020. doi:10.1016/j.matpr.2020.03.272.
- [3] Oke, T.R, Johnson, G.T., Steyn DG and W. Simulation of Surface Urban Heat Islands under ‘Ideal’ Conditions at Night – Part 2: Diagnosis and Causation. Bound Layer Meteorol 1991;56:339–358.
- [4] Akbari Hashem, Matthews HD. Global cooling updates: reflective roofs and pavements. Energy Build 2012;55:2–6.
- [5] Doulos L, Santamouris M, Livada I. Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. Sol Energy 2004;77:231–49. doi:10.1016/j.solener.2004.04.005.
- [6] Jooseng Gavin_Gui, Patrick E. Phelan, Kamil E. Kaloush JSG. Impact of Pavement thermophysical properties on surface temperatures. J Mater Civ Eng 2007;19:8.
- [7] Levinson R, Akbari H, Berdahl P, Wood K, Skilton W, Petersheim J. A novel technique for the production of cool colored concrete tile and asphalt shingle roofing products. Sol Energy Mater Sol Cells 2010;94:946–54. doi:10.1016/j.solmat.2009.12.012.
- [8] Haselbach LM. Pervious concrete and mitigation of the urban heat island effect. Transp Res Board 88th Annu Meet 2009.
- [9] Tran, N., Powell, B., Marks, H., West, R., Kvasnak A. Strategies for Design and Construction of High-Reflectance Asphalt Pavements. Transp Res Rec J Transp Res Board 2009;2098.
- [10] Ferrari A, Kubilay A, Derome D, Carmeliet J. The use of permeable and reflective pavements as a potential strategy for urban heat island mitigation. Urban Clim 2020;31:100534. doi:10.1016/j.uclim.2019.100534.