

*Escuela Técnica Superior de
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono

Trabajo realizado por:
Eric Andrés Domínguez

Dirigido:
Angel Vega Zamanillo
Miguel Angel Calzada Pérez

Titulación:
**Máster Universitario en
Ingeniería de Caminos, Canales y
Puertos**

Santander, junio de 2025

Índice

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
1. OBJETO DEL TRABAJO.....	3
2. ESTADO DEL ARTE.....	4
2.1. LOS PAVIMENTOS BITUMINOSOS.....	4
2.2. EL USO DE SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES EN PAVIMENTOS BITUMINOSOS.....	7
2.2.1. Problemática.....	7
2.2.2. Tipos de subproductos.....	8
2.2.3. Ejemplos de subproductos utilizados en firmes.....	9
2.3. EL NEGRO DE CARBONO	17
2.3.1. Usos del negro de carbono	19
2.4. EL NEGRO DE CARBONO EN FIRMES DE CARRETERA	20
2.4.1. N.C. En mezclas bituminosas	20
2.4.2. Efectos del N.C. sobre el betún	25
3. METODOLOGÍA	28
3.1. ENSAYO MARSHALL.....	28
3.1.1. Preparación de las mezclas y probetas	29
3.1.2. Estudio de densidades y huecos	36
3.2. ENSAYO DE SENSIBILIDAD AL AGUA.....	38
3.3. ENSAYO CÁNTABRO DE PÉRDIDA DE PARTÍCULAS	41
3.4. ENSAYO DE PÉNDULO TRL	43
3.5. CÍRCULO DE ARENA	46
3.6. ESCÁNER LÁSER CON TEXTURÓMETRO	51
3.7. ENSAYO DE ABSORCIÓN ACÚSTICA	54
3.8. ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO.....	57
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
4.1. ENSAYO MARSHALL.....	61
4.1.1. Probetas con 0% de N.C.	62
4.1.2. Probetas con 1% de N.C.	64
4.1.3. Probetas con 2% de N.C.	66
4.1.4. Discusión.....	66
4.2. ENSAYO DE SENSIBILIDAD AL AGUA.....	67
4.2.1. Probetas con 0% de N.C.	67

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono

4.2.2.	Probetas con 1% de N.C.	68
4.2.3.	Probetas con 2% de N.C.	68
4.2.4.	Discusión	69
4.3.	ENSAYO CÁNTABRO DE PÉRDIDA DE PARTÍCULAS	69
4.3.1.	Probetas con 0% de N.C.	69
4.3.2.	Probetas con 1% de N.C.	71
4.3.3.	Discusión	72
4.4.	ENSAYO DE PÉNDULO TRL	72
4.4.1.	Probetas con 0% de N.C.	72
4.4.2.	Probetas con 1% de N.C.	73
4.4.3.	Discusión	74
4.5.	CÍRCULO DE ARENA	75
4.5.1.	Probetas con 0% de N.C.	75
4.5.2.	Probetas con 1% de N.C.	75
4.5.3.	Discusión	76
4.6.	ESCÁNER LÁSER	77
4.6.1.	Probetas con 0% de N.C.	77
4.6.2.	Probetas con 1% e N.C.	79
4.6.3.	Discusión	80
4.7.	ENSAYO DE ABSORCIÓN ACÚSTICA	83
4.7.1.	Probetas con 0% de N.C.	83
4.7.2.	Probetas con 1% de N.C.	83
4.7.3.	Discusión	83
4.8.	ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO.....	84
4.8.1.	Probetas con 0% de N.C.	85
4.8.2.	Probetas con 1% de N.C.	86
4.8.3.	Discusión	86
5.	CONCLUSIONES	88

Índice de imágenes

1	Tabla de granulometrías para mezclas AUTL. [1]	3
2	Puesta en obra de microaglomerado en frío [3]	5
3	Mezcla abierta en frío tras su puesta en obra [5].....	5
4	Sección de una capa de hormigón bituminoso [7]	6
5	Pavimento permeable permitiendo la percolación de agua [9]	6
6	Probeta de mezcla AUTL obtenida en laboratorio	7
7	Escoria de acería [12].....	8
8	Firme con incorporación de fresado en AP-6 (Segovia) [13]	9
9	Porcentajes de distintos materiales en neumáticos [14]	10
10	NFU triturado, para su uso en mezclas bituminosas [15].	11
11	AP-7 en el PK 407 antes y después de la rehabilitación [16]	11
12	Tipos de polímeros reciclados utilizados en mezclas bituminosas [18].....	12
13	Ladrillo machacado, subproducto con gran capacidad de reutilización. [21]	14
14	Ámbito de aplicación de los firmes reciclados, en función de la categoría de tráfico. [20]	14
15	Coefficientes de equivalencia recogidos en la OC 40/2017	15
16	Reciclaje de capas asfálticas in-situ [23].....	16
17	Tipos de reciclaje in-situ con emulsión [24]	16
18	Rehabilitación en C-45 mediante reciclaje de firme in-situ con emulsión. [25].....	17
19	Negro de carbono observado con microscopio de electrones. [28]	18
20	Negro de carbono para su uso en laboratorio. [27]	19
21	Negro de carbono recuperado de NFU. [29]	20
22	Granulometría del estudio, con límites y centro de huso. [28]	21
23	Estabilidad Marshall para distintas proporciones de N.C. [28].....	22
24	Densidad para distintas proporciones de N.C. [28]	22
25	Huecos en mezcla para distintas proporciones de N.C. [28]	23
26	Huecos en áridos para distintas proporciones de N.C. [28].....	23
27	Coefficiente Marshall para distintas proporciones de N.C. [28]	24
28	Análisis Beneficio/Coste para distintas proporciones de N.C.....	25
29	Coefficiente de expansión térmica de la mezcla en función de su contenido de N.C. [30]	26
30	Deformaciones de rotura de la mezcla en función de su contenido de N.C. [30]....	26
31	Granulometrías para mezclas AUTL. [1]	28
32	Probeta tipo Marshall utilizada en ensayos	29
33	Áridos y filler de la mezcla, tras sacarlos del horno de precalentamiento.	30

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono

34	Materiales dosificados y precalentados para mezcla con N.C.....	30
35	Áridos dosificados, colocados en el recipiente sobre el fuego.....	31
36	Recipiente con áridos y N.C.....	31
37	Recipiente con N.C. integrado en áridos.....	32
38	Recipiente con betún sin integrar en los áridos.....	32
39	Recipiente tras añadir el filler a la mezcla.....	33
40	Recipiente con la mezcla completada.....	33
41	Vertido de la mezcla a molde de probetas Marshall.....	34
42	Molde con mezcla, colocado en compactadora Marshall.....	35
43	Probetas a la espera de ser desmoldadas.....	36
44	Tabla de medidas y densidades obtenidas en laboratorio, como ejemplo.....	37
45	Parámetros para cálculo de huecos en probetas.....	37
46	Cálculo de huecos sobre mezcla y huecos sobre áridos.....	38
47	Rango de huecos en mezcla permitidos para mezclas AUTL [1].....	38
48	Esquema bastidor sensibilidad al agua [32].....	39
49	Posibles tipos de rotura en una probeta sometida a tracción indirecta [32].....	39
50	Fórmula índice de tracción indirecta. [32].....	40
51	Probetas sometidas a ensayo de sensibilidad al agua.....	40
52	Tambor el ensayo de Los Ángeles, utilizado en este ensayo.....	41
53	Cálculo pérdida en ensayo Cántabro.....	42
54	Cálculo índice de aumento de pérdidas en ensayo Cántabro.....	42
55	Probetas tipo Marshall tras someterse a ensayo Cántabro.....	43
56	Péndulo TRL para ensayo de coeficiente de resistencia al deslizamiento.....	44
57	Comienzo del contacto zapata-probeta.....	44
58	Final del contacto zapata-probeta.....	45
59	Posición inicial del péndulo para el ensayo.....	45
60	Posición final del péndulo.....	46
61	Croquis de la arena rellenando los huecos de la superficie de a mezcla bituminosa. [35].....	47
62	Microesferas de vidrio, para su uso como arena en el ensayo.....	47
63	Arena dosificada para ensayo de círculo de arena.....	48
64	Pequeño montículo de arena para ensayo de círculo de arena.....	48
65	Enrasado de la arena con tampón.....	49
66	extensión finalizada para ensayo de círculo de arena.....	49
67	Medición del diámetro medio del círculo.....	50
68	Cálculo de altura media de la arena en el círculo.....	50

69 Escáner láser utilizado para el ensayo.....	51
70 Probeta manchada con filler en su zona central, lista para el escáner laser.....	52
71 Plancha inferior del escáner láser.....	52
72 Modelo 3D de la superficie escaneada de una probeta.....	53
73 Imagen generada de la misma probeta.....	54
74 Tubo de impedancia utilizado en el ensayo.....	55
75 Conexión del cableado.....	55
76 Pistón del tubo para ajuste de la probeta.....	56
77 Bloque de espuma listo para realizar la calibración.....	56
78 Tubo de impedancia preparado para el ensayo.....	57
79 Probetas serradas para someter a ensayo de módulo dinámico.....	57
80 Probeta prismática serrada, para ensayo de módulo dinámico.....	58
81 Máquina para ensayo de módulos dinámicos.....	58
82 Modelo del ensayo de módulo dinámico [37].....	59
83 Probeta siendo ensayada para módulo dinámico.....	60
84 Huso granulométrico de AUTL 8.....	61
85 Representación de la granulometría de la mezcla (Sin N.C.).....	62
86 Densidad aparente mezcla con 0% N.C.....	63
87 Huecos en mezcla con 0% N.C.....	63
88 Huecos en áridos de mezcla con 0% N.C.....	63
89 Restricción de Hm del artículo 545 del PG-3.....	64
90 Densidad aparente mezcla con 1% N.C.....	65
91 Huecos en mezcla con 1% N.C.....	65
92 Huecos en áridos de mezcla con 1% N.C.....	65
93 Peso perdido en ensayo Cántabro en probetas del 0%.....	70
94 Probetas con 0% de N.C. tras ser ensayadas en el ensayo Cántabro.....	70
95 Peso perdido en ensayo Cántabro en probetas del 1%.....	71
96 Probetas con 1% de N.C. tras ser ensayadas en el ensayo Cántabro.....	72
97 Medición obtenida en ensayo de péndulo TRL.....	74
98 Apelmazamiento de N.C. antes de la extensión de arena.....	76
99 Apelmazamiento de N.C. después de la extensión de arena.....	77
100 Escáner láser en probeta nº1 con 0% N.C.....	78
101 Escáner láser en probeta nº2 con 0% N.C.....	78
102 Escáner láser en probeta nº1 con 1% N.C.....	79
103 Escáner láser en probeta nº2 con 1% N.C.....	79
104 Modelo 3D de la probeta nº1 con 0% de N.C.....	81

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono

105 Modelo 3D de la probeta nº2 con 0% de N.C.	81
106 Modelo 3D de la probeta nº1 con 1% de N.C.	82
107 Modelo 3D de la probeta nº2 con 1% de N.C.	82
108 Resultados módulos dinámicos para probetas 0%	85
109 Resultados módulos dinámicos para probetas 1%	86
110 Módulo dinámico y desfase para ambos grupos de probetas	87

Índice de tablas

Tabla 1 Granulometría de la mezcla (sin N.C.).....	61
Tabla 2 Parámetros calculados en ensayo Marshall para probetas con 0% N.C.	62
Tabla 3 Parámetros calculados en ensayo Marshall para probetas con 1% N.C.	64
Tabla 4 Parámetros calculados en ensayo Marshall para probetas con 2% N.C.	66
Tabla 5 Índice de resistencia al agua sin N.C.....	67
Tabla 6 Índice de resistencia al agua 1% de N.C.	68
Tabla 7 Índice de resistencia al agua 2% de N.C.	68
Tabla 8 Peso perdido en ensayo Cántabro en probetas del 0%	69
Tabla 9 Peso perdido en ensayo Cántabro en probetas del 1%	71
Tabla 10 Ensayo de péndulo, probeta 1 - 0% N.C.....	73
Tabla 11 Ensayo de péndulo, probeta 2 - 0% N.C.....	73
Tabla 12 Ensayo de péndulo, probeta 1 - 1% N.C.....	73
Tabla 13 Ensayo de péndulo, probeta 2 - 1% N.C.....	74
Tabla 14 Mediciones círculo de arena 0% N.C.....	75
Tabla 15 Mediciones círculo de arena 1% N.C.....	76
Tabla 16 Valores de MTD para probetas 0% obtenidas mediante escáner láser.	78
Tabla 17 Valores de MTD para probetas 1% obtenidas mediante escáner láser.	80
Tabla 18 Coeficientes de absorción acústica en diferentes bandas para probetas 0%.	83
Tabla 19 Coeficientes de absorción acústica en diferentes bandas para probetas 1%.	83
Tabla 20 Coeficientes de absorción acústica y comparativa.....	84
Tabla 21 Resultados módulos dinámicos para probetas 0%	85
Tabla 22 Resultados módulos dinámicos para probetas 1%	86
Tabla 23 Módulo dinámico para ambas mezclas en 10 y 30Hz	87

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono

RESUMEN

El subproducto de Negro de carbono, que se citará en todo este trabajo como N.C., es un nanomaterial que aparece como subproducto en la industria, en muchos de aquellos procesos industriales en los que se quema combustible fósil a altas temperaturas.

Este subproducto por su granulometría muy fina y sus propiedades es altamente contaminante y peligroso para la salud. Sin embargo, es inocuo cuando queda embebido en otro material, y es capaz de otorgarle al material que lo envuelve ciertas capacidades mecánicas que lo hacen más deseable para ciertas aplicaciones.

Su uso en otras industrias, como por ejemplo en la fabricación de neumáticos o como refuerzo en otro tipo de materiales plásticos cumple una doble función. La primera es la de mejorar las capacidades de los materiales a los que se añade, y la segunda es la de darle uso al subproducto antes de que se convierta en residuo, disminuyendo su huella de carbono y su impacto ambiental.

Por tanto, desde muchos organismos dedicados a la ingeniería de caminos, se ha comenzado a explorar el uso del N.C. en materiales de la construcción, y más concretamente en las mezclas asfálticas utilizadas en carreteras.

En el caso de este Trabajo de Fin de Máster, nos enfocaremos en estudiar los efectos producidos por la adición del N.C. en mezclas asfálticas del tipo AUTL 8 someténdolas a ensayos de laboratorio normalizados, habiendo previamente realizado una introducción con el marco teórico de las tecnologías empleadas y los procedimientos.

En cuanto a la relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, este se da principalmente en tres de ellos.

En primer lugar, la relación con el ODS 9 “Industria, innovación e infraestructura” y el ODS 11 “Ciudades y comunidades sostenibles”, son directas, ya que este trabajo trata de desarrollar una nueva tecnología para un material de construcción altamente utilizado en infraestructura y urbanismo.

También existe una relación con el ODS 13 “Acción por el clima” ya que uno de los objetivos que se persigue con esta modificación es el de reducir la huella de carbono de las mezclas asfálticas y por tanto, disminuir su impacto ambiental.

ABSTRACT

Carbon black by-product, referred to throughout this study as “N.C.”, is a nanomaterial that appears as a by-product in many industrial processes involving the combustion of fossil fuels at high temperatures.

Due to its extremely fine particle size and chemical properties, this by-product is highly polluting and poses a significant health risk. However, once embedded within another material, it becomes inert and can enhance the mechanical properties of the host material, making it more desirable for certain applications.

Its use in other industries, such as tire manufacturing or as reinforcement in plastic-based materials, serves two purposes. Firstly, to improve the characteristics of the materials to which it is added; and secondly, to provide a use for this by-product before it becomes waste, thus reducing its carbon footprint and environmental impact.

For these reasons, various civil engineering institutions have begun exploring the application of N.C. in construction materials, particularly in asphalt mixtures used in road pavements.

This Master's Thesis focuses on studying the effects of adding N.C. to AUTL 8-type asphalt mixtures, subjecting them to standardized laboratory tests. Prior to the experimental phase, a theoretical framework is provided, covering the relevant technologies and procedures.

Regarding the relationship between this work and the Sustainable Development Goals (SDGs), it primarily aligns with three of them.

Firstly, there is a direct connection with SDG 9 “Industry, Innovation and Infrastructure” and SDG 11 “Sustainable Cities and Communities,” as this study aims to develop a new technology for a construction material widely used in infrastructure and urban planning.

There is also a link to SDG 13 “Climate Action,” since one of the objectives pursued through this material modification is to reduce the carbon footprint of asphalt mixtures, thereby lowering their environmental impact.

1. OBJETO DEL TRABAJO

El objeto de este Trabajo de Fin de Máster es el de analizar la bondad de una mezcla ultradelgada de tipo AUTL 8 a la que se le ha añadido subproducto de negro de carbono, estas mezclas se compararán tanto con una mezcla de referencia no modificada, como con las exigencias impuestas por el artículo 545 del PG-3 sobre mezclas ultradelgadas.

El N.C. en las mezclas modificadas con este, entrará a formar parte de la mezcla como sustituto parcial del filler calizo natural que suele utilizarse en este tipo de mezclas. Por tanto, si se introduce un 1% de N.C. en la mezcla (sobre el peso total de esta), se ahorrará un 1% de filler calizo natural.

En primer lugar, se buscará una formulación base para el trabajo de laboratorio, lo cual consistirá en la fabricación de probetas de mezcla AUTL sin N.C. para dar con la dosificación de áridos y de betún correctas. Para la dosificación de estos áridos, se intentará ceñir la granulometría al centro del huso marcado por el artículo 545 del PG-3, marcado para una mezcla del tipo AUTL 8.

TIPO DE MEZCLA	ABERTURA DE LOS TAMICES. NORMA UNE-EN 933-2 (mm)							
	16	11,2	8	5,6	4	2	0,5	0,063
AUTL 5 ⁽²⁾			100	90-100	35-55	15-25	8-14	5-9
AUTL 8^(1,2)		100	90-100	40-65	25 - 40	15-30	10-18	5-9
AUTL11 ^(1,2,3)	100	90-100	65-85	50-76	33-55	20-35	10-23	5-11

1 Tabla de granulometrías para mezclas AUTL. [1]

Una vez dosificados los áridos, se tanteará la proporción de ligante bituminoso para obtener densidades e índices de huecos óptimas según lo especificado en la norma.

Tras haber dosificado la mezcla, y cumpliendo esta con las especificaciones dictadas por la norma, esta se utilizará como referencia a la hora de juzgar la bondad de las mezclas modificadas con N.C. Por tanto, se fabricarán probetas con distintos porcentajes de N.C. y se estudiará la validez de estas mezclas.

Dada la experiencia del uso de este material como aditivo en mezclas bituminosas de otros tipos, los valores de adición de N.C. estudiados serán próximos al 1%-2% sobre el peso total de la mezcla.

Sobre estas probetas se realizarán distintos ensayos de laboratorio, comentado en cada caso los resultados obtenidos tanto en la mezcla de referencia como en las mezclas modificadas con N.C.

Antes de esto, se realizará un pequeño estudio del estado del arte, tanto en materia de mezclas bituminosas, como en materiales utilizados como aditivos en estas y el uso de materiales reciclados en mezclas de este tipo.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. LOS PAVIMENTOS BITUMINOSOS

Se conoce como mezcla bituminosa aquel material compuesto por áridos de una granulometría dada, polvo mineral, betún asfáltico y eventualmente aditivos que es ampliamente utilizado en pavimentos por su capacidad flexible y resistente frente a las cargas. Las mezclas bituminosas se clasifican en cuatro tipos según su temperatura de trabajo y puesta en obra, siendo estas categorías:

- Mezclas en caliente: Las más utilizadas, utilizan una temperatura de trabajo de entre 150°C y 180°C.
- Mezclas semicalientes: Fundamentalmente iguales a las mezclas calientes, con la salvedad de que por la naturaleza del betún utilizado o de los aditivos empleados, es posible trabajarla a una temperatura menor, de entre 110°C y 150°C.
- Mezclas en frío: Estas mezclas consisten en emulsiones, las cuales se consiguen utilizando un emulgente para crear la emulsión del betún en agua, permitiendo una gran trabajabilidad de la mezcla sin necesidad de calentarla, temperatura de trabajo 10°C-40°C.
- Mezclas templadas: También consisten en emulsiones, pero en este caso estas son calentadas ligeramente para aumentar su trabajabilidad, temperatura de trabajo 40°C-90°C.

Por otro lado, la clasificación que hace la norma 6.1-IC para las mezclas bituminosas incluye también la granulometría de los áridos, teniendo en cuenta el tipo de estructura que forma el firme una vez puesto en obra. La clasificación es la siguiente:

- Microaglomerados en frío: Se conoce como microaglomerado en frío (MAF) aquella mezcla bituminosa en emulsión que, por su naturaleza de granulometría fina y continua y su capacidad de ser trabajada a temperatura ambiente se utiliza para la reparación y la mejora de características superficiales de firmes existentes, colocándose en una o varias delgadas ($\leq 1,5$ cm). [2]



2 Puesta en obra de microaglomerado en frío [3]

- Mezclas bituminosas abiertas en frío: Este tipo de mezcla (AF) consiste en una emulsión bituminosa con granulometría compuesta principalmente de árido grueso, con un gran contenido de huecos. Las mezclas bituminosas abiertas en frío se utilizan como capa de rodadura o intermedia en carreteras de categoría de tráfico pesado T3 y T4. [4]



3 Mezcla abierta en frío tras su puesta en obra [5]

- Mezclas bituminosas de tipo hormigón bituminoso: Denominadas AC, Consisten en mezclas calientes o semicalientes en las que los áridos quedan completamente recubiertos por una película homogénea de ligante. Las mezclas de este tipo son las más comúnmente usadas en firmes de carretera. [6]



4 Sección de una capa de hormigón bituminoso [7]

- Mezclas bituminosas drenantes y discontinuas: Este tipo de mezclas pueden ser calientes o semicalientes y se utilizan en firmes de carretera para capas de rodadura cuando se quiere dotar a esta de capacidades drenantes. Las mezclas drenantes (PA) son aquellas que tienen una baja cantidad de áridos finos, haciéndolas idóneas para su uso en capas de rodadura de pequeño espesor (4-5 cm). Las mezclas discontinuas (BBTM) tienen una granulometría con una baja proporción de áridos de tamaño inferior al árido grueso, utilizándose en capas muy delgadas (2-3 cm). [8]



5 Pavimento permeable permitiendo la percolación de agua [9]

- Mezclas bituminosas de tipo SMA: Son mezclas SMA o “Stone Mastic Asphalt” aquellas mezclas calientes o semicalientes en las que la granulometría tiene una discontinuidad acentuada en los tamaños intermedios y finos, en los que todo el

árido queda recubierto por una película de ligante. Estas mezclas tienen una gran proporción de filler y de ligante. [10]

- Mezclas bituminosas de tipo AUTL: Son mezclas AUTL, o ultradelgadas, aquellas mezclas calientes y semicalientes, de granulometría continua y que se extienden en capas de rodadura sobre un riego de adherencia en capas delgadas de entre 10 y 20mm. [1]



6 Probeta de mezcla AUTL obtenida en laboratorio

2.2. EL USO DE SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES EN PAVIMENTOS BITUMINOSOS

2.2.1. Problemática

El manejo y la gestión de los residuos se ha convertido en una prioridad mundial a medida que la sociedad global trata de mitigar sus efectos adversos sobre el medio natural y el clima. En las últimas décadas, se ha producido un gran desarrollo de tecnologías y alternativas para aprovechar ciertos subproductos industriales antes de considerarlos residuos y tratarlos como tal, minimizando así su afeción al medio y el volumen de su vertido. [11]

Esta prioridad no ha hecho más que aumentar con el grave costo de la gestión de estos subproductos como residuos y la imperativa necesidad de disminuir la huella de carbono del sector de la construcción, en este caso de la asociada a la construcción de carreteras, y dentro de esta, de la fabricación de firmes bituminosos.

Por tanto, las soluciones consistentes en la adición de subproductos industriales en mezclas bituminosas han ido ganando cada vez más importancia, utilizando distintos tipos de subproductos, tanto para sustituir parcialmente alguno de los elementos

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono

fundamentales de la mezcla (áridos, filler y ligante), como para ser utilizados como aditivos en las mismas.

Las mezclas que incluyan subproductos industriales buscarán tener unas características comparables a aquellas obtenidas únicamente con materiales naturales. La obtención de estas prestaciones se ve altamente dificultada por la diferencia en comportamiento de los distintos subproductos entre sí, y por la diferencia de comportamiento de los subproductos con los materiales naturales. Por otro lado, la experiencia y el conocimiento sobre los subproductos variarán ampliamente en función del país, la zona y la industria. [11]

2.2.2. Tipos de subproductos

Como ya se ha mencionado, el tipo de subproductos utilizados depende fuertemente de los producidos en cada país y región, sin embargo, pueden ser clasificados en tres grandes grupos: Provenientes de procesos térmicos, provenientes de demolición y provenientes de otras fuentes.[11]

- Provenientes de procesos térmicos: Estos subproductos aparecen en la industria del acero, el cemento y la cal, así como en las centrales térmicas de generación eléctrica al quemar productos combustibles.[11] Estos residuos son muy comunes en España, en especial en la zona norte, donde la industria metalúrgica y siderúrgica tuvieron gran relevancia en el siglo XX. En esta categoría se encuentran entre otros, la escoria de alto horno, las cenizas volantes y, el estudiado en este caso, el negro de carbono.



7 Escoria de acería [12]

- Provenientes de demoliciones: En esta categoría se incluyen todos los subproductos provenientes de las actividades de demolición de cualquier proyecto de construcción, y la demolición total o parcial de las capas de mezcla bituminosa. La utilización de estos materiales es ampliamente usada en muchos países, siendo también común la reutilización in-situ del firme para recrecidos u

obras de reparación en carreteras, utilizando así el propio fresado del firme. Otros materiales de esta categoría serían el ladrillo y el hormigón entre otros.



8 Firme con incorporación de fresado en AP-6 (Segovia) [13]

- Provenientes de otras fuentes: El uso de este tipo de subproducto en carreteras está directamente relacionado con la producción local, [11] siendo rara vez importado, su procedencia y naturaleza puede ser diversa, como, por ejemplo:
 - Procedentes de la misma obra o instalaciones adyacentes.
 - Procedentes de plantas de tratamiento de residuos de la construcción.
 - Procedentes de un excedente de algún residuo o subproducto local concreto, como por ejemplos NFU (Neumáticos fuera de uso), o diversos plásticos.

2.2.3. Ejemplos de subproductos utilizados en firmes

2.2.3.1. Neumáticos fuera de uso

Durante la década de los 2000, el enorme volumen de neumáticos que se vertía, y el peligro que estos suponían para la población, llegó a desencadenar la necesidad de reciclar estos de alguna manera. Una de las alternativas llevadas a cabo, entre otras, fue la de la incorporación de NFU a mezclas bituminosas. [14]

El problema principal para este uso provenía de la composición química de los neumáticos, que, si bien están formados principalmente por cauchos naturales, también contienen otros materiales en su composición, como son los materiales metálicos, textiles, y los provenientes del proceso de vulcanización. Por tanto, el material que presentan está lejos de ser homogéneo e isótropo. [14]

Material	Turismo/ Servicios	Camión
Caucho	48	45
Negro de carbono y sílice	22	22
Metal	15	25
Textil	5	-
Óxido de cinc	1	2
Azufre	1	1
Aditivos	8	5

9 Porcentajes de distintos materiales en neumáticos [14]

El polvo de caucho, que es la principal forma en la que se utiliza el NFU para su adición en mezclas bituminosas, se obtiene de la trituración de estos por medios mecánicos hasta obtener el tamaño deseado, permitiendo así separar parte de los metales y los textiles presentes en el material. La incorporación del polvo de caucho a la mezcla puede darse de dos maneras.

La conocida como “vía húmeda”, en la cual el polvo es añadido al betún previa a la creación de la mezcla, creando una tolva con este betún modificado con NFU. Se definen tres tipos de betunes: betún mejorado con caucho (BC), betún modificado con caucho (BMC), y betún modificado de alta viscosidad con caucho (BMAVC). Estos betunes utilizan porcentajes de polvo de caucho en peso de entre 8% y 12%, entre 12% y 15%, y entre 15% y 22% respectivamente.[14]

Es importante destacar que el BC presenta características empíricas mejores al betún asfáltico sin modificar, y que el BMC presenta prestaciones similares al betún modificado con polímeros.[14]

El otro tipo de inclusión de polvo de caucho a la mezcla es la “vía seca”, en este método, el polvo se añade directamente al mezclador junto con el betún, el filler y los áridos como si se tratase de un árido más. En general, este método es más sencillo, pero da pie a mezclas más pobres.



10 NFU triturado, para su uso en mezclas bituminosas [15].

En España, existen más de 1.600 km de carreteras en uso construidas utilizando NFU en sus firmes. La comunidad autónoma que más destaca en el uso de esta tecnología es la Comunidad Valenciana, con 103 tramos construidos. [16]

Entre ellas, destacan dos grandes obras de refuerzo a la autovía AP-7 entre los PK 407 y 437 en el año 2002. En este caso el polvo de caucho empleado se mezcló por vía húmeda in-situ por la empresa DRAGADOS.



AÑO 2002



AÑO 2009



AÑO 2016

11 AP-7 en el PK 407 antes y después de la rehabilitación [16]

En la comunidad de Madrid, por su lado también se construyó mucho utilizando estas tecnologías, es el caso por ejemplo de las autovías A-2 y A-3, y de muchos tramos de las carreteras M-30, M-40 y M-50.

En el caso concreto de Cantabria, no existen muchos tramos que utilicen NFU, siendo las últimas obras realizadas el refuerzo de la travesía de San Felices de Buelna (2,80km) en 2006 y la carretera CA-234 entre Renedo y Zurita (11,24km) en el año 2009. En ambos casos se utilizó la técnica de vía húmeda in-situ para crear una mezcla tipo AC16 surf S. [16]

2.2.3.2. Polímeros reciclados

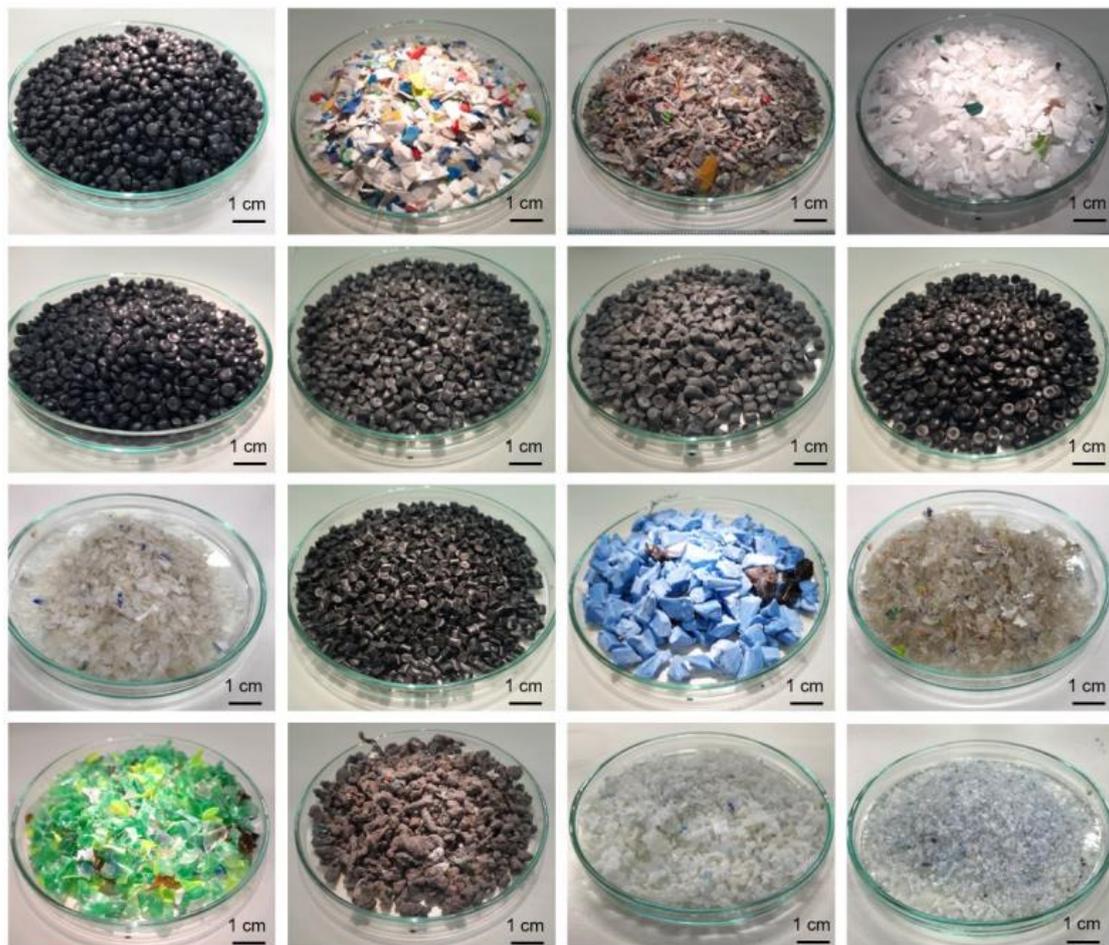
Con el uso de los materiales plásticos en la sociedad y el consiguiente aumento en los desperdicios generados de este tipo de material, llega el auge de la reutilización y el

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono

reciclaje. Los materiales poliméricos tienen un impacto negativo sobre el medio ambiente tanto en todas las fases de su creación como durante su reciclaje. [17]

Los polímeros más comúnmente usados para crear betunes modificados provienen de materiales vírgenes, esto quiere decir que son extraídos de la naturaleza con el fin de ser aplicados a los firmes de carretera. La utilización de polímeros para crear betunes modificados para su uso en firmes comenzó en Europa en los años 30 y se utiliza ampliamente hoy en día, en especial en capas de rodadura que son las que sufren mayores sollicitaciones y a las que se exigen mejores prestaciones. [17]

Intercambiar estos polímeros vírgenes por polímeros reciclados parece evidente, si se pudiera abaratar costes y reducir la huella de carbono de las mezclas conservando los beneficios que aportan los polímeros vírgenes a la mezcla (ductilidad, termoplaticidad, comportamiento ante altas o bajas temperaturas, etc.), resultarían mezclas muy competitivas e interesantes para su uso.



12 Tipos de polímeros reciclados utilizados en mezclas bituminosas [18]

En 2008, se publica un artículo por parte de D. Casey et al. [19] Desde la universidad de Dublín, que estudia la modificación de bitúmenes con polímeros reciclados desde el punto de vista del gran aumento de la demanda que existe para los PMBs, con la intención de encontrar soluciones viables y medioambientalmente sostenibles.

Existen muchos tipos de polímeros reciclados que pueden actuar como aditivos del betún. De todos ellos, el estireno-butadieno-estireno (SBS) y el acetato de etileno-vinilo (EVA) son los más utilizados para modificar el ligante. La principal ventaja del SBS es su estructura de dos fases, con micro dominios vítreos de poliestireno conectados a segmentos de caucho de polibutadieno, lo que le da un comportamiento similar al de un elastómero reticulado. Esto permite que los dominios de poliestireno mantengan su estructura, y esa solubilidad parcial es clave para que el SBS sea un buen modificador de mezclas asfálticas. Gracias a su comportamiento como elastómero termoplástico, el SBS se usa ampliamente en la modificación de mezclas bituminosas. [19]

Son conocidas las dificultades de usar polímeros reciclados como modificadores del ligante, ya que el proceso de reciclado reduce las propiedades mecánicas del polímero. Otros estudios demuestran que la reología de ligantes con altas proporciones (hasta un 40%) de plástico reciclado y concluyen que estas mezclas no son compatibles desde el punto de vista termodinámico. [19]

Por su parte, los estudios respectivos al uso de polietileno de baja densidad reciclado junto con cera de polietileno observan que los polímeros con menor peso molecular se dispersaban mejor en el ligante asfáltico. Al estudiar el uso de polietileno de alta densidad (HDPE) reciclado como modificador del ligante en muestras de asfalto, utilizando la prueba de estabilidad Marshall, se demuestra que una adición del 4% de HDPE reciclado mejoraba los valores del cociente Marshall, pero que, al aumentar esa cantidad, el rendimiento disminuía notablemente. [19]

También existen otros materiales plásticos que existen en abundancia por su extendido uso en industria, sin embargo, muchos de ellos carecen de las propiedades termoplásticas que los harían deseables para modificar betunes asfálticos.

2.2.3.3. Subproductos de demolición

La creación de mezclas bituminosas con aquellos residuos provenientes de otras obras (o de otro lugar en la misma obra), dan pie a mezclas fabricadas ex-situ, mezclando estos subproductos ya machacados con áridos, polvo mineral y ligante bituminoso en planta para crear la mezcla bituminosa. [20]



13 Ladrillo machacado, subproducto con gran capacidad de reutilización. [21]

También se considera subproducto de demolición, pese a tener un trato especial en este ámbito, el resultante del fresado de firmes bituminosos. Este fresado puede reutilizarse como árido para la creación de nuevas mezclas, esta labor puede llevarse a cabo en planta, in-situ con emulsión bituminosa, e in-situ con cemento. Existe una orden circular publicada en 2017, y una publicada en 2023 sobre reciclado de firmes y pavimentos bituminosos donde se recogen la experiencia y el conocimiento obtenido desde el año 2001 en esta materia. [22]

La OC 40/2017 y la OC 02/2023 dictan las prescripciones técnicas a adoptar en el reciclado de firmes, así como las especificaciones exigidas y los ámbitos de aplicación.

TABLA 1 – CRITERIOS DE APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE RECICLADO

TIPO DE RECICLADO	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO				
	T00	T0	T1	T2	T3 y T4
En central	Reciclado + 10 cm (1)	Reciclado + 8 cm (1)	Reciclado + 5 cm (2)	Reciclado + 5 cm (2, 3)	Reciclado + rodadura (3, 4 ó 5)
In situ con emulsión	—	—	Reciclado + 8 cm (1)	Reciclado + 5 cm (2)	Reciclado + rodadura (3, 4 ó 5)
In situ con cemento	—	—	Reciclado + MBC	Reciclado + MBC	Reciclado + MBC

14 Ámbito de aplicación de los firmes reciclados, en función de la categoría de tráfico. [20]

Se aprecia en la tabla extraída de la Orden Circular mencionada, que para categorías de tráfico T0 y T00 la única técnica de reciclado de firmes permitida es el reciclado en central, mientras que en categorías inferiores quedan permitidas las técnicas de reciclado in-situ con emulsión y reciclado in-situ con cemento. [20]

Para el dimensionamiento de capas con firme reciclado, se realizará mediante un estudio especial, que incluya la identificación más completa posible del material a reutilizar, determinando el módulo elástico y la ley de fatiga del producto resultante. En su defecto, se adoptarán como simplificación los coeficientes de equivalencia recogidos en la siguiente tabla, y se efectuará la evaluación de los espesores según la Norma 6.3 1C Rehabilitación de firmes, en función de que se trate de soluciones de eliminación parcial y reposición del firme o de recrecimiento del firme existente.

TABLA 2 - COEFICIENTE DE EQUIVALENCIA ESTRUCTURAL ENTRE UNA MEZCLA BITUMINOSA EN CALIENTE O SEMICALIENTE Y LOS DIFERENTES TIPOS DE MATERIAL RECICLADO			
TIPO DE MATERIAL	COEFICIENTE DE EQUIVALENCIA	LEY DE FATIGA	LIMITACIÓN DE ESPESOR (cm)
MEZCLA BITUMINOSA EN CALIENTE O SEMICALIENTE (Densa, Semidensa y Gruesa)	1	$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} N^{-0,27243}$	—
RECICLADO EN CALIENTE Y SEMICALIENTE EN CENTRAL DE CAPAS BITUMINOSAS	0,80 a 1 ⁽¹⁾	Ley específica	5 - 15
RECICLADO <i>IN SITU</i> CON EMULSIÓN DE CAPAS BITUMINOSAS	0,75 ⁽²⁾	Ley específica	6 - 12
RECICLADO <i>IN SITU</i> CON CEMENTO DE CAPAS DE FIRME	Material semejante al suelocemento		20 - 30 ⁽³⁾

(1) El coeficiente de equivalencia dependerá de la proporción r de material bituminoso reciclado (RAP) utilizado, con el siguiente criterio: **1** si $15 < r \leq 30$; **0,9** si $30 < r \leq 60$ y **0,8** si $r \geq 60$.

(2) Si el mezclado se efectúa en una central de fabricación de mezclas de las especificadas en los artículos 542 del PG-3 o 22 de esta Orden Circular, podrá adoptarse el coeficiente de 0,80.

(3) Este valor máximo podrá aumentarse hasta 35 cm, siempre y cuando el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares especifique sistemas constructivos que garanticen una compactación uniforme en todo el espesor de la capa.

15 Coeficientes de equivalencia recogidos en la OC 40/2017

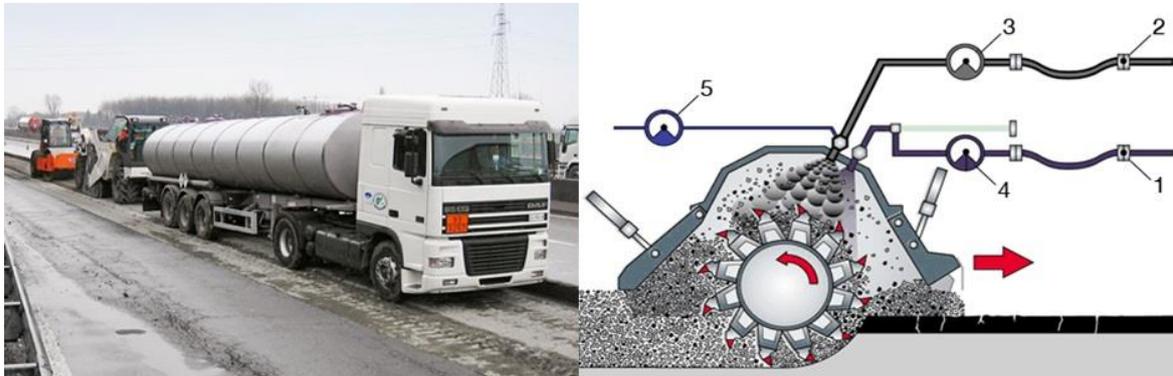
Las mezclas realizadas in-situ consiguen en un mismo tajo de trabajo fresar y rehabilitar las capas superiores del firme utilizando emulsión bituminosa o mezcla con cemento (esta última no sería una mezcla bituminosa), revalorizando así la mezcla anteriormente dispuesta y ya deteriorada antes de que se convierta en residuo. [20]

Estas técnicas de reciclado de firmes in-situ han ido cobrando importancia y demostrando su efectividad a lo largo de los años, desde que se empezaron a utilizar a finales de los 90, suponiendo una gran alternativa desde el punto de vista medioambiental y siendo competitivas en cuanto a costes.

En su momento el reciclaje in-situ de mezclas bituminosas se hacía “en caliente”, lo que conllevaba calentar el material fresado a temperaturas de trabajo (150-180°C) lo cual lo hacía energéticamente intensivo y económicamente costoso, sin embargo, esto producía malos resultados debido al calentamiento desigual del pavimento a reciclar y de la pérdida parcial de los aceites presentes en la mezcla. [23]

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono

Como ya se ha visto en las tablas anteriores extraídas de la normativa, hoy en día solo se contemplan los reciclados “fríos”, que son aquellos en los que se utiliza emulsión bituminosa para conseguir una capa bituminosa, y en los que se utiliza cemento para obtener una capa más rígida, tratada con cemento con comportamiento similar a un suelocemento. [23]



16 Reciclaje de capas asfálticas in-situ [23]

El reciclaje in-situ con emulsión consta de cuatro fases principales:

- El fresado del material existente.
- La inyección de la emulsión bituminosa y los aditivos.
- El mezclado.
- Reperfilado y compactación.

La OC 02/2023 hace también una distinción en los reciclajes in-situ con emulsión en función del porcentaje de material bituminoso sobre el total de material fresado, pudiendo ser:

	TIPO I	TIPO II	TIPO III
Material reutilizado del firme existente	Capa bituminosa (espesor ≤ 5 cm) + material granular	Capa(s) bituminosa(s) (espesor de 5 a 10 cm) + base no bituminosa	Mezclas bituminosas
Proporción de material bituminoso (%)	≤ 60	60-100	100
Espesor reutilizado (cm)	8-15	8-15	6-12(*)

(*) Excepcionalmente se podrá llegar a los 15 cm de espesor siempre que en el tramo de prueba se compruebe que se pueden obtener los valores de densidad y resistencia mecánica con el equipo de compactación aprobado

17 Tipos de reciclaje in-situ con emulsión [24]

Estas técnicas de reciclado in-situ son muy utilizadas en España hoy día, como por ejemplo la rehabilitación de la carretera C-45 en Lleida en enero del 2025, donde se recicló in-situ con emulsión una capa de 7cm, sobre la que posteriormente se colocó una capa de rodadura de 5cm en una longitud de unos 8km, evitando la generación de residuos del firme deteriorado.



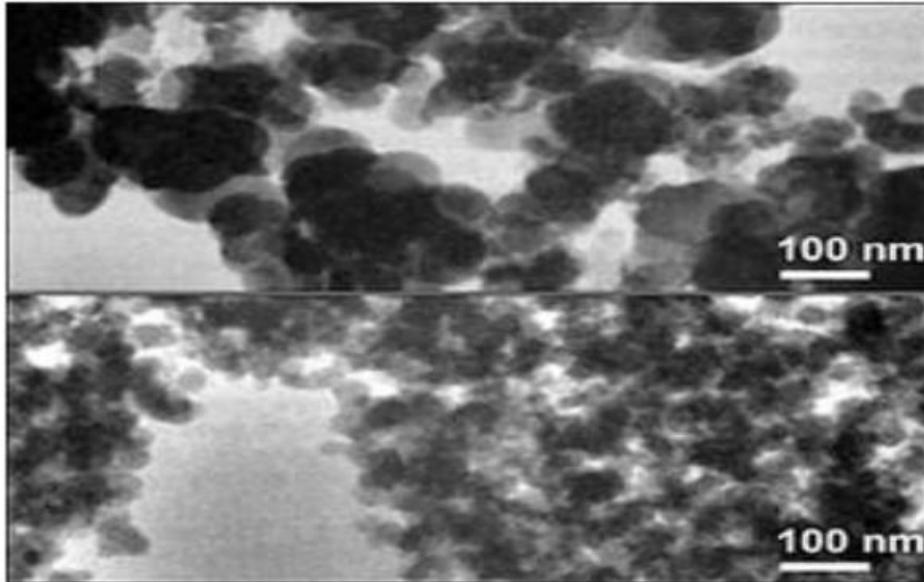
18 Rehabilitación en C-45 mediante reciclaje de firme in-situ con emulsión. [25]

También existen otros ejemplos realizados a nivel nacional, como por ejemplo la Carretera regional de Madrid M-204, entre Carabaña y Ambiente (2008), la Carretera regional de Madrid M-822, entre Loeches y Nuevo Baztán (2005) o la Carretera regional de Madrid M-604, entre El Paular y Puerto de Navacerrada (2003). [26]

2.3. EL NEGRO DE CARBONO

El negro de carbono es un material producido por la combustión incompleta de productos derivados del petróleo que aparece en procesos industriales. Es una forma de carbono amorfo y puede tener una relación superficie/volumen extremadamente alta debido a su granulometría muy fina. [27]

El negro de carbono, en su forma más pura está compuesto casi únicamente por carbono, siendo la proporción de este sobre el total de entre 88 y 99,5%, otros elementos que lo conforman son el oxígeno entre el 3 y el 11% y el hidrógeno en proporciones de entre 0,1 y 1%.



19 Negro de carbono observado con microscopio de electrones. [28]

La relación superficie/volumen convierten al N.C. en un nanomaterial, lo que significa que las propiedades de este son muy dependientes del tamaño muy pequeño de sus gránulos.[27]

El N.C. es en esencia el mismo material que el conocido como negro de humo, a excepción de que este último no comparte la granulometría tan fina que tiene el N.C. y por tanto sus propiedades como nanomaterial. El N.C. es utilizado a menudo como pigmento negro y como material de refuerzo en productos y materiales de goma y plástico. [27]

Por otro lado, este material supone ciertos riesgos para la salud, principalmente por ser un conocido carcinógeno y por dañar el tracto respiratorio si se inhala.[27]



20 Negro de carbono para su uso en laboratorio. [27]

2.3.1. Usos del negro de carbono

El N.C. es un nanomaterial ampliamente utilizado, principalmente por su disponibilidad a nivel industrial y sus propiedades como nanomaterial.

El uso más común que se le da al N.C., suponiendo alrededor de un 70% de su uso, es para neumáticos de automóvil, en este caso, el nanomaterial actúa como pigmento y refuerzo del caucho utilizado en los neumáticos, también reducen el aumento de temperatura en la zona de huella incrementando la vida útil de estos. [27]

Otro 20% del uso del N.C. se utiliza como material de refuerzo en otros tipos de materiales plásticos o de goma, como por ejemplo mangueras, cinturones, etc. El último 10% restante se utiliza como pigmento en otro tipo de materiales. [27]

Es importante mencionar que ya existen técnicas mediante las cuales, utilizando pirólisis, puede recuperarse el negro de carbono de los neumáticos fuera de uso, este novedoso método, permite no solo la recuperación parcial del N.C. de los neumáticos, sino reducir el impacto ambiental que implica su vertido. Este método nace de la necesidad de las empresas que emplean este material, ya que su precio ha aumentado considerablemente en los últimos años. [29]



21 Negro de carbono recuperado de NFU. [29]

2.4. EL NEGRO DE CARBONO EN FIRMES DE CARRETERA

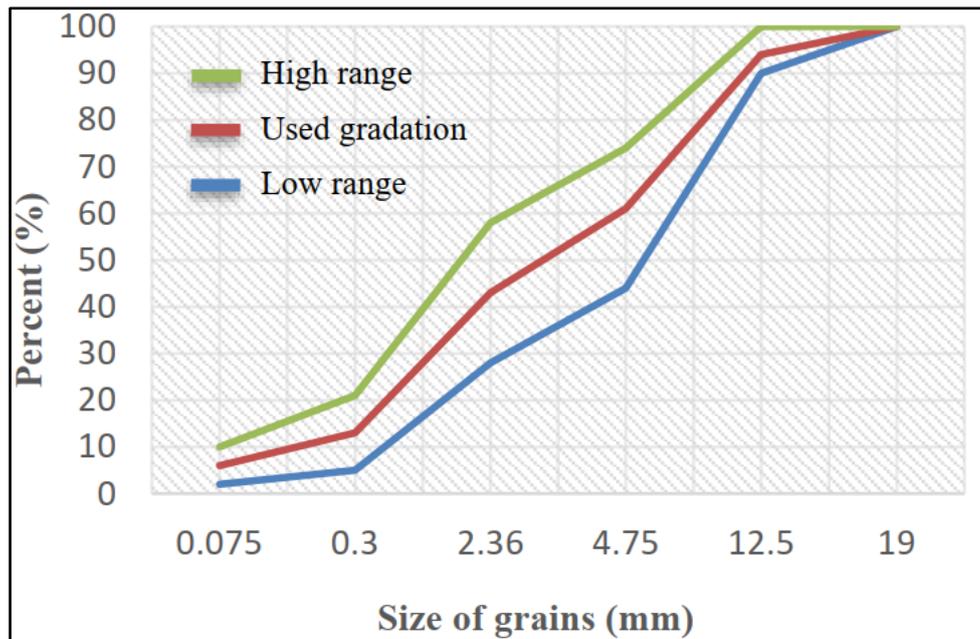
La utilización de N.C. en distintos materiales que componen los firmes de carreteras ha sido estudiado por múltiples organizaciones alrededor del mundo, a continuación, se presentan los trabajos y conclusiones de estos trabajos, que por su estudio directo del N.C. en distintas capas de los firmes se han estimado interesantes.

2.4.1. N.C. En mezclas bituminosas

Siendo conocido el efecto positivo que tienen sobre una mezcla asfáltica los aditivos, y el valor que tiene el N.C. como agente que aumenta la resistencia y ductilidad de materiales derivados del petróleo, no es de sorprender que aparezcan estudios que analicen el comportamiento de mezclas bituminosas con este nanomaterial.

En 2022, M. Zarei et al. [28] Publican desde la universidad de Teherán, Irán, un estudio en el que se fabrican y muestrean probetas Marshall con distintos porcentajes de N.C. con el fin de dar con funciones que aproximen el comportamiento de estas mezclas frente a distintos ensayos y solicitaciones en función de la proporción de N.C. en mezcla.

Para este fin, modifican el betún con N.C. por vía húmeda, es decir, que el nanomaterial ya estaría presente en el betún cuando este se mezcla con los áridos. El betún utilizado es un betún blando 85/100 con un punto de reblandecimiento de 45°. La granulometría de la mezcla utilizada es la siguiente:



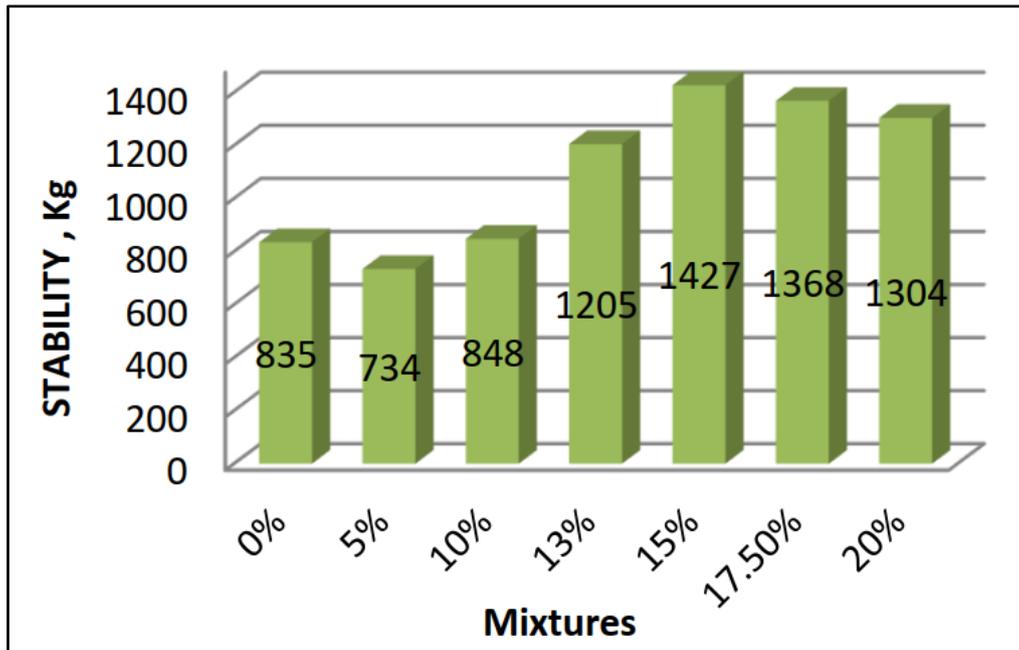
22 Granulometría del estudio, con límites y centro de huso. [28]

La granulometría utilizada consiste en una mezcla parecida a una AC 16 D, pero no totalmente, en el estudio se menciona como Topeka 19.

El N.C. utilizado es en su forma de nanomaterial, es decir, formado por partículas de diámetro aproximado de entre 100 y 1.000 [10^{-10} m], lo cual lo hace no solo peligroso para la salud sino también altamente difícil de manipular.

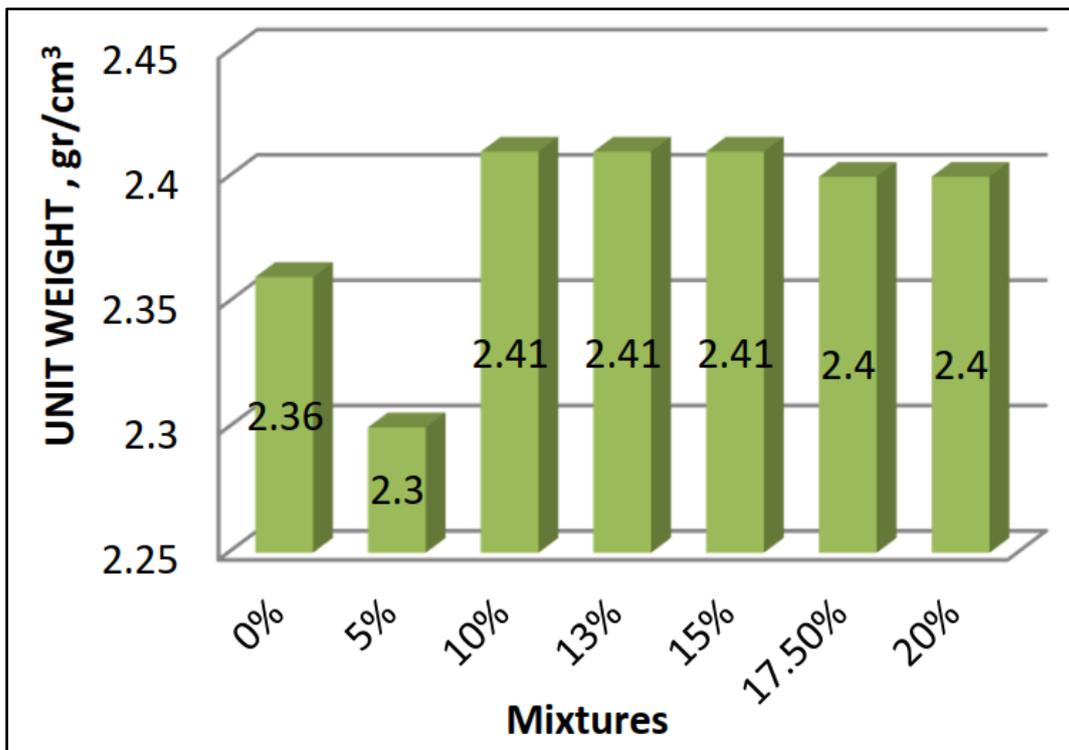
Para llevar a cabo los ensayos, se fabricarán probetas tipo Marshall de este tipo de mezcla utilizando un 5% de betún (previamente definido como contenido óptimo de betún) al que se añadirán seis proporciones distintas de N.C.: 5%, 10%, 13%, 15%, 17,5%, 20%. Estos porcentajes son referidos a la proporción en peso sobre el óptimo de ligante, en otras palabras, un 20% en estas condiciones supone una quinta parte del óptimo de ligante (5%), que sería un 1% del peso de la mezcla. [28]

En cuanto a la estabilidad Marshall (Aquella fuerza, en kilogramos, que es necesaria para romper la probeta a 60°C), se aprecia una disminución de esta característica con un contenido del 5% de N.C., con una disminución de alrededor del 12%, sin embargo, al aumentar la proporción esta característica del firme aumenta considerablemente, un 71% de la probeta de control.



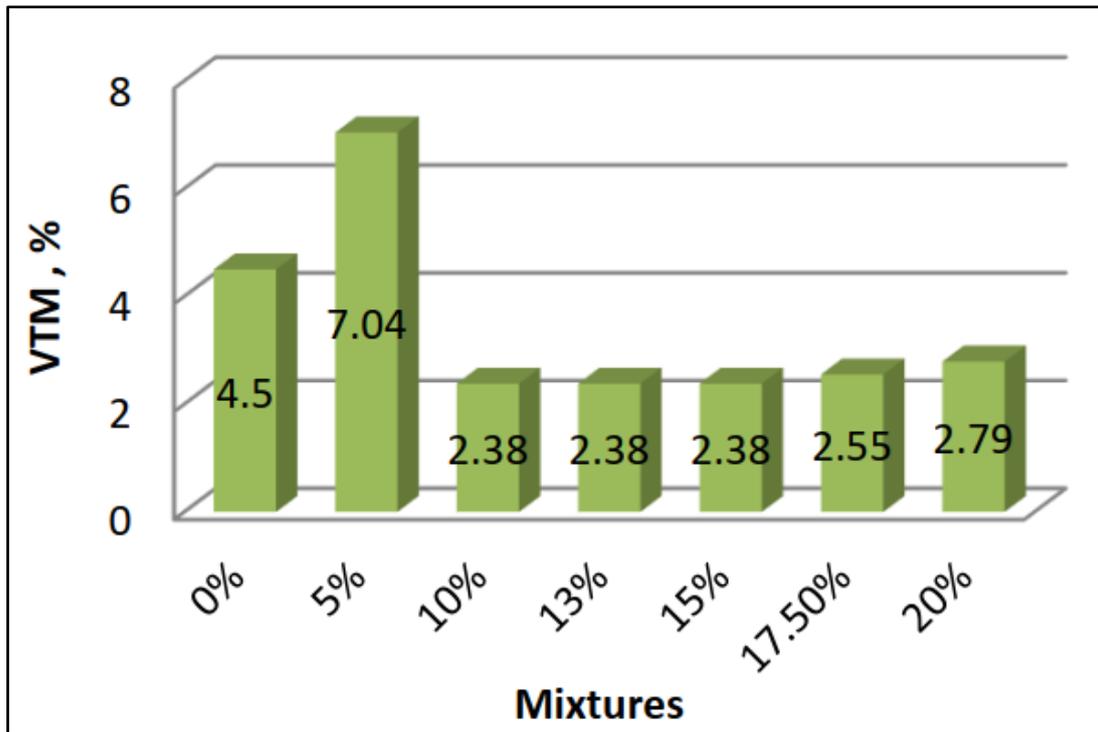
23 Estabilidad Marshall para distintas proporciones de N.C. [28]

Las densidades muestran un comportamiento similar, descendiendo ligeramente en proporciones bajas respecto a la referencia, pero ascendiendo nuevamente a medida que se añade más N.C.

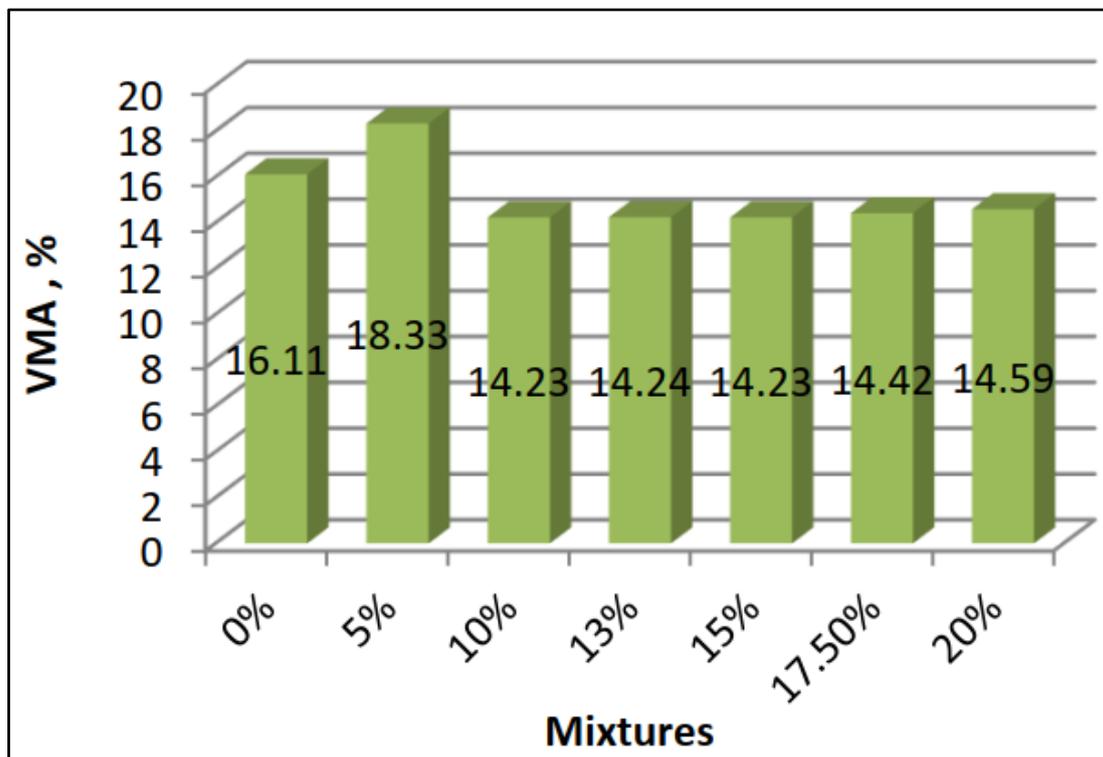


24 Densidad para distintas proporciones de N.C. [28]

Desempeños similares se pueden observar en las probetas al analizar tanto los huecos en áridos como los huecos en mezcla, siendo máximos con una proporción del 5% y después estabilizándose en torno a un valor menor al de referencia.



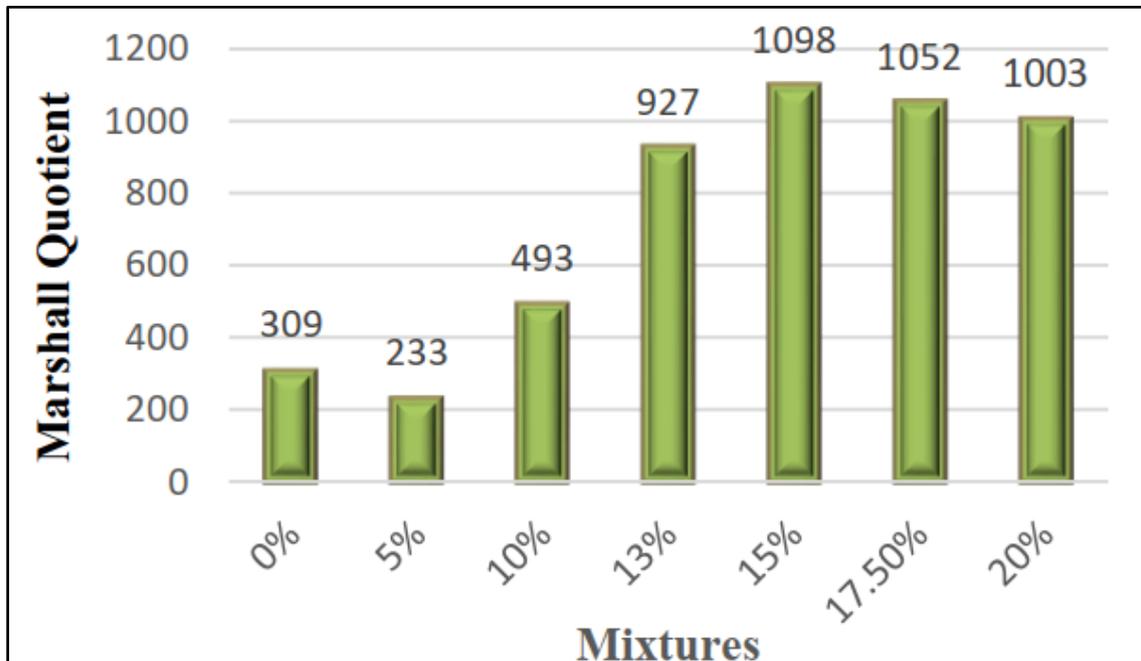
25 Huecos en mezcla para distintas proporciones de N.C. [28]



26 Huecos en áridos para distintas proporciones de N.C. [28]

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono

Por último, este estudio analiza también un parámetro conocido como Coeficiente Marshall, que tiene en cuenta la estabilidad de la mezcla y su fluidez. Los resultados de la mezcla frente a este parámetro serán mejores cuanto mayor sea su valor, lo que supondrá una mayor resistencia a la formación de deformaciones plásticas. En este caso, se aprecia una vez más una trayectoria similar, en la que la aptitud de la mezcla decrece en proporciones bajas de N.C.



27 Coeficiente Marshall para distintas proporciones de N.C. [28]

Las conclusiones a las que llegan M. Zarei et al. En este estudio para justificar el comportamiento de las distintas probetas en función de su contenido en N.C. son principalmente que la adición de N.C. como nanomaterial afecta tanto a la cohesión interna del betún como a la cohesión de este con los áridos. Por tanto, la adición de bajas proporciones de este nanomaterial supone un decrecimiento de ambas de estas cohesiones, disminuyendo las propiedades de la probeta. Sin embargo, al aumentar la proporción de N.C. la reducción de la cohesión supone un considerable decremento de la viscosidad del betún, consiguiendo un mejor recubrimiento y adhesión con los áridos, dando pie a una mezcla más compacta y resistente.

En este mismo estudio, también se lleva a cabo un pequeño análisis económico de la aportación de N.C. a las mezclas, en este análisis se concluye que el Beneficio/Coste de la utilización de esta técnica es positivo y deseable para las mezclas en las que se utiliza un 13% o más de N.C.

En la siguiente tabla extraída del estudio se muestran las conclusiones de la aptitud económica de las distintas mezclas, en las que los costes y beneficios mostrados son indicadores calculados en base a la mejora en estabilidad Marshall obtenida y el coste añadido de la mezcla con cada proporción de N.C. en una autopista de 6 carriles(estadounidenses).

Additive	Benefit	Cost	Benefit - Cost	$\frac{\text{Benefit}}{\text{cost}}$	Result
5	-137506*	15321	-148848	-12.0	uneconomical
10	3777	21043	-17266	0.18	uneconomical
13	51186	23169	+28016	2.21	economical
15	70984	24716	+46267	2.87	economical
17.5	66320	29390	+36929	2.26	economical
20	61473	34247	+27225	1.79	economical

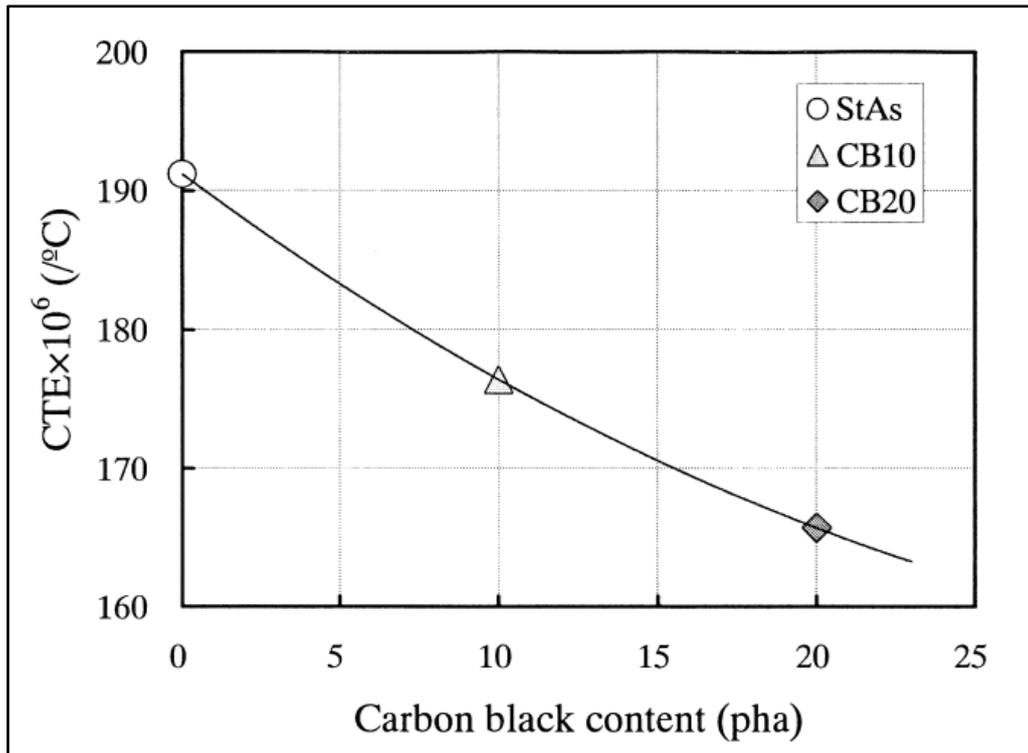
28 Análisis Beneficio/Coste para distintas proporciones de N.C.

Para concluir, teniendo en cuenta las conclusiones técnicas y económicas, se concreta que el porcentaje óptimo de N.C. en mezclas bituminosas estará entre el 13% y el 17,5%, tratando de aproximarse al 15% que es el que mejor resultados ha mostrado de entre todos los estudiados. Estos porcentajes y este “punto óptimo”, pese a ser relevantes y tener un interés intrínseco al estudio del N.C. en firmes bituminosos, deberá estudiarse y concretarse para cada tipo de mezcla, fórmula de trabajo y metodología.

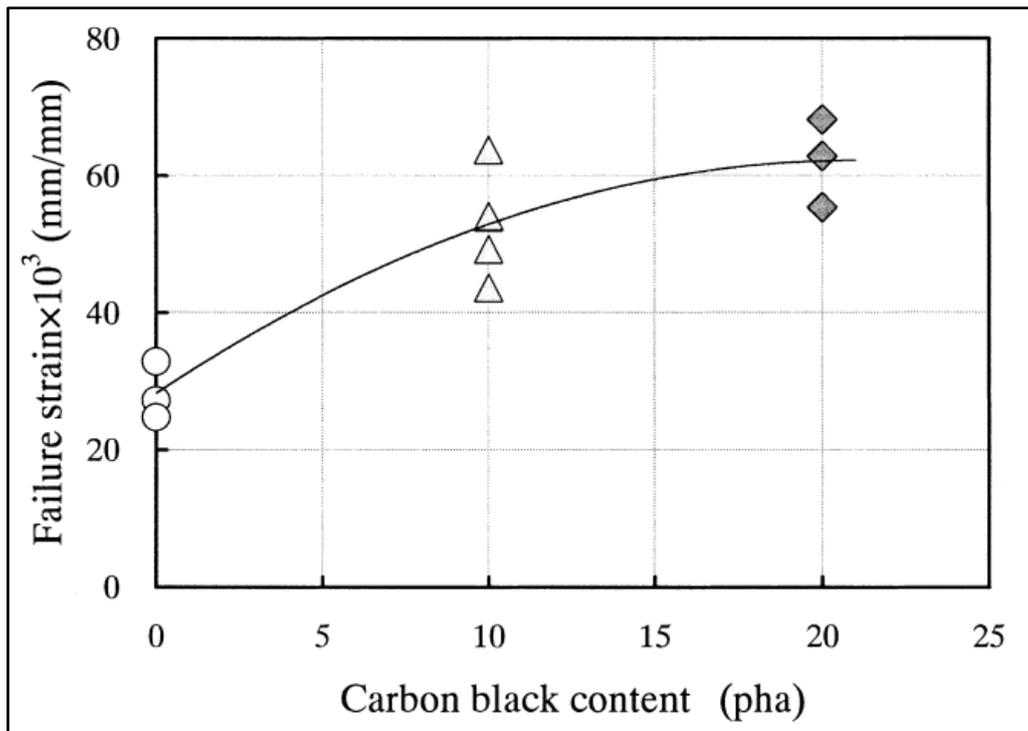
2.4.2. Efectos del N.C. sobre el betún

La sustitución del filler natural por N.C., como ya se ha mencionado, tiene como efecto aumentar el módulo elástico y disminuir la viscosidad del betún de las mezclas asfálticas, en especial en rangos de temperaturas altos. Por tanto, el N.C. tiene la capacidad de aumentar el rango de funcionamiento del betún, aparte de disminuir la susceptibilidad de las mezclas que lo utilicen a las deformaciones plásticas y la formación de roderas. [30]

Por otro lado, las mezclas modificadas con N.C. muestran mayores deformaciones de rotura, al aumentar su rango elástico en todo su rango de temperaturas. También se ve disminuido el coeficiente de expansión térmica del betún, lo cual hace más aproximados los coeficientes de expansión del betún y los áridos, haciendo a la mezcla mucho menos susceptible a la fatiga inducida por efectos térmicos. [30]



29 Coeficiente de expansión térmica de la mezcla en función de su contenido de N.C. [30]



30 Deformaciones de rotura de la mezcla en función de su contenido de N.C. [30]

Como efectos menores, también se ha observado en betunes modificados con N.C. que estos presentan una mayor fotorresistencia (resistencia a radiación ultravioleta) y una mejor disipación del calor, pudiendo conferir a estas mezclas una mejor longevidad en zonas de gran insolación. [30]

En conclusión, el N.C. es un aditivo interesante a tener en cuenta para aumentar la durabilidad y prestaciones de las mezclas bituminosas, en especial en regiones en las que se exija al firme un gran rango de actuación, en el que pudiera aparecer agrietamiento en invierno con las bajas temperaturas y roderas en verano con las altas temperaturas y gran incidencia solar.

3. METODOLOGÍA

En esta parte del trabajo se comentará la metodología seguida para la realización de los distintos ensayos realizados sobre las mezclas con contenidos de N.C. así como las mezclas de referencia, de iguales características a las probetas estudiadas, pero sin la sustitución de ninguna parte de su filler natural por N.C.

El objetivo es dosificar y comprobar la bondad de la mezcla AUTL 8 con distintas proporciones de N.C., ajustando la granulometría de esta mezcla al centro del huso marcado por el artículo 545 del PG-3 sobre mezclas ultradelgadas.

TIPO DE MEZCLA	ABERTURA DE LOS TAMICES. NORMA UNE-EN 933-2 (mm)							
	16	11,2	8	5,6	4	2	0,5	0,063
AUTL 5 ⁽²⁾			100	90-100	35-55	15-25	8-14	5-9
AUTL 8^(1,2)		100	90-100	40-65	25 - 40	15-30	10-18	5-9
AUTL11 ^(1,2,3)	100	90-100	65-85	50-76	33-55	20-35	10-23	5-11

31 Granulometrías para mezclas AUTL. [1]

Los ensayos realizados serán los siguientes:

- Ensayo Marshall.
- Sensibilidad al agua.
- Ensayo Cántabro
- Círculo de arena.
- Ensayo de péndulo TRL.
- Escáner láser
- Ensayo de ruido
- Módulo dinámico

Todos estos ensayos se desarrollan en este capítulo del trabajo.

3.1. ENSAYO MARSHALL

El ensayo Marshall es un ensayo ampliamente utilizado en mezclas asfálticas para determinar su dosificación, este ensayo utiliza probetas cilíndricas normalizadas de 101,6mm de diámetro y 63,5mm de altura (En este caso, al tratarse de mezclas ultradelgadas AUTL, la altura de las probetas Marshall será de entre 35 y 45mm y tendrán un peso de $700 \pm 35g$). [31] [1]

Sobre estas probetas se realiza un análisis de densidad y huecos y después se somete a ensayo de estabilidad y deformación. [31]



32 Probeta tipo Marshall utilizada en ensayos

Este método es válido tanto para la creación de mezclas asfálticas nuevas como para el control de puesta en obra de las mezclas, y es válido para mezclas en caliente con betún de penetración y tamaño máximo de árido menor a 25,4mm. [31]

Mientras que este ensayo comienza con la preparación de las probetas tipo Marshall, es necesario haber seguido con anterioridad unos pasos previos: [31]

- Haber comprobado que todos los materiales utilizados para la mezcla cumplen las especificaciones requeridas por la norma.
- Haber dosificado los áridos con anterioridad, para que la granulometría utilizada coincida con la requerida.
- Haber determinado los pesos específicos de todos los materiales empleados en la mezcla, para poder emplearlos en el cálculo de densidades y huecos.

Mediante el método Marshall se determina el contenido óptimo de betún para una mezcla de áridos con una composición y granulometría específicas. Para ello, se preparan varias probetas, incrementando el contenido de betún en intervalos de 0,5%, hasta cubrir un rango que incluya al menos dos valores por encima y dos por debajo del contenido óptimo estimado. Inicialmente, se realiza una estimación del contenido óptimo de betún, y con el fin de obtener resultados más precisos, se moldean al menos tres probetas por cada contenido evaluado. Así, el estudio de una mezcla asfáltica con seis contenidos distintos de betún requiere la fabricación de un mínimo de 18 probetas. [31]

3.1.1. Preparación de las mezclas y probetas

La preparación de las probetas tipo Marshall requiere de haber separado y calentado previamente los materiales necesarios para la creación de la mezcla, para que estos no enfríen la mezcla al integrarse y dificulten el correcto mezclado.

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono



33 Áridos y filler de la mezcla, tras sacarlos del horno de precalentamiento.

Si la mezcla utiliza N.C. este también deberá ser calentado.



34 Materiales dosificados y precalentados para mezcla con N.C.

Se coloca el recipiente donde se realizará la mezcla sobre un fuego, que hará llegar a la mezcla a la temperatura deseada de mezclado y compactación. En el recipiente se vuelcan en primer lugar los áridos, que han sido previamente dosificados para ajustarse a la granulometría deseada para la mezcla AUTL 8.



35 Áridos dosificados, colocados en el recipiente sobre el fuego.

Después, se verterá el N.C. en la mezcla, y se integrará con los áridos.



36 Recipiente con áridos y N.C.

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono



37 Recipiente con N.C. integrado en áridos

En este momento, se añade a la mezcla el betún caliente y previamente pesado, y se integra con el resto de los componentes.



38 Recipiente con betún sin integrar en los áridos

Una vez bien integrado el betún, se añade el filler, es importante añadirlo en este orden ya que, si se añadiera antes, podría tender a apelmazar el betún y a no permitir la correcta adherencia y envoltura del árido y el betún.



39 Recipiente tras añadir el filler a la mezcla.

Por último, antes de sacar la mezcla del recipiente, se integra todo hasta conseguir una mezcla homogénea.



40 Recipiente con la mezcla completada.

La mezcla ha debido estar a una temperatura comprendida entre los 175° y los 190° durante todo el proceso de mezclado, y haber sido removida de manera vigorosa para evitar sobrecalentamientos y enfriamientos locales.

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono

La mezcla, una vez terminada, se vierte con ayuda de un embudo a un molde específico para probetas tipo Marshall, que habrá sido previamente calentado para no enfriar la mezcla al ser vertida.



41 Vertido de la mezcla a molde de probetas Marshall.

Una vez con la mezcla en el molde, se compacta mediante una compactadora Marshall de martillo, aplicando 25 golpes de martillo por cada cara de la probeta (En otro tipo de mezclas, se aplican más golpes, pero en este caso la probeta es más pequeña y solo requiere de 25), manteniendo en todo momento la mezcla en una temperatura próxima a los 125°



42 Molde con mezcla, colocado en compactadora Marshall.

Una vez compactada la mezcla, la probeta se deja enfriar a temperatura ambiente antes de ser desmoldada.



43 Probetas a la espera de ser desmoldadas.

Todo este proceso, desde la dosificación de los materiales hasta el desmoldado de las probetas deberá repetirse para cada probeta realizada.

Una vez desmoldadas las probetas, se dejan enfriar por completo permitiendo que reposen a temperatura ambiente antes de realizar sobre ellas el estudio de densidades y huecos.

3.1.2. Estudio de densidades y huecos

En primer lugar, es necesario determinar la densidad aparente de las probetas, para ello, se calcula el volumen del cilindro que forman las probetas, conociendo el diámetro de estas ya que coincide con el diámetro interior del molde Marshall, y midiendo la altura de la probeta en cuatro puntos distintos, tomando como altura la media de estas cuatro mediciones.

Se calculará entonces el volumen de cada una de las probetas, y se tomará como volumen la media de los volúmenes obtenidos para cada una de las tres probetas realizadas con cada proporción de betún.

Porcentaje de betún sobre mezcla %	5,00%				
Porcentaje de betún sobre árido %	5,26%	36,8			gramos
IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS	A1	A2	A3	A4	
PESO EN EL AIRE (gr.)	731,9	730,9	732,2		
ALTURA 1 (mm) CON PASTILLAS	70,00	70,36	69,50		
ALTURA 2 (mm) CON PASTILLAS	70,84	70,80	69,78		
ALTURA 3 (mm) CON PASTILLAS	69,86	70,66	69,80		
ALTURA 4 (mm) CON PASTILLAS	69,84	70,14	69,52		
ALTURA 1 (mm) SIN PASTILLAS	42,95	43,31	42,45		
ALTURA 2 (mm) SIN PASTILLAS	43,79	43,75	42,73		
ALTURA 3 (mm) SIN PASTILLAS	42,81	43,61	42,75		
ALTURA 4 (mm) SIN PASTILLAS	42,79	43,09	42,47		
ALTURA MEDIA DE CADA PROBETA (mm)	43,09	43,44	42,60		
DIAMETRO DE CADA PROBETA (mm)	101,6	101,6	101,6		
VOLUMEN GEOMETRICO (cm³)	349,3	352,2	345,4		
DENSIDAD APARENTE (gr/cm³)	2,095	2,075	2,119		
MEDIA DENSIDAD APARENTE (gr/cm³)	2,097				

44 Tabla de medidas y densidades obtenidas en laboratorio, como ejemplo.

Una vez obtenida la densidad media aparente para todos los casos que se vayan a estudiar, el cálculo de huecos se realiza de la siguiente manera, se calculan los parámetros V, B, A y H de la siguiente manera:

$$V := \frac{100}{D_{aparente}}$$

$$B := \frac{\%betún}{PE_{betún}}$$

$$A := \frac{100 - \%betún}{PE_{áridos}}$$

$$H := V - B - A$$

45 Parámetros para cálculo de huecos en probetas

Estos parámetros marcan una proporción del betún, el árido y los huecos en la mezcla, para el cálculo de estos parámetros, como ya se ha mencionado antes, es necesario conocer con anterioridad los pesos específicos de los materiales empleados.

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono

Para representar esta proporción como porcentajes de huecos sobre áridos y sobre mezcla, se hace la conversión de esta manera:

$$H_m := \frac{H}{V} \cdot 100$$
$$H_a := \frac{H + B}{V} \cdot 100$$

46 Cálculo de huecos sobre mezcla y huecos sobre áridos

Habiendo obtenido las densidades y los huecos de las probetas en todos los casos estudiados, se tratará de buscar una proporción de betún “óptima” que cumpla todas las especificaciones marcadas por el artículo 545 del PG-3 sobre mezclas ultradelgadas.

TIPO DE MEZCLA	% DE HUECOS (Norma UNE-EN 12697-8)
AUTL	≥ 8 y ≤ 15

47 Rango de huecos en mezcla permitidos para mezclas AUTL [1]

Para la determinación del contenido óptimo de ligante, es recomendable graficar mediante herramientas informáticas las curvas obtenidas para la densidad, el porcentaje de huecos en árido y el porcentaje de huecos en mezcla. De esta manera se busca localizar los máximos y mínimos que presentan estas curvas, y que dependerán del tipo de mezcla y de ligante.

3.2. ENSAYO DE SENSIBILIDAD AL AGUA

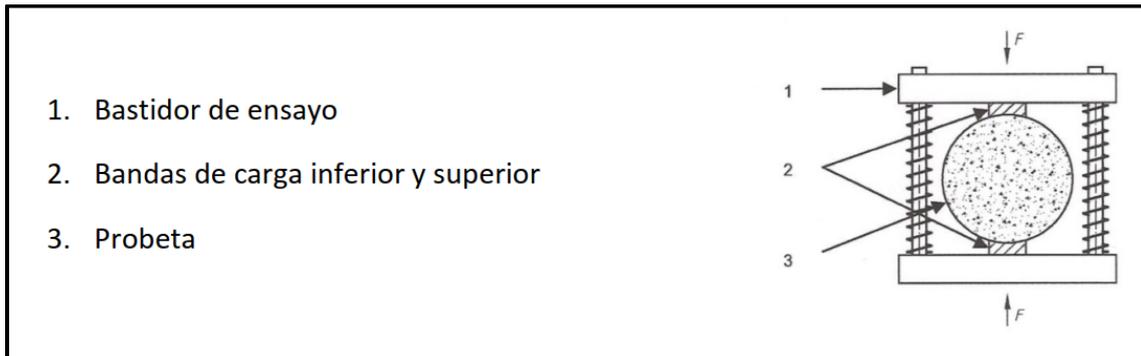
El ensayo de sensibilidad al agua es un ensayo de laboratorio diseñado para evaluar la resistencia de las mezclas bituminosas frente a la acción del agua. Su objetivo principal es determinar en qué medida la cohesión de la mezcla se ve afectada cuando se expone a condiciones de humedad, lo cual es crucial para prever su comportamiento y durabilidad en ambientes reales donde la exposición al agua es frecuente (lluvia, filtraciones, humedad del terreno, etc.) [32]

Se utiliza este ensayo porque permite estimar la pérdida de propiedades mecánicas de la mezcla debido a la acción del agua, lo cual es esencial para asegurar la calidad y vida útil de las carreteras. Una mezcla que presenta una baja sensibilidad al agua será más resistente al deterioro, reduciendo costos de mantenimiento y aumentando la seguridad vial. [32]

Para llevar a cabo este ensayo se utilizarán las probetas tipo Marshall con el ligante óptimo determinado en el ensayo anterior, se realizará el ensayo para cuatro probetas secas y cuatro probetas húmedas en cada caso, siendo los tres casos estudiados:

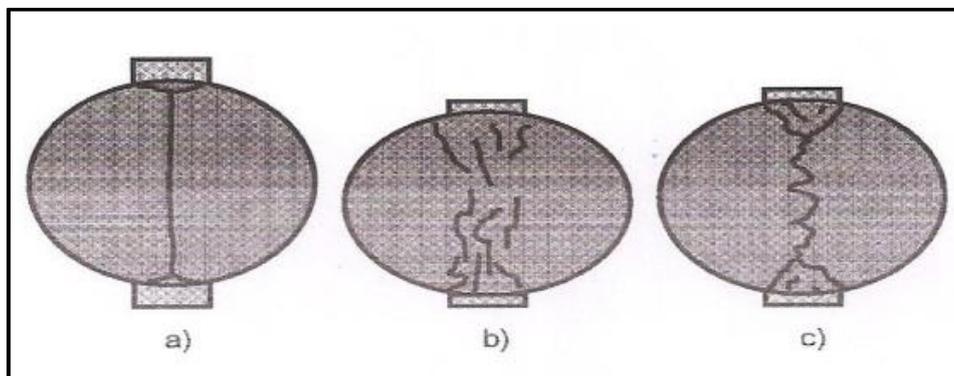
- 0% N.C.
- 1% N.C.
- 2% N.C.

Las probetas serán sometidas a tracción indirecta mediante una prensa equipada con bastidor especial con la siguiente forma:



48 Esquema bastidor sensibilidad al agua [32]

Una vez se alcanza la carga de rotura, esta se extrae como dato para obtener la tensión de rotura de la probeta, también conviene analiza la probeta para estudiar el tipo de rotura que ha sufrido y comprobar si los áridos han sido machacados o no.



49 Posibles tipos de rotura en una probeta sometida a tracción indirecta [32]

Como se aprecia en la figura, esta rotura puede ser:

- a) Rotura limpia por tracción.
- b) Deformación
- c) Combinación de ambas

Una vez realizadas las roturas de las probetas, y anotadas las cargas de rotura se calcula la tensión de rotura mediante la siguiente fórmula:

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} \times 10^3$$

50 Fórmula índice de tracción indirecta. [32]

Donde:

- ITS: Índice de tracción indirecta en MPa
- P: Carga máxima en KN
- D: Diámetro de la probeta acondicionada en mm
- H: Altura de la probeta acondicionada

Una vez calculado en Índice de Tracción Indirecta, para todas las probetas de un caso, se realiza una media aritmética de los valores obtenidos para las probetas secas y lo mismo para las probetas acondicionadas en agua.

El objetivo es observar en que proporción disminuye la resistencia a tracción indirecta de las probetas tras ser acondicionadas, para ello se divide el valor obtenido para las probetas húmedas entre aquel de las probetas secas.

Para que una mezcla se considere apta, según el artículo 545 del PG-3 sobre mezclas ultradelgadas AUTL, la resistencia conservada debe ser mayor o igual al 90% de la inicial.

En la siguiente imagen, se muestra como ejemplo un grupo de probetas sobre las que se ha realizado el ensayo de sensibilidad al agua y han sido rotas a tracción indirecta, se puede apreciar que presentan una rotura mixta como la expuesta anteriormente, siendo esta más cercana a la rotura limpia de tracción que es la más deseable.



51 Probetas sometidas a ensayo de sensibilidad al agua

3.3. ENSAYO CÁNTABRO DE PÉRDIDA DE PARTÍCULAS

El objeto del ensayo cántabro de pérdida de partículas es útil para determinar tanto la cohesión interna de una mezcla para retener sus áridos, como para comprobar la pérdida de cohesión que la mezcla sufre por la acción del agua. [33]

Las probetas que se utilizarán para este ensayo serán probetas tipo Marshall, con las dimensiones requeridas para este tipo de probeta y la energía de compactación dictada por la norma para cada tipo de mezcla, en este caso, 25 golpes en el compactador Marshall por cara. [33]

Las probetas que vayan a ser sometidas a este ensayo se dividirán en dos series diferenciadas, la primera serie se acondicionará en aire para el ensayo y la segunda serie se acondicionará en agua.

La serie de acondicionamiento en aire se mantiene en un recinto a aproximadamente 25° durante al menos 24 horas, mientras que las acondicionadas en agua se sumergen en un baño de agua de aproximadamente 60° durante el mismo tiempo. Pasado este tiempo, ambas series de probetas se meten en una estufa a 25° y ventilación forzada durante 24 horas y pasado este tiempo se determina la masa de cada probeta.

Después, se introducen de una en una las probetas al tambor rotativo del ensayo de Los Ángeles y se someten a 300 vueltas en esta máquina, sin introducir otros objetos en la misma.



52 Tambor el ensayo de Los Ángeles, utilizado en este ensayo

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono

Una vez sale cada probeta del tambor, esta se limpia cuidadosamente y se determina nuevamente su peso, pudiendo calcular de manera sencilla la pérdida sufrida por cada probeta.

$$Pérdida (\%) := \frac{P_1 - P_2}{P_1} \cdot 100$$

53 Cálculo pérdida en ensayo Cántabro

Siendo:

- P1: Peso de la probeta acondicionada antes de entrar al tambor.
- P2: Peso de la probeta al salir del tambor.

Por último, es necesario calcular el índice de aumento de pérdidas, que dará el aumento de las pérdidas percibido por las probetas acondicionadas en agua respecto a aquellas acondicionadas en aire, se calcula de la siguiente manera:

$$IAP (\%) := \frac{P_s}{P_a} \cdot 100$$

54 Cálculo índice de aumento de pérdidas en ensayo Cántabro

Donde:

- Ps: Pérdida media sufrida en las probetas acondicionadas en aire.
- Pa: Pérdida media sufrida en las probetas acondicionadas en agua.

Según el artículo 545 del PG-3 sobre mezclas ultradelgadas este aumento de pérdidas no debe ser superior al 20% en categorías de tráfico pesado de T00 a T2, y en el resto de los casos, no ser superior al 25%.



55 Probetas tipo Marshall tras someterse a ensayo Cántabro

3.4. ENSAYO DE PÉNDULO TRL

El ensayo de resistencia al deslizamiento mediante péndulo del TRL tiene como objetivo obtener un coeficiente de resistencia al deslizamiento que esté estrechamente ligado con el coeficiente físico de rozamiento y valore las características antideslizantes de la superficie de un pavimento. [34]

Para conseguir este objetivo, este ensayo mide la pérdida de energía sufrida por un péndulo de características conocidas al rozar este de manera controlada con el pavimento que tiene debajo. La pérdida de energía del péndulo se mide mediante el ángulo obtenido por el péndulo en su subida tras el rozamiento. También cabe destacar que este ensayo es válido no solo para el estudio de mezclas en laboratorio, sino también para en estudio in situ de del coeficiente de resistencia al deslizamiento en tramos existentes de carretera. [34]

Para realizar este ensayo, el primer paso es colocar el péndulo, en este caso sobre la probeta, y asegurarse de que este está perfectamente nivelado, es importante también asegurarse de que la probeta no se mueva durante el ensayo, ya que esto arruinaría las medidas.

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono



56 Péndulo TRL para ensayo de coeficiente de resistencia al deslizamiento

Para preparar la superficie de contacto del péndulo con la probeta es necesario tomar en consideración lo siguiente:

- La zapata del péndulo debe estar en buenas condiciones y ajustada a la presión correcta.
- La zapata debe hacer contacto con la probeta en toda la longitud marcada y no fuera de ella.
- La probeta debe mojarse adecuadamente con agua para simular condiciones de pavimento en la lluvia.



57 Comienzo del contacto zapata-probeta



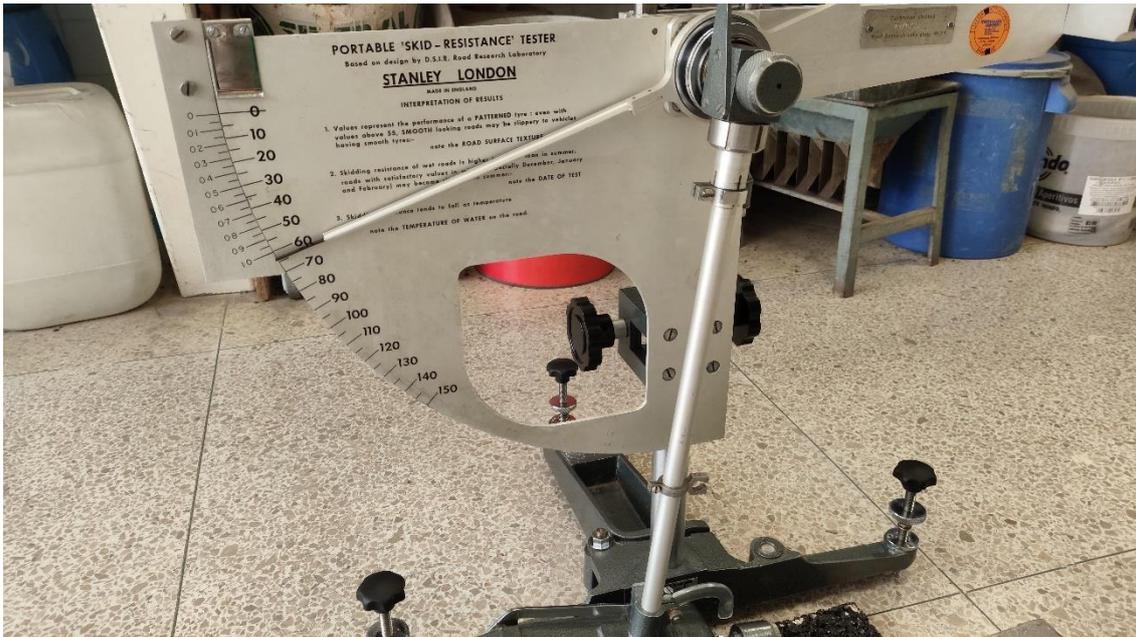
58 Final del contacto zapata-probeta

Una vez realizados estos pasos se puede proceder con el ensayo, llevando el péndulo hacia su posición inicial en la parte superior de la montura, desde donde se deja caer libremente hacia la probeta.



59 Posición inicial del péndulo para el ensayo

Una vez el péndulo haya rebasado la zona de contacto con la probeta, subirá por el lado contrario, desplazando la aguja, que determinará el alcance máximo que ha logrado el péndulo.



60 Posición final del péndulo

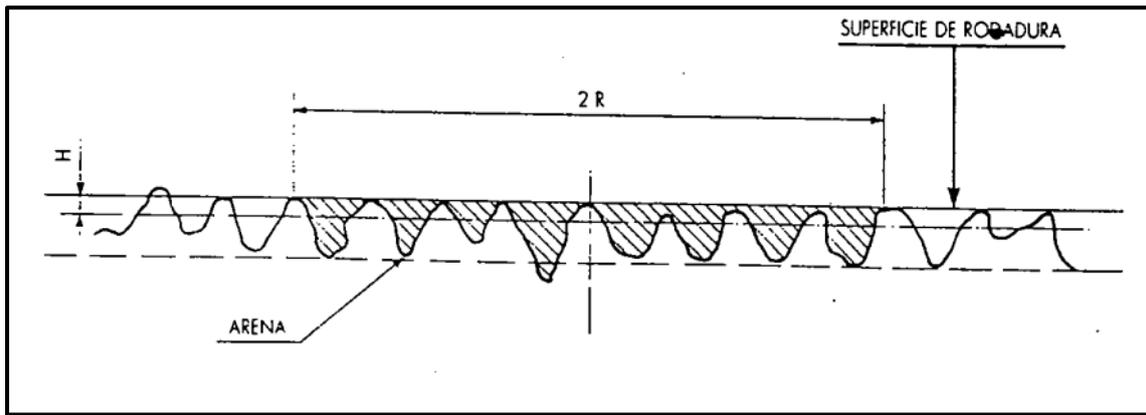
Con la posición final de la aguja del péndulo, se podrá leer en la escala el coeficiente de resistencia al deslizamiento, es importante notar, que, para mayores resistencias al deslizamiento, se disipará mayor energía en el tramo de contacto zapata-probeta, por lo que el péndulo subirá menos en su recorrido ascendente, por tanto, los valores más altos de la escala se encuentran en la parte inferior.

El artículo 545 del PG-3 sobre mezclas ultradelgadas marca un mínimo de 60 para el ensayo de resistencia al deslizamiento, medido in situ un mes tras la puesta en obra de la mezcla.

3.5. CÍRCULO DE ARENA

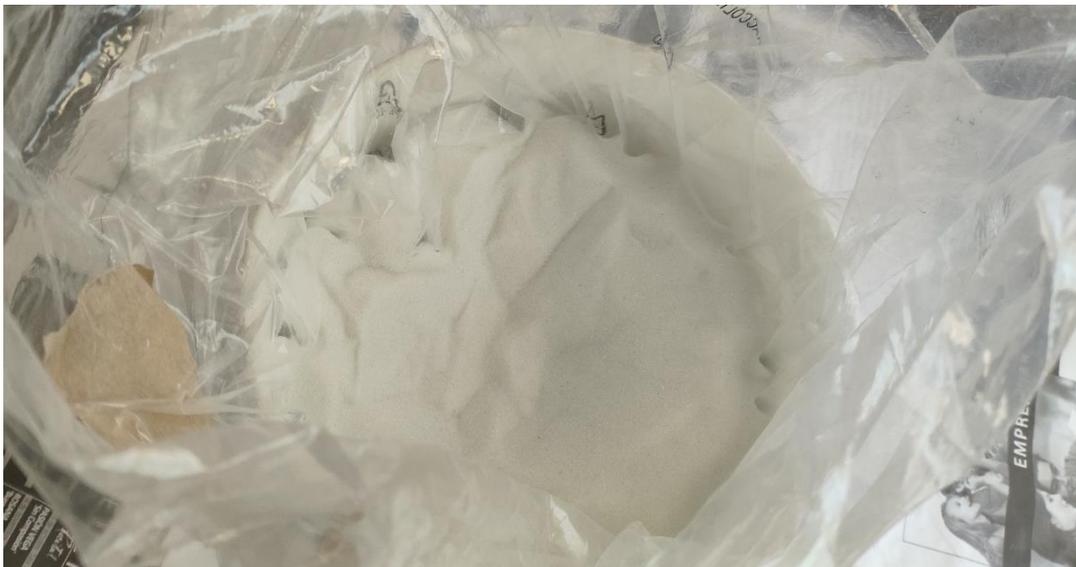
Este ensayo tiene como objetivo la medida de la textura superficial de un pavimento bituminoso (aunque también es aplicable a otro tipo de pavimentos), mediante la creación de un círculo de arena fina sobre su superficie, enrasándola hasta que no pueda expandirse más. [35]

A partir del volumen de arena utilizado y del área cubierta por la misma sobre el pavimento, se calcula una profundidad media de los huecos rellenos por la arena, valor que puede utilizarse como medida de la rugosidad o textura superficial del pavimento. [35]



61 Croquis de la arena relleno los huecos de la superficie de a mezcla bituminosa. [35]

La arena que se utiliza para este ensayo no es una arena convencional utilizada en la fabricación de mezclas bituminosas, sino que se trata de unas microesferas de vidrio con una granulometría de una uniformidad excelente, para no afectar a las mediciones.



62 Microesferas de vidrio, para su uso como arena en el ensayo.

Se toma un volumen dado de esta arena, en este caso de 25cm^3 para su utilización sobre la probeta plana.

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono



63 Arena dosificada para ensayo de círculo de arena.

Esta arena, previo secado y limpieza de la probeta se vierte sobre el centro de la zona que se quiera analizar, formando un pequeño montículo.



64 Pequeño montículo de arena para ensayo de círculo de arena

Este pequeño montículo, se extiende sobre la probeta con ayuda de un pequeño tampón, que dispone de una cara plana de caucho en la parte inferior. Esta extensión debe hacerse con pequeños movimientos circulares, tratando de crear una forma circular con la arena.



65 Enrasado de la arena con tampón.

La extensión termina cuando la arena está perfectamente enrasada con la probeta y el tampón no puede extender más el material, en este momento se mide mediante un compás de puntas rígidas y una regla el diámetro medio del círculo resultante.



66 extensión finalizada para ensayo de círculo de arena.

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono



67 Medición del diámetro medio del círculo

Una vez tomadas las mediciones, se calcula la profundidad media de la arena en el círculo utilizando la siguiente expresión:

$$H := \frac{V}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}}$$

68 Cálculo de altura media de la arena en el círculo

Donde:

- \underline{V} : Volumen de arena utilizado, que puede variar en función de la granulometría utilizada en la mezcla.
- \underline{D} : Diámetro medio medido en ensayo.

El artículo 545 del PG-3 sobre mezclas ultradelgadas marca para este ensayo un valor mínimo obtenido de 1,0mm de MTD para que la mezcla se considere apta.

3.6. ESCÁNER LÁSER CON TEXTURÓMETRO

El ensayo del texturómetro láser, permite hacer un análisis detallado de la macrotextura superficial de una mezcla. Para ello, se utilizan probetas planas, sobre las cuales se actúa un sensor láser, que, mediante un barrido, puede determinar la distancia entre cada punto de la probeta y el plano del sensor con gran precisión, consiguiendo generar una imagen en tres dimensiones de la superficie de la mezcla. [36]



69 Escáner láser utilizado para el ensayo.

Para llevar a cabo este ensayo, se comienza por preparar todas las probetas que van a ser sometidas al mismo “manchándolas” ligeramente en su superficie con filler con ayuda de una brocha suave.

Este paso es imprescindible para la correcta lectura del escáner láser, ya que la superficie de la mezcla presenta brillo de manera natural, este brillo causa malas lecturas en el escáner, el cual detecta la superficie mucho más elevada de lo que realmente se encuentra, obteniendo una superficie con afiladas aristas hacia afuera, que no corresponden con la realidad y pueden invalidar el ensayo si no se corrigen.

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono



70 Probeta manchada con filler en su zona central, lista para el escáner laser.

Después se coloca la plancha inferior del escáner, la cual sirve como guía para el aparato y ayuda a visualizar si quedan zonas sin recubrir de filler.



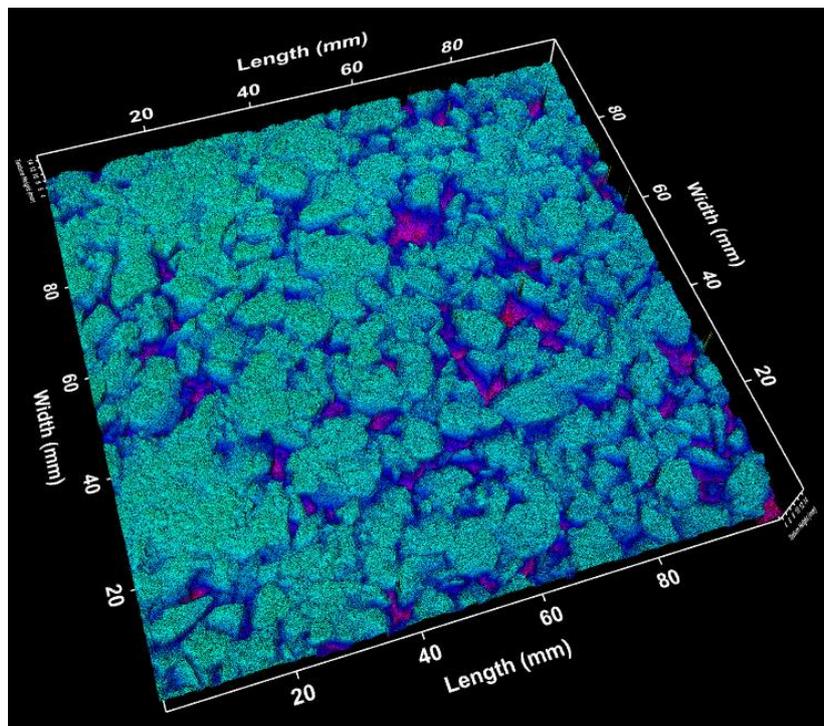
71 Plancha inferior del escáner láser.

Sobre esta plancha, se coloca el aparato, que, conectado al procesador y visualizador de datos, puede proceder a realizar el barrido.

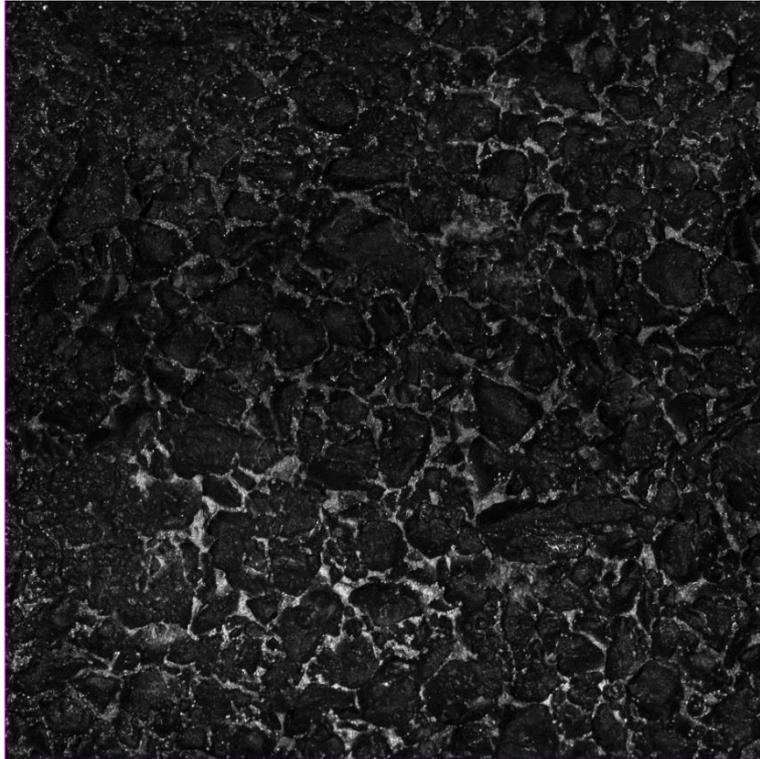


Al terminar el ensayo, el escáner habrá generado cuatro cosas:

- Una imagen real de la superficie escaneada, que servirá para comprobar la bondad del modelo generado.
- Una tabla con los datos topográficos de cada uno de los puntos escaneados en la superficie.
- Un modelo 3D de la superficie a partir de los datos topográficos obtenidos.
- Una tabla con los datos estadísticos interesantes para la macrotextura, entre los que se encuentra el MTD.



72 Modelo 3D de la superficie escaneada de una probeta



73 Imagen generada de la misma probeta

Este proceso debe llevarse a cabo para cada probeta a ensayar. El artículo 545 del PG-3 sobre mezclas ultradelgadas establece un mínimo de 0,7mm de MTD en para este tipo de mezcla al estudiarse mediante este ensayo.

3.7. ENSAYO DE ABSORCIÓN ACÚSTICA

La absorción acústica de la mezcla se determina mediante el ensayo de tubo de impedancia. Este ensayo consiste en la utilización de un tubo con una fuente sonora en uno de sus extremos, una probeta tipo Marshall de la mezcla en el extremo opuesto y unos receptores sonoros cerca del centro.

Este ensayo realizará un barrido de frecuencias sonoras, de las cuales se estudiarán las frecuencias entre 50 Hz y 1,6 kHz. Para este rango de frecuencias se observará la potencia sonora reflejada en la mezcla, conociendo de esta manera la absorción acústica de la mezcla.



74 Tubo de impedancia utilizado en el ensayo.

Para la realización de este ensayo, el primer paso es conectar todo el cableado para el funcionamiento del sistema acústico del tubo, para ello son necesarios los tres micrófonos con su respectivo DAQ para la adquisición de datos y el micrófono emisor previamente amplificado.



75 Conexión del cableado

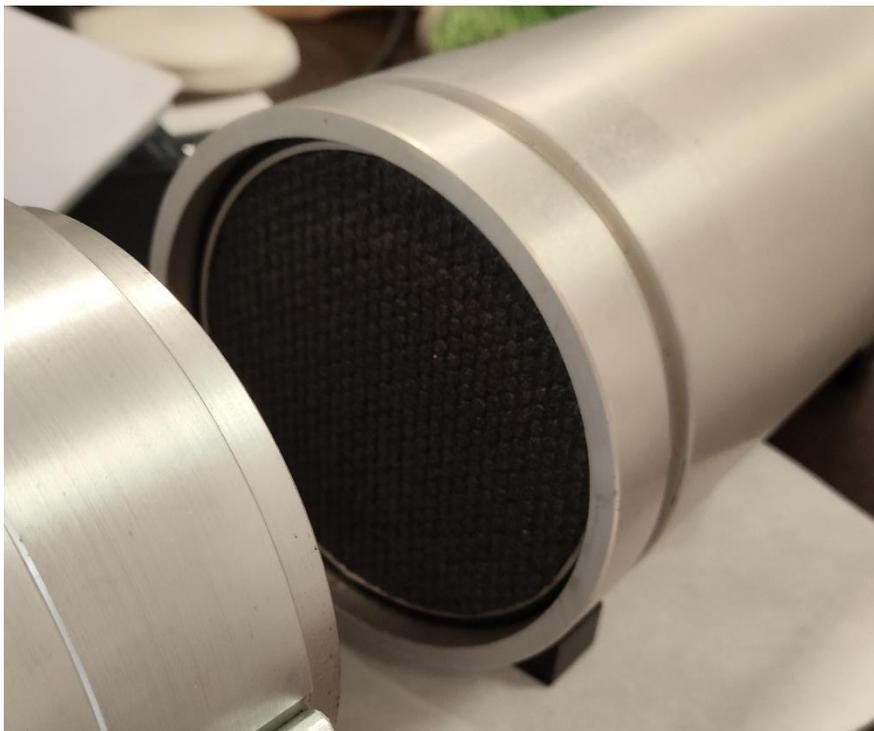
Una vez está conectado y funcionando todo el aparataje, es necesario colocar la probeta en el lugar de ensayo, para ajustarla se utiliza un pistón que se encuentra en el tubo para este fin.

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono



76 Pistón del tubo para ajuste de la probeta

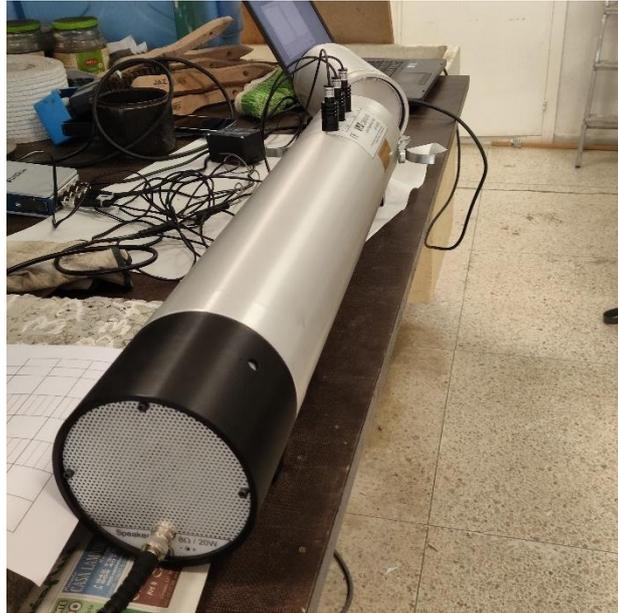
Previo al ensayo de la probeta, es necesario hacer calibraciones del sistema, para lo cual es utilizado un bloque de espuma de las mismas dimensiones que una probeta Marshall, que se coloca sobre el pistón, como si se tratara de una muestra a ensayar.



77 Bloque de espuma listo para realizar la calibración.

Una vez calibrado el sistema, se coloca la primera probeta en el tubo y se realiza el ensayo. Este proceso ocurre de manera automática, una vez comenzado el ensayo la fuente sonora comienza a emitir sonido en un barrido de frecuencias que los micrófonos van recibiendo.

Estos datos los recibe el ordenador y se muestran en pantalla, con un ligero posprocesado de los datos se obtienen los resultados del ensayo.



78 Tubo de impedancia preparado para el ensayo.

En este caso, el artículo 545 del PG-3 sobre mezclas ultradelgadas no contempla este ensayo, puesto que no impone limitaciones de ruido a estas mezclas

3.8. ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO

El ensayo de módulo dinámico es un ensayo que trata de caracterizar la respuesta de una mezcla asfáltica considerando esta un material elástico-viscoso, para llevar a cabo este ensayo es necesario fabricar unas probetas serradas con forma de prisma que serán sometidas a flexión de su eje largo. [37]



79 Probetas serradas para someter a ensayo de módulo dinámico

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono



80 Probeta prismática serrada, para ensayo de módulo dinámico

Estas probetas se introducirán en una máquina que les aplicará un esfuerzo continuo sinusoidal, y medirá de manera continua también la deformación que estas sufren durante el ensayo.

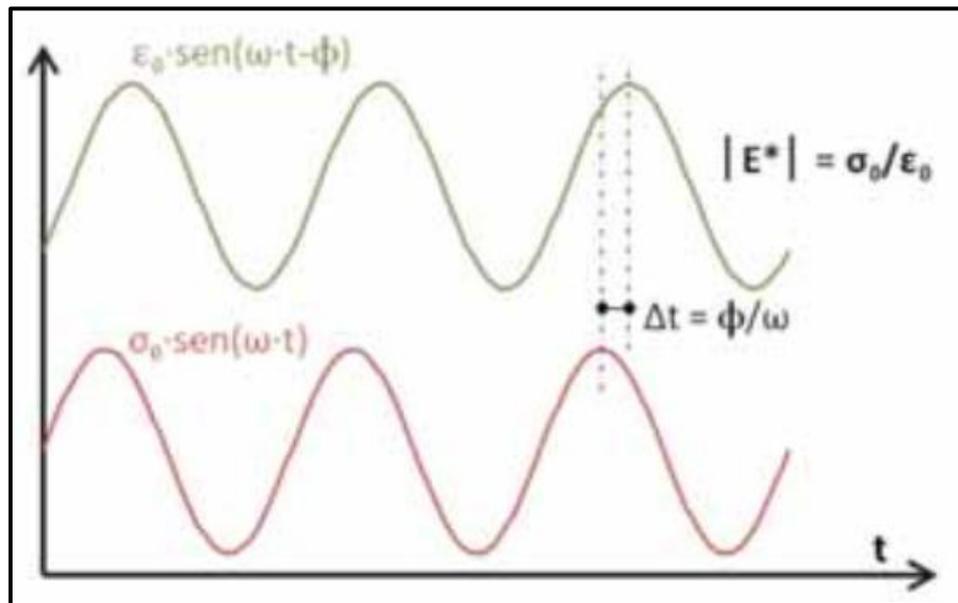


81 Máquina para ensayo de módulos dinámicos.

Este ensayo, que se realiza a temperatura constante y controlada, monitorea principalmente dos variables:

- La amplitud de la deformación de la probeta bajo la carga introducida, que estará directamente relacionada con el comportamiento elástico del material.
- El desfase entre la aplicación de la carga y la deformación sufrida por el material, que se relacionará directamente con su comportamiento viscoso.

A continuación, se muestra una imagen en la que se aprecia tanto la amplitud de la deformación respuesta como el desfase entre la carga y la deformación.



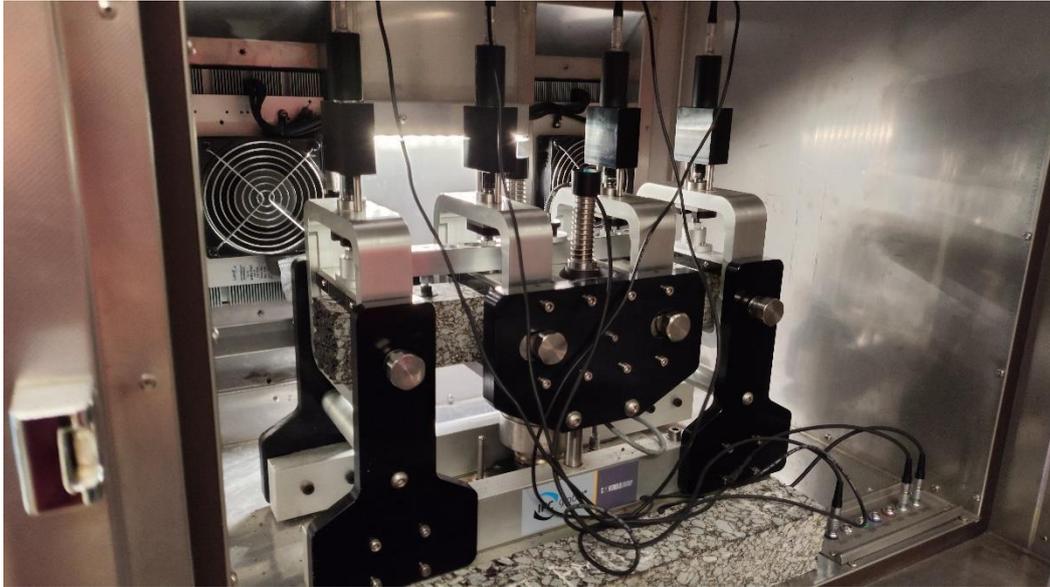
82 Modelo del ensayo de módulo dinámico [37]

Este ensayo también es conocido como “Módulo complejo”, ya que es común representarlo como la suma de dos términos, una parte real correspondiente al módulo elástico del material, y una parte imaginaria correspondiente al módulo viscoso.

Este análisis elástico-viscoso, se realizará dentro de una máquina que, de manera automática, variará la frecuencia de la fuerza aplicada, manteniendo constantes el resto de los valores. Por la naturaleza del material, es común percibir dos tendencias en los resultados a medida que se aumenta la frecuencia de la fuerza aplicada.

- El material se vuelve más rígido, aumentando su módulo dinámico.
- El material se vuelve más elástico, pues su desfase disminuye y por tanto su comportamiento viscoso.

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono



83 Probeta siendo ensayada para módulo dinámico

El artículo 545 del PG-3 no marca limitación alguna para este ensayo ni para los módulos obtenidos de él, sin embargo, conocer el módulo elástico-viscoso de una mezcla asfáltica es crucial para realizar su diseño y modelizar su respuesta a las cargas, por lo que es interesante estudiar la incidencia de la adición de N.C. en este aspecto.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ENSAYO MARSHALL

El ya mencionado ensayo Marshall para dosificación de mezclas, se ha realizado con dos objetivos. El primer objetivo es el de determinar si existen mezclas con 1% y 2% de N.C. que cumplan con especificaciones señaladas por la norma.

El segundo objetivo es el de definir un contenido de ligante óptimo para estas mezclas, por tanto, se fabricarán probetas con 0%, 1% y 2% de N.C. y se obtendrá de ellas la densidad aparente, el contenido de huecos en áridos y el contenido de huecos en mezcla para obtener el valor de dosificación del betún.

La granulometría empleada para la mezcla se intentará ajustar al centro del huso marcado por el artículo 545 del PG-3 para una mezcla AUTL 8.

TIPO DE MEZCLA	ABERTURA DE LOS TAMICES. NORMA UNE-EN 933-2 (mm)							
	16	11,2	8	5,6	4	2	0,5	0,063
AUTL 5 ⁽²⁾			100	90-100	35-55	15-25	8-14	5-9
AUTL 8^(1,2)		100	90-100	40-65	25 - 40	15-30	10-18	5-9
AUTL11 ^(1,2,3)	100	90-100	65-85	50-76	33-55	20-35	10-23	5-11

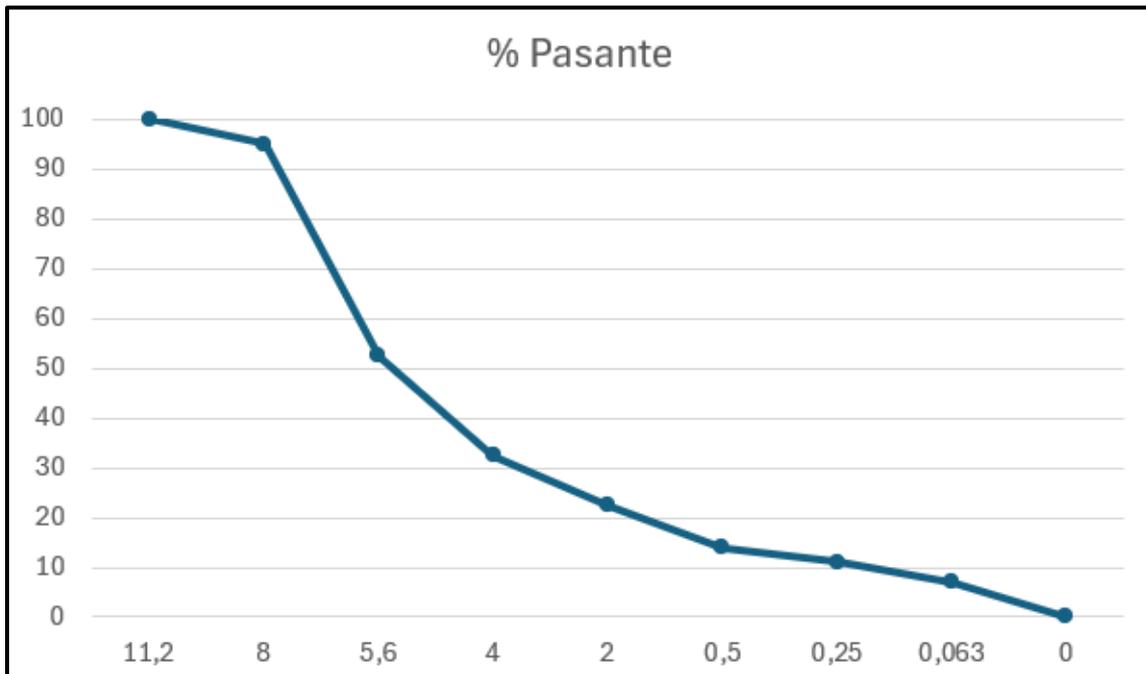
84 Huso granulométrico de AUTL 8

Obteniéndose la siguiente granulometría:

Rango de diámetros (mm)	8/11,2	5,6/8	4/5,6	2/4	0,5/2	0,25/0,5	0,063/0,25	0/0,063
Tipo de árido	Ofita	Ofita	Ofita	Caliza	Caliza	Caliza	Caliza	Caliza
Porcentaje	5	42,5	20	10	8,5	3	4	7
% Pasante	95	52,5	32,5	22,5	14	11	7	0

Tabla 1 Granulometría de la mezcla (sin N.C.)

Que aparece representada gráficamente a continuación:



85 Representación de la granulometría de la mezcla (Sin N.C.)

4.1.1. Probetas con 0% de N.C.

Para este caso, el ensayo de control, se preparan tres probetas para cada proporción de ligante estudiada, que en este caso son 5%, 5,5%, 6% y 6,5% de betún en mezcla.

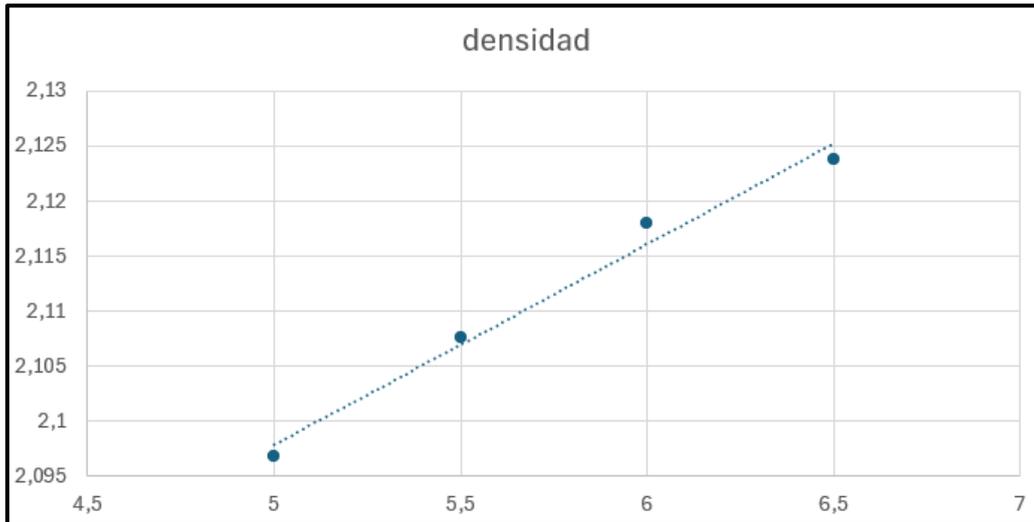
Para cada probeta se obtiene su peso, y altura, obteniendo una media para cada grupo de probetas, que comparten proporción de betún.

Se calcula su volumen aparente conociendo el diámetro y midiendo la altura, y desde estos datos se calcula mediante el método ya explicado la proporción de huecos en árido y huecos en mezcla.

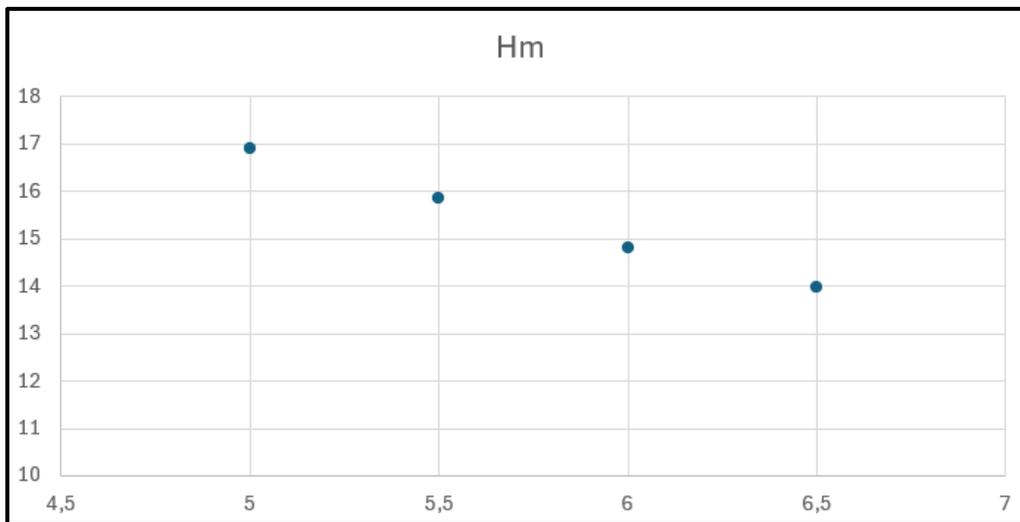
% Betún	5	5,5	6	6,5
Densidad	2,09681197	2,10764978	2,11801625	2,12373473
Hm	16,8962595	15,8478871	14,8121077	13,9585509
Ha	26,9001333	26,9090261	26,9381549	27,1305698

Tabla 2 Parámetros calculados en ensayo Marshall para probetas con 0% N.C.

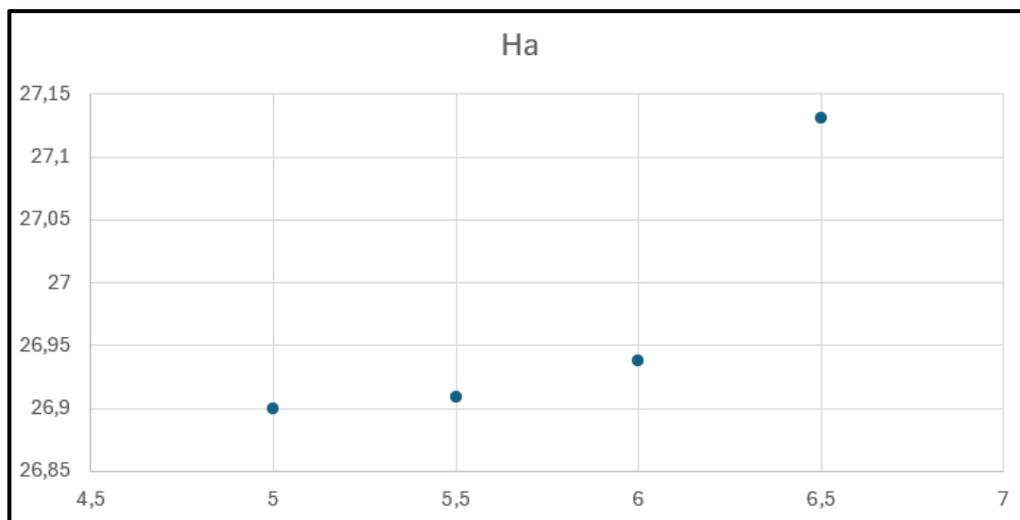
Es importante graficar estos parámetros para conocer sus tendencias, y estudiar con detalle la mezcla.



86 Densidad aparente mezcla con 0% N.C.



87 Huecos en mezcla con 0% N.C.



88 Huecos en áridos de mezcla con 0% N.C.

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono

Se observa que la densidad toma una trayectoria casi lineal, disminuyendo su pendiente en los valores superiores y que los huecos en áridos sufren un aumento moderado entre los dos últimos valores (es importante prestar atención a la escala del eje vertical en este caso). Sin embargo, la única restricción que la norma impone para mezclas AUTL es la siguiente, en referencia a los huecos en mezcla.

TABLA 545.10 – CONTENIDO DE HUECOS EN MEZCLA EN PROBETAS.	
NORMA UNE-EN 12697-30 (25 golpes por cara)	
TIPO DE MEZCLA	% DE HUECOS (Norma UNE-EN 12697-8)
AUTL	≥ 8 y ≤ 15

89 Restricción de Hm del artículo 545 del PG-3

Por tanto, las únicas proporciones de betún que cumplen esta restricción son el 6% y el 6,5%, las más altas utilizadas, pero no fuera de lo común en mezclas del tipo AUTL.

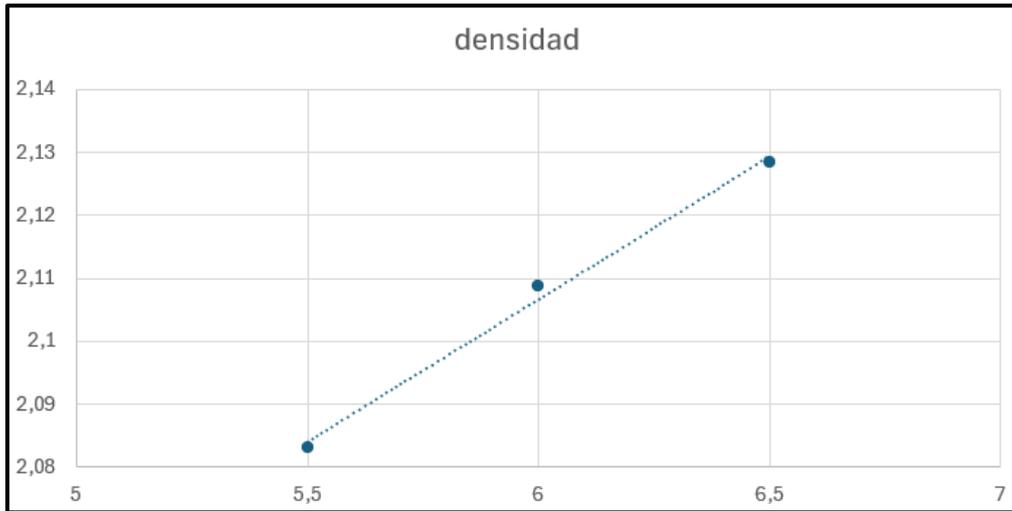
4.1.2. Probetas con 1% de N.C.

Para las probetas modificadas con un 1% de N.C. se han realizado una vez más tres probetas de cada proporción de betún estudiada, que en este caso son tres: 5,5%, 6% y 6,5%.

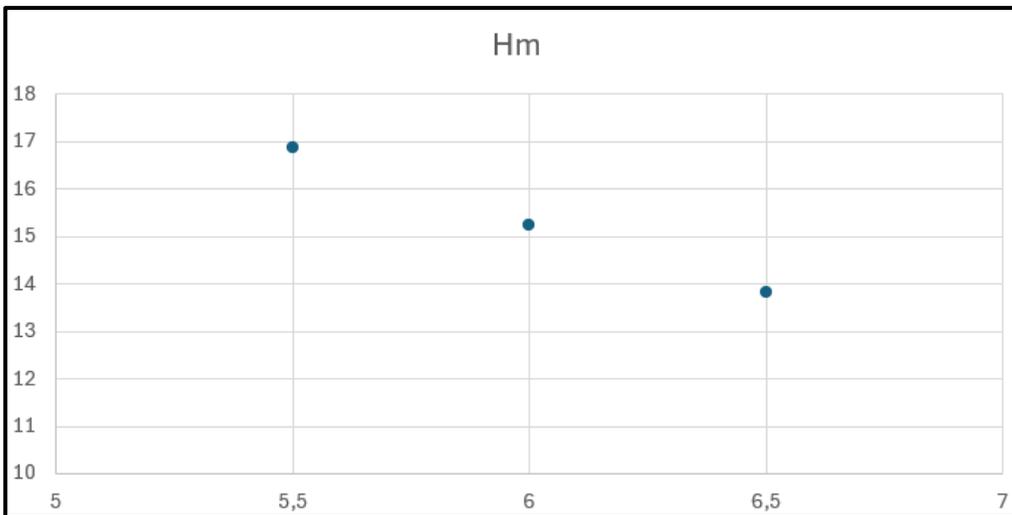
De nuevo, se calcula un valor medio para el peso y el volumen de cada grupo de probetas y se calculan con estos los parámetros a estudiar, a continuación se muestran y se grafican.

% Betún	5,5	6	6,5
densidad	2,08312631	2,10866793	2,12838274
Hm	16,8800168	15,2414503	13,8238003
Ha	27,8124545	27,3139766	27,0246475

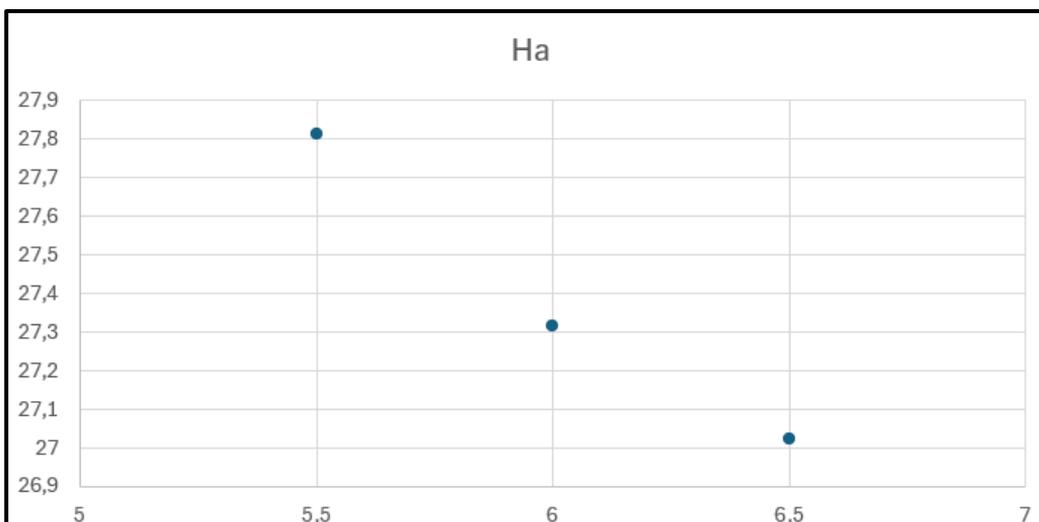
Tabla 3 Parámetros calculados en ensayo Marshall para probetas con 1% N.C.



90 Densidad aparente mezcla con 1% N.C.



91 Huecos en mezcla con 1% N.C.



92 Huecos en áridos de mezcla con 1% N.C.

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono

Los resultados observados siguen las mismas tendencias, a excepción de los huecos en áridos, que en este caso disminuyen en todo el rango observado. Esto quiere decir que a medida que aumenta la proporción de betún en la mezcla se obtiene una mayor compactación en los áridos, por lo que sería interesante realizar ensayos con mayor proporción de betún.

Por otro lado, también puede verse que la única proporción de ligante que cumple con la especificación establecida por el PG-3 es el 6%, que se encuentra por debajo del límite superior de 14% de huecos en mezcla.

4.1.3. Probetas con 2% de N.C.

En el caso de las probetas modificadas con el 2%, bajo las sospechas fundadas de que la proporción de ligante sería demasiado alta para hacer que la mezcla cumpliera la especificación de huecos sobre mezcla definida por el PG-3, solo se han realizado dos grupos de probetas, ambas con el 6,5% de betún en mezcla.

Para estos grupos de probetas, se ha calculado una vez más la altura y peso medios para calcular con estos los parámetros de interés, los cuales se muestran a continuación.

% Betún	6,5	6,5
Densidad	2,10982948	2,10879092
Hm	14,2285012	14,2707219
Ha	27,3142756	27,3500549

Tabla 4 Parámetros calculados en ensayo Marshall para probetas con 2% N.C

Tal y como se sospechaba, los huecos en mezcla para estos grupos de probetas superan en ambos casos el máximo establecido del 14%. Por lo tanto, estas probetas se testearán en el ensayo de sensibilidad al agua, pero con sendas proyecciones de abandonar más adelante la mezcla modificada con un 2% para utilizar únicamente la del 1%.

4.1.4. Discusión

En cuanto a los objetivos de este ensayo, se ha demostrado que es posible fabricar una mezcla modificada con N.C. que cumpla con las especificaciones impuestas por la norma en el ensayo Marshall.

El segundo objetivo, el de dosificar el betún para la mezcla, lleva a elegir el 6,5% ya que es el único porcentaje de este que cumple las especificaciones del PG-3 tanto para el 0% como para el 1% de N.C., es crucial que ambas mezclas tengan la misma proporción de ligante ya que este tiene un rol protagonista en el comportamiento de la mezcla, y si se fabricaran con porcentajes distintos de ligante los resultados comparativos serían poco valiosos para el estudio objetivo del N.C. en mezclas bituminosas.

4.2. ENSAYO DE SENSIBILIDAD AL AGUA

Para el ensayo de sensibilidad al agua, se llevarán a cabo tres tiradas de ocho probetas cada una, haciéndose una tirada con un 0% de N.C., con un 1% y con un 2%.

De cada grupo de ocho probetas con una misma proporción de N.C., cuatro se acondicionarán en agua y cuatro se acondicionarán en aire y se utilizarán los valores medios obtenidos para la tensión de rotura en cada subgrupo para comparar la diferencia de rendimiento entre unas y otras.

4.2.1. Probetas con 0% de N.C.

Las probetas de control, sin ningún porcentaje de N.C. muestran los siguientes resultados:

Tipo	Probeta	Carga rotura (Kg)	Resistencia tracción (Kg/cm ³)	Media
Aire	1	1016	149,51	141,41
	3	889	130,58	
	4	1005	146,89	
	7	948	140,20	
Agua	2	813	119,33	125,68
	5	830	122,23	
	6	900	132,57	
	8	887	129,52	

Tabla 5 Índice de resistencia al agua sin N.C.

Por tanto, este grupo de probetas obtiene un índice de resistencia a la tracción retenida del 89%, situándolo justo por debajo del límite establecido por la norma del 90%. Sin embargo, aun no cumpliendo los mínimos este grupo es perfectamente válido como grupo de control.

4.2.2. Probetas con 1% de N.C.

Para este primer grupo de probetas experimentales se obtienen estos resultados:

Tipo	Probeta	Carga rotura (Kg)	Resistencia tracción (Kg/cm3)	Media
Aire	1	986	149,02	148,83
	2	933	141,19	
	3	992	150,92	
	6	1008	154,88	
Agua	4	825	126,08	135,94
	5	927	142,37	
	7	898	136,69	
	8	919	139,80	

Tabla 6 Índice de resistencia al agua 1% de N.C.

En este caso, al añadir un 1% de N.C. a la mezcla, se obtiene una mejora en el ITSR, que lo coloca en 91%, superando esta vez lo establecido por la norma y lo obtenido en el grupo de control.

4.2.3. Probetas con 2% de N.C.

El segundo grupo de probetas experimentales consigue los siguientes resultados:

Tipo	Probeta	Carga rotura (Kg)	Resistencia tracción (Kg/cm3)	Media
Aire	1	860	129,41	136,43
	2	928	141,19	
	3	943	143,23	
	4	885	132,87	
Agua	5	749	112,65	113,12
	6	745	112,05	
	7	738	111,04	
	8	778	116,92	

Tabla 7 Índice de resistencia al agua 2% de N.C.

Para este caso, el ITRS obtenido es del 83%, lo cual sitúa a esta mezcla sustancialmente por debajo del mínimo establecido por la norma 545 del PG3 y también del resultado obtenido para el grupo de control.

4.2.4. Discusión

Los resultados obtenidos en este ensayo colocan en buen lugar a las probetas fabricadas con un 1% de N.C. ya que los datos obtenidos para estas no solo son mejores que los obtenidos para el grupo de control, sino que también hacen que la mezcla obtenida cumpla las especificaciones marcadas por la norma. Por tanto, la adición de N.C. a la mezcla en este caso se considera favorable.

Sin embargo, el caso es opuesto para las probetas fabricadas con el 2% de N.C. ya que empeoran el rendimiento de la mezcla en este aspecto.

Por tanto, se ha decidido continuar únicamente con la mezcla del 1% de N.C. para los siguientes ensayos, pues la de mayor contenido se juzga de NO adecuada.

4.3. ENSAYO CÁNTABRO DE PÉRDIDA DE PARTÍCULAS

El ensayo Cántabro de pérdida de partículas se utiliza para juzgar la capacidad de la mezcla de retener los áridos al desgastarse.

Para llevar a cabo este ensayo, se han sometido al mismo todas las probetas fabricadas para el ensayo Marshall con contenidos de N.C. de 0% y 1%, habiéndose descartado ya las del 2%.

Todas las probetas ensayadas se pesan antes y después de introducirse al tambor de los ángeles y se calcula el porcentaje perdido. Para cada proporción de betún y de N.C. se calculará un valor medio de pérdida de partículas.

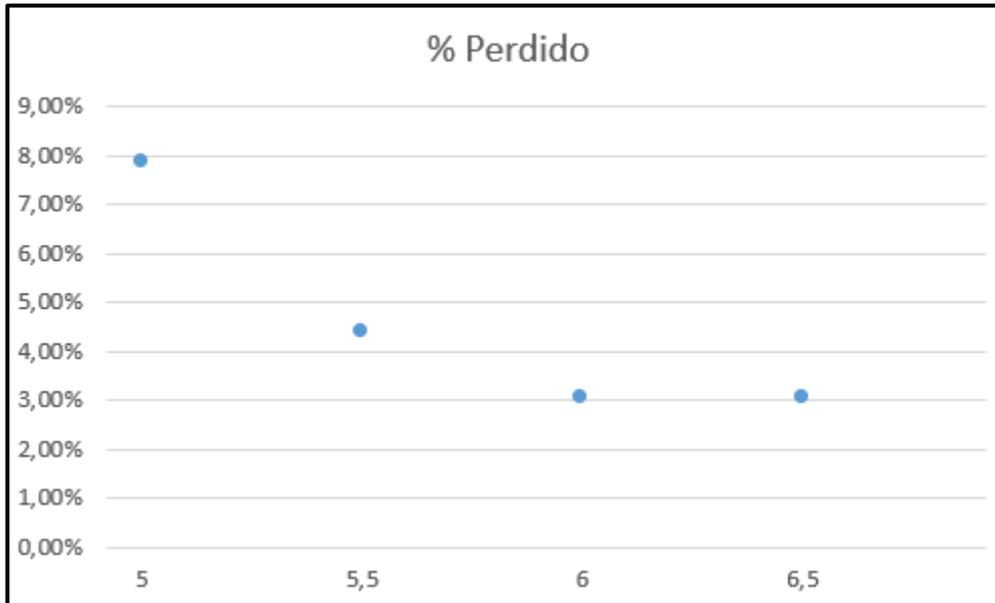
4.3.1. Probetas con 0% de N.C.

Los datos obtenidos para las probetas de referencia sin N.C. son los siguientes:

% Betún	5			5,5			6			6,5		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
probeta	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Inicial	731,9	730,9	732,2	734,7	735,8	734,1	736,2	737,6	736,4	737,9	738,3	739,5
Final	664,4	677,5	678,3	691	708,7	704	712,5	721,4	702,6	713,1	715,8	719,3
Perdido	67,5	53,4	53,9	43,7	27,1	30,1	23,7	16,2	33,8	24,8	22,5	20,2
% Perdido	9,22%	7,31%	7,36%	5,95%	3,68%	4,10%	3,22%	2,20%	4,59%	3,36%	3,05%	2,73%
Media	7,87%			4,39%			3,05%			3,02%		

Tabla 8 Peso perdido en ensayo Cántabro en probetas del 0%

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono



93 Peso perdido en ensayo Cántabro en probetas del 0%

Se aprecia que los valores obtenidos para estas probetas, en especial las que utilizan mayores proporciones de N.C. son muy buenos ya que las probetas no desprenden casi áridos, siendo el máximo impuesto por la norma el 20% incluso para las mayores categorías de tráfico, valor que queda muy alejado de los obtenidos en este caso.

También se observa que las probetas ensayadas no presentan rotura en ningún caso, lo que asegura la resistencia de la mezcla a roturas frágiles.



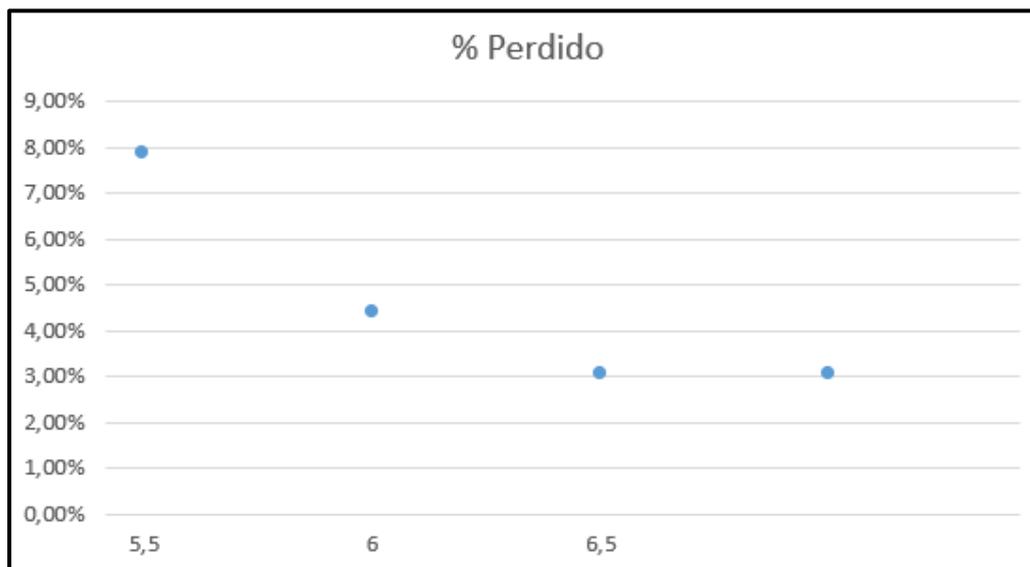
94 Probetas con 0% de N.C. tras ser ensayadas en el ensayo Cántabro

4.3.2. Probetas con 1% de N.C.

Los datos resultantes de las probetas con el 1% de N.C. son los mostrados a continuación:

% Betún	5,5			6			6,5		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Inicial	700,2	701,6	700,5	708,3	706,5	705,9	711,1	710,7	710,2
Final	662,5	657,1	636,4	678,9	670,4	671	677,3	671,7	690,4
Perdido	37,7	44,5	64,1	29,4	36,1	34,9	33,8	39	19,8
% Perdido	5,38%	6,34%	9,15%	4,15%	5,11%	4,94%	4,75%	5,49%	2,79%
Media	6,63%			4,70%			3,99%		

Tabla 9 Peso perdido en ensayo Cántabro en probetas del 1%



95 Peso perdido en ensayo Cántabro en probetas del 1%

Para estas probetas, pese a que se observa un aumento en el porcentaje de peso perdido, este es circunstancial y se sigue obteniendo valores muy favorables y lejanos del máximo teórico del 20-25%.

En este caso tampoco se observa rotura en las probetas ensayadas, asegurando una vez más su resistencia a la rotura frágil.



96 Probetas con 1% de N.C. tras ser ensayadas en el ensayo Cántabro

4.3.3. Discusión

En este caso, la sustitución parcial del filler por N.C. tiene un impacto ligeramente negativo en el rendimiento de la mezcla, sin embargo, este no se considera apreciable puesto que los resultados obtenidos son muy favorables igualmente.

Tampoco aparecen fracturas de ningún tipo en las mezclas, por lo que no queda comprometido su rendimiento en este aspecto tampoco.

Por lo tanto, las mezclas con N.C. se juzgan favorables en este aspecto.

4.4. ENSAYO DE PÉNDULO TRL

En este ensayo se probarán dos probetas del 0% y otras dos del 1%, en todos los casos se harán cinco mediciones con la probeta seca y otras cinco con la probeta húmeda, obteniendo un valor medio para cada probeta en cada caso.

El objetivo es medir tanto la resistencia al deslizamiento de cada probeta como la disminución de esta debido a la presencia de agua en su superficie.

4.4.1. Probetas con 0% de N.C.

Los valores obtenidos para estas probetas son los mostrados en las siguientes tablas:

0% PROBETA 1

Medidas en seco:	78
	80
	80
	80
	80
Media:	79,6

Medidas en húmedo:	60
T ^a : 20,4°C	61
	60
	59
	60
Media:	60

Tabla 10 Ensayo de péndulo, probeta 1 - 0% N.C.

0% PROBETA 2

Medidas en seco:	84
	85
	85
	85
	85
Media:	84,8

Medidas en húmedo:	65
T ^a : 23°C	64
	64
	62
	64
Media:	63,8

Tabla 11 Ensayo de péndulo, probeta 2 - 0% N.C.

4.4.2. Probetas con 1% de N.C.

Los valores obtenidos para estas probetas son los mostrados en las siguientes tablas:

1% PROBETA 1

Medidas en seco:	90
	90
	90
	90
	91
Media:	90,2

Medidas en húmedo:	73
T ^a : 23,5°C	70
	70
	70
	70
Media:	70,6

Tabla 12 Ensayo de péndulo, probeta 1 - 1% N.C.

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono

1% PROBETA 2

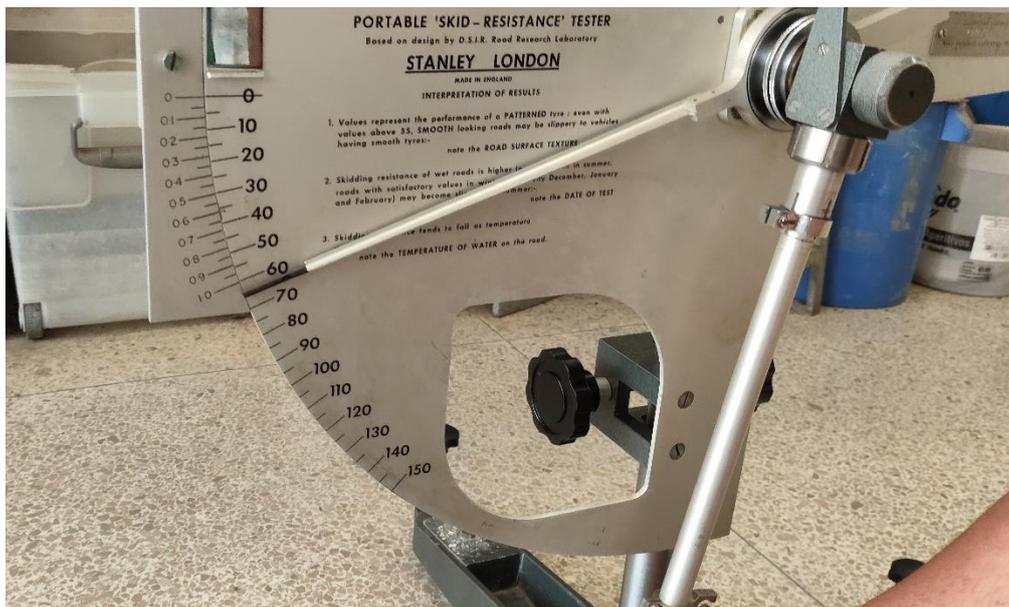
Medidas en seco:	93	Medidas en húmedo:	65
	92	T ^a : 23,5°C	65
	91		65
	91		65
	91		65
Media:	91,6	Media:	65

Tabla 13 Ensayo de péndulo, probeta 2 - 1% N.C.

4.4.3. Discusión

Se observa que en todos los casos la media obtenida cumple con el mínimo establecido en el artículo 545 del PG-3 sobre mezclas ultradelgadas de 60 puntos en este ensayo.

La adición de N.C. en este caso, se juzga de beneficiosa, pues la resistencia al deslizamiento es superior en todos los casos medidos, mejorando de esta manera el contacto asfalto-neumático en una situación real de uso en carreteras.



97 Medición obtenida en ensayo de péndulo TRL

También se observa una clara mejora en el rendimiento que las probetas modificadas con N.C. muestran en este ensayo, tanto en situación seca como en húmeda. Las probetas modificadas también muestran un buen comportamiento frente a la situación húmeda, ya que muestran una disminución de su coeficiente de rozamiento muy similar a las probetas no modificadas, siendo esta disminución del 25,54% en las probetas del 1% de N.C., frente al 24,69% en las probetas de referencia.

En cuanto al aumento del coeficiente de rozamiento hallado entre las probetas con 1% y 0% de N.C., se observa que este es de un 10,69% en las probetas secas y de un 9,45% en las húmedas. Por tanto, la adición de N.C. a la mezcla da resultados muy favorables en este ensayo.

Sin embargo, al ponerse en servicio la mezcla, se espera que los valores de coeficiente de rozamiento se ecualicen en ambos casos y la diferencia disminuya, puesto que se pulimentará el betún de la superficie exponiendo la microtextura de los áridos que es idéntica en ambos casos.

4.5. CÍRCULO DE ARENA

El ensayo de círculo de arena se realizará sobre dos probetas planas de referencia sin N.C. y en otras dos probetas planas con 1% de N.C., en todos los casos se utilizará un volumen de 25 cm³ de arena.

Tras el extendido de la arena sobre la probeta, se realizarán sobre el círculo cuatro mediciones del diámetro, tratando de capturar la forma obtenida para que la media de las mediciones sea representativa del círculo.

4.5.1. Probetas con 0% de N.C.

Los resultados obtenidos en estas probetas son los siguientes:

0% PROBETA 1		0% PROBETA 2	
DIAMETROS:	189	DIAMETROS:	182
	175		177
	183		170
	177		185
MEDIA:	181	MEDIA:	178,5
Heq	0,971612	Heq	0,999019

Tabla 14 Mediciones círculo de arena 0% N.C.

Se aprecia que los valores obtenidos son muy parecidos y se encuentran justo por debajo del mínimo establecido por el artículo 545 del PG-3 de 1mm, sin embargo, las muestras son perfectamente válidas como referencia para la comparación con la mezcla modificada.

4.5.2. Probetas con 1% de N.C.

Los resultados obtenidos para las probetas modificadas son los siguientes:

1% PROBETA 1

DIAMETROS:	213
	197
	181
	198
MEDIA:	197,25
Heq	0,818118

1% PROBETA 2

DIAMETROS:	199
	200
	200
	195
MEDIA:	198,5
Heq	0,807847

Tabla 15 Mediciones círculo de arena 1% N.C.

De nuevo, obtenemos valores inferiores a los exigidos por la norma para la profundidad media.

4.5.3. Discusión

Se observa que la presencia de N.C. en la mezcla conlleva una ligera disminución en la profundidad media de la textura superficial medida, haciéndola menos deseable en este aspecto.

Sin embargo, esta disminución puede deberse a unos defectos que tienden a aparecer en estas probetas planas modificadas. Estos defectos se tratan de apelmazamientos de N.C. con finos de la mezcla, creando zonas de la probeta con baja macrotextura superficial afectando así a las medidas realizadas y la macrotextura registrada.



98 Apelmazamiento de N.C. antes de la extensión de arena



99 Apelmazamiento de N.C. después de la extensión de arena

Por tanto, este ensayo no es muy conclusivo, y se espera al escáner mediante barrido láser para tomar conclusiones sobre la macrotextura de las probetas modificadas con N.C.

4.6. ESCÁNER LÁSER

El ensayo de escáner mediante barrido láser, también se realiza sobre dos probetas de referencia sin N.C. y dos probetas modificadas con el 1% de N.C.

Estas probetas ensayadas, son del tipo plano, iguales a las ensayadas en el círculo de arena, y el parámetro estudiado es, igual que en éste, la profundidad media de huecos, que es representativa de la macrotextura superficial de la probeta.

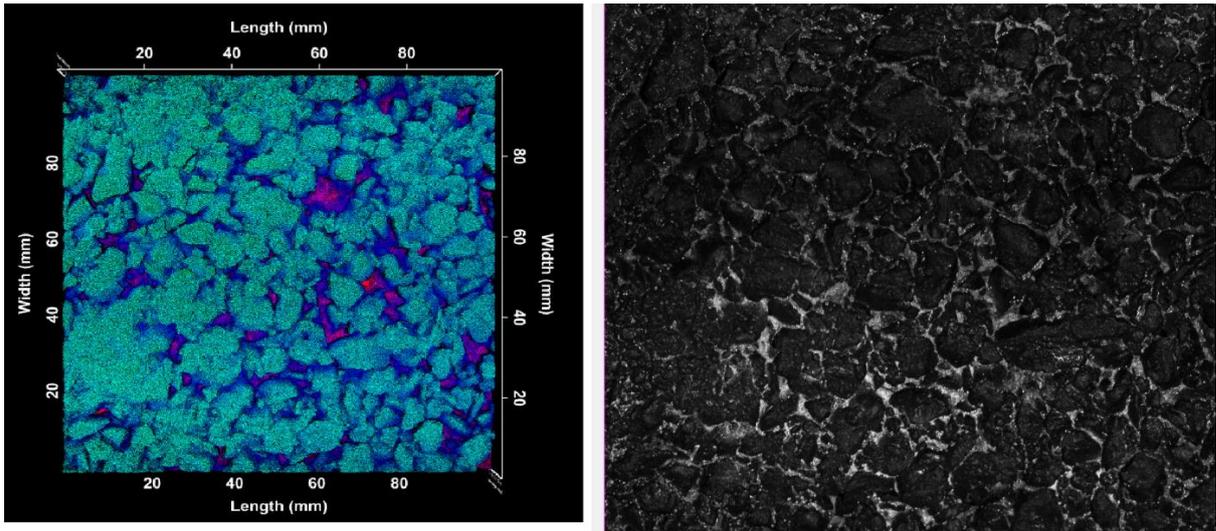
Estas probetas deben ser “ensuciadas” con filler antes del ensayo para evitar brillos en la superficie que distorsionen las medidas obtenidas mediante el láser.

El escáner hará sobre cada probeta barridos en los que se muestrearán la profundidad de la superficie en numerosos puntos. Tras terminar el barrido sobre una probeta, estos datos se procesarán para obtener la profundidad media de huecos en cada caso entre otros muchos parámetros que, en este caso, no son de interés.

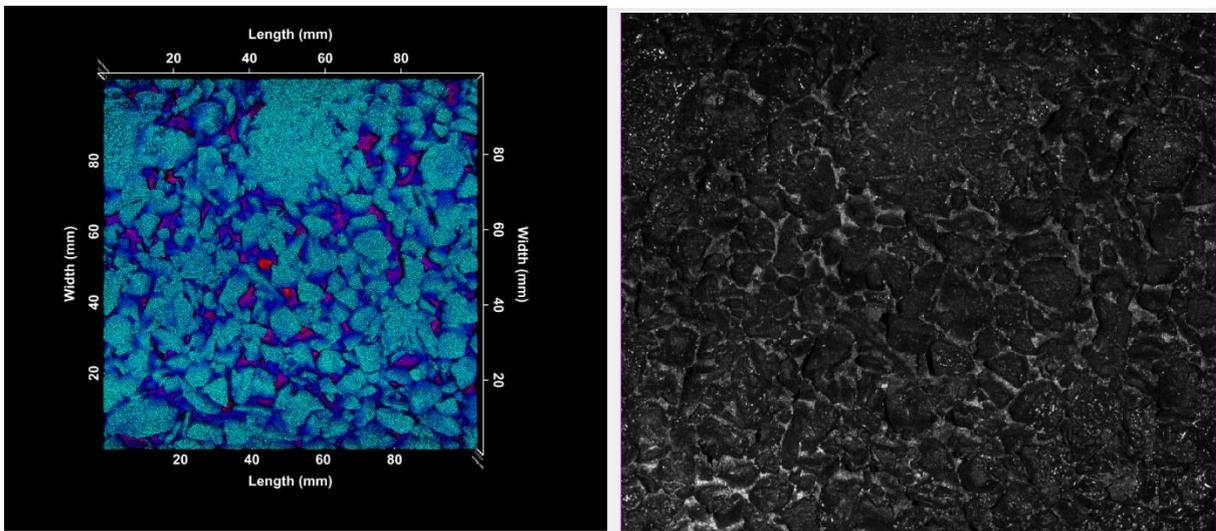
4.6.1. Probetas con 0% de N.C.

A continuación, se muestran los modelos 3D generados a partir de los escaneos láser de estas probetas, acompañados de las fotos tomadas por el escáner de las mismas probetas.

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono



100 Escáner láser en probeta n°1 con 0% N.C.



101 Escáner láser en probeta n°2 con 0% N.C.

Los datos obtenidos para el MTD en milímetros para estas probetas son:

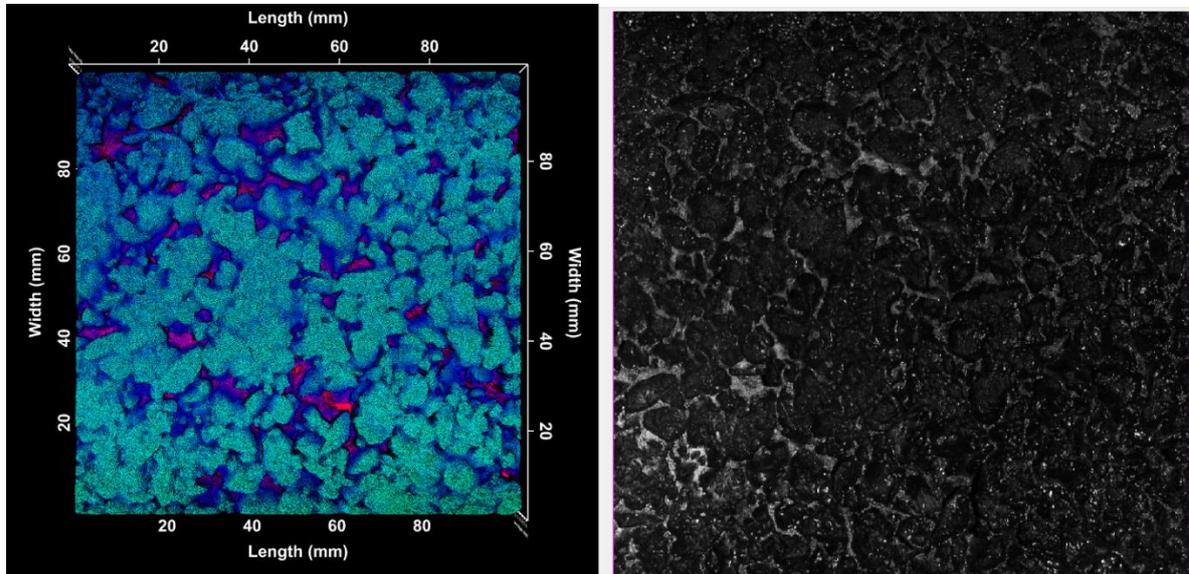
Probeta n°1	Probeta n°2
0,917	0,922

Tabla 16 Valores de MTD para probetas 0% obtenidas mediante escáner láser.

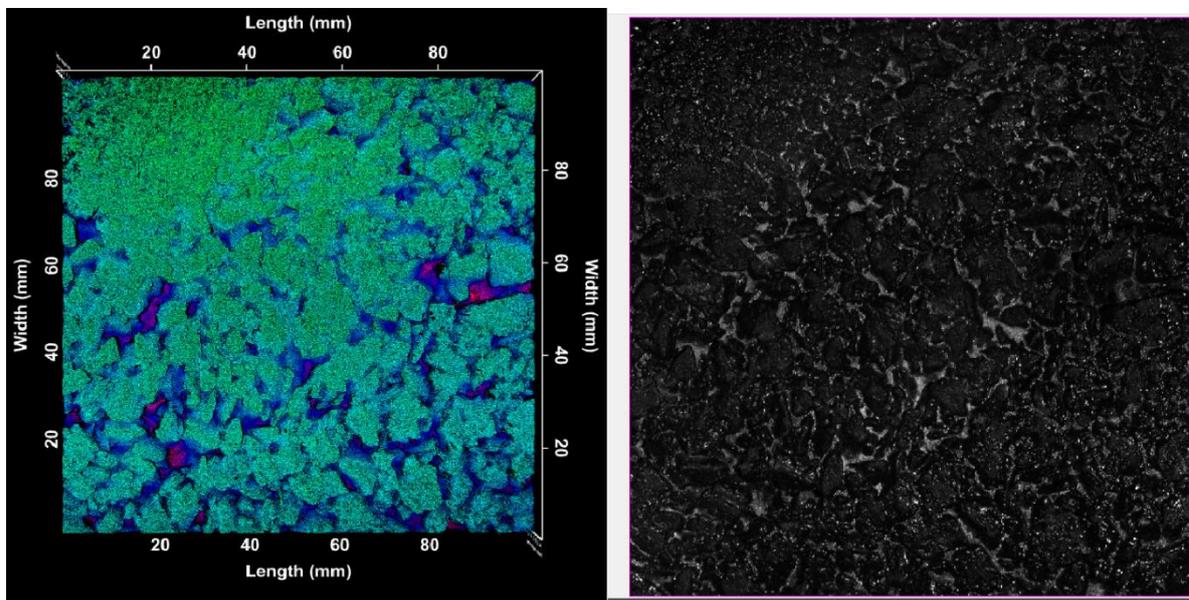
Los valores obtenidos son muy parecidos entre sí, y en este caso superan sin problema el valor mínimo establecido por el artículo 545 del PG-3 sobre mezclas ultradelgadas de 0,7mm para este parámetro en este ensayo.

4.6.2. Probetas con 1% e N.C.

A continuación, se muestran los modelos 3D generados a partir de los escaneos láser de las probetas modificadas con N.C., junto a las fotos tomadas por el escáner de las mismas probetas.



102 Escáner láser en probeta nº1 con 1% N.C.



103 Escáner láser en probeta nº2 con 1% N.C.

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono

Estas probetas muestran los siguientes valores de MTD en milímetros:

Probeta nº1	Probeta nº2
0,904	0,968

Tabla 17 Valores de MTD para probetas 1% obtenidas mediante escáner láser.

De nuevo, se obtienen valores similares entre sí, y superiores al mínimo establecido por la norma de 0,7mm.

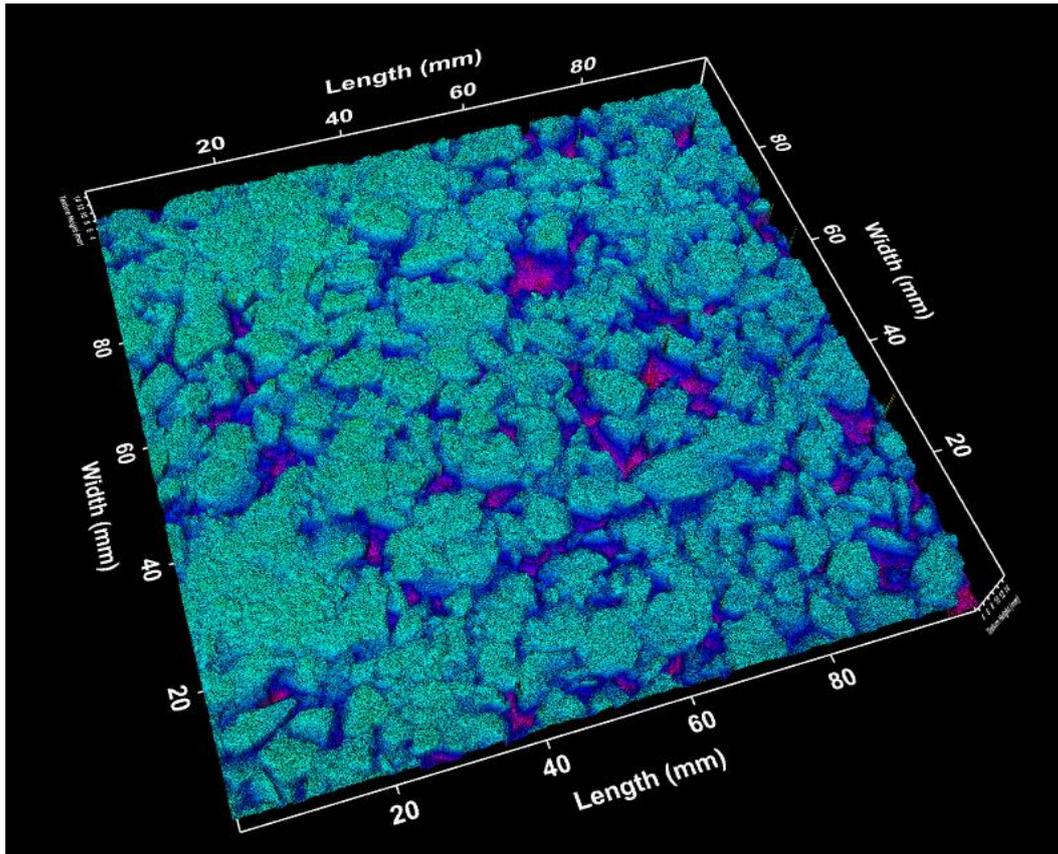
4.6.3. Discusión

Al analizar la macrotextura superficial de las probetas mediante este ensayo, mucho más preciso y riguroso que su contraparte el círculo de arena, se observan principalmente tres puntos:

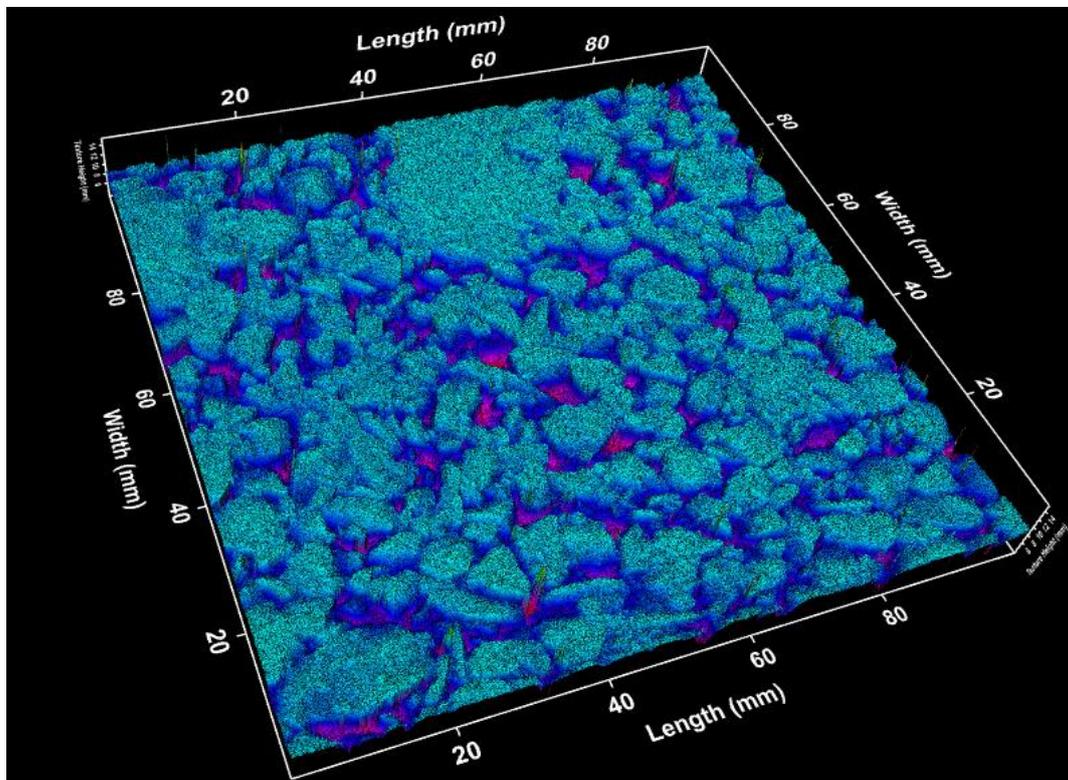
- Los valores obtenidos en todos los casos para el MTD superan sin problema los mínimos establecidos por el artículo 545 del PG-3 de 0,7mm para este valor, haciéndolas aptas para su uso.
- Las muestras modificadas con N.C. muestran un comportamiento marginalmente mejor, concluyendo que este no aporta de manera apreciable en la macrotextura superficial.
- Los apelmazamientos causados por la presencia de N.C. en la mezcla modificada aparecen, pero impactan de manera negativa la macrotextura superficial de las probetas.

Por tanto, la mezcla modificada con N.C. se juzga de indiferente respecto a la de referencia, obteniendo ambas resultados favorables en este ensayo.

Por otro lado, este ensayo es de gran utilidad para crear modelos en 3 dimensiones de las superficies ensayadas, permitiendo mayores inspecciones y el estudio de otros parámetros que pudieran resultar útiles en su caracterización. A continuación, se muestran imágenes de los distintos modelos generados para las superficies analizadas.

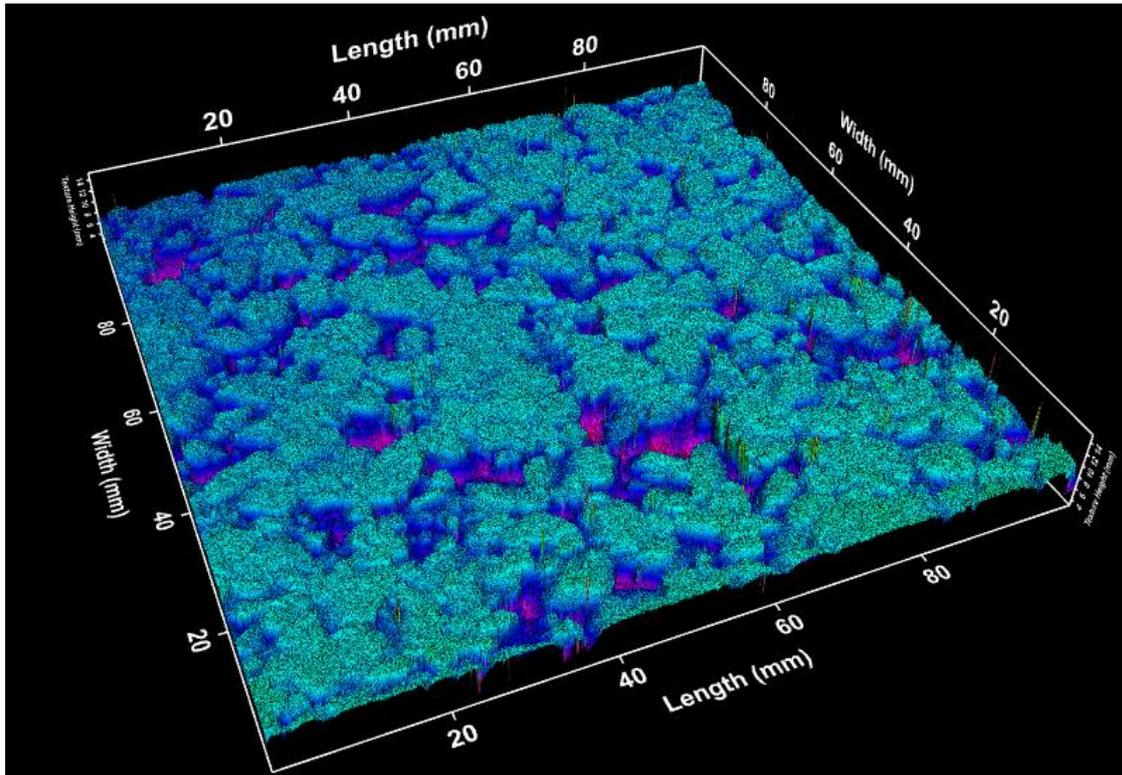


104 Modelo 3D de la probeta n°1 con 0% de N.C.

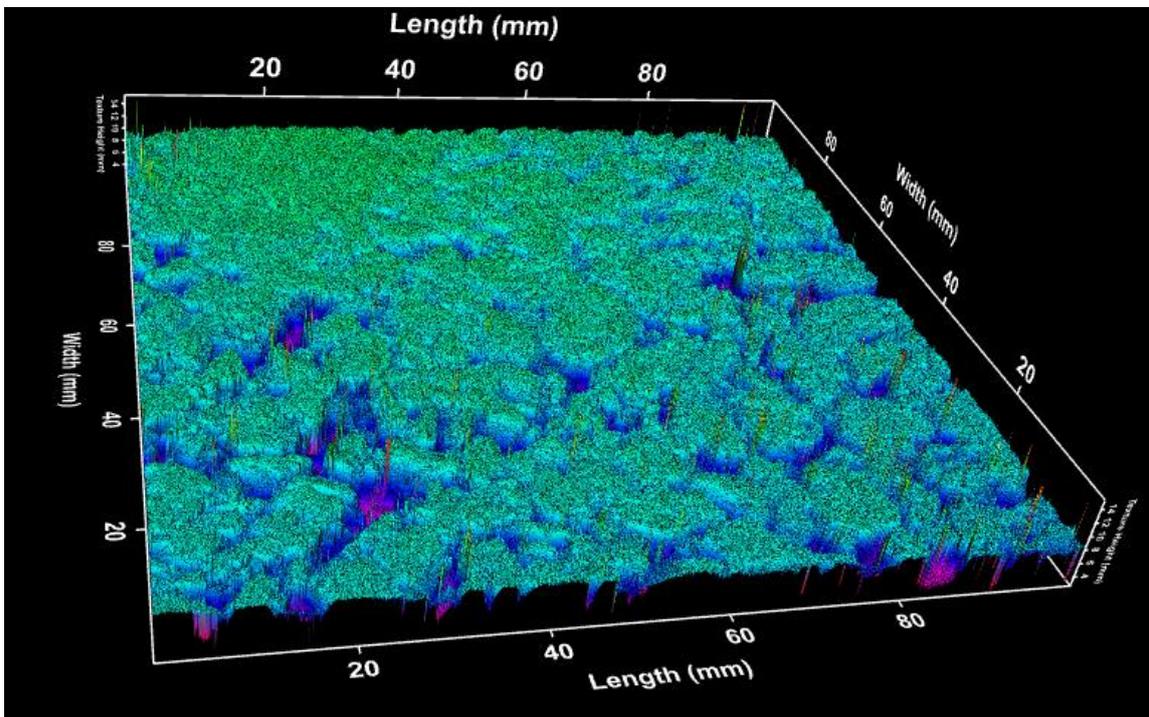


105 Modelo 3D de la probeta n°2 con 0% de N.C.

Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono



106 Modelo 3D de la probeta n°1 con 1% de N.C.



107 Modelo 3D de la probeta n°2 con 1% de N.C.

4.7. ENSAYO DE ABSORCIÓN ACÚSTICA

En el ensayo de absorción acústica mediante tubo de impedancia, se han testado dos probetas tipo Marshall, una con 0% de N.C. como referencia y una con 1% de N.C.

El parámetro estudiado en este ensayo es el coeficiente de absorción acústica (α) en la probeta. Este valor muestra la proporción de energía sonora incidente que es absorbida por el material al darse la reflexión.

El valor de α varía entre 0 y 1, donde 0 significa que el material no absorbe sonido y refleja toda la energía incidente, y 1 indica que el material absorbe completamente la energía sonora sin darse reflexión.

Este coeficiente de reflexión se estudiará en frecuencias entre 100Hz y 1600Hz

4.7.1. Probetas con 0% de N.C.

Resultados obtenidos para probetas de referencia.

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400
probeta0%	0,0060	0,0030	0,0557	0,0691	0,0593	0,0814	0,1426

Freq. (Hz)	500	630	800	1000	1250	1600
probeta0%	0,2029	0,1666	0,1787	0,1271	0,0909	0,0950

Tabla 18 Coeficientes de absorción acústica en diferentes bandas para probetas 0%.

4.7.2. Probetas con 1% de N.C.

Resultados obtenidos para probetas de modificadas.

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400
probeta1%	0,0929	0,0309	0,0506	0,0682	0,0645	0,0936	0,1544

Freq. (Hz)	500	630	800	1000	1250	1600
probeta1%	0,2219	0,2140	0,1688	0,1171	0,1055	0,1287

Tabla 19 Coeficientes de absorción acústica en diferentes bandas para probetas 1%.

4.7.3. Discusión

Se muestra la comparativa con los valores obtenidos para ambas probetas, junto con el porcentaje de cambio recogido para cada banda.

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400
probeta0%	0,0060	0,0030	0,0557	0,0691	0,0593	0,0814	0,1426
probeta1%	0,0929	0,0309	0,0506	0,0682	0,0645	0,0936	0,1544
Aumento (%)	1434,27%	931,03%	-9,14%	-1,21%	8,79%	14,94%	8,24%

Freq. (Hz)	500	630	800	1000	1250	1600
probeta0%	0,2028	0,1666	0,1787	0,1271	0,0909	0,0950
probeta1%	0,2219	0,2140	0,1688	0,1171	0,1055	0,1287
Aumento (%)	9,38%	28,47%	-5,57%	-7,83%	15,99%	35,50%

Tabla 20 Coeficientes de absorción acústica y comparativa

Como se puede observar, existe un aumento de un orden de magnitud de la absorción acústica en las bandas de frecuencia más bajas. Este cambio, sin embargo, no es tan significativo como pudiera parecer, ya que se siguen obteniendo valores inferiores a las bandas centrales.

En estas bandas centrales, por su lado, se observa un aumento ligero, pero relativamente consistente en toda esta zona central del espectro.

En las frecuencias más altas vuelve a registrarse un despunte positivo en la absorción acústica favoreciendo una vez más a la mezcla modificada.

Por consiguiente, pese a no existir en el artículo 545 del PG-3 sobre mezclas ultradelgadas ninguna limitación o exigencia respecto a la fonoabsorbencia de la mezcla, la sustitución parcial del filler natural por N.C. en la mezcla se juzga favorable en este aspecto ya que aumenta el rango de frecuencias en las que la mezcla asfáltica es capaz de absorber sonido y por tanto reducir el emitido.

4.8. ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO

El ensayo de módulo dinámico se realiza para conocer la respuesta tanto elástica como viscosa de una mezcla bituminosa. Para este caso, se han fabricado cuatro probetas serradas de referencia, sin N.C., y otras cuatro modificadas con un 1% de N.C.

Estas probetas han sido ensayadas por separado, y se trabajará con los valores medios obtenidos para cada grupo, las frecuencias utilizadas son (en Hercios): 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 10.

Se generan tablas y gráficas utilizando todos los valores, pero se prestará especial atención a los resultados obtenidos para 10 y 30Hz.

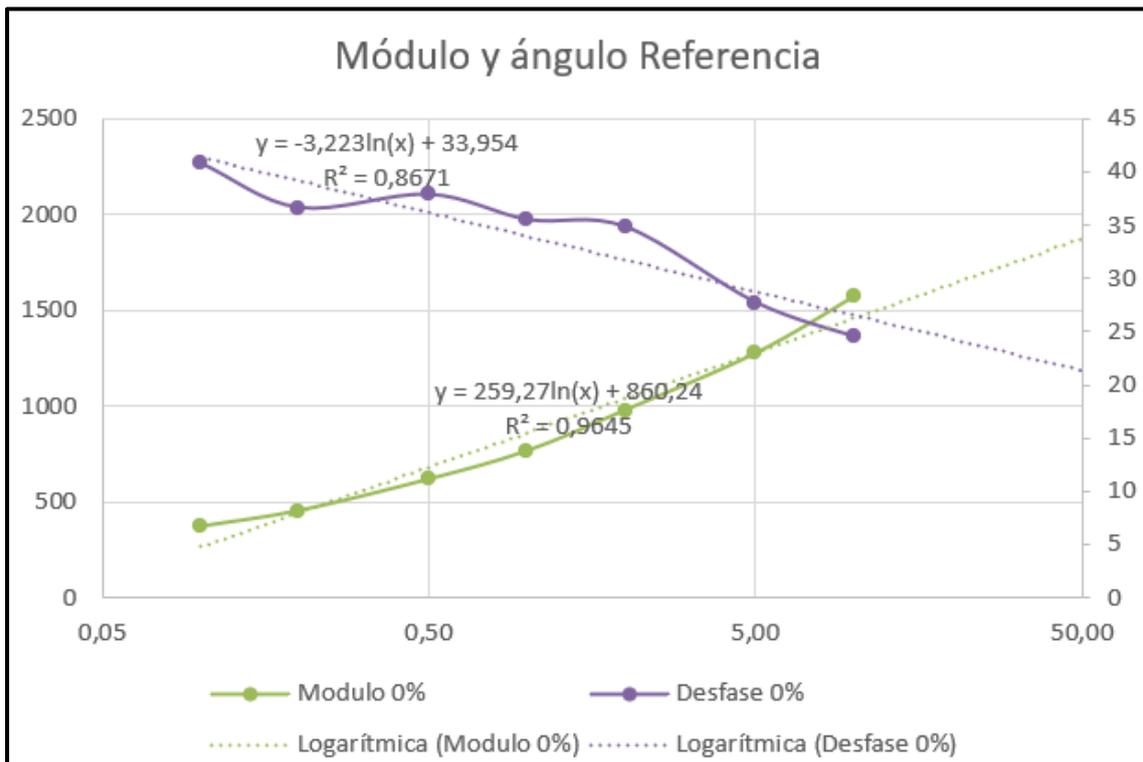
4.8.1. Probetas con 0% de N.C.

Los valores obtenidos para el módulo dinámico y el ángulo de desfase en las probetas de referencia son los siguientes:

Freq (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10
Módulo complejo (Mpa)	368,70	451,44	615,72	763,99	977,41	1274,01	1570,40
Angulo fase (°)	40,78	36,60	37,85	35,48	34,79	27,69	24,49

Tabla 21 Resultados módulos dinámicos para probetas 0%

Que gráficamente son:



108 Resultados módulos dinámicos para probetas 0%

Ambas curvas siguen la tendencia esperada, aumentando el módulo dinámico y disminuyendo el ángulo de desfase a medida que aumenta la frecuencia de la fuerza aplicada, esta tendencia se ha aproximado con una regresión logarítmica, que aparece lineal en el gráfico por la escala logarítmica del eje X.

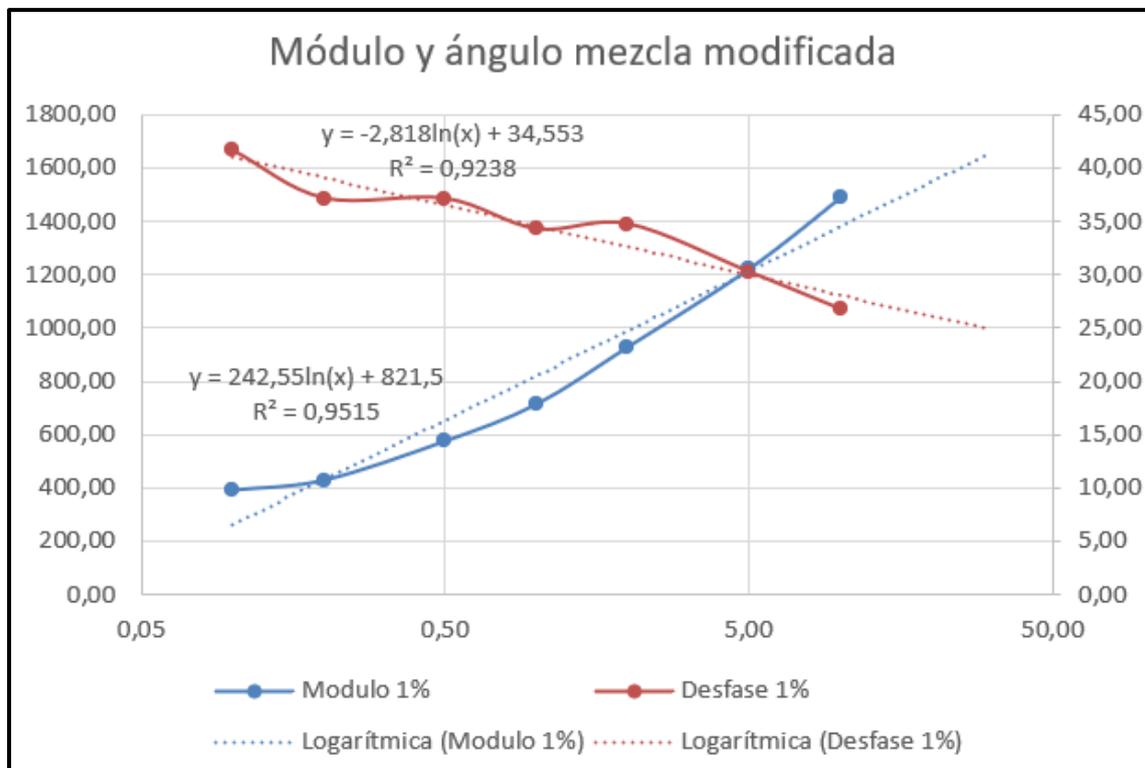
4.8.2. Probetas con 1% de N.C.

Los valores obtenidos para el módulo dinámico y el ángulo de desfase en las probetas modificadas son los siguientes:

Freq (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10
Módulo complejo (Mpa)	390,37	427,70	574,59	713,79	929,55	1222,89	1491,60
Angulo fase (°)	41,66	37,15	37,12	34,26	34,73	30,23	26,72

Tabla 22 Resultados módulos dinámicos para probetas 1%

Representados gráficamente aparecen de esta manera:

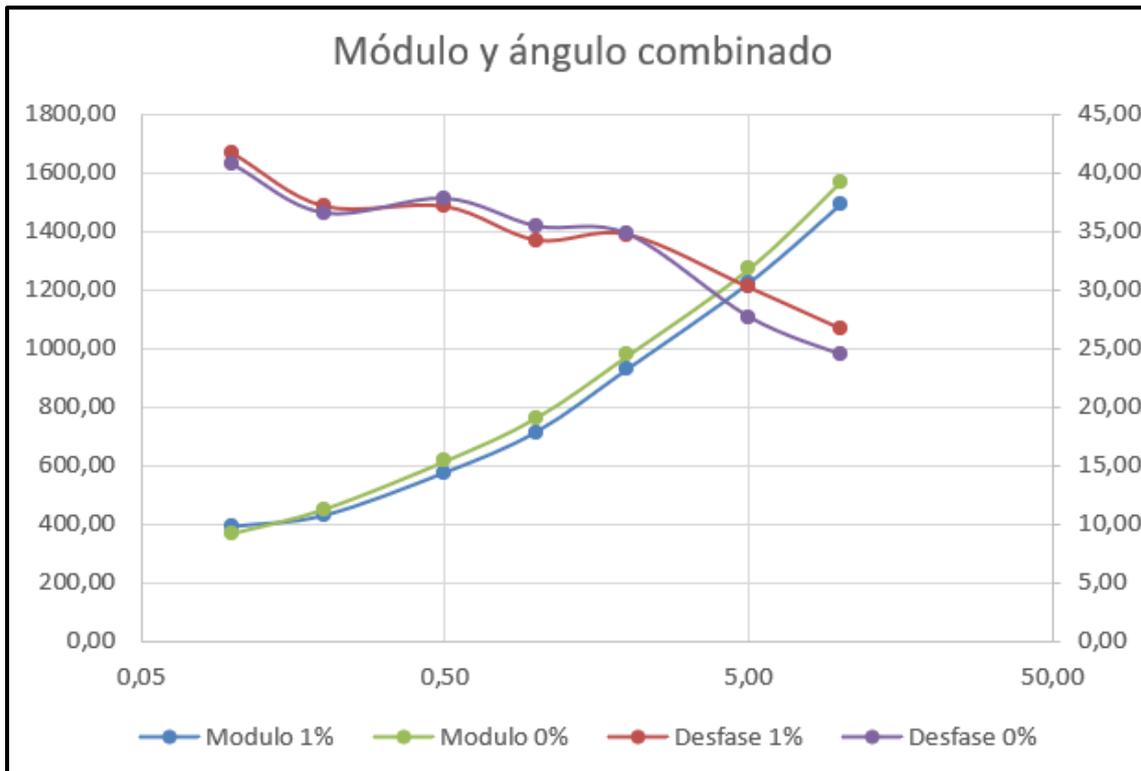


109 Resultados módulos dinámicos para probetas 1%

En este segundo caso, ambas tendencias se aprecian de manera clara, con el módulo de manera ascendente y el ángulo de desfase descendente, de nuevo se aproximan estas curvas con funciones polinómicas.

4.8.3. Discusión

Se muestra una gráfica conteniendo módulo y ángulo de desfase de ambos grupos de probetas.



110 Módulo dinámico y desfase para ambos grupos de probetas

Se aprecia que los dos pares de curvas son muy similares entre sí, produciéndose un solape casi completo de estas curvas en todo su recorrido.

Los valores para las frecuencias de interés de 10Hz y 30Hz (que ha tenido que ser extrapolada), se muestran a continuación.

	10Hz	30Hz
Mezcla 0%	1570,40	1742.06
Mezcla 1%	1491,60	1646.46

Tabla 23 Módulo dinámico para ambas mezclas en 10 y 30Hz

En otros casos en los que se ha estudiado la adición de N.C. en mezclas asfálticas, este producía un aumento de la rigidez y la elasticidad apreciable de la mezcla, lo cual no ocurre en este caso. Esto se achaca a el alto contenido de betún en una mezcla AUTL, que puede causar como ya se ha visto, apelmazamientos de N.C. que evitan que este cumpla su función rigidizadora.

Sin embargo, tampoco se observan efectos adversos por la adición de este material, por lo que se puede concluir que la adición de N.C. no es negativa en el aspecto de su comportamiento elástico-viscoso.

5. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se pueden derivar del estudio realizado son las siguientes, que se comentan más en profundidad a continuación:

- La sustitución de un 1% del filler natural por subproducto de negro de carbono en mezclas bituminosas será beneficiosa desde el punto de vista ambiental, disminuyendo la huella de carbono del N.C. como subproducto, y de la propia mezcla bituminosa al reducirse la necesidad de filler natural utilizado.
- La sustitución de un 1% del filler natural calizo por una cantidad igual de N.C. sobre el peso de la mezcla, a una mezcla AUTL8 supone una mejora sustancial en la eficacia de la mezcla para los ensayos de: Sensibilidad al agua, ensayo de péndulo TRL, textura superficial mediante escáner laser y fonoabsorbencia.
- La adición del N.C. no supone una pérdida de rendimiento sustancial en ningún ensayo realizado.
- La mezcla AUTL8 modificada con N.C. no presenta la modificación de sus propiedades elástico-viscosas que cabe de esperar (basado en la experiencia con otras mezclas) de una mezcla modificada con este material.

En primer lugar, se ha dado con una mezcla modificada con subproducto de negro de carbono que disminuye el coste medioambiental respecto a la mezcla AUTL 8 sin modificar, ya que se reduce su huella de carbono.

Esta disminución de la huella de carbono sería beneficiosa en primer lugar para la sociedad y en segundo lugar para la empresa que utilizara este tipo de mezclas, ya que hoy en día es común que las licitaciones ofrezcan mejores puntuaciones a los proyectos que tengan buenas consideraciones ambientales en sus propuestas.

Este hecho también supondrá beneficios económicos, ya que el productor del subproducto no estará obligado a pagar por su gestión ambiental y el fabricante de la mezcla reducirá su uso de filler natural, que supone una parte considerable de el coste de la mezcla.

Respecto al segundo punto, es importante recalcar el uso en obra civil que se le da a una mezcla del tipo AUTL, que es la de crear una capa ultradelgada de rodadura en la superficie de carreteras en su rehabilitación, para asegurar una buena adherencia de los vehículos al pavimento.

Por tanto, un buen rendimiento en los ensayos de sensibilidad al agua (asegurando una buena longevidad), ensayo de péndulo TRL y textura superficial (asegurando buena adherencia y resistencia al deslizamiento) y fonoabsorbencia (potencialmente disminuyendo niveles de ruido en zonas sensibles), se alinean perfectamente con los objetivos de estas mezclas en proyectos de obra civil.

Por lo cual, aumenta el número de casos en los que esta mezcla será útil o competitiva respecto a otros tipos de mezclas.

Por otro lado, no se ha detectado que la adición del 1% de N.C. haya supuesto un impacto negativo para el rendimiento de la mezcla en ninguno de los ensayos

realizados, por lo que es seguro asumir que esta proporción no compromete la utilidad de la mezcla en ningún aspecto.

En cuanto a las propiedades elástico-viscosas que presenta esta mezcla modificada con N.C., esta falta de cambio percibida se achaca al alto porcentaje de betún que se utiliza en las mezclas tipo AUTL, ya que esta puede no permitir la dispersión total del N.C. y crear apelmazamientos.

Sin embargo, si se continuara con la investigación en el futuro, sería interesante desde el punto de vista científico ensayar con probetas con mayores proporciones de betún (7%, 7,5%) para obtener valores en el ensayo Marshall más cercanos al 10% de huecos en mezcla en lugar de cercanos a 14% como han resultado en este caso.

Esto también permitiría estudiar tanto proporciones mayores de N.C. como afinar más las proporciones de este material introducido en las mezclas, utilizando, por ejemplo, un 1,5%, 2% y 2,5% de N.C. sobre el peso de la mezcla. De esta manera pudiendo generar más datos para el estudio del impacto de este material sobre las propiedades de la mezcla.

Estas nuevas mezclas con altas proporciones de betún, salvo que presentaran unas propiedades maravillosas, no tendrían grandes salidas en el mundo de la obra civil, ya que una mezcla con 7,5%-8% de betún sobre mezcla sería demasiado costosa y podría tener problemas de escurrimiento de ligante, haciéndola contraproducente.

En conclusión, la sustitución de un 1% del filler natural de una mezcla AUTL8 por una proporción igual de subproducto de negro de carbono resulta en una mezcla modificada que presenta unas buenas propiedades y resulta interesante su investigación para aplicación en obra civil tanto desde el punto de vista técnico, económico y medioambiental.

- [1] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2022, marzo). *Artículo 545. Mezclas bituminosas tipo AUTL para capas de rodadura* (PG-3). <https://www.mitma.gob.es/carreteras/servicios/normativa/pliegos>
- [2] Es lo mismo que el [1]
- [3] Ministerio de Fomento. (2015, enero 3). *Artículo 542. Mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso* (PG-3). <https://www.mitma.gob.es/carreteras/servicios/normativa/pliegos>
- [4] Loma, J., Sampedro, Á., Terán, R., & Lozano, L. (2022). *TRASUTRA. Mezclas ultradelgadas fabricadas con aditivos*. Comunicación presentada en la Jornada Técnica de ASFEMA 2022, Madrid, España.
- [5] Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2024, enero). *Artículo 540. Microaglomerados en frío* (PG-3). Orden Circular. <https://www.mitma.gob.es/carreteras/servicios/normativa/pliegos>
- [6] Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2024, enero). *Artículo 541. Mezclas bituminosas abiertas en frío* (PG-3). Orden Circular. <https://www.mitma.gob.es/carreteras/servicios/normativa/pliegos>
- [7] Ministerio de Fomento. (2015, enero 3). *Artículo 543. Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas* (PG-3). <https://www.mitma.gob.es/carreteras/servicios/normativa/pliegos>
- [8] Ministerio de Fomento. (2019). *Artículo 544. Mezclas bituminosas tipo SMA* (PG-3). Orden Circular 3/2019. <https://www.mitma.gob.es/carreteras/servicios/normativa/pliegos>
- [9] Ecoasfalt. (2025). *Microaglomerados en frío: puesta en obra y principales usos* [Imagen]. <https://www.ecoasfalt.es/microaglomerados-en-frio-puesta-en-obra-y-principales-usos/>
- [10] PROAS. (s.f.). *Manual de consulta: mezclas abiertas en frío*. Recuperado de https://www.moeve.es/stfls/CepsaCom/PROAS/Ficheros_proas/Mezclas-abiertas-en-frio.pdf
- [11] Wikipedia. (s.f.). *Hormigón asfáltico* [Imagen]. https://es.wikipedia.org/wiki/Hormig%C3%B3n_asf%C3%A1ltico
- [12] Pavement Interactive. (s.f.). *Running hose demonstrating drainage of a permeable pavement* [Imagen]. <https://pavementinteractive.org/porous-on-purpose-permeable-pavements/>

- [13] López Domínguez, M. G., Pérez Salazar, A., & Garnica Anguas, P. (2014). *Estado del arte sobre el uso de residuos y sub-productos industriales en la construcción de carreteras*. Instituto Mexicano del Transporte.
- [14] Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). (2013). *Escorias de acería de horno de arco eléctrico* [Imagen]. <https://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/25/escorias-de-aceria-de-horno-de-arco-electrico/>
- [15] Retema. (2023). *[Extendido y compactado de capas de asfalto reciclado]* [Imagen]. <https://www.retema.es/actualidad/en-marcha-un-proyecto-de-reutilizacion-y-reciclado-del-asfalto-en-las-vias>
- [16] Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). (2007). *Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas*.
- [17] Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). (2013). *NFU granulado para la fabricación de pavimentos bituminosos* [Imagen]. <https://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/32/neumaticos-fuera-de-uso/>
- [18] SIGNUS. (s.f.). *Tramos ejecutados en España con NFU*. <https://www.signus.es/mezclas-asfalticas-con-polvo-de-neumatico/tramos.html>
- [19] Ministerio de Fomento. (2017). *Orden Circular 40/2017 sobre reciclado de firmes y pavimentos bituminosos*. <https://www.mitma.gob.es/carreteras/servicios/normativa/pliegos>
- [20] Carreteros. (2001). *Reciclado in situ con emulsión de capas bituminosas*. http://www.carreteros.org/normativa/pg4/oc8_2001/a_20.htm
- [21] Canteras El Cerro. (2011). *[Ladrillo machacado]* [Imagen]. <https://www.canteraselcerro.com/caminos-ladrillo-triturado/>
- [22] Yepes, V. (2018). *Reciclaje de firmes*. Universidad Politécnica de Valencia. <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/reciclaje-de-firmes/>
- [23] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2023). *Orden Circular OC 2/2023 sobre reutilización de capas de firmes y pavimentos bituminosos*. <https://www.mitma.gob.es/carreteras/servicios/normativa/pliegos>
- [24] Sorigué. (2025). *Asfaltos Sorigué rehabilita el firme de la carretera C-45 de Lleida con asfalto reciclado*. <https://www.sorigue.com/es/sala-de-prensa/actualidad/asfaltos-sorigue-rehabilita-el-firme-de-la-carretera-c-45-de-lleida-con>

- [25] CEDEX. (s.f.). *Obras realizadas con reciclaje de pavimentos asfálticos*. Cedex Materiales. <https://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/33/reciclado-de-pavimentos-asfalticos/valorizacion-/173/obras-realizadas-.html>
- [26] Kalantar, Z. N., Karim, M. R., & Mahrez, A. (2012). A review of using waste and virgin polymer in pavement. *Construction and Building Materials*, 33, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.009>
- [27] Wikipedia. (s.f.). *Negro de carbón*. https://es.wikipedia.org/wiki/Negro_de_carb%C3%B3n
- [28] Residuos Profesional. (2023). *Expertos analizan el potencial de la pirólisis para recuperar el negro de carbón de los neumáticos usados*. <https://www.residuosprofesional.com/pirolisis-recuperar-negro-de-carbon-neumaticos-usados/>
- [29] Zarei, M., Naseri, A. R., Salehikalam, A., Ghandehari, M., Nasrollahi, M., & Dadashi, A. (2022). Technical-economic studies about the effect of nano-carbon black on asphalt mixtures. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 22(1), 92–101.
- [30] Yamaguchi, K., Sasaki, I., Nishizaki, I., Meiarashi, S., & Moriyoshi, A. (2005). Reinforcing effects of carbon black on asphalt binder for pavement. *Journal of the Japan Petroleum Institute*, 48(6), 373–379.
- [31] Casey, D., McNally, C., Gibney, A., & Gilchrist, M. D. (2008). Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt. *Resources, Conservation and Recycling*, 52, 1167–1174. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.03.006>
- [32] Giustozzi, F., Xuan, D. L., Enfrin, M., Masood, H., Audy, R., & Boom, Y. J. (2021, noviembre). *Use of road-grade recycled plastics for sustainable asphalt pavements: Towards the selection of road-grade plastics – An evaluation framework and preliminary experimental results* (Informe de investigación). Austroads. Sydney, Australia. https://www.researchgate.net/publication/356392925_Use_of_Road-grade_Recycled_Plastics_for_Sustainable_Asphalt_Pavements_Towards_the_Selection_of_Road-grade_Plastics_-_An_Evaluation_Framework_and_Preliminary_Experimental_Results
- [33] Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo. (s.f.). *Método Marshall para mezclas asfálticas* (NLT-159/63). Recuperado de http://www.carreteros.org/normativa/otros/nlt/pdfs/azules/1963/159_63_63.pdf

- [34] ALEAS. (2016). *Protocolo para la determinación de la sensibilidad al agua. Método A* (Basado en la norma UNE-EN 12697-12:2009). Recuperado de https://asefma.es/wp-content/uploads/2016/05/PTAleas_12V0F.pdf
- [35] Loma, J. (2023). NLT-362/92 Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas de granulometría abierta, mediante el ensayo cántabro de pérdida por desgaste. *Asfalto y pavimentaciones*, (48), 27–29. <https://asefma.es/wp-content/uploads/2023/03/Asfalto-y-Pavimentaci%C3%B3n-48-baja.pdf>
- [36] Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo. (1998). *Coeficiente de resistencia al deslizamiento con el péndulo del TRRL* (NLT-175/98). Recuperado de http://www.carreteros.org/normativa/otros/nlt/pdfs/rosas/1998/175_98.pdf
- [37] Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo. (1987). *Medida de la textura superficial de un pavimento por el método del círculo de arena* (NLT-335/87). Recuperado de http://www.carreteros.org/normativa/otros/nlt/pdfs/negras/1987/335_87.pdf
- [38] Asociación Española de la Carretera. (2023). *UNE-EN ISO 13473-1: Caracterización de la textura de los pavimentos mediante el uso de perfiles de superficie*. Recuperado de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0063242>
- [39] Mateos Moreno, Á., & Soares, J. B. (2015). *El módulo dinámico de la mezcla bituminosa: importancia, evaluación y estimación*. *Asfalto y Pavimentación*, (16), 9–19. https://asefma.es/wp-content/uploads/2015/04/asfalto_16.pdf



Mezclas bituminosas Ultradelgadas (AUTL) con incorporación de negro de carbono

Objetivos

Conseguir una mezcla AUTL8 con negro de carbono que cumpla con lo establecido en el PG-3

Conseguir una mezcla ultradelgada con menor impacto medioambiental

Obtener una mezcla modificada que presente mejores prestaciones que una de referencia

Obtención mezcla de trabajo

Ensayo mezcla referencia y modificada

Conclusiones sobre mezcla modificada



Negro de carbono

- Subproducto industrial
- Utilizado en neumáticos y productos plásticos



Uso en mezclas AUTL

- Objeto de este Trabajo Fin de Master
- Ya empleado en otras mezclas
- Nuevos retos y posibilidades

Ensayos realizados



Ensayo Marshall



Sensibilidad al agua



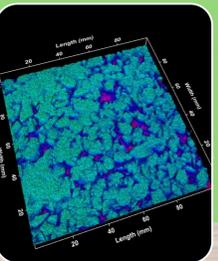
Ensayo Cántabro



Péndulo TRL



Círculo de arena



Escáner laser



Absorción acústica



Módulos dinámicos

- Se realiza la dosificación de la mezcla mediante el ensayo Marshall.
- Se utilizan los demás ensayos para comparar las propiedades de la mezcla.

Se obtienen mejoras en:

- Sensibilidad al agua
- Péndulo TRL
- Escáner laser
- Fonoabsorbencia