Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

DESARROLLO DE UNA NUEVA PRUEBA DE CONTROL Y VALIDACIÓN DE MEZCLAS POROSAS

TRABAJO FIN DE MASTER

Trabajo realizado por:
Darío Prieto Quintana

Dirigido:
Miguel Ángel Calzada Pérez
Pedro Lastra González

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

Santander, septiembre de 2022

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido fruto del esfuerzo y dedicación de varias personas, es por ello mi agradecimiento a todas ellas.

En primer lugar, agradezco al Grupo GITECO por darme la oportunidad de poder haber desarrollado este experimento, haber podido analizar y aprender sobre las mezclas bituminosas y las carreteras que veo día a día.

Quiero dar gracias a mis directores de trabajo, Pedro Lastra González y Miguel Ángel Calzada Pérez, sin ellos este trabajo todavía estaría en los comienzos. Gracias a Jorge Rodríguez Hernández por pensar en mi para desempeñar esta tarea y darme la ayuda técnica que he necesitado durante todos estos meses. Gracias también a Daniel Castro Fresno por todo lo que ha hecho durante mis tres años en GITECO.

Mis compañeros de trabajo merecen una mención especial, sin ellos este trabajo se habría hecho aún más complicado, gracias, Sara, Adrián, Helena, Alex, Saúl, Cristina, Eva y Christopher. Como no agradecer a Paula del Rio y a Javier Menocal, por haber colaborado de forma indirecta pero esencial en este trabajo y haberme ayudado en todo lo que he necesitado en el laboratorio todos estos meses.

Quiero también agradecer a la empresa “CEPSA S.A.” por el betún modificado aportado, así como a la empresa “Teijin Aramid B.V.” por las fibras de aramida aportadas.

A mi familia, que me animó desde que supo que podía hacer este trabajo y confiaba en que se llegase a realizar. A mi madre por todo el apoyo que me ha dado durante estos años, a mi padre y a Panta por ayudarme a reparar la máquina cuando ésta dejaba de funcionar, a mi hermana por todos los esfuerzos que hizo para que estuviese aquí hoy y a Esteban por hacer que continuase mis estudios. A mis tíos, tías, primos y primas, en especial a Lourdes.

Y por último y más importante, a mis amigos y amigas, porque sin ellos no estaría donde me encuentro ahora. Por escucharme, aconsejarme y entenderme, por todo ello quiero dar las gracias especialmente a Lucía, a Celia y a Tania. Porque, aunque haya tenido ayuda de mis tutores, la vuestra ha sido la más importante y la que más necesitaba.

RESUMEN

Título: Desarrollo de una nueva prueba de control y validación de mezclas porosas.

Especialidad: Transporte, Urbanismo y Ordenación del Territorio.

Autor: Darío Prieto Quintana.

Directores: Miguel Ángel Calzada Pérez y Pedro Lastra González.

Convocatoria: septiembre de 2022.

Palabras clave: pérdida de partículas, ravelling, abrasión mezclas bituminosas, ensayos mezclas porosas, PA, esfuerzos superficiales, fibras de aramida.

El presente trabajo se centra en desarrollar un nuevo ensayo para mezclas porosas (PA) que permita analizar los esfuerzos superficiales que sufren dichas mezclas evaluando la pérdida de partículas que experimentan al aplicar diferentes cargas a través de los dos elementos de contacto empleados: caucho NBR (nitrilo butadieno) y cepillos de acero latonado.

La pérdida de partículas consiste en el desprendimiento de áridos de la mezcla bituminosa. Es además el factor limitante que tienen las mezclas porosas debido a la reducción de su vida útil respecto a otros tipos de mezcla. Las causas para que se produzcan son muy variadas, desde una mala compactación de la mezcla o un mal diseño, hasta la presencia de humedad en la puesta en obra. Y las consecuencias en cualquier caso no son beneficiosas: marcas y desigualdades en la superficie que pueden dar lugar a baches o disminución de la resistencia al deslizamiento y por lo tanto menor seguridad a los conductores.

Con el objetivo de cuantificar dicha pérdida, se ha analizado la influencia del porcentaje de huecos de la mezcla, así como el impacto que tiene añadir fibras de aramida en la pérdida de partículas que experimentaba la mezcla al someterla a diferentes condiciones de ensayo.

Dichas condiciones de ensayo han consistido en variar la carga que se aplica sobre el elemento de contacto, el número de ciclos totales aplicados, el porcentaje de huecos y el uso de fibras. Para realizar este estudio se han realizado un total de 123 ensayos.

Los resultados obtenidos en los que el elemento de contacto fue el caucho NBR no se mostraron coherentes pues a igualdad de condiciones de ensayo se desprendían áridos o no.

Los resultados obtenidos en los que el elemento de contacto fueron los cepillos, se agrupan en tres categorías: pérdida de partículas medida en gramos; deformación

experimentada al aplicar las cargas, medida en centímetros y la temperatura máxima alcanzada en la zona de contacto medida en grados Celsius. Posteriormente, se ha realizado un análisis estadístico estableciendo un intervalo de confianza del 95% para los datos obtenidos con el objetivo de analizar si los datos muestran diferencias significativas.

De forma complementaria se han escaneado las probetas antes y después de ser ensayadas mediante un láser portátil, con el fin de obtener un modelo de superficie y obtener información visual de forma clara y rápida.

ABSTRACT

Title: Development of a new control and validation test for porous mixtures.

Major: Transports, Urbanism and Spatial Planning.

Author: Darío Prieto Quintana.

Mentors: Miguel Ángel Calzada Pérez and Pedro Lastra González.

Call: September 2022.

Key Words: Particle loss, ravelling, abrasion of bituminous mixtures, tests on porous asphalt, PA, surface stresses, aramid fibers.

The present work focuses on developing a new test for porous asphalt mixtures (PA) to analyse the surface stresses suffered by these mixtures by evaluating the particles loss when different loads are applied through the two contact elements used: NBR (nitrile butadiene rubber) and brass-plated steel brushes.

Particle loss is the detachment of aggregates from the bituminous mixtures. It is also the limiting factor for porous mixtures due to the reduction of their useful life compared to other types of mixtures. The causes for its occurrence are very varied, from poor compaction of the mixture or a bad design, to the presence of moisture in the laying. And the consequences are in any case not beneficial: marks and unevenness in the surface can lead to potholes or reduced skid resistance and thus less safety for drivers.

In order to quantify this loss, the influence of the percentage of voids in the mixture was analysed, as well as the impact of adding aramid fibres on the loss of particles experienced by the mixture when subjected to different test conditions.

These test conditions consisted of varying the load applied to the contact element, the number of total cycles applied, the percentage of voids and the use of fibres. A total of 123 tests were carried out for this study.

The results obtained where the contact element was NBR rubber were not consistent, as aggregates were either released or not released under the same test conditions.

The results obtained where the contact element was the steel brushes are grouped into three categories: particle loss measured in grams; deformation experienced when applying the loads, measured in centimetres; and the maximum temperature reached in the contact zone measured in degrees Celsius. Subsequently, a statistical analysis was carried out, establishing a 95% confidence interval for the data obtained in order to analyse whether the data show significant differences.

In addition, the specimens were scanned before and after being tested using a portable laser in order to obtain a surface model and to obtain visual information clearly and quickly.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS 1
RESUMEN 2
ABSTRACT 4
Apartado 1: INTRODUCCIÓN 10
1.1. Antecedentes 10
1.2. Objetivos 10
Apartado 2: ESTADO DE LA TÉCNICA 11
2.1. Introducción a las mezclas bituminosas en caliente 11
2.1.1. Hormigón bituminoso (AC) 12
2.1.2. Mezclas porosas (PA) 12
2.1.3. Mezclas discontinuas (BBTM) 12
2.1.4. Mezclas tipo SMA 13
2.1.5. Ligantes 13
2.2. Ensayos de pérdida de partículas 14
2.2.1. Ensayo de pérdida de partículas de probetas de mezclas bituminosas drenantes - UNE EN 12697-17 15
2.2.2. Desarrollo de una nueva prueba de pérdida de partículas para mezclas bituminosas 16
2.3. Fibras 17
Apartado 3: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 18
3.1. Consideraciones previas 18
3.2. Proceso de fabricación 21
3.3. Materiales para la fabricación de las mezclas 22
3.3.1. Áridos y betún 22
3.3.2. Fibras 23
3.4. Máquina de ensayo 24
3.4.1. Máquina empleada 24
3.4.2. Elementos de contacto 28
3.4.2.1. Caucho NBR 28
3.4.2.2. Cepillos 29
3.4.3. Equipos auxiliares 30
3.4.3.1. Adquisición de datos 30
3.4.3.2. Cámara termográfica 30

3.4.3.3. Escáner láser ... 31
3.5. Condiciones de ensayo ... 32
3.5.1. Abrasión realizada aplicando caucho ... 32
3.5.2. Abrasión realizada aplicando cepillos ... 33
3.5.3. Cálculo de la pérdida de partículas ... 35
3.5.3.1. Pérdida de partículas empleando caucho ... 35
3.5.3.2. Pérdida de partículas empleando cepillos ... 36
3.5.4. Cálculo de la deformación ... 36
3.5.5. Cálculo de la temperatura máxima ... 38
3.6. Diseño de las mezclas porosas ... 39
Apartado 4: RESULTADOS ... 42
4.1. Resultados de los ensayos realizados con caucho ... 42
4.2. Resultados de los ensayos realizados con cepillos ... 43
4.2.1. Pérdida de partículas ... 43
4.2.1.1. Ensayos en las probetas sin fibras ... 43
4.2.1.2. Ensayos en las probetas con fibras ... 45
4.2.1.3. Comparativa de los ensayos sin fibras y con fibras ... 46
4.2.2. Deformación ... 48
4.2.3. Temperatura máxima alcanzada ... 50
Apartado 5: CONCLUSIONES ... 51
5.1. Conclusiones ... 51
5.2. Futuras líneas de investigación ... 51
Bibliografía ... 52
Anejo I: Modelo de superficie de las probetas ... 54
I.1. Modelos de superficie empleando caucho ... 55
I.1.1. PA 16 – 22% ... 55
I.2 Modelos de superficie empleando cepillos ... 57
I.2.1. PA 16 – BAJO – 22 ... 57
I.2.2. PA 16 – ALTO – 22 ... 59
I.2.3. PA 16 – BAJO – 24 ... 61
I.2.4. PA16 – ALTO – 24 ... 63
I.2.5. PA16 – BAJO – 27 ... 65
I.2.6. PA16 – ALTO – 27 ... 67
Anejo II: Análisis estadístico de los datos ... 69

II.1. Mezclas sin fibras 70
II.1.1. Análisis paramétrico 70
II.1.2. Homogeneidad de varianzas 73
II.1.3. Distribución paramétrica..... 76
II.1.4. Distribución no paramétrica..... 76
II.2. Mezclas con fibras 78
II.2.1. Análisis paramétrico 78
II.2.2. Homogeneidad de varianzas 80
II.2.3. Distribución paramétrica..... 81
II.2.4. Distribución no paramétrica..... 81

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Esquema de la mezcla tipo AC. Fuente: eapa.org [22]. 12
Ilustración 2: Esquema de la mezcla tipo PA. Fuente: eapa.org [22]..... 12
Ilustración 3: Esquema de la mezcla tipo BBTM. Fuente: eapa.org [22]. 12
Ilustración 4: Esquema de la mezcla tipo SMA. Fuente: eapa.org [22]. 13
Ilustración 5: Arriba a la izquierda ARTe; arriba a la derecha DSD; abajo a la izquierda RSAT; abajo a la derecha TRD [19]..... 16
Ilustración 6: Esquema del tribómetro de Leonardo da Vinci en el que los materiales empleados son una superficie de carretera y caucho [20]. 18
Ilustración 7: Dibujo esquematizado del equipo SCRIM. Fuente: euroconsult.tnt..... 19
Ilustración 8: Esquema del alzado frontal de la máquina de pista de la norma NLT-173/00. 19
Ilustración 9: Escalas Shore 00, A y D con ejemplos de materiales cotidianos. Fuente: recreus.com. 20
Ilustración 10: Máquina compactadora. Fuente: propia. 21
Ilustración 11: Molde con la probeta antes de ser compactada. Fuente: propia..... 21
Ilustración 12: Fibras de aramida PULP. Fuente: propia. 23
Ilustración 13: Vista de perfil de la máquina de ensayo. Fuente: propia..... 24
Ilustración 14: Esquema del alzado frontal de la máquina de pista. Fuente: norma NLT-173/00. 24
Ilustración 15: Vista del alzado de la máquina de ensayo. Fuente: propia..... 25
Ilustración 16: Esquema del alzado lateral de la máquina de pista de la norma NLT-173/00. Fuente: norma NLT-173/00. 25
Ilustración 17: Arriba: Imagen de la máquina de pista. Abajo: Esquema de la cuna metálica. Cotas en mm. Fuente: propia..... 26
Ilustración 18: Base de pesas con 2 pesas sobre ella. Al fondo se aprecian otras 2 pesas más. Fuente: propia. 26
Ilustración 19: Caucho NBR empleado. Fuente: propia..... 28
Ilustración 20: Cepillos de acero latonado empleados. Fuente: propia. 29
Ilustración 21: LVDT acoplado a la máquina de ensayo. Fuente: propia. 30
Ilustración 22: Cámara empleada en un trípode para poder analizar las temperaturas de forma estática. Fuentes: propia (izquierda) y optris.es (derecha). 30
Ilustración 23: Escáner de AMES Engineering. Fuente: propia..... 31
Ilustración 24: Captura de la cámara térmica en la que se presenta la temperatura que alcanzan la mezcla y el cepillo. Los valores que se muestran se refieren a la máxima temperatura que alcanza el conjunto de elementos. Fuente: propia..... 34
Ilustración 25: Probeta ensayada con caucho NBR. Se observa que el caucho se desprende por los bordes. Fuente: propia. 35
Ilustración 26: Caucho junto con áridos recolectados tras el ensayo. Fuente: propia. 35
Ilustración 27: Ensayo empleando cepillos de acero latonado en el extremo izquierdo de la probeta. Fuente: propia. 36
Ilustración 28: Ensayo empleando cepillos de acero latonado en el extremo derecho de la probeta. Fuente: propia..... 36

Ilustración 29: Información obtenida del software Dewesoft durante 4 ciclos de un ensayo. Fuente: propia. 37
Ilustración 30: Comparativa realizada con el software 'AMES Engineering' entre el antes (izquierda) y el después (derecha) en una mezcla PA al realizar un ensayo en el que se emplean cepillos. Fuente: propia. 37
Ilustración 31: Metodología de cálculo de la deformación. Fuente: propia. 38
Ilustración 32: Granulometría de las mezclas PA empleadas. Fuente: propia. 40
Ilustración 33: Pérdida de partículas en los ensayos sin fibras. Análisis enfocado en los huecos. Fuente: propia. 43
Ilustración 34: Pérdida de partículas en los ensayos con fibras. Análisis enfocado en los huecos. Fuente: propia. 45
Ilustración 35: Comparativa de pérdida de partículas entre probetas con fibras y sin fibras para un porcentaje de huecos del 22%. Fuente: propia. 46
Ilustración 36: Comparativa de pérdida de partículas entre probetas con fibras y sin fibras para un porcentaje de huecos del 27%. Fuente: propia. 46
Ilustración 37: Ratio de pérdida de partículas entre mezclas con fibras y mezclas sin fibras. Fuente: propia. 47
Ilustración 38: Deformación de los ensayos sin fibras. Análisis enfocado en los huecos. Fuente: propia. 48
Ilustración 39: Deformación de los ensayos con fibras. Análisis enfocado en los huecos. Fuente: propia. 48
Ilustración 40: Temperatura máxima alcanzada por los ensayos realizados con fibras. Fuente: propia. 50
Ilustración 41: Planta de la probeta con un 22% de huecos antes del ensayo con caucho. 55
Ilustración 42: Planta de la probeta con un 22% de huecos después del ensayo con caucho. 55
Ilustración 43: Perspectiva de la probeta con un 22% de huecos antes del ensayo con caucho. 56
Ilustración 44: Perspectiva de la probeta con un 22% de huecos después del ensayo con caucho. 56
Ilustración 45: Planta de la probeta con un 22% de huecos antes del ensayo de solicitación baja con cepillos. 57
Ilustración 46: Planta de la probeta con un 22% de huecos después del ensayo de solicitación baja con cepillos. 57
Ilustración 47: Perspectiva de la probeta con un 22% de huecos antes del ensayo de solicitación baja con cepillos. 58
Ilustración 48: Perspectiva de la probeta con un 22% de huecos después del ensayo de solicitación baja con cepillos 58
Ilustración 49: Planta de la probeta con un 22% de huecos antes del ensayo de solicitación alta con cepillos. 59
Ilustración 50: Planta de la probeta con un 22% de huecos después del ensayo de solicitación alta con cepillos. 59
Ilustración 51: Perspectiva de la probeta con un 22% de huecos antes del ensayo de solicitación alta con cepillos. 60

Ilustración 52: Perspectiva de la probeta con un 22% de huecos después del ensayo de solicitación alta con cepillos. 60
Ilustración 53: Planta de la probeta con un 24% de huecos antes del ensayo de solicitación baja con cepillos. 61
Ilustración 54: Planta de la probeta con un 24% de huecos después del ensayo de solicitación baja con cepillos. 61
Ilustración 55: Perspectiva de la probeta con un 24% de huecos antes del ensayo con cepillos. 62
Ilustración 56: Perspectiva de la probeta con un 24% de huecos después del ensayo con cepillos. 62
Ilustración 57: Planta de la probeta con un 24% de huecos antes del ensayo de solicitación alta con cepillos. 63
Ilustración 58: Planta de la probeta con un 24% de huecos después del ensayo de solicitación alta con cepillos. 63
Ilustración 59: Perspectiva de la probeta con un 24% de huecos antes del ensayo de solicitación alta con cepillos. 64
Ilustración 60: Planta de la probeta con un 24% de huecos después del ensayo de solicitación alta con cepillos. 64
Ilustración 61: Planta de la probeta con un 27% de huecos antes del ensayo de solicitación baja con cepillos. 65
Ilustración 62: Planta de la probeta con un 27% de huecos después del ensayo de solicitación baja con cepillos. 65
Ilustración 63: Perspectiva de la probeta con un 27% de huecos antes del ensayo de solicitación baja con cepillos. 66
Ilustración 64: Perspectiva de la probeta con un 27% de huecos después del ensayo de solicitación baja con cepillos. 66
Ilustración 65: Planta de la probeta con un 27% de huecos antes del ensayo de solicitación alta con cepillos. 67
Ilustración 66: Planta de la probeta con un 27% de huecos después del ensayo de solicitación alta con cepillos. 67
Ilustración 67: Perspectiva de la probeta con un 27% de huecos antes del ensayo de solicitación alta con cepillos. 68
Ilustración 68: Perspectiva de la probeta con un 27% de huecos después del ensayo de solicitación alta con cepillos. 68
Ilustración 69: Análisis paramétrico de las mezclas PA16 sin fibras con un 22% de huecos y solicitación alta. 70
Ilustración 70: Análisis paramétrico de las mezclas PA16 sin fibras con un 24% de huecos y solicitación alta.. 70
Ilustración 71: Análisis paramétrico de las mezclas PA16 sin fibras con un 27% de huecos y solicitación alta. 71
Ilustración 72: Análisis paramétrico de las mezclas PA16 sin fibras con un 22% de huecos y solicitación baja. 71
Ilustración 73: Análisis paramétrico de las mezclas PA16 sin fibras con un 24% de huecos y solicitación baja. 72

Ilustración 74: Análisis paramétrico de las mezclas PA16 sin fibras con un 27% de huecos y solicitación baja. 72
Ilustración 75: Análisis de homogeneidad de varianzas entre las mezclas sin fibras con solicitación alta y un 22% y 24% de huecos. 73
Ilustración 76: Análisis de homogeneidad de varianzas entre las mezclas sin fibras con solicitación alta y un 22% y 27% de huecos. 73
Ilustración 77: Análisis de homogeneidad de varianzas entre las mezclas sin fibras con solicitación alta y un 24% y 27% de huecos. 74
Ilustración 78: Análisis de homogeneidad de varianzas entre las mezclas sin fibras con solicitación baja y un 22% y 24% de huecos. 74
Ilustración 79: Análisis de homogeneidad de varianzas entre las mezclas sin fibras con solicitación baja y un 22% y 27% de huecos. 75
Ilustración 80: Análisis de homogeneidad de varianzas entre las mezclas sin fibras con solicitación baja y un 24% y 27% de huecos. 75
Ilustración 81: Distribución t de student para las mezclas sin fibras con solicitación alta y un 22% y 24% de huecos. 76
Ilustración 82: Distribución t de student para las mezclas sin fibras con solicitación baja y un 22% y 24% de huecos. 76
Ilustración 83: Prueba U de Mann – Whitney para las mezclas sin fibras con solicitación alta y un 22% y 27% de huecos. 76
Ilustración 84: Prueba U de Mann – Whitney para las mezclas sin fibras con solicitación alta y un 24% y 27% de huecos 77
Ilustración 85: Prueba U de Mann – Whitney para las mezclas sin fibras con solicitación baja y un 22% y 27% de huecos 77
Ilustración 86: Prueba U de Mann – Whitney para las mezclas sin fibras con solicitación baja y un 24% y 27% de huecos 77
Ilustración 87: Análisis paramétrico de las mezclas PA16 con fibras con un 22% de huecos y solicitación alta. 78
Ilustración 88: Análisis paramétrico de las mezclas PA16 con fibras con un 27% de huecos y solicitación alta. 78
Ilustración 89: Análisis paramétrico de las mezclas PA16 con fibras con un 22% de huecos y solicitación baja. 79
Ilustración 90: Análisis paramétrico de las mezclas PA16 con fibras con un 27% de huecos y solicitación baja. 79
Ilustración 91: Análisis de homogeneidad de varianzas entre las mezclas con fibras con solicitación alta y un 22% y 27% de huecos. 80
Ilustración 92: Análisis de homogeneidad de varianzas entre las mezclas con fibras con solicitación baja y un 22% y 27% de huecos. 80
Ilustración 93: Distribución t de student para las mezclas con fibras con solicitación alta y un 22% y 27% de huecos. 81
Ilustración 94: Prueba U de Mann – Whitney para las mezclas con fibras con solicitación baja y un 22% y 27% de huecos. 81

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Características de los áridos y del betún empleado. 22
Tabla 2: Características de las fibras de aramida empleadas..... 23
Tabla 3: Superficie de contacto en relación con los diferentes materiales empleados... 27
Tabla 4: Masa aplicada, presión de contacto y porcentaje de incremento de masa en la zona de contacto en relación con los diferentes materiales empleados. 27
Tabla 5: Características del caucho NBR. 28
Tabla 6: Características de los cepillos de acero latonado. 29
Tabla 7: Propiedades del escáner láser. 31
Tabla 8: Condiciones de los distintos ensayos con caucho NBR. 32
Tabla 9: Condiciones de los distintos ensayos con cepillos. 33
Tabla 10: Valores de los ensayos del PG-3 de las diferentes mezclas PA-16. 41
Tabla 11: Resultados de los ensayos realizados con caucho. 42
Tabla 12: Resultados de los p-valores de la pérdida de partículas en las mezclas sin fibras. 44
Tabla 13: Resultados de los p-valores de la pérdida de partículas en las mezclas con fibras 45

Apartado 1: INTRODUCCIÓN

1.1.Antecedentes

El presente trabajo se encuentra enmarcado dentro del proyecto coordinado HOFIDRAIN, el cual consta de tres subproyectos. Uno de ellos se denomina MELODRAIN y se lleva a cabo en la Universidad de Cantabria (UC). El subproyecto MELODRAIN tiene dos ejes principales: el primero se centra en el rendimiento mecánico de las mezclas de asfalto analizando el método óptimo para agregar aditivos en función de sus características. El segundo y el cual se va a centrar este trabajo será el desarrollo de una nueva prueba de control y de validación de mezclas porosas [1].

1.2.Objetivos

El objetivo de este trabajo consiste en desarrollar un nuevo ensayo de control y validación de mezclas porosas para carreteras y compararlas con el rendimiento de las mezclas convencionales. Hasta ahora, uno de los ensayos más utilizados en el mundo es el ensayo Cántabro de pérdida de partículas. Sin embargo, se puede ampliar más los conocimientos acerca de la pérdida de partículas estudiando la respuesta de las mezclas porosas frente a los esfuerzos superficiales que produce el rodamiento de los vehículos, siendo este ensayo válido para las mezclas porosas y especialmente importante en el caso de pavimentos permeables en las ciudades.

En consecuencia, un nuevo ensayo que represente los esfuerzos superficiales que sufre una mezcla porosa debido al tráfico de vehículos ayudaría a estudiar de manera más profunda la efectividad de las diferentes mejoras aplicadas a las mezclas porosas para que resista mejor los esfuerzos tangenciales. Se ensayarán diferentes condiciones de ensayo (carga de los elementos de contacto, porcentaje de huecos, número de ciclos por minuto y número de ciclos totales) con diferentes mezclas porosas, con el objetivo de determinar las condiciones que producen la pérdida de partículas asociada a los esfuerzos que soportan las mezclas porosas en condiciones reales en entornos urbanos con numerosas maniobras de vehículos. Asimismo, se analizará el impacto de las fibras de aramida en el comportamiento mecánico de la mezcla bituminosa.

Apartado 2: ESTADO DE LA TÉCNICA

En el presente capítulo se va a comenzar a exponer las diferentes mezclas bituminosas que se emplean en la actualidad, para posteriormente, centrarnos en exponer las diferentes técnicas de desgarro y pérdida de partículas que se está empleando en diferentes lugares del mundo. Finalmente se expondrán las fibras que se emplean .

2.1. Introducción a las mezclas bituminosas en caliente

Una mezcla bituminosa se define como una combinación de betún asfáltico junto a los áridos (incluido también el polvo mineral) y, eventualmente, aditivos. Así, todas las partículas de árido quedarán recubiertas por una capa homogénea de ligante. El proceso de fabricación y de puesta en obra se debe realizar a una temperatura que sea muy superior a la del ambiente. Las combinaciones entre materiales, betunes y aditivos permiten obtener una gran variedad de mezclas para ser empleadas con diferentes usos.

En España, en el año 2019 se produjeron 18,81 millones de toneladas de mezclas bituminosas, de las cuales el 68,8% se emplearon en capas de rodadura, el 20,4% en capas intermedias y el 10,8% en las capas de base. En cambio, en el año 2020 se estima que se produjeron 17 millones de toneladas, generando una caída del 10,1% del consumo de betún respecto al año anterior. España sigue siendo el séptimo país europeo en producción de mezclas asfálticas, según datos oficiales de EAPA [2][3].

Las mezclas que se disponen en capa de rodadura pueden permitir una mayor o menor infiltración dependiendo de cómo sea de abierta la mezcla. Por ello, las mezclas cerradas apenas infiltran agua a las capas inferiores, sino que evacúan el agua superficialmente hacia cunetas o alcantarillas, lo que provoca que puedan acumularse charcas de agua y provocar situaciones peligrosas a los usuarios como el *aquaplaning* o hidroplaneo. No obstante, las mezclas cerradas o semicerradas presentan un menor mantenimiento y una vida útil superior al resto.

En cambio, las mezclas abiertas o las porosas se caracterizan por drenar agua hacia las capas inferiores debido a la granulometría que poseen. Este tipo de mezclas requieren de un mayor mantenimiento para evitar problemas de colmatación en zonas o épocas poco lluviosas. Asimismo, poseen una vida útil menor que las mezclas más cerradas o densas y en situaciones de ciclos de hielo-deshielo, su vida útil se ve reducida drásticamente.

A pesar del amplio abanico de opciones que podemos tener con la combinación de betún, áridos y aditivos, el PG-3 define cuatro tipos de mezclas para capas de rodadura de acuerdo con los artículos 542, 543 y 544: las mezclas tipo hormigón bituminoso (abreviadas como AC), las mezclas porosas (abreviadas como PA) y las mezclas discontinuas (BBTM y SMA).

2.1.1. Hormigón bituminoso (AC)

También llamado "Asphalt Concrete", son mezclas que presentan una granulometría continua y son muy cerradas, contienen entre un 4 y un 6% de huecos, por lo tanto, son mezclas impermeables (Ilustración 1). Para capas de rodadura su espesor mínimos será de 4 cm y la dotación mínima de ligante ha de ser de 4,5% para áridos cuya densidad media sea de 2,65 g/cm^3.

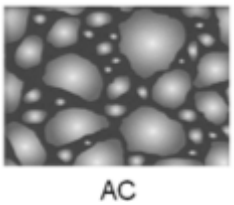


Ilustración 1: Esquema de la mezcla tipo AC. Fuente: eapa.org [22].

2.1.2. Mezclas porosas (PA)

También llamadas "Porous Asphalt", son mezclas que presentan una granulometría continua y su característica principal es su alto contenido de huecos, siendo superior al 20%, por ello son mezclas muy permeables que permiten drenar el agua rápidamente a través de la estructura interna del pavimento (Ilustración 2). Su empleo está limitado únicamente a la capa de rodadura, y emplean habitualmente betunes modificados para así asegurar una buena adhesión a pesar de los huecos, y minimizar la pérdida de partículas. El espesor está definido entre 4 y 5 cm, y la dotación mínima de ligante es de 4,3% para áridos cuya densidad media sea de 2,65 g/cm^3.

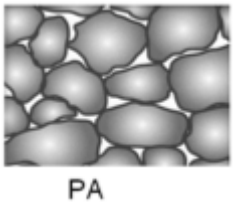


Ilustración 2: Esquema de la mezcla tipo PA. Fuente: eapa.org [22].

Este tipo de mezclas son empleadas con frecuencia para mejorar el drenaje de la carretera y gestionar el agua de escorrentía mediante el empleo de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), facilitando la canalización y evacuación de grandes caudales, evitando así inundaciones y daños materiales y humanos. Este tipo de mezclas, mejora también la seguridad en los conductores dado que mejora la resistencia al deslizamiento, reduce las salpicaduras de los vehículos y evita la formación de balsas de agua en la calzada [4].

Aunque, por el contrario, este tipo de mezclas requiere de un mantenimiento más frecuente que el resto dado que presenta con frecuencia problemas de colmatación, dejando de ser permeable, siendo esta su función más característica [5].

El uso de este tipo de mezclas en España está limitado a las zonas más septentrionales y sin riesgo de heladas. En Estados Unidos su uso está concentrado en la costa sureste, principalmente en los estados de Nuevo México, Arizona, Florida y Georgia empleando 1.600, 1.300, 1.100 y 900 km·carril/año de mezclas bituminosas porosas, respectivamente [5]. Asimismo, en Países Bajos, se emplean mezclas porosas de doble capa con otra finalidad: la reducción de la contaminación por ruido [6].

2.1.3. Mezclas discontinuas (BBTM)

También llamadas "Béton Bitumineux Très Mince", son mezclas que presentan una gran discontinuidad entre los 2 y los 8 mm. Presentan un contenido de huecos entre un 4 y 18% en función de si son BBTM A o B. Se caracterizan por presentar una elevada

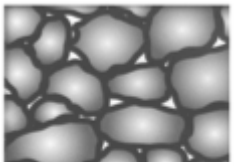


Ilustración 3: Esquema de la mezcla tipo BBTM. Fuente: eapa.org [22].

rugosidad, es decir, una mayor macrotextura (Ilustración 3). El espesor está definido entre 2 y 3 cm, la dotación mínima de ligante es de 4,75% para áridos cuya densidad media sea de 2,65 g/cm^3. Presentan una buena resistencia al deslizamiento y una buena drenabilidad.

2.1.4. Mezclas tipo SMA

También llamadas "Stone Mastic Asphalt", son mezclas discontinuas que trabajan por rozamiento del esqueleto mineral con un bajo porcentaje de árido fino, con una dotación de ligante más alta respecto a las otras mezclas (Ilustración 4). Presentan un contenido de huecos entre un 4% y 7%. Dichas mezclas son las que menos tiempo han sido empleadas en España, dado que han sido incluidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carretera y Puentes (PG-3) en diciembre de 2019 [7]. No obstante, son empleadas en otros países de Europa con mayor frecuencia, como por ejemplo en Reino Unido.

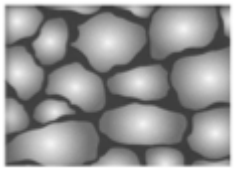


Ilustración 4: Esquema de la mezcla tipo SMA. Fuente: eapa.org [22].

Presentan bajas proporciones de árido fino y una discontinuidad granulométrica en los tamaños intermedios del árido grueso. El espesor definido en la capa de rodadura es de entre 2 y 6 cm. Ha de presentar una dotación mínima de ligante de 5,6% para áridos cuya densidad media sea de 2,65 g/cm^3.

En ocasiones estas mezclas incorporan fibras para evitar el escurrimiento del ligante. El alto porcentaje de betún empleado, así como el rozamiento del esqueleto mineral, aportan un gran comportamiento mecánico a este tipo de mezcla.

2.1.5. Ligantes

Un ligante es un material que posee la propiedad de aglutinar partículas sólidas para formar una masa coherente [8]. Un ligante hidrocarbonado es un producto bituminoso viscoso preparado a partir de hidrocarburos naturales que poseen propiedades aglomerantes. Poseen color oscuro, carácter termoplástico y buena adhesividad con los áridos [9].

A pesar de existir una gran variedad de ligantes, el uso de mezclas calientes se limita a incorporar betunes convencionales o modificados con polímeros. No obstante, en función del tipo de mezcla, de la ubicación donde se vaya a disponer, del tráfico previsto a soportar, así como del rango de temperaturas del ambiente, entre otras variables, se pueden emplear betunes convencionales o modificados.

El empleo de betunes modificados con polímeros respecto a los convencionales presenta diferentes ventajas como son: lograr una mayor cohesión, mayor resistencia a la fatiga, mayor durabilidad en su puesta en servicio, mayor adhesividad a los áridos, evita escurrimiento del ligante, mejora la resistencia a las deformaciones plásticas, mejora la elasticidad de la mezcla, entre otras.

2.2. Ensayos de pérdida de partículas

La pérdida de partículas consiste en el desprendimiento de áridos de la mezcla bituminosa. Este tipo de fallo es el factor limitante que tienen las mezclas porosas debido a que reducen significativamente su vida útil respecto a las otras mezclas.

La pérdida de partículas es uno de los problemas de fallo más comunes en los pavimentos y en especial en las mezclas porosas. Una vez que se han perdido algunas partículas superficiales, el deterioro se va haciendo progresivamente más rápido en el tiempo pudiendo diferenciarse en 3 etapas. La primera es la etapa ligera en la que se desprenden los áridos finos superficiales. La segunda es la etapa moderada, en la que se desprenden los áridos finos y algunos áridos gruesos. La tercera es la etapa más severa en la que se desprenden áridos finos y gruesos [10].

La pérdida de partículas de áridos finos se produce cuando la unión micromecánica entre el ligante y el árido alcanza un punto crítico. La fractura cohesiva del ligante ocurrirá cuando el esfuerzo de tracción supere al esfuerzo de rotura del ligante dando lugar así al desprendimiento de partículas de árido fino de la superficie [11].

La pérdida de partículas se produce por diferentes causas como son: la compactación inadecuada, pues el árido no se adherirá bien al ligante; tráfico, en especial en zonas donde el tráfico pesado sea elevado; el envejecimiento, pues el ligante endurece y empeoran sus propiedades; presencia de polvo, pues este hace que el ligante se adhiera al polvo y no a los áridos debilitando las uniones de estos; presencia de humedad, el ligante no se adherirá bien al árido en condiciones húmedas; así como un mal diseño de la mezcla, si el contenido de ligante es demasiado bajo, los áridos no podrán ser envueltos por el ligante [10,12].

Los efectos producidos por la pérdida de partículas son numerosos y en ningún caso favorables. Las partículas se quedan sobre la superficie dejando marcas sobre la superficie, que de no ser tratadas son propensas a convertirse en baches, desigualdades en la superficie, tener una menor resistencia al deslizamiento, así como menos comodidad para los conductores y más ruido [13].

Se ha aludido que el *ravelling*, es decir la pérdida de partículas de árido grueso, es de dos tipos, uno a corto y otro a largo plazo. El *ravelling* a corto plazo, es provocado por el tráfico, y se supone que está causado por la fuerza tangencial que se ejerce en la superficie de contacto entre el neumático y el pavimento. El *ravelling* a largo plazo, está relacionado con el debilitamiento de la mezcla causado por el envejecimiento o por estar expuesto a la intemperie [14].

Actualmente, dicho fallo se mide en laboratorio de acuerdo con los siguientes métodos:

2.2.1. Ensayo de pérdida de partículas de probetas de mezclas bituminosas drenantes - UNE EN 12697-17

Tradicionalmente se ha evaluado la pérdida de partículas mediante el ensayo cántabro. Esta norma europea, procede de la norma "NLT 352/00 Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste", analiza la pérdida de partículas de las mezclas bituminosas drenantes. Este ensayo sirve como método de dosificación de las probetas porosas.

La facilidad del ensayo radica en el empleo de dos máquinas que son habituales en los laboratorios de caminos: la máquina de Los Ángeles y la compactadora Marshall.

La pérdida de partículas se evalúa mediante la pérdida de masa de las probetas tras someterse a 300 vueltas en la máquina de Los Ángeles. Las probetas empleadas son probetas cilíndricas de mezclas bituminosas drenantes cuyo tamaño máximo de árido es menor de 22,4 mm.

Se fabrican, al menos, 5 probetas por ensayo. Se determina la masa de la probeta (W_1) y se introduce en el interior del tambor de la máquina de Los Ángeles, y sin introducir las bolas metálicas, se hace girar el tambor entre 30 y 33 rpm, durante 300 vueltas. Al terminar el ensayo, se saca la probeta y se limpia ligeramente con un paño para eliminar las partículas claramente sueltas y se vuelve a pesar anotando la masa (W_2). Para cada una de las probetas preparadas se repite de forma análoga.

Así, el cálculo de la pérdida de partículas (PL) resulta ser:

$$PL = 100 \cdot \frac{W_1 - W_2}{W_1}$$

Con PL siendo el valor de la pérdida de partículas (%), W_1 la masa inicial de la probeta (g) y W_2 la masa final de las probetas (g). El valor de PL se redondea al 1% más próximo [15].

Dada la sencillez operativa y la capacidad de que diferentes laboratorios puedan realizar este ensayo, su empleo se ha extendido globalmente dando lugar a diversas variaciones de este ensayo, estando algunas recogidas en norma o en proceso y otras no como por ejemplo el empleo en mezclas más cerradas como en las AC [16]. Asimismo, este ensayo se emplea con el objetivo de poder comparar mezclas en las que se haya sustituido alguno de los materiales que lo conforman por otros, de los que se desconoce su empleo y funcionalidad [17][18].

Otra variedad del ensayo cántabro de pérdida de partículas es el ensayo húmedo mediante la norma NLT 362/92 denominada 'Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas de granulometría abierta, mediante ensayo cántabro de pérdida por desgaste'. En él, las probetas han sido sumergidas previamente al ensayo a un baño de agua durante 24 horas a 60ºC, con el fin de verificar y comprobar la adhesividad árido-ligante. Asimismo, se pueden obtener valores comparativos entre el ensayo en seco y húmedo para las mismas dosificaciones.

2.2.2. Desarrollo de una nueva prueba de pérdida de partículas para mezclas bituminosas

Para tratar de simular en laboratorio la pérdida de partículas provocada por el tráfico real se han desarrollado varias pruebas con el fin de dar una indicación de la potencial abrasión de una mezcla asfáltica.

Con el propósito de normalizar diferentes ensayos se ha realizado un proyecto de especificación técnica elaborado por el Comité Europeo de Normalización (CEN) denominado CEN/TS 12697-50, de resistencia al desgaste [19]. En este estudio se emplearon cuatro máquinas para medir la pérdida de partículas de diferente forma: el Aachener Ravelling Tester (ARTe), el Darmstadt Scuffing Device (DSD), el Rotating Surface Abrasion Test (RSAT) y el TriboRoute Device (TRD), tal y como se observa en la Ilustración 5.

El objetivo era validar in situ los diferentes dispositivos, si los resultados pueden estandarizarse y obtener una medida común aplicando factores correctores, así como identificar qué dispositivos puedan ser comparables.

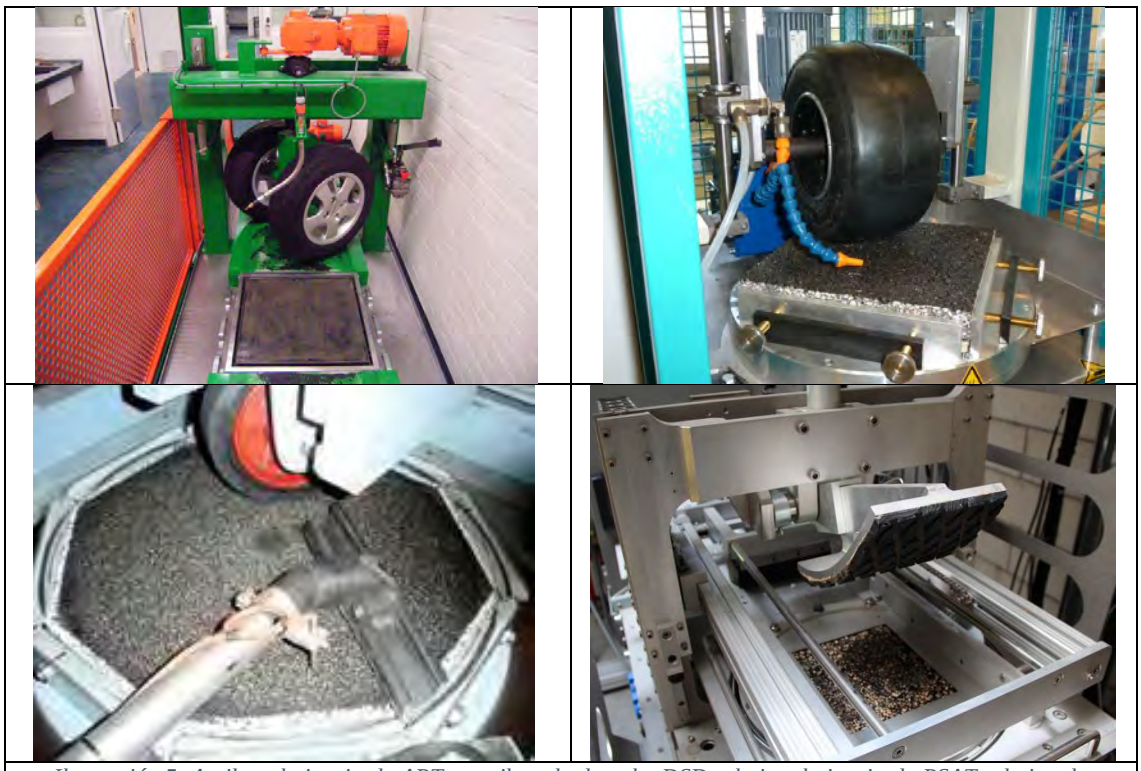


Ilustración 5: Arriba a la izquierda ARTe; arriba a la derecha DSD; abajo a la izquierda RSAT; abajo a la derecha TRD [19].

Posteriormente identificaron diferentes factores relacionados con los materiales que podrían afectar a la pérdida de partículas, entre ellos fueron el contenido de ligante, el uso de betunes modificados y el tamaño máximo de los áridos, dado que una granulometría más gruesa tiende a aumentar la pérdida de partículas. Los resultados de los ensayos no fueron concluyentes dado que no se proporcionó una respuesta definitiva en cuanto a si existe un mejor dispositivo que deba ser empleado de forma principal, así como factores de correlación consistentes para comparar los resultados de los diferentes dispositivos ni en una mezcla específica ni en el conjunto de todas ellas.

2.3. Fibras

En la actualidad se está estudiando el uso de fibras en las mezclas y cómo éstas influyen en el comportamiento de las mezclas porosas, mejorando propiedades como la resistencia al escurrimiento o la pérdida de partículas. Actualmente, se está investigando el uso de fibras de aramida como una nueva aplicación frente a las tradicionales fibras de celulosa.

Con el objetivo de mejorar las propiedades resistentes de las mezclas se han realizado estudios para analizar su impacto en función de su composición y de su porcentaje sobre mezclas porosas. Así, con tan solo añadir un 0,05% de fibras de aramida con revestimiento de látex con respecto al peso total de la mezcla con betún modificado, se consigue reducir la pérdida de partículas hasta en un 46,7% en el ensayo en condiciones secas [17].

Además, para el caso de mezclas que incorporan betunes convencionales, la incorporación de fibras de aramida tipo "*PULP*" en un 0,05% respecto al peso total de la mezcla consigue reducir la pérdida de partículas en un 61,5% en el ensayo en condiciones secas [18].

Apartado 3: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Consideraciones previas

El proyecto comenzó planteándose la idea de medir esfuerzos tangenciales en las mezclas bituminosas porosas. Para ello, el concepto principal fue la aplicación de un esfuerzo superficial sobre la mezcla que simulase el efecto de un neumático cuando desliza. Se partió de la idea del tribómetro de Leonardo da Vinci. Un tribómetro es un instrumento empleado para obtener medidas de rozamiento o desgaste entre dos superficies de contacto en movimiento.

Una de las aplicaciones de este instrumento consiste en disponer una mesa sobre la que se apoya inmóvil uno de los materiales a ensayar, sobre su superficie libre desliza el otro material de ensayo en sentido longitudinal (Ilustración 9). La carga necesaria para que se produzca el deslizamiento es una medida directa para obtener el coeficiente de rozamiento. Este aparato se ha utilizado también para obtener la resistencia al deslizamiento de las carreteras [20].

El esquema del tribómetro de Leonardo da Vinci es el que se muestra a continuación (Ilustración 6):

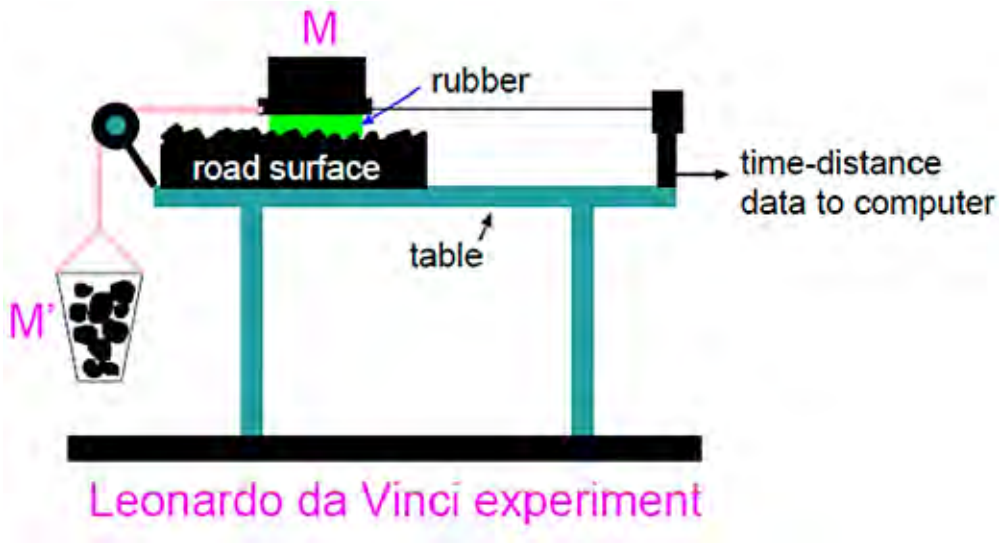


Ilustración 6: Esquema del tribómetro de Leonardo da Vinci en el que los materiales empleados son una superficie de carretera y caucho [20].

En la actualidad, mediante el ensayo SCRIM se evalúa la adherencia entre vehículo y pavimento cuando este último se encuentra mojado, obteniendo así el coeficiente de rozamiento transversal (CRT) [21].

El proceso consta de un camión que pulveriza agua obteniéndose así una película líquida de espesor constante sobre la superficie del pavimento, y seguidamente se hace pasar una rueda lisa que forma 20º con su eje como se muestra en la Ilustración 7. El propio equipo consta de un sensor láser que permite obtener, además, una medida continua de la textura del pavimento.

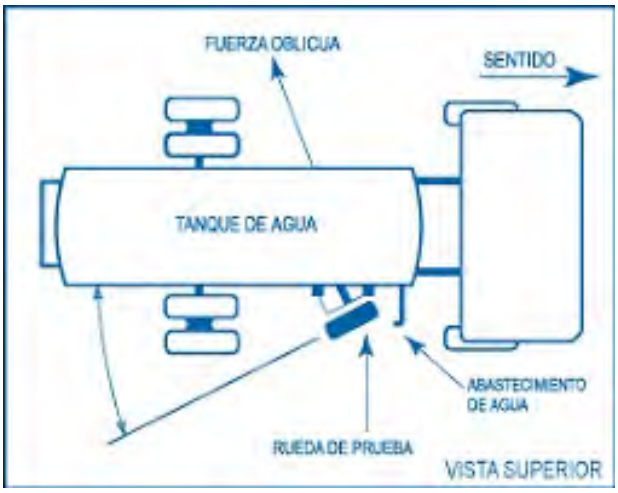


Ilustración 7: Dibujo esquematizado del equipo SCRIM. Fuente: euroconsult.tnt.

A la hora de desarrollar el equipo que se presenta en este estudio, inicialmente se planteó la opción de utilizar también ruedas de neumático para tratar de reproducir de la mejor manera posible el paso de los vehículos y las fuerzas que éstos son capaces de aplicar a las capas de rodadura. No obstante, debido a que se buscaba que los ensayos fuesen simples y fáciles de ejecutar, y dado que el esfuerzo es el mismo que el de una rueda bloqueada, se decidió reemplazar el neumático por una pieza única que desliza en lugar del esfuerzo combinado de rodadura y deslizamiento del neumático. Para simular el movimiento se empleó una máquina de pista sustituyendo el neumático por diferentes objetos encargados de transmitir los esfuerzos superficiales sobre la probeta de estudio. En la Ilustración 8 se puede apreciar un esquema del equipo en el que, remarcado en líneas rojas discontinuas, se dispone la probeta a ensayar. Las flechas indican la dirección de vaivén posible. La indicación de 'STOP' señala que ese objeto se encuentra inmóvil.

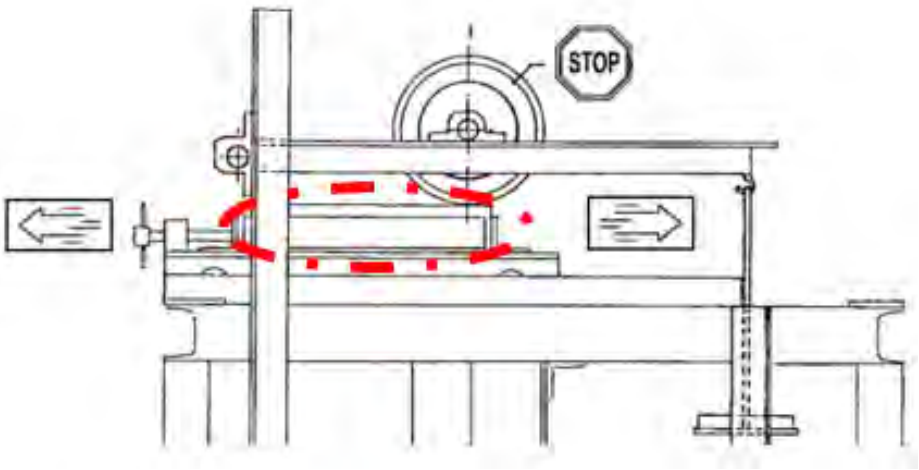


Ilustración 8: Esquema del alzado frontal de la máquina de pista de la norma NLT-173/00.

Para tratar de asimilar el material a los neumáticos se decidió emplear un caucho de nitrilo butadieno (NBR) como material que más se puede asemejar en términos de dureza al caucho de las ruedas de los vehículos. En la escala de dureza Shore A, el caucho empleado presenta una dureza de 65 ± 5 y normalmente, el de los neumáticos está en torno a 65 – 70. Esta escala mide la dureza elástica de los materiales compactos al dejar caer sobre ellos un objeto.

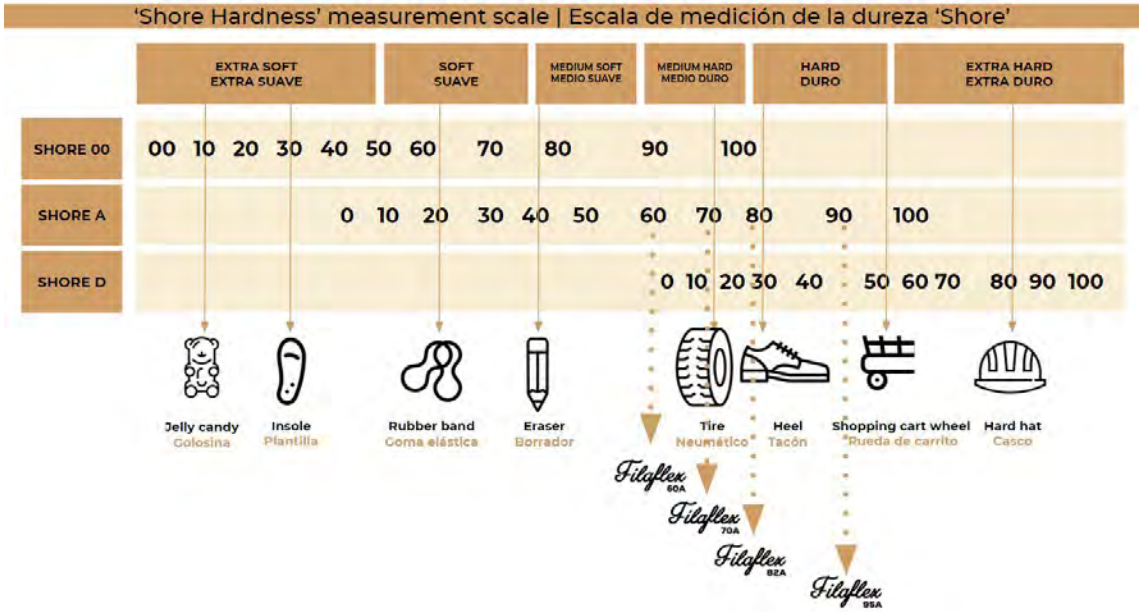


Ilustración 9: Escalas Shore 00, A y D con ejemplos de materiales cotidianos. Fuente: recreus.com.

En una segunda fase, y dado que los resultados obtenidos con el empleo del caucho NBR no fueron determinantes, se decidió incrementar el esfuerzo aplicado sobre la probeta empleando cepillos de acero latonado para transmitir las cargas, los cuales aplican una mayor fuerza de desprendimiento de partículas.

De cara a mejorar el estudio experimental, se decidió analizar el impacto de las fibras de aramida en las mezclas porosas para investigar la influencia que éstas podían ejercer en relación con la pérdida de partículas.

3.2. Proceso de fabricación

El proceso de fabricación de las probetas es el habitualmente empleado en mezclas convencionales, excepto en aquellas que incorporaron fibras. A continuación, se detalla el proceso de fabricación de las mezclas que incorporan fibras:

1) Incorporación de áridos y posterior mezclado durante un minuto.
2) Vertido de fibras sobre los áridos y mezclado durante un minuto.
3) Incorporación del ligante y mezclado durante dos minutos.
4) Se añade el polvo mineral y se mezcla durante dos minutos.

Las temperaturas de fabricación no han variado respecto a las mezclas convencionales, empleando siempre la que suministra el proveedor del ligante.

A continuación, se muestran en la Ilustración 10 e Ilustración 11 la máquina compactadora, así como la probeta antes de ser compactada en el molde.

Ilustración 10: Máquina compactadora. Fuente: propia.

Ilustración 11: Molde con la probeta antes de ser compactada. Fuente: propia.

3.3. Materiales para la fabricación de las mezclas

A continuación, se detallan los materiales empleados para poder realizar los ensayos pertinentes de las mezclas. Se comenzará por los áridos, para seguir con el ligante y las fibras. Finalmente se muestran las características de los elementos de contacto con las probetas.

3.3.1. Áridos y betún

Los materiales convencionales, como los áridos y el betún, se han caracterizado de acuerdo con la normativa vigente. A continuación, se muestran las características principales que presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Características de los áridos y del betún empleado.

	Resultado	Límites	Norma
	Ofita		
Coeficiente de Los Ángeles	13	≤ 20	EN 1097-2
Peso específico (g/cm^3)	2.787	-	EN 1097-6
Coeficiente de pulimento acelerado	60	≥ 56	EN 1097-8
Índice de lajas (%)	8	≤ 20	EN 933-3
	Árido calizo		
Coeficiente de Los Ángeles	28	-	EN 1097-2
Peso específico (g/cm^3)	2.705	-	EN 1097-6
Equivalente de arena	78	> 55	EN 933-8
	PMB 45/80-65		
Penetración (25ºC, mm/10)	56.00	45 – 80	EN 1426
Tª de reblandecimiento (ºC)	74.10	≥ 65	EN 1427
Fragilidad Fraass (ºC)	-13.00	< -15	EN 12593
Peso específico (g/cm^3)	1.03	-	EN 15326
Recuperación elástica (25ºC, %)	87	> 70	EN 13398
Fuerza ductilidad (J/cm^2)	5	≥ 3	EN 13589

Previos a los ensayos de las mezclas han tenido que llevarse los ensayos relativos a la caracterización de los materiales que componen la mezcla.

3.3.2. Fibras

Las fibras empleadas son de aramida, suministradas por la empresa "Teijin Aramid B.V.", las cuales se observan en la Ilustración 12. En la Tabla 2 se muestran sus características.

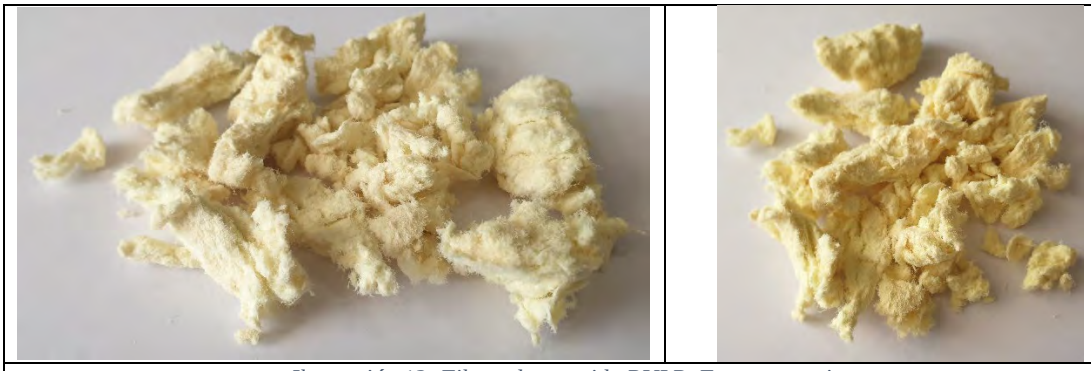


Ilustración 12: Fibras de aramida PULP. Fuente: propia.

Tabla 2: Características de las fibras de aramida empleadas.

Fibras de aramida (*PULP*)				
Color	Peso específico (g/cm^3)	Resistencia a la tracción (GPa)	Longitud (mm)	Temperatura de descomposición (ºC)
Amarillo	1.44	2.7 – 3.6	1 – 1.5	> 450

3.4. Máquina de ensayo

A continuación, se expondrá la máquina empleada para realizar los ensayos, así como los equipos auxiliares que han sido necesarios para obtener datos.

3.4.1. Máquina empleada

Para definir la metodología de ensayo, se partió de la máquina de laboratorio que evaluaba las deformaciones plásticas de acuerdo con la antigua norma NLT-173/00 "Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio". En ella, se fijan ciertas variables de ensayo, una de las cuales se ha adoptado para este trabajo, la frecuencia de ciclo de (42 ± 1) pasadas por minuto.

La máquina se compone de un motorreductor que permite girar un plato con un eje el cual permite generar el movimiento de vaivén del carretón apoyándose en unos perfiles en forma de L sobre los que se coloca la probeta a ensayar. La carga se transmite colgando unas pesas en un extremo de la estructura superior sobre la que se fija la rueda o "el taco" de goma.

Además, mediante un útil de agarre para los elementos de contacto se consiguen anclar dichos materiales permitiendo su contacto con la probeta. A continuación, se muestra en la Ilustración 13 la máquina de ensayo empleado mientras que en la Ilustración 14 se muestra el esquema que aparece en la norma NLT.

Ilustración 13: Vista de perfil de la máquina de ensayo. Fuente: propia.

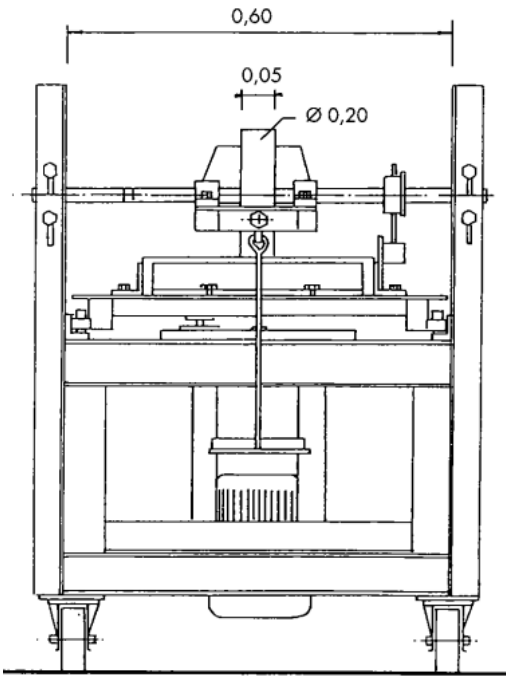


Ilustración 14: Esquema del alzado frontal de la máquina de pista. Fuente: norma NLT-173/00.

En la Ilustración 15 se muestra el alzado de la máquina de ensayo, mientras que en la Ilustración 16 se muestra el esquema que aparece en la norma NLT.

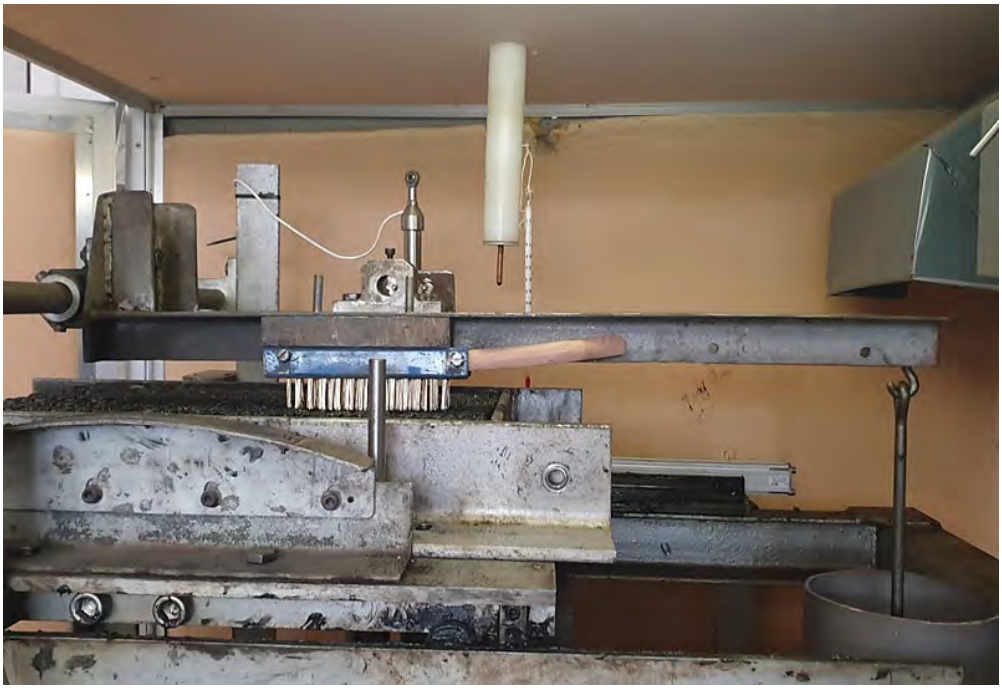


Ilustración 15: Vista del alzado de la máquina de ensayo. Fuente: propia.

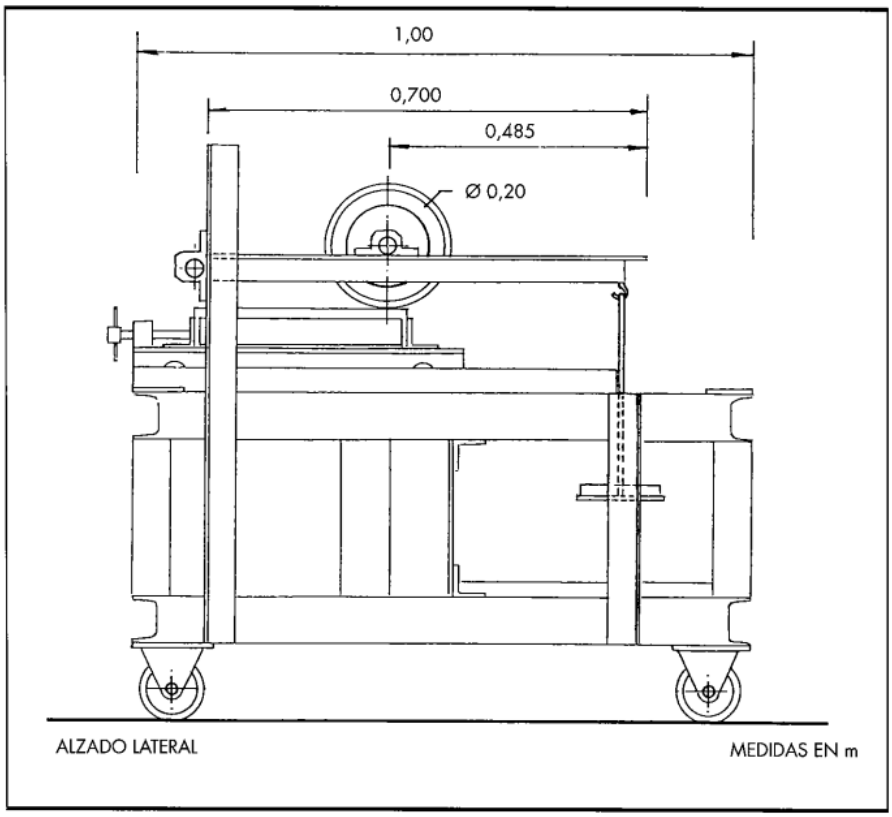


Ilustración 16: Esquema del alzado lateral de la máquina de pista de la norma NLT-173/00. Fuente: norma NLT-173/00.

Para el diseño de la cuna metálica se partió del mecanismo existente en la máquina de pista, el cual posee en la parte izquierda una estructura que hace las funciones de un apoyo fijo y en el extremo derecho de un gancho en el que se pueden acoplar las pesas.

A continuación, se presenta en la Ilustración 17 un esquema de la cuna metálica.

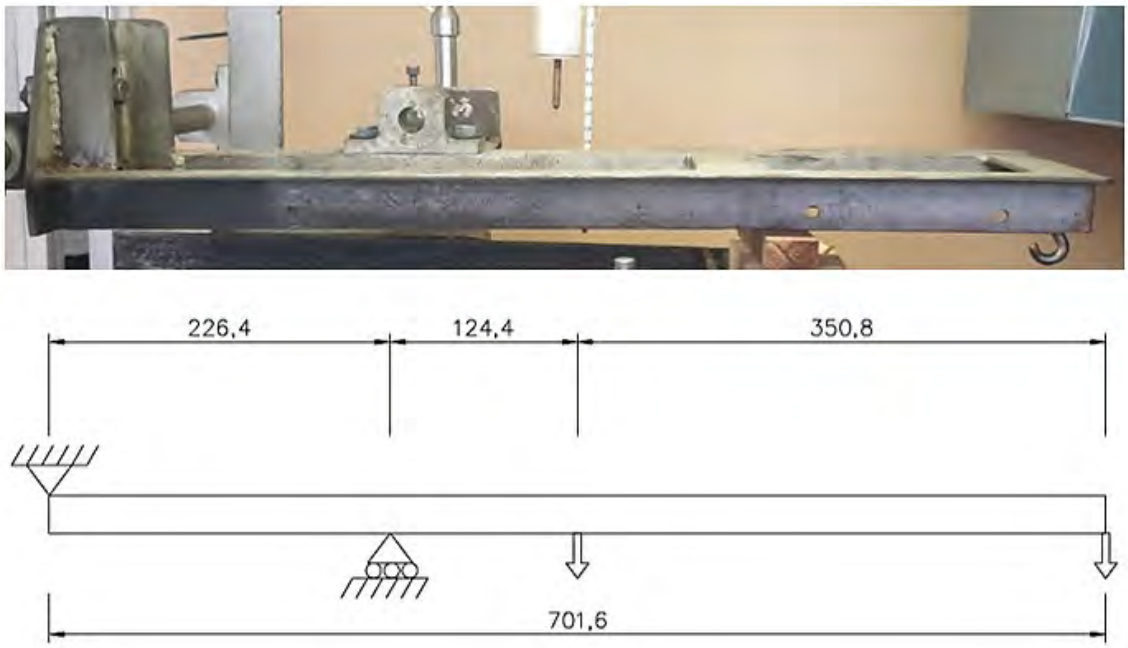


Ilustración 17: Arriba: Imagen de la máquina de pista. Abajo: Esquema de la cuna metálica. Cotas en mm. Fuente: propia.

Dada la estructura del equipo, éste trabaja con un apoyo fijo dado que la cuna en ese punto tiene bloqueados los movimientos horizontales y verticales, y uno móvil, el cual corresponde al contacto entre la probeta y el elemento de desgaste el cual aplica la carga a la losa. Las dos cargas verticales representan la masa del mecanismo concentrada en el centro de gravedad, el cual se ha supuesto que actúa en la mitad del mismo. La masa de dicho mecanismo es de 11,92 kg. Por último, la flecha del extremo derecho representa la carga que actúa en función del número de pesas que le aplicamos.

Ilustración 18: Base de pesas con 2 pesas sobre ella. Al fondo se aprecian otras 2 pesas más. Fuente: propia.

Con todo ello, se puede lograr calcular el peso que se puede ejercer en el apoyo móvil, así como la presión que se aplicaría en la probeta.

La ecuación que relaciona la masa aplicada en el apoyo inferior es la siguiente:

$$R = 18{,}47 + 3{,}10 \cdot CE \quad [kg]$$

Siendo CE la carga extra que se puede añadir. Dicha carga se consigue añadiendo las pesas que se observan en la Ilustración 18.

Para ello se ha calculado la superficie de contacto con los cepillos y con el caucho. En el caso del caucho el resultado es el producto del largo por el ancho del material, el cual es constante a lo largo de todo el ensayo.

$$\text{Superficie caucho: } 14\ cm\ (largo) \cdot 3{,}7\ cm\ (ancho) = 51{,}80\ cm^2$$

Para el caso del cepillo, se ha calculado mediante el producto del conjunto de hilos existente en el cepillo por la superficie de cada uno de ellos. Es importante remarcar que se ha considerado que la superficie de contacto va a permanecer constante durante el ensayo, aunque en la realidad ésta varíe ligeramente posteriormente a medida que se desgasta el elemento que aplica la carga.

$$\text{Superficie cepillo: } 56\ [conjuntos\ hilos] \cdot \left(\pi \cdot \frac{(0{,}48\ cm)^2}{4}\right)\left[\frac{superficie}{conjunto\ hilo}\right] = 10{,}13\ cm^2$$

Así pues, en la Tabla 3 se recogen las dimensiones de la superficie de contacto en función del material empleado.

Tabla 3: Superficie de contacto en relación con los diferentes materiales empleados.

Material	Superficie de contacto (cm^2)
Caucho	51,80
Cepillo	10,13

Y, simplemente dividiendo la masa actuante entre la superficie de contacto obtenemos la presión que se aplica a la probeta, las cuales se presentan en la Tabla 4. La presión de contacto sin carga aplicada es de 0,35 kg/cm^2 en el caso del caucho y de 1,82 kg/cm^2 para el caso del cepillo.

Tabla 4: Masa aplicada, presión de contacto y porcentaje de incremento de masa en la zona de contacto en relación con los diferentes materiales empleados.

Material	Carga aplicada (kg)	Presión de contacto (kg/cm^2)
Caucho	3,89	0,59
	8,93	0,89
	13,97	1,19
	16,52	1,34
Cepillo	6,15	3,70
	8,93	4,55

3.4.2. Elementos de contacto

3.4.2.1. Caucho NBR

Este tipo de caucho presenta buenas características frente a la resistencia a tracción, compresión, flexión, así como a la degradación frente a los aceites. Se muestra en la Ilustración 19 la apariencia del caucho.

Ilustración 19: Caucho NBR empleado. Fuente: propia.

Las características que presenta el caucho han sido proporcionadas por la empresa "PLÁSTICOS GUCOBA 2012 S.L.L." ubicada en Maliaño (Cantabria) y son las que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Características del caucho NBR.

Propiedades		Unidades	Valores
Composición	Acrilonitrilo Butadieno		
Color	Negro		
Peso específico		1,5 ± 0,05	g/cm^3
Dureza		65 ± 5	SHORE A
Carga de rotura		≥ 3,5	MPa
Alargamiento en rotura		≥ 280	%
Resistencia al desgarro		15	N/mm
Temperatura mínima de desgarro		-30	ºC
Temperatura máxima de desgarro		120	ºC
Envejecimiento por aire caliente	72h x 70ºC		
Inc. Dureza		5	SHORE A
Inc. Carga de rotura		-15	%
Inc. Alargamiento		-40	%

3.4.2.2. Cepillos

Los cepillos de acero latonado empleados fueron cepillos manuales de 4 hileras de acero recto. Se muestra en la Ilustración 20 la apariencia de dichos cepillos.

Ilustración 20: Cepillos de acero latonado empleados. Fuente: propia.

Los cepillos fueron suministrados por la empresa "SumIdeCant. S.L" y las características que presentan aparecen recogidas en la Tabla 6:

Tabla 6: Características de los cepillos de acero latonado.

Propiedades	Unidades	Valores
Contenido en Carbono	%	0,65 – 0,85
Contenido en Manganeso	%	0,40 – 0,70
Contenido en Sílice	%	0,15 – 0,30
Resistencia	N/mm^2	1.950 – 3.150
Área del mechón de púas	mm^2	0,18
Saliente púas	mm	30
Número de hileras	-	4
Número de alambres/mechón	-	44

3.4.3. Equipos auxiliares

Para poder analizar los diferentes datos que nos proporcionan los ensayos, se recurrió al empleo de tres equipos de toma de datos, así como de sus respectivos softwares.

3.4.3.1. Adquisición de datos

Con el objetivo de obtener las deformaciones verticales se empleó el software 'Dewesoft'. Dichas deformaciones se obtuvieron mediante un *LVDT* o transformador diferencial de variador lineal que está acoplado junto a la máquina de ensayo, el cual se muestra en la Ilustración 21. Tras calibrar el programa se estableció una toma de información cada 0,0083 segundos proporcionando el número de ciclos aplicado y la deformación vertical en centímetros, entre otros datos.

Ilustración 21: LVDT acoplado a la máquina de ensayo. Fuente: propia.

3.4.3.2. Cámara termográfica

El empleo del software 'Optris PI Connect' fue utilizado para la obtención de la temperatura que se alcanza en la zona de contacto entre probeta y elemento a lo largo de todo el ensayo mediante una cámara termográfica. Este programa permite analizar los datos incluso después de realizar las mediciones y poder obtener valores máximos o medios a lo largo de todo el ensayo. En la Ilustración 22 se muestra la cámara empleada.

Ilustración 22: Cámara empleada en un trípode para poder analizar las temperaturas de forma estática. Fuentes: propia (izquierda) y optris.es (derecha).

3.4.3.3. Escáner láser

El software '*AMES Engineering*' fue empleado junto al escáner de textura láser portátil para proyectar un barrido láser en unas dimensiones de aproximadamente 10x10 cm. Así, se pudo obtener una representación de cómo es la macrotextura de la probeta antes y después del ensayo permitiendo comparar visualmente las variaciones producidas objeto del ensayo. En la Ilustración 23 se muestra el escáner láser empleado.

Ilustración 23: Escáner de AMES Engineering. Fuente: propia.

Las características del escáner láser son las que se presentan a continuación en la Tabla 7.

Tabla 7: Propiedades del escáner láser.

Propiedades	Unidades	Valores
Resolución vertical	mm	0,01
Resolución longitudinal	mm	0,0496
Resolución transversal	mm	0,0415
Área de escaneo	cm	10,16 x 10,16
Tiempo completo de escaneo	s	90

3.5. Condiciones de ensayo

Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente, con valores próximos a 25ºC, que es la temperatura fijada en la normativa para el ensayo de pérdida de partículas de probetas de mezclas bituminosas drenantes (UNE EN 12697 – 17). Las condiciones de ensayo variaron en función del material que transmitía las cargas a las losas. A continuación, se presentan para cada uno de ellos dichas variaciones.

3.5.1. Abrasión realizada aplicando caucho

En cuanto a los ensayos realizados aplicando caucho, se establecieron diferentes velocidades de pasada, o, dicho de otra forma, diferentes ciclos por minuto, así como diferentes cargas aplicadas, cuyos valores fueron variando entre 4 y 16,5 kg.

Se emplearon tres velocidades diferentes para aplicar diferentes cargas, o esfuerzos superficiales, sobre la probeta.

- Velocidad alta: La frecuencia de ciclo es de (42 ± 1) pasadas por minuto o (21 ± 0,5) ciclos por minuto.
- Velocidad media: La frecuencia de ciclo es de (16 ± 1) pasadas por minuto o (8 ± 0,5) ciclos por minuto.
- Velocidad baja: La frecuencia de ciclo es de (8 ± 1) pasadas por minuto o (4 ± 0,5) ciclos por minuto.

Un ciclo consiste en la acción de dos pasadas (ida + vuelta) con el elemento de contacto.

Además, se aplicaron diferentes cargas para lograr generar más daño sobre las probetas. Las condiciones de ensayo realizadas empleando caucho, tratando siempre de generar una pérdida artificial de partículas, pueden verse recogidas de forma más clara en la Tabla 8.

Tabla 8: Condiciones de los distintos ensayos con caucho NBR.

Porcentaje de huecos = 22%		**Masa añadida**			
		4 kg	9 kg	14 kg	16,5 kg
Tipo de velocidad	Velocidad alta	✔	✔	-	-
	Velocidad media	-	-	✔	✔
	Velocidad baja	-	-	-	✔

Dado que con la velocidad alta no se observó que se produjese un desprendimiento de partículas, se optó por reducir la velocidad a la denominada velocidad media para que el contacto caucho – probeta fuese más lento y se pudiese producir una mejor adherencia entre ellos. Además, se decidió ensayar a una velocidad inferior a la anteriormente mencionada, la velocidad baja, con la mayor carga.

3.5.2. Abrasión realizada aplicando cepillos

En relación con los ensayos en los que se aplicaron cepillos se han considerado 2 tipologías de ensayo, denominadas 'solicitación alta' y 'solicitación baja', que junto a los 3 porcentajes de huecos diferentes de las probetas porosas se obtienen en total 6 condiciones de ensayo diferentes. Además, para cada condición de ensayo anterior, se añadieron fibras de aramida tipo "*PULP*", por lo que se obtienen en total 12 condiciones de ensayo posibles. Para cada condición de ensayo se han realizado 8 ensayos para así poder establecer comparaciones a igualdad de ensayos realizados.

El tipo de ensayo denominado 'solicitación alta' consiste en la aplicación de una carga de 6 kg durante 1.000 ciclos. El tipo de ensayo denominado 'solicitación baja' consiste en la aplicación de una carga de 9 kg durante 400 ciclos.

Los resultados que se mostrarán posteriormente son el fruto de los 123 ensayos que se han realizado para este trabajo. Dado que los primeros ensayos sirvieron para probar, observar y definir el tipo de solicitación, el número de ensayos que finalmente se emplearon para analizar la pérdida de partículas de las mezclas PA empleando cepillos asciende a 96.

Los porcentajes de huecos de las probetas fueron: 22%, 24% y 27%. Realmente, los porcentajes de huecos variaron ligeramente, pero para simplificar la nomenclatura de las mezclas se prefirió emplear valores sin decimales. Así pues, las diferentes condiciones de ensayo que se han realizado con los cepillos se recogen en la Tabla 9.

Tabla 9: Condiciones de los distintos ensayos con cepillos.

			Porcentaje de huecos		
			22%	24%	27%
Con fibras	Tipo de solicitación	Solicitación alta (6 kg+ 1.000 ciclos)	ALTO-22-CON	-	ALTO-27-CON
		Solicitación baja (9 kg + 400 ciclos)	BAJO-22-CON	-	BAJO-27-CON
Sin fibras	Tipo de solicitación	Solicitación alta (6 kg + 1.000 ciclos)	ALTO-22-SIN	ALTO-24-SIN	ALTO-27-SIN
		Solicitación baja (9 kg + 400 ciclos)	BAJO-22-SIN	BAJO-24-SIN	BAJO-27-SIN

Como medida de control, se evaluó la temperatura en la superficie de contacto que alcanzaban las losas con los cepillos. En la Ilustración 24 se muestra una toma de la grabación de la temperatura obtenida mediante la cámara térmica. En color amarillo y rojo se muestran las zonas que más temperatura alcanzan la mezcla y el elemento de contacto, en este caso un cepillo. En el instante en que se ha tomado esta imagen, el valor máximo que se alcanza es de 77,7ºC. Se aprecia una franja longitudinal fruto del paso del cepillo en el que los colores tienden a ser más cálidos y por tanto tienen una mayor temperatura.

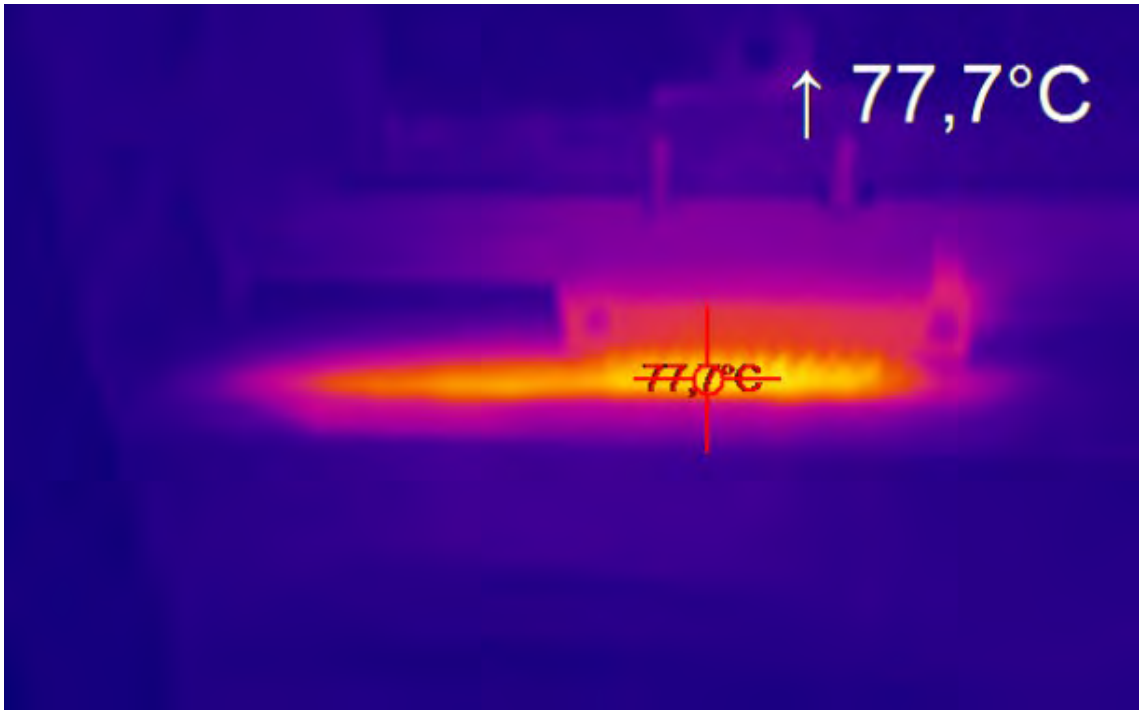


Ilustración 24: Captura de la cámara térmica en la que se presenta la temperatura que alcanzan la mezcla y el cepillo. Los valores que se muestran se refieren a la máxima temperatura que alcanza el conjunto de elementos. Fuente: propia.

3.5.3. Cálculo de la pérdida de partículas

El análisis para obtener la pérdida de partículas de las probetas varía en función del material de contacto empleado, dado que el rendimiento de ambos fue muy desigual.

3.5.3.1. Pérdida de partículas empleando caucho

Se recolecta todo el material que se desprende del ensayo, dado el gran desgaste que sufre el bloque de caucho que se emplea como elemento de contacto (como se puede observar en la Ilustración 25). La pérdida de partículas se calcula tamizando el material obtenido en seco por el tamiz 2 mm. Se pesa ese material y se obtienen así los gramos de árido grueso que se han desprendido de la probeta.

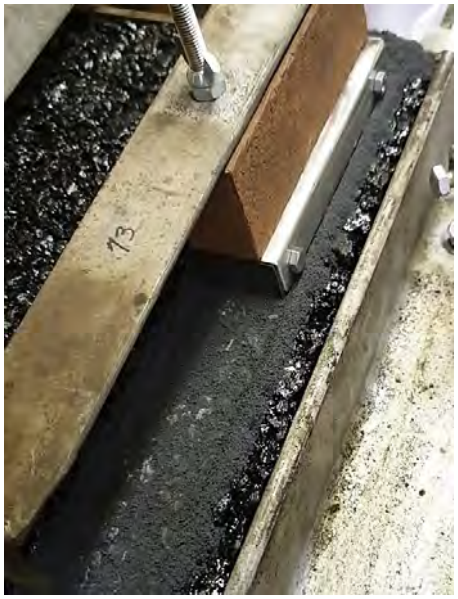


Ilustración 25: Probeta ensayada con caucho NBR. Se observa que el caucho se desprende por los bordes. Fuente: propia.

Se excluye en el cálculo de la pérdida de partículas el árido fino y el filler dada la imposibilidad de separarlos respecto al caucho, tanto por vía seca como por vía húmeda, y su menor influencia respecto al árido grueso. En la Ilustración 26 se muestran el árido junto con el caucho obtenido producto del ensayo.

Ilustración 26: Caucho junto con áridos recolectados tras el ensayo. Fuente: propia.

3.5.3.2. Pérdida de partículas empleando cepillos

El cálculo de la pérdida de partículas se realiza mediante la diferencia de pesadas de la probeta antes y después de ser ensayada. Debido a que, tras realizar el ensayo, con frecuencia quedan partículas sobre la probeta que han perdido claramente la adhesión con respecto a la mezcla, se roza la superficie con un cepillo de púas blandas para desprender el material suelto. Asimismo, las posibles púas que pudiesen haber quedado incrustadas procedente de los cepillos de ensayo entre los huecos son retiradas también.

3.5.4. Cálculo de la deformación

Este análisis se realiza únicamente con los cepillos, dado que fueron los únicos que generaron una pérdida de partículas significativa.

A continuación, en las dos siguientes ilustraciones (Ilustración 27 e Ilustración 28) se muestran las posiciones de las púas en los cepillos al realizar el ensayo. Se puede observar como varía la orientación de las púas, lo cual incide directamente en la medida de la deformación. En la primera ilustración las púas están en una posición vertical mientras que en la posterior las púas aparecen más horizontales.

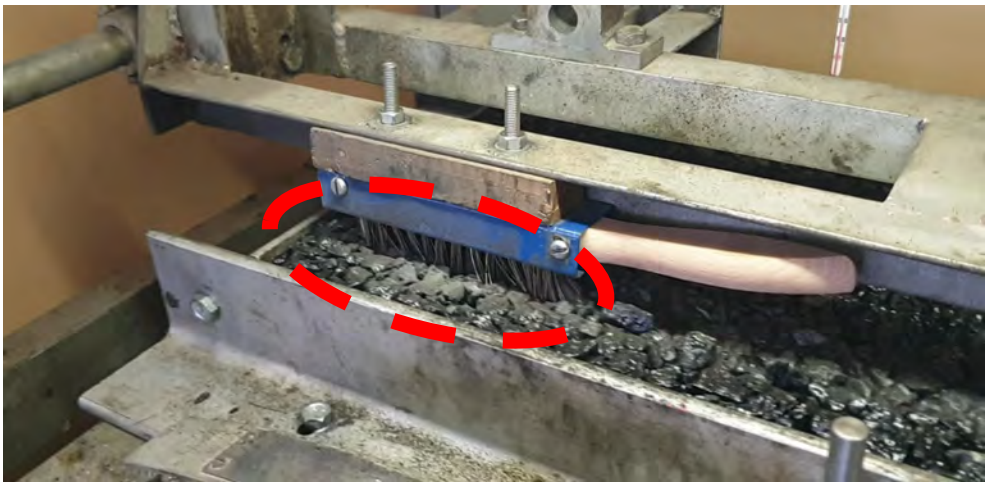


Ilustración 27: Ensayo empleando cepillos de acero latonado en el extremo izquierdo de la probeta. Fuente: propia.

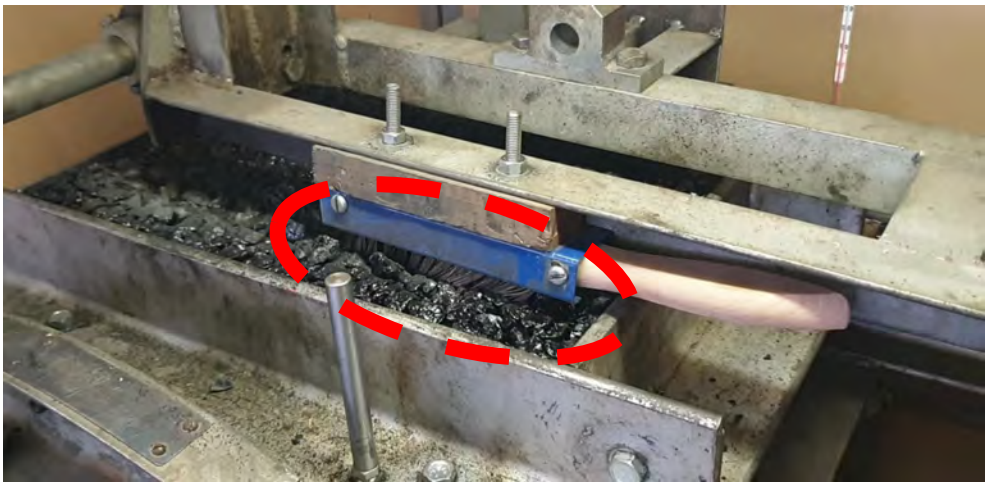


Ilustración 28: Ensayo empleando cepillos de acero latonado en el extremo derecho de la probeta. Fuente: propia.

A continuación, se muestran en la Ilustración 29 los resultados obtenidos mediante el software de adquisición de datos. En la parte superior y de color verde se muestra una onda sinusoidal correspondiente al giro del plato que mueve el carretón. En la parte inferior y en color azul claro se muestra el movimiento vertical que experimenta el LVDT.

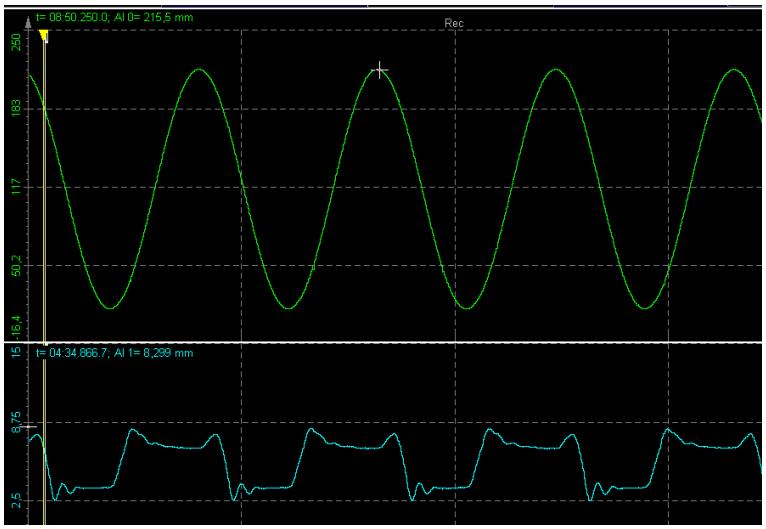


Ilustración 29: Información obtenida del software Dewesoft durante 4 ciclos de un ensayo. Fuente: propia.

Mediante el escáner láser se procede a escanear la probeta antes y después de realizar los ensayos, para los dos elementos de contacto empleados. Mediante un abanico de colores se designa la profundidad del escaneo a un color. El empleo de dichos colores está comprometido a la configuración propia del software dado que realiza una media de los valores mínimos y máximos para asignarlos. Para la obtención de los modelos, se ha tratado de situar el escáner exactamente en la misma posición antes y después, para que las comparaciones fuesen más precisas.

A continuación, se muestra en la Ilustración 30 una comparativa entre el antes y el después de aplicar un ensayo para poder observar el surco producido por los cepillos.

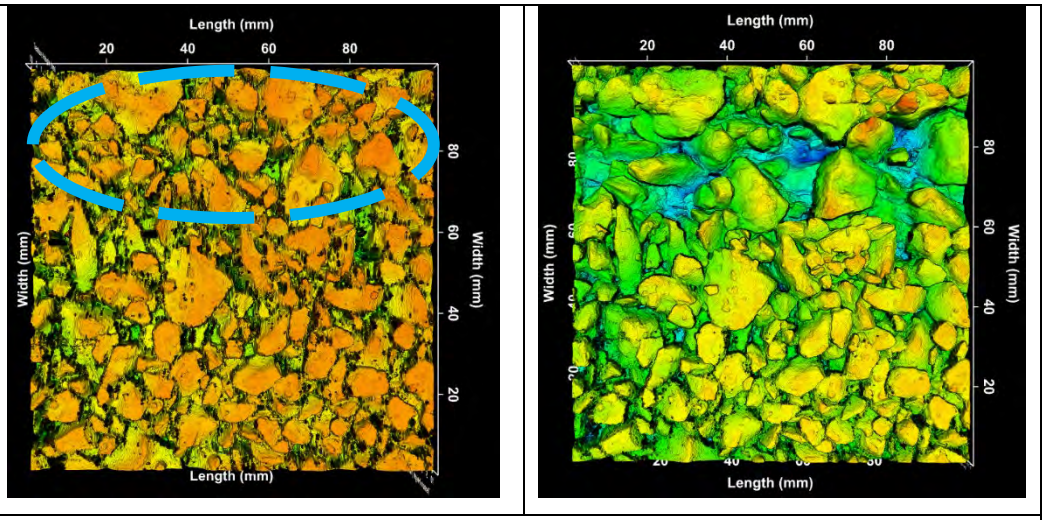


Ilustración 30: Comparativa realizada con el software 'AMES Engineering' entre el antes (izquierda) y el después (derecha) en una mezcla PA al realizar un ensayo en el que se emplean cepillos. Fuente: propia.

Debido a la deformación que experimentan los cepillos de forma natural al aplicar la carga de forma continuada sobre la probeta, se decidió aplicar un factor corrector a la deformación obtenida que tuviera en cuenta este factor. Debido a que el LVDT mide deformaciones totales, el valor obtenido incluye la deformación que también sufre el cepillo. Por ello, se tomó como referencia la deformación que sufrieron 5 cepillos tras el ensayo, y se adoptó el valor de 0,2 cm. Dicho valor, ha sido restado de los resultados obtenidos. Para obtener un valor de la deformación, se decidió aplicar el criterio siguiente:

De los 10 primeros ciclos se halla el valor medio de los valores máximos (A), así como el valor medio de los valores mínimos (C). De la misma forma, se hallan los valores medios máximos (B) y mínimos (D) de los 10 últimos ciclos. Se restan los valores medios máximos de los 10 primeros y 10 últimos ciclos (A – B = E) y los valores medios mínimos de los 10 primeros y 10 últimos ciclos (C – D = F). Se calcula la media de los valores E y F y este será el resultado de la deformación.

A continuación, y de forma más visual se muestra en la siguiente Ilustración 31 un gráfico en el que se esquematiza la forma de obtención de la deformación anteriormente mencionada:

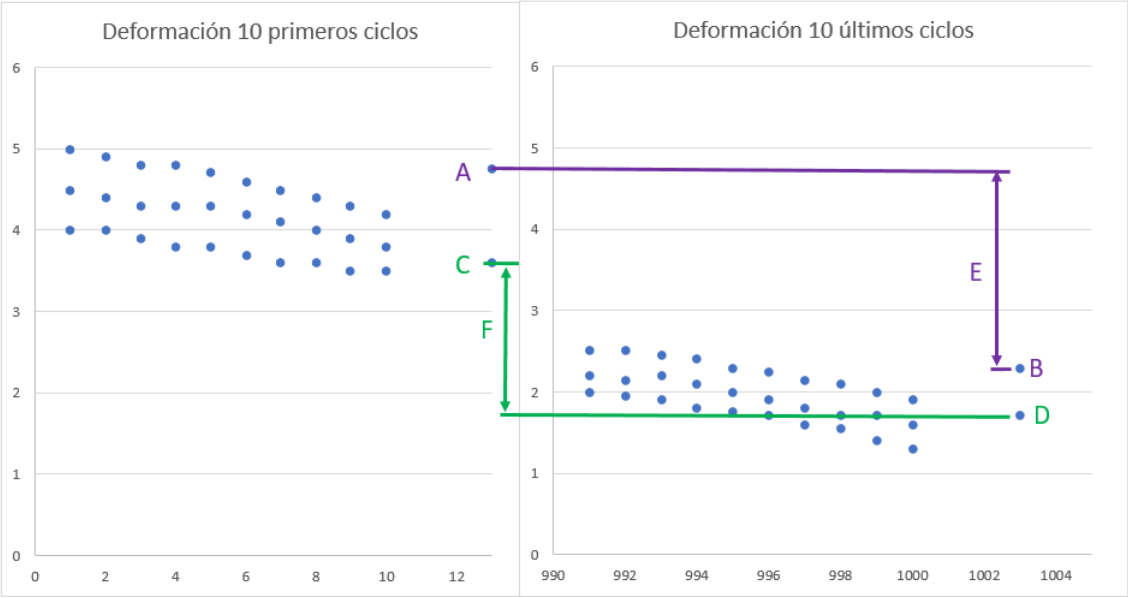


Ilustración 31: Metodología de cálculo de la deformación. Fuente: propia.

Con el cálculo de la deformación se pretende comprobar si puede ser una forma de medir indirectamente la pérdida de partículas.

3.5.5. Cálculo de la temperatura máxima

De cara a caracterizar lo mejor posible el ensayo, se evaluó la temperatura máxima que se alcanzaba con cada elemento de contacto sobre la superficie de la probeta. Así, los valores obtenidos con la cámara térmica fueron registrados cada 2 segundos. De ese conjunto de valores, la temperatura más alta registrada es la que se considere como temperatura máxima alcanzada.

3.6. Diseño de las mezclas porosas

Todas las mezclas empleadas para los ensayos corresponden a probetas asfálticas porosas (PA) con un tamaño máximo del árido de 16 mm destinadas a la capa de rodadura con un espesor de 5 cm. El porcentaje de huecos fue variando de cara a analizar la sensibilidad del ensayo, por ese motivo se partió de la mezcla con menos huecos hacia otras con valores mayores. Todas las mezclas, tanto de referencia como experimentales, superaron los requisitos establecidos en el PG-3 para las mezclas porosas, a excepción de la diseñada con 27% de huecos sin fibras, dado que su bajo porcentaje de finos provocó que el ligante escurriera. Asimismo, la mezcla con un 24% de huecos sin fibras no superó un ensayo de los marcados por el PG-3.

- La mezcla 'PA 16 – 22% huecos – SIN' fue la inicialmente empleada en el diseño y caracterización de los ensayos llevados a cabo. Se ha tomado como referencia para los ensayos dado que es la que habitualmente se emplea en las capas de rodadura.
- La mezcla 'PA 16 – 22% huecos – CON' ha sido diseñada partiendo de la dosificación anterior añadiendo fibras de aramida.
- La mezcla 'PA 16 – 24% huecos – SIN' ha sido diseñada exclusivamente para este proyecto, incrementando el porcentaje de huecos de la anterior mezcla.
- La mezcla 'PA 16 – 27% huecos – SIN' se diseñó con el objetivo de evaluar en profundidad el impacto tanto de los huecos como de las fibras. Así pues, se decidió diseñar una mezcla con un muy alto contenido de huecos.
- La mezcla 'PA 16 – 27% huecos – CON' parte de la misma dosificación de la mezcla anterior añadiendo fibras de aramida. Para estimar el impacto sobre la pérdida de partículas empleando el nuevo ensayo, esta mezcla se diseñó y fabricó con fibras, superando todos los ensayos del PG-3, incluido el del escurrimiento de ligante.

Se procede a mostrar en una única gráfica la granulometría de las mezclas empleadas con su correspondiente ajuste en peso (Ilustración 32).

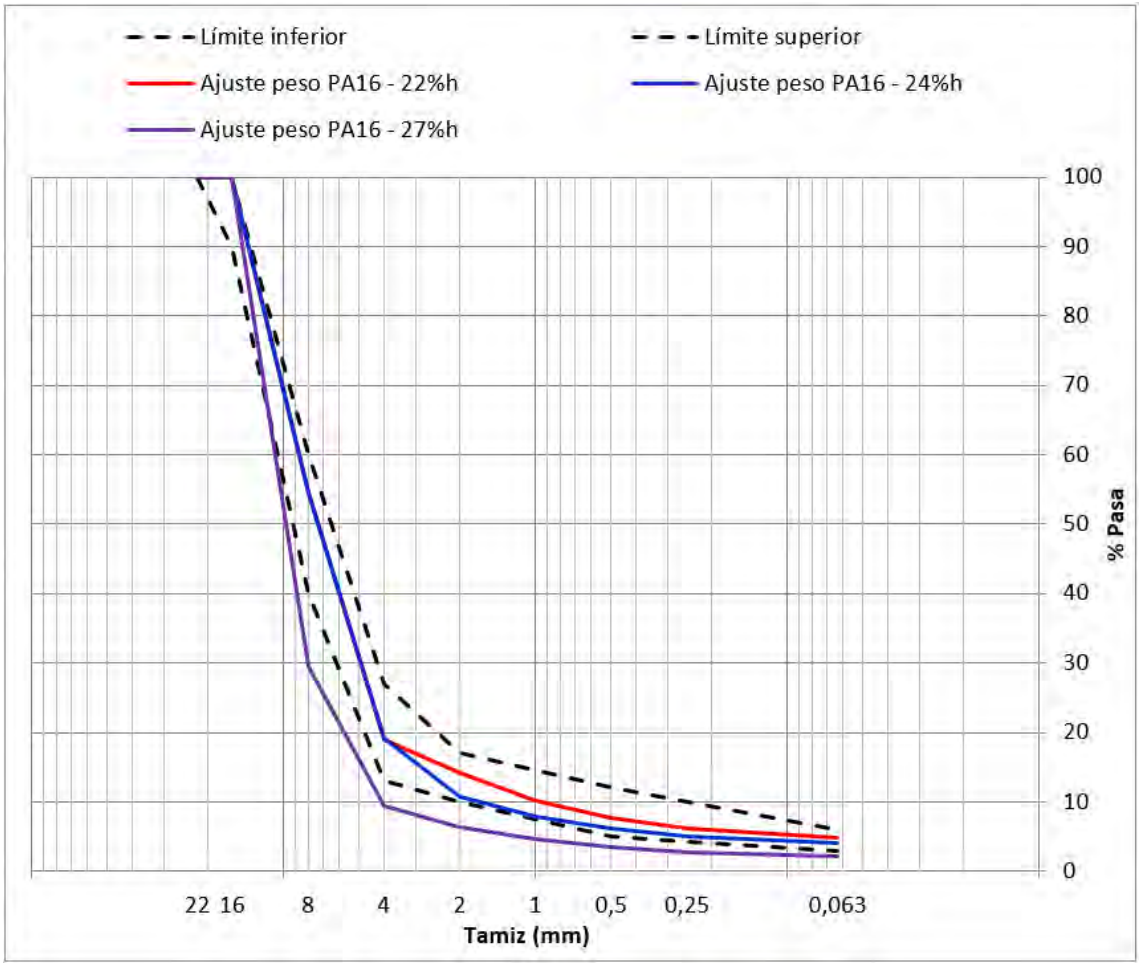


Ilustración 32: Granulometría de las mezclas PA empleadas. Fuente: propia.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos durante el diseño de cada una de las mezclas utilizadas en la Tabla 10.

Tabla 10: Valores de los ensayos del PG-3 de las diferentes mezclas PA-16.

	Porcentaje de betún sobre mezcla (%)	**Contenido de huecos (%) (UNE-EN 12697-8)**	**Sensibilidad al agua (%) (UNE-EN 12697-12)**	**Escurrimiento de ligante (%) (UNE-EN 12697-18)**	**Pérdida de partículas en seco (%) (UNE-EN 12697-17)**	**Pérdida de partículas en húmedo (%) (NLT-362/92)**
Límites PG-3	*> 4,3*	*≥ 20*	*≥ 85*	*0*	*≤ 20**	*< 35 (T00 a T1)*
PA 16– 22% HUECOS – SIN	4,5	22,5	93	0	9,2 ± 1,5	10,7 ± 2,0
PA 16 – 22% HUECOS – CON	4,5	22,2	93	0	5,9 ± 1,5	10,2 ± 2,4
PA 16 – 24% HUECOS – SIN	4,3	24,2	76	0,2	11,1 ± 4,8	14,2 ± 1,8
PA 16 – 27% HUECOS – CON	5,3	27,5	89	0	14,3 ± 3,1	17,9 ± 5,0

*** Valores más exigentes en función de la categoría de tráfico pesado**

Se puede observar que todas las mezclas a excepción de la 'PA 16 – 24% HUECOS – SIN' han cumplido los ensayos especificados por la normativa española para este tipo de mezcla, ajustándose a los valores especificados correctamente.

La mezcla anteriormente mencionada no alcanzó el valor límite en el ensayo de sensibilidad al agua que indica la normativa. Asimismo, en el ensayo de escurrimiento de ligante, se superó el valor límite mínimamente. Dado que es una mezcla experimental y el uso principal destinado es para ensayos de laboratorio no supone un grave problema el hecho de no cumplir estrictamente los valores marcados por la normativa.

Igualmente, la mezcla 'PA 16 – 27% HUECOS – SIN' no pudo caracterizarse pues su exceso de ligante impidió que pudieran realizarse las probetas necesarias. No obstante, no se presentaron problemas para poder fabricar las losas de ensayo objeto de este estudio.

Apartado 4: RESULTADOS

En el presente capítulo se procederá a mostrar los resultados que se han obtenido de los diferentes ensayos con la metodología experimental anteriormente descrita.

Para determinar si los datos obtenidos son estadísticamente significativos, se recurrió al empleo del programa 'MiniTab 17 Statistical Software'. Se consideró un intervalo de confianza del 95%, por lo que los resultados cuyos p-valores fuesen superiores al 0,05 no mostraron diferencias significativas desde el punto de vista estadístico.

4.1. Resultados de los ensayos realizados con caucho

Los resultados del ensayo mostraron una alta variabilidad, por lo que se modificaron las condiciones de ensayo de forma continuada con el objetivo de producir una pérdida de partículas en la losa.

Los resultados fueron altamente irregulares. Inicialmente se tantearon diferentes condiciones con el objetivo de lograr un comportamiento homogéneo que obtuviera unos resultados coherentes para este tipo de material. Se modificó por lo tanto el número de ciclos totales, el número de ciclos por minuto, así como la presión ejercida en la probeta. En todos los ensayos se empleó el mismo tipo de mezcla, la que se consideró de referencia con un 22% de huecos y no contiene fibras en su interior.

A continuación, se muestra la pérdida de partículas en función de las variables modificadas durante el ensayo en la Tabla 11.

Tabla 11: Resultados de los ensayos realizados con caucho.

Material empleado	N.º ciclos por minuto	N.º ciclos totales	Presión aplicada (kg/cm^2)	Pérdida de partículas (g)
Caucho NBR	4	200	1.34	1.5
	8	200	1.19	8.2
				15.4
				-0.3
			1.34	6.5
		360	1.19	-3.3
	21.5	200	0.89	-2.6
		400	0.59	-1.0

A pesar de los esfuerzos llevados a cabo, los datos obtenidos no resultaron ser coherentes debido a que, a igualdad de condiciones de ensayo, la probeta podía perder áridos o no. Es más, dado que el caucho tenía un contacto abrasivo con la probeta, éste se deshacía e incrementaba la masa final de la probeta, haciendo inviable evaluar una posible pérdida de partículas. Los valores negativos en la pérdida de partículas son el resultado del caucho alojado entre los huecos de la mezcla.

4.2. Resultados de los ensayos realizados con cepillos

4.2.1. Pérdida de partículas

A continuación, se muestran los resultados obtenidos al ensayar las probetas con los cepillos, presentando los resultados de las mezclas sin fibras y de las probetas con fibras en primer lugar. Posteriormente, se mostrarán los resultados para cada porcentaje de huecos en los que el análisis se centrará en la influencia que tienen las fibras sobre la pérdida de partículas. Para cada condición de ensayo se han ensayado 8 probetas. Los valores que se muestran en las gráficas presentan el valor medio de los resultados, mientras que las barras muestran la desviación típica.

4.2.1.1. Ensayos en las probetas sin fibras

A continuación, se muestra en la Ilustración 33 los valores de la pérdida de partículas en cada condición de ensayo.

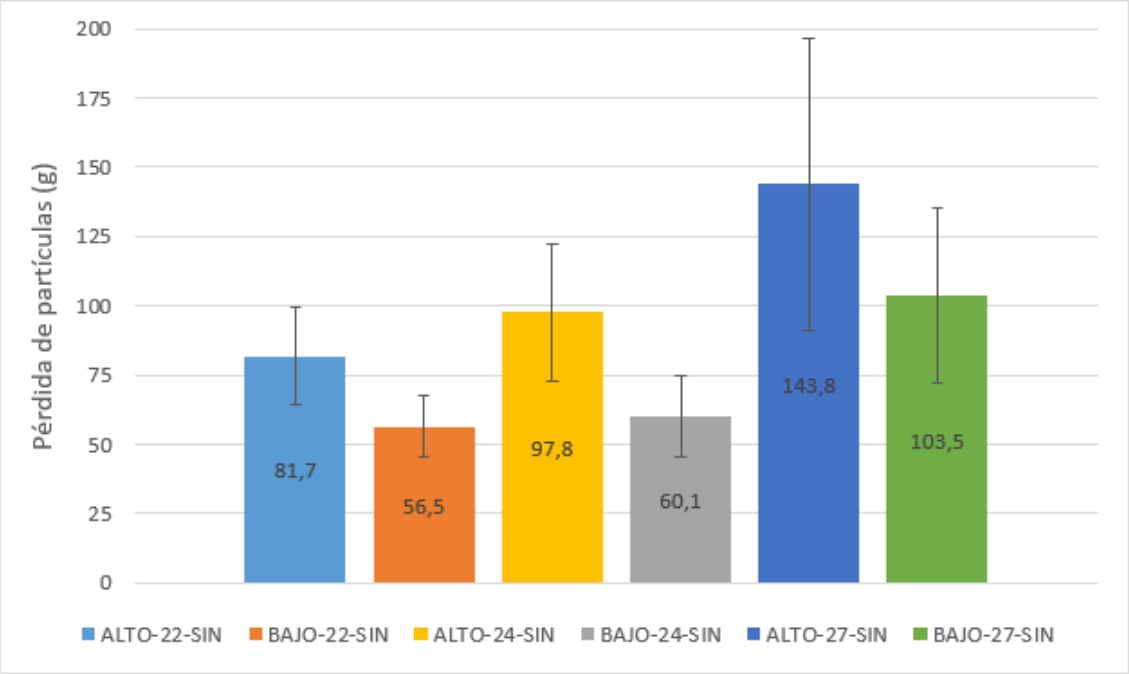


Ilustración 33: Pérdida de partículas en los ensayos sin fibras. Análisis enfocado en los huecos. Fuente: propia.

Se aprecia, a la vista de estos resultados, que la metodología propuesta es sensible a la variable de porcentaje de huecos. Así, se observa que todos los valores son coherentes, pues a mayor porcentaje de huecos, mayor es la pérdida de partículas.

Realizando un análisis según el tipo de solicitación, para el caso de la solicitación baja, se produce una pérdida de partículas mayor cuando el porcentaje de huecos es más alto. Para el caso de la solicitación alta, la pérdida de partículas es mayor cuando el porcentaje de huecos es mayor. Además, comparando cada solicitación de carga respecto al mismo porcentaje de huecos, la solicitación alta siempre desprende una mayor cantidad de partículas.

Tras analizar estadísticamente los datos, se observa que, para los porcentajes de huecos que están muy próximos entre sí, es decir entre el 22% y el 24%, no se muestran diferencias significativas independientemente del tipo de solicitación aplicada. Para los porcentajes de huecos más alejados (22% y 27%; 24% y 27%) sí existen diferencias significativas en los resultados de pérdida de partículas para cualquier tipo de solicitación.

La Tabla 12 muestra en las dos primeras columnas de datos el porcentaje que aparece frente al 22% de huecos. En la última columna se comparan el 24% con el 27%. De color naranja se muestran los resultados en los que no hay diferencias significativas mientras que de color azul se muestran los que sí.

Tabla 12: Resultados de los p-valores de la pérdida de partículas en las mezclas sin fibras.

			22% y 24%	**22% y 27%**	**24% y 27%**
Sin fibras	Tipo de solicitación	Solicitación alta	0,153	0,001	0,031
		Solicitación baja	0,583	0,007	0,010

4.2.1.2. Ensayos en las probetas con fibras

A continuación, se muestra en la Ilustración 34 los valores de la pérdida de partículas en cada condición de ensayo.

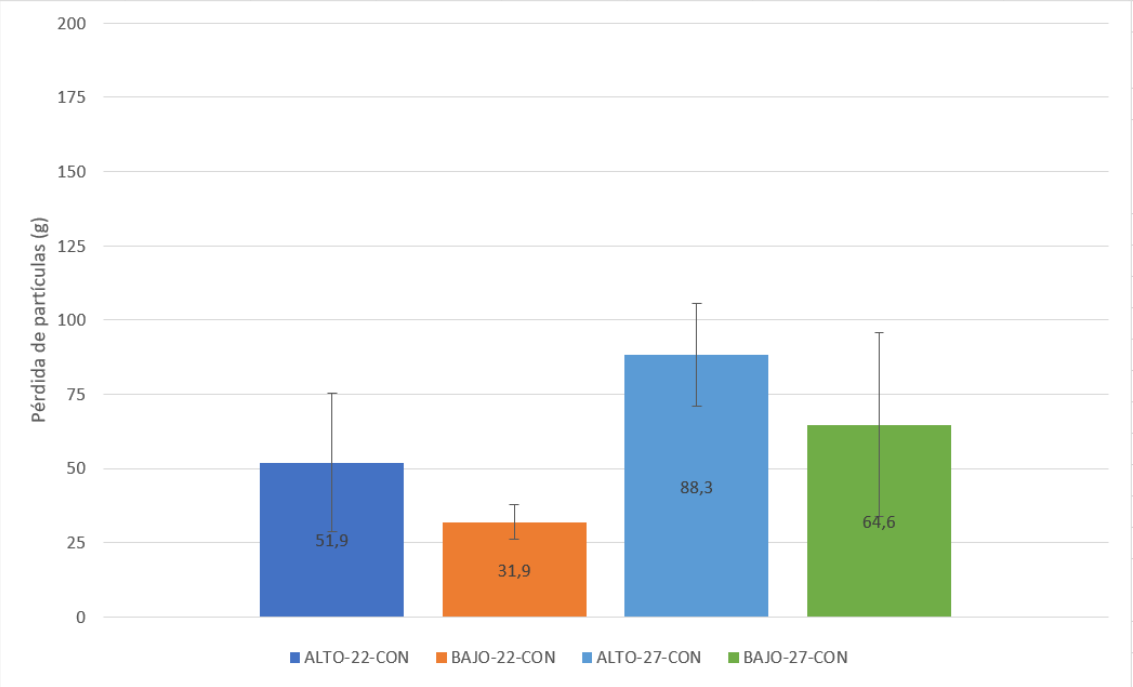


Ilustración 34: Pérdida de partículas en los ensayos con fibras. Análisis enfocado en los huecos. Fuente: propia.

Si añadimos fibras a la mezcla observamos que la tendencia que muestran coincide con las que no tienen fibras. Se produce una mayor pérdida de partículas para la solicitación alta que para la solicitación baja para ambos porcentajes de huecos. Asimismo, para la mezcla que presenta un mayor porcentaje de huecos, la pérdida de partículas es superior para cada tipo de solicitación aplicada.

Asimismo, tras analizar estadísticamente los datos, se concluye que, para las mezclas que sí contienen fibras, existen diferencias significativas para cada tipo de ensayo realizado, independientemente del tipo de solicitación aplicada.

La Tabla 13 muestra en la columna de datos el porcentaje de huecos comparado con el 22%. De color azul se muestran los resultados en los que sí hay diferencias significativas.

Tabla 13: Resultados de los p-valores de la pérdida de partículas en las mezclas con fibras

			22% y 27%
Con fibras	Tipo de solicitación	Solicitación alta	0,012
		Solicitación baja	0,008

4.2.1.3. Comparativa de los ensayos sin fibras y con fibras

Para poder evaluar el impacto mecánico de las fibras, se procede a mostrar los resultados en función de si llevan fibras o no, fijando el porcentaje de huecos.

Los valores para las probetas con el 22% de huecos se presentan en la Ilustración 35.

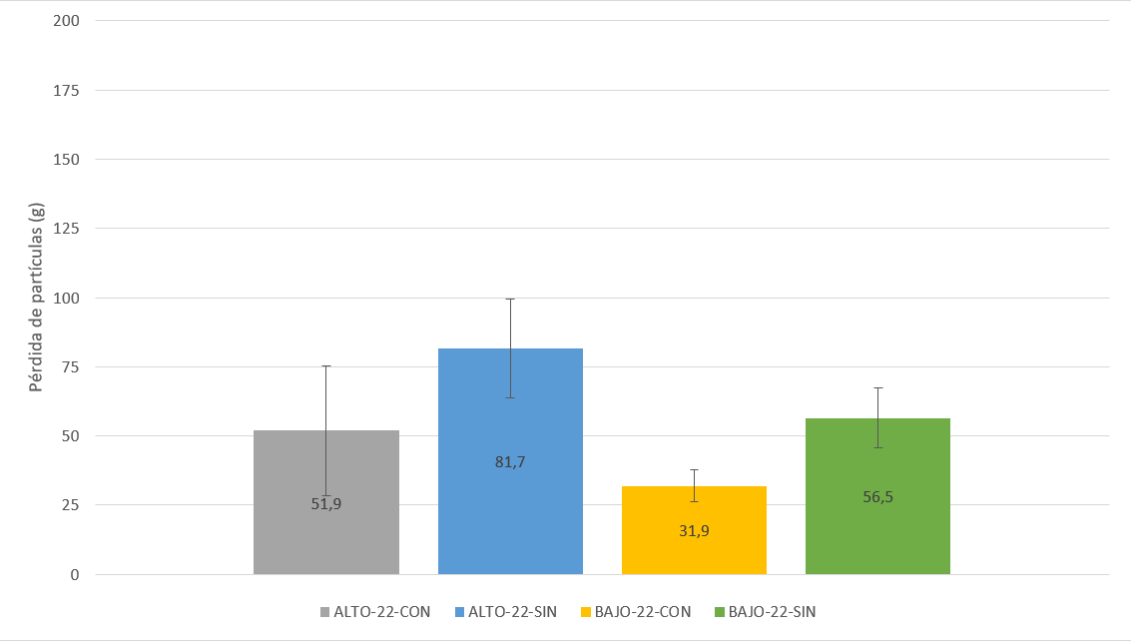


Ilustración 35: Comparativa de pérdida de partículas entre probetas con fibras y sin fibras para un porcentaje de huecos del 22%. Fuente: propia.

Y para los ensayos en los que se fijaron el porcentaje de huecos en un 27, los resultados de pérdida de partículas son los que se recogen en la Ilustración 36.

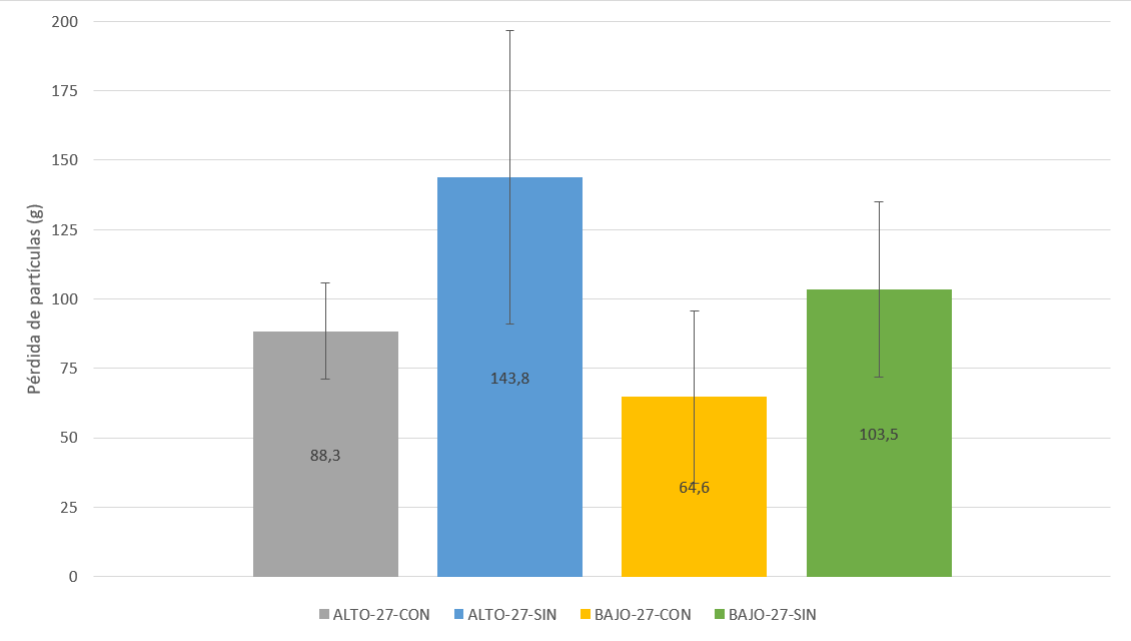


Ilustración 36: Comparativa de pérdida de partículas entre probetas con fibras y sin fibras para un porcentaje de huecos del 27%. Fuente: propia.

Como se muestra en la Ilustración 37 las ratios de pérdida de partículas en mezclas con fibras respecto a mezclas sin fibras son muy semejantes para los 2 porcentajes de huecos analizados, aproximadamente 0,60. Es decir, el impacto de las fibras es similar independientemente de los huecos que contenga la mezcla y del tipo de solicitación que se aplique.

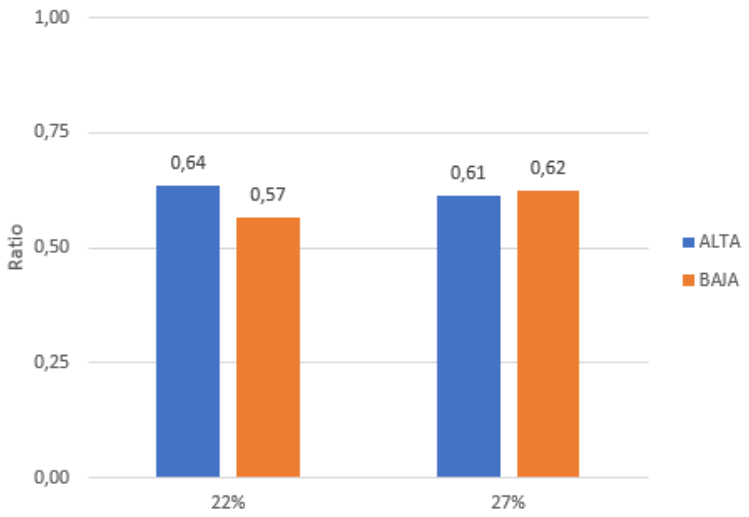


Ilustración 37: Ratio de pérdida de partículas entre mezclas con fibras y mezclas sin fibras. Fuente: propia.

Así pues, la reducción de pérdida de partículas en mezclas que sí contienen fibras es de aproximadamente un 40% respecto a las mezclas que no las contienen.

4.2.2. Deformación

Los valores de la deformación obtenida se presentan en la Ilustración 38 e Ilustración 39 en función de si incorporan fibras o no.

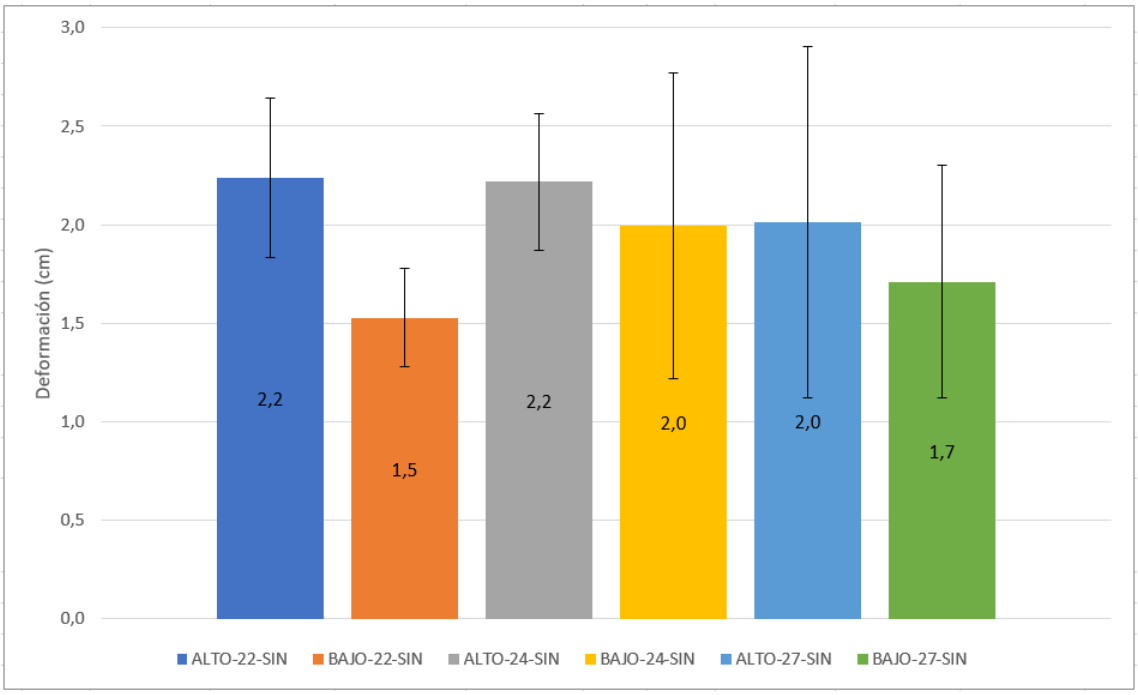


Ilustración 38: Deformación de los ensayos sin fibras. Análisis enfocado en los huecos. Fuente: propia.

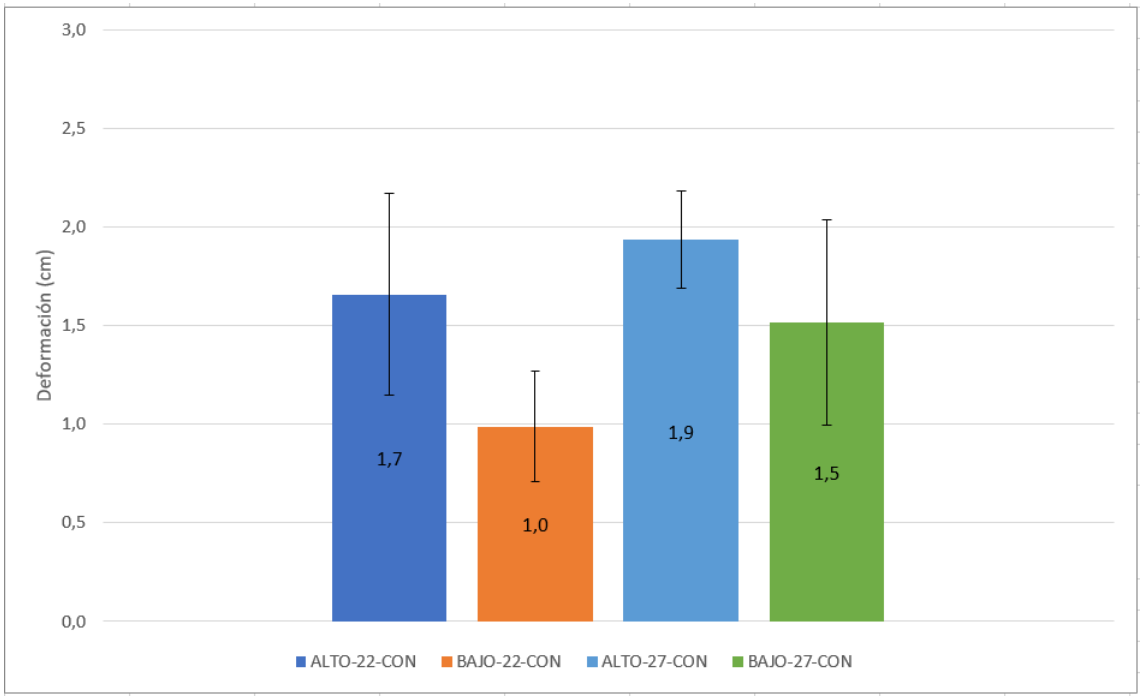


Ilustración 39: Deformación de los ensayos con fibras. Análisis enfocado en los huecos. Fuente: propia.

A la vista de los resultados, los valores de deformación cuando se aplica la solicitación alta son superiores respecto a si se aplicase la baja, esto se cumple para todas las condiciones de ensayo.

Se aprecia que no por tener un mayor porcentaje de huecos se produce una rodera mayor. En los resultados que no incorporan fibras y para la solicitación alta, la deformación se mantiene constante para luego decrecer según aumenta el porcentaje de huecos, lo cual no se considera coherente. Sucede, por lo tanto, que a mayor porcentaje de huecos hay una mayor pérdida de partículas, pero no una mayor deformación. Esta potencial incongruencia puede deberse a que la rodera se mide considerando los valores máximos y mínimos, y por lo tanto tienen una gran influencia valores puntuales que puedan deberse a deformaciones extremas en zonas localizadas. Para la solicitación baja no se observa un patrón claro pues tiende a aumentar para posteriormente decrecer. Además, todos los resultados han mostrado una alta variabilidad.

En el caso de las mezclas con fibras y para ambos tipos de solicitaciones, la deformación sí aumenta al aumentar el porcentaje de huecos. Además, se observa una tendencia clara similar a la de la pérdida de partículas, pues se produce una mayor deformación si se aplica la solicitación alta que la baja para los dos casos.

Dado que los resultados no se han mostrado homogéneos, el parámetro de la deformación no se ha considerado útil para evaluar de forma indirecta la pérdida de partículas en las condiciones de ensayo llevadas a cabo.

Los resultados obtenidos del escáner láser han aportado una buena información visual del ensayo realizado, aunque no obstante, todavía queda un profundo trabajo para obtener más información de las deformaciones a partir de los datos que el escáner es capaz de obtener.

4.2.3. Temperatura máxima alcanzada

A continuación, se expresan los resultados de la temperatura máxima alcanzada en la zona de contacto por los diferentes ensayos. Todos los ensayos alcanzaron temperaturas máximas comprendidas entre los 75ºC y los 80ºC, como se muestran en la Ilustración 40. Las desviaciones obtenidas son poco significativas por lo que se han omitido para una mayor claridad en los datos.

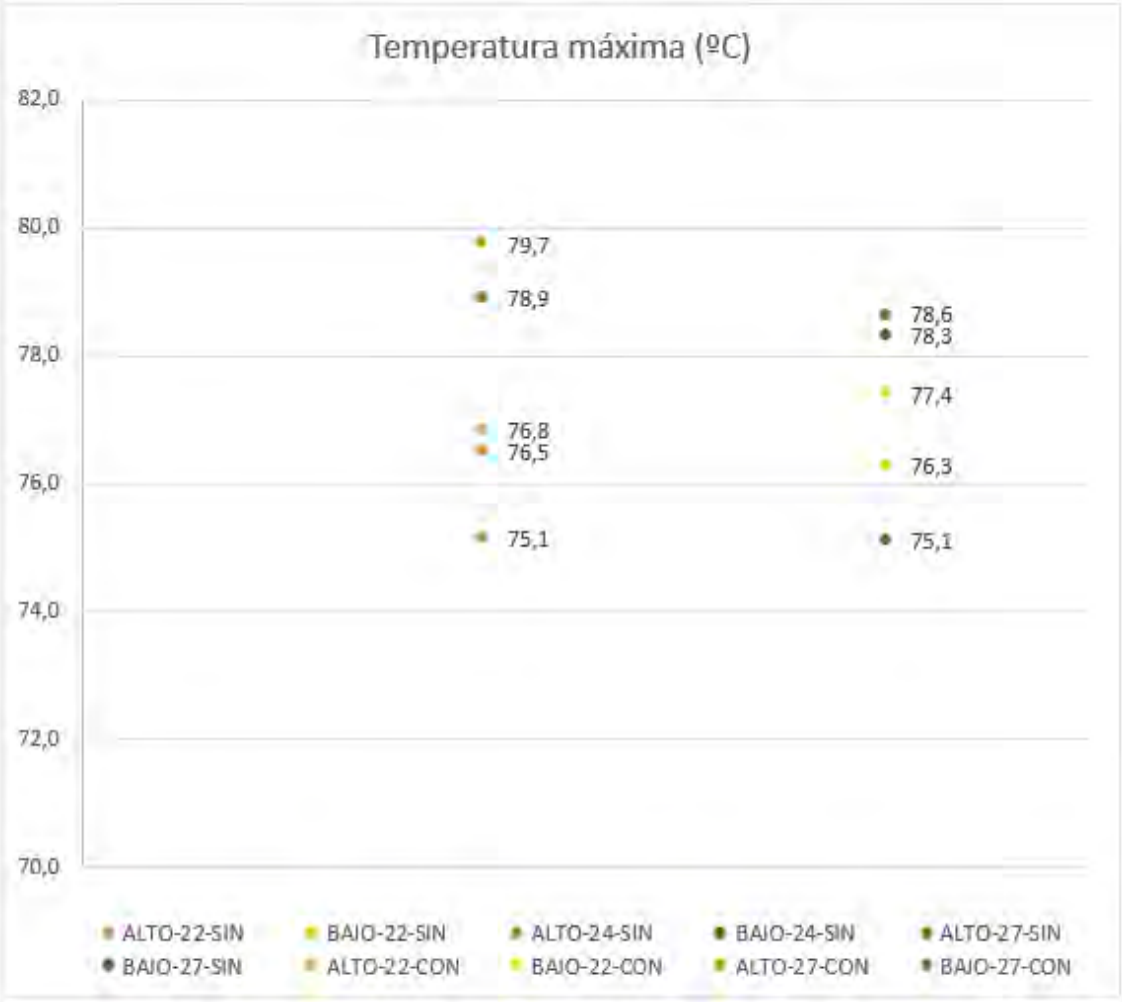


Ilustración 40: Temperatura máxima alcanzada por los ensayos realizados con fibras. Fuente: propia.

Apartado 5: CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos, se revela que los ensayos en los que el elemento de contacto empleado para aplicar la solicitación era de caucho no han arrojado resultados coherentes, pues en igualdad de condiciones la probeta podía perder áridos o no. Así pues, este material en las condiciones de ensayo analizadas no es útil para evaluar la pérdida de partículas.

En cuanto a los ensayos en los que la solicitación se ha aplicado mediante un cepillo metálico, el método se ha mostrado sensible a las variables que caracterizan la mezcla y al procedimiento de ensayo, como son el porcentaje de huecos, la incorporación de fibras, y el tipo de solicitación aplicada.

Respecto a la pérdida de partículas, los resultados muestran patrones lógicos en relación con el porcentaje de huecos y el tipo de solicitación aplicada, con diferencias estadísticamente significativas en prácticamente todos los casos.

Se comprobó que empleando fibras se consigue reducir la pérdida de partículas aproximadamente en un 40%, no teniendo una gran influencia el tipo de solicitación aplicada o el porcentaje de huecos que tenga la mezcla.

Los resultados han mostrado que el parámetro de la deformación no es útil para poder obtener de forma indirecta la pérdida de partículas que experimentan las probetas.

Las temperaturas máximas alcanzadas en los ensayos se concentran en un rango de temperatura. La temperatura ambiente a la que se realiza el ensayo no tiene una gran influencia en la temperatura máxima que alcanzan las dos superficies de contacto.

5.2. Futuras líneas de investigación

Por otra parte, hay aspectos que no forman parte de este trabajo fin de máster o que no se han tratado con profundidad que podrían complementar el mismo, como:

- Realizar una comparativa entre los ensayos realizados en laboratorio y la pérdida de partículas a escala real.
- Desarrollar la metodología propuesta en este trabajo. Para mejorar el procedimiento de la toma de datos se propone analizar los resultados que aportan los perfiles obtenidos con el escáner láser para poder obtener de manera indirecta la pérdida de partículas.
- Tratar de encontrar un material como pueda ser el poliuretano rígido como una alternativa a los cepillos metálicos. Asimismo, se pueden realizar ensayos en mezclas que sean más cerradas como las mezclas discontinuas tipo BBTM B.
- Estudiar si el procedimiento podría ser útil para desgastar los áridos y el betún que los recubre, lo que permitiría analizar variables como el coeficiente de resistencia al deslizamiento en función del número de vehículos que pasan por la carretera.

Bibliografía

[1] HOFIDRAIN, (n.d.). https://www.giteco.unican.es/proyectos/hofidrain/resumen.shtml.

[2] ASEFMA, (2020). https://asefma.es/espana-produce-18-millones-de-toneladas-de-mezclas-asfalticas-en-2019-y-registra-un-crecimiento-del-1756/.

[3] ASEFMA, (2021). https://asefma.es/asefma-anuncia-una-caida-del-101-en-el-consumo-de-betun-en-espana-para-mezclas-asfalticas-en-2020-y-advierte-del-grave-deficit-acumulado/.

[4] W.R.& B.S. Stefan Alber, Explaining drainage of porous asphalt with hydrological modelling, Int. J. Pavement Eng. 23 (2022) 1561–1571. https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1811278.

[5] J. Rodriguez-Hernandez, D. Castro-Fresno, A.H. Fernández-Barrera, Á. Vega-Zamanillo, Characterization of Infiltration Capacity of Permeable Pavements with Porous Asphalt Surface Using Cantabrian Fixed Infiltrometer, J. Hydrol. Eng. 17 (2012) 597–603. https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000480.

[6] B. Peeters, I. Ammerlaan, A. Kuijpers, Noise reduction by absorbing road surfaces: Destroying the horn effect, Proc. ISMA 2010 - Int. Conf. Noise Vib. Eng. Incl. USD 2010. (2010) 4053–4064.

[7] ORDEN CIRCULAR OC 3/2019 SOBRE MEZCLAS BITUMINOSAS TIPO SMA, (2019). https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/comodin/recursos/oc3_2019.pdf.

[8] REMER, (n.d.). https://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta24/vademecum19/vdm02530.htm.

[9] Víctor Yepes Piquera, Estabilización de suelos con ligantes bituminosos, (2016). https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/ligante-bituminoso/#:~:text=Los ligantes hidrocarbonados son productos,buena adhesividad con los áridos.

[10] FIVE WAYS TO PREVENT ASPHALT RAVELLING, (2015). https://www.heavyequipmentguide.ca/article/20924/five-ways-to-prevent-asphalt-ravelling.

[11] C.K. Ojum, Task 451: Developing a Simulative Laboratory Ageing Testing Method for Thin Surfacings, (2016).

[12] R. Ponce, N. Ranga, Distress Call: Raveling!, (n.d.). https://www.roadbotics.com/2019/10/07/distress-call-raveling/#:~:text=Raveling can occur due to,of raveling are even higher.

[13] J. Nicholls, J. De Visscher, F. Hammoum, M. Jacobs, DRaT–Development of the Ravelling Test Review of parameters influencing the propensity of asphalt to ravel, Cedr. (2015) 26. http://www.ponic.nl/mediapool/74/740569/data/DRaT_D2_Properties_for_ravelling.pdf.

[14] A. Molenaar, J., & Molenaar, An Investigation into the Contribution of Bituminous Binder to the Resistance to Raveling of Porous Asphalt, in: Barcelona, Spain, 2000: pp. 500–508.

[15] N. Espa, Norma Española Mezclas bituminosas Métodos de ensayo Parte 17 : Pérdida de partículas de probetas de mezclas bituminosas drenantes, (2018).

[16] M. Vila-Cortavitarte, P. Lastra-González, M.Á. Calzada-Pérez, I. Indacoechea-Vega, Analysis of the influence of using recycled polystyrene as a substitute for bitumen in the behaviour of asphalt concrete mixtures., J. Clean. Prod. 170 (2018) 1279–1287. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.232.

[17] A. Gupta, P. Lastra-Gonzalez, D. Castro-Fresno, J. Rodriguez-Hernandez, Laboratory characterization of porous asphalt mixtures with aramid fibers, Materials (Basel). 14 (2021). https://doi.org/10.3390/ma14081935.

[18] A. Gupta, D. Castro-Fresno, P. Lastra-Gonzalez, J. Rodriguez-Hernandez, Selection of fibers to improve porous asphalt mixtures using multi-criteria analysis, Constr. Build. Mater. 266 (2021) 121198. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121198.

[19] J. Nicholls, E. Schoen, D. Van Vliet, S. Mookhoek, N. Meinen, J. De Visscher, A. Vanelstraete, T. Blumenfeld, S. Bohm, M. Jacobs, J. Nicholls, E. Schoen, D. Van Vliet, S. Mookhoek, N. Meinen, Development of a Ravelling Test for Asphalt To cite this version : HAL Id : hal-02875468 Development of a Ravelling Test for Asphalt, 7th ICONFBMP. (2021).

[20] A. Genovese, G.A. D'Angelo, A. Sakhnevych, F. Farroni, Review on friction and wear test rigs: An overview on the state of the art in tyre tread friction evaluation, Lubricants. 8 (2020). https://doi.org/10.3390/LUBRICANTS8090091.

[21] CEDEX, (n.d.). http://www.cedex.es/CEDEX/LANG_CASTELLANO/ORGANISMO/CENTYLAB/CET/EQUIPAMIENTO/Scrim.htm.

[22] Asphalt Products, (n.d.). https://eapa.org/asphalt-products/.

Anejo I: Modelo de superficie de las probetas

A continuación, se presentan los resultados de los modelos de superficie mencionados anteriormente. En primer lugar, se muestran aquellos ensayos en los que se empleó el caucho NBR. Se puede apreciar que, por la zona en la que actuaba el caucho posteriormente la losa quedaba rellenada de dicho material debido a que se colmataba del caucho empleado.

En segundo lugar, se muestran los ensayos en los que se emplearon los cepillos. En estos ensayos se observa de forma más clara la superficie en la que actuaron debido a que se aprecia con claridad los áridos que han sido desprendidos. Además, en alguna ilustración, la escala de colores se modifica ligeramente por el motivo anteriormente comentado.

La fuente de todas las ilustraciones que aparecerán posteriormente es propia.

I.1. Modelos de superficie empleando caucho

I.1.1. PA 16 – 22%

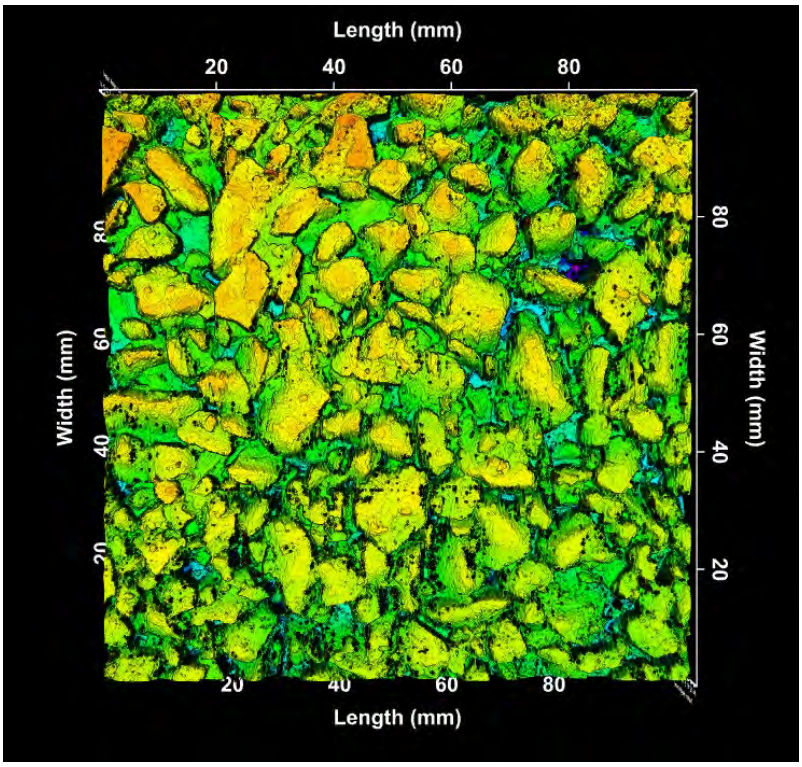


Ilustración 41: Planta de la probeta con un 22% de huecos antes del ensayo con caucho.

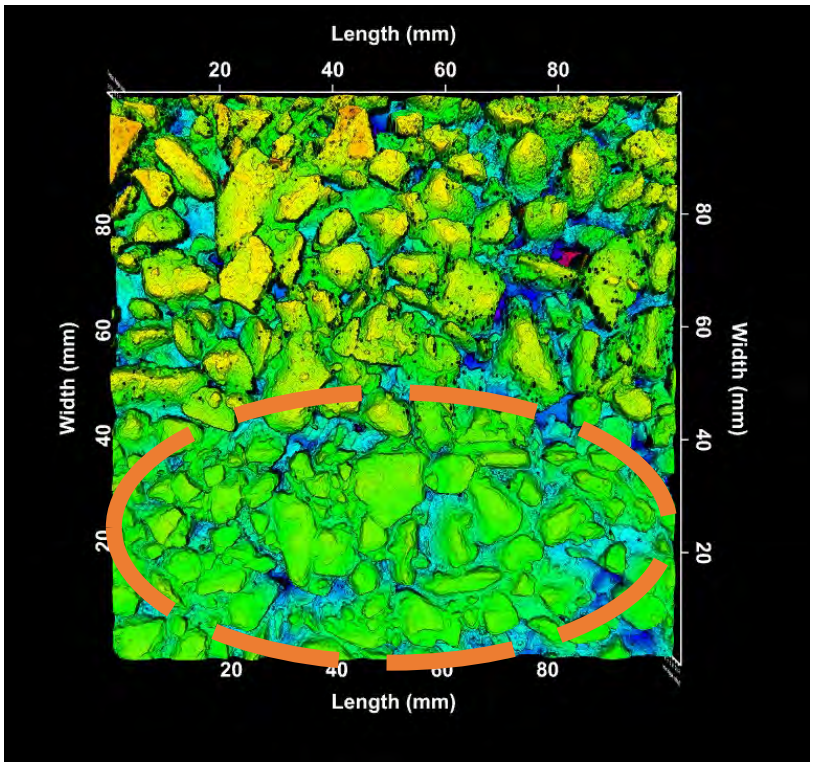


Ilustración 42: Planta de la probeta con un 22% de huecos después del ensayo con caucho.

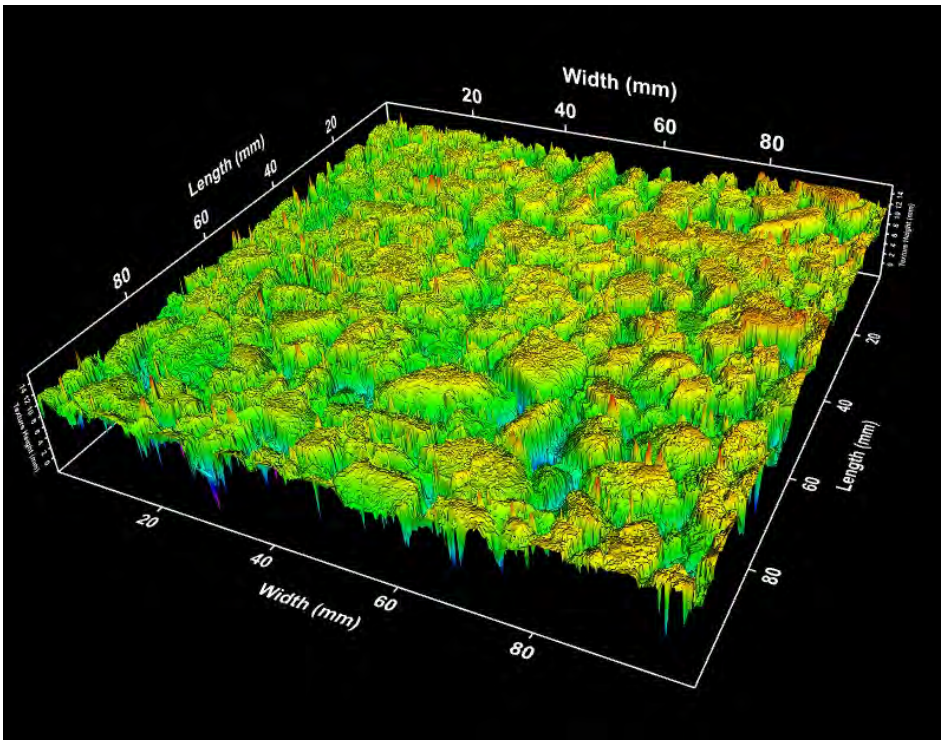


Ilustración 43: Perspectiva de la probeta con un 22% de huecos antes del ensayo con caucho.

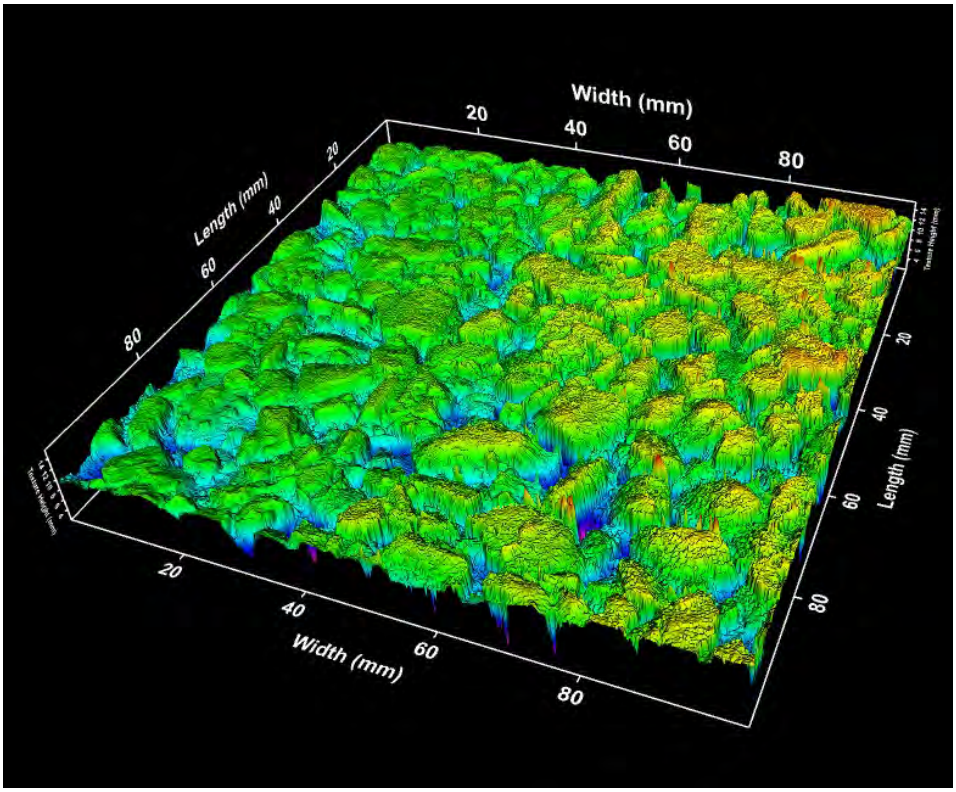


Ilustración 44: Perspectiva de la probeta con un 22% de huecos después del ensayo con caucho.

I.2 Modelos de superficie empleando cepillos

I.2.1. PA 16 – BAJO – 22

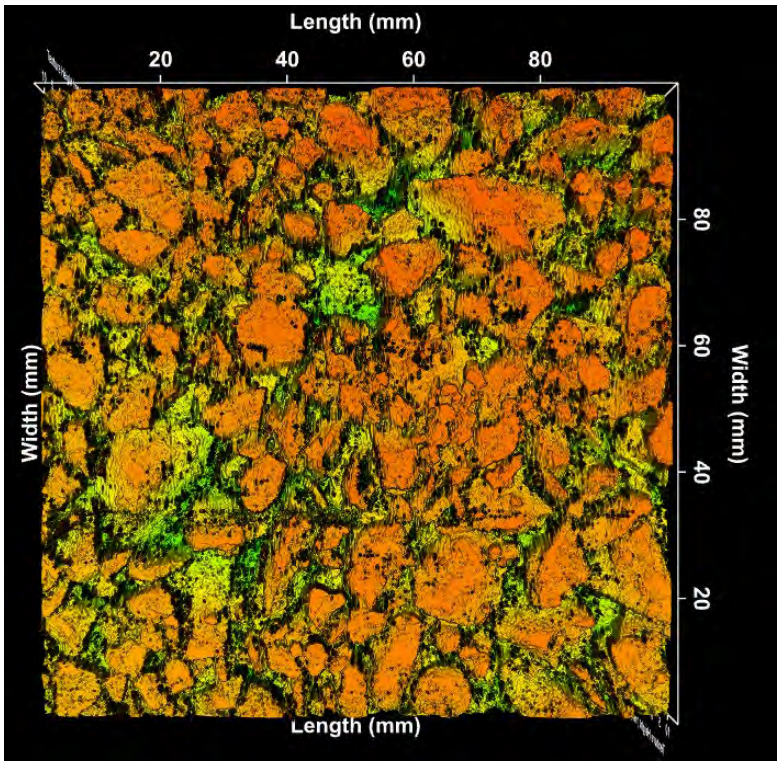


Ilustración 45: Planta de la probeta con un 22% de huecos antes del ensayo de solicitación baja con cepillos.

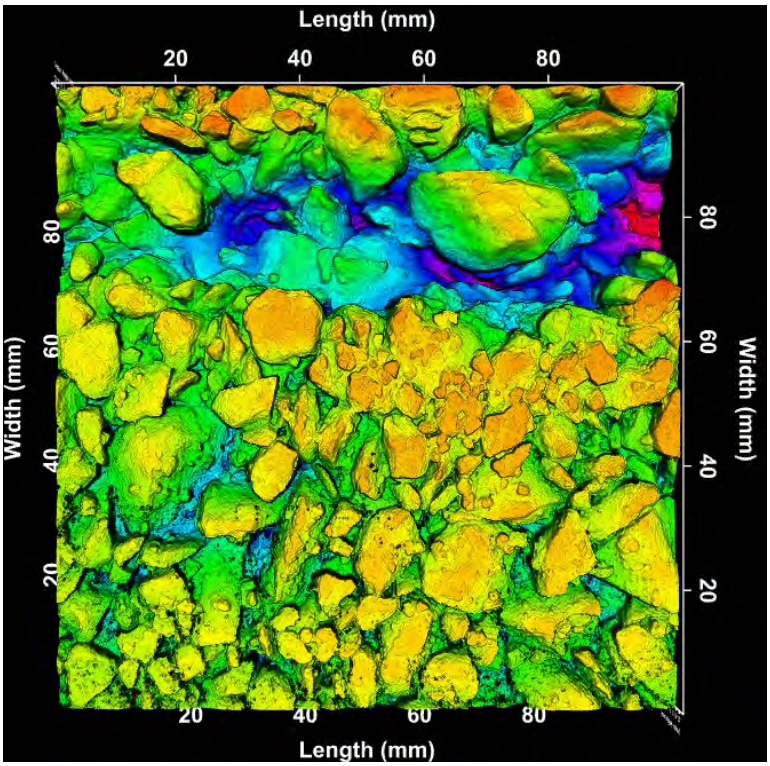


Ilustración 46: Planta de la probeta con un 22% de huecos después del ensayo de solicitación baja con cepillos.

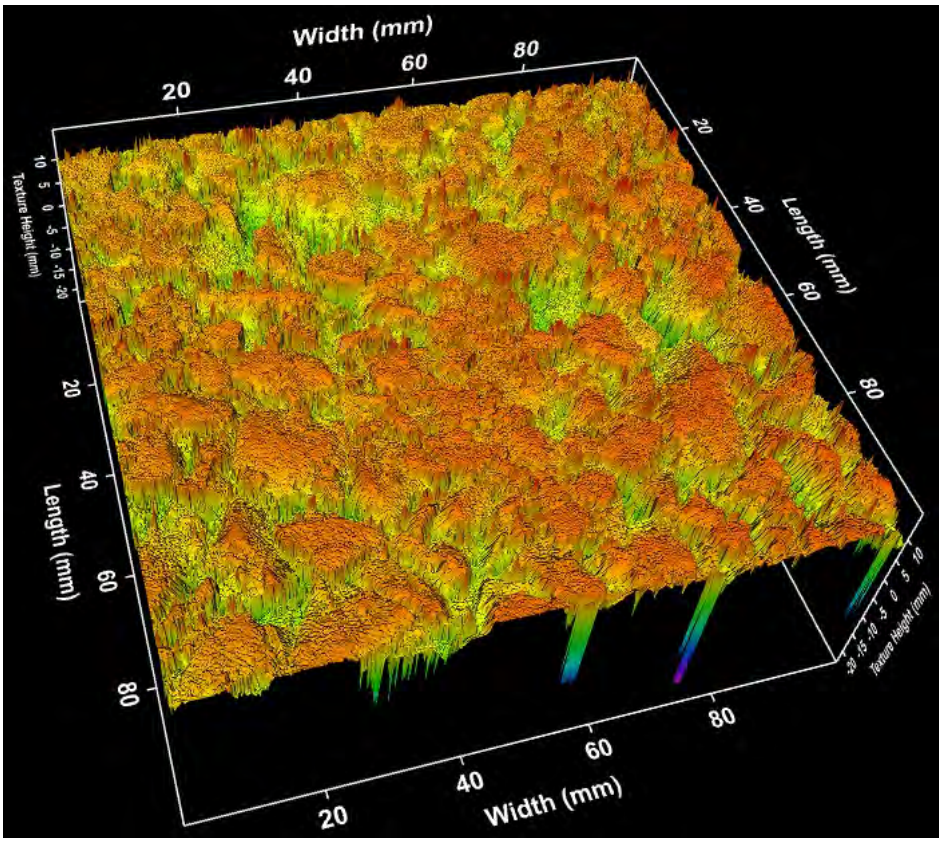


Ilustración 47: Perspectiva de la probeta con un 22% de huecos antes del ensayo de solicitación baja con cepillos.

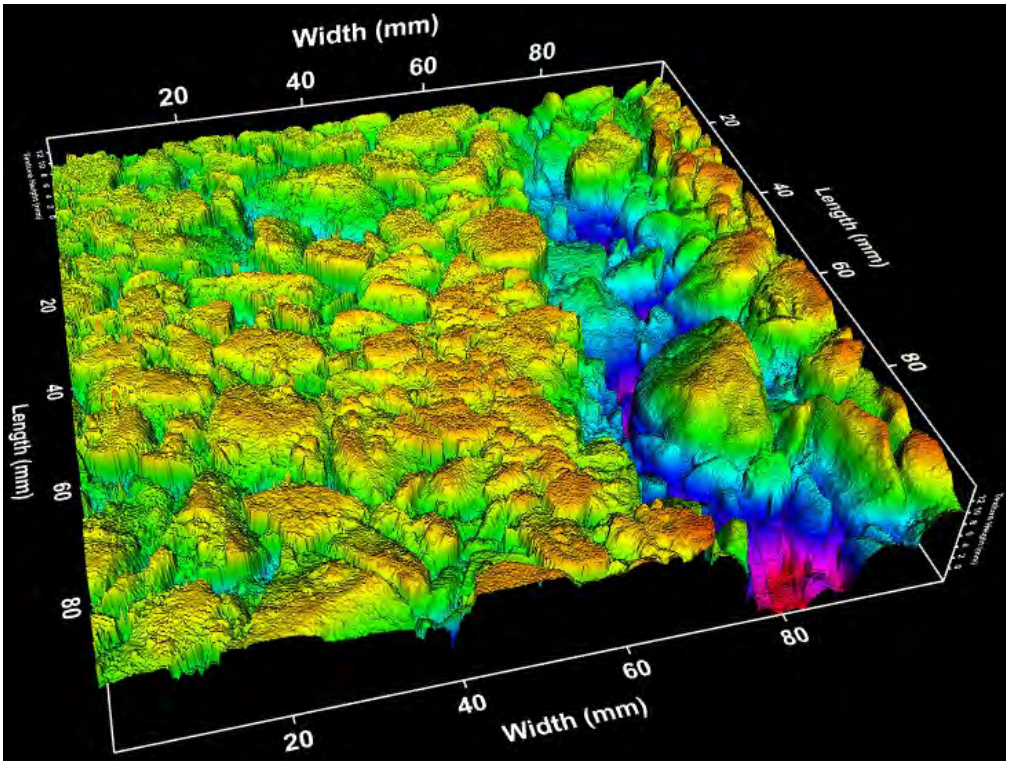


Ilustración 48: Perspectiva de la probeta con un 22% de huecos después del ensayo de solicitación baja con cepillos

I.2.2. PA 16 – ALTO – 22

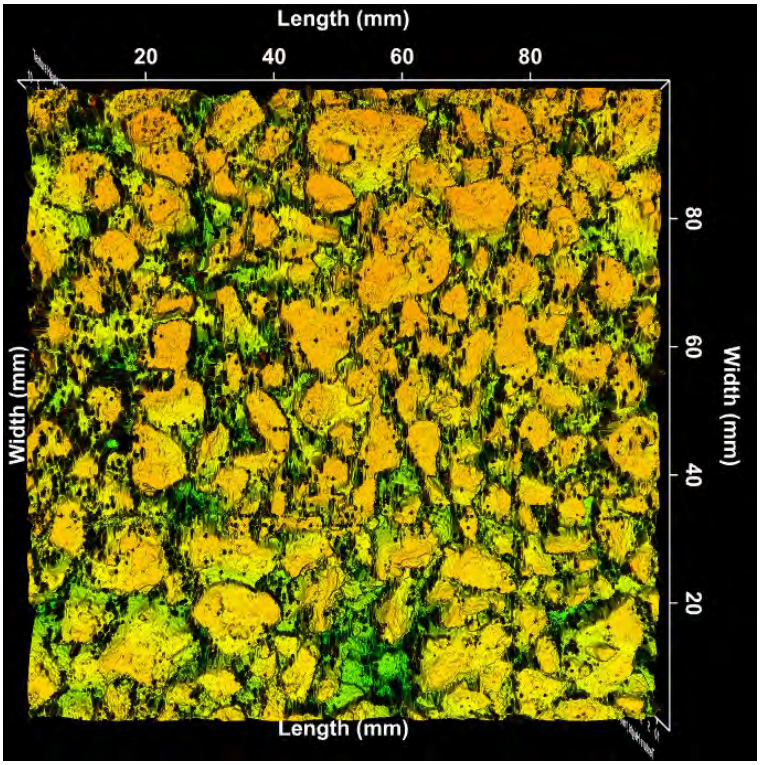


Ilustración 49: Planta de la probeta con un 22% de huecos antes del ensayo de solicitación alta con cepillos.

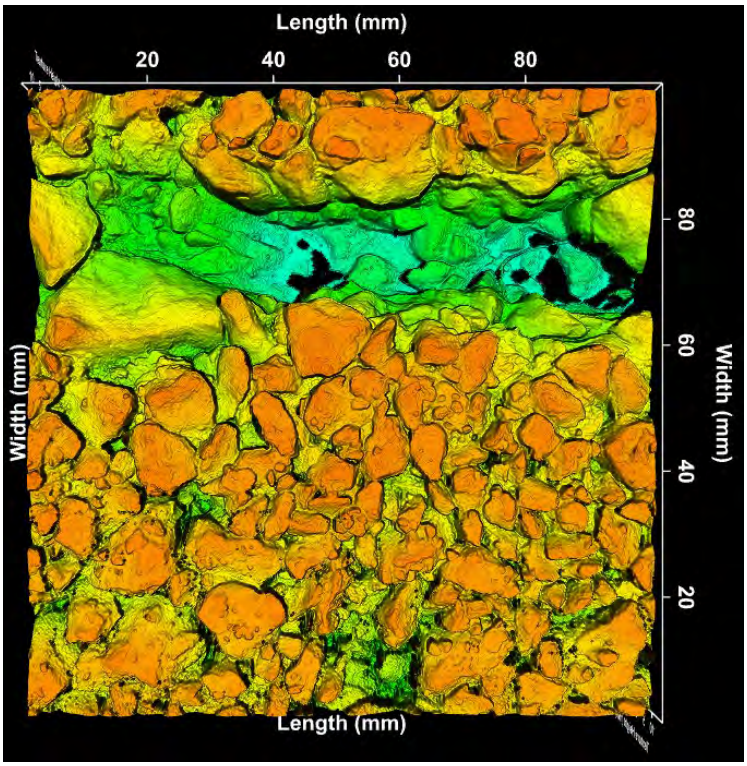


Ilustración 50: Planta de la probeta con un 22% de huecos después del ensayo de solicitación alta con cepillos.

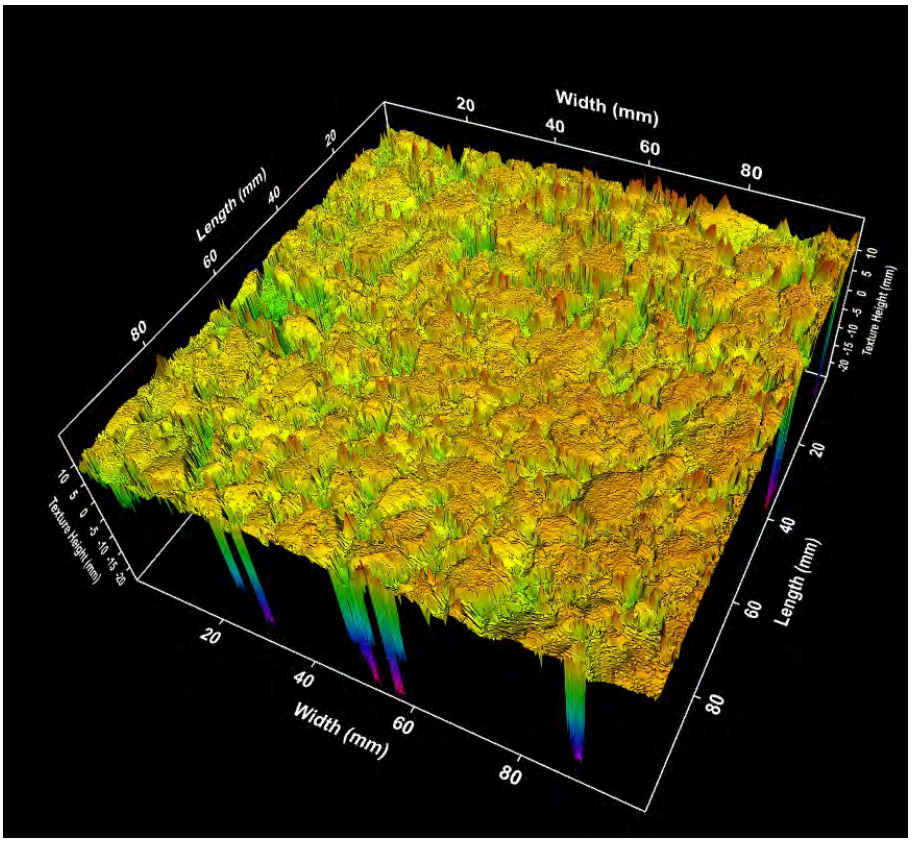


Ilustración 51: Perspectiva de la probeta con un 22% de huecos antes del ensayo de solicitación alta con cepillos.

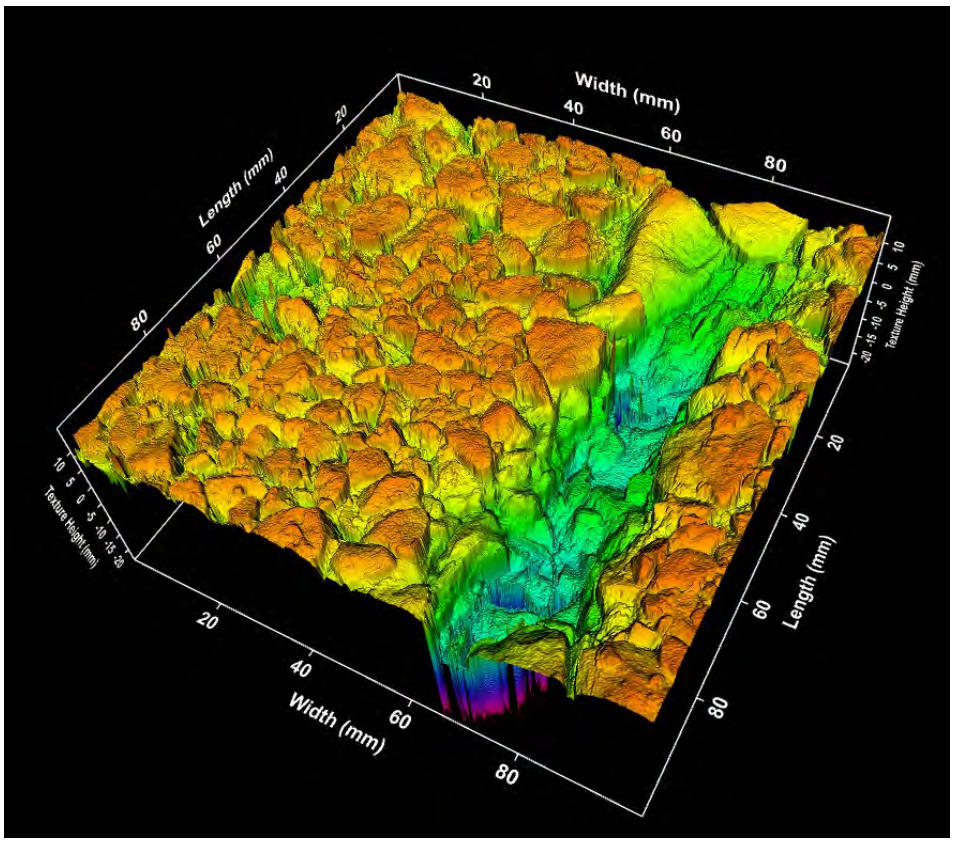


Ilustración 52: Perspectiva de la probeta con un 22% de huecos después del ensayo de solicitación alta con cepillos.

I.2.3. PA 16 – BAJO – 24

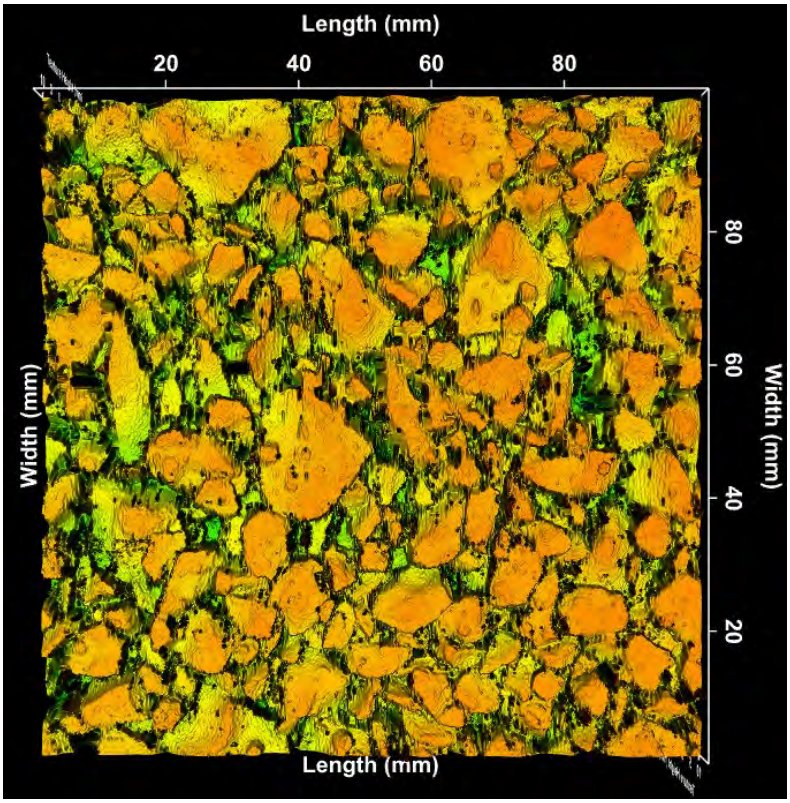


Ilustración 53: Planta de la probeta con un 24% de huecos antes del ensayo de solicitación baja con cepillos.

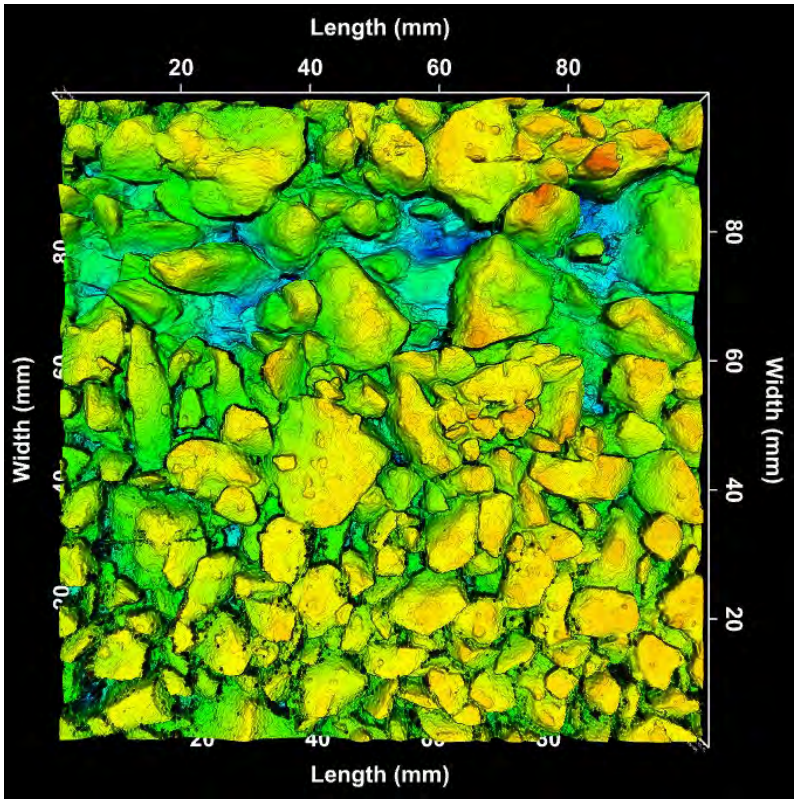


Ilustración 54: Planta de la probeta con un 24% de huecos después del ensayo de solicitación baja con cepillos.

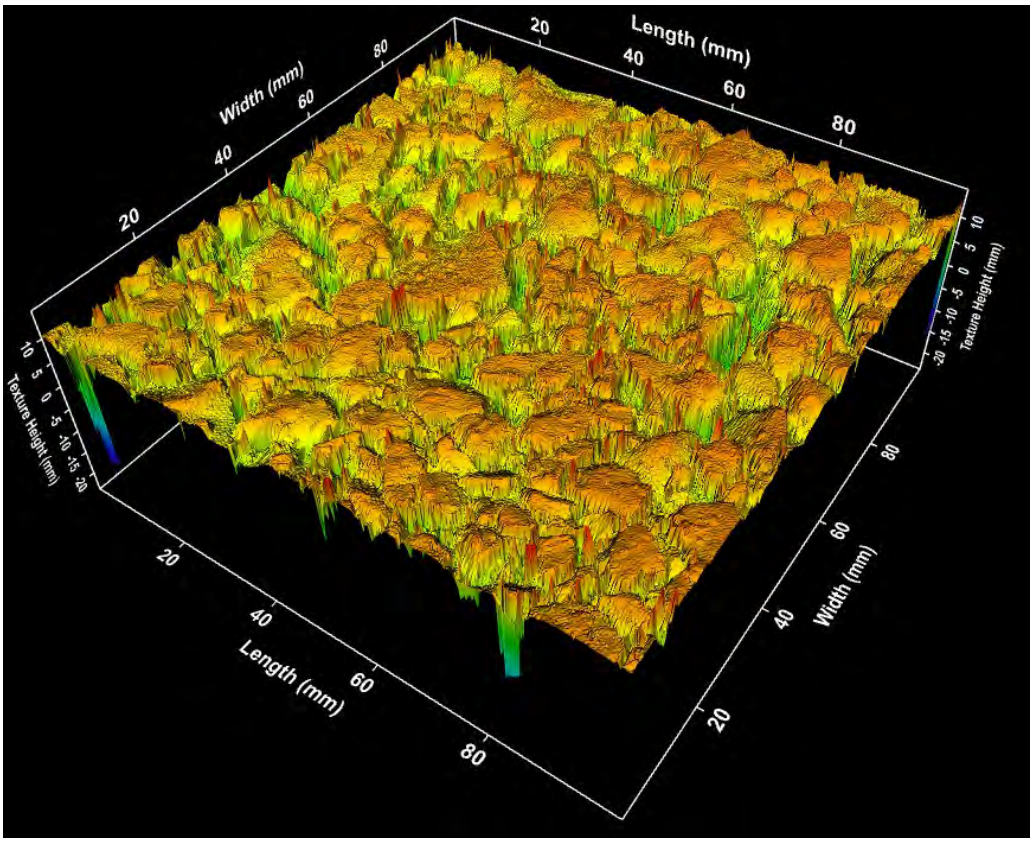


Ilustración 55: Perspectiva de la probeta con un 24% de huecos antes del ensayo con cepillos.

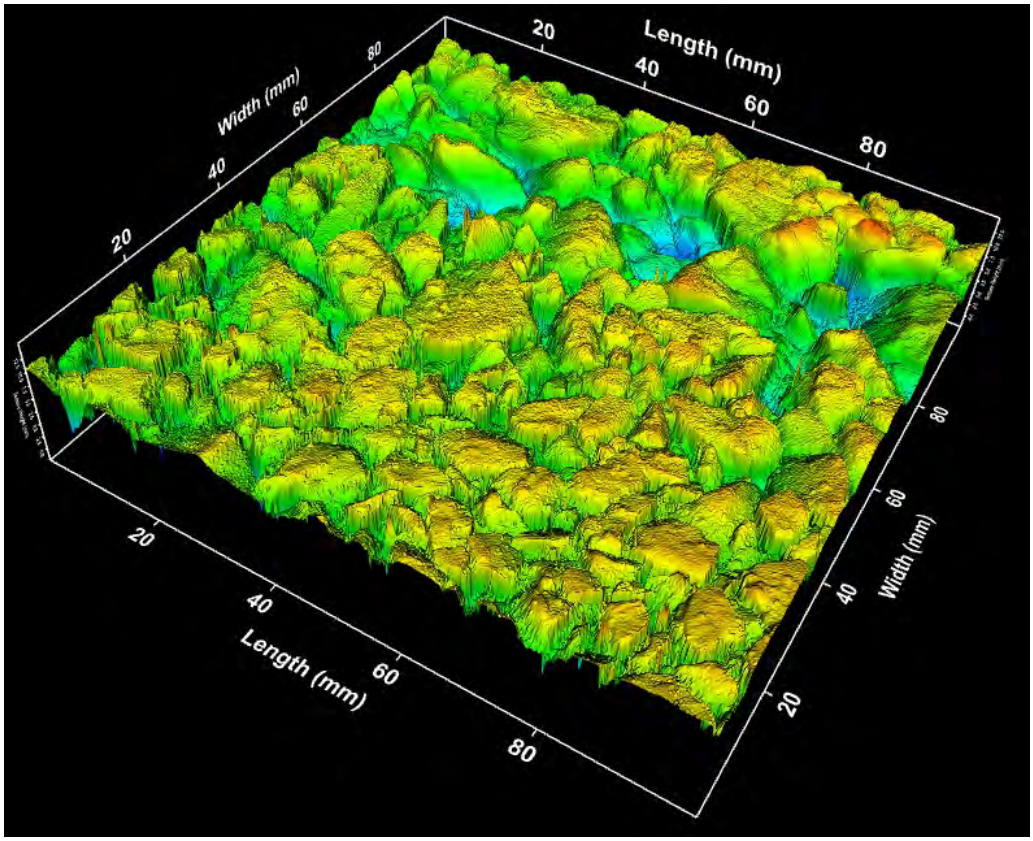


Ilustración 56: Perspectiva de la probeta con un 24% de huecos después del ensayo con cepillos.

I.2.4. PA16 – ALTO – 24

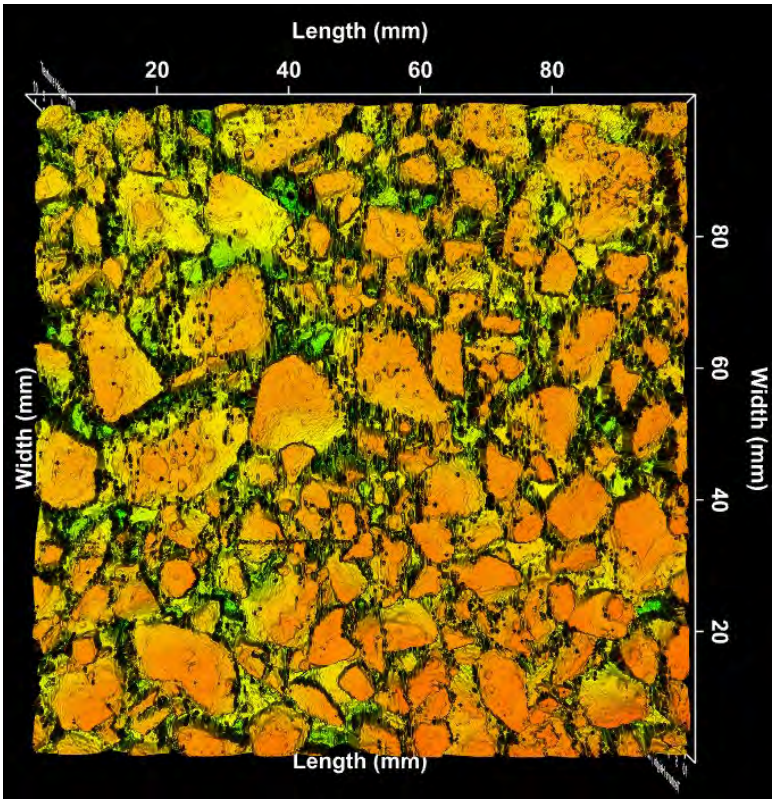


Ilustración 57: Planta de la probeta con un 24% de huecos antes del ensayo de solicitación alta con cepillos.

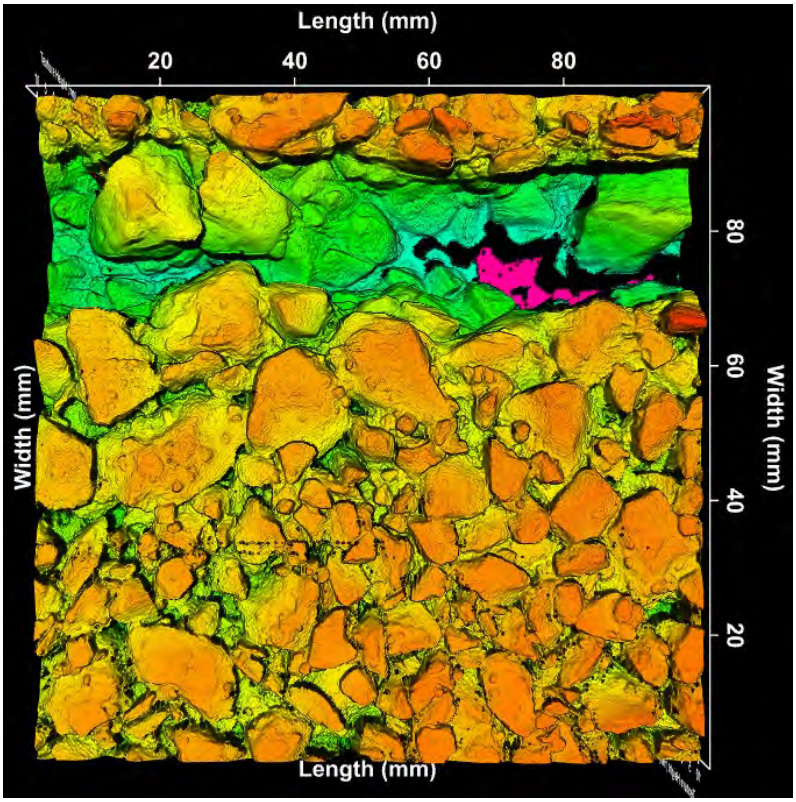


Ilustración 58: Planta de la probeta con un 24% de huecos después del ensayo de solicitación alta con cepillos.

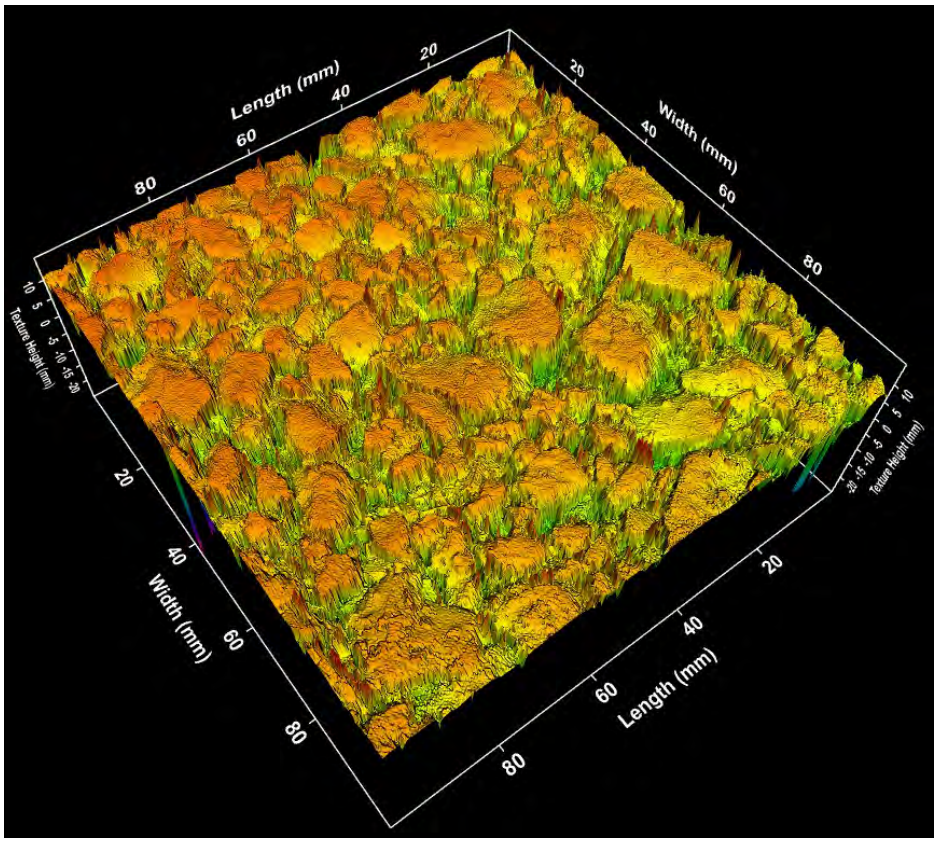


Ilustración 59: Perspectiva de la probeta con un 24% de huecos antes del ensayo de solicitación alta con cepillos.

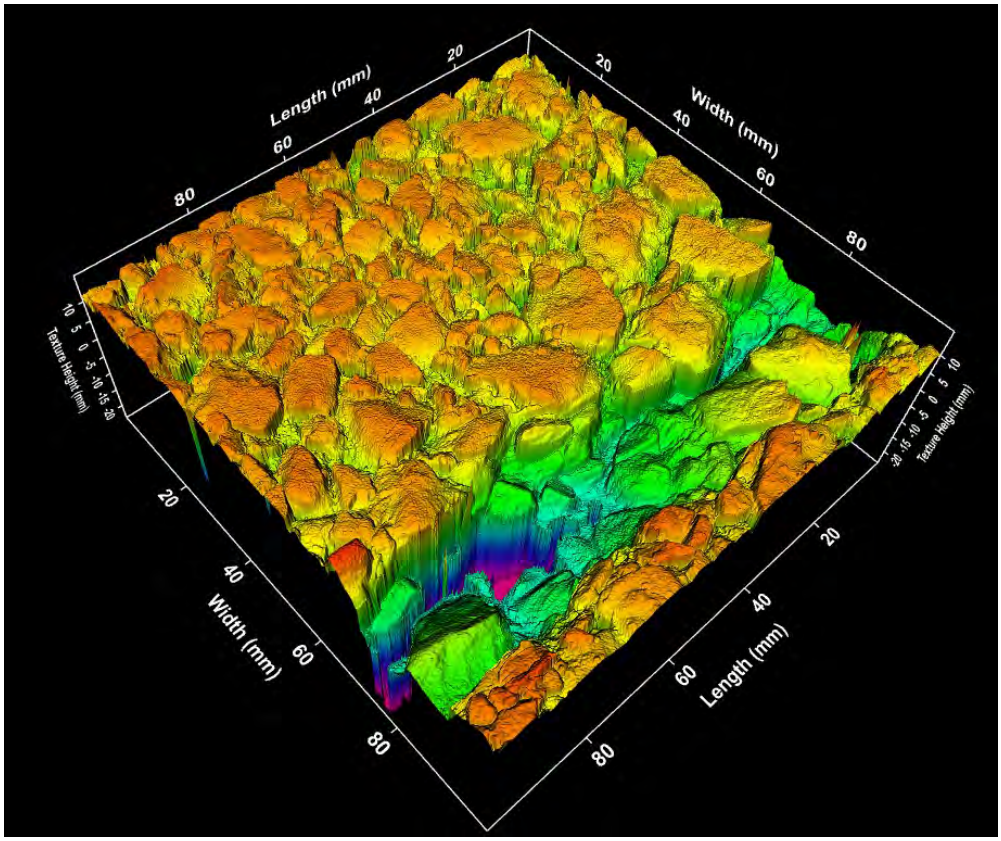


Ilustración 60: Planta de la probeta con un 24% de huecos después del ensayo de solicitación alta con cepillos.

I.2.5. PA16 – BAJO – 27

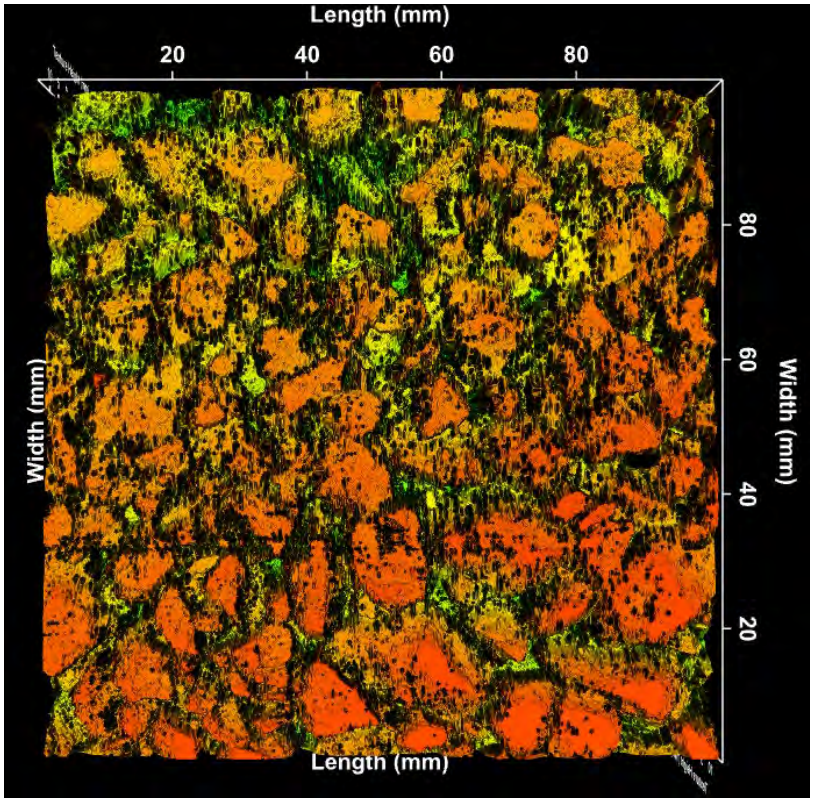


Ilustración 61: Planta de la probeta con un 27% de huecos antes del ensayo de solicitación baja con cepillos.

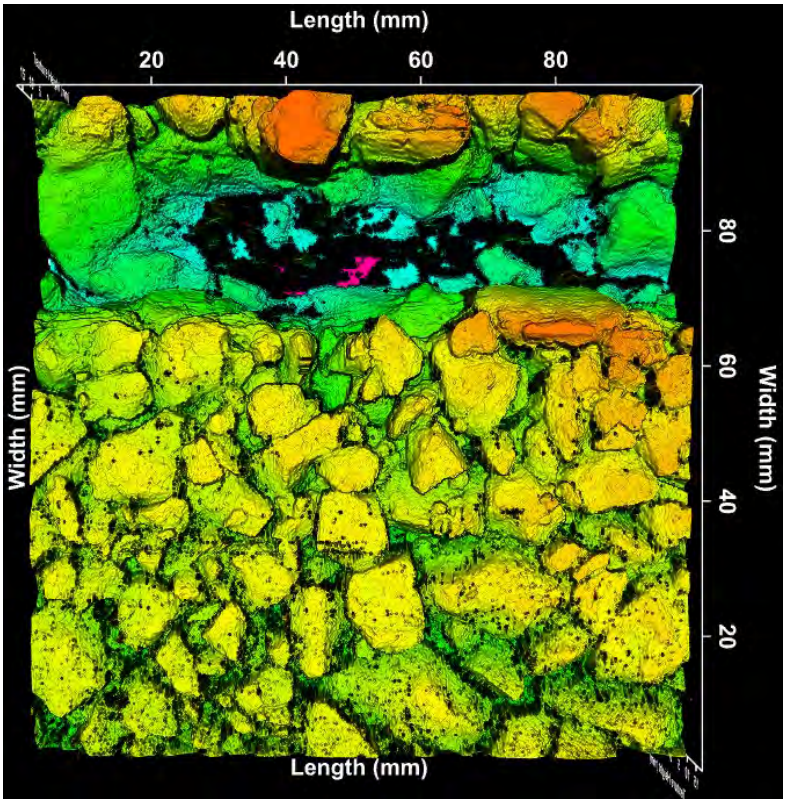


Ilustración 62: Planta de la probeta con un 27% de huecos después del ensayo de solicitación baja con cepillos.

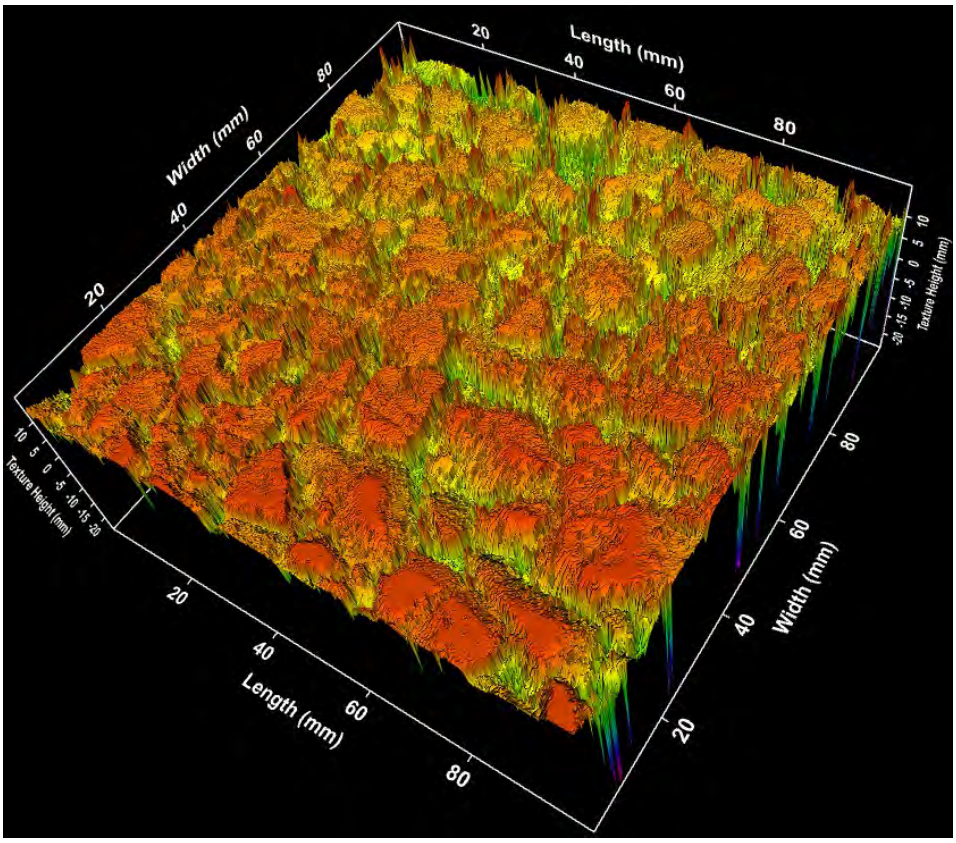


Ilustración 63: Perspectiva de la probeta con un 27% de huecos antes del ensayo de solicitación baja con cepillos.

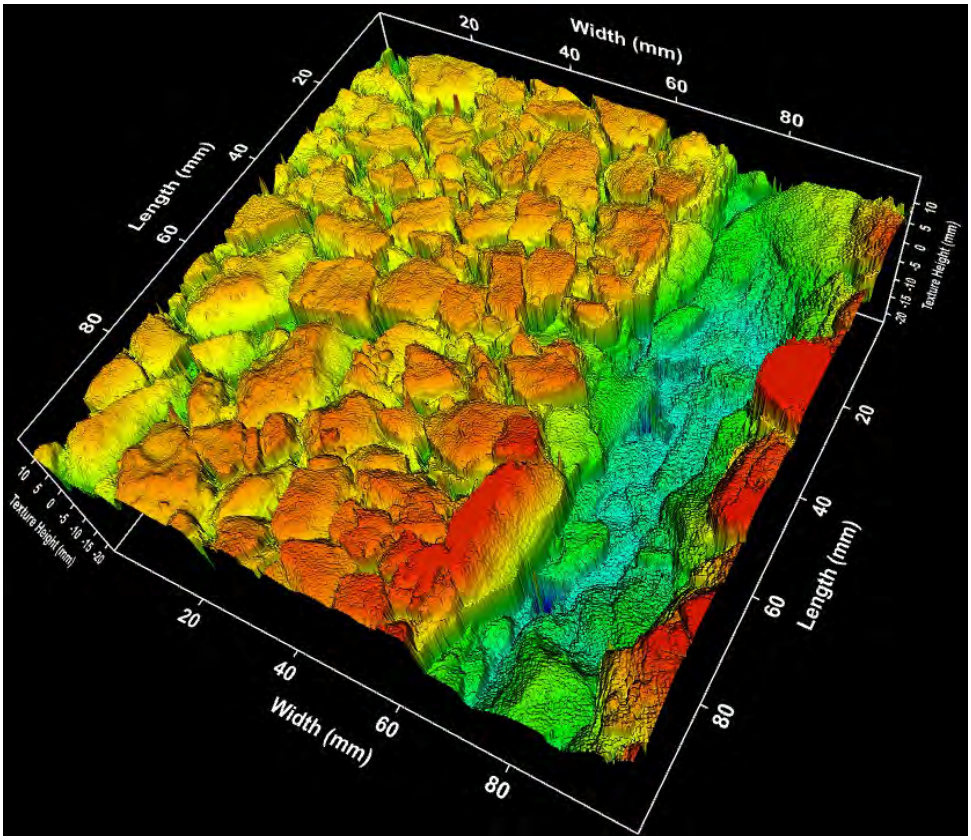


Ilustración 64: Perspectiva de la probeta con un 27% de huecos después del ensayo de solicitación baja con cepillos.

I.2.6. PA16 – ALTO – 27

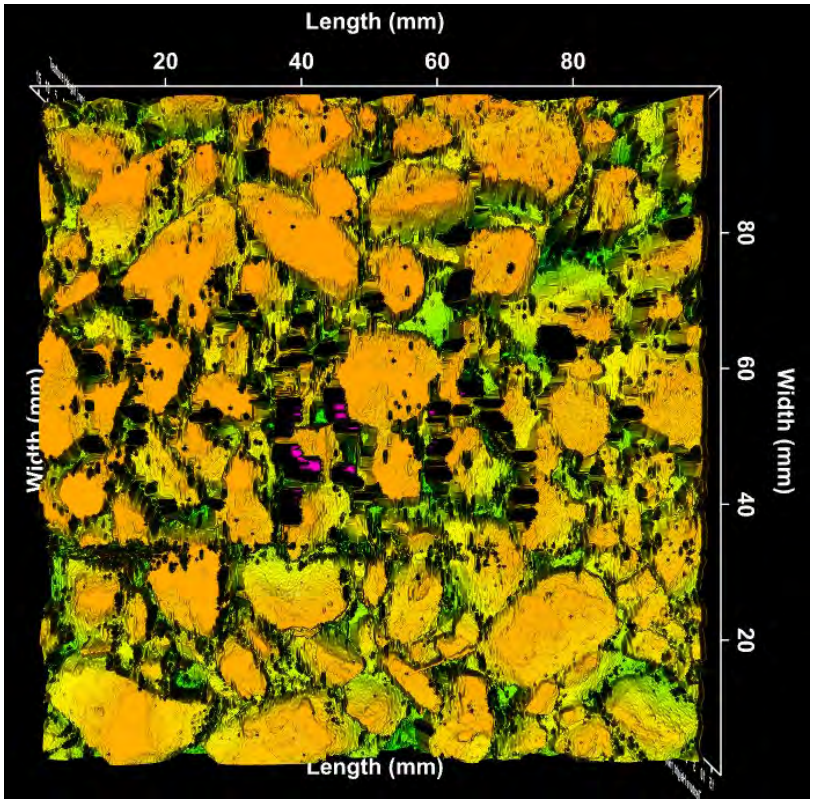


Ilustración 65: Planta de la probeta con un 27% de huecos antes del ensayo de solicitación alta con cepillos.

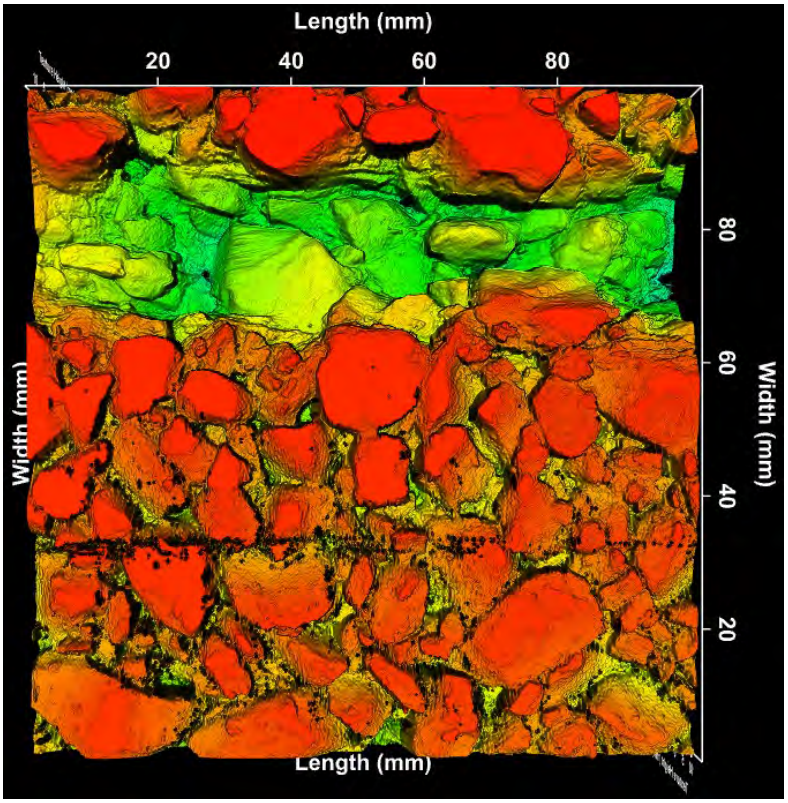


Ilustración 66: Planta de la probeta con un 27% de huecos después del ensayo de solicitación alta con cepillos.

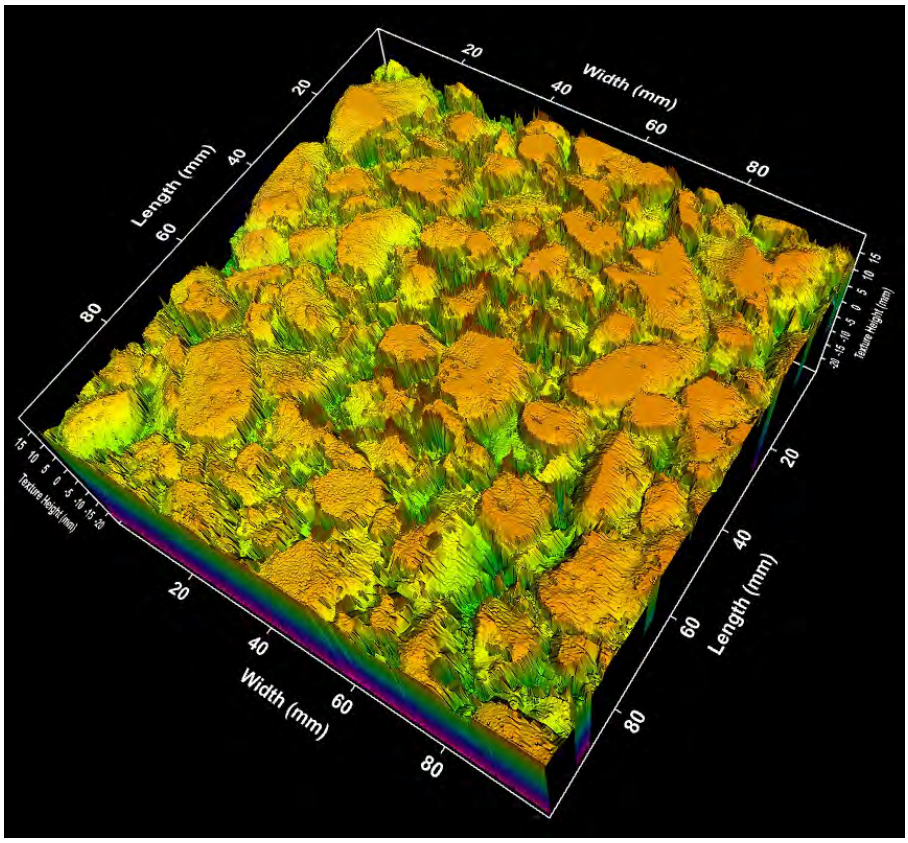


Ilustración 67: Perspectiva de la probeta con un 27% de huecos antes del ensayo de solicitación alta con cepillos.

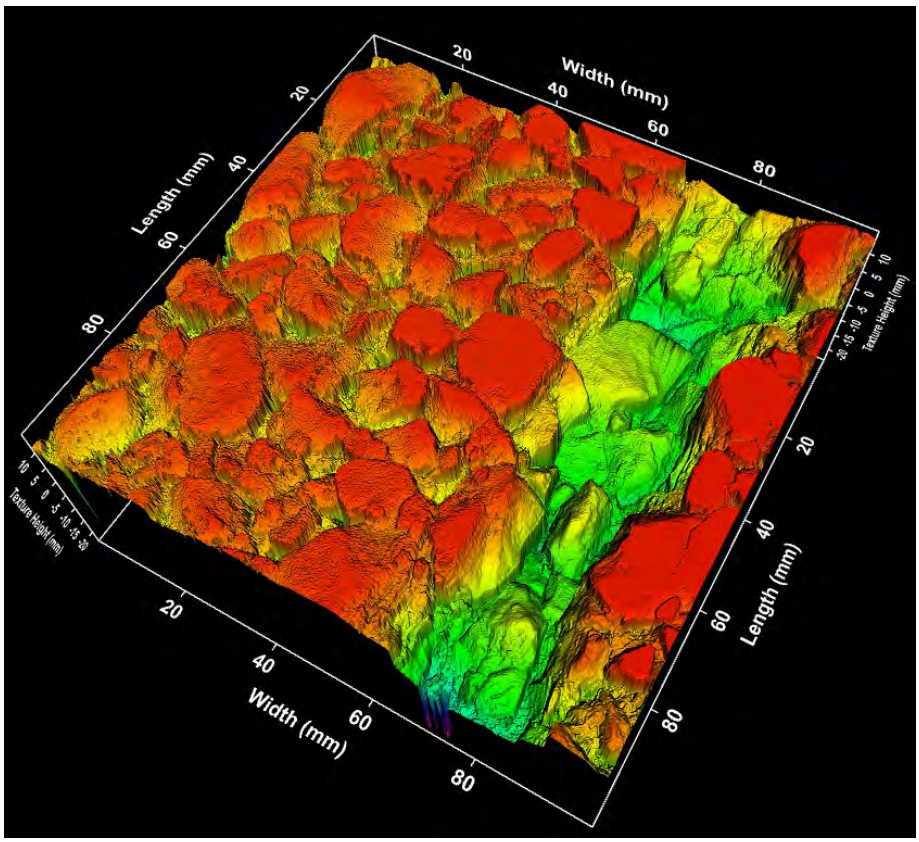


Ilustración 68: Perspectiva de la probeta con un 27% de huecos después del ensayo de solicitación alta con cepillos.

Anejo II: Análisis estadístico de los datos

En este anejo se procede a mostrar el análisis estadístico de la pérdida de partículas de las mezclas en función de su porcentaje de huecos y de si contenían fibras o no.

Este análisis estadístico está diferenciado en dos secciones en función de si cumplen los siguientes requisitos: si las muestras que tenemos siguen una distribución normal y cumplen el principio de homocedasticidad se emplean métodos de análisis paramétricos. En cambio, si no cumplen alguno de los dos requisitos anteriores se emplean métodos de análisis no paramétricos.

Así pues, el método de análisis paramétrico es el 't de student' y el no paramétrico es la 'Prueba U de Mann Whitney'. Asimismo, se han eliminado los valores atípicos u *outliers*.

La fuente de todas las ilustraciones que aparecerán posteriormente es propia.

II.1. Mezclas sin fibras

II.1.1. Análisis paramétrico

A continuación, se muestran los resultados para comprobar si la distribución es normal.

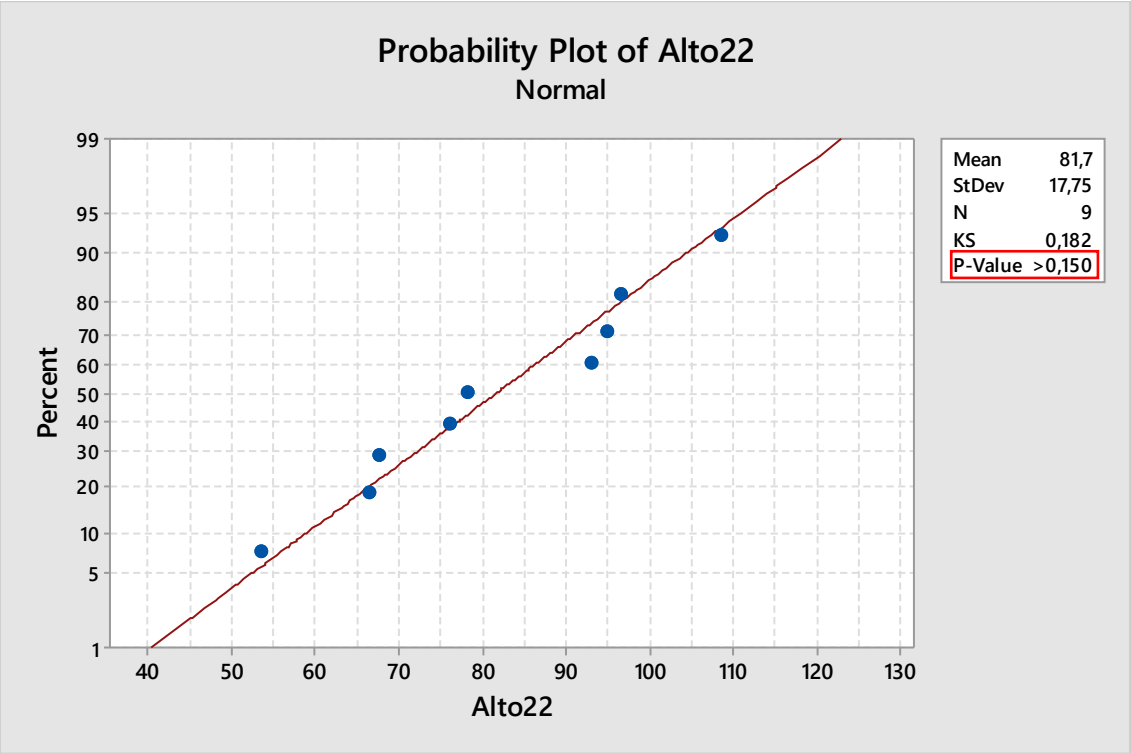


Ilustración 69: Análisis paramétrico de las mezclas PA16 sin fibras con un 22% de huecos y solicitación alta.

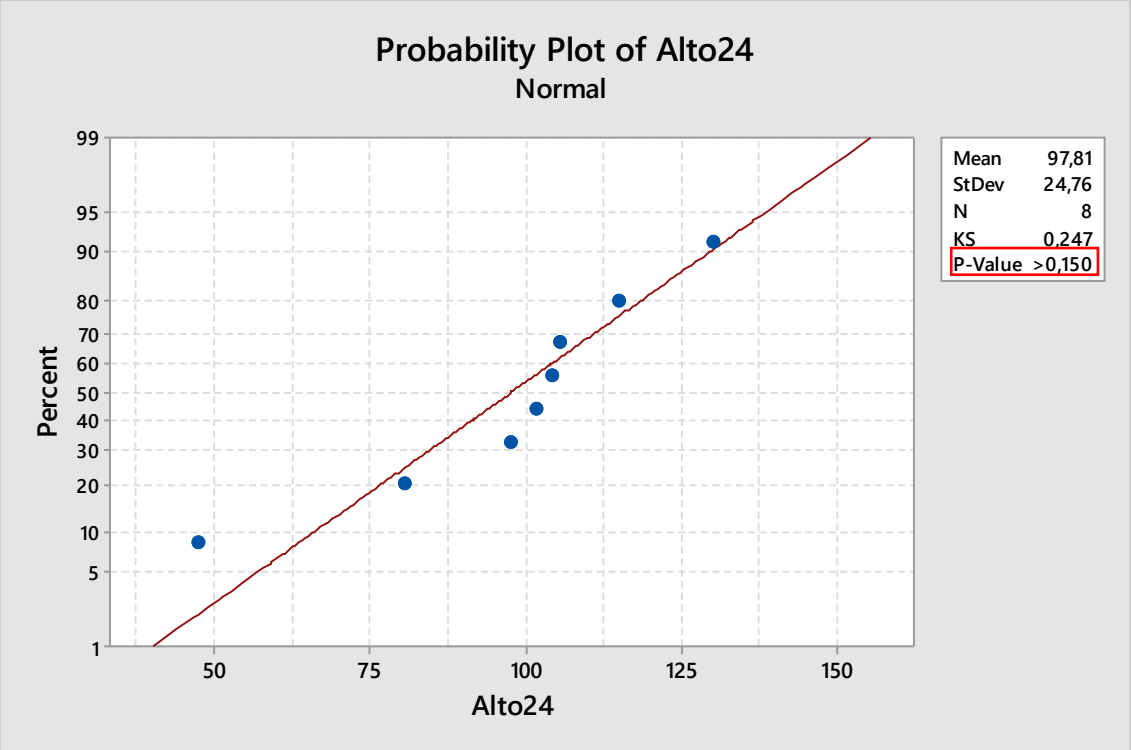


Ilustración 70: Análisis paramétrico de las mezclas PA16 sin fibras con un 24% de huecos y solicitación alta.

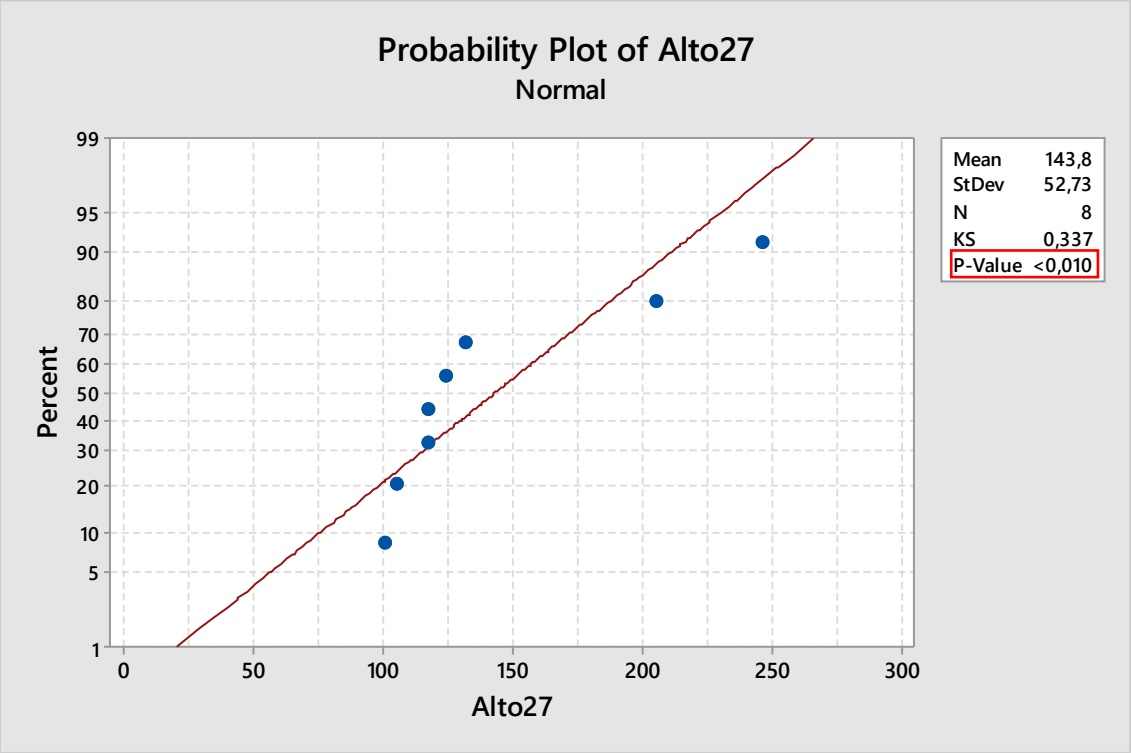


Ilustración 71: Análisis paramétrico de las mezclas PA16 sin fibras con un 27% de huecos y solicitación alta.

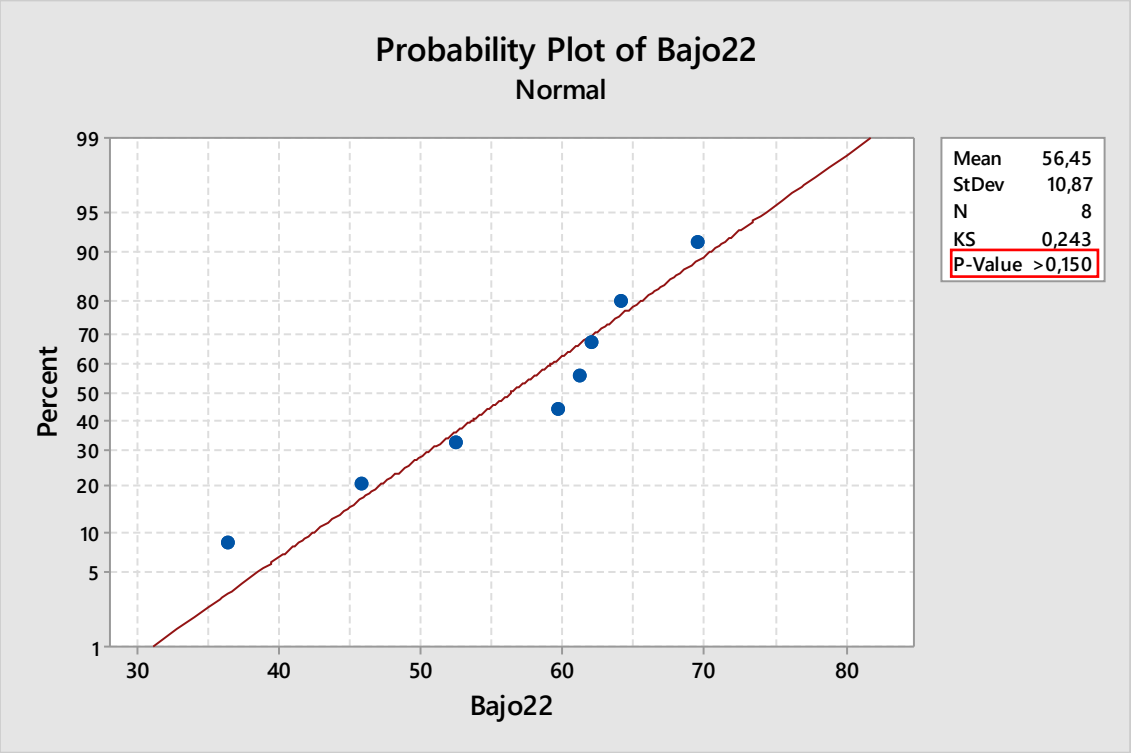


Ilustración 72: Análisis paramétrico de las mezclas PA16 sin fibras con un 22% de huecos y solicitación baja.

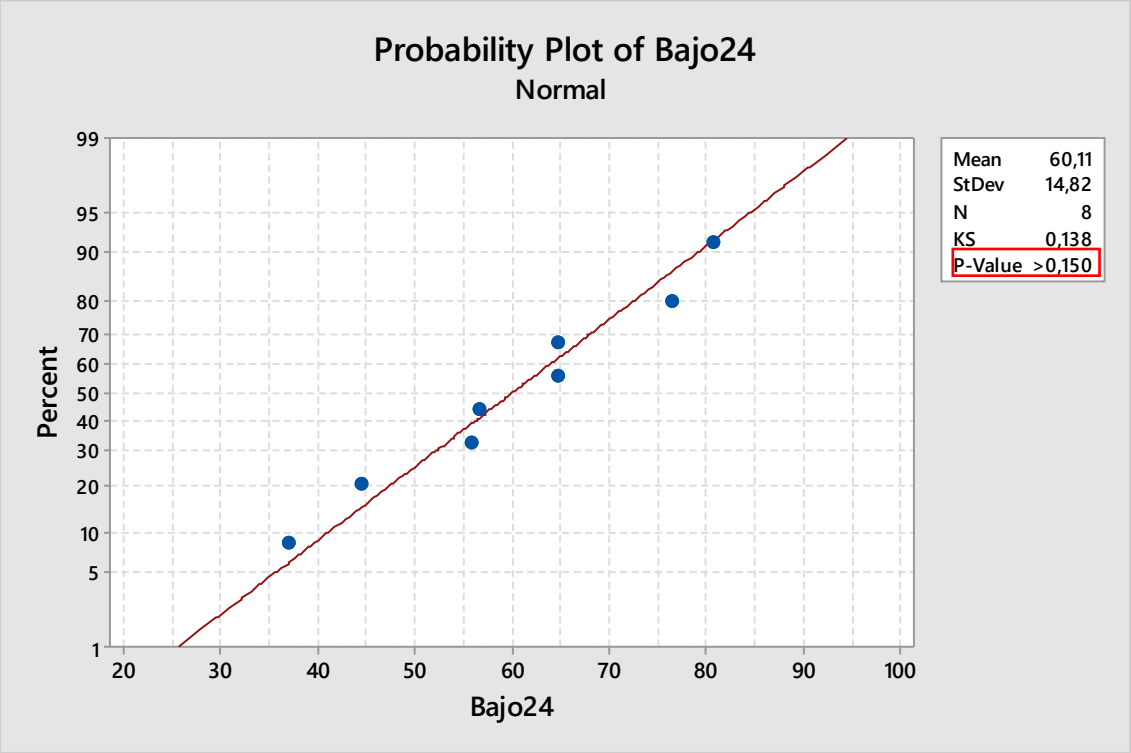


Ilustración 73: Análisis paramétrico de las mezclas PA16 sin fibras con un 24% de huecos y solicitación baja.

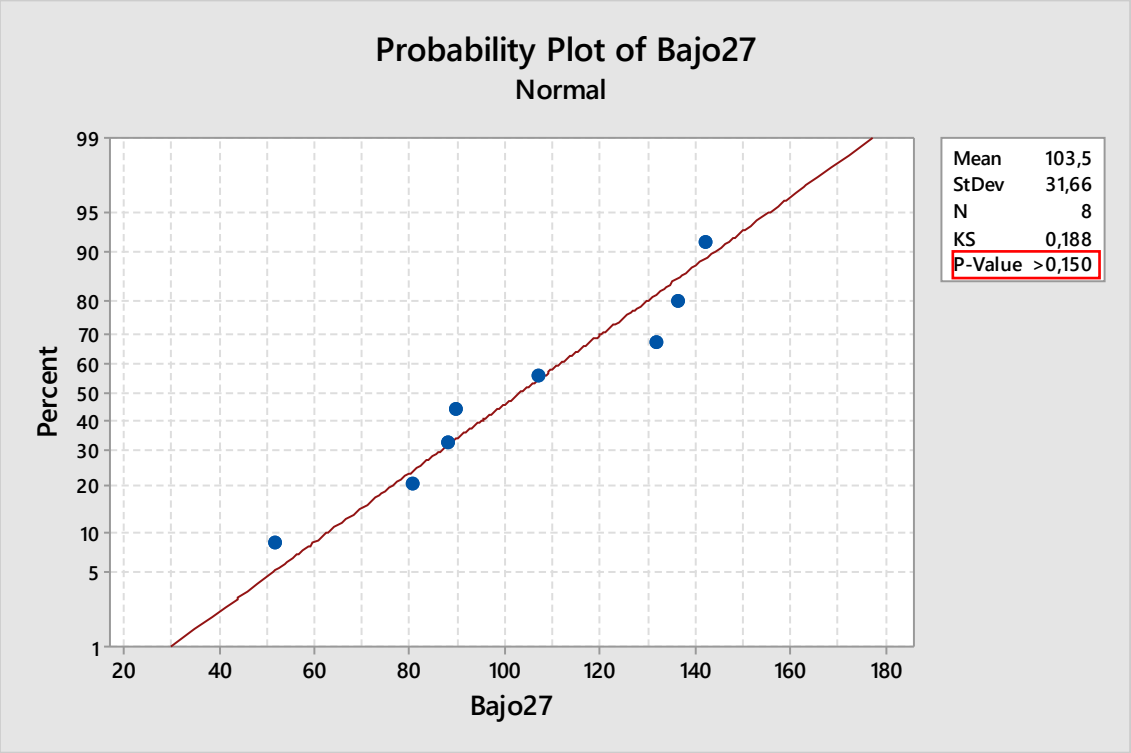


Ilustración 74: Análisis paramétrico de las mezclas PA16 sin fibras con un 27% de huecos y solicitación baja.

II.1.2. Homogeneidad de varianzas

Calculamos si hay homogeneidad entre las varianzas.

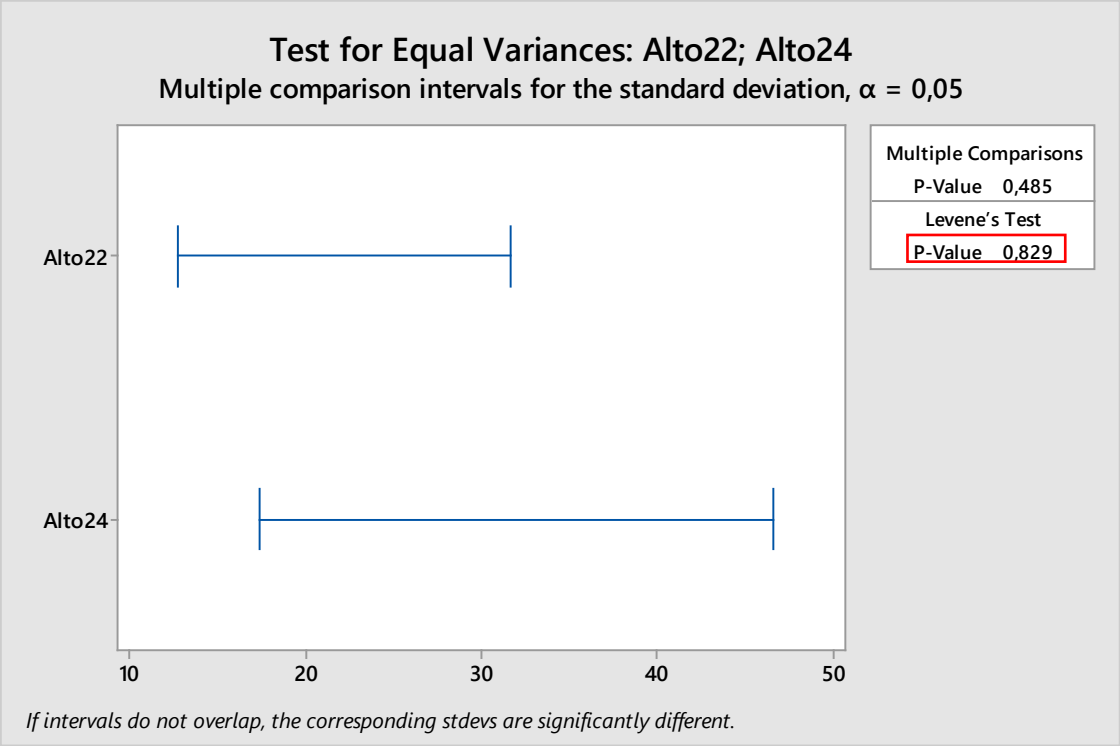


Ilustración 75: Análisis de homogeneidad de varianzas entre las mezclas sin fibras con solicitación alta y un 22% y 24% de huecos.

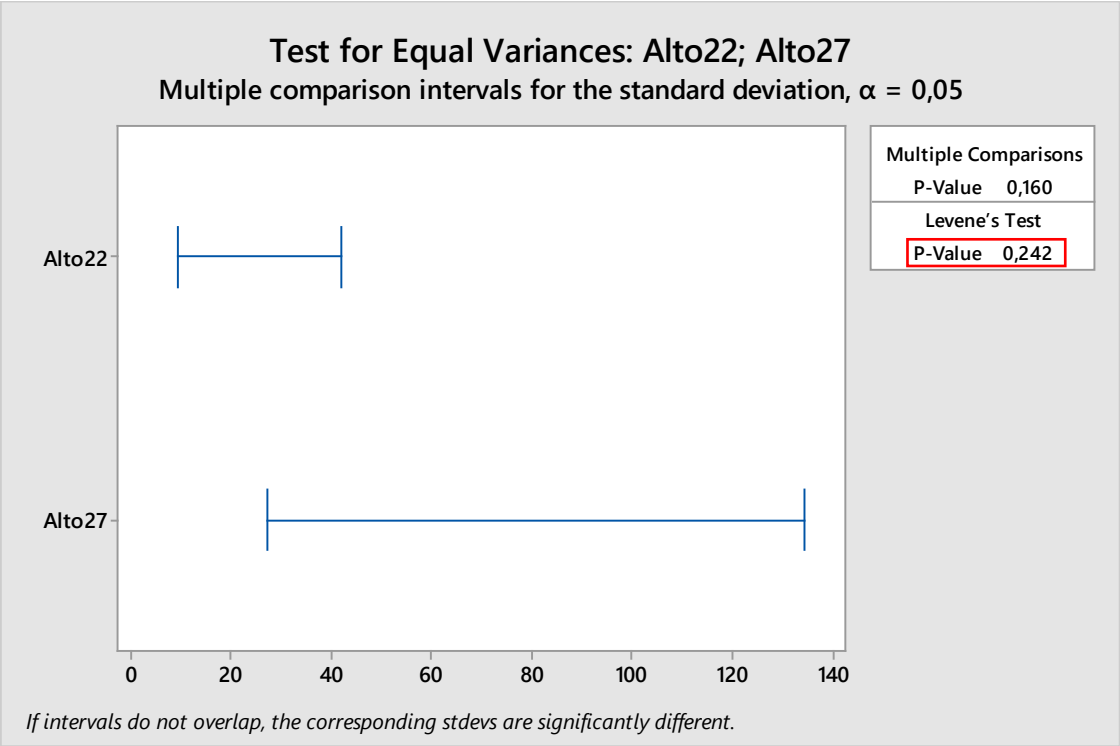


Ilustración 76: Análisis de homogeneidad de varianzas entre las mezclas sin fibras con solicitación alta y un 22% y 27% de huecos.

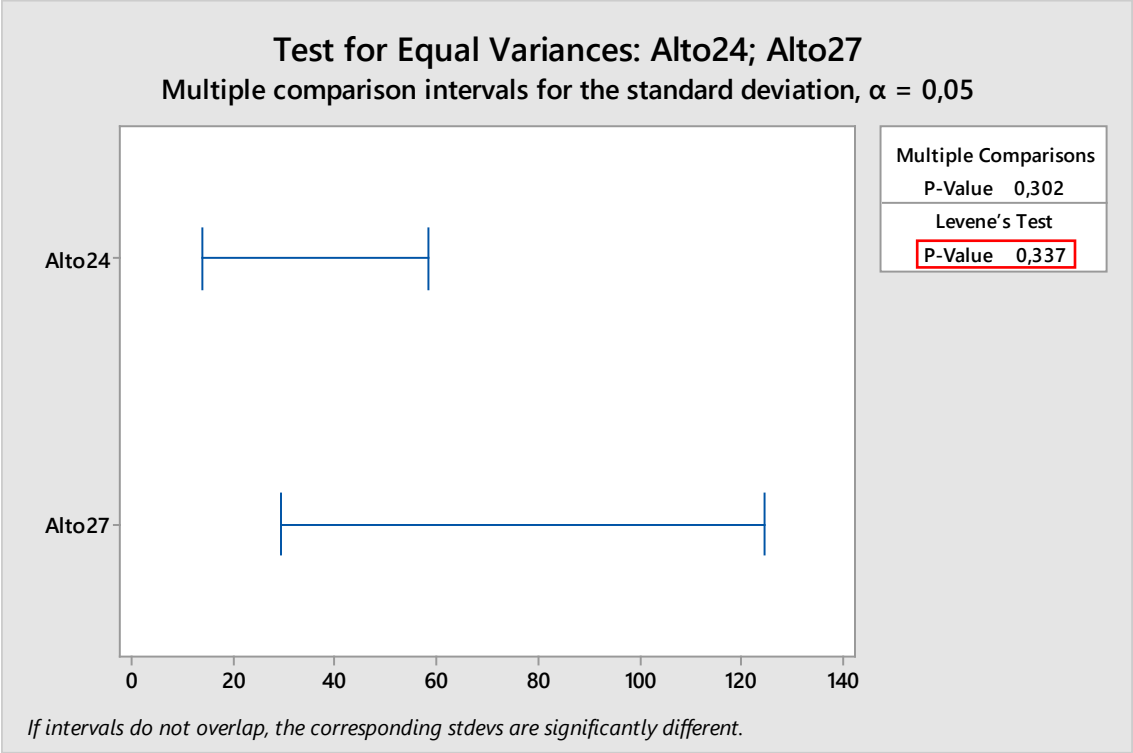


Ilustración 77: Análisis de homogeneidad de varianzas entre las mezclas sin fibras con solicitación alta y un 24% y 27% de huecos.

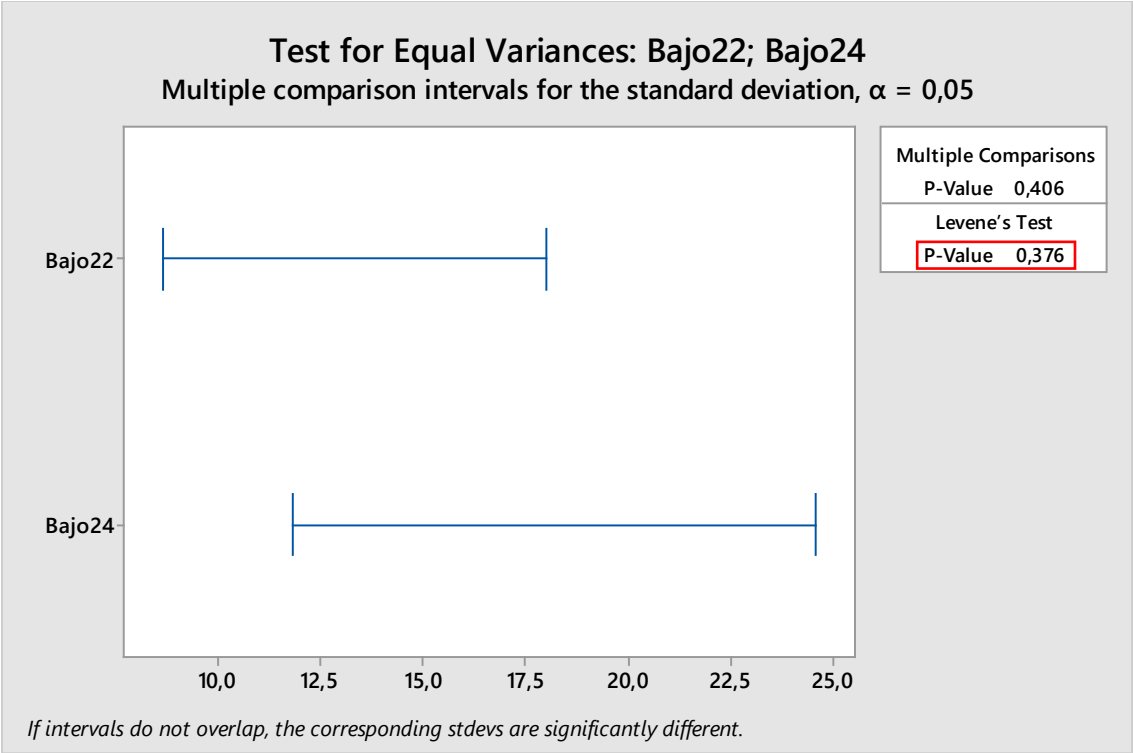


Ilustración 78: Análisis de homogeneidad de varianzas entre las mezclas sin fibras con solicitación baja y un 22% y 24% de huecos.

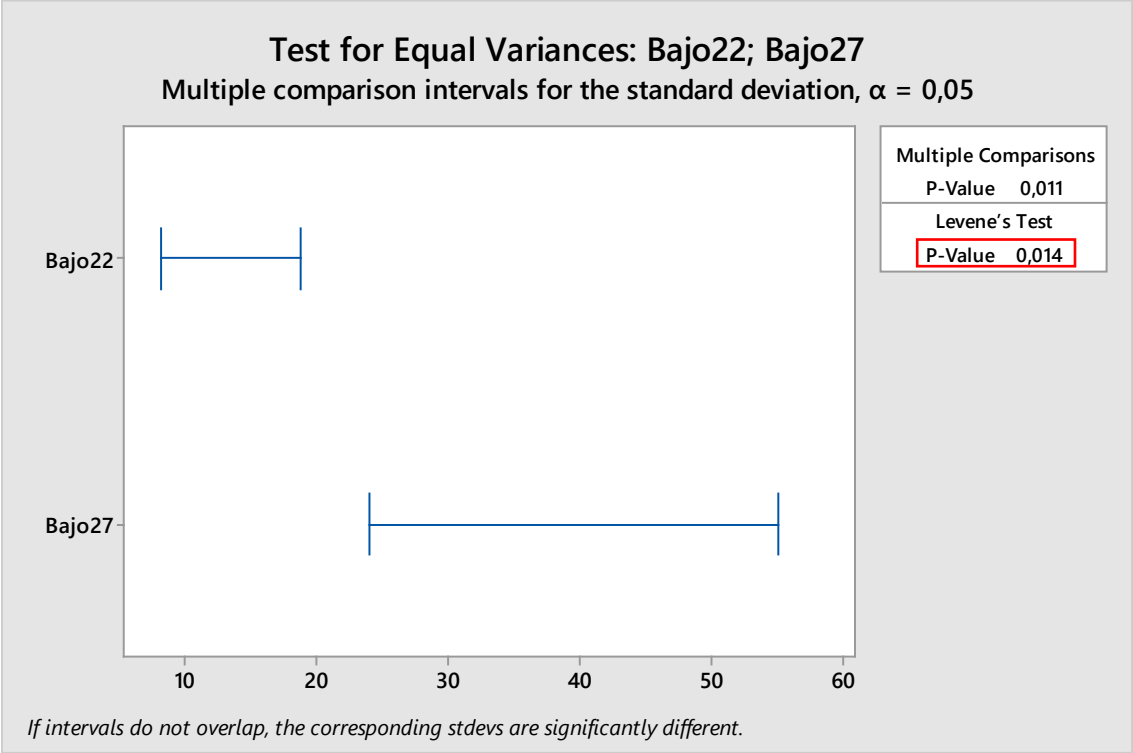


Ilustración 79: Análisis de homogeneidad de varianzas entre las mezclas sin fibras con solicitación baja y un 22% y 27% de huecos.

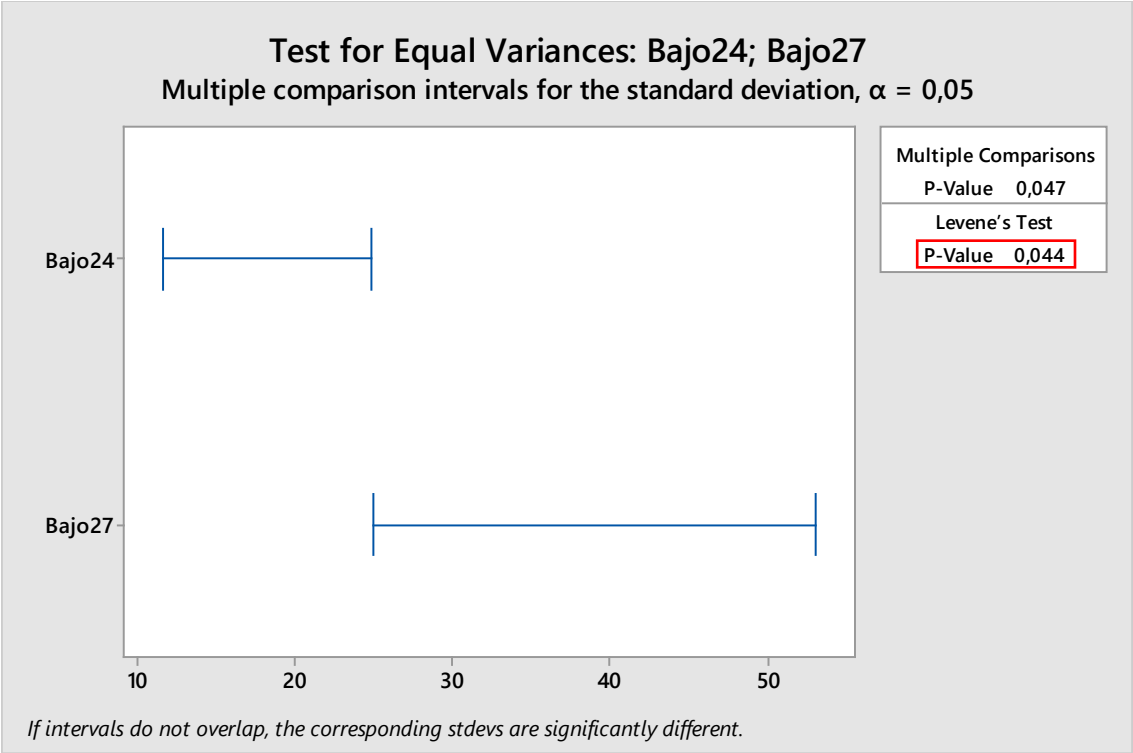


Ilustración 80: Análisis de homogeneidad de varianzas entre las mezclas sin fibras con solicitación baja y un 24% y 27% de huecos.

II.1.3. Distribución paramétrica.

Empleamos la distribución t de Student.

Two-Sample T-Test and CI: Alto22; Alto24

```
Two-sample T for Alto22 vs Alto24

        N  Mean  StDev  SE Mean
Alto22  9  81,7   17,8      5,9
Alto24  8  97,8   24,8      8,8


Difference = μ (Alto22) - μ (Alto24)
Estimate for difference:  -16,1
95% CI for difference:  (-39,1; 6,9)
T-Test of difference = 0 (vs ≠): T-Value = -1,52  P-Value = 0,153  DF = 12
```

Ilustración 81: Distribución t de student para las mezclas sin fibras con solicitación alta y un 22% y 24% de huecos.

Two-Sample T-Test and CI: Bajo22; Bajo24

```
Two-sample T for Bajo22 vs Bajo24

        N  Mean  StDev  SE Mean
Bajo22  8  56,4   10,9      3,8
Bajo24  8  60,1   14,8      5,2


Difference = μ (Bajo22) - μ (Bajo24)
Estimate for difference:  -3,66
95% CI for difference:  (-17,82; 10,49)
T-Test of difference = 0 (vs ≠): T-Value = -0,56  P-Value = 0,583  DF = 12
```

Ilustración 82: Distribución t de student para las mezclas sin fibras con solicitación baja y un 22% y 24% de huecos.

II.1.4. Distribución no paramétrica

Empleamos la prueba U de Mann – Whitney.

Mann-Whitney Test and CI: Alto22; Alto27

```
        N  Median
Alto22  9   78,20
Alto27  8  121,25


Point estimate for η1 - η2 is -44,10
95,1 Percent CI for η1 - η2 is (-110,51;-22,93)
W = 47,0
Test of η1 = η2 vs η1 ≠ η2 is significant at 0,0013
```

Ilustración 83: Prueba U de Mann – Whitney para las mezclas sin fibras con solicitación alta y un 22% y 27% de huecos.

Mann-Whitney Test and CI: Alto24; Alto27

```
        N  Median
Alto24  8  103,05
Alto27  8  121,25


Point estimate for η1 - η2 is -23,90
95,9 Percent CI for η1 - η2 is (-101,10;-2,20)
W = 47,0
Test of η1 = η2 vs η1 ≠ η2 is significant at 0,0313
```

Ilustración 84: Prueba U de Mann – Whitney para las mezclas sin fibras con solicitación alta y un 24% y 27% de huecos

Mann-Whitney Test and CI: Bajo22; Bajo27

```
        N  Median
Bajo22  8   60,45
Bajo27  8   98,30


Point estimate for η1 - η2 is -44,60
95,9 Percent CI for η1 - η2 is (-78,10;-19,51)
W = 42,0
Test of η1 = η2 vs η1 ≠ η2 is significant at 0,0074
```

Ilustración 85: Prueba U de Mann – Whitney para las mezclas sin fibras con solicitación baja y un 22% y 27% de huecos

Mann-Whitney Test and CI: Bajo24; Bajo27

```
        N  Median
Bajo24  8   60,65
Bajo27  8   98,30


Point estimate for η1 - η2 is -43,60
95,9 Percent CI for η1 - η2 is (-75,81;-13,18)
W = 43,0
Test of η1 = η2 vs η1 ≠ η2 is significant at 0,0101
```

Ilustración 86: Prueba U de Mann – Whitney para las mezclas sin fibras con solicitación baja y un 24% y 27% de huecos

II.2. Mezclas con fibras

II.2.1. Análisis paramétrico

A continuación, se muestran los resultados para comprobar si la distribución es normal.

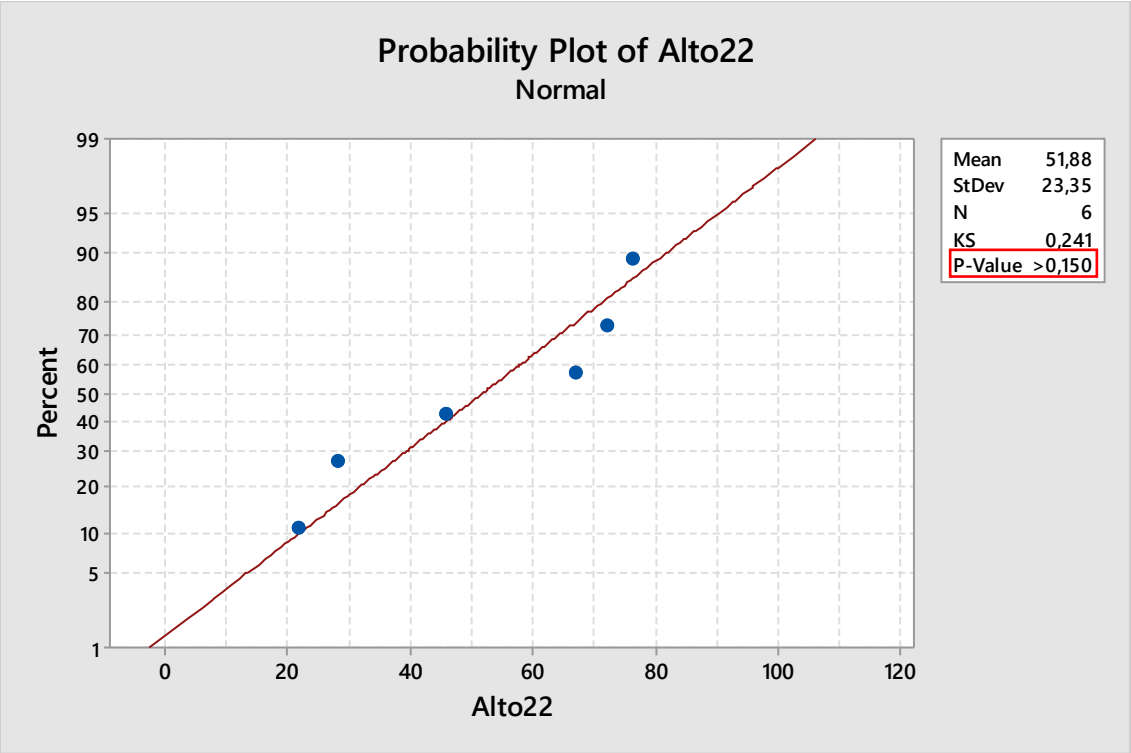


Ilustración 87: Análisis paramétrico de las mezclas PA16 con fibras con un 22% de huecos y solicitación alta.

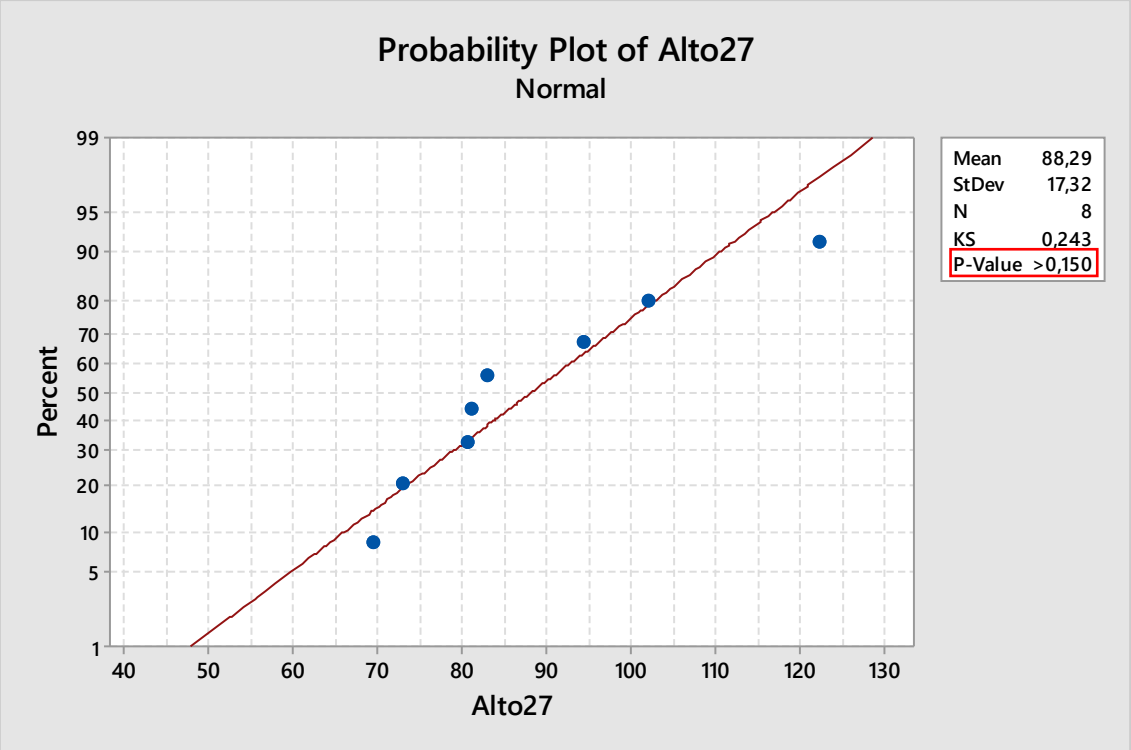


Ilustración 88: Análisis paramétrico de las mezclas PA16 con fibras con un 27% de huecos y solicitación alta.

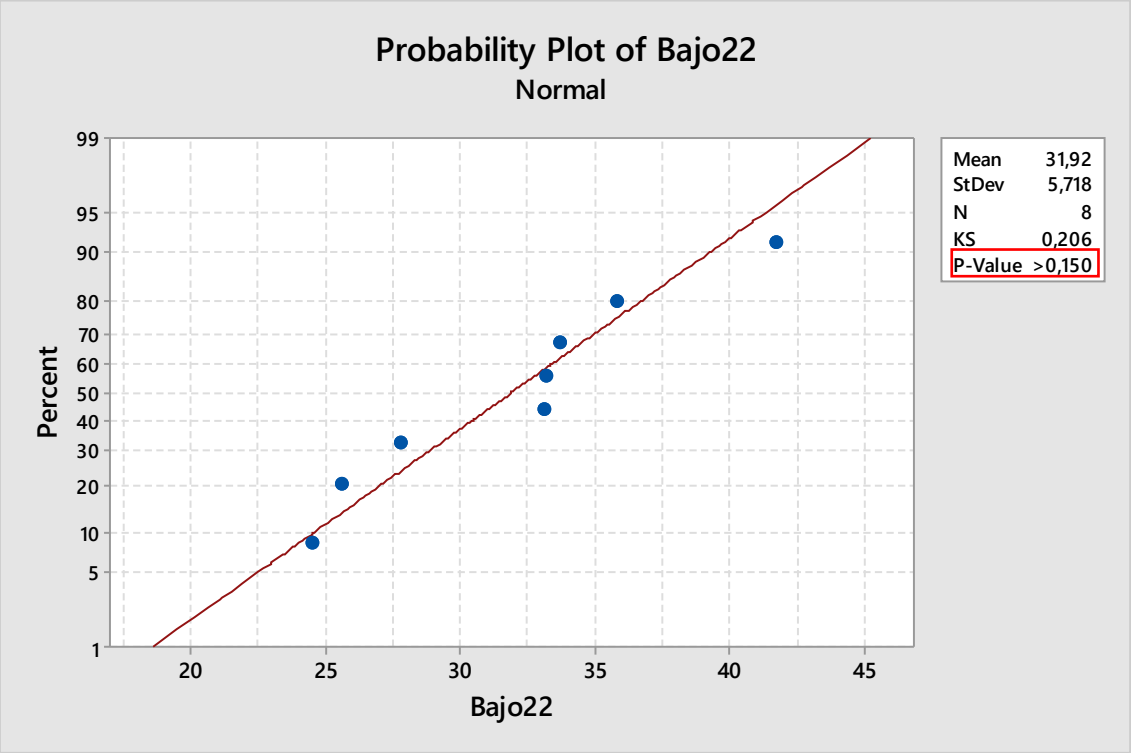


Ilustración 89: Análisis paramétrico de las mezclas PA16 con fibras con un 22% de huecos y solicitación baja.

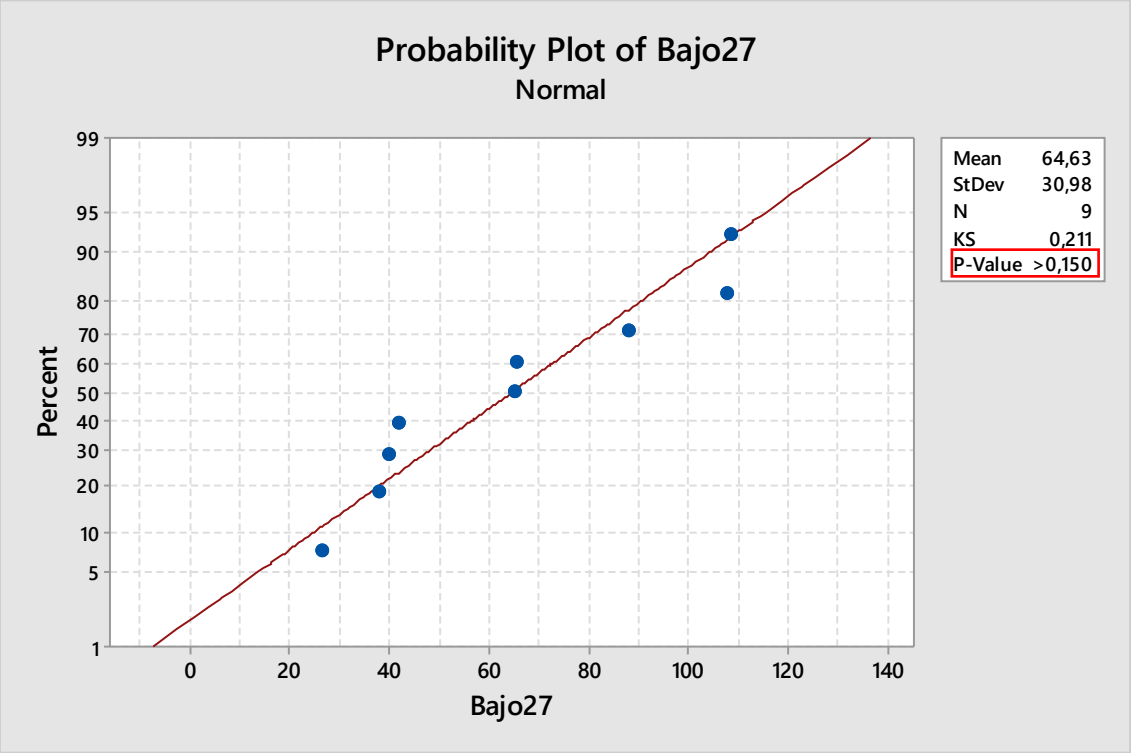


Ilustración 90: Análisis paramétrico de las mezclas PA16 con fibras con un 27% de huecos y solicitación baja.

II.2.2. Homogeneidad de varianzas

Calculamos si hay homogeneidad entre las varianzas.

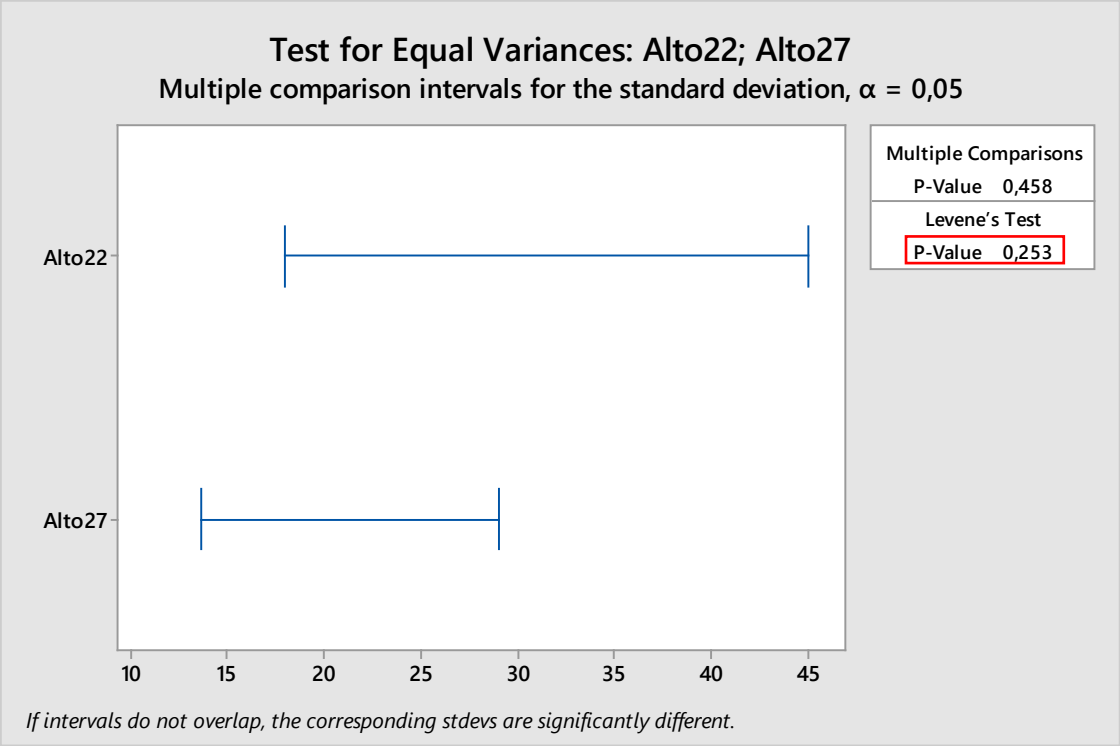


Ilustración 91: Análisis de homogeneidad de varianzas entre las mezclas con fibras con solicitación alta y un 22% y 27% de huecos.

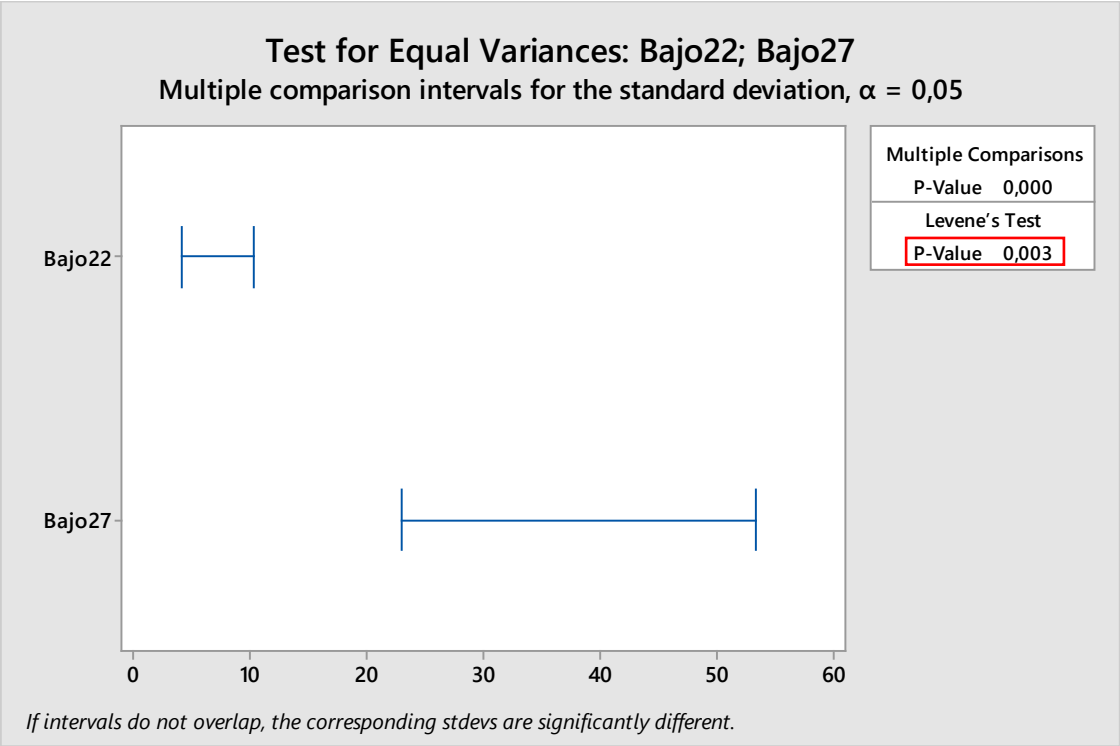


Ilustración 92: Análisis de homogeneidad de varianzas entre las mezclas con fibras con solicitación baja y un 22% y 27% de huecos.

II.2.3. Distribución paramétrica

Empleamos la distribución t de student.

Two-Sample T-Test and CI: Alto22; Alto27

```
Two-sample T for Alto22 vs Alto27

        N  Mean  StDev  SE Mean
Alto22  6  51,9   23,4      9,5
Alto27  8  88,3   17,3      6,1


Difference = μ (Alto22) - μ (Alto27)
Estimate for difference:  -36,4
95% CI for difference:  (-62,5; -10,3)
T-Test of difference = 0 (vs ≠): T-Value = -3,21  P-Value = 0,012  DF = 8
```

Ilustración 93: Distribución t de student para las mezclas con fibras con solicitación alta y un 22% y 27% de huecos.

II.2.4. Distribución no paramétrica

Empleamos la prueba U de Mann – Whitney.

Mann-Whitney Test and CI: Bajo22; Bajo27

```
        N  Median
Bajo22  8   33,15
Bajo27  9   65,10


Point estimate for η1 - η2 is -30,55
95,1 Percent CI for η1 - η2 is (-66,20;-4,78)
W = 44,0
Test of η1 = η2 vs η1 ≠ η2 is significant at 0,0081
```

Ilustración 94: Prueba U de Mann – Whitney para las mezclas con fibras con solicitación baja y un 22% y 27% de huecos.

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

DESARROLLO DE UNA NUEVA PRUEBA DE CONTROL Y VALIDACIÓN DE MEZCLAS POROSAS

MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS CANALES Y PUERTOS — SEPTIEMBRE 2022

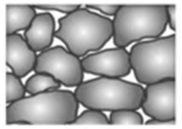
AUTOR: DARÍO PRIETO QUINTANA DIRECTORES: MIGUEL ÁNGEL CALZADA PÉREZ & PEDRO LASTRA GONZÁLEZ

1.INTRODUCCIÓN

Las mezclas porosas (PA) son aquellas que contienen un alto porcentaje de huecos con una granulometría continua, las ventajas que presentan son: mayor drenaje, menor ruido, etc. La pérdida de partículas es el factor limitante de este tipo de mezclas y consiste en el desprendimiento de los áridos de la mezcla bituminosa.

Las causas son variadas y abarcan desde una mala compactación de la mezcla o mal diseño hasta la presencia de humedad en la puesta en obra.

Las consecuencias son: el deterioro de la superficie, dando lugar a baches, discontinuidades y la disminución de la resistencia al deslizamiento, reduciendo en consecuencia la seguridad para los conductores y la vida útil del firme.



PA

El objetivo del trabajo ha sido desarrollar un nuevo ensayo de control y validación de las mezclas porosas que represente mejor los esfuerzos superficiales que sufren las mezclas porosas debido al tráfico, lo que permitiría analizar mejor aditivos que mejoren su comportamiento.

Se han realizado ensayos en diferentes condiciones: carga de los elementos de contacto, porcentaje de huecos, número de ciclos por minuto y número de ciclos totales.

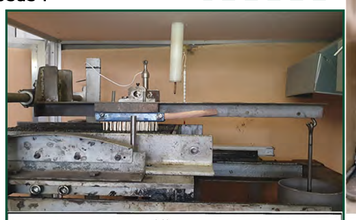
Además, se procedió a analizar el impacto de fibras de aramida.

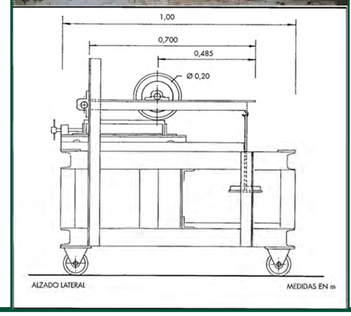
2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

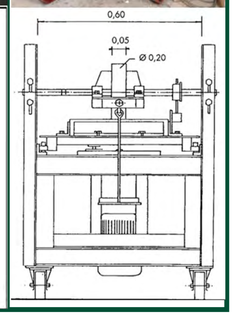
La metodología desarrollada trata de reproducir el paso de los vehículos y la fuerza que son capaces de transmitir a las capas de rodadura .

La máquina de ensayo empleada se ha adaptado de la norma de "Evaluación de deformaciones plásticas de mezclas bituminosas".

MÁQUINA ADAPTADA







Cepillos de acero latonado

96 ensayos realizados con PA de los 123 realizados en total.

Cálculo de la pérdida de partículas: diferencia de pesadas antes y después de ensayar.

Cálculo de la deformación: valor medio de los valores medios de deformación máxima y mínima.

Cálculo de la temperatura máxima: máximo valor alcanzado.

			Porcentaje de huecos		
			22%	24%	27%
Con fibras	Tipo solicitación	Solicitación alta (6 kg + 1.000 ciclos)	ALTO-22-CON	-	ALTO-27-CON
		Solicitación baja (9 kg + 400 ciclos)	BAJO-22-CON	-	BAJO-27-CON
Sin fibras	Tipo solicitación	Solicitación alta (6 kg + 1.000 ciclos)	ALTO-22-SIN	ALTO-24-SIN	ALTO-27-SIN
		Solicitación baja (9 kg + 400 ciclos)	BAJO-22-SIN	BAJO-24-SIN	BAJO-27-SIN

Caucho NBR

Caucho de nitrilo butadieno. Dureza en la escala Shore A ~ 65 (similar a los neumáticos).

Cálculo de la pérdida de partículas: Recolectar todo el material obtenido (caucho + áridos) y tamizarlo por el tamiz 2mm, obteniendo así el árido grueso desprendido.

Porcentaje de huecos = 22%		Masa añadida			
		4 kg	9 kg	14 kg	16,5 kg
Tipo de velocidad	Velocidad alta (21 ± 0,5 ciclos/min)	✓	✓	-	-
	Velocidad media (8 ± 0,5 ciclos/min)	-	-	✓	✓
	Velocidad baja (4 ± 0,5 ciclos/min)	-	-	-	✓

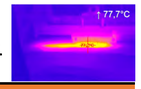
3.1. RESULTADOS CON CEPILLOS

Los resultados obtenidos son coherentes pues a mayor porcentaje de huecos hay una mayor pérdida de partículas. Asimismo, se produce una mayor pérdida de partículas si se aplica la solicitación alta que si se aplica la baja.

Si se emplean fibras en la mezcla, se reduce en un 40% la pérdida de partículas.

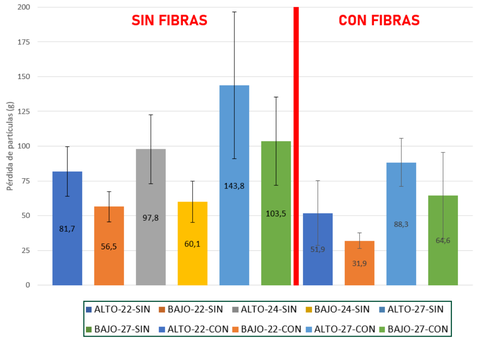
El parámetro deformación no es útil para evaluar de forma indirecta la pérdida de partículas.

El rango de temperaturas máximas se concentra entre 75°C y 80°C.

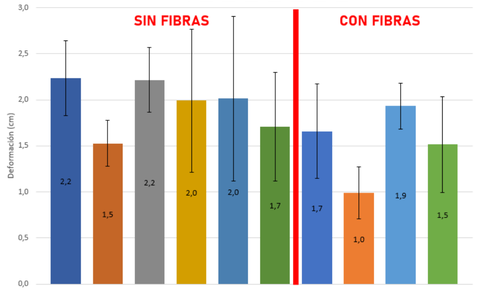


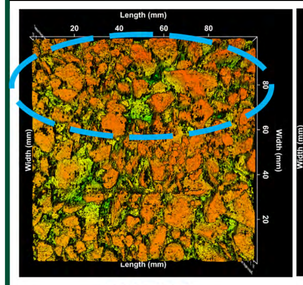
p-valores (pérdida de partículas)			22% - 24%	22% - 27%	24% - 27%
Con fibras	Tipo de solicitación	Solicitación alta	-	0,012	-
		Solicitación baja	-	0,008	-
Sin fibras	Tipo de solicitación	Solicitación alta	0,153	0,001	0,031
		Solicitación baja	0,583	0,007	0,010

PÉRDIDA DE PARTÍCULAS

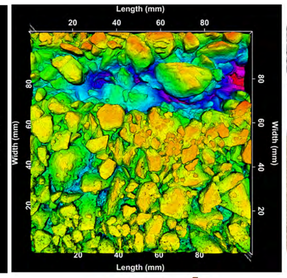


DEFORMACIÓN





ANTES



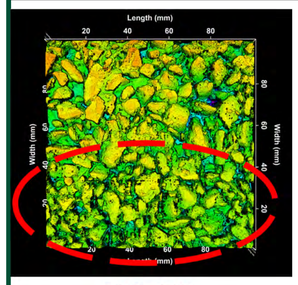
DESPUÉS

REALIDAD

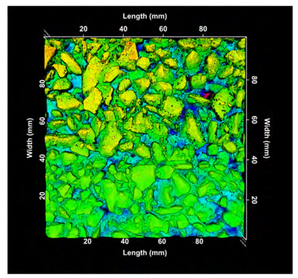
3.2. RESULTADOS CON CAUCHO

No se obtuvieron resultados coherentes, pues a igualdad de condiciones, la probeta podía perder áridos o no. Además, debido a que el caucho se desgastaba, éste se quedaba introducido entre los poros de la mezcla, invalidando los resultados de este estudio. Los resultados positivos indican una pérdida de partículas en la probeta. Los resultados negativos corresponden al caucho alojado entre los huecos de la mezcla porosa.

Material empleado	N.º ciclos por minuto	N.º ciclos totales	Presión aplicada (kg/cm²)	Pérdida de partículas (g)
Caucho NBR	4	200	1,34	1,5
	8	200	1,19	8,2
				15,4
				-0,3
			1,34	6,5
		360	1,19	-3,3
	21.5	200	0,89	-2,6
		400	0,59	-1,0



ANTES



DESPUÉS

REALIDAD

4. CONCLUSIONES

Cepillos

- Metodología sensible a las variables analizadas: porcentaje de huecos, empleo de fibras y solicitación aplicada.
- Patrón de pérdida de partículas coherente.
- Reducción de la pérdida de partículas en un 40% si se emplean fibras en las mezclas.
- El parámetro deformación no es útil.
- Rango de temperaturas homogéneo.

Caucho

- El procedimiento empleando caucho no es coherente.

Futuras líneas de investigación

- Comparativa de resultados a escala real.
- Desarrollo de la metodología: análisis de resultados con el escáner láser. Análisis en mezclas más cerradas. Análisis con materiales más rígidos.