



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

## Estudio del empleo de escorias de acería en las propiedades mecánicas y térmicas de una mezcla asfáltica

Trabajo realizado per:  
**Pol Celma Barroso**

Dirigido per:  
**Dra. Marilda Barra Bizinotto**  
**Dr. Rodrigo Miró Recasens**  
Tutor externo:  
**Dr. Diego Fernando Aponte**

Grado en:  
**Ingeniería de obras públicas**

Barcelona, octubre de 2017

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

**TRABAJO FINAL DE GRADO**

**ESTUDIO DEL EMPLEO DE ESCORIAS DE ACERÍA EN LAS  
PROPIEDADES MECÁNICAS Y TÉRMICAS DE UNA MEZCLA  
ASFÁLTICA**

**Autor**

**POL CELMA BARROSO**

**Tutores**

**Dra. MARILDA BARRA**

**Dr. RODRIGO MIRÓ**

**Tutor Externo**

**Dr. DIEGO APONTE**

**Universidad Politécnica de Cataluña**

**Ingeniería Civil y Ambiental**

**Barcelona, octubre 2017**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradecer al Dr. Diego Aponte su ayuda en todo el desarrollo de la tesis, tanto la parte experimental como la parte teórica. Sin él no hubiera sido posible la consecución de este trabajo.

Agradecer a todo el personal del laboratorio de Caminos y de Materiales por su ayuda y profesionalidad para que todo salga bien.

Dar gracias a los tutores Marilda Barra y Rodrigo Miró por dejarme desarrollar esta tesis.

En segundo lugar, quiero agradecer a mi familia la oportunidad que me dan al poder cursar este grado y por el apoyo emocional y económico que me están brindando. También mencionar a Cristina, por ayudarme en todo y estar siempre a mi lado. Dar las gracias a mis amigos y compañeros de clase, por hacer que esta etapa de mi vida haya sido memorable.



## RESUMEN

El problema empieza en las industrias siderúrgicas. La fabricación del acero genera muchos tipos de residuos, entre los cuales encontramos las escorias de acería. Deshacerse de estos materiales genera un coste y un impacto ambiental negativo.

Investigadores del sector han estudiado estos materiales y han determinado que se pueden utilizar en otros campos de la construcción, para nuestro caso, se pueden utilizar en las mezclas bituminosas. De este modo, aprovecharíamos el material, ahorrando dinero para su destrucción y evitando la contaminación del medio ambiente.

Por lo tanto, la finalidad de esta tesis es determinar el comportamiento mecánico y térmico de la mezcla bituminosa con árido siderúrgico, comparándolo en todo momento con la mezcla bituminosa hecha de áridos convencionales.

De este modo, se han fabricado 22 probetas tipo Marshall de cada mezcla bituminosa. Estas probetas serán evaluadas con los ensayos mecánicos de módulo de rigidez, Ebade y tracción indirecta. Todos estos hechos a 3 temperaturas diferentes, para poder comparar el comportamiento del material en diferentes condiciones térmicas.

También se ha realizado un ensayo de irradiación térmica para sacar más conclusiones del comportamiento térmico. Por último se ha hecho un ensayo innovador que mide la contracción que sufre el material y la fuerza necesaria debido a cambios bruscos de temperatura, empezando el ensayo a 20°C y terminándolo a -5°C.

## **ABSTRACT**

The problem begins in the steel industry. The manufacture of steel generates many types of waste, among which we find the steel slag. Getting rid of these materials generates a cost and a negative environmental impact.

Researchers have studied these materials and they have determined that they can be used in other fields of construction, for our case, it can be used in bituminous mixtures. In this way, we would take advantage of the material, saving money for its destruction and avoiding pollution of the environment.

Therefore, the purpose of this thesis is to determine the mechanical and thermal behavior of the bituminous mixture with siderurgical aggregate, comparing it with the bituminous mixture made of conventional aggregates.

In this way, 22 Marshall specimens have been manufactured from each bituminous mixture. These specimens will be evaluated with mechanical tests of rigidity modulus, Ebade and indirect traction. All tests evaluated in 3 different temperatures, to be able to compare the behavior of the material in different thermal conditions.

A thermal irradiation test has also been carried out to achieve further conclusions of the thermal behavior. Finally, an innovative test has been made that measures the contraction of the material and the necessary force due to sudden changes in temperature, starting the test at 20 ° C and ending at -5 ° C.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ESTUDIO DEL EMPLEO DE ESCORIAS DE ACERÍA EN LAS PROPIEDADES  
MECÁNICAS Y TÉRMICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA ..... IV

<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>i</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO .....</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>1 <u>INTRODUCCIÓN .....</u></b>	<b>12</b>
<b>2 <u>OBJETIVOS.....</u></b>	<b>13</b>
<b>2.1 Objetivo principal .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Objetivos específicos .....</b>	<b>13</b>
<b>3 <u>ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....</u></b>	<b>15</b>
<b>3.1 Mezclas asfálticas .....</b>	<b>15</b>
3.1.1 Definición .....	15
<b>3.2 Componentes de la mezcla asfáltica .....</b>	<b>16</b>
3.2.1 Betún .....	16
3.2.2 Árido convencionales y siderúrgicos .....	17
<b>3.3 Fatiga .....</b>	<b>20</b>
<b>3.4 Ensayos para determinar la fatiga.....</b>	<b>21</b>
<b>3.5 Propiedades térmicas .....</b>	<b>22</b>
<b>3.6 Deformación por efecto térmico en las mezclas ...</b>	<b>23</b>
<b>4 <u>MATERIALES Y METODOLOGÍA.....</u></b>	<b>25</b>
<b>4.1 Materiales.....</b>	<b>25</b>
<b>4.2 Ensayos realizados .....</b>	<b>26</b>
4.2.1 Ensayo de densidad máxima y contenido de huecos.....	26

4.2.2	Ensayo de deformación y tensión generadas por cambios térmicos .....	28
4.2.3	Ensayo de fatiga: EBADE .....	28
4.2.4	Ensayo de módulo resiliente.....	30
4.2.5	Ensayo de sensibilidad al agua.....	32
4.2.6	Ensayo de Tracción indirecta .....	33
4.2.7	Ensayo de Irradiación .....	33
<b>5</b>	<b><u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</u></b>	<b><u>37</u></b>
<b>5.1</b>	<b>Densidad máxima y contenido de huecos .....</b>	<b>37</b>
<b>5.2</b>	<b>Módulo resiliente .....</b>	<b>38</b>
<b>5.3</b>	<b>Tracción indirecta .....</b>	<b>39</b>
<b>5.4</b>	<b>Sensibilidad al agua.....</b>	<b>41</b>
<b>5.5</b>	<b>Irradiación térmica .....</b>	<b>43</b>
<b>5.6</b>	<b>Ensayo EBADE.....</b>	<b>46</b>
<b>5.7</b>	<b>Deformación y tensión debidas a los efectos térmicos .....</b>	<b>50</b>
<b>6</b>	<b><u>CONCLUSIONES .....</u></b>	<b><u>57</u></b>
<b>7</b>	<b><u>FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....</u></b>	<b><u>59</u></b>
<b>8</b>	<b><u>REFERENCIAS.....</u></b>	<b><u>61</u></b>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Densidades aparentes y máximas según tipo de mezcla.....	37
Tabla 2. Contenido de huecos de las mezclas.....	38
Tabla 3. Resultados tracción indirecta.....	40
Tabla 4 Deformaciones tracción indirecta.....	41
Tabla 5. Sensibilidad al agua de las mezclas ensayadas.....	41

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de cómo es el betún .....	16
Figura 2. Planta clasificadora de áridos. (Blázquez, 2000) .....	18
Figura 3. Clasificación de escoria según procedencia. ....	19
Figura 4. Pavimento fisurado. ....	21
Figura 5. Procedimientos para determinar el comportamiento a fatiga. flexión .....	22
Figura 6. Cambio en el comportamiento del asfalto en función de la temperatura (FCELA 2006).....	23
Figura 7. Foto árido convencional.....	25
Figura 8. Foto árido siderúrgico.....	26
Figura 9. Descripción gráfica ensayo EBADE .....	29
Figura 10. Ejemplo resultado EBADE tensión.....	29
Figura 11. Ejemplo resultado EBADE módulo. ....	30
Figura 12. Ejemplo resultado EBADE disipación de energía. ....	30
Figura 13. Estructura mezcla ensayo irradiación .....	34
Figura 14. Estructura ensayo de irradiación .....	35
Figura 15. Comportamiento del módulo resiliente de la mezcla siderúrgica con la temperatura.....	38
Figura 16. Comportamiento del módulo resiliente de la mezcla convencional con la temperatura.....	39
Figura 17. Gráfica tipo resultado tracción indirecta.....	40
Figura 18. Gráficas sensibilidad al agua siderúrgica .....	42
Figura 19. Gráficas sensibilidad al agua convencional. ....	42
Figura 20. Resultado irradiación 1 siderúrgico.....	43
Figura 21. Resultados Irradiación 2 siderúrgico.....	44
Figura 22. Enfriamiento de las probetas de irradiación.....	44
Figura 23. Resultados irradiación 3 convencional. ....	45
Figura 24. Resultados irradiación 4 convencional .....	45
Figura 25. Tensión EBADE convencional .....	46
Figura 26. Tensión EBADE siderúrgico .....	47
Figura 27. Módulo EBADE convencional.....	48
Figura 28. Módulo EBADE siderúrgico.....	48
Figura 29. Energía disipada EBADE convencional.....	49
Figura 30. Energía disipada EBADE siderúrgico.....	50
Figura 31. Ciclo térmico al que se someten las probetas.....	51
Figura 32 Resultado de tensión probeta convencional 32.....	51
Figura 33 Resultado de tensión probeta convencional 43.....	52
Figura 34 Resultado de tensión probeta siderúrgica 14.....	52
Figura 35. Resultado de tensión probeta siderúrgica 20.....	53
Figura 36. Resultado de deformación probeta convencional 32. ....	54

Figura 37. Resultado deformación probeta convencional 43 .....	54
Figura 38. Resultados deformación probeta siderúrgica 14. ....	55
Figura 39. Resultados deformación probeta siderúrgica 20. ....	55



## **1 INTRODUCCIÓN**

Las carreteras y autopistas se diseñan siguiendo unos parámetros que se consiguen con una buena calidad de los materiales y una correcta ejecución de la obra. Aun así, el pavimento se puede ver afectado por agentes externos, como la climatología, o por acciones del propio tráfico. Además, el firme se puede dañar de manera indirecta, por el abocamiento de líquidos inflamables. Este firme está compuesto por una mezcla bituminosa que se consigue con la mezcla de áridos y betún. Estos áridos pueden ser de procedencia natural (áridos graníticos) o reciclados. Estos áridos reciclados se pueden obtener de los residuos de las industrias siderúrgicas, que destacan por la fabricación de materiales de construcción, como por ejemplo el acero.

El problema se haya en que, en la formación del acero, las industrias siderúrgicas generan una gran cantidad de residuos conocidos como “escorias de acería”. Para solucionarlo se han elaborado unos nuevos materiales constituidos a partir de estos residuos contaminantes una vez se han enfriado, separado y molido. Este nuevo material puede ser utilizado para componer el árido de las mezclas bituminosas, reemplazando el árido natural convencional, ya que cumple las especificaciones y características que marca la normativa para carreteras PG-3. Por lo tanto, se puede utilizar este material para realizar mezclas bituminosas, bases, coronaciones y áridos para hormigón y reducir el impacto ambiental que generan estos residuos al estar expuestos en vertederos, ya que no podían ser utilizados para desempeñar otra función. Asimismo, se puede ahorrar el dinero que costaría deshacerse definitivamente de estos residuos o la transformación de estos en algún material que pueda ser útil.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo principal**

El objetivo principal de la tesis es estudiar el comportamiento térmico y mecánico de dos mezclas bituminosas distintas, que tienen el mismo fin: utilizarse como capa asfáltica tipo BBTM. Una está fabricada con árido convencional y la otra compuesta por árido siderúrgico, comparando en cada ensayo las ventajas e inconvenientes de cada tipo de mezcla.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Fabricar probetas tipo Marshall con el material tomado de una obra real realizada en Catalunya, con la finalidad de realizar los ensayos con una cantidad significativa de probetas.
- Determinar las propiedades la densidad y la cantidad de huecos de los dos tipos de mezcla bituminosa.
- Determinar la sensibilidad al agua de las dos mezclas bituminosas fabricadas.
- Determinar la influencia de la temperatura de las probetas en las propiedades de tracción indirecta y módulo resiliente.
- Determinar el comportamiento a la fatiga de las mezclas por medio del ensayo EBADE.
- Determinar la deformación y las tensiones generadas en las mezclas asfálticas, por los cambios de temperatura (de 20 °C a -5 °C).
- Determinar las diferencias de temperatura al interior de una estructura de pavimento, simulando a escala reducida la situación de exposición del pavimento a una fuente de calor (ensayo de irradiación).



### 3 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

La estructura de una vía se divide en varias partes y cada una tiene una función específica para conseguir que la carretera tenga un buen funcionamiento.

Esta estructura del firme se divide en tres partes: la base, la subbase y la capa de rodadura. (Bañon Blazquez, L. 2000)

La capa **base** es la capa estructural más importante de la estructura, que está destinada a distribuir de manera efectiva las cargas debidas al tráfico de tal manera que las capas no unidas subyacentes no están expuestas a presiones y deformaciones excesivas. Esto hace que la capa base tenga una rigidez muy alta.

La **subbase** o capa intermedia es diseñada para soportar las más altas presiones de cizallamiento que se producen alrededor de 50 – 70 mm por debajo de la superficie del asfalto. Por tanto, la capa de unión se coloca entre la capa de rodadura y la capa de base para reducir la formación de surcos por la combinación de cualidades de estabilidad y durabilidad.

En la elección de la capa de **rodadura** depende de los requisitos funcionales de la superficie por la que vaya a ser construida la carretera. Esto podría ser una durabilidad alta, reducción de ruido, reducción de salpicaduras y de pulverización, una alta resistencia al deslizamiento, impermeabilidad, etc. Esta elección será la que marcará la vida útil que tendrá la carretera.

#### 3.1 Mezclas asfálticas

##### 3.1.1 Definición

Las mezclas asfálticas se componen de un ligante hidrocarbonado con materiales minerales (mezcla de varios tamaños de áridos y finos). Estos elementos se mezclan a una temperatura elevada y se extienden en capas para formar el pavimento de la carretera, luego se compactan para que puedan soportar las cargas del tránsito sin moverse. (Geoge Arias, Wilson Galvis, et al. 2013)

La función de esta capa es absorber todos los esfuerzos proporcionados por el tráfico de vehículos pesados, ya que la carga del tránsito se distribuye hacia las capas

inferiores de la estructura del pavimento por medio de la fricción de las partículas de los áridos. (Yepes, V. UPC 2014)

La mezcla asfáltica debe ser duradera, es decir, que aguante a las inclemencias meteorológicas, a las solicitaciones del tránsito y resistente a las acciones como el despegue de la película de asfalto del agregado por efectos del agua.

## 3.2 Componentes de la mezcla asfáltica

### 3.2.1 Betún

El betún o bitumen es una mezcla de sustancias orgánicas con mucha viscosidad y alta densidad. Tiene un color negro como se muestra en la Figura 1 y está compuesto por hidrocarburos aromáticos poli cíclicos. Poseen características aglomerantes y son esencialmente solubles en sulfuro de carbono (Bañon Blázquez, 2000)



*Figura 1. Ejemplo de cómo es el betún*

La mayoría de betunes contiene azufre y metales pesados como plomo, mercurio, níquel, etc. Es un material tóxico ya que contiene elementos arsénico y selenio. Existen dos formas conocidas de procedencia:

- Los **betunes naturales** proceden de descomposición de organismos marinos, que afloran a la superficie en lagos de asfalto Se puede encontrar en grandes depósitos naturales, como el lago Asphaltites y el Mar Muerto.

- Los **betunes artificiales** se obtienen como subproductos del petróleo, una mezcla de hidrocarburos con impurezas (Bañon Blázquez, 2000).

Las propiedades más destacables que tienen los betunes para usarlos en la construcción de carreteras son las siguientes:

- 1) Adhesividad: facilidad que tiene el betún para adherirse a los áridos. Los áridos y el betún deben formar un conjunto homogéneo y continuo.
- 2) Viscosidad: es la resistencia que oponen las partículas a separarse, debido a rozamientos internos.
- 3) Susceptibilidad térmica: nos indica si el betún es propenso a presentar variaciones en las propiedades reológicas con el cambio de temperatura.
- 4) Plasticidad: comportamiento mecánico que tiene el betún ante diferentes estados físicos y temporales de carga. Un betún poco plástico no tendrá demasiada deformación sin que se produzcan grietas.
- 5) Envejecimiento: fenómeno que degrada el betún debido a la acción oxidante del aire, humedad y radiaciones solares. Este fenómeno hace que el betún pierda sus propiedades reológicas y adhesivas.  
(Bañon Blázquez, 2000)

Su uso principal es la pavimentación de carreteras, mezclando este betún con los áridos naturales se consigue la mezcla asfáltica necesaria para la elaboración del pavimento.

### 3.2.2 Árido convencionales y siderúrgicos

El **árido convencional** puede ser árido calizo o granítico. El más conocido es el árido granítico, debido a que el granito es el material principal. El granito es una de las rocas más resistentes de La Tierra, ocupa la séptima posición en la escala de dureza y es la roca óptima usar en la construcción por su dureza y duración.

Los yacimientos de granito se encuentran a varios kilómetros de la superficie, ya que se forma cuando el magma se filtra a través de las grietas de la corteza terrestre y a medida que se va enfriando se solidifica. (Méndez, B.A. UPC 2016)

Estos áridos se obtienen mayoritariamente de graveras que explotan depósitos granulares mediante la utilización de explosivos. Los áridos se lavan y clasifican para poder usarlos. Tienen forma redondeada con superficies lisas y sin aristas.

El granito está compuesto en un 20-40% por cuarzo, 16-56% de feldespato y en un 14-56 % por mica, su nombre varía dependiendo del contenido de material mayoritario.

Por otra parte, el árido calizo se produce en canteras, arrancando los materiales de los macizos rocosos y someterlos posteriormente a trituración, molido y clasificación. Son áridos rugosos.

**Características.**

Las características que hacen del granito un material óptimo para la elaboración de pavimentos y hormigones son las siguientes:

- La estabilidad térmica del granito hace que pueda resistir a grandes gradientes de temperatura.
- La dureza del material, encontrándose en la séptima posición de la escala de dureza de los materiales.
- Gran porosidad y permeabilidad, contiene un porcentaje de poros entre 0,15 -0,4% de su volumen. (CEDEX 2013)

En la Figura 2 podemos ver el proceso de extracción, transporte y clasificación de los áridos:

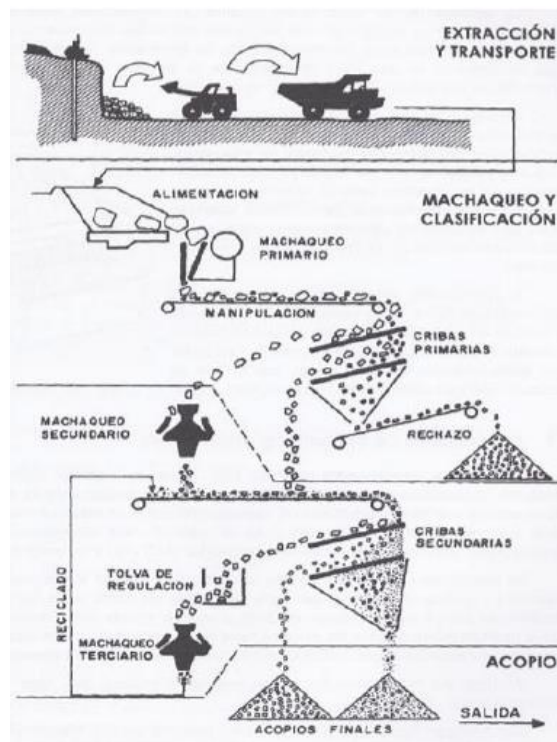


Figura 2. Planta clasificadora de áridos. (Blázquez, 2000)

El **árido siderúrgico** proviene de las escorias de acería, que son los residuos que se generan en los procesos de fabricación de metales de las industrias siderúrgicas.

Su naturaleza varía dependiendo del metal utilizado en el proceso que generará el residuo, por lo tanto hay escorias de hierro, acero, níquel, magnesio, cobre, etc. Para la construcción de pavimentos, las escorias más utilizadas son las que se extraen de los procesos de hierro y acero.

En la siguiente figura podemos observar la clasificación de la escoria según procedencia. (Amaral de Lima, 1991)

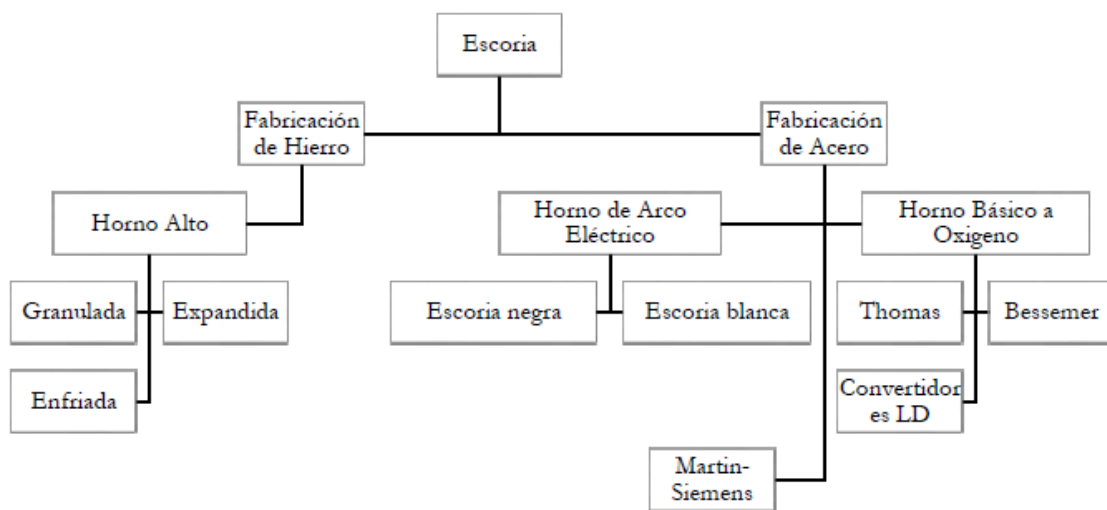


Figura 3. Clasificación de escoria según procedencia.

#### Proceso de producción:

La industria metalúrgica convierte la chatarra metálica en acero comercial. Esta chatarra se clasifica y es llevada para su fundición. Al terminar esta fundición se obtienen dos elementos: acero y escoria negra. (Mendez,B UPC 2015)

Los siguientes procesos son la oxidación, para eliminar impurezas de magnesio y silicio, la defosforación y la formación de espumante, donde se acumulan todas las impurezas que no fueron evaporadas a 1600°C. Este material es removido e inclinando la caldera y dejando que la escoria caiga al suelo. (Medina Romero, 2006)

Muchos investigadores han estudiado el árido siderúrgico para el campo de aplicación de las mezclas bituminosas, intentando desarrollar las propiedades físicas y mecánicas del material. Enumeramos algunas de las propiedades estudiadas (por CEDEX 2013):

- Alta resistencia a los ciclos de hielo-deshielo en zonas de temperatura extrema.
- Alta resistencia a la trituración y pulimiento de partículas, resultados con valores adecuados para capas de rodadura.
- Resistencia al desgaste, lo que hace de la mezcla un material duradero.
- Adecuada adherencia con los ligantes bituminosos
- Tiene una alta densidad, mayor que el árido granítico, importante tenerlo en cuenta en las dosificaciones.

### **3.3 Fatiga**

La fatiga es una de las principales causas del daño de las mezclas bituminosas, de ahí la importancia de su estudio. La fatiga es un fenómeno que produce una alteración deformacional del pavimento bajo los efectos de la repetición periódica de una sollicitación inferior a la de rotura (repetición de carga y descarga). Esta fatiga comporta la pérdida de las propiedades mecánicas de la estructura del firme traduciéndose en la aparición de fisuras que con el tiempo se pueden generalizar en todo el pavimento. Esta fisuración provoca un aumento de las deflexiones y la disminución de la capacidad portante, reflejándose en el descenso del valor del módulo de rigidez. (Salvador,W. UPC 2012)

También la norma europea EN 12697-24 define la fatiga como la reducción de la resistencia de un material bajo la aplicación repetida de una carga cuando se compara con la resistencia bajo la aplicación individual de una carga.

En el caso de las mezclas bituminosas la fisuración por fatiga y reflexión de fisuras a través de las capas bituminosas del pavimento, es uno de los principales mecanismos de deterioro que sufren los firmes durante su vida útil. Estos deterioros son ocasionados por la acción combinada de las cargas repetidas del tráfico y los esfuerzos y deformaciones térmicas a las que son sometidas las mezclas bituminosas.

La fatiga en las mezclas bituminosas se traduce en una pérdida de su resistencia, lo que conlleva una disminución de la rigidez (disminución del módulo dinámico) y por las fisuras generalizadas causadas por el aumento de las deformaciones superficiales elásticas. Por este motivo, para el dimensionamiento de un firme es

necesario conocer el comportamiento y la resistencia a fatiga que tendrán todas las capas de la mezcla bituminosa que componen el pavimento. Los componentes de la tensión en un punto de la carretera aumentan cuando la rueda se aproxima, alcanza su punto máximo cuando la rueda está encima, y disminuye a medida que la rueda se aleja. La componente horizontal de compresión a la parte superior de la capa de rodadura se convierte en tensión en la parte inferior. Por lo que el tráfico actual consiste en cargas cortas y rápidas con de periodos de reposo. (Salvador,W. UPC 2012)

Estas sollicitaciones causan fisuras longitudinales y transversales. Las primeras fisuras en el pavimento son de tipo longitudinal; los daños son causados por las tensiones transversales. No obstante, las tensiones transversales son más perjudiciales que las longitudinales en las mismas condiciones. Seguidamente, las fisuras transversales se reproducen hasta que se llega a la fisuración generalizada del pavimento (“piel de cocodrilo”), se puede observar en la siguiente Figura 4.



*Figura 4. Pavimento fisurado.*

### **3.4 Ensayos para determinar la fatiga**

Los ensayos de determinación de resistencia a fatiga de las mezclas bituminosas están orientados a conseguir el momento de fallo de las probetas, no teniendo en cuenta el resto de la información recogida en el ensayo.

Sea cual sea el ensayo utilizado tiene que cumplir:

- El ensayo ha de simular las cargas provocadas por la circulación.
- La simulación tiene que tener en cuenta los periodos de carga y los de reposo, sabiendo que la variación de la duración de estos ciclos puede cambiar bastante la vida de la mezcla bituminosa. (Salvador,W UPC 2012)

Hay varios ensayos para determinar la fatiga (Salvador,W UPC 2012):

- Ensayo a fatiga a flexión (Figura 5) en varios puntos sobre las probetas. En estos ensayos se someten probetas a una serie de cargas cíclicas, en la que se mantiene constante la tensión, la deformación o el desplazamiento aplicado, hasta que se produce el fallo de la mezcla.



Figura 5. Procedimientos para determinar el comportamiento a fatiga. flexión

- Ensayo de barrido de tiempo. Los ensayos de barrido de tiempo son ensayos de fatiga en que la amplitud de desplazamiento o deformación se mantiene constante hasta que se produce el fallo de la probeta. Se realizan varios ensayos a diferentes amplitudes de deformación y se registra el número de ciclos hasta el fallo.
- Otros ensayos para determinar la fatiga son: **la Tracción Indirecta** (cálculo de la resistencia máxima de una probeta cilíndrica justo antes de romperse), **la Sensibilidad al agua** (efecto de la saturación de una probeta debido a una inmersión acelerada en agua), **el módulo resiliente** (deformaciones de recuperación instantánea del pavimento al ser expuesto a cargas cíclicas) y el **ensayo EBADE**. Estos ensayos han sido explicados, realizados y analizados los resultados en los siguientes apartados de esta tesis.

### 3.5 Propiedades térmicas

El estado del pavimento está muy condicionado por la temperatura a la que está expuesto. Las variaciones de temperatura hacen que el pavimento cambie de estado.

Este cambio es debido al contenido de ligante que tiene el asfalto. A temperaturas bajas, este ligante tiene una conducta de material sólido elástico, mientras que a temperaturas altas, el material se comporta como un fluido viscoso. Para las temperaturas intermedias, el material se comporta de forma intermedia a los estados anteriores, comportándose de un modo visco-elástico. (Salvador,W. UPC 2012)

De este modo, es muy importante conocer la temperatura a que se enfrentará el pavimento durante su vida útil, para poder diseñar el asfalto con las características más adecuadas para cada zona. En las zonas con temperatura baja, se tendrá que tener cuidado con la fisuración del pavimento, y en zonas de temperatura alta, el pavimento tenderá a sufrir ahuellamientos. (Salvador,W UPC 2012)

En la siguiente Figura 6 podemos ver el comportamiento del material dependiendo de la temperatura a la que está expuesto:

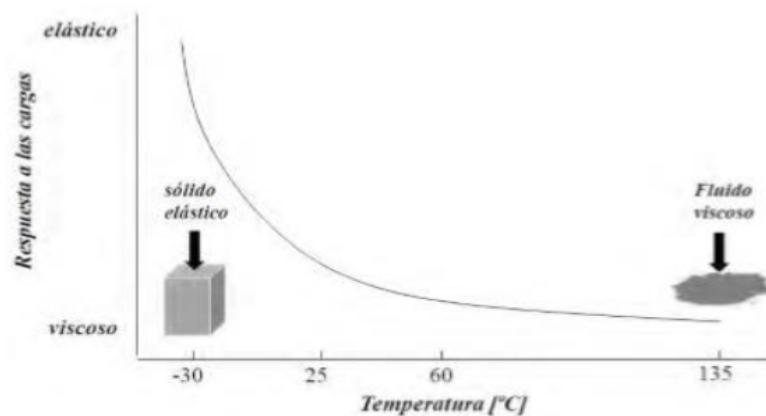


Figura 6. Cambio en el comportamiento del asfalto en función de la temperatura (FCELA 2006)

### 3.6 Deformación por efecto térmico en las mezclas

Como se ha comentado en el apartado anterior, los pavimentos pueden sufrir fisuraciones o ahuellamientos debido al efecto térmico en las mezclas bituminosas.

Con el cambio de temperaturas durante las cuatro estaciones del año, los pavimentos son sometidos a cambios térmicos muy elevados, ya sea a bajas o altas temperaturas. Los pavimentos se enfrentan a condiciones climáticas extremas que pueden empeorar su calidad y vida útil en poco tiempo. (Salvador,W. UPC 2012)

Las fallas que presenta un pavimento pueden dividirse en fisuraciones térmicas o por fatiga y deformaciones permanentes (ahuellamientos):

La **fisuración** es difícil de representar por medios experimentales y que está regido por una amplia gama de factores, dentro de los cuales consideramos las características de los materiales que lo conforman, el espesor de la capa y el proceso de ejecución de la mezcla. (Padilla,A UPC 2004)

Este fallo es causado mayoritariamente por las tensiones generadas por diferenciales térmicos, especialmente en mezclas asfálticas con módulos de rigidez muy altos, en las cuales se provocan retracciones superficiales que dan origen a este tipo de fallo.

El **ahuellamiento** en pavimentos es un fenómeno que va ligado a las altas temperaturas, por lo que es más probable que ocurra y se amplifique en los meses de verano dónde la temperatura es más elevada. (FCELA, 2006).

Las tensiones que causan el ahuellamiento pueden disiparse dependiendo la temperatura, este fenómeno es conocido como relajación. A temperaturas altas la relajación ocurre en unos minutos mientras que a temperaturas bajas puede tardar horas e incluso días. Si el betún no tiene una buena rigidez, no puede soportar las partículas de la mezcla en su sitio y éstas pueden moverse compactando el esqueleto obteniendo una mezcla más densa, lo que produce exudaciones y deformaciones en la superficie (Padilla,A UPC 2004).

## **4 MATERIALES Y METODOLOGÍA**

### **4.1 Materiales**

Se obtuvieron dos muestras distintas de mezcla bituminosa procedentes de un tramo de autopista. Una mezcla está hecha con árido siderúrgico y la otra con árido granítico o convencional. El tipo de capa de rodadura es BBTM.

Al estar en el mismo tramo, se puede considerar que el tráfico que pasaba por las dos muestras es similar. Con estos dos materiales distintos, fabricamos probetas tipo Marshall en el laboratorio de la escuela de Caminos y con la ayuda de los técnicos que trabajan en él.

A las 24 horas de la fabricación, pudimos desmoldar las probetas con una herramienta especializada que facilitaba la extracción de la probeta del molde. Una vez sacadas del molde se anotaron las características geométricas de cada una de ellas.

Para los ensayos EBADE y Deformación y tensión generados por cambios térmicos se tuvieron que cortar las probetas tipo Marshall. Estos cortes los realizó el técnico del laboratorio.

En las siguiente Figura 7 podemos ver una muestra del árido convencional y en la Figura del árido siderúrgico.



*Figura 7. Foto árido convencional*



Figura 8. Foto árido siderúrgico (Mendez, B UPC 2015)

## 4.2 Ensayos realizados

En este apartado se explica la metodología utilizada para ensayar los dos tipos de mezcla bituminosa que estamos estudiando.

### 4.2.1 Ensayo de densidad máxima y contenido de huecos

La normativa EN 12697-5:2002+A1:2007 especifica los métodos de ensayo necesarios para determinar la densidad máxima de una mezcla bituminosa. Para realizar el ensayo necesitaremos agua, una balanza, un picnómetro, una pipeta y un baño de agua a 25°C.

Para empezar el ensayo, necesitamos que las partículas de la mezcla no superen los 6 mm de diámetro. El objetivo es obtener la densidad máxima que puede tener una mezcla y para ello le quitamos el aire existente y rellenamos los huecos de agua.

La densidad máxima  $\rho_{mv}$  de la mezcla bituminosa determinada por el procedimiento volumétrico se debe calcular, con aproximación a 1 kg/m<sup>3</sup> en la siguiente Ecuación 1.

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 \times \left( V_p - \frac{(m_3 - m_2)}{\rho_w} \right)}$$

Ecuación 1. Densidad máxima

Dónde

$\rho_{mv}$  es la densidad máxima de la mezcla bituminosa determinada por el procedimiento volumétrico, en kilogramos por metro cúbico (kg/m<sup>3</sup>)

$m_1$  es la masa del picnómetro más la pieza de cabeza y el muelle, en gramos (g);

$m_2$  es la masa del picnómetro más la pieza de cabeza, muelle y muestra de ensayo, en gramos (g);

$m_3$  es la masa del picnómetro más la pieza de cabeza, muelle, muestra de ensayo y agua o disolvente, en gramos (g);

$V_P$  es el volumen del picnómetro, cuando está lleno hasta la marca de referencia, en metros cúbicos (m<sup>3</sup>);

$\rho_W$  es la densidad del agua o del disolvente a la temperatura de ensayo, en kilogramos por metro cúbico (kg/m<sup>3</sup>).

El contenido de huecos de aire se debe calcular, con una aproximación del 0,1 %, mediante la siguiente Ecuación 2:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100\% \text{ (v/v)}$$

*Ecuación 2. Contenido de huecos*

Dónde

$V_m$  es el contenido de huecos de aire de la mezcla, expresado como un porcentaje con una aproximación del 0,1 por ciento (v/v);

$\rho_m$  es la densidad máxima de la mezcla, expresada en kilogramos por metro cúbico (kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_b$  es la densidad aparente de la probeta, expresada en kilogramos por metro cúbico (kg/m<sup>3</sup>);

#### **4.2.2 Ensayo de deformación y tensión generadas por cambios térmicos**

Este ensayo no está normalizado por ninguna norma existente. El experimento tiene dos partes: el primero consiste en colocar la probeta tipo EBADE e imponer que el desplazamiento sea 0. De este modo al aplicarle un cambio de temperatura, podremos ver cómo es el desarrollo de las tensiones que se generan en el momento que la muestra se enfría. El ensayo se empieza a 20°C y cada hora se baja la temperatura, pasando por 10°C, 5°C y terminando en -5°C. En todo momento se mide la temperatura de la cámara y la temperatura de la probeta ensayada.

Con estos descensos de temperatura, podremos ver la fuerza que está haciendo la probeta para resistir a la contracción que le está provocando la variación de temperatura.

La segunda parte del ensayo es inverso al anterior: imponemos que la fuerza sea nula, y con la ayuda de los extensómetros mediremos la deformación producida en la probeta debido a los cambios de temperatura anteriormente comentados.

#### **4.2.3 Ensayo de fatiga: EBADE**

Este ensayo consiste en aplicar una carga cíclica de tensión-compresión para diferentes niveles de deformación, para determinar dos niveles de deformación críticos de la mezcla: el nivel máximo donde no se registra daño en la mezcla elástico, y el nivel de deformación en que la mezcla falla, produciendo un daño irreversible (irreversible). (Salvador,W. UPC 2012)

Con este ensayo podemos determinar el fallo por fatiga, simulando el mecanismo de fisuración de las mezclas bituminosas cuándo están sometidas a las sollicitaciones del tráfico y a las variaciones de la temperatura ambiente.

Se realizan una serie de ciclos a un nivel de deformación constante que van aumentando de magnitud hasta llegar a la rotura del material. En la Figura 9 se puede observar la preparación del ensayo EBADE.

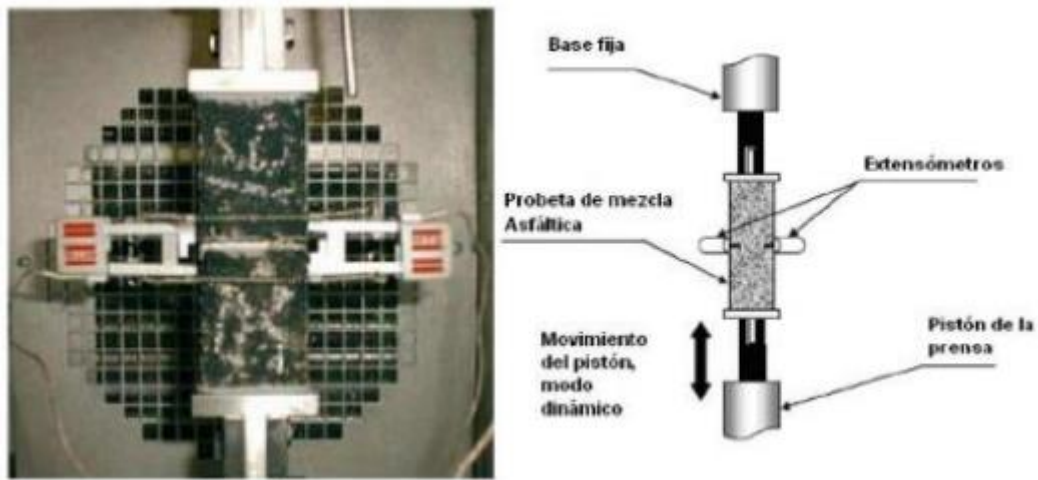


Figura 9. Descripción gráfica ensayo EBADE (Méndez, B.A. UPC 2016)

Al realizar este ensayo podemos obtener valores de tensión (ejemplo en la Figura 10), el módulo que resisten las probetas (Figura 11) y la disipación de energía que se produce en la probeta (Figura 12).

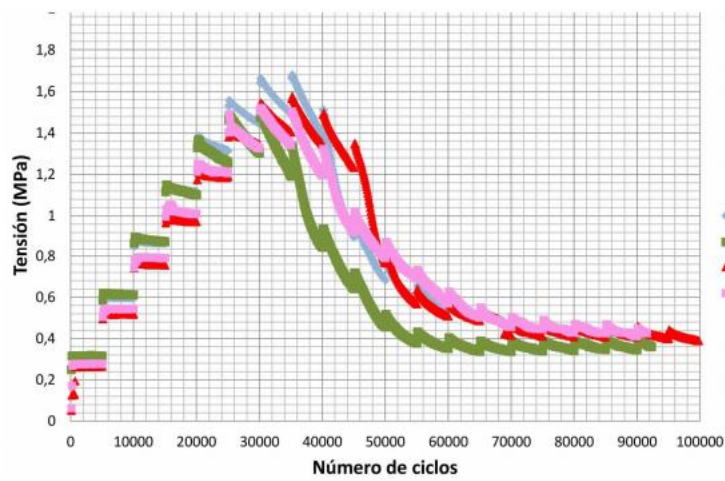


Figura 10. Ejemplo resultado EBADE tensión (Salazar, 2012).

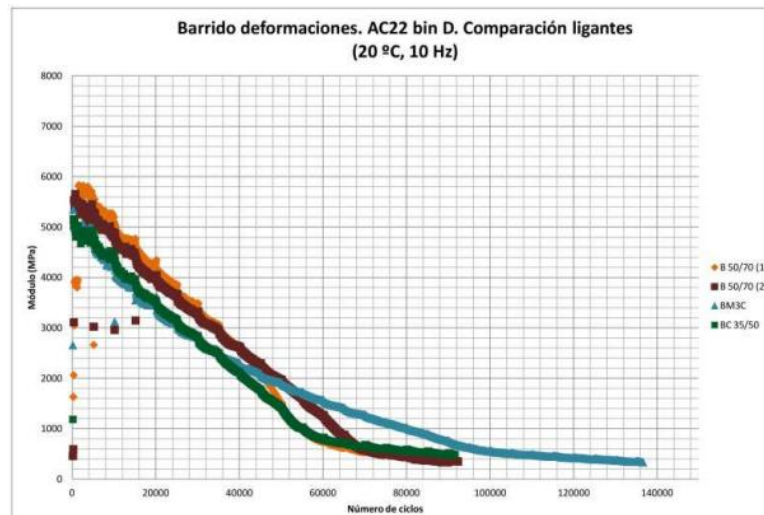


Figura 11. Ejemplo resultado EBADE módulo (Salazar, 2012).



Figura 12. Ejemplo resultado EBADE disipación de energía. (Salazar, 2012).

#### 4.2.4 Ensayo de módulo resiliente

Las deformaciones resilientes son de recuperación instantánea, el pavimento al ser expuesto a cargas cíclicas hace que aparezca una deformación permanente en la muestra.

El módulo resiliente se define como la magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión axial dividido entre la deformación axial recuperable. Utilizamos la siguiente Ecuación 3. (Aguado, C. UPC 2006)

$$Mr = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon_{axial}} = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_{axial}}$$

*Ecuación 3. Módulo resiliente*

Donde,

$\sigma_1$  = deformación principal mayor.

$\sigma_2$  = deformación principal menor.

$\sigma_d$  = esfuerzo desviador.

$\varepsilon_{axial}$  = deformación recuperable.

### Procedimiento

La probeta tipo Marshall se coloca en la base y se le ponen dos sensores que medirán la deformación que sufre la probeta al exponerla a las cargas cíclicas que se le aplicara a compresión.

Al aplicar cargas repetitivas se observa que el módulo tiende a ser constante después de un cierto número de ciclos de carga. Esto hace que la respuesta del suelo se pueda asumir como elástica.

Al módulo que permanece constante se le llama módulo resiliente, definido como el cociente entre la tensión desviadora axial repetida  $\sigma_d$  y la deformación axial recuperable  $\varepsilon_a$ .

Se obtienen dos valores de módulo resiliente debido a que se registran dos deformaciones durante el ciclo de carga, una al finalizar el pulso de carga y la otra al terminar el período de relajación.

Se utilizan las siguientes *Ecuación 4*

$$E_i = \frac{P(v+0,27)}{t \cdot D_i}$$

$$E_i = \frac{P(v+0,27)}{t \cdot D_i}$$

*Ecuación 4. Módulo resiliente total*

Dónde:

$E_i$ : módulo resiliente instantáneo

$E_t$ : módulo resiliente total

$\nu$ : coeficiente de Poisson

$t$ : espesor de la probeta

$D_i$ : deformación resiliente instantánea

$D_t$ : deformación resiliente total

#### 4.2.5 Ensayo de sensibilidad al agua

La norma UNE-EN 12697-12:2006 describe el método de ensayo para determinar el efecto de la saturación de una probeta debido a una inmersión acelerada en agua. Para ver esta comparación se hace el ensayo de tracción indirecta y se relacionan los resultados de las probetas en seco y las húmedas.

Para saturar las probetas se tienen que poner durante 72 horas en un baño de agua a una temperatura de 40°C. Después de este tiempo se dejan durante 24 horas a una temperatura de 15°C.

La normativa establece una temperatura de ensayo que va de 5 a 25 grados, siendo 25 la temperatura normalizada del ensayo.

Para calcular la relación a la tracción indirecta se aplica la siguiente Ecuación 5:

$$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d}$$

*Ecuación 5. Tracción indirecta sensibilidad agua*

Dónde  $ITS_w$  i  $ITS_d$  son las resistencias a tracción indirecta de las probetas en seco (d) y la húmedas (w)

#### 4.2.6 Ensayo de Tracción indirecta

La norma UNE-EN 12607-23 especifica el método para determinar la resistencia a la tracción indirecta de una probeta de mezcla bituminosa. Este ensayo se basa en calcular la resistencia máxima de una probeta cilíndrica justo antes de romperse, sometida a una carga diametral y a una temperatura de ensayo especificada.

##### Procedimiento:

Colocamos la probeta tipo Marshall centrada para que se ejecute una fuerza a compresión en la parte diametral. Esta fuerza irá incrementando con el tiempo. Con la carga máxima y las características de la probeta podremos sacar la Resistencia a la tracción indirecta con la siguiente Ecuación 6.

$$ITS = \frac{2P}{\pi D H}$$

*Ecuación 6. Tracción indirecta*

Donde,

$\sigma_{oct}$  = Resistencia a la tracción indirecta.

F = Carga Máxima.

D = Longitud de la línea de contacto de la probeta.

H = Dimensión de la sección transversal.

#### 4.2.7 Ensayo de Irradiación

La Resistencia térmica es la diferencia de temperatura en dos superficies definidas de un material que genera una unidad de velocidad de flujo de calor cuando atraviesa una unidad de área. Este valor se determina dividiendo el espesor entre la conductividad térmica de la muestra. (Mercedes, R. UPC 2016)

Los objetivos de este ensayo son obtener las velocidades de enfriamiento y calentamiento en varios puntos del firme simulado, y conseguir la variación de temperatura en función de la profundidad de la probeta.

### Preparación del ensayo.

En un cilindro vamos a introducir 3 capas que van a simular el asfalto. Para la capa base pondremos 12 cm de zahorra, la capa intermedia será compuesta de una mezcla bituminosa cualquiera de probetas desechables, y por último en la capa de rodadura pondremos 6 cm de nuestra mezcla bituminosa. Todas estas capas estarán pegadas con betún.

En cada separación de capas colocamos un sensor que medirá la temperatura en un total de 4 puntos diferentes. En la siguiente Figura 13 se puede ver la estructura del firme con los sensores:



*Figura 13. Estructura mezcla ensayo irradiación*

Este firme simulado lo colocamos en el suelo, cubierto con un porexpan dónde solo se verá la capa de rodadura. Este porexpan hará que el calor sólo toque a la muestra por la parte de arriba y no por los laterales.

A una altura de 60 cm aproximadamente, colocamos 4 focos de luz que producirán el calor al firme. En la siguiente Figura 14 se puede ver la estructura del ensayo:



*Figura 14. Estructura ensayo de irradiación (Mendez, B.A. UPC 2016)*

Para iniciar el ensayo abrimos los focos de luz y ponemos en marcha el datalogger para que vaya midiendo las variaciones de temperatura en cada punto de la muestra. El ensayo tendrá 6 horas de inyección de calor. Una vez transcurridas este tiempo, apagaremos los focos y dejaremos que el firme vuelva a la temperatura ambiente. En todo momento el datalogger estará guardando los datos de las temperaturas. De este modo podremos calcular la velocidad de calentamiento y enfriamiento del firme que estamos estudiando.



## 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan y analizan los datos y resultados obtenidos de los ensayos térmicos y mecánicos de las dos mezclas bituminosas.

### 5.1 Densidad máxima y contenido de huecos

De acuerdo al procedimiento descrito en el apartado 4.2.1 La Tabla 1 muestra los resultados finales de las densidades aparentes y máximas para cada tipo de mezcla.

El resultado de la densidad aparente es la media del resultado de 24 probetas para la mezcla siderúrgica y 22 probetas para la convencional.

Tabla 1. Densidades aparentes y máximas según tipo de mezcla

	<b>Mezcla Siderúrgica</b>	<b>Mezcla Convencional</b>
Densidad Aparente	2,7 kg/m <sup>3</sup>	2,33 kg/m <sup>3</sup>
Densidad máxima	3,12 kg/m <sup>3</sup>	2,44 kg/m <sup>3</sup>

Podemos ver que la mezcla con árido siderúrgico tiene mayor densidad que la mezcla convencional, eso es debido a que la mezcla siderúrgica está hecha con escorias de acería que poseen un peso específico superior. La densidad del árido convencional es 1,6 kg/m<sup>3</sup> i la del árido siderúrgico es 3,5 kg/m<sup>3</sup>. (Giménez Ribera 2016)

En todo caso, la densidad aparente no debe superar la densidad máxima. Este dato vemos que se cumple sin problema.

El **contenido de huecos** de las dos mezclas viene representado en la siguiente Tabla 2.

Tabla 2. Contenido de huecos de las mezclas.

	Mezcla Siderúrgica	Mezcla Convencional
Contenido de huecos	13,4 %	4,5%

Podemos observar que la mezcla siderúrgica tiene mucha más cantidad de huecos que la mezcla convencional. Eso es debido a que los áridos siderúrgicos no se compenentran tan bien como los áridos granulares convencionales, ya que son unos áridos más rígidos.

La consecuencia positiva que tendremos con este resultado es que la mezcla siderúrgica será más porosa y podrá drenar con más rapidez y facilidad el agua que precipite en la carretera.

## 5.2 Módulo resiliente

Hemos realizado el ensayo para 3 temperaturas distintas,  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $5^{\circ}\text{C}$  y  $20^{\circ}\text{C}$ , ensayando 3 muestras para cada temperatura y para cada tipo de mezcla bituminosa.

Para cada muestra y temperatura hemos hecho los promedios de los cuáles sacamos los siguientes resultados. La Figura 15 para la mezcla siderúrgica y Figura 16 para la convencional.

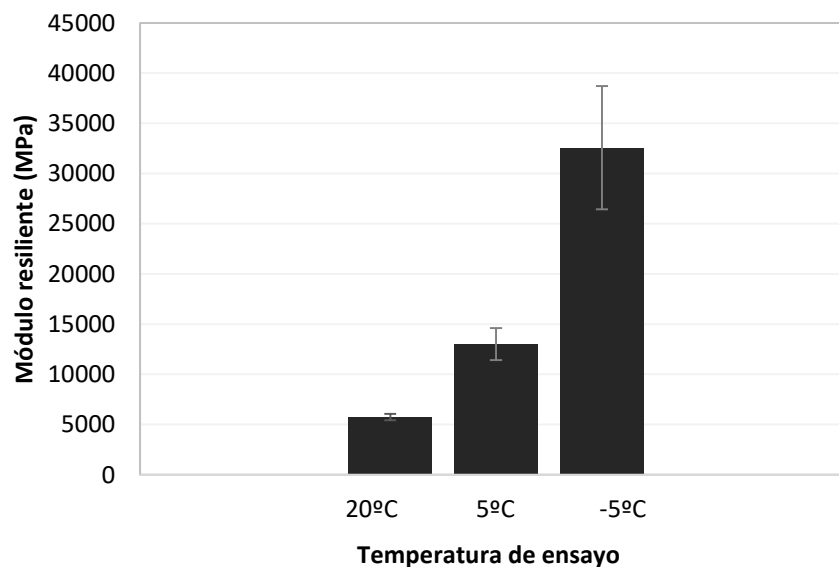


Figura 15. Comportamiento del módulo resiliente de la mezcla siderúrgica con la temperatura.

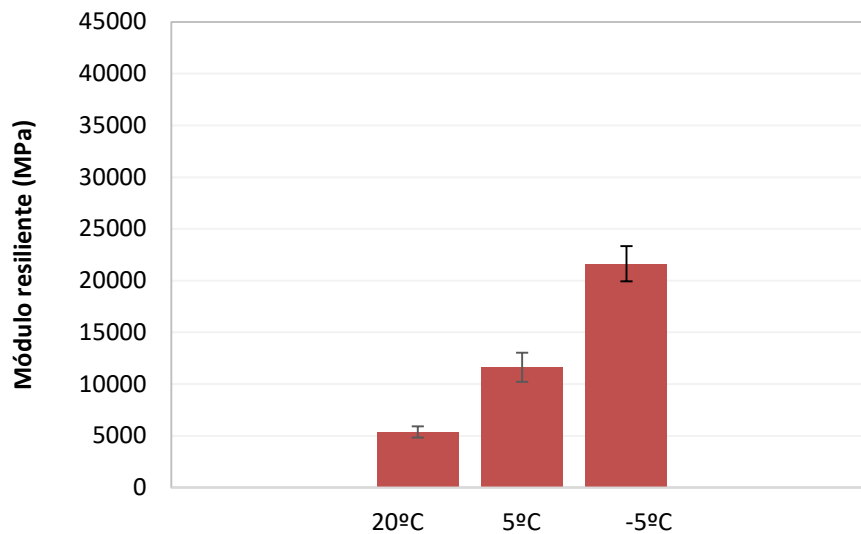


Figura 16. Comportamiento del módulo resiliente de la mezcla convencional con la temperatura.

Como podemos observar, la mezcla con árido siderúrgico tiene mayor resistencia a la deformación que la mezcla con árido convencional. Esto significa que la mezcla con árido siderúrgico necesita una carga mayor para alcanzar la misma deformación que la mezcla convencional. Esto podría ser debido a que el árido siderúrgico tiene mejor rugosidad y factor de forma, lo que provoca una distribución de esfuerzos más efectiva

También podemos ver que cuanto más temperatura de ensayo, el valor del módulo resiliente disminuye en gran cantidad. Esto es debido a que a temperaturas bajas, el betún tiene una conducta de material sólido elástico, mientras que a temperaturas altas, el material se comporta como un fluido viscoso.

### 5.3 Tracción indirecta

En este ensayo también se estudió para las tres temperaturas del ensayo de módulo resiliente: -5°C, 5°C y 20°C. Con también tres probetas por temperatura y mezcla.

Los datos del resultado del ensayo son introducidos al Excel para crear una gráfica tipo la Figura 17 donde se puede observar el valor de carga y desplazamiento que sufre la probeta ensayada:

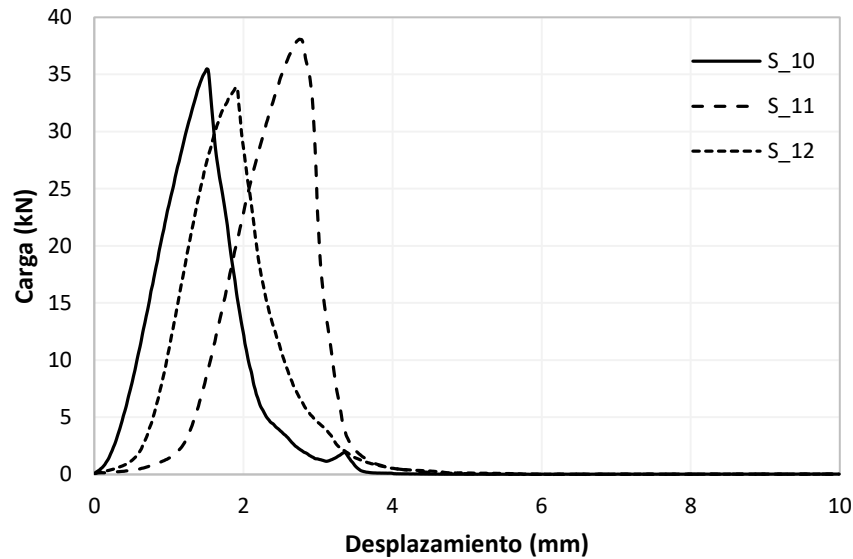


Figura 17. Gráfica tipo resultado tracción indirecta

Con los valores máximos de carga, calculamos el módulo de tracción indirecta. A continuación, podemos ver la Tabla 3 con los resultados para cada temperatura y mezcla. Valores en MPa.

Tabla 3. Resultados tracción indirecta

	-5°C		5°C		20°C	
	Media	d.e.	Media	d.e.	Media	d.e.
Siderúrgico	<b>3,86</b> MPa	0,4 Mpa	<b>3,74</b> MPa	0,2 Mpa	<b>2,01</b> MPa	0,1 MPa
Convencional	<b>4,19</b> MPa	0,3 Mpa	<b>4,47</b> MPa	0,4 Mpa	<b>2,27</b> MPa	0,1 MPa

El comportamiento de este ensayo es parecido al ensayo de módulo resiliente: al aumentar la temperatura de ensayo, la capacidad de carga de la probeta disminuye considerablemente. En este ensayo la mezcla con árido convencional obtuvo mejores resultados de módulo para cada temperatura.

Por lo que hace a las deformaciones, podemos ver en la siguiente Tabla 4, que cuando más se eleva la temperatura, las probetas tienen más deformación debido a lo explicado anteriormente en el ensayo de módulo resiliente, a altas temperaturas el betún es inestable y permite una mayor deformación del material. Valores en milímetros.

Tabla 4 Deformaciones tracción indirecta

	-5°C		5°C		20°C	
	Media	d.e.	Media	d.e.	Media	d.e.
Siderúrgico	<b>1,7</b> mm	0,4 mm	<b>1,8</b> mm	0,2 mm	<b>1,9</b> mm	0,1 mm
Convencional	<b>1,8</b> mm	0,3 mm	<b>1,9</b> mm	0,4 mm	<b>2,1</b> mm	0,1 mm

Podemos ver que la deformación de la mezcla con árido siderúrgico tiene menor deformación, lo que nos dice que la mezcla con árido siderúrgico tiene mayor capacidad de carga.

Comparando los dos resultados, podemos concluir que la mezcla siderúrgica y la mezcla convencional tienen un valor de módulo muy parecido. No obstante, la mezcla convencional obtiene una mayor deformación al no ser tan rígida.

#### 5.4 Sensibilidad al agua

En este ensayo romperemos a tracción indirecta 6 probetas de cada tipo de mezcla, 3 de ellas han sido sumergidas previamente durante 72 horas a 25°C.

La normativa nos indica que el porcentaje de la siguiente fórmula debe reducirse como máximo un 10% para este tipo de mezcla.

$$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d}$$

Los resultados se muestran en la Tabla 5:

Tabla 5. Sensibilidad al agua de las mezclas ensayadas.

	Siderúrgico	d.e.	Convencional	d.e.
	ITSR (%)	98 %	4,7%	100%

Podemos observar que en la mezcla siderúrgica solo se reduce un 2% y en la convencional no se reduce. Esto nos indica que el agua no afecta en las dos mezclas bituminosas. (Martínez, A 2008)

En las siguientes gráficas podemos ver el comportamiento de las dos mezclas en cuanto a carga y desplazamiento:

Siderúrgica

Seco y húmedo. Figura 18

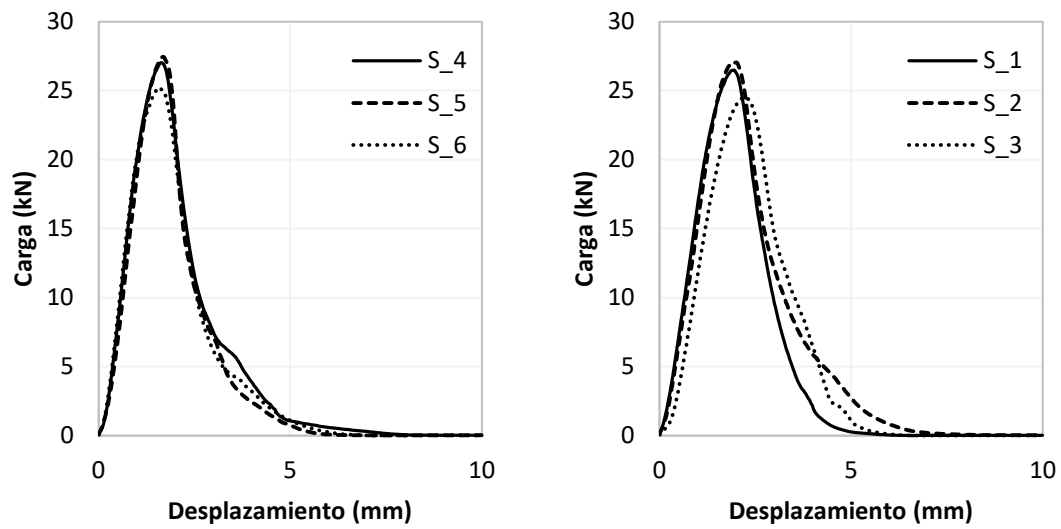


Figura 18. Gráficas sensibilidad al agua siderúrgica

Convencional

Seco y húmedo. Figura 19

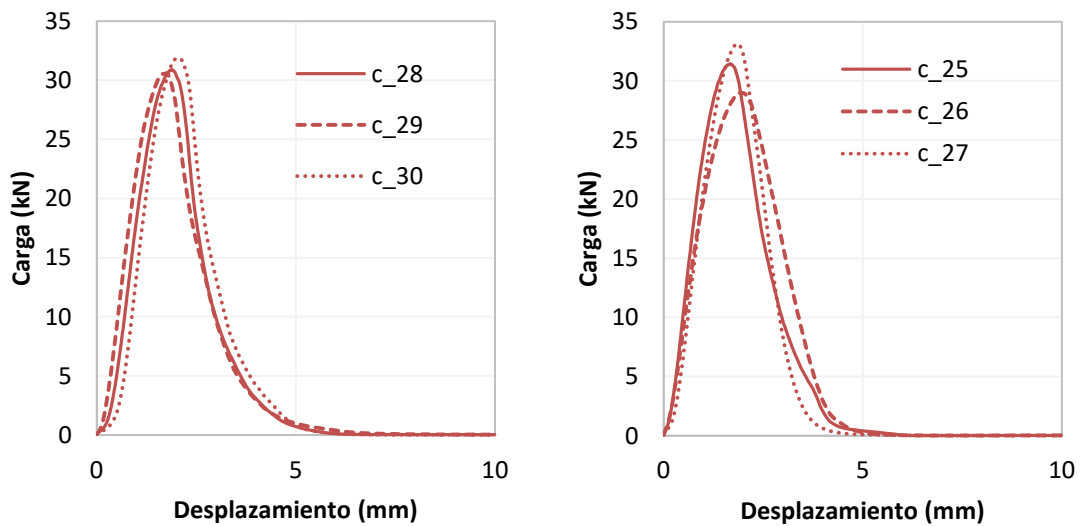


Figura 19. Gráficas sensibilidad al agua convencional.

## 5.5 Irradiación térmica

En este ensayo se ensayarán 4 probetas, dos de cada tipo de mezcla bituminosa. Las probetas tipo Marshall se cortarán para que tengan una altura de 3 cm. Estas probetas simularan la capa de rodadura de un asfalto. Debajo de ellas pondremos una capa intermedia de 6 cm de una mezcla asfáltica densa y una base de 12 cm de zahorra compactada.

Para conocer la temperatura en cada punto de dicha simulación de asfalto, colocaremos 4 sensores, el primero en superficie, el segundo estará a 3 cm de la superficie, entre la capa de rodadura y la capa intermedia, el tercero a 6 cm de profundidad, entre la capa intermedia y la capa base, y el último en medio de la capa base a una profundidad de 12 cm. La distancia entre sensores es de 3 cm entre los tres primeros sensores y de 6 cm entre el tercero y el cuarto sensor.

Las 4 muestras se han ensayado por duplicado. A continuación se pueden ver los resultados de cada muestra, haciendo la media de resultados de los dos ensayos hechos con cada probeta.

Mezcla siderúrgica Figura 20, primera probeta:

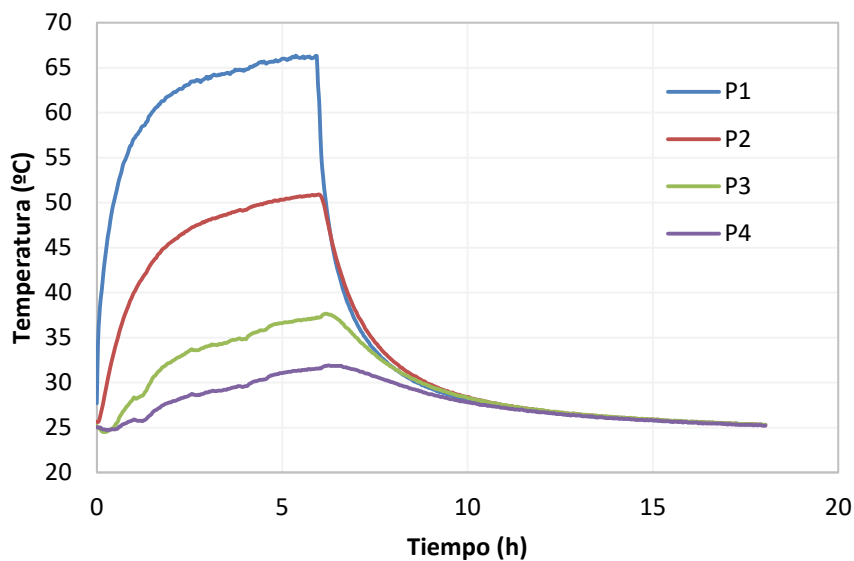


Figura 20. Resultado irradiación 1 siderúrgico

Mezcla siderúrgica Figura 21, segunda probeta:

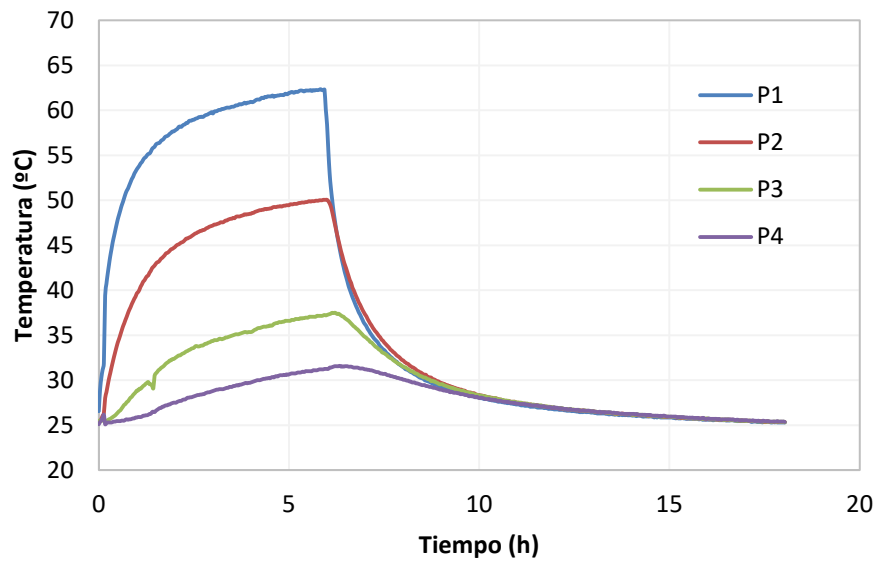


Figura 21. Resultados Irradiación 2 siderúrgico

En la siguiente Figura 22 podemos observar cómo se enfría la probeta en los diferentes puntos:

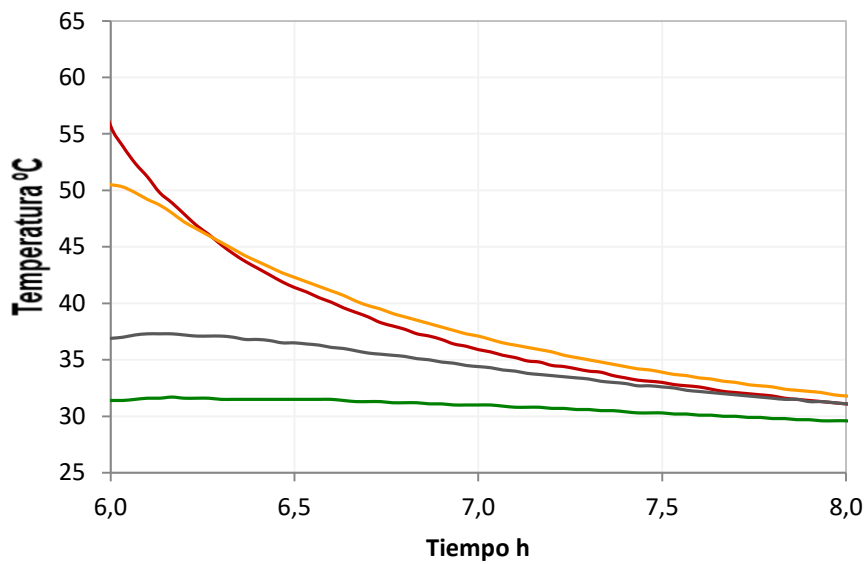


Figura 22. Enfriamiento de las probetas de irradiación

Un dato importante del enfriamiento de la muestra es que a la media hora de apagar el foco de calor, la temperatura en la posición 1 (superficie) es más baja que la temperatura en la posición 2 (posición entre capa base y capa intermedia) y se mantiene así hasta 6 horas después de apagar el foco de calor, en este momento la temperatura en las 4 posiciones de la muestra vuelve a ser la misma y baja conjuntamente hasta la temperatura inicial.

Para la mezcla convencional pudimos sacar las siguientes Figura 23 i Figura 24:

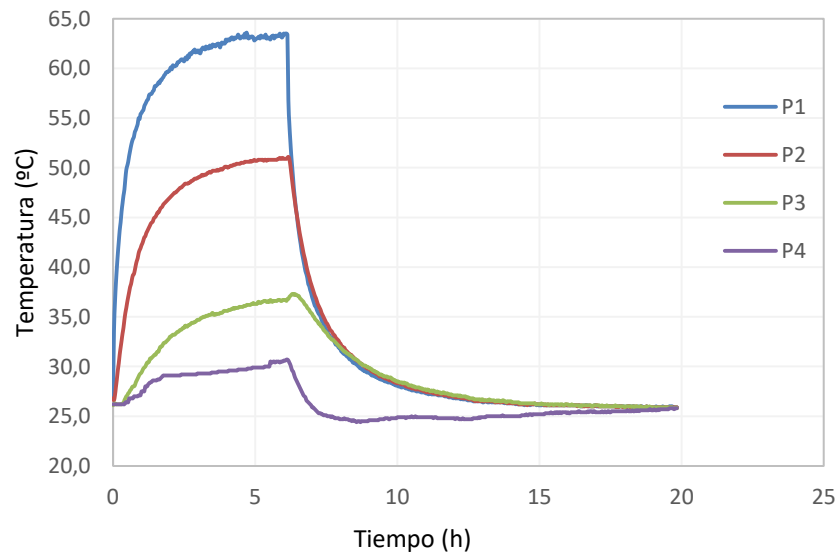


Figura 23. Resultados irradiación 3 convencional.

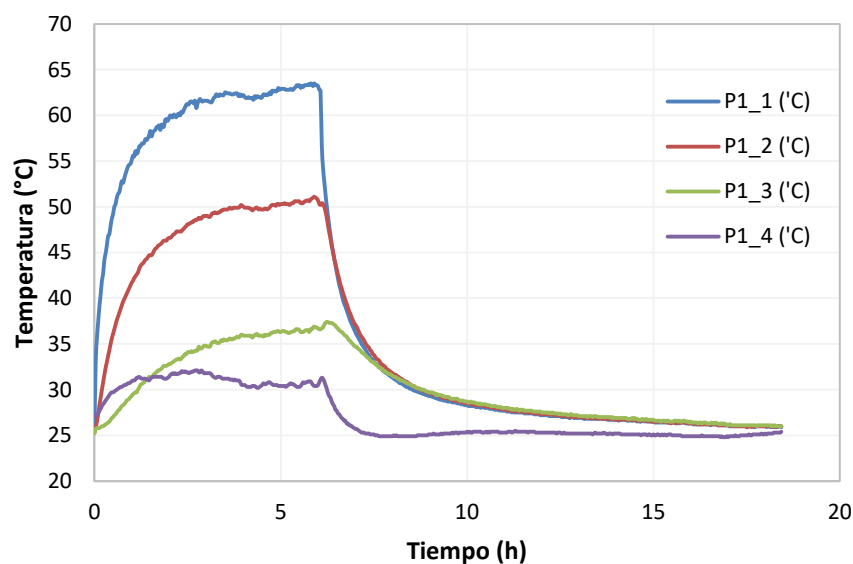


Figura 24. Resultados irradiación 4 convencional

De las anteriores figuras podemos ver que la mezcla siderúrgica alcanza una temperatura algo mayor que la mezcla convencional. También podemos observar que las probetas de áridos siderúrgicos en el ciclo de enfriamiento del ensayo tienen un descenso de temperatura más estable entre la superficie y base. Esto es debido a que la escoria negra la cual está constituido el árido siderúrgico, tiene menor difusividad térmica que el granito de la mezcla convencional. Este dato de las difusividad también se puede comprobar analizando la velocidad de calentamiento de las probetas. Las probetas de mezcla siderúrgica tienen un calentamiento más lento que la muestra con árido convencional. Este factor es debido a que los áridos siderúrgicos tienen una mayor porosidad que hace que el flujo de calor tenga una discontinuidad, de este modo el flujo de calor no fluye tan rápidamente.

La capa base apenas alcanza la temperatura de 40°C, i la intermedia no supera los 50°C.

## 5.6 Ensayo EBADE

En este apartado se ensayaron 6 probetas, 3 de cada tipo de mezcla bituminosa. Al descargar todos los resultados del programa al Excel se observó que se había parado el ensayo antes de tiempo y no se pudo llegar a su conclusión. Aun así, podemos sacar algunas conclusiones con los resultados que hemos obtenido.

### Tensión

En la siguiente Figura 25 y Figura 26 se muestran la tensión alcanzada en la mezcla convencional y siderúrgica, respectivamente.

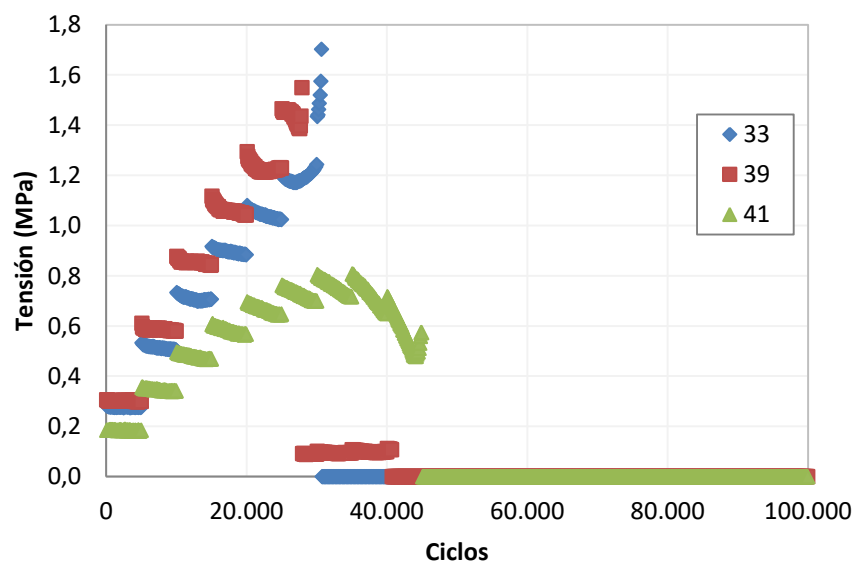


Figura 25. Tensión EBADE convencional

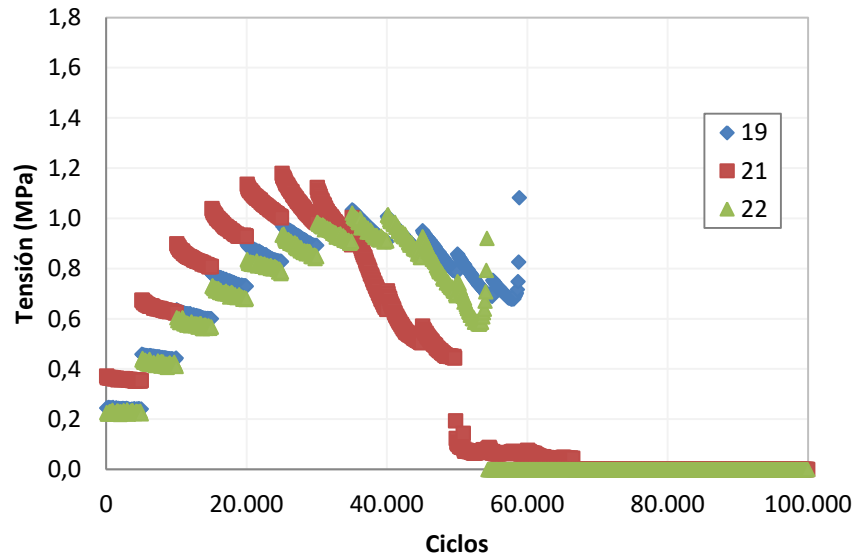


Figura 26. Tensión EBADE siderúrgico

En las figuras anteriores podemos ver la evolución de la tensión a que están sometidas las mezclas durante el ensayo, en el eje vertical. Esta tensión se ha obtenido dividiendo la carga aplicada entre la sección de la probeta con los cortes laterales.

Se ha establecido como criterio de fallo a fatiga de la mezcla, el nivel de deformación en que se reduce a la mitad la tensión máxima alcanzada por el material durante el proceso de fatiga.

Como muestran las gráficas anteriores, la mezcla siderúrgica alcanza unos valores más altos de tensión, esto es debido a que la mezcla siderúrgica es más rígida que la convencional. Este mismo motivo también explica que tengamos valores de módulo más altos que en mezclas con betunes similares, tales como los BM3C (Salvador, 2012).

## Módulo

En las siguientes Figura 27 y Figura 28 se muestran el módulo alcanzado en la mezcla convencional y siderúrgica, respectivamente.

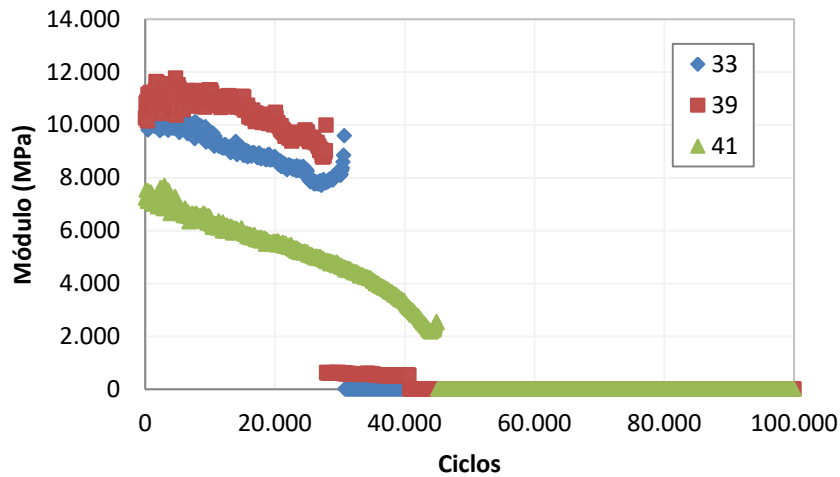


Figura 27. Módulo EBADE convencional

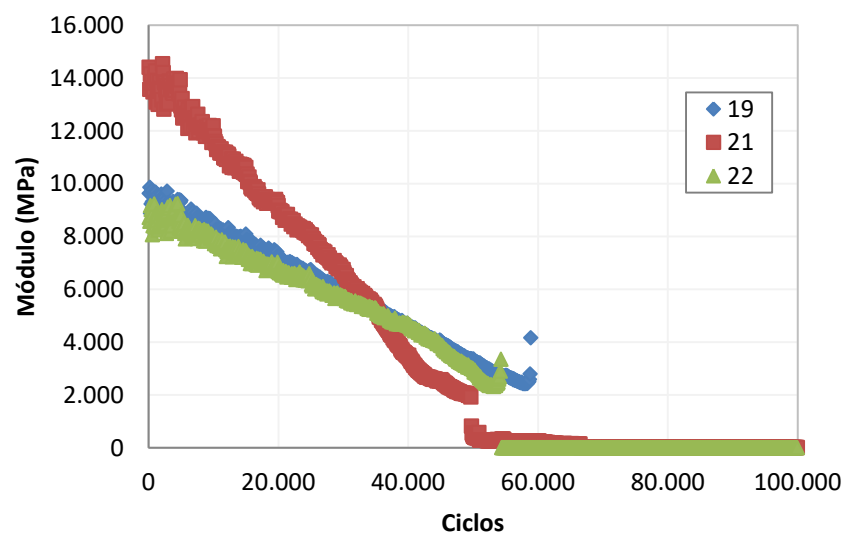


Figura 28. Módulo EBADE siderúrgica

Estas gráficas permiten analizar cómo se va produciendo el deterioro de las mezclas durante el proceso de fatiga.

Comparando nuestros resultados, observamos que los valores de módulo son bastante más altos, y en el caso de la mezcla siderúrgica, aun son un poco más altos

que la mezcla convencional. Estos valores son más altos que los encontrados con mezclas similares, BBTM, con betunes similares (Salvador, 2012).

El módulo de rigidez influye mucho en el cálculo de la fatiga, ya que una mezcla con un módulo muy alto tendrá una capacidad de deformación más pequeña, pero una capacidad de retorno a su estado inicial más elevada. Tendrá una deformación inicial más pequeña y esto implicará un periodo de vida inferior. (Salvador, 2012)

### Energía disipada

En las siguientes Figura 29 y Figura 30 se muestran la energía disipada en la mezcla convencional y siderúrgica, respectivamente.

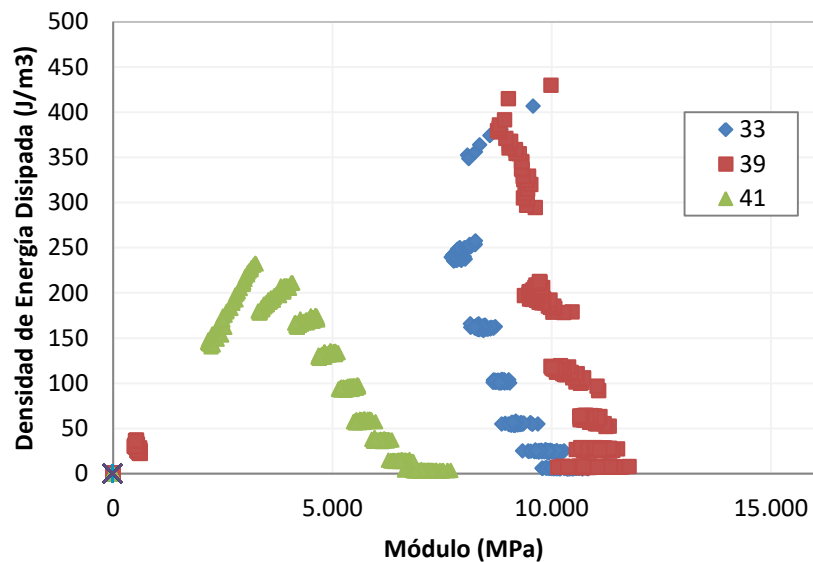


Figura 29. Energía disipada EBADE convencional

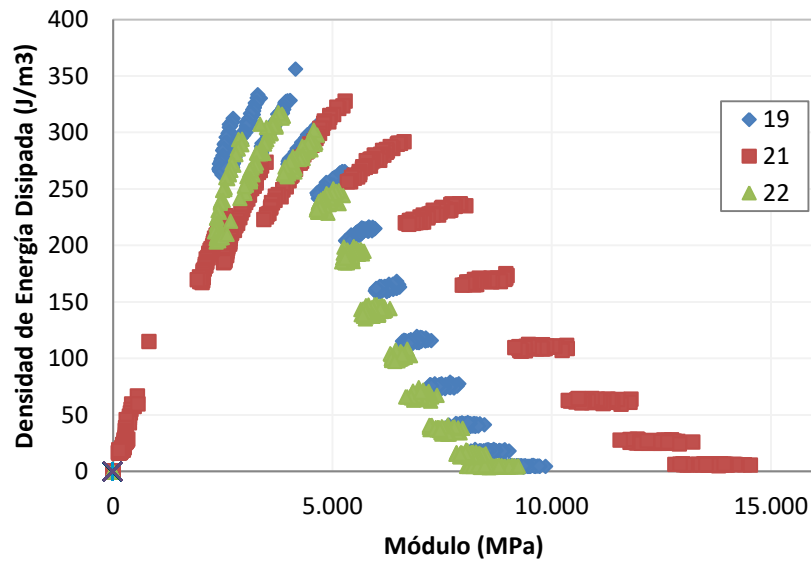


Figura 30. Energía disipada EBADE siderúrgico

Analizando las dos anteriores figuras, observamos que la mezcla siderúrgica, que recordamos que es más rígida, obtiene unos valores de disipación de energía más bajos. Esto es debido a que una mezcla menos rígida puede alcanzar deformaciones más elevadas sin romper, por lo que acaban obteniendo valores más elevados de energía disipada.

Esto explica que la mezcla convencional, es un poco más dúctil que la siderúrgica, alcance valores de disipación de energía mayores.

Comparando nuestros resultados con mezclas de características similares (Salvador, 2012) vemos que los de disipación de energía son más altos que los nuestros. Esto es debido a que sus mezclas son mucho menos rígidas que las nuestras, por lo que se deforman más y alcanzan valores de disipación de energía superiores.

## 5.7 Deformación y tensión debidas a los efectos térmicos

En este ensayo, estudiaremos el comportamiento de 4 probetas, dos de cada tipo de mezcla. Cada probeta se ensayará por duplicado. En el primer ensayo el control será por desplazamiento, manteniéndolo a 0 y midiendo la fuerza producido debido a la variación de temperatura. En el segundo ensayo se intercambian las posiciones y mantenemos la fuerza en 0 y medimos el desplazamiento producido.

En la siguiente Figura 31 se muestra el ciclo térmico al que se someten las probetas, tanto, en el ensayo de deformación y el ensayo de tensión.

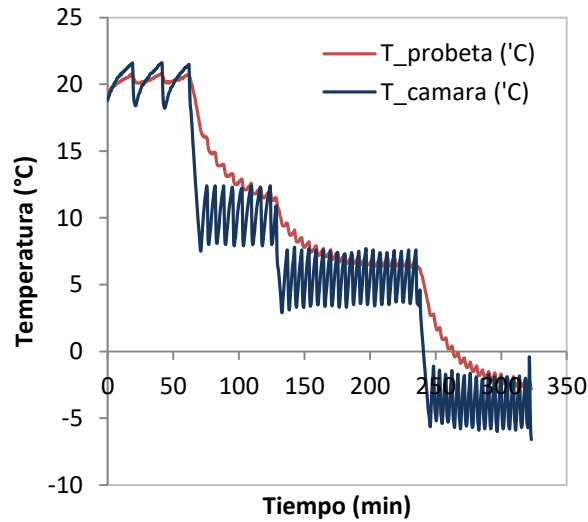


Figura 31. Ciclo térmico al que se someten las probetas

Como podemos observar en la Figura 31, la velocidad de enfriamiento de la cámara es más rápida que la velocidad de enfriamiento de la probeta.

### Tensión debido a efectos térmicos

A continuación se muestra el comportamiento en deformación de las probetas con árido convencional y árido siderúrgico.

#### Árido convencional

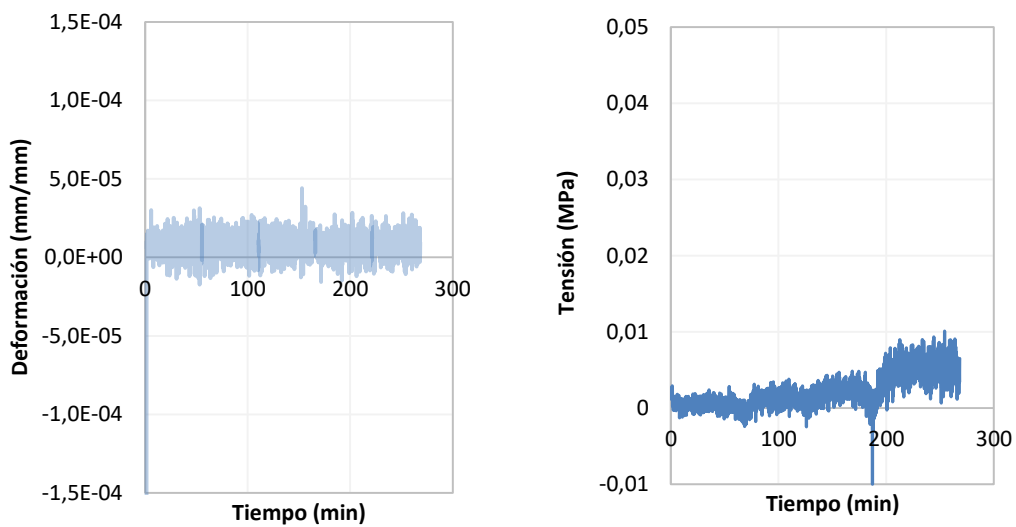


Figura 32 Resultado de tensión probeta convencional 32

En la Figura 32 anterior, probeta 32 convencional, se puede observar que la tensión es mínima, lo que puede suponer que la probeta ha fallado y no se han realizado las mediciones correctamente.

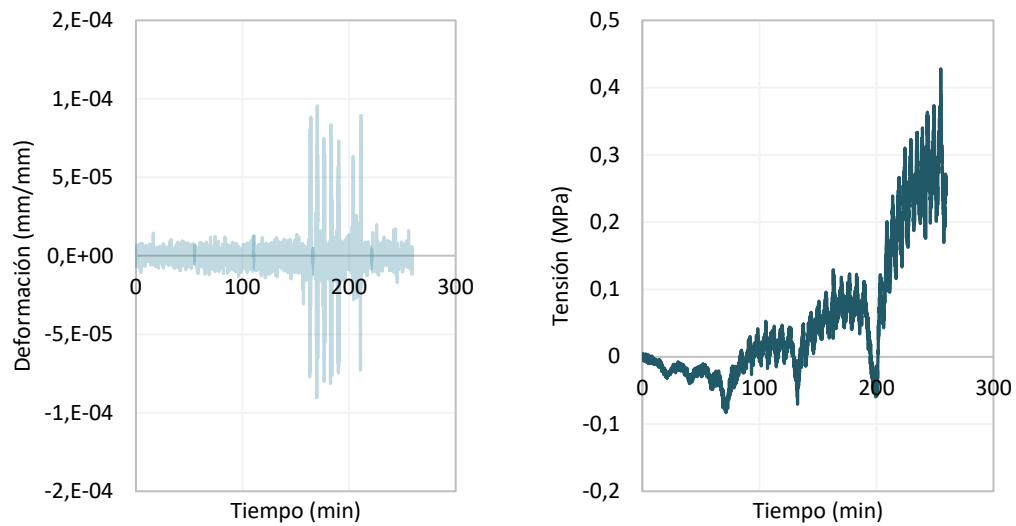


Figura 33 Resultado de tensión probeta convencional 43

En la Figura 33 anterior, probeta 43 convencional, se puede observar el incremento de la tensión generada por la disminución de la temperatura.

### Árido siderúrgico

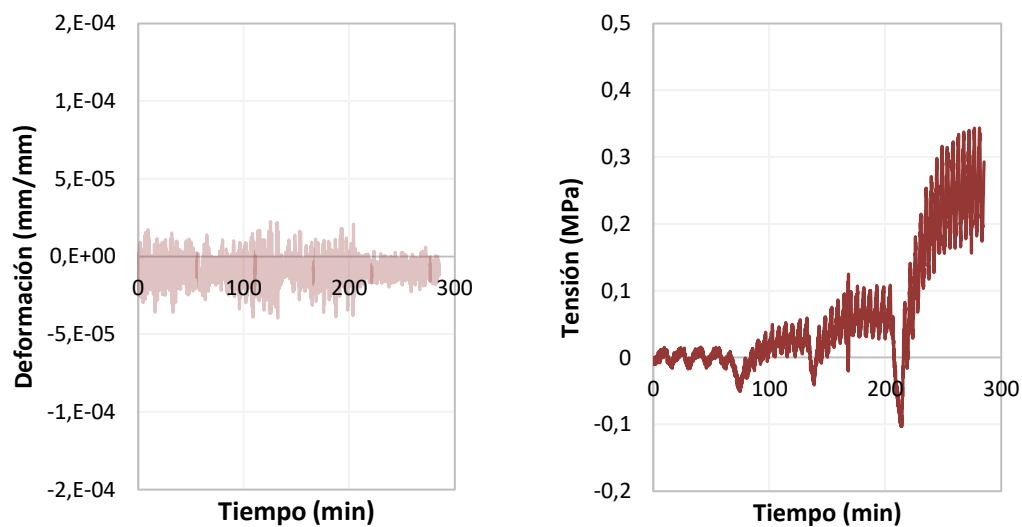


Figura 34 Resultado de tensión probeta siderúrgica 14

En la Figura 34 anterior, probeta 14 siderúrgica, se puede observar el incremento de la tensión generada por la disminución de la temperatura.

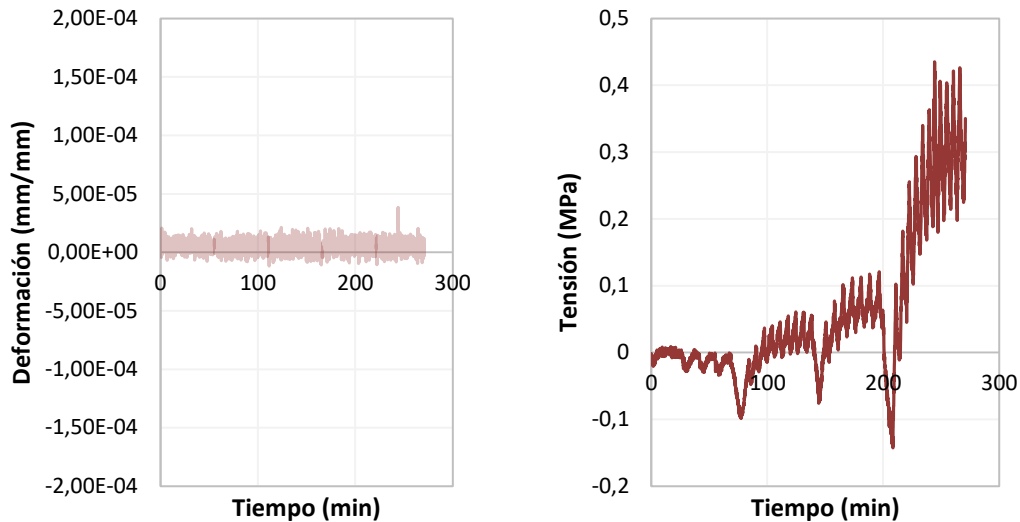


Figura 35. Resultado de tensión probeta siderúrgica 20

En la Figura 35 anterior, probeta 20 siderúrgica, se puede observar el incremento de la tensión generada por la disminución de la temperatura.

En todos los casos anteriores, podemos observar que cada vez que reducimos la temperatura, se genera un pico de tensión negativa provocada por el cambio brusco de temperatura en la cámara.

La tensión alcanzada en las tipos de mezclas es bastante alta y similar. En el siguiente apartado veremos cómo afectará la deformación producida por esta gran tensión.

## Deformación debido a efectos térmicos

### Probetas Convencionales

En la siguiente Figura 36 y Figura 37 se muestra el comportamiento de deformación de las probetas convencionales 32 y 43.

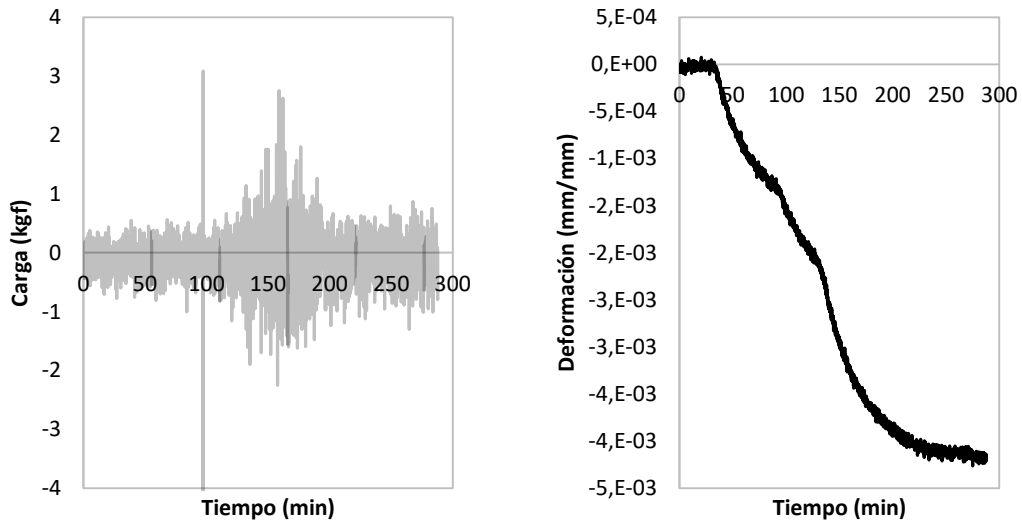


Figura 36. Resultado de deformación probeta convencional 32.

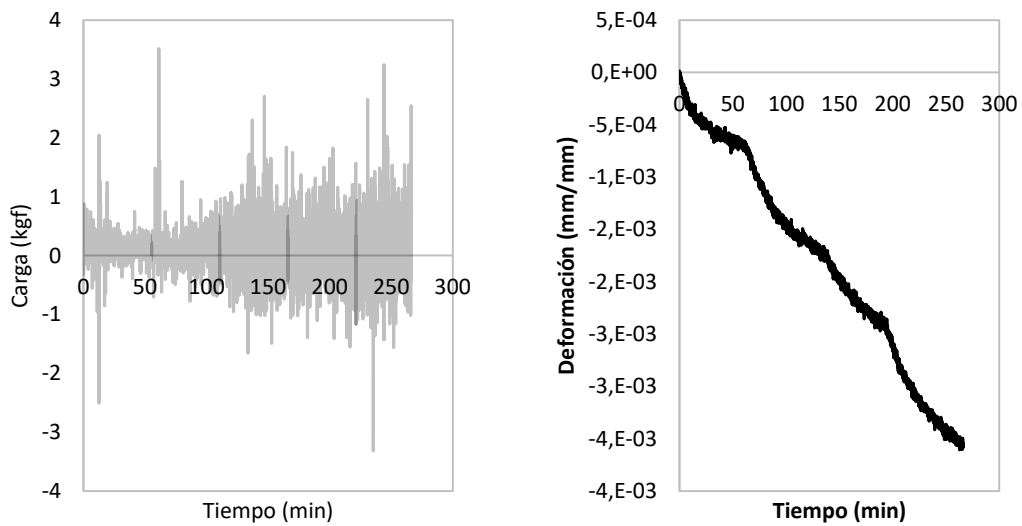


Figura 37. Resultado deformación probeta convencional 43

Para las probetas con mezcla siderúrgica, tenemos los resultados de las Figura 38 y Figura 39.

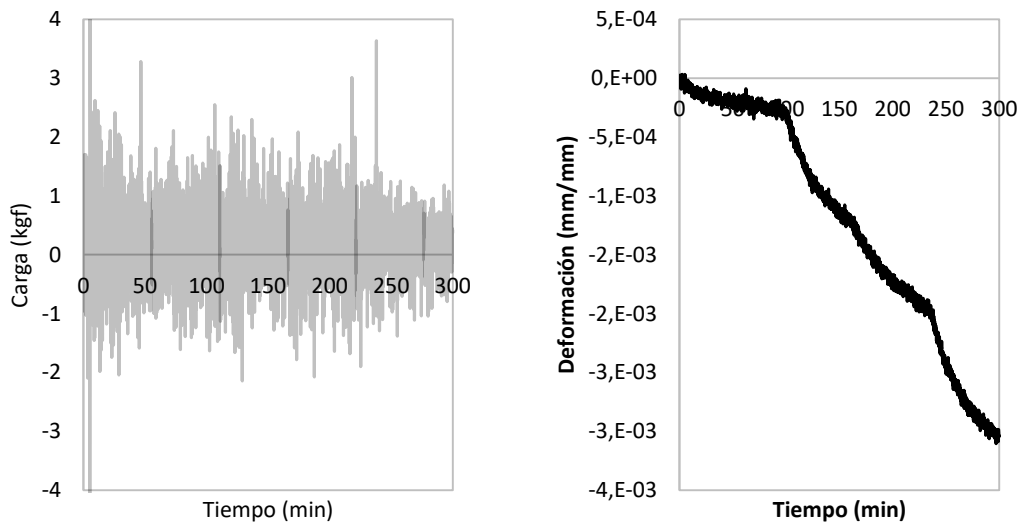


Figura 38. Resultados deformación probeta siderúrgica 14.

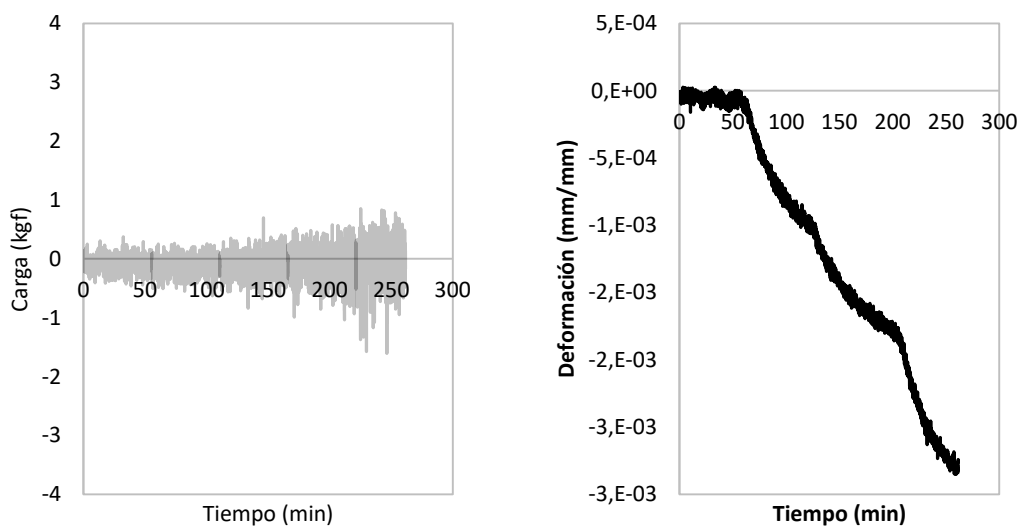


Figura 39. Resultados deformación probeta siderúrgica 20.

Comparando las dos mezclas, observamos que las probetas siderúrgicas alcanzan menor deformación que las probetas convencionales. Como hemos dicho anteriormente, esto pasa porque la mezcla siderúrgica es más rígida que la mezcla convencional, y esto hace que la capacidad de deformación de una mezcla rígida se menor que una más dúctil.

Analizando los valores obtenidos, vemos que se produce una deformación considerable, ya que si relacionamos estos resultados para un pavimento de 1 metro de longitud, las deformaciones serian de varios milímetros por metro, valor considerable a tener en cuenta.



## 6 CONCLUSIONES

Se ha realizado este estudio con el fin de establecer el comportamiento térmico y mecánico de una mezcla hecha con árido siderúrgico, comparándola con una mezcla con árido convencional. Nos hemos basado en ensayos de laboratorio útiles para lograr este objetivo. A continuación mostramos las conclusiones resultantes según las comparaciones y análisis de los resultados de los capítulos anteriores:

❖ Conclusión general:

- Las mezclas bituminosas con árido siderúrgico tienen una conductividad térmica menor que las mezclas con árido convencional, esto hace que sean menos susceptibles al cambio de temperatura. La mezcla siderúrgica es más rígida y puede soportar más tensiones con el inconveniente que su capacidad de deformación es más baja.

❖ Conclusiones específicas:

- La mezcla con árido siderúrgico tiene mayor densidad y contenido de huecos en las probetas.
- La mezcla siderúrgica ofrece un módulo resiliente mayor en todas las temperaturas ensayadas en comparación con el árido convencional.
- Los resultados de tracción indirecta de ambas mezclas mostraron una resistencia similar
- El efecto de sumergir las probetas en agua no afecta a la resistencia a tracción indirecta.

- En el ensayo EBADE obtenemos unos valores altos de módulo y tensión, que son superiores en las mezclas siderúrgicas al ser más rígidas. Esto conlleva que la deformación en las mezclas convencionales sea mayor, por lo que disipan mayor cantidad de energía.
  
- Se producen deformaciones considerables en el ensayo de Deformación debido a efectos térmicos en la mezcla. Las probetas de mezcla convencional se deforman un poco más por ser menos rígidas.
  
- En el ensayo de irradiación la temperatura alcanzada en las dos mezclas es similar pero las probetas de mezcla siderúrgica tienen un calentamiento más lento que la muestra con árido convencional debido a que tienen más cantidad de huecos, por lo que se genera una discontinuidad que hace que el calor no fluya tan rápidamente.

## **7 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

Para futuras investigaciones se propone desarrollar los siguientes temas:

- ❖ Analizar si todos los tipos de escorias de acerías son aptos para la fabricación de mezclas bituminosas.
  
- ❖ Desarrollar y realizar un estudio con ciclos de calentamiento-congelamiento con la finalidad de estudiar las posibles fisuras aparecidas.
  
- ❖ Estudiar y analizar cómo afecta el envejecimiento en las mezclas con árido siderúrgico, comparándola con una mezcla convencional.



## 8 REFERENCIAS

- AENOR, Asociación española de normalización y certificación. Julio 2001.** *Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.* Julio 2001. UNE-EN 1097-6.
- **Diciembre 2007.** *Determinación de la densidad máxima.* Diciembre 2007. UNE-EN 12697-5:2003+A1.
- **Enero 2004.** *Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas.* Enero 2004. UNE-EN 12607-23.
- **Noviembre 2006.** *Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezclas bituminosas.* Noviembre 2006. UNE-EN 12697-12.
- **Noviembre 2003.** *Determinación del contenido de huecos de las probetas bituminosas.* Noviembre 2003. UNE-EN 12697-8.
- Aguado, C. (2006).** *Estudio del daño por humedad en mezclas bituminosas fabricadas con áridos siderúrgicos.* Universidad Politécnica de Catalunya.
- Amaral De Lima, Luciana. 1999.** *Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental.* BARCELONA : s.n., 1999. Tesis doctoral; UPC.
- Baltasar Rubio, Rafael Jiménez, Félix Pérez y Adriana Martínez. 2008.** *El ensayo europeo de sensibilidad al agua y su relación con los ensayos normalizados en España.* España : Ingeniería Civil 151, 2008.
- Blázquez, Luis Bañón. 2000.** *Manual de carreteras.* Alicante : Universidad de Alicante, 2000. Vol. I (elementos y proyecto).
- Behnood, A. Ameri, M. 2012.** Experimental investigation of stone matrix asphalt mixtures containing steel slag.
- CEDEX. (2013).** *Ficha Técnica: Escorias de acería de horno de arco eléctrico.* Madrid.
- CEDEX, Centro de estudios y experimentación de públicas. 2013.** CEDEX. [En línea] 2013. [Citado el: 14 de Diciembre de 2015.] [http://www.cedex.es/CEDEX/LANG\\_CASTELLANO/ORGANISMO/CENTYLAB/CE T/EQUIPAMIENTO/PistaLaboratorio.htm](http://www.cedex.es/CEDEX/LANG_CASTELLANO/ORGANISMO/CENTYLAB/CE T/EQUIPAMIENTO/PistaLaboratorio.htm).
- Dirección general de carreteras. (2008).** *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3).* Madrid, España: PG-3.
- FCEIA. (2006).** *Deformación permanente de mezclas asfálticas.* Rosario.
- Generalitat de Catalunya. (2009).** *DECRETO 32/2009, de 24 de febrero, sobre la valorización de escorias siderúrgicas.*

- Kraemer, e. A. (2004).** *Ingeniería de Carreteras*. Madrid: Interamericana de España S.A.
- Mendez, B. A. (2016).** *Estudio de las propiedades termicas de las mezclas asfálticas con aridos siderurgicos*. Barcelona: Universidad Politecnica de Cataluña. Tesis de master
- Mercedes Reyes, Rolando. 2016.** Estudio deformacional de mezclas asfálticas con árido siderúrgico. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña. Tesis de master.
- Ministerio de fomento. (2011).** PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3). PG-3, 77-112.
- Promsa Green. (2010).** *Arido siderurgico*. Zaragoza: Promsa Green.
- Rosli Hainin, et al. 2012.** Steel Slag as an Aggregate Replacement in Malaysian Hot Mix Asphalt.
- Rodrigo M., Martínez A., Botella R., Félix Pérez J. 2013.** *Analysis of the mechanical behaviour of bituminous mixtures at low temperature*. [ed.] Elsevier. Barcelona : s.n., 2013. Vol. 46, Revista: Construction and building materials.
- Yepes Piqueras, Víctor. 2014.** *Tipos de mezclas bituminosas*. Valencia : Univerddidad Politecnica de Valencia, 2014.