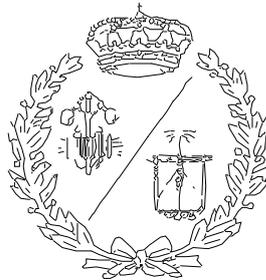


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

**Análisis del fenómeno de desgaste por
abrasión en conjuntos fibra-matriz de fibra de
carbono-epoxy**

**(Analysis of wear phenomena in Carbon Fibre
Reinforced Polymer Matrix Composites)**

Para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Héctor José Erquicia Gonzalez

Mayo - 2017

Índice

Memoria

1.- Introducción y objetivos

2.- Estado del arte

2.1.- Los materiales compuestos

2.2.- La fibra de carbono (Compuesto)

2.2.1.- Fibras de carbono (Refuerzo)

2.2.2.- Resina epoxy (Matriz)

2.2.3.- Adiciones

2.3.- Proceso de fabricación del compuesto fibra de carbono

2.4.- La fibra de carbono en las bicicletas de competición

2.4.1.- Historia de los materiales en el ciclismo

2.4.2.- Las llantas: motivación del análisis del desgaste

3.- Materiales y Metodología experimental

3.1.- Adiciones

3.2.- Granulometría

3.3.- Probetas de ensayo

3.4.- Ensayo de tracción

3.4.1.- Geometría de las probetas

3.4.2.- Preparación y conducción del ensayo

3.4.3.- Cálculo de resultados

3.5.- Ensayo de flexión en tres puntos

- 3.5.1.- Geometría de las probetas
- 3.5.2.- Preparación y conducción del ensayo
- 3.5.3.- Cálculo de resultados
- 3.6.- Ensayo de impacto o ensayo normalizado Charpy
 - 3.6.1.- Geometría de las probetas
 - 3.6.2.- Preparación y conducción del ensayo
 - 3.6.3.- Cálculo de resultados
 - 3.6.4.- Tipos de fallo
- 3.7.- Ensayo normalizado Taber o de abrasión
 - 3.7.1.- Principio teórico del ensayo Taber
 - 3.7.2.- Geometría de las probetas
 - 3.7.3.- Principio de funcionamiento del abrasímetro Taber
 - 3.7.4.- Preparación y conducción del ensayo
 - 3.7.4.1.- Primera tanda
 - 3.7.4.2.- Segunda tanda
 - 3.7.4.3.- Tercera tanda
 - 3.7.5.- Cálculo de resultados
- 3.8.- Ensayo de erosión
 - 3.8.1.- Geometría de las probetas
 - 3.8.2.- Preparación y conducción del ensayo
 - 3.8.2.1.- Medición de huellas de probetas mediante laser

3.8.3.- Cálculo de resultados

4.- Resultado de los ensayos

4.1.- Ensayo de tracción

4.2.- Ensayo de flexión en tres puntos

4.3.- Ensayo de impacto Charpy

4.4.- Ensayo de abrasión Taber

4.5.- Ensayo de erosión

5.- Análisis de resultados de los ensayos

5.1.- Ensayo de tracción

5.2.- Ensayo de flexión en tres puntos

5.3.- Ensayo de impacto Charpy

5.4.- Ensayo de abrasión Taber

5.4.1.- Primera Tanda (medidas de pérdida de peso y espesor a 100, 500, 1000 y 2000 ciclos)

5.4.2.- Segunda Tanda (medida de temperatura, y pérdida de peso y espesor a 1000 ciclos)

5.4.3.- Tercera Tanda (medida de temperatura, y pérdida de peso y espesor a 1000 ciclos con aporte externo de calor)

5.5.- Ensayo de erosión

6.- Conclusiones

7.- Bibliografía

Capítulo 1.- Introducción y objetivos

Actualmente, los materiales más utilizados en el día a día de la industria mundial siguen siendo materiales “simples”, entendiéndose como estos a aquellos materiales que no están formados por una unión de dos o más componentes, si no que todo material es un propio componente. Durante mucho tiempo, las características de estos materiales han sido suficientes para mantener el avance tecnológico, a pesar de sus limitaciones. Sin embargo, en los últimos años, y debido a la continua aceleración en el desarrollo mundial, ha surgido la necesidad de encontrar nuevos materiales con características que rompan, de una vez por todas, con las limitaciones de los materiales simples. La solución: los materiales compuestos, que no son más que la unión de dos o más materiales simples referidos como componentes, y macroscópicamente diferenciables.

Las características de los materiales compuestos suelen aunar lo mejor de sus componentes, para dar como resultado un material que se comporte relativamente bien en casi cualquier situación. Obviamente, esta mejora de su comportamiento tiene una repercusión, y es que es complejo y caro fabricar un material compuesto, por lo que actualmente su uso está reservado a aplicaciones de relativa responsabilidad.

De entre los materiales compuestos, uno de los más reconocidos es la fibra de carbono. De este material compuesto, es muy conocida su gran resistencia mecánica y su ligereza, que lo hace ideal para muchas potenciales aplicaciones, como el equipamiento deportivo, desde espinilleras para futbolistas hasta carrocerías completas de monoplazas de Fórmula 1.

En este proyecto se pretende analizar en profundidad el comportamiento mecánico de la fibra de carbono embutida en epoxy ante el fenómeno del desgaste, realizando en el proceso análisis de otros parámetros mecánicos del material. Para caracterizar de la mejor forma posible fenómeno del desgaste, una serie de adiciones han sido añadidas a la fibra de carbono. Por tanto, el objetivo del proyecto se define como la caracterización del fenómeno de desgaste en la fibra de carbono embutida en epoxy, y el impacto de ciertas adiciones en dicho fenómeno.

La caracterización mecánica del material objeto del proyecto ha sido realizada a través de una serie de ensayos mecánicos de diferente índole. El ensayo de tracción aporta información sobre el módulo de elasticidad del material, un parámetro característico del material que nos aporta mucha información sobre el mismo; el ensayo de impacto Charpy, que se lleva a cabo para conocer la resiliencia del material; y el ensayo de flexión (en nuestro caso en 3 puntos), conducido para estimar la rigidez del material. Los ensayos

citados hasta ahora sirven para ampliar la caracterización de los materiales del proyecto, pero realmente los ensayos clave del estudio son los referentes al desgaste del material. Para ello, se han llevado a cabo dos ensayos complementarios que buscan responder la misma cuestión tribológica, cuáles son los mecanismos del desgaste en un determinado material, aunque desde unas condiciones de contorno diferentes. Estos ensayos son: el ensayo de erosión, en el que intervienen tres cuerpos (dos superficies y un corriente de partículas abrasivas); y el ensayo de abrasión Taber, en el que solo intervienen dos cuerpos (dos superficies, sin partículas externas abrasivas).

En el capítulo 2 se realiza un repaso del estado del arte de la temática de los materiales compuestos, particularizando el material objeto del proyecto, la fibra de carbono embebida en epoxy. Se trata la historia del material compuesto, los componentes que forman el material de este estudio con sus características básicas y el principal proceso de fabricación del material. Por último, se hace hincapié en una aplicación específica del material y se establece el porqué del estudio del desgaste en este material.

En el inicio del capítulo 3 se recoge la caracterización de las adiciones por tamaño (granulometría), cómo se han obtenido las probetas utilizadas en el ensayo y qué sistema de organización se ha utilizado para distinguir las probetas entre sí (codificación). A continuación, se entra en el núcleo del capítulo donde se revisan los principios teóricos de los ensayos y la morfología de sus probetas, así como los métodos de preparación y conducción de cada ensayo.

En el capítulo 4 únicamente se exponen los resultados de los ensayos.

En el capítulo 5 se encuentra el análisis de los resultados del capítulo anterior, y finalmente se realiza una comparativa de las propiedades de los materiales en cuanto su adición.

En el capítulo 6 se establecen las conclusiones obtenidas de la comparación realizada en el capítulo 5 y se presenta de forma breve el impacto económico que puede tener el hecho de usar estas adiciones en los materiales.

En la parte final se encuentra la bibliografía, con todas las referencias de las que se ha tomado la información para complementar este proyecto.

Capítulo 2.- Estado del arte

2.1. Los materiales compuestos

Un material compuesto es aquel formado por un conjunto macroscópico de dos o más componentes, o fases, de forma que estos puedan ser identificados físicamente debido a la interacción común entre ellos. El material compuesto es heterogéneo y anisótropo, y posee fases químicas distintas y diferenciadas a simple vista [1].

La historia de los materiales compuestos comienza con los materiales compuestos “naturales”, cuyo origen se remonta a la aparición de los seres vivos que contienen estos materiales en su morfología. La madera de los árboles, por ejemplo, es un material compuesto cuyos constituyentes son las fibras de celulosa que están embebidas en una matriz de hemicelulosa y lignina. Otro ejemplo de este tipo de materiales son los huesos, formados por fibras de colágeno embebidas en matrices de distinto orden constituidas de elementos básicos como el calcio o el fósforo [2].

Sin embargo, no fue hasta la década de 1950 cuando, en los Estados Unidos, se comenzó a investigar y desarrollar de forma acelerada sobre los materiales compuestos. La floreciente economía norteamericana de posguerra junto con los requerimientos de materiales cada vez más ligeros, rígidos y resistentes para la industria aeroespacial y electrónica fueron los principales impulsores de este desarrollo. Además, comenzaron a formularse teorías sólidas que auguraban el gran potencial de los cristales teóricos perfectos en este tipo de materiales cuyos valores de resistencia a la tracción y módulo elástico superaban 100 veces la de los materiales metálicos más comunes, como el acero [3].

En la actualidad, los materiales compuestos se han convertido en uno de los grandes retos de la industria en cuanto a uso generalizado se refiere, principalmente por su elevado precio, pero siguen siendo una de las pocas alternativas en cuanto a aplicaciones de responsabilidad se refiere.

Se diferencian tres puntos básicos que los materiales compuestos de uso estructural deben cumplir [4]:

- El material compuesto resultante debe poseer mejores propiedades, generales o específicas, que las de los componentes por separado sin que ninguna de las propiedades originales de los constituyentes se vea empeorada de forma significativa.
- Su fabricación debe poder realizarse de forma sistemática a partir de sus constituyentes básicos, logrando así un material resultante con unas propiedades óptimas.
- Sus constituyentes básicos (2 o más) deben poder ser separados de forma mecánica.

Algunas de las propiedades más comunes que pretenden ser mejoradas usando materiales compuestos son:

- Resistencia mecánica y/o térmica
- Rigidez
- Durabilidad o vida de servicio
- Conductividad térmica y/o eléctrica
- Peso
- Resistencia al desgaste y/o corrosión

Aunque es muy complicado mejorar todas estas propiedades al mismo tiempo, tampoco es necesario puesto que los materiales compuestos están diseñados para aplicaciones específicas donde es necesario que el material posea un número reducido de propiedades excepcionales, al mismo tiempo que mantiene o empeora de forma ligera sus propiedades en otros aspectos secundarios. El objetivo es, en sí, crear un material cuyas mejores propiedades sean aquellas necesarias para el desempeño de una determinada tarea [5].

Otro de los pilares sobre los que se asientan los materiales compuestos es el hecho de que son, en su gran mayoría, materiales elaborados artificialmente, aunque también existen ejemplos de materiales compuestos “naturales”, como los huesos y la madera [2]. Esta capacidad de elaborar un material a partir de la combinación de otros elimina en gran medida muchas de las barreras de los materiales “simples”, permitiendo diseñar materiales con unas propiedades específicas para aplicaciones determinadas.

Puesto que los materiales compuestos pueden elaborarse de forma natural o artificial, y esto condiciona la estrategia a seguir a la hora de elegir qué material utilizar para una respectiva aplicación, se hace necesario distinguir a que campo pertenece cada material en

el ámbito global de la ciencia de los materiales, aun estando dentro del mismo sub-campo, los materiales compuestos. Esta distinción se representa en la Fig. 2.1.1.

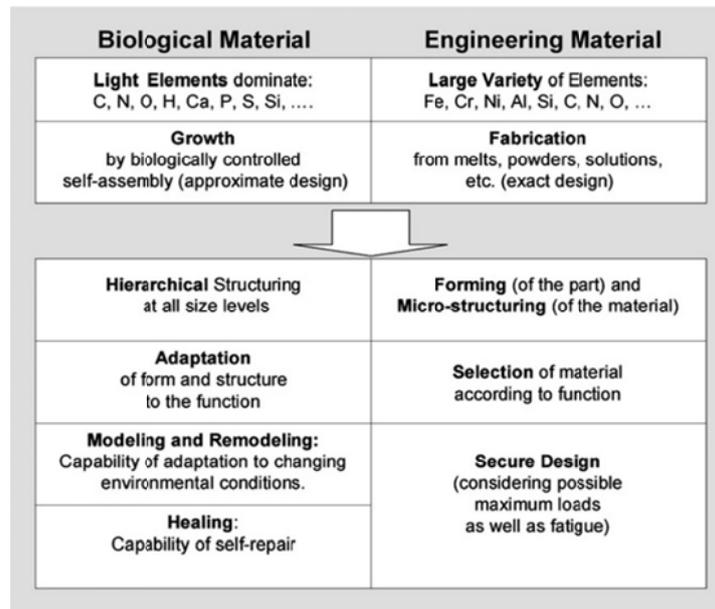


Fig 2.1.1 Los materiales biológicos e ingenieriles están gobernados por una elección muy distinta de elementos básicos y modos de fabricación. De esto resultan las distintas estrategias y desarrollo a la hora de escoger un material (debajo de la flecha) [2]. Véase también [6].

Como se aprecia en la Fig. 2.1.1, los materiales biológicos, aquellos elaborados de forma natural, tienen una predominancia de elementos ligeros y no son elaborados, en el sentido riguroso de la palabra, sino que son el resultado del crecimiento y adaptación a un medio, con el objeto de obtener el mejor desempeño posible en sus tareas. Por otra parte, los materiales ingenieriles, aquellos elaborados artificialmente, están formados por una gran variedad de elementos y son propiamente fabricados, pues han sido diseñados a partir de una selección, análisis y síntesis de la problemática del medio en el que van a ser utilizados. Son estos materiales compuestos ingenieriles los más importantes en la industria de la actualidad y, por lo tanto, en este trabajo nos centraremos en ellos.

La importancia de saber distinguir los materiales compuestos biológicos e ingenieriles es alta, pero la clasificación más común e importante en cuanto a materiales compuestos es aquella que los distingue según la morfología y unión de sus constituyentes. En esta clasificación, tres tipos de materiales compuestos son aceptados [1], con una cuarta clase formada de las posibles combinaciones de las anteriores [5]:

- 1) Materiales compuestos reforzados con fibras: consisten en un conjunto de *whiskers*, fibras o alambres, según metodología, que se encuentran embebidos en una matriz, generalmente polimérica. Diversos parámetros de las fibras, como su longitud, orientación, concentración, diámetro y distribución afectan en gran medida al comportamiento del material compuesto.



Fig 2.1.2 El material conocido como “fibra de carbono” pertenece a la clase de materiales compuestos reforzados con fibra. En la figura se puede apreciar el tejido entramado de fibras de carbono embebido en una matriz polimérica de epoxy.

- 2) Materiales compuestos reforzados con partículas: consisten en un conjunto de partículas, ya sean grandes o pequeñas, que se aglomeran en una matriz similar a la de los materiales reforzados con fibras. El refuerzo será más efectivo cuanto menor sea su tamaño, y mejor se reparta entre la matriz.



Fig 2.1.3 El hormigón es un tipo de material compuesto reforzado con partículas. Las partículas de arena y grava se aglomeran en una pasta de cemento hidratada, lo que, al endurecerse, forma un material barato, duradero y con buena resistencia a compresión [7].

- 3) Materiales compuestos estructurales (laminares o paneles): consisten en un conjunto de láminas o paneles apilados y pegados entre sí. La dirección de elevada resistencia de los paneles puede variar, de forma que el material puede comportarse muy bien en una determinada dirección o comportarse moderadamente bien en un conjunto de direcciones.

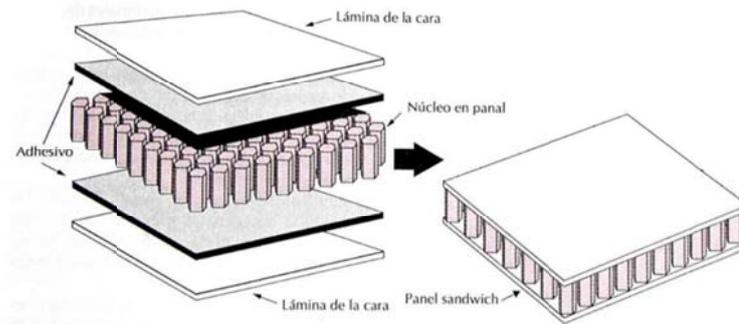


Fig 2.1.4 Los paneles sándwich con estructura en panal son materiales compuestos estructurales muy utilizados, debido a su gran resistencia perpendicular [1]. Partes del fuselaje de los aviones comerciales actuales se componen de este tipo de material.

- 4) Materiales compuestos formados de la combinación de dos o tres de las clases anteriores: son el resultado de combinar dos o más fases de materiales compuestos de las clases anteriores, siendo las clases diferentes entre sí.

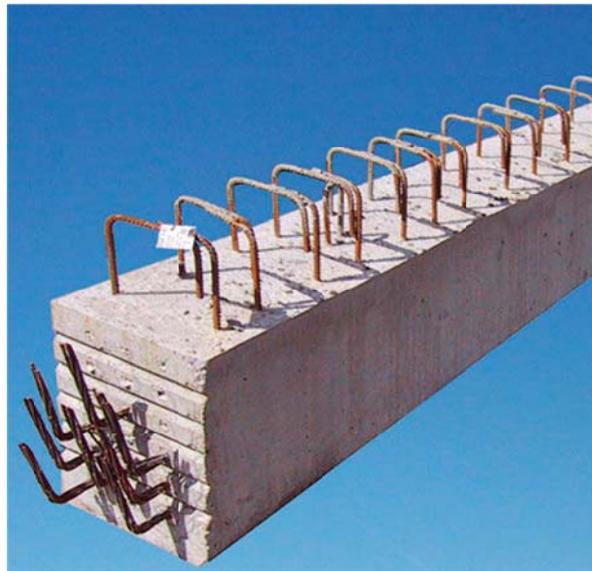


Fig 2.1.5 El hormigón armado es un material de uso común en la construcción y se puede considerar como material compuesto reforzado con fibras (barras de acero embebidas) y, a la vez, como material compuesto reforzado con partículas (partículas de arena y grava en pasta de cemento) [8].

En los últimos años, el uso de los materiales compuestos se ha visto aumentado de forma exponencial en aplicaciones de cierta responsabilidad, como la industria aeroespacial, o en aplicaciones deportivas a la vanguardia en el uso de nuevos materiales, como la Formula 1. Este incremento ha supuesto la práctica sustitución de los materiales metálicos en estos campos, impulsada principalmente por dos ventajas fundamentales de dichos materiales compuestos frente a los materiales metálicos [9].

La primera ventaja es el peso. En el diseño de los materiales compuestos uno de los principales puntos de interés es el uso de constituyentes de baja densidad que, unidos entre sí, resulten en un material con unas propiedades mecánicas equiparables a la de los materiales metálicos. Así, aunque los materiales metálicos puedan equipararse a los materiales compuestos en cuanto a cumplimiento de unas propiedades mecánicas, su elevado peso lastra sus propiedades específicas, tan importantes en sectores como el del transporte. Un claro ejemplo de ello son las misiones espaciales, donde cada kilo de más cuenta, y más concretamente alrededor de 10000 \$ en el año 2005 [10].

La segunda ventaja es lo que se conoce como anisotropía. Debido a la capacidad de diseño en los materiales compuestos, uno de los puntos clave de este diseño se centra en el comportamiento del material respecto de la dirección y sentido de las solicitaciones. Estudiando las solicitaciones a las que va a estar sometido el material, podemos configurar el material compuesto para que sus propiedades mecánicas sean tanto mejores en los planos y direcciones de solicitaciones más severas, por lo que se optimiza en gran medida el uso del material. Esto no ocurre con los materiales metálicos, que son isótropos, y por tanto la optimización que es viable en los materiales compuestos, no es posible.

Por el contrario, los materiales compuestos también tienen sus inconvenientes frente a sus competidores más directos.

Primero, el coste. Debido a su difícil fabricación, en especial en piezas de grandes dimensiones y formas complejas, derivada tanto por la especificidad de los equipos de fabricación como por sus complejos procesos de fabricación. En general, los materiales metálicos son más fáciles de producir y procesar, lo que abarata su coste frente a los materiales compuestos.

Segundo, la ausencia de mecanismos de aviso veraces o teorías precisas para predecir cómo y cuándo va a ocurrir un fallo que desencadene la rotura total del material compuesto. Puesto que los materiales compuestos tienen una historia muy corta respecto del rápido desarrollo de sus métodos de fabricación, existe un cierto vacío de información en cuanto a

sus mecanismos de desgaste y fallo, todo ello obstaculizado por la complejidad del análisis de dichos mecanismos. Esta complejidad analítica, derivada de la anisotropía y los enrevesados diseños necesarios para la optimización de los materiales compuestos, se contraponen totalmente a los más sencillos y conocidos mecanismos de fallo en los materiales metálicos, fruto de la isotropía y larga historia de uso de este tipo de materiales.

A pesar de ello, es previsible que este último inconveniente de los materiales compuestos vaya desapareciendo con el tiempo a medida que se estudian con más detenimiento este tipo de nuevos materiales, llegando a sustituir casi por completo a los materiales metálicos.

2.2. La fibra de carbono (Compuesto)

Cuando coloquialmente se habla de “fibra de carbono”, generalmente nos referimos al material compuesto reforzado con fibras de carbono, y no a las propias fibras de carbono que físicamente forman el reforzante del material. La estructura de este material compuesto lo forma un conjunto entretrejido de fibras de carbono, que actúan como fase reforzante, el cual se encuentra embebido en una matriz, polímero de resina epoxy, que actúa como fase de soporte y da forma al conjunto general que forma el material [4]. Puesto que sus constituyentes son fabricados y no se desarrollan de forma natural, el compuesto de fibra de carbono es un material compuesto ingenieril.

El compuesto de fibra de carbono es uno de los materiales compuestos más populares en la actualidad debido a unas propiedades mecánicas excepcionales, buenas propiedades secundarias y un coste de producción aceptable dentro del campo de los materiales compuestos. Por ello, es utilizada en diversos campos, desde equipamiento deportivo de grandes prestaciones, como raquetas de tenis o aletas de buceo, hasta el sector automotriz, donde existen carrocerías de coches fabricadas íntegramente en fibra de carbono [11].



Fig 2.2.1 Las aletas de fibra de carbono de la marca CARBONTEK suponen una ventaja frente a otros competidores debido a la ligereza y resistencia mecánica de las mismas [12].

A continuación, se citan las propiedades más destacadas de este material [13]:

- Excelentes propiedades mecánicas y tenacidad, con módulos de elasticidad de entre 250 a 400 GPa y resistencias de tracción del entorno de una 250% superiores a las de los aceros comunes más utilizados.
- Resistencia a la fatiga y auto lubricación.
- Estabilidad y aislamiento térmico, pues no tiene grandes expansiones con la temperatura.
- Ligereza, alrededor de un 225% más ligero que el acero común, e incluso un 50% por debajo del aluminio.
- Excelente resistencia química, en especial a la corrosión, incluso sometido a moderadas temperaturas, lo que le hace preferible ante los metales aleados en ciertas aplicaciones.
- Gran capacidad de absorber energía, lo cual es muy ventajoso para aplicaciones de seguridad donde se requieran grandes disipaciones de energía en cortos periodos de tiempo, como los choques de vehículos.
- Compatibilidad biológica, por lo que es interesante de cara a prótesis.

Sin embargo, a pesar de sus ventajas, el compuesto de fibra de carbono tiene un inconveniente, que es su elevado coste de fabricación. Al igual que la mayoría de los materiales compuestos, el proceso de fabricación del compuesto de fibra de carbono, así como de su componente de refuerzo, las fibras de carbono, es complejo y requiere de maquinaria especializada. Todo esto lastra la fabricación global y hace que el compuesto sea un material accesible únicamente para aplicaciones de responsabilidad o artículos de lujo.

De sus dos constituyentes, las fibras de carbono, o refuerzo, le confieren al compuesto sus excepcionales propiedades mecánicas y a la vez flexibilidad, pues se trata de fibras independientes entretejidas mediante un patrón. A su vez el otro constituyente, la matriz de polímero epoxy, sirve como base para unir y contener el tejido de fibras, distribuir de la forma más equitativa las cargas por el tejido y actuar como recubrimiento para proteger al refuerzo de los elementos externos.

2.2.1 Fibras de carbono (Refuerzo)

Las fibras de carbono que sirven como refuerzo del compuesto de fibra de carbono en la actualidad comenzaron a levantar el interés de los norteamericanos a principios de la década de 1950, que veían en este material un perfecto candidato para su uso en los materiales compuestos estructurales.

La fabricación de estas fibras se inició con el proceso de carbonización de rayones sintéticos procedentes de la industria textil, cuyo principal objetivo era la producción de misiles con buenas propiedades a altas temperaturas. Sin embargo, durante el proceso de fabricación, los norteamericanos se percataron de que si, durante el carbonizado, sometían a los rayones sintéticos a temperaturas más altas y durante un periodo de tiempo más largo, las fibras obtenidas eran ligeramente distintas. Esto supuso la primera distinción en cuanto a la fabricación de fibras de refuerzo basadas en el carbono, obteniéndose fibras de carbono o fibras de grafito.

Sometiendo a los rayones a temperaturas moderadas durante un periodo de tiempo moderado, se conseguían fibras de carbono, cuya ordenación era preferentemente bidimensional. Sin embargo, si las temperaturas y tiempos de exposición se elevaban, las fibras obtenidas eran de grafito, cuya ordenación era preferentemente tridimensional, pero cuyo enlace entre capas bidimensionales era muy débil. Por ello, se centró la producción en las fibras de carbono, las más comunes hoy en día, a pesar de que las fibras de grafito también se utilizan en otras aplicaciones, pero en menor porcentaje [14].

En cuanto a la fabricación de las fibras de carbono se estipula que alrededor del 90% de la producción se realiza partiendo de un polímero conocido por sus siglas como PAN (poliacrilonitrilo), mientras que el 10% restante lo forman los citados rayones sintéticos y derivados densos de la destilación fraccionaria del petróleo (breas) [15]. Aunque estos últimos productos son algo más baratos de procesar, la calidad de la fibra final es relativamente peor, por lo que se tiene preferencia por el PAN.

Aunque existen diversas técnicas para el procesado de los materiales precursores de las fibras de carbono, todos ellos siguen una secuencia similar. Tomando como base la secuencia para el precursor de PAN se distinguen 4 fases principales [15]:

1. Hilado: partiendo del polímero PAN, se realiza el hilado del mismo en fibras a través de dos métodos. El primero consiste en mezclar el PAN con ciertos agentes químicos para después bombearlo a través de pequeños orificios hacia una cámara de enfriamiento. Una vez ahí, el PAN se coagula y solidifica en forma de fibras. El segundo método es similar, solo que, tras realizar la mezcla, esta es dirigida a una cámara de calentamiento a través de pequeños orificios, donde los agentes fluidificantes se evaporan, dejando como resultado una fibra sólida. Una vez se tienen las fibras sólidas, estas se lavan y se trefilan hasta el diámetro deseado. Es importante trefilar correctamente las fibras, pues las fuerzas de los enlaces de carbono en fases posteriores dependen directamente de ello.
2. Estabilizado: antes de ser carbonizadas, las fibras deben ser químicamente alteradas para que posean unos enlaces atómicos lineales térmicamente estables. Para ello, las fibras se calientan entre los 200-300 °C durante una media de 75 minutos, de forma que las fibras absorben oxígeno del aire y reordenan sus cadenas de enlaces. Este proceso debe ser estrictamente controlado, pues las reacciones que ocurren en las fibras son complejas y además algunas son exotérmicas, lo que puede llevar a un sobrecalentamiento indeseado de las fibras. Los procesos de calentamiento se pueden llevar a cabo de muchas formas, desde hornos en serie hasta trenes de rodillos calientes.
3. Carbonizado: tras estabilizarse, las fibras son sometidas a altas temperaturas, desde 1000 hasta 3000 °C, durante varios minutos en un horno con una atmósfera inerte (sin oxígeno). Debido a la ausencia de oxígeno, el carbono de las fibras no se quema con las altas temperaturas, pero los elementos que no son carbono (oxígeno y nitrógeno principalmente) de las fibras comienzan a reaccionar y a liberarse en

forma de gases. Puesto que las fibras expulsan la mayor parte de elementos que no son carbono, los átomos de carbono se juntan en forma de cristales, mediante enlaces muy fuertes alineados paralelamente al eje de longitud de la fibra. Durante los tiempos de introducción y retirada de las fibras en los hornos las vías de acceso deben permanecer selladas, a la vez que la presión dentro del horno debe ser mayor que fuera de él, todo ello para evitar la entrada de oxígeno dentro del horno.

4. Tratamiento superficial: tras ser carbonizadas, la superficie de las fibras es ligeramente oxidada. Esto se realiza para conseguir que la superficie de las fibras forme buenos enlaces con el epoxy de la resina de recubrimiento, a la vez que endurece y mejora sus propiedades mecánicas. Para que esta oxidación tenga lugar, las fibras se introducen en atmósferas ricas en gases como aire, ozono o dióxido de carbono, líquidos como hipoclorito sódico o ácido nítrico o de forma electrolítica. En cualquier caso, durante la oxidación se debe extremar la precaución para no favorecer la formación de microfisuras cuya repercusión es muy grande en los fallos de fibras.

A parte de las 4 fases básicas, existe una quinta fase opcional de recubrimiento, donde la fibra recibe un recubrimiento que lo protege de los posibles daños durante su posterior etapa de tejido. Los materiales deben ser compatibles con la resina en la que después se van a embeber las fibras, donde los más utilizados suelen ser epoxy, poliéster o nylon.



Fig 2.2.1.1 Trenzado de fibras de carbono ZOLTEK PX35 bobinadas de 7.2 micras de diámetro de fibra
[16]

El producto de este proceso son los filamentos individuales de carbono, conocidos como mechas, y cuyo diámetro se encuentra entre las 5 y 10 micras.

Tras obtener los filamentos individuales de carbono, estos deben entreteterse para formar una malla o tela que posteriormente se utilizará para la fabricación de las piezas tras haber embebido dicha malla en la resina correspondiente. El tejido de las fibras de carbono es un proceso crítico para el posterior desempeño del compuesto, pues diseñar mal el tipo de entramado y orientación de las fibras puede suponer que el compuesto final tenga unas propiedades muy pobres en direcciones en las cuales van a existir importantes solicitaciones mecánicas, provocando el colapso de las fibras. Existen diferentes formas de entreteter las fibras, pero las más comunes son las tres citadas a continuación (Fig. 2.2.1.2):

- Tafetán o tejido plano: cada hilado longitudinal y transversal pasa por encima de un hilo y por debajo del siguiente, repitiéndose el patrón. Este entreteterido es utilizado para aplicaciones generales, pues proporciona un entramado muy estable de difícil distorsión a la vez que garantiza buenos espesores de laminado.
- Sarga o tejido cruzado: los hilados longitudinales pasan sobre los transversales atendiendo a un número distinto de pasadas. Variando el número de pasadas del hilado longitudinal se pueden realizar distintos tipos de entreteteridos cruzados. Este tipo de entramado tiene una mayor permeabilidad que le permite adherirse más fácilmente a la resina.
- Satén o tejido satinado: de patrón similar a los tejidos cruzados, el tejido satinado se diferencia de este último por tener un mayor número de hilados longitudinales y transversales pasando por encima y debajo antes del entreteterido. Esto quiere decir que una dirección tiene predominancia de elementos longitudinales, y la otra de transversales. Su característica principal es su buen acabado superficial.

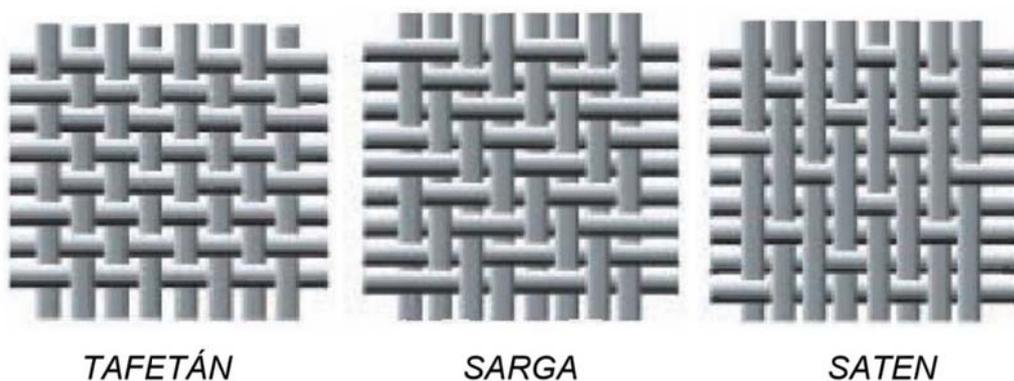


Fig 2.2.1.2 Patrones de hilado más comunes para el entreteterido de las fibras de carbono [17].

2.2.1 Resina epoxy (Matriz)

La resina es un término genérico que se utiliza para designar al polímero o al material precursor del polímero, que una vez mezclado con un agente catalizador, pierde su ductilidad y se endurece, tomando una forma final.

Esta resina es el constituyente complementario a las fibras de carbono en el compuesto de fibra de carbono. Algunos de sus objetivos principales son los de permitir una transferencia de esfuerzos con la mejor distribución posible hacia todo el tejido de fibras, y soportar la malla, de forma que se evite el pandeo de dichas fibras.

Aunque parezca que la labor de la resina en el compuesto es menos importante en el conjunto que la de las fibras, hay que extremar la precaución a la hora de procesar, fabricar y unir ambos constituyentes, pues otro de los objetivos de la resina es el de proteger a las fibras de los agentes externos y condiciones ambientales. Por ello, si durante una de las fases de fabricación del compuesto de fibra de carbono, introducimos impurezas o defectos en la resina, sus efectos en el conjunto pueden llevar a un desgaste prematuro, una pérdida de propiedades mecánicas o, incluso, un fallo global del compuesto [14].

En cuanto a las resinas más comunes, encontramos polímeros como el poliéster, el fenol-formaldehído o el epoxy, siendo este último el más popular de todos para los compuestos de fibras de carbono.

Epoxy es un término que engloba a una familia de polímeros basados en grupos de moléculas conocidos como epóxidos. Estos grupos de epóxidos están formados, básicamente, de anillos compuestos por dos átomos de carbono y uno de oxígeno, que se hacen reaccionar mediante ciertos ácidos, aminas, alcoholes o fenoles para llevar a cabo el curado o polimerización (proceso de endurecimiento).



Fig 2.2.2.1 Comercialmente la resina de epoxy se vende en dosis pequeñas junto con el endurecedor (catalizador) para tareas de bricolaje doméstico [18].

Las ventajas del epoxy frente a otros polímeros son las siguientes [14]:

- Alta resistencia mecánica y módulo elástico.
- Alta resistencia térmica, hasta temperaturas que alcanzan los 200 °C.
- Gran capacidad de adhesión, facilitando la posterior fabricación del material compuesto.
- Baja tasa de contracción en enfriamiento, lo que implica una buena estabilidad dimensional.
- Buena resistencia química.
- Facilidad de procesado.

Sin embargo, también tiene algunos inconvenientes:

- Fragilidad elevada.
- Reducción de sus propiedades en presencia de humedad.
- Mayor tiempo de curado que otros polímeros, como el poliéster.
- Mayor coste.

El procesamiento del epoxy se puede realizar de muchas formas, siendo las más comunes el moldeo en autoclave o infusión, el moldeo con bolsa de vacío o inyección, la transferencia de resina o la pultrusión. El procedimiento general de estos métodos es similar, incluyendo una fase de extendido de las fibras sobre un molde, una impregnación de la matriz sobre el entretejido de fibras, una etapa de preformado, un proceso de curado y un corte final.

Las temperaturas típicas del curado rondan los 120 a 180 °C, donde contra mayor temperatura de curado, mayor resistencia térmica de la matriz resultante, y por ello, esta podrá alcanzar temperaturas de servicio más elevadas. Además de la temperatura, la presión tiene un papel importante en el curado, donde dependiendo del proceso de impregnado, los valores pueden ir desde presiones relativas negativas a presiones absolutas de aproximadamente 700 kPa (7 bares).

2.2.2 Adiciones

Según la RAE, adición es la acción o efecto de añadir. En la ciencia de materiales, cuando se habla de las adiciones, a lo que se hace referencia es a las partículas que se introducen a propósito en una red cristalina de un material para mejorar ciertas propiedades de dicho material. En sí, las partículas no dejan de ser defectos o imperfecciones que se introducen en la red cristalina para modificar parcialmente la distribución de los esfuerzos sobre el conjunto, solo que, en vez de ser indeseados, son diseñados con un fin determinado [19].

Los defectos de las redes cristalinas de los materiales metálicos pueden ser de 4 tipos:

- Puntuales, si se producen en un lugar determinado del espacio de la red.
- Lineales o dislocaciones, si se producen en una dimensión debido a la introducción de un elemento o al desplazamiento de una partícula local.
- De superficie, si se produce en dos dimensiones debido a un apilamiento o a los bordes de grano.
- De volumen, si se produce en las tres dimensiones geométricas.

Existen ciertos modelos y leyes que explican el cambio de comportamiento de los materiales metálicos con respecto a parámetros como el tamaño de grano y la composición de las partículas externas que se introducen en la red. Por ejemplo, según la ley de Hall-Petch se relaciona el tamaño de grano de las partículas externas respecto de la variación del límite de cedencia del material, tal y como se ve en la siguiente ecuación [20]:

$$\sigma_0 = \sigma_i + \frac{k}{\sqrt{d}}$$

Donde,

σ_0 = Tensión de cedencia del material

σ_i = Constante empírica de la tensión inicial de dislocación del material

k = Constante empírica del material del factor de liberación de tensiones

d = Tamaño del grano

Conforme reducimos el tamaño de grano, el límite de cedencia del material metálico crece, es decir, el material se endurece. Esto se debe a que, al introducir partículas de grano pequeño para la dislocación es cada vez más difícil avanzar, pues las partículas externas están más juntas y la tensión necesaria para continuar su avance es mayor. Este tipo de endurecimiento de los materiales metálicos se conoce como endurecimiento por solución sólida.

Sin embargo, debido a la complejidad y a la falta actual de información sobre los mecanismos de dislocación en los materiales compuestos, la única forma de comprobar el efecto de las distintas adiciones sobre este tipo de materiales es la vía experimental. En un futuro, seguramente se comenzará a esclarecer el comportamiento de este tipo de materiales, tanto con adiciones como sin ellas, fruto del estudio y análisis de las experiencias y ensayos realizados. Este último punto es uno de los pilares por lo que se realiza este proyecto, con el objetivo de arrojar un poco más de luz sobre estos nuevos materiales tan desconocidos y con un increíble potencial.

2.3. Proceso de fabricación del compuesto fibra de carbono

Como se ha comentado, en el proceso de fabricación de los constituyentes del compuesto fibra de carbono se debe extremar la precaución para no introducir en ellos suciedad o impurezas indeseadas, que, en servicio, puedan dar lugar a fallos generales del material compuesto. Lo mismo se debe aplicar para el proceso de unión de dichos constituyentes en un compuesto por las mismas razones citadas. Es por ello que las herramientas y piezas utilizadas durante el proceso de fabricación sean previamente desengrasadas con productos especiales, como la acetona industrial, y en caso de manipulación por parte de los operarios, estos deben tener las manos limpias.

Aunque actualmente existen diversos sistemas semi-automáticos para la fabricación de las piezas de fibra de carbono, aun se requiere un moderado grado de intervención humana comparado con otras fabricaciones prácticamente automatizadas hoy en día (montaje de circuitos electrónicos), por lo que material se encarece.

El esquema general de la fabricación del compuesto de fibra de carbono a partir de las fibras de carbono y la matriz sigue se desarrolla en tres fases básicas: fabricación del molde y diseño del entramado, colocación e impregnado, y curado [9].

1) Fabricación del molde y diseño del entramado

Lo primero que se debe de hacer es diseñar el entramado y fabricar el molde con la forma de la pieza que se quiere obtener, desde piezas simples con moldes monobloque hasta piezas complejas que requieran de utillajes especiales. El entramado es el tejido que está formado por retales de fibras de carbono cuyas dimensiones están diseñadas para optimizar el uso del refuerzo (fibras de carbono) en el compuesto final. Los materiales en los que se fabrican estos moldes suelen ser metales ligeros como el aluminio o mezclas de materiales poliméricos, de fácil mecanizado para conseguir formas específicas de forma fácil y económica.

2) Colocación e impregnado

Tras fabricar el molde, se coloca sobre este el entramado de fibras de carbono en las posiciones correspondientes, previamente diseñadas. Una vez colocado el entramado, se calculan, mezclan y agitan los volúmenes correspondientes de resina y endurecedor, teniendo especial cuidado en los parámetros de tiempo y velocidad de agitado, temperatura de la mezcla y forma del recipiente. El tiempo de agitado depende de diversos factores, pero generalmente coincide cuando el color de la mezcla es homogéneo. Es entonces cuando se aplica una capa de catalizador que une los retales del entramado y endurece el conjunto. Es a este proceso de mezcla y vertido de ella sobre el molde que contiene el entramado a lo que se conoce como impregnación.

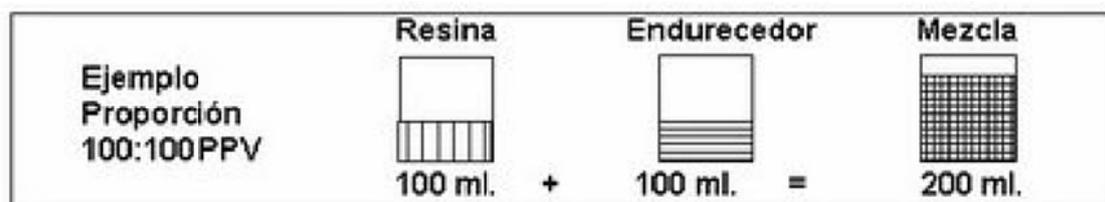


Fig 2.3.1 Ejemplo de preparación de la mezcla [21].

El impregnado puede realizarse por diversos métodos, entre los cuales los 3 siguientes son los más comunes:

El método de **infusión** o **moldeo en horno autoclave**, que consiste en colocar al mismo tiempo sobre el molde tanto el entramado seco del refuerzo como la matriz de resina en forma de película semisólida. Una vez colocadas, el calor y la presión funden la resina e impregnan el entramado.

El método de **inyección** o **moldeo en bolsa de vacío**, que consiste en colocar el entramado seco del refuerzo en un molde, cerrado o abierto, y precalentado para posteriormente inyectar la resina en el molde utilizando la presión de vacío de una bolsa adyacente, lo que impregna el entramado.

El método de **transferencia de resina**, que consiste en colocar el entramado seco del refuerzo en un molde, herméticamente cerrado, y precalentado para posteriormente transferir la resina en el molde utilizando la presión de un equipo externo, lo que impregna el entramado. Este proceso es homólogo al de inyección o moldeo en bolsa de vacío, solo que en este es necesario utilizar un molde cerrado a causa de la presión relativa positiva.

También existe el método de la impregnación manual, pero hoy en día supone una minoría respecto a los anteriores tres métodos de impregnado, por lo que comentar su proceso no tiene mucha importancia en este estudio.

3) Curado

El último paso antes de obtener la pieza deseada del compuesto es el curado. Este proceso consiste en conseguir que la mezcla de resina y catalizador con las fibras de refuerzo ya embebidas se endurezca hasta su estado final, controlando diversos parámetros como temperatura, presión y tiempo de curado. Generalmente, se utilizan hornos autoclave para controlar estos parámetros y conseguir que el proceso de curado sea lo más uniforme posible.

En sí, el proceso de curado se realiza en otros materiales, como el hormigón, donde un mal curado puede provocar una pérdida importante de propiedades del producto final, por lo que es un proceso fundamental en la secuencia.

Hasta ahora hemos visto la fabricación de piezas de fibra de carbono de forma discreta, es decir, fabricación de piezas donde se requiere un moldeo y desmoldeo sistemático. Sin embargo, también existen métodos de fabricación continua de materiales compuestos reforzados con fibras, cuya capacidad de producción horaria es muy elevada, aunque solo puedan producir piezas de geometría simple. De entre estos procesos continuos, el de la pultrusión es uno de los más utilizados en la actualidad.

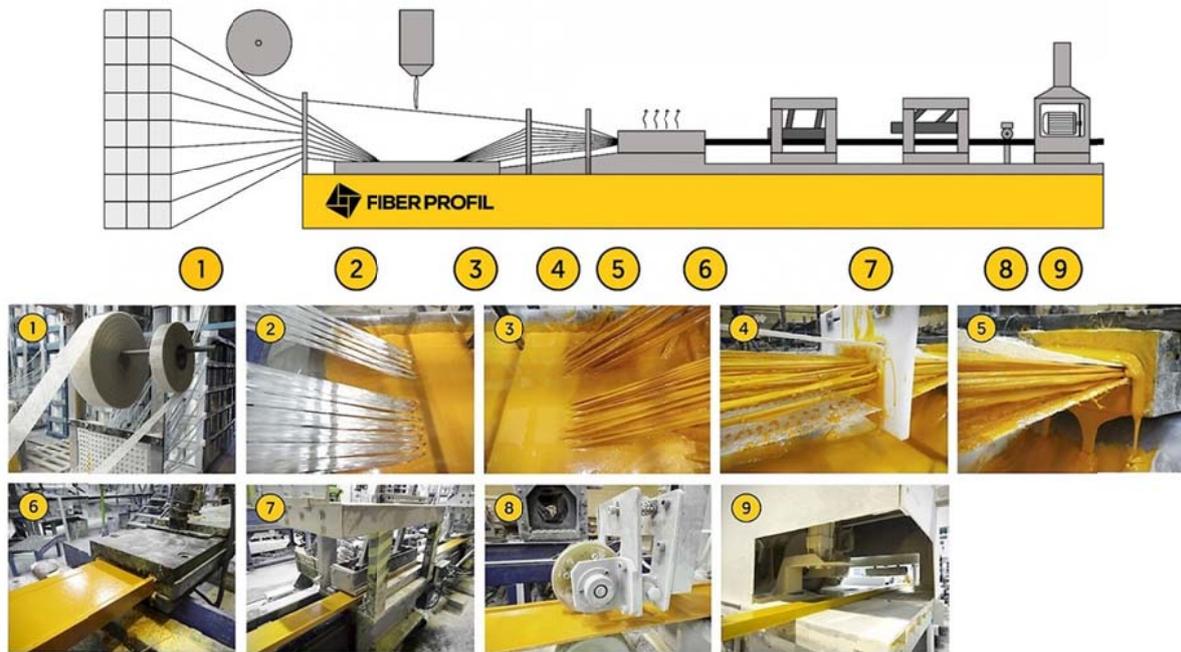


Fig 2.3.2 Esquema de las fases de producción de materiales compuestos reforzados por fibras por el proceso de pultrusión [22].

El método de la pultrusión comienza con la elección de las fibras de refuerzo a utilizar, que se encuentran preparadas en un bobinado (1). Además, se eligen las resinas, aditivos y proporciones de los mismos, que se depositarán en un recipiente por el que se arrastrarán las fibras de refuerzo, de forma que las fibras quedan bañadas por la mezcla (2 y 3). Tras pasar por el baño de la mezcla, las fibras de refuerzo “mojadas” se someten a un proceso de estirado continuo de forma que estas quedan distribuidas uniformemente por toda la matriz (4). Después de esta distribución, el conjunto de fibras “mojadas” y estiradas entran en un molde que compacta, forma al compuesto y produce el endurecimiento/curado a través de calor por el proceso de polimerización (5 y 6). A la salida del molde, se obtiene una pieza termoestable con elemento estructural pre-esforzado y totalmente terminada, de forma que solo es necesario que pase por un conjunto de máquinas de corte para ajustar la longitud del perfil al tamaño deseado (7, 8 y 9).

2.4. La fibra de carbono en las bicicletas de competición

Dentro del estudio de las características mecánicas del material compuesto de fibra de carbono presentadas en este proyecto, en particular la resistencia a la abrasión, se ha querido buscar una aplicación actual en la que el uso de este material cada vez esté más

extendida, además de servir como símbolo y ejemplo de uno de los principales problemas de este tipo de materiales: el desgaste.

De entre los muchos campos de aplicación en los que los materiales compuestos, en concreto la fibra de carbono, se han ido introduciendo a lo largo de los últimos 60 años, el ciclismo es uno de ellos.

A pesar de que el uso de la fibra de carbono en sectores de responsabilidad como el del automóvil han producido o producirán, debido a su potencial, beneficios muy importantes, sobre todo en materia de seguridad, en el sector de los deportes de alto rendimiento, el uso de la fibra de carbono ha revolucionado las características de las máquinas de trabajo.

2.4.1. Historia de los materiales en el ciclismo

La historia del ciclismo ha estado siempre ligada íntimamente a la herramienta principal en este deporte: la bicicleta. Por ello en primera instancia, se va a hacer un repaso general por la historia de la bicicleta centrándose en el uso de los distintos materiales para sus distintas partes y su evolución [23].

El primer diseño u origen del concepto de un vehículo de tracción humana con dos ruedas en serie apareció por primera vez en 1493, de la mano de Leonardo DaVinci y su pupilo Gian Giacomo Caprotti. Aunque no se sabe exactamente si DaVinci llegó a construir un prototipo de tal vehículo con este diseño, lo que sí es seguro es que influyó directamente la construcción de lo que hoy conocemos como bicicleta. A lo largo de la historia, se han realizado muchas recreaciones de vehículos de este estilo basados en el diseño de DaVinci, utilizando materiales de toda índole.

En 1818 se fabricó en Alemania el primer vehículo basado en estos diseños, conocido como "Velocípedo" o "Draisine". Estaba fabricado en madera, un material de construcción muy utilizado hasta mitades el siglo XIX, y contaba con un asiento y dos ruedas en línea, pero no tenía pedales.

Alrededor de 30 años después, aparecieron los pedales y los cuadros de las bicicletas, así como las llantas pasaron de fabricarse de madera a acero. Este nuevo material presentaba mejores propiedades mecánicas, rigidez y durabilidad, además de ser barato, abundante y sencillo de fabricar. Sin embargo, poseía dos grandes inconvenientes; el primero, que el

peso global era bastante mayor (una bicicleta de acero de finales de 1880 podía pesar perfectamente 35 Kg), y el segundo, que se oxidaba con facilidad.

El uso del acero introdujo dos importantes cambios en la bicicleta: el incremento de diámetro de las llantas y la producción masiva.

Al poder incrementar el diámetro de las llantas, la velocidad a la que podía desplazarse la bicicleta era mayor, ya que, con menos rotaciones del pedal, se avanzaban más metros lineales. Por su parte, la posibilidad de producir las bicicletas de forma masiva permitió abaratamiento, y por tanto su uso extendido en el mundo. Un dato curioso derivado de esto es el hecho de que fue la bicicleta el vehículo que más se utilizó durante las dos guerras mundiales, ocurridas en los dos primeros cuartos del siglo XX [24].

Una vez entrados los años 50 del siglo XX, la revolución de las aleaciones entró de lleno en la industria de la bicicleta. El material base para cuadros y llantas seguía siendo el acero (de mucha mayor calidad que 100 años atrás), pero ahora se le aleaba con metales de propiedades mecánicas excelentes, como el cromo, el níquel o el molibdeno.

Paralelamente, la investigación de otro nuevo material con un gran potencial en cuanto a propiedades mecánicas permitió su uso en aplicaciones punteras en su tiempo. Este material era el titanio. Considerado desde hace 50 años el mejor material para la fabricación de los cuadros de las bicicletas por un sector considerable de los ciclistas profesionales, el titanio ofrece ligereza combinada con unas propiedades mecánicas y anticorrosivas excepcionales. Sin embargo, como todos los materiales de estas características, el coste de producción y fabricación es muy elevado, además de presentar dificultades notables a la hora de ser mecanizado y soldado.

En la parte opuesta, el aluminio también comenzó a introducirse de forma considerable en la industria de la bicicleta, debido a la optimización en sus procesos de producción y el abaratamiento de la energía. A pesar de su gran ligereza, sus propiedades mecánicas pobres lo relegaron al sector de las bicicletas de bajo coste, pues ante los niveles de fatiga en condiciones exigentes se observó que el índice de rotura de las piezas fabricadas con este material era muy alto.

No fue hasta la década de los años 80 cuando hizo su aparición el que hoy es considerado como uno de los materiales revolucionarios en la industria de la bicicleta, la fibra de carbono. Sus excelentes propiedades mecánicas, rigidez y dificultad de corrosión lo hacían un buen candidato para competir con los materiales más arraigados en la producción de

bicicletas de alto nivel. Sin embargo, una de sus propiedades destacaba sobre el resto, e indirectamente afectaba a todas ellas, su baja densidad, y por tanto ligereza.

Si se comparan las propiedades específicas de cualquier material utilizado de forma considerable en la fabricación de bicicletas en aquella época con respecto a las de la fibra de carbono, la diferencia que se encuentra es enorme. La densidad media del compuesto de fibra de carbono es de 1.7 g/cm^3 , mientras que la de su competidor más directo, en este sentido, es el titanio, con una densidad de alrededor de 4 g/cm^3 . Como se puede observar, la diferencia es de más del doble, es decir, una bicicleta fabricada en fibra de carbono pesa un poco menos de la mitad que una fabricada en titanio, y eso teniendo en cuenta que las propiedades de ambos materiales son equiparables. En palabras de Raoul Luescher, empleado en el pasado por Boeing Aerospace y el Ministerio de Defensa de Australia, y con 20 años de experiencia en materiales compuestos, *“las propiedades específicas de la fibra de carbono son impresionantes, combina esto con la habilidad de poner a punto las características de la bicicleta y, de forma sencilla, crear distintas geometrías, y las ventajas son fáciles de ver”* [23].

Otra de las ventajas fundamentales de la fibra de carbono es el rango de precios de las bicicletas fabricadas en este material. Actualmente, se pueden encontrar tiendas donde venden bicicletas fabricadas en fibra de carbono cuyos precios van desde 2000 a 20000 \$, dependiendo de la calidad de la fibra. Así, aunque sea un material caro, su versatilidad de fabricación en cuanto a calidades le permite abarcar desde el mercado de las bicicletas de bajo-medio perfil, hasta el de las bicicletas de competición para ciclistas profesionales.

Finalmente, se hace referencia a un proyecto de fin de carrera de un estudiante de la Universidad de Deakin, Australia, sobre cuál es la mejor combinación entre geometría y materiales en cuanto a bicicletas de carretera para amateurs y profesionales [23]. Las dos conclusiones principales del proyecto fueron:

- Primero, que en el ciclismo profesional la opinión personal de los ciclistas influye mucho sobre el material en el que se fabrican sus bicicletas, algunos ciclistas se sienten más cómodos con un material, aunque sus propiedades no sean tan buenas.
- Segundo, en el campo amateur y ocasional del ciclismo, las modas importan tanto como las propiedades del material, es decir, un material debe comportarse bien, pero también que tenga una buena estética.

2.4.2. Las llantas: motivación del análisis del desgaste

Uno de los principales problemas que han surgido en el ciclismo en los últimos años es la elección entre el uso de frenos de disco o zapatas.

Mientras que los frenos de disco tienen una durabilidad excepcional, tienen un inconveniente fundamental, y es que, cuando los ciclistas se caen de la bicicleta, es fácil que el disco, que gira a muchas revoluciones, provoque cortes profundos en las extremidades del ciclista, poniendo en riesgo su seguridad.

Por otro lado, las zapatas superan ligeramente a los frenos de disco en cuanto a capacidad de frenado, a la vez que eliminan el gran inconveniente de provocar cortes profundos en las caídas. Sin embargo, esto viene a un alto precio, literalmente, si se utilizan llantas de fibra de carbono en la bicicleta. Debido al mecanismo de frenado propio de las zapatas, el desgaste que se produce en las llantas de fibra de carbono es muy elevado, lo que lleva a los ciclistas a financiar y reemplazar de forma continuada las llantas de sus bicicletas, con el elevado coste que eso conlleva.

Es por esta razón, por la que, en este proyecto, se ha querido establecer el foco de atención sobre el desgaste que sufre el compuesto de fibra de carbono mediante el mecanismo específico de la abrasión, así como la búsqueda de la mejora del comportamiento en este aspecto a través de la introducción de partículas de adición de distintos tipos en el material compuesto. Además, también se controlarán los parámetros mecánicos principales, y alguno más de carácter tribológico, y su variación con la introducción de estas adiciones, con el objetivo de asegurar que dichas propiedades del material compuesto se mantienen en valores aceptables para el correcto desempeño de su tarea en el ámbito del ciclismo.

Finalmente, se remarca que, a pesar de centrar parcialmente el foco de atención en el campo del ciclismo, las conclusiones obtenidas en este proyecto son válidas para cualquier ámbito ingenieril.

Capítulo 3.- Materiales y metodología experimental

Todos los ensayos conducidos en este trabajo de fin de grado han sido realizados en el LADICIM, un grupo de I+D adscrito al Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales de la Universidad de Cantabria y con sede en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander. [25]



Nació hace algo más de 30 años (curso 1983-84), por iniciativa del profesorado del Área de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, con el fin de trasladar a la sociedad el conocimiento disponible en la Universidad dentro del ámbito de la Ciencia y Tecnología de Materiales en los aspectos relacionados con su comportamiento mecánico, con especial incidencia en los procesos de fractura y fisuración de los mismos.

El Laboratorio ofrece servicios de asesoramiento continuado y tiene establecidos numerosos convenios con empresas e instituciones para desarrollar proyectos de I+D+i, contando para ello con un sofisticado equipamiento científico que le permite abordar tanto la caracterización a escala microestructural (microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos X...) como la caracterización mecánica de los materiales (máquinas de ensayos dinámicas, bancadas de ensayos estáticos y dinámicos, péndulo instrumentado de impacto, máquina de tracción lenta...).

En este proyecto se han utilizado una serie de probetas basadas en un material común (fibra de carbono embebida en matriz de epoxy) a las que se les han añadido distintas adiciones. El objeto de este hecho es analizar cómo varía el comportamiento mecánico, sobre todo frente al desgaste, del conjunto (material base + adición) para las diferentes adiciones utilizadas. Se ha considerado innecesario realizar los ensayos a una probeta sin adiciones debido a la extensa bibliografía que se posee sobre el material base, frente a la escasa bibliografía que existe actualmente sobre el conjunto del material base con adiciones.

Tanto la obtención de las probetas como la conducción de los ensayos se ha llevado a cabo utilizando el equipo de seguridad pertinente. En la Fig. 3.1 podemos ver el equipo de seguridad completo.



Fig. 3.1 Equipo de seguridad completo (guantes, mascarilla, gafas protectoras y cascos de insonorización).

3.1. Adiciones

De entre la extensa variedad de materiales que puede contemplarse para ser utilizados como adiciones para nuestro material base, se ha escogido un total de 10 candidatos. En el proceso de selección se han tenido en cuenta diversos factores, como el origen del material (si es económica su obtención) o aspectos ligados al reciclaje (algunos materiales son subproductos no deseados de procesos industriales), pero sobre todo se ha querido garantizar la heterogeneidad en cuanto al tipo de adiciones. Es por ello que entre las adiciones escogidas encontremos desde materiales de origen árido hasta escorias (subproductos) procedentes de procesos metalúrgicos.

A continuación, se encuentran clasificadas las adiciones en 4 familias: áridos, cementos, escorias y óxidos.

Áridos

- Arena de playa: procedente de playa del Norte de España, con diversos componentes, mayoritariamente carbonato cálcico, y minoritariamente sílice y feldespato. Se destaca la existencia de pequeños trozos de conchas marinas en el conjunto.
- Arena de sílice fina: procedente de río del Norte de España, con un tamaño de grano menor que la arena de playa.
- Arena de sílice gruesa: procedente de cantera del Norte de España, con un tamaño de grano superior que la arena de playa y la arena de sílice fina.

Cementos

Los cementos usados en este proyecto como adiciones responden a la Norma UNE-EN 197-1:2000 donde figura toda la documentación adicional.

- Cemento A: Cemento Portland con escorias de horno alto EN 197-1 -- CEM III/A 32.5
- Cemento B: Cemento Portland con escorias de horno alto EN 197-1 -- CEM III/B 32.5
- Cemento aluminoso: Cemento Portland EN 197-1 -- CEM I 32.5

Escorias

Las escorias usadas en este proyecto como adiciones son residuos de la industria siderúrgica y poseen unas propiedades similares a los áridos naturales.

- Escoria vítrea: procedente principalmente de acerías de alto horno.
- Escoria negra: procedente principalmente de acerías de horno de arco eléctrico.
- Escoria de fundición verde: procedente de la industria siderúrgica.

Óxidos

- Arena de corindón: procedente de bauxitas calcinadas en horno eléctrico. Tamaño de grano F80 (150-212 μm)

Algo destacable de entre las adiciones seleccionadas, salvo la arena de corindón, es que todas son fáciles y relativamente baratas de obtener. Incluso algunas, como en el caso de las escorias, son residuos de otros procesos industriales por lo que el hecho de poder

usarlas como adiciones eficaces significa solucionar dos problemas simultáneamente (ahorro económico por no tener que “deshacerse” de dicha escoria y la mejora de las propiedades de un material).

Este enfoque hacia las adiciones de bajo coste viene motivado en gran medida por la necesidad de evitar un encarecimiento del precio, ya considerablemente alto, del material base. El objeto de todo ello es mantener prácticamente igual el actual precio del material, mejorando algunas de sus propiedades, sobre todo la resistencia al desgaste, y extendiendo su uso a un mayor número de potenciales aplicaciones para las que previamente no se contemplaba usar este material por temas conjuntos de especificaciones/económicos.

Codificación de las probetas según sus adiciones

Como se ha comentado, cada una de las planchas de donde se obtienen las probetas para este proyecto ha sido fabricada en un material base, pero a cada una se la ha añadido un tipo diferente de adición. Puesto que la diferenciación, en cuanto a material se refiere, estriba en el tipo de adición, a continuación (Tabla 3.1), se presentan codificadas las 10 adiciones que se han utilizado en este ensayo. Entre corchetes se encuentra indicada la simbología que se utilizará en el posterior gráfico de la Fig. 3.3

Tabla 3.1 Codificación de las probetas atendiendo al tipo de adición.

Código	Descripción
ACR	Arena de corindón
APL	Arena de playa
ASF	Arena de sílice (Grano fino)
ASG	Arena de sílice (Grano grueso)
CAL	Cemento aluminoso
CCA	Cemento B
CAP	Cemento A
EFU	Escoria vítrea
ENG	Escoria negra
EVE	Escoria de fundición verde

3.2. Granulometría

Una vez introducidos algunos aspectos básicos sobre los materiales que se han utilizado como adiciones, se realiza el estudio y análisis de los tamaños de las partículas que componen dichas adiciones.

Para realizar una granulometría se necesita el siguiente equipamiento: máquina de agitación, tamices, báscula, pincel fino, recipientes para las pesadas y tapa de tamiz. En nuestro caso, los tamices utilizados tienen los siguientes tamaños de rejilla por orden descendente de tamaño en mm: $5.6 > 5 > 4 > 2.5 > 2 > 1.25 > 1 > 0.5 > 0.4 > 0.25 > 0.125 > 0.063$. La báscula electrónica utilizada fue de 600 gramos, pues el peso de ninguna de las muestras de adiciones utilizadas en la granulometría superaba los 50 gramos. En la Fig. 3.2 podemos observar la máquina de agitación usada en la granulometría de este proyecto, con una serie de tamices montados y preparados.



Fig. 3.2 Máquina agitadora con una serie de tamices montados.

De cara a la preparación del equipo debe tenerse cuidado al juntar los tamices en serie según el orden descendente de tamaño de rejilla (el primer tamiz es el de más tamaño de rejilla), separándolos en dos “torres” de tamices, pues esto es necesario para que cada torre quepa en la máquina agitadora. La primera torre contiene desde el tamiz de 5.6 hasta el de 1.25 mm inclusive, y la segunda desde el tamiz de 1 hasta el de 0.063 mm inclusive. Ambas torres de tamices deben tener una tapa adjuntada a su último tamiz, para recoger los posibles granos que tengan un tamaño menor al del tamaño de rejilla de dicho último tamiz. Además de esto, también ha de tenerse cuidado al manipular la báscula, asegurándose de resetearla a cero al inicio de la granulometría y de tarar, a continuación, el recipiente que usemos para pesar las muestras.

El procedimiento seguido fue sencillo; en primer lugar, se vierte la muestra correspondiente en el recipiente tarado y se toma el peso inicial. Tras esto, se vierte la muestra del recipiente sobre la primera torre de tamices y esta se introduce en la máquina agitadora.

A continuación, la máquina agitadora se pone marcha durante dos minutos y debido a su movimiento hace que los granos atraviesen solo aquellos los tamices con tamaño de rejilla superior a su propio tamaño, asegurando un tamizado homogéneo. Se retira la primera torre de tamices y se extrae la tapa inferior de ella, vertiendo la porción de muestra que ha atravesado la primera torre de tamices al inicio de la segunda torre de tamices. Se introduce la segunda torre de tamices en la máquina y se repite el proceso como con la primera.

Por último, cuando se extrae la segunda torre de tamices de la máquina agitadora, se separan los tamices de ambas torres, se vierte su contenido en un recipiente tarado (valiéndose de un pincel fino para realizar el transporte de la mejor forma posible) y se pesan en la báscula, todo ello de forma individual para cada tamiz. El hecho de tomar el peso inicial de la muestra sirve como seguro para comprobar posibles pérdidas significativas de masa de las muestras.

Todos los resultados obtenidos de nuestra granulometría se han procesado, y se muestran juntos a continuación, en la Fig. 3.3. Nótese la ausencia de los cementos, debido a su consistencia y extremadamente fino tamaño de grano, y de una de las escorias (la escoria vítrea), debido a la indisponibilidad de dicha adición en el laboratorio.

Granulometría Adiciones

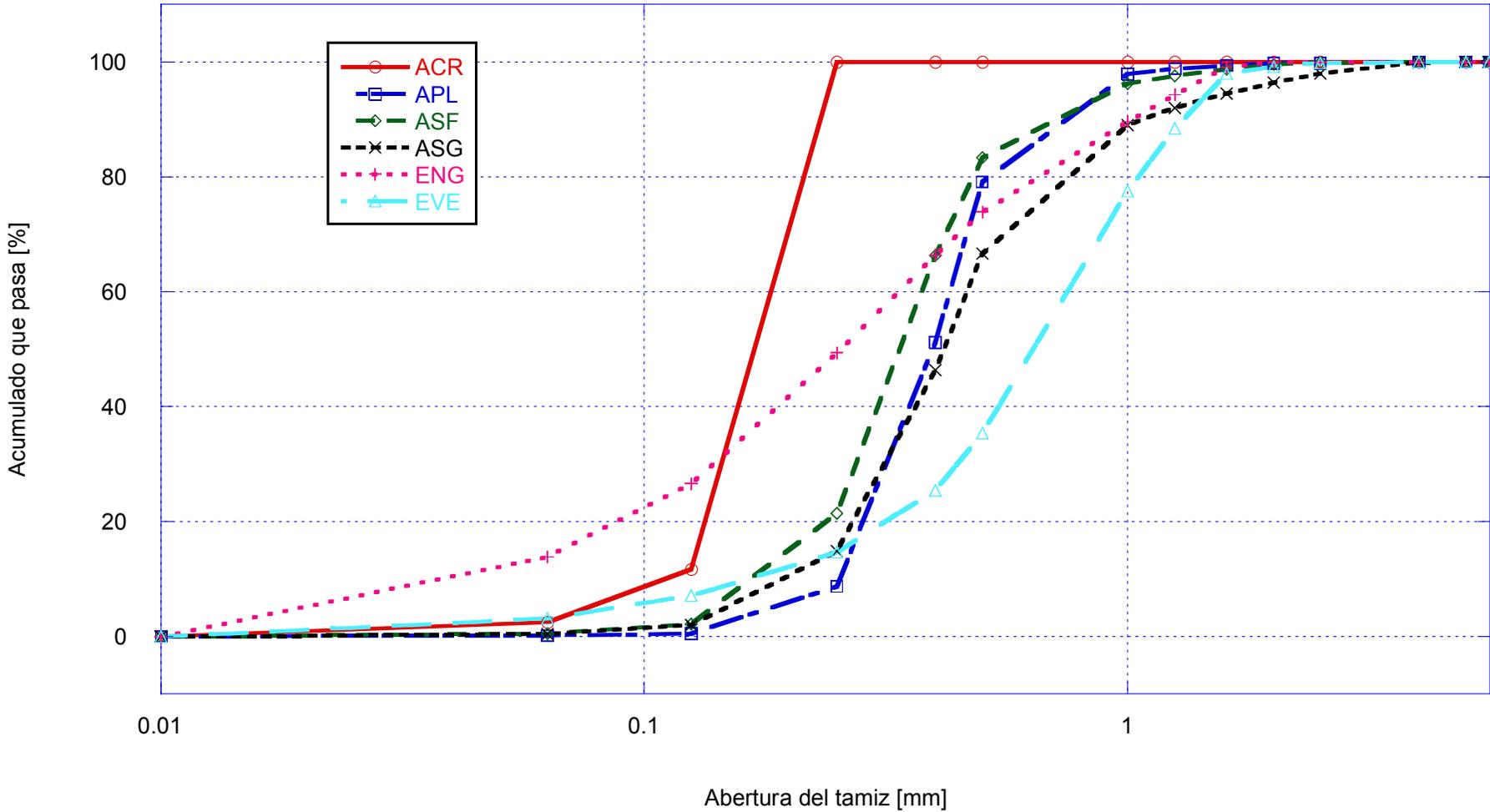


Fig. 3.3 Gráfico de resultados de la granulometría de las adiciones analizadas.

3.3. Probetas de ensayo

En este apartado, describiremos brevemente la fabricación de las planchas del material de ensayo y veremos cómo se obtienen las probetas que utilizaremos para los ensayos desde las citadas planchas, además de discutir cómo se distinguen las probetas entre sí.

La fabricación de las planchas comienza realizando el entretejido en forma de tafetán (un tejido de una fibra por encima y otra por debajo), con una densidad superficial de 200 g/m². Una vez conseguida la fibra entretejida, esta es colocada en una superficie plana desmoldeante donde se vierte el epoxy que aglomera las fibras y el catalizador que hace reaccionar la mezcla. Nada más verter estos componentes, se añade un tercero al conjunto, la adición, que quedará atrapada en el conjunto en forma granulada.

Por último, dejamos reposar el conjunto mientras aplicamos 2 bares de presión para que se produzca sangrado durante la polimerización, eliminando de forma efectiva el exceso de catalizador.

Fabricación de las probetas

Las probetas empleadas en los ensayos de este proyecto han sido obtenidas a través de métodos manuales (corte directo con sierra) desde planchas (Fig. 3.4). En total se utilizaron 10 planchas, cada una de ellas fabricada en un material base de fibra de carbono embebidas en epoxy y una adición, siendo esto último lo que diferencia a las planchas entre sí en lo referente al material de fabricación.

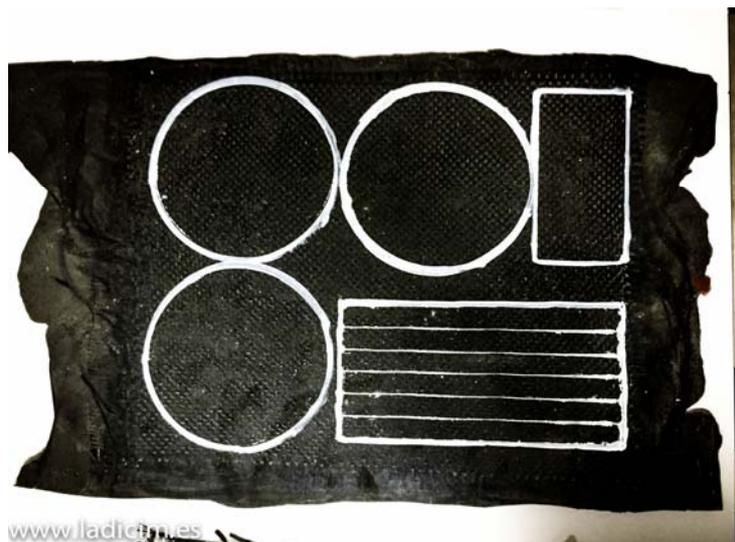


Fig. 3.4 *Planchas iniciales con plantilla de colocación de donde se obtienen las probetas posteriormente.*

Antes de comenzar con la obtención de las probetas, una plantilla de colocación ha sido diseñada para optimizar el uso de material (Fig. 3.5), evitando que grandes partes de la plancha sean desperdiciadas. Esto es fundamental, pues el precio de las planchas es considerablemente alto. En la siguiente figura se presenta el esquema de la plantilla utilizada, junto con la codificación de las probetas que se verá más adelante.

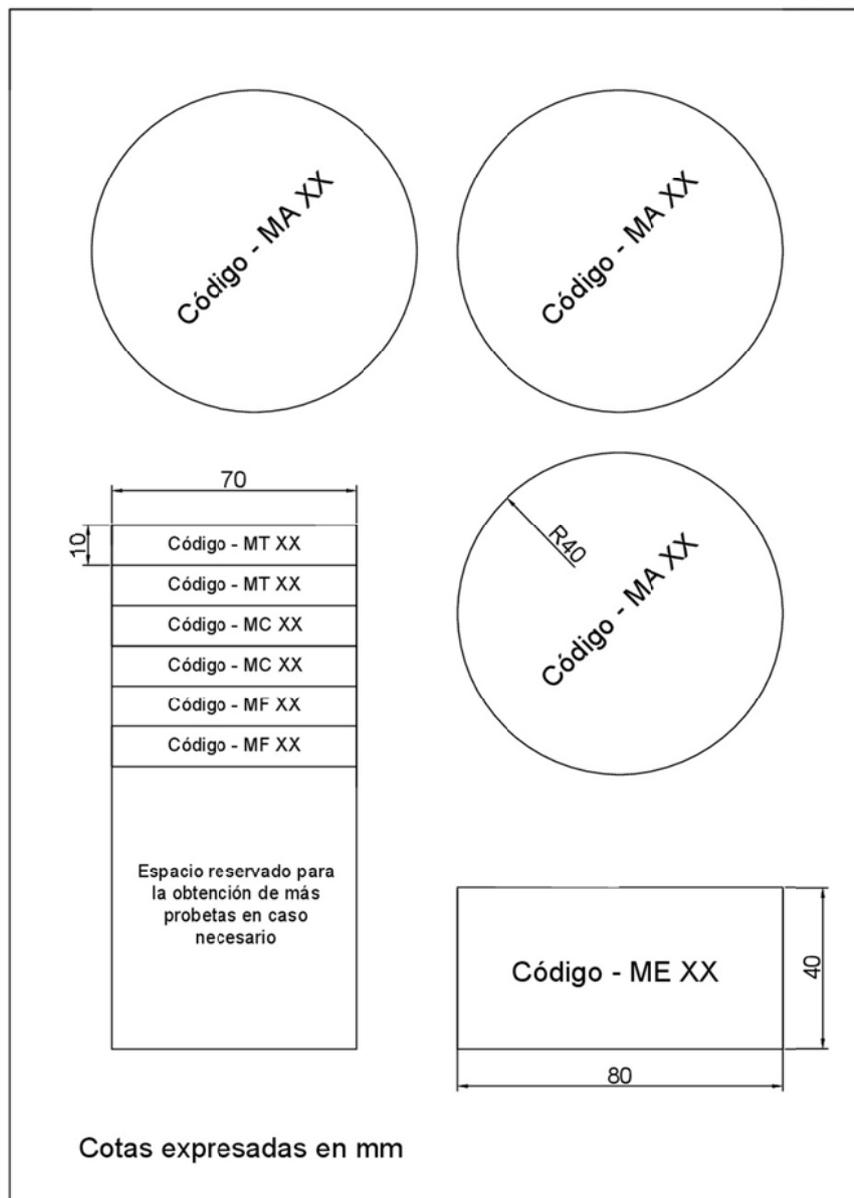


Fig. 3.5 Esquema de la distribución de las probetas en las planchas iniciales.

Como es apreciable en la figura anterior, se usan probetas con tres morfologías distinguidas. En la parte superior de la plantilla se encuentran las tres probetas del ensayo de abrasión (o ensayo Taber) que consisten en tres discos de 8 cm de diámetro. En la parte intermedia izquierda se estructuran las probetas rectangulares para los ensayos de tracción, resiliencia (Charpy) y flexión en tres puntos, que tienen un ancho de 1 cm por 7 cm de largo. Por último, en la parte inferior derecha de la plantilla tenemos la probeta rectangular para ensayo de erosión, con un ancho de 4 cm por 8 cm de largo. Es destacable el hecho de reservar un espacio en la plantilla (Fig. 3.5) para la obtención de posibles futuras probetas, por si ocurre algún incidente con alguna de las probetas proyectadas inicialmente, ya sea durante la fabricación de estas o durante el desarrollo de los ensayos del proyecto.

Entrando ya en la propia obtención de las probetas a partir de la plantilla, se destaca el uso de dos tipos de maquinaria distinta en función de la forma de las probetas a obtener.

Para cortar las probetas circulares necesarias para los ensayos de abrasión, se utiliza una taladradora de columna (Fig. 3.6i) con una sierra de corona de 8 cm de diámetro y una broca central de 1 cm de diámetro. Mientras, para la obtención de las probetas restantes, se emplea una sierra de cinta semiautomática (Fig. 3.6d) debido a la rapidez y sencillez con la que se pueden seguir las líneas de corte de la plantilla.



Fig. 3.6 Taladro de columna (derecha) y sierra de cinta semiautomática (izquierda)

utilizados para la obtención de las probetas.

Sin embargo, al realizar el dibujo de la plantilla sobre cada plancha, es fundamental que se deje una pequeña separación entre los límites de corte de las probetas destinadas a los ensayos de tracción, Charpy y flexión. Esto es necesario ya que, durante la parte final del corte con la sierra de cinta, algunas fibras se desgarran, y es necesario tener un margen de seguridad para pulir esas fibras, consiguiendo que la probeta tenga una geometría lo más exacta posible. En este proyecto, se ha fabricado una plantilla especial (Fig. 3.7), en papel, para realizar el dibujo de dichas probetas en las planchas, donde simplemente se ha de repasar el contorno de la plantilla para obtener el citado dibujo.



Fig. 3.7 Plantilla para realizar el dibujo de las probetas de tracción, Charpy y flexión.

Codificación de las probetas según el ensayo

La codificación que hemos realizado hasta ahora solo distingue las planchas de donde proceden las probetas, pero no las probetas en sí, fabricadas en el mismo material. Por ello, debemos fijar una codificación que permita diferenciar completamente cualquier probeta de otra del proyecto. Para este fin, la siguiente Tabla 3.2 es presentada, donde se identifica el material de la probeta, seguido del ensayo al que se somete. Un ejemplo del sistema de codificación también es adjuntado.

Tabla 3.2 Codificación completa de las probetas.

Código	Tipo de Ensayo	Ejemplo
CÓDIGO DE MATERIAL – MA XX	Ensayo de abrasión o ensayo Taber	Probeta nº1 con adición de arena de sílice fina sometida a ensayo de abrasión ASF – MA 01
CÓDIGO DE MATERIAL – ME XX	Ensayo de abrasión por deslizamiento o erosión	Probeta nº2 con adición de arena de corindón sometida a ensayo de erosión ACR – ME 02
CÓDIGO DE MATERIAL – MC XX	Ensayo Charpy instrumentado	Probeta nº1 con adición escoria vítrea sometida a ensayo Charpy instrumentado EFU – MC 01
CÓDIGO DE MATERIAL – MT XX	Ensayo de tracción	Probeta nº2 con adición de cemento aluminoso sometida a ensayo de tracción CAL – MT 02

Código	Tipo de Ensayo	Ejemplo
CÓDIGO DE MATERIAL – MF XX	Ensayo de flexión en tres puntos	Probeta nº1 con adición de arena de playa sometida a ensayo de flexión en tres puntos APL – MF 01

3.4. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción es uno de los ensayos más empleados a la hora de caracterizar mecánicamente un material, principalmente debido a dos razones:

- Facilidad para la preparación y conducción del ensayo
- Gran versatilidad de los parámetros obtenidos del ensayo (módulo elástico)

La probeta se introduce en una máquina y se agarran sus extremos con dos mordazas. Se coloca entonces un dispositivo llamado extensómetro que mide el alargamiento que sufrirá la probeta. A continuación, se comienza a ejercer fuerza en la dirección vertical y en sentido contrario en cada extremo de la probeta, como si dichos extremos se repeliesen, y se mide con una determinada frecuencia la relación entre fuerza y alargamiento. Finalmente, conociendo la sección inicial de la probeta y su longitud inicial, determinamos la curva tensión-deformación del material a ensayar. Este ensayo se realiza teniendo presentes las directrices de la Norma UNE 2597 *Material Aeroespacial-Plásticos reforzados con fibra de carbono-Laminados unidireccionales. Ensayo de tracción perpendicular a la dirección de las fibras* [26].

3.4.1. Geometría de las probetas

Las probetas para el ensayo de tracción obtenidas de las planchas son originariamente de 10 x 70 mm tal y como muestra la Fig. 3.5. Como se aprecia en la Tabla 3.3, las medidas de longitud de las probetas son algo irregulares debido al pulido los extremos de las mismas manualmente. El espesor de las probetas es variable entre 2.60 y 1.89 mm, debido a la irregularidad en el espesor de las planchas originales.

En la siguiente tabla (Tabla 3.3) están recogidas las principales dimensiones, anchura [b], longitud [L] y espesor [T], de las probetas del ensayo de tracción.

Tabla 3.3 Dimensiones geométricas de las probetas del ensayo de tracción.

Código	Anchura [b] (mm)	Longitud [L] (mm)	Longitud entre mordazas [Lo] (mm)	Espesor [T] (mm)
ACR - MT01	10.18	69.36	43.37	2.28
ACR - MT02	9.80	69.46	46.48	2.29
APL - MT01	9.53	68.00	47.23	2.15
APL - MT02	9.46	68.30	49.10	2.12
ASF - MT01	10.13	64.93	45.33	2.60
ASF - MT02	9.70	64.41	44.27	2.60
ASG - MT01	10.19	66.11	45.23	2.24
ASG - MT02	10.53	66.52	48.20	2.35
CAL - MT01	9.70	68.90	51.33	1.92
CAL - MT02	10.01	68.61	48.44	1.95
CAP - MT01	9.27	70.18	47.93	2.15
CAP - MT02	10.65	70.20	48.27	2.14
CCA - MT01	9.51	67.00	49.77	1.94
CCA - MT02	9.69	66.93	49.79	1.89
EFU - MT01	9.78	68.94	46.15	2.02
EFU - MT02	10.07	68.71	47.45	1.98
ENG - MT01	10.19	70.74	45.82	2.37
ENG - MT02	9.53	70.71	46.63	2.28
EVE - MT01	9.91	71.08	43.60	2.58
EVE - MT02	9.54	71.08	42.90	2.54

3.4.2. Preparación y conducción del ensayo

Para la ejecución del ensayo de tracción se ha utilizado una máquina de ensayos servo hidráulica Instron 8501 (Fig. 3.8) junto con un equipo de adquisición de datos, en conjunto capaces de adquirir la curva de fuerza-alargamiento de un material, a partir de la cual, podemos obtener la curva de tensión-deformación y, de ella, el módulo elástico.



Fig. 3.8 Máquina de ensayos Instron 8501 utilizada para realizar el ensayo de tracción.

Preparación

Primero, se toman las medidas de las probetas utilizando un calibre (Tabla 3.3) y se comprueba que la célula de carga, en este caso de 100 kN, fuese la correcta para el material a ensayar.

A continuación, se seleccionaron las mordazas adecuadas para el tipo y espesor de probeta de nuestro ensayo (Fig. 3.9), montándolas en la máquina de ensayos.



Fig. 3.9 Mordazas seleccionadas para realizar el ensayo de tracción (para probetas de 2 a 7.5 mm de espesor).

Por último, se realizó la configuración del software de adquisición de datos desde un ordenador conectado a la misma. Para ello, se utilizó el software LABVIEW desarrollado por el LADICIM. Se programó el sistema en control de posición (la probeta es traccionada a una velocidad constante) y se introdujeron los siguientes parámetros:

- Función utilizada → Rampa (Single ramp)
- Velocidad de separación → 0.01 mm/s
- Destino → 5 mm (El sistema tracciona hasta una separación de 5 mm)
- Escalas → 10 para el parámetro carga y 5 para el parámetro posición
- Canal 0 → Carga [kN] (Eje Y)
- Canal 1 → Posición [mm] (Eje X)

Conducción

Una vez tenemos configurados los parámetros de la máquina de ensayos, comenzamos con el procedimiento para realizar el ensayo.

En primer lugar, se coloca la probeta en la mordaza inferior de forma que 1cm de la longitud de la probeta quede agarrada por dicha mordaza.

Después, se acciona el cilindro de la máquina para elevar la probeta junto con la mordaza inferior hasta una distancia tal que la mordaza superior agarre la misma longitud que la mordaza inferior (aproximadamente 1 cm). Una vez la probeta está sujeta entre las mordazas, iniciamos el programa de ensayos con los parámetros anteriormente configurados, de forma que la probeta comienza a ser traccionada hasta un punto en el que su sección más débil se rompe.

Por último, se guarda el archivo informático que contiene la curva de fuerza-alargamiento adquirida durante el ensayo y se acciona el sistema servo hidráulico para liberar la probeta ensayada.

3.4.3. Cálculo de resultados

Lo primero que vamos a calcular es el módulo de elasticidad, que no es más que la pendiente de la curva tensión-deformación del material. Este parámetro relaciona directamente la deformación que sufre un material cuando sobre él es aplicada una cierta tensión de tracción.

- Módulo de elasticidad, E (MPa)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A_0}{\Delta L/L_0} = \frac{F}{b * T} \frac{L_0}{\Delta L}$$

σ es la tensión aplicada en un instante en el material, en MPa

ε es la deformación (adimensional) que sufre el material debido a la tensión aplicada en ese mismo instante

F es la fuerza de tracción aplicada sobre la probeta, en kN

ΔL es el alargamiento de la probeta, en mm, debido a la fuerza de tracción aplicada

A_0 es la sección transversal inicial de la probeta donde ($A_0 = b * T$)

b es la anchura de la probeta, en mm

T es el espesor de la probeta, en mm

L_0 es la longitud de la probeta que hay entre las mordazas, en mm

La bondad de conocer este parámetro característico de cada material reside en la posibilidad de extraer, de forma indirecta, información relativa a otros muchos parámetros mecánicos del material, de ahí su versatilidad.

Sin embargo, la curva que se obtiene directamente del ensayo no es la curva de tensión-deformación, si no la curva de fuerza-alargamiento. A pesar de ello, la transformación de la curva de fuerza-alargamiento en la de tensión-deformación es sencilla, y se puede realizar a posteriori.

➤ Tensión de rotura, σ_R (MPa)

$$\sigma_R = \frac{F_R}{A_0} = \frac{F_R}{b * T}$$

σ_R es la tensión máxima que soporta el material, en MPa

F_R es la fuerza de rotura del material, en kN

A_0 es la sección transversal inicial de la probeta donde ($A_0 = b * T$)

b es la anchura de la probeta, en mm

T es el espesor de la probeta, en mm

La tensión de rotura es la tensión máxima que puede soportar un material a tracción. En el caso de la fibra de carbono, la curva de tensión-deformación es prácticamente una recta que finaliza de forma brusca (no hay una caída paulatina de la tensión tras la rotura), por lo que no se prevé estricción del material, y por ello se valida el uso de la sección inicial en la fórmula de la tensión de rotura.

3.5. Ensayo de flexión en tres puntos

El ensayo de flexión en tres puntos persigue, como su nombre indica, poner a prueba la resistencia a la flexión del material de ensayo, o lo que es lo mismo, busca analizar la rigidez del material ante un esfuerzo realizado en una dirección determinada.

Es un ensayo que consiste en colocar la probeta sobre dos apoyos separados una cierta distancia L . Una vez colocada la probeta, un elemento con forma de cuña situado en el centro de los apoyos y por encima de la probeta, comienza a descender, flexionando la parte central de la probeta, hasta que esta se rompe. Lo que buscamos es calcular la flecha en rotura, así como la tensión de flexión en dicho instante. En este ensayo siguen las directrices de la Norma UNE-EN ISO 178:2011/A1:2013 *Plásticos. Determinación de las propiedades de flexión* [27].

Aunque el ensayo se realice al material completo (matriz + fibras) en realidad el componente que resiste la práctica totalidad del esfuerzo flexional es la matriz de epoxy debido a la rigidez casi nula del entretejido de fibra de carbono.

3.5.1. Geometría de las probetas

Las probetas utilizadas para este ensayo tienen la misma geometría nominal que las del ensayo de tracción (Sub-apartado 3.4.1), es decir, probetas rectangulares de 10 x 70 mm. En este caso el espesor de las probetas varía entre 1.89 y 2.59 mm, pero en la generalidad, los espesores de cada probeta son similares a los del ensayo de tracción. En la Fig. 3.10 puede verse una de las probetas de flexión en tres puntos utilizada en uno de los ensayos.



Fig. 3.10 Probeta del ensayo de flexión en tres puntos (ya ensayada).

En la siguiente tabla (Tabla 3.4) están recogidas las principales dimensiones, anchura [b], y espesor [T], de las probetas del ensayo de flexión en tres puntos.

Tabla 3.4 Dimensiones geométricas de las probetas del ensayo de flexión en tres puntos.

Código	Anchura [b] (mm)	Espesor [T] (mm)
ACR - MT01	10.02	2.30
ACR - MT02	9.99	2.28
APL - MT01	9.96	2.15
APL - MT02	10.29	2.16
ASF - MT01	9.73	2.59
ASF - MT02	9.54	2.42
ASG - MT01	10.16	2.28
ASG - MT02	9.92	2.25

Código	Anchura [b] (mm)	Espesor [T] (mm)
CAL - MT01	10.11	1.91
CAL - MT02	9.60	1.93
CAP - MT01	9.71	2.16
CAP - MT02	9.34	2.06
CCA - MT01	9.47	1.95
CCA - MT02	10.35	1.89
EFU - MT01	9.73	1.99
EFU - MT02	10.22	1.97
ENG - MT01	9.49	2.40
ENG - MT02	9.95	2.39
EVE - MT01	9.27	2.52
EVE - MT02	9.75	2.56

3.5.2. Preparación y conducción del ensayo

El ensayo de flexión en tres puntos se ha realizado utilizando una máquina de ensayos Servosis Serie ME-405 (Fig. 3.11) conectada a un equipo de adquisición de datos. El conjunto permite capturar y guardar los valores de deflexión o flecha producida por una fuerza a lo largo del tiempo que dura el ensayo, hasta que la probeta se rompe en el punto de aplicación de dicha fuerza.



Fig. 3.11 Máquina de ensayos Servosis Serie Me-405 utilizada para realizar el ensayo de flexión en tres puntos.

Preparación

En primer lugar, tomamos las medidas geométricas de las probetas del ensayo con un calibre de forma que obtenemos la Tabla 3.4. Además, se mide la distancia entre los puntos de apoyo de la probeta en el utillaje de ensayo, así como el diámetro de los rodillos. En este caso, los rodillos seleccionados son de 14 mm de diámetro, y la distancia entre apoyos es de 30 mm.

A continuación, se coloca la célula de carga, en nuestro caso de 1.25 kN, y se coloca el utillaje de forma que este quede justo debajo y en el medio del cilindro superior, donde está instalada la célula de carga. El montaje final puede apreciarse en la Fig. 3.11.

Tras esto, debemos configurar el equipo de adquisición de datos e introducir los parámetros de ensayo deseados. El software utilizado para la adquisición de datos fue el programa PCD2K desarrollado por la empresa fabricante de la máquina de ensayo Servosis. Se estableció en el sistema el control de posición, y se introdujeron los siguientes parámetros:

- Función utilizada → Rampa (Single ramp)
- Velocidad de bajada de la cuchilla → 0.5 mm/s
- Destino del vástago → -33 mm (Para mayores valores la cuchilla choca contra los cilindros del utillaje)
- Canal 0 → Carga [kN] (Eje Y)
- Canal 1 → Posición [mm] (Eje X)

Por último, se coloca una probeta de ensayo centrada entre los puntos de apoyo y se actúa sobre el cilindro superior para que comience a bajar. En su bajada, el cilindro empuja el puente del utillaje haciendo que la cuchilla se acerque cada vez más a la probeta. Una vez esta toca la probeta, detenemos el cilindro y tomamos dos valores directamente del interfaz del software usado en el equipo de adquisición de datos:

- Posición inicial del vástago (cilindro superior) → -22 mm
- Precarga del utillaje → 660 N

Conducción

Tras configurar los parámetros del ensayo, comenzamos a conducirlo propiamente.

Para empezar, colocamos la probeta pertinente entre los puntos de apoyo del utillaje, de forma que quede centrada entre los rodillos. Acto seguido, comandamos el cilindro superior desde el equipo de adquisición de datos para que se coloque en la posición inicial hallada en la preparación del ensayo (-22 mm) y comprobamos que la precarga del utillaje sea igual a la hallada en dicha preparación.

A continuación, iniciamos el trazador en el equipo de adquisición de datos y seleccionamos “iniciar ensayo” en la interfaz del software. Hecho esto, el vástago comienza a bajar empujando a la cuchilla, que comienza a ejercer fuerza sobre la probeta y esta empieza a curvarse en su parte central hasta su punto de rotura.

Finalmente, se comanda el vástago hasta la posición de retracción (-21 mm), se retira la probeta rota y se guarda el archivo pertinente que contiene los datos de la fuerza ejercida y la posición del cilindro superior en todo momento.

3.5.3. Cálculo de resultados

Las fórmulas que se utilizan para analizar el ensayo de flexión en tres puntos de este proyecto vienen especificadas en la Norma ISO 178:2010, así como otros los interrogantes derivados de este ensayo. En la Fig. 3.12 se presenta el esquema de fuerzas de la probeta durante el ensayo de flexión en tres puntos.

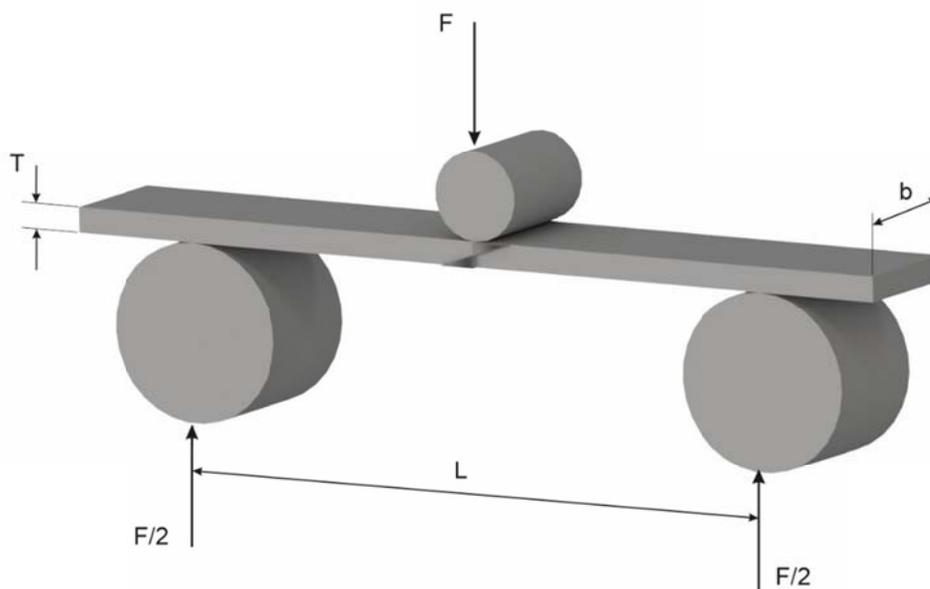


Fig. 3.12 Esquema de fuerzas en una probeta sometida a esfuerzo de flexión en tres puntos [9].

En primer lugar, calculamos la tensión de flexión que sufre la probeta en su sección central, donde la cuchilla contacta con la citada probeta, y se da la flexión máxima.

➤ Tensión de flexión, σ_f (MPa)

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bT^2}$$

- σ_f es la tensión de flexión aplicada en la sección central de la probeta, en MPa
- F es la fuerza aplicada, en kN
- L es la distancia entre los apoyos, en mm
- b es la anchura de la probeta, en mm
- T es el espesor de la probeta, en mm

Finalmente, también calculamos la deformación en flexión que es la variación fraccional nominal de la longitud de la superficie exterior de la probeta en el punto de aplicación de la carga. Es un parámetro íntimamente ligado con la flecha o deflexión.

- Deformación en flexión, ε_f (adimensional)

$$\varepsilon_f = \frac{6sT}{L^2}$$

- ε_f es la tensión de flexión aplicada en la sección central de la probeta, en MPa
- s es la flecha o deflexión, en mm
- L es la distancia entre los apoyos, en mm
- T es el espesor de la probeta, en mm

La deformación en flexión es adimensional, pero la podemos medir en tanto por uno o tanto por cien.

3.6. Ensayo de impacto Charpy

El ensayo de impacto Charpy es uno de los ensayos mecánicos más utilizados para estudiar la resiliencia de los materiales. Lo que se busca en el ensayo es analizar la energía de impacto necesaria para provocar una cierta deflexión o, incluso, la fractura parcial o total de la sección resistente del material.

Es un ensayo profundamente dinámico ya que estudia el comportamiento de los materiales ante una considerable liberación de energía en un corto espacio de tiempo, es decir, un impacto.

En el ensayo Charpy, la probeta es colocada en un soporte que la mantiene prácticamente fija en sus extremos, pero sin ejercer fuerza sobre ella. A continuación, un péndulo con una masa determinada es liberado desde una altura predeterminada, de forma que la gravedad lo acelera, golpeando la probeta. Una vez el péndulo rompe la probeta, se mide qué altura final alcanza y se computa la cantidad de energía que ha sido necesaria para romper la probeta. El ensayo es desarrollado conforme a la UNE-EN ISO 179-2:2000/A1:2012. *Plásticos. Determinación de las propiedades frente al impacto Charpy. Parte 2: Ensayo de impacto instrumentado. Modificación 1: Datos de precisión. (ISO 179-2:1997/Amd 1:2011) [28].*

Un aspecto destacable es el buen comportamiento del compuesto fibra de carbono embebido en epoxy ante los impactos, donde el epoxy aglomera el entretejido de fibras, pero es dicho entretejido el que va a soportar la práctica totalidad de la energía de impacto.

3.6.1. Geometría de las probetas

Las probetas utilizadas para este ensayo tienen la misma geometría nominal que las del ensayo de tracción (Sub-apartado 3.4.1) y el ensayo de flexión en tres puntos (Sub-apartado 3.5.1), es decir, probetas rectangulares de 10 x 70 mm. En este caso el espesor de las probetas varía entre 1.89 y 2.59 mm, pero en la generalidad, los espesores de cada probeta son similares a los de los dos ensayos anteriores.

En la siguiente tabla (Tabla 3.5) están recogidas las principales dimensiones, anchura [b], y espesor [T], de las probetas del ensayo de impacto Charpy.

Tabla 3.5 Dimensiones geométricas de las probetas del ensayo de impacto Charpy.

Código	Anchura [b] (mm)	Espesor [T] (mm)	Distancia entre apoyos [L] (mm)
ACR - MC01	10.34	2.18	24
ACR - MC02	10.36	2.20	24
APL - MC01	10.10	2.04	24
APL - MC02	9.18	2.21	24
ASF - MC01	10.30	2.56	24

Código	Anchura [b] (mm)	Espesor [T] (mm)	Distancia entre apoyos [L] (mm)
ASF - MC02	10.16	2.37	24
ASG - MC01	10.23	2.20	24
ASG - MC02	10.28	2.23	24
CAL - MC01	10.06	1.82	24
CAL - MC02	10.12	1.88	24
CAP - MC01	10.04	2.06	24
CAP - MC02	10.46	2.06	24
CCA - MC01	10.21	1.86	24
CCA - MC02	10.09	1.90	24
EFU - MC01	9.70	1.92	24
EFU - MC02	10.02	2.00	24
ENG - MC01	10.04	2.36	24
ENG - MC02	10.49	2.38	24
EVE - MC01	9.86	2.52	24
EVE - MC02	10.06	2.52	24

3.6.2. Preparación y conducción del ensayo

El ensayo de impacto Charpy se ha realizado utilizando una máquina de ensayo Impactor II del fabricante CEAST (Fig. 3.13) junto con un DAS (Data Acquisition System) o sistema de adquisición de datos. Además, para evitar usar la interfaz acoplada directamente en la máquina de ensayos, se ha utilizado un ordenador con un software proporcionado por la empresa fabricante de la máquina de ensayos. El equipo completo permite la captación de muchos parámetros del ensayo de forma directa, de entre los cuales se encuentran los más importantes para nosotros, como son la fuerza, deformación y energía consumida en una gran cantidad de instantes de tiempo durante la ejecución del ensayo.

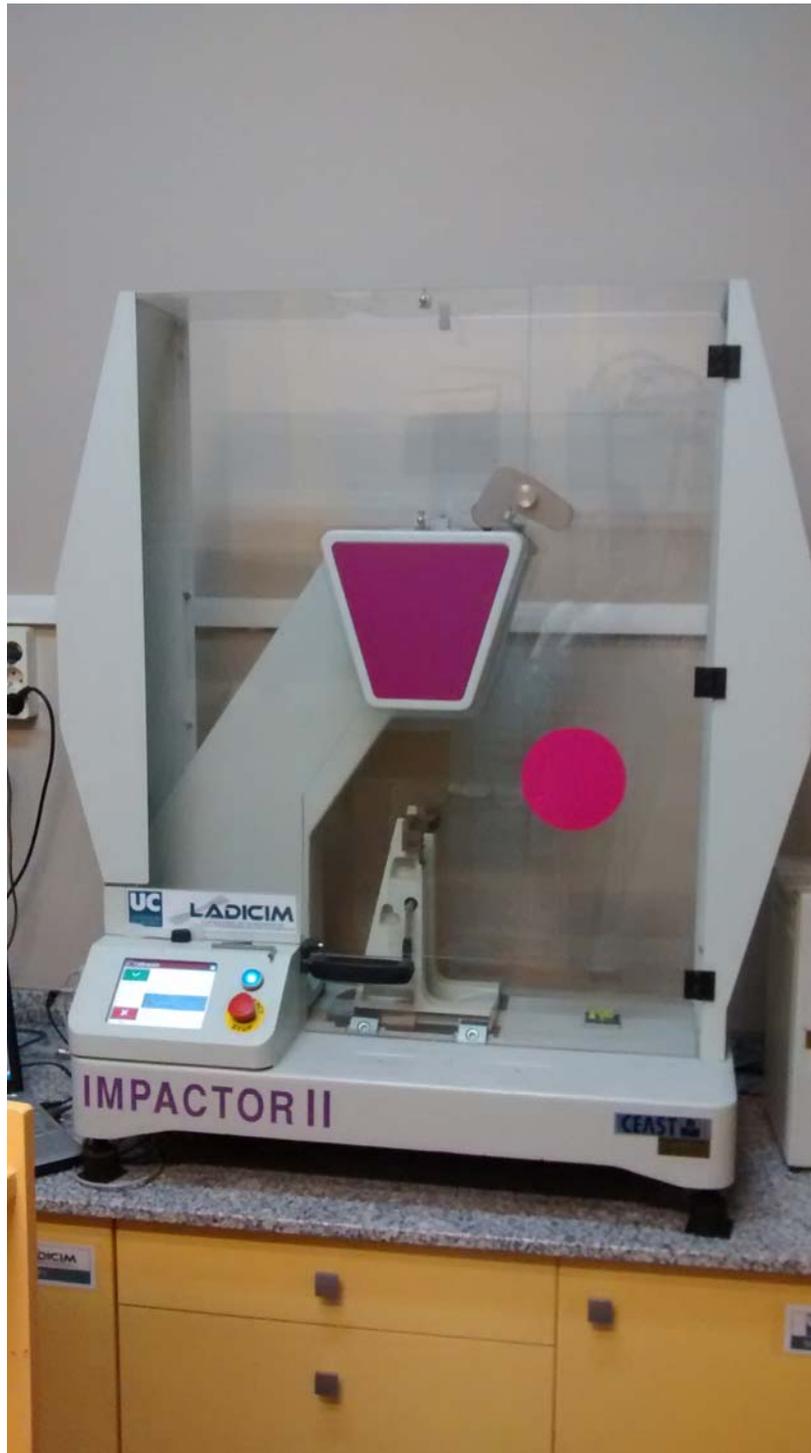


Fig. 3.13 Máquina de ensayos CEAST Impactor II utilizada para realizar el ensayo de impacto Charpy.

Preparación

Lo primero de todo es tomar las medidas de las probetas que vamos a utilizar en el ensayo, para lo que se utiliza un calibre, y con lo que obtenemos la Tabla 3.5. También se usa el

calibre para ajustar la distancia entre los apoyos donde se coloca la probeta, que en nuestro caso será de 24 mm.

A continuación, se procede a seleccionar y montar en la máquina de ensayo el martillo adecuado para el tipo de probetas a ensayar. Debido a la poca sección resistente de nuestras probetas, el martillo utilizado es un martillo Charpy ISO 7601.005.1 con una energía de impacto máxima de 5 Julios.

Tras esto, se conecta un ordenador al DAS y a la máquina de ensayo, y se inicia el software CEASTVIEW v.5.93. Una vez iniciado el software se crea un perfil de parámetros nuevo, individual para cada probeta, y se introducen la siguiente serie de parámetros navegando por cada una de las ventanas del perfil creado:

- Estándar de Muestra → Charpy Tipo 179
- Martillo utilizado → Charpy ISO 7601.005.1 5J
- Aspectos geométricos de las probetas (ancho, espesor y distancia entre apoyos) → Tabla 3.5
- Tipo de Entalla → Sin entalla (Unotched [U])
- Nivel de trigger → 2%
- Pretrigger → 400
- Número de puntos del ensayo → 5000
- Frecuencia de muestreo → 1000 kHz
- Rango de escala → 1045 N
- Temperatura y humedad → Medido in situ con un termómetro y un higrómetro
- Tipo de rotura → Completa (Complete [C])

Un perfil de parámetros nuevo debe ser creado para cada una de las probetas del ensayo, variando únicamente entre los perfiles la geometría de las probetas y la temperatura y humedad en el instante de la realización del ensayo. Los demás parámetros revisados en la lista superior deberán ser comunes a todos los perfiles.

Por último, se realiza la calibración del martillo a través del propio software CEASTVIEW. Se selecciona un ángulo de calibración de 150°, y se inicia la calibración, con lo que el sistema realiza autónomamente el procedimiento. La calibración consiste en soltar el martillo de 1.19 kg de masa a una velocidad de 3 m/s desde una altura de 1000 mm y medir la energía disipada tras doce oscilaciones.

Conducción

Tras haber calibrado el martillo y haber creado el perfil de parámetros correspondiente a cada probeta de ensayo, se inicia la conducción del ensayo propiamente.

Primero, se carga el perfil de parámetros correspondiente en el software CEASTVIEW, asegurándose de que los parámetros geométricos, temperatura de la sala y humedad de la sala coinciden con los reales.

Una vez realizado esto, colocamos la probeta entre los apoyos y la centramos. Para ayudarnos a centrarla, la máquina de ensayo cuenta con una varilla que está situada en la parte central, entre los apoyos, y la cual debemos hacer coincidir con una marca previamente practicada en el centro de la probeta. Se debe extremar la precaución y no realizar una muesca para marcar el centro, sino una marca que no afecte a la superficie de la probeta. Este procedimiento se plasma en la Fig. 3.14.



Fig. 3.14 Elemento auxiliar para centrar la probeta Charpy entre los apoyos.

Para finalizar, se inicia el ensayo desde el interfaz del software informático de forma que el martillo es liberado y cae por gravedad, impactando sobre la sección central de la probeta y perdiendo energía en el proceso. Así, el martillo se recoge de forma automática hasta su posición inicial y el DAS envía los datos sobre la fuerza, desplazamiento y energía absorbida por el impacto para cada uno de los 5000 instantes de tiempo del ensayo al ordenador, donde es almacenado en un archivo.

3.6.3. Cálculo de resultados

El martillo utilizado en el ensayo Charpy instrumentado contiene una célula de carga, de forma que es posible obtener del ensayo la curva de fuerza-flexión que sufre la probeta en cada instante del ensayo. Además, del ensayo también se puede obtener la energía que absorbe el material en cada instante por efecto del impacto, y con ello su resistencia al impacto. Todas las fórmulas y descripciones presentadas a continuación en este ensayo figuran directamente en la Norma ISO 179-2 *Plásticos. Determinación de las propiedades frente al impacto Charpy. Parte 2: Ensayo de impacto instrumentado.*

Algo destacable en cuanto al ensayo es la incapacidad de la máquina de ensayos para tomar valores continuos. En su defecto, la máquina de ensayos discretiza la medida tomando una gran cantidad de puntos, con lo que no obtenemos el valor real de las medidas, pero si una aproximación bastante precisa si el número de puntos seleccionado es suficientemente grande. Por esta razón, se muestran a continuación las dos versiones de las ecuaciones de cada uno de los parámetros calculados, la forma continua (exacta) y la forma discreta (aproximada).

- Velocidad de impacto, V_0 (m/s): velocidad del percutor (martillo) con respecto a los soportes (apoyos) de la probeta en el momento del impacto.

Forma continua

$$v_i = \int_i \frac{F(t)}{M_{\text{total}}} dt$$

Forma discreta

$$v_i = v_{(i-1)} - t_{\text{muestreo}} * \frac{\frac{F_i + F_{(i-1)}}{2} - g * (M_{\text{total}})}{M_{\text{total}}}$$

Donde,

t	es el tiempo al que se mide la velocidad tras el impacto, en s
t _{muestreo}	es el tiempo de muestreo (T _{muestreo} = t - t _{i-1}) medido en s
F(t)	es la fuerza medida en el tiempo t tras el impacto en newtons
F _i	es la fuerza medida en el instante i en newtons
M _{total}	es la masa total del martillo en kg
g	es la aceleración local de la gravedad en m/s ²

- Flexión, s (mm): desplazamiento del percutor con respecto a los soportes de la probeta después del impacto, desde el primer contacto entre el percutor y la probeta.

Forma continua

$$s(t) = v_0 * t - L_p * \frac{g}{M_H} \int_0^t \int_0^{t_1} F(t) dt dt_1$$

Forma discreta

$$s_i = \sum_{i=0}^{i-1} s_i + t_{\text{muestreo}} * \frac{v_i + v_{(i-1)}}{2}$$

Donde,

v ₀	es la velocidad del impacto, en m/s
t	es el tiempo al que se calcula la flexión tras el impacto, en s
t _{muestreo}	es el tiempo de muestreo (T _{muestreo} = t - t _{i-1}) medido en s
s(t)	es la flexión de la probeta en el tiempo t tras el impacto en m
F(t)	es la fuerza medida en el tiempo t tras el impacto en newtons
L _p	es la longitud física del péndulo en m

M_H es el momento horizontal del péndulo en m*newtons
 g es la aceleración local de la gravedad en m/s²

- Energía de impacto, W (J): energía consumida en acelerar, deformar y romper la probeta durante la flexión s .

Forma continua

$$W_i = \int_0^{s_i} F(s) ds$$

Forma discreta

$$W_i = \sum_{i=0}^{i-1} W_i + t_{\text{muestreo}} * \frac{F_i * v_i + F_{(i-1)} * v_{(i-1)}}{2}$$

Donde,

t_{muestreo} es el tiempo de muestreo ($T_{\text{muestreo}} = t - t_{i-1}$) medido en s
 s es la flexión en m
 $F(s)$ es la fuerza medida con respecto a la flexión s en newtons

- Resistencia al impacto Charpy, a_{cu} (kJ/m²): energía de impacto en la rotura con respecto al área de la sección transversal inicial central A de la probeta no entallada.

$$a_{cu} = \frac{W_B * 10^3}{T * b}$$

Donde,

W_B	es la energía en la rotura en J
T	es el espesor de la probeta en mm
b	es la anchura de la probeta en mm

3.6.4. Tipos de fallo

Dependiendo de diversos factores, las probetas del ensayo de impacto Charpy pueden romperse de una serie de formas. A continuación, se presentan los tipos más comunes de roturas:

- Rotura completa (C): se rompe la totalidad de la sección resistente en la zona de impacto, de forma que la probeta queda dividida en dos o más partes.
- Rotura en bisagra (H): se rompe una gran cantidad de sección resistente de la zona de impacto, pero queda un remanente de nula resistencia en la parte exterior de la citada zona. La probeta queda doblada por la zona de impacto, pero sus partes no llegan a separarse, unidas únicamente por una mínima sección.
- Rotura parcial (P): se conoce como rotura parcial a toda rotura que se asemeja a la rotura en bisagra, pero donde la rigidez estructural del remanente en la zona de impacto todavía es sustancial.
- Sin rotura (N): si el material es muy resiliente o el impacto no confiere la suficiente energía, el material absorberá toda la energía de impacto sin romperse, apreciándose únicamente pequeñas muescas o zonas blanquecinas en la zona de impacto.

En este proyecto se ha decidido asegurar que la rotura de todas las probetas sea completa, para evitar que el software pueda inferir en un error a la hora de clasificar automáticamente el tipo de rotura de la probeta. Para conseguir dicho tipo de rotura con fiabilidad, se ha escogido una distancia entre apoyos corta (24 mm) comparado con la geometría y composición de nuestras probetas. Con ello, y realizando ensayos de prueba, se corrobora que la totalidad de las probetas sufrieron una rotura completa.

3.7. Ensayo normalizado Taber o de abrasión

Según la RAE, el concepto de abrasión se define como la *acción y efecto de raer o desgastar por fricción* [29]. Sin embargo, la abrasión no solo es eso, si no que significa esa *acción y efecto de desgaste por fricción* en dos o tres superficies debido al contacto entre ellas cuando existe un movimiento relativo entre las mismas. Por ello, la abrasión es un mecanismo de desgaste de doble cuerpo o triple cuerpo [30]. El objetivo final de todo ello es llegar a cuantificar el desgaste de los materiales bajo unas condiciones de trabajo específicas, hallar su resistencia al desgaste por abrasión y realizar una predicción veraz sobre la vida útil del material.

3.7.1. Principio teórico del ensayo Taber

El ensayo de abrasión o, como se conoce comúnmente, ensayo Taber es un tipo de ensayo mecánico que busca conocer los mecanismos de desgaste mediante abrasión en los materiales.

Sin embargo, y a pesar de otros tipos de ensayos, para estudiar los mecanismos de desgaste en los materiales no es viable simplemente realizar una observación en la aplicación práctica de cada material, pues el mecanismo de desgaste se reproduce a un ritmo demasiado lento. Para suplir este gran inconveniente, surgieron los ensayos de desgaste acelerados, como el ensayo Taber, mediante el que se pueden reproducir las condiciones de trabajo reales, de forma bastante aproximada, de muchos materiales y estudiar en un corto periodo de tiempo los mecanismos de desgaste del mismo material. A parte de la evidente ventaja de reducirse el tiempo de ensayo, los ensayos acelerados son más económicos que si se realizase el ensayo en la aplicación real y, si se toman las precauciones adecuadas, su divergencia de resultados respecto de la realidad puede limitarse a cotas despreciables.

En el ensayo Taber la probeta del material se hace girar en un plato al mismo tiempo que dos muelas cilíndricas ruedan sobre la superficie del disco. El contacto de las muelas contra la probeta genera un desgaste acelerado por abrasión que va liberando partículas de ambas superficies y dejando una huella en forma de anillo en la probeta. Para evitar que las partículas liberadas por la abrasión interfieran en el proceso, un aspirador recoge dichas partículas. Finalmente, mediremos cuanto peso y espesor pierde la probeta y lo compararemos con su estado inicial a un cierto número de ciclos. El ensayo Taber se realiza según las directrices de la Norma UNE-EN ISO 5470-1:1999. *Tejidos recubiertos de*

plástico o caucho. *Determinación de la resistencia a la abrasión. Parte 1: Aparato de ensayo de abrasión Taber. (ISO 5470-1:1999) [31].*

3.7.2. Geometría de las probetas

Las probetas utilizadas para el ensayo Taber están normalizadas según la ISO 5470-1:1999, y son discos circulares de 8 cm de diámetro, tal y como muestra la Fig 3.5. El espesor de las probetas varía entre 1.78 y 2.54 mm. Aunque la norma establezca que los discos tienen que medir un diámetro determinado, los obtenidos para este ensayo contienen pequeñas diferencias entre sus diámetros ya que es requisito suficiente con que la distancia entre las caras exteriores de las muelas del equipo no sobrepase el diámetro de la probeta. En la Fig. 3.15 podemos observar la morfología de la probeta del ensayo Taber.



Fig. 3.15 *Probeta utilizada para el ensayo de abrasión o ensayo normalizado Taber (ya ensayada).*

En la siguiente tabla (Tabla 3.6) están recogidos los espesores iniciales medios de las probetas (media basada en tres puntos escogidos alrededor de la probeta a 120° entre sí) y el peso inicial de cada probeta.

Tabla 3.6 *Espesor medio y peso inicial de las probetas del ensayo de abrasión.*

Código	Espesor medio inicial [e] (mm)	Peso inicial [P] (g)
ACR - MA01	2.18	26.43
ACR - MA02	1.99	21.53

Código	Espesor medio inicial [e] (mm)	Peso inicial [P] (g)
ACR - MA03	1.85	21.52
APL - MA01	2.17	23.06
APL - MA02	2.12	22.11
APL - MA03	2.02	21.69
ASF - MA01	2.49	36.92
ASF - MA02	2.37	25.76
ASF - MA03	2.30	26.01
ASG - MA01	2.30	20.00
ASG - MA02	2.27	19.08
ASG - MA03	2.08	17.91
CAL - MA01	1.88	16.37
CAL - MA02	1.88	16.38
CAL - MA03	1.79	16.58
CAP - MA01	2.14	26.42
CAP - MA02	2.34	25.96
CAP - MA03	2.19	24.23
CCA - MA01	1.76	18.82
CCA - MA02	1.79	20.87
CCA - MA03	1.70	18.88
EFU - MA01	2.05	22.65
EFU - MA02	1.90	20.58
EFU - MA03	1.79	20.78
ENG - MA01	2.33	26.82
ENG - MA02	2.15	23.13
ENG - MA03	2.00	22.71
EVE - MA01	2.50	21.02
EVE - MA02	2.48	20.55
EVE - MA03	2.35	20.23

3.7.3. Principio de funcionamiento del abrasímetro Taber

Para llevar a cabo el ensayo normalizado Taber, se utiliza un abrasímetro Modelo 5135 del fabricante Taber Industries (Fig. 3.16). Este equipo fue concebido como un instrumento enfocado a realizar ensayos acelerados de desgaste por abrasión de forma sencilla y precisa, de forma que se convirtió rápidamente en el equipo estándar para la evaluación de la resistencia a la abrasión de los materiales [32].



Fig. 3.16 Abrasímetro Modelo 5135 de Taber Industries utilizado para el ensayo de abrasión.

Actualmente, el abrasímetro Taber es utilizado para ensayar la resistencia a la abrasión de un amplio espectro de materiales bajo numerosos estándares y especificaciones, desde materiales plásticos hasta cerámicos, pasando por laminados, fibras textiles o recubrimientos superficiales.

La versatilidad en cuanto a la cantidad de materiales que se pueden evaluar con este equipo procede en cierta parte de la amplia gama de muelas disponibles en el mercado, de forma que escogeremos una muela más o menos abrasiva dependiendo del material a ensayar. Todas las muelas ya están codificadas por la empresa fabricante y esta provee recomendaciones en cuanto a qué tipo de muela utilizar para cada material. En la Fig. 3.17 se visualizan las muelas utilizadas en los ensayos de abrasión llevados a cabo en este proyecto.



Fig. 3.17 Muela Calibrade H-18 montada en el abrasímetro Taber utilizado en los ensayos del proyecto.

El Modelo 5135 de Taber consta básicamente de un plato giratorio de eje vertical sobre el cual se coloca la probeta del material a ensayar, y dos muelas abrasivas montadas sobre un eje de giro horizontal. A medida que el plato gira, este obliga a las muelas a girar, cada una en direcciones opuestas, alrededor de un eje horizontal desplazado tangencialmente con respecto al eje de giro de la probeta. Así, el mecanismo de abrasión es producido por el deslizamiento rotativo de las muelas sobre la superficie de la probeta. En la Fig. 3.18 podemos observar un diagrama del giro conjunto de muelas y plato.

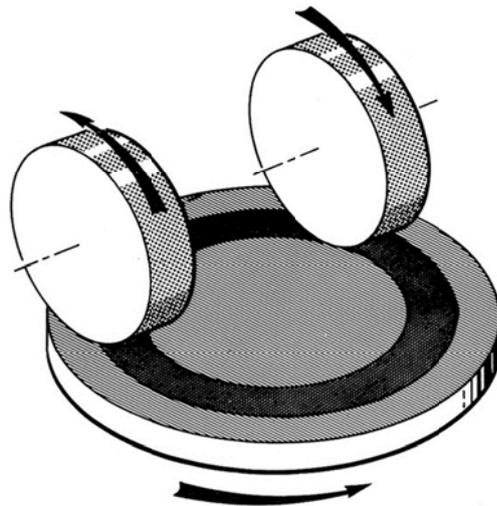


Fig. 3.18 Diagrama de giro conjunto de las muelas y plato del abrasímetro Taber 5135.

Para asegurar que el desgaste se produzca en todos los ángulos de ataque relativos al entramado del material, las muelas giran en sentidos contrarios centrando su desgaste en una zona específica. Una de las muelas desgasta más la periferia de la probeta, mientras la otra produce mayor abrasión en la zona interior. Al final, las huellas dejadas por la abrasión de las muelas son bandas circulares regulares.

Cabe destacar que las muelas van montadas sobre unos soportes en los que se encuentran unas masas normalizadas. Dichas masas pueden ser sustituidas por otras de mayor o menor valor, con el objetivo de conseguir la presión de contacto necesaria entre las muelas y la probeta, buscando reproducir las condiciones de trabajo de una aplicación determinada. Además, un sistema de extracción se coloca muy cerca de la superficie de desgaste de la probeta para recoger las partículas que son desprendidas durante el ensayo, evitando las posibles desviaciones que estas pudiesen provocar en el ensayo.

3.7.4. Preparación y conducción del ensayo

Para la realización de este ensayo se poseen tres probetas de cada material. Esto fue concebido para conducir tres ensayos de abrasión Taber con condiciones de trabajo diferentes, con el objeto de comprobar el efecto de la temperatura en el desgaste del material ensayado. Por ello, los sub-apartados que vienen a continuación, diferenciaremos tres tandas de probetas, correspondientes a los tres ensayos de abrasión Taber llevados a cabo.

3.7.4.1. Primera tanda

La primera tanda del ensayo de abrasión se realizó a temperatura ambiente y haciendo paradas intermitentes a los 100, 500, 1000 y 2000 ciclos absolutos, para tomar las medidas de peso y profundidad de huella. Además, se utilizó un vatímetro para medir la potencia consumida por el equipo de abrasión a lo largo del ensayo, aunque sus resultados no fueron los esperados.

En primer lugar, se deben seleccionar el tipo de muelas adecuadas para el material que vayamos a ensayar. En nuestro caso, se seleccionan las muelas Calibrade H-18 (Fig. 3.18) indicadas para materiales resilientes como fibras textiles o láminas de plástico flexibles. Además, también se selecciona la masa adecuada para conseguir una buena presión de contacto, que en nuestro caso es de 1000 gramos.

A continuación, se mide el peso y el espesor inicial de todas las probetas archivándose en un fichero EXCEL. Para pesar las probetas se utiliza una báscula de precisión GRAM de la Serie BH, con un peso máximo de 600 gramos (Fig. 3.19i), mientras que para medir el espesor inicial de las probetas se usa un micrómetro (Fig. 3.19d).



Fig. 3.19 Báscula utilizada para la medida de peso de las probetas (izquierda) y micrómetro utilizado para la medida de espesores de las probetas (derecha).

Para evitar errores derivados de la irregularidad de espesor de las probetas, toman medidas en tres puntos, desfasados 120° entre sí, y se realiza un promedio entre estos. La Fig. 3.20 muestra el esquema de distribución de los puntos.

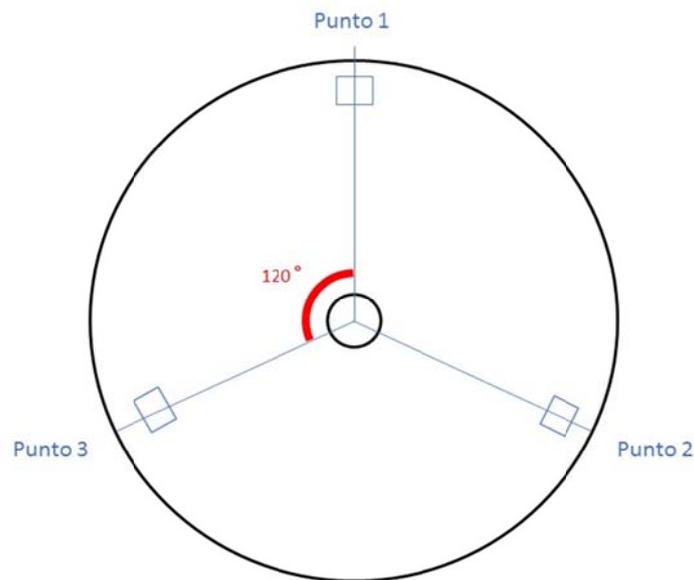


Fig. 3.20 Esquema de los puntos de medida de espesor en las probetas del ensayo de abrasión.

Después, se debe configurar el equipo de abrasión dónde introducimos los siguientes parámetros:

- Programa de ensayo nº1 → Rotary Abraser
- Velocidad de giro del plato → 72 ciclos/min
- Modo calibración → 100 ciclos

Una vez introducimos estos parámetros, se coloca sobre el plato una probeta extra fabricada para la calibración del equipo. Se bajan las muelas hasta que toquen la superficie de la probeta y se inicia la calibración apretando el botón “Start” del display del equipo. La calibración solo debe realizarse al inicio de cada una de las tres tandas, nunca en mitad de una de ellas.

Tras calibrar el equipo, se coge la primera probeta de la tanda y se coloca sobre el plato. En el display, se selecciona en el modo de ensayo el número de ciclos hasta la primera parada programada, en esta tanda 100 ciclos, y se inicia el ensayo pulsando el botón “Start” de nuevo. El equipo de extracción se pondrá automáticamente en marcha y el plato comenzará

a girar provocando el desgaste de la superficie de la probeta, hasta que se detenga automáticamente a los 100 ciclos.

Con el equipo parado, se extrae la probeta del plato y se realiza una medida del peso y espesor en el estado actual (Fig. 3.21), archivándose los resultados en el fichero EXCEL que contiene los pesos y espesores iniciales de las probetas.



Fig. 3.21 Medida del espesor de una probeta de abrasión durante un ensayo.

Por último, se repite el mismo proceso explicado tras la calibración para 500, 1000 y 2000 ciclos de la misma probeta, y al finalizar los 2000 ciclos, se repite de igual forma el proceso, otra vez tras la calibración, para la siguiente probeta.

El procedimiento de uso del vatímetro es en este caso irrelevante, ya que se obtuvieron resultados muy similares en la potencia consumida por el equipo a lo largo de todo el ensayo.

3.7.4.2. Segunda tanda

La segunda tanda de probetas del ensayo de abrasión se realizó a temperatura ambiente y sin hacer ninguna parada. Las probetas se ensayaron a 1000 ciclos, con el objeto de comprobar cómo afecta al desgaste el aumento de la temperatura de la probeta generado por el propio rozamiento entre la probeta y las muelas. La principal diferencia con la primera tanda estriba en la falta de refrigeración que existe, derivada de no realizar las paradas a 100 y 500 ciclos.

En cuanto a la preparación y conducción del ensayo, el procedimiento es igual que el descrito para la primera tanda, con la salvedad de que en esta segunda tanda no se realizan paradas intermedias, y se ensaya directamente a 1000 ciclos.

3.7.4.3. Tercera tanda

La tercera tanda de probetas se realizó hasta los 1000 ciclos y sin paradas, igual que la segunda tanda. Sin embargo, el ensayo no se realizó a temperatura ambiente, si no que se utilizó una decapadora para calentar la probeta durante la mitad del ensayo. Esto fue llevado a cabo para completar el estudio de cómo afecta el aumento de temperatura al mecanismo de desgaste. Además, cómo durante la segunda mitad del ensayo la decapadora se desconecta, también es posible evaluar la capacidad de refrigeración de la probeta.

La preparación del ensayo es igual que con las dos tandas anteriores, con la excepción del montaje de la decapadora en un soporte y la utilización de una cámara termográfica para controlar la temperatura de la probeta (Fig. 3.22).



Fig. 3.22 Montaje final de la decapadora (verde) y de la cámara termográfica.

En cuanto a la conducción del ensayo, el procedimiento es similar al de las tandas anteriores con dos salvedades; la primera, que al iniciar el ensayo debemos comenzar el registro de temperaturas con la cámara termográfica, para lo que utilizamos el software IRISYS 1000 Series Handheld Thermal Imager cargado en un ordenador. La segunda, el hecho de encender la decapadora cada vez que iniciamos el ensayo de una probeta, y apagarla cuando se realicen 500 ciclos, dejando que los últimos 500 ciclos se realicen sin aporte externo de calor.

3.7.5. Cálculo de resultados

Para interpretar la resistencia a la abrasión producida durante el ensayo normalizado Taber existen diversos métodos de evaluación. De entre ellos, en este proyecto se utilizarán los dos que se explican a continuación:

Método de la pérdida de peso

El método de la pérdida de peso es un método cuantificable basado en la pérdida de peso que sufre la probeta debida a la abrasión. Este método es válido cuando se quieren comparar resultados de dos materiales de similar densidad relativa, siendo perfecto en nuestro caso ya que los materiales a comparar son prácticamente iguales.

El método consiste en medir el peso de cada probeta al inicio y final de cada parada. Así, de la resta entre el peso inicial y final, se obtiene la pérdida de peso a unos ciclos determinados.

$$P_P = P_i - P_f$$

Donde,

P_P es la pérdida de peso por abrasión, en gramos

P_i es el peso inicial de la probeta, en gramos

P_f es el peso final de la probeta, en gramos

Además de calcular la pérdida de peso por abrasión, es muy interesante el hecho de referenciar este parámetro respecto del número de ciclos a través de un indicador absoluto. Este indicador se conoce como Índice de Desgaste Taber (IDT) [32], y se calcula según la siguiente fórmula:

$$IDT = \frac{1000 * P_P}{n^{\circ} \text{ ciclos}}$$

Donde,

P_P es la pérdida de peso por abrasión, en miligramos

El factor de corrección 1000 se debe a que el IDT se calcula sobre una base de 1000 ciclos (pérdida de peso en miligramos por cada 1000 ciclos), mientras que nosotros lo vamos a hacer unitario.

Método de la pérdida de espesor

El método de la pérdida de espesor es un método cuantificable basado en la pérdida de espesor máxima que sufre la probeta en debida a la abrasión. Este método, como el anterior, es válido para materiales con densidad relativa similar, por lo que en nuestro caso es idóneo.

El método consiste en medir el espesor de cada probeta en tres puntos (Fig. 3.20) al inicio y final de cada parada. De la medida de estos tres puntos, se realiza una media, que será el parámetro que utilizaremos. Así, de la diferencia entre el espesor inicial y final medios, se obtiene la pérdida de espesor media a unos determinados ciclos.

$$T_{im} = (T_{i1} + T_{i2} + T_{i3})/3$$

$$T_{fm} = (T_{f1} + T_{f2} + T_{f3})/3$$

Donde,

T_{in} es el espesor inicial de la probeta en el punto n, en milímetros

T_{fn} es el espesor final de la probeta en el punto n, en milímetros

T_{im} es el espesor inicial medio de la probeta, en milímetros

T_{fm} es el espesor final medio de la probeta, en milímetros

$$T_{Pm} = T_{im} - T_{fm}$$

Donde,

T_{Pm} es la pérdida de espesor media por abrasión, en milímetros

En la primera tanda, se toma la pérdida de peso y espesor a los 100, 500, 1000 y 2000 ciclos, mientras que en la segunda y tercera tanda solo se hace para los 1000 ciclos. Así, la comparación mediante este método solo se realiza para los 1000 ciclos en las tres tandas.

Análogamente al caso del Índice de Desgaste Taber, podemos referenciar la pérdida de espesor por abrasión respecto del número de ciclos a través de un indicador absoluto. Este indicador se conoce como Índice de Pérdida de Espesor (IPE), y se calcula según la siguiente fórmula:

$$IPE = \frac{T_{Pm}}{n^{\circ} \text{ ciclos}}$$

Donde,

T_{Pm} es la pérdida de espesor media por abrasión, en micrómetros

El factor de corrección 1000 se debe a que el IPE se calcula sobre una base de 1000 ciclos (pérdida de espesor en micrómetros por cada 1000 ciclos), mientras que nosotros lo vamos a hacer unitario.

3.8. Ensayo de erosión

El concepto de erosión está ligado de forma íntima al de abrasión, tanto en cuanto ambos conceptos forman parte de los distintos procesos mediante los que un material puede sufrir un desgaste. A pesar de ello, no se deben confundir, ya que mientras la abrasión es un mecanismo de doble o triple cuerpo, la erosión es de cuerpo único. Esto significa que el mecanismo de erosión se produce debido a la fricción continuada que se produce cuando una corriente de partículas (ya sean líquidas o sólidas) entra en contacto con una sola superficie [30].

El ensayo de erosión es un tipo de ensayo mecánico cuyo objetivo es, análogamente al ensayo Taber, analizar y comprender los mecanismos de desgaste mediante erosión en los materiales. Cabe destacar que ambos ensayos (Taber y erosión) buscan comprender una fenomenología común, el desgaste de los materiales, pero desde puntos de vista distintos, pues cuando los materiales sufren un desgaste los mecanismos que intervienen en la interacción de ese material con su entorno pueden ser muy distintos, aunque el resultado final sea el mismo, el desgaste. Al ser un ensayo de desgaste, el ensayo de erosión es, como el ensayo Taber, un ensayo acelerado.

En el ensayo de erosión, se coloca la probeta del material en un carro que la presiona contra una rueda metálica que se encuentra en movimiento. Al mismo tiempo, desde la parte superior, una tolva con material abrasivo suelta un flujo continuo de partículas sobre el contacto entre la probeta y la rueda en rotación, simulando de forma acelerada el contacto entre la superficie de la probeta y el flujo de partículas. Este proceso simula los mecanismos de erosión en el material y desgasta su superficie. El tiempo del ensayo está normalizado, así como otros factores como la presión entre rueda y probeta o el material abrasivo utilizado. Por último, se retira la probeta y se mide la profundidad de la huella en distintos puntos, ya sea utilizando mecanismos convencionales o laser. El ensayo de erosión realizado no sigue una norma específica, siendo la Norma UNE-EN 14617-4:2012 *Piedra aglomerada. Métodos de ensayo. Parte 4: Determinación de la resistencia a la abrasión* [33], la norma que más se aproxima al procedimiento seguido en el ensayo de erosión realizado para este trabajo.

3.8.1. Geometría de las probetas

Las probetas que se utilizan en el ensayo de erosión no están normalizadas, presentando una forma rectangular de 4 cm de largo por 8 cm de ancho, con espesores de entre 1.78 y 2.54 mm. El hecho de no tener dimensiones normalizadas no es un impedimento para el

ensayo, pues realmente solo se debe garantizar que la huella que resulta del mismo este contenida dentro de la probeta y que dicha probeta no pierda más de la mitad de su espesor en ningún punto, pues se ensayan en ambas caras. En la Fig. 3.23 se puede apreciar una de las probetas del ensayo de erosión.



Fig. 3.23 Probeta utilizada para el ensayo de erosión (véase la huella).

Puesto que solo nos interesa la pérdida de espesor de la probeta (huella) y para ello utilizaremos una medición continua de dicha huella mediante laser, no será necesario realizar medidas de peso ni de espesor inicial. Además, y remitiéndose a lo dicho en el párrafo anterior respecto de las dimensiones de la probeta, se hace presente el hecho de no ser necesario medir las desviaciones dimensionales respecto de los valores nominales de 8 x 4 cm.

3.8.2. Preparación y conducción del ensayo

Para la realización del ensayo de erosión se utiliza una máquina especializada que consta de cinco partes fundamentales:

- *Carro*, que servirá como alojamiento de la probeta
- *Rueda de fricción*, que será la que presione el material abrasivo contra la probeta
- *Tolva de alimentación de material abrasivo*, que proporciona las partículas de material abrasivo en el contacto entre probeta y rueda de fricción, a un ritmo controlado
- *Contrapeso*, que, por gravedad, asegurará la presión de contacto adecuada entre probeta y rueda de fricción.

- *Temporizador con display*, que permite ajustar el tiempo de duración deseado para el ensayo.

En la Fig. 3.24 se aprecia una vista general de la máquina utilizada en el ensayo de erosión (el display se encuentra en uno de los laterales de la máquina).



Fig. 3.24 Máquina utilizada para conducir el ensayo de erosión.

Preparación

En primer lugar, se preparan las probetas para ser montadas en el carro de la máquina. Puesto que la distancia entre las mordazas del carro es superior a la anchura de las probetas, se escogió montar las probetas de 4 en 4 sobre unas piezas de acero que sirviesen como bastidor (Fig. 3.25). Para adherir las probetas a estos bastidores, se utiliza silicona y se dejan secar durante 24 h. A parte, se da un ligero pulido uniforme con lija a la superficie de las probetas a ensayar, en parte para eliminar la silicona remanente en las caras traseras de las probetas ya ensayadas, y en parte para minimizar los reflejos que posteriormente puedan ocurrir durante la medición de la profundidad de la huella mediante laser.



Fig. 3.25 Cuatro probetas de erosión montadas en su correspondiente bastidor.

A continuación, con las probetas ya preparadas en los bastidores, se coloca la probeta correspondiente a ensayar sobre el carro, utilizando como soportes unos tacos de madera para ajustar la posición de la probeta y que el contacto con la rueda de fricción se realice de

la manera más centrada posible. Para asegurar la probeta al carro, se hace uso de un husillo que ejerce una presión suficiente para que la probeta no se mueva, pero no tan elevada que pueda flexionarla. En la Fig. 3.26 se muestra este montaje.

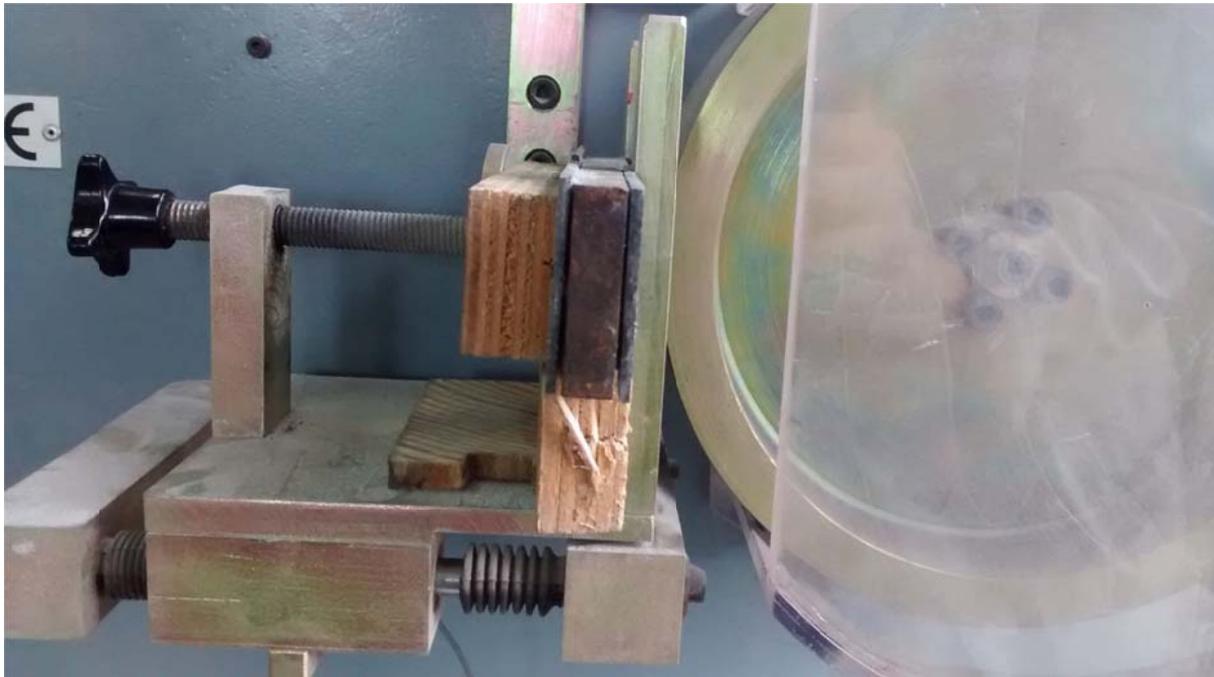


Fig. 3.26 Montaje de la probeta sobre el carro de la máquina.

Tras esto, se fuerza el carro contra la rueda, para lo que se utiliza un contrapeso que por gravedad ejerce dicha fuerza y asegura la presión del contacto.

Por último, se debe llevar la tolva de alimentación con el abrasivo correspondiente, que en nuestro caso es arena de corindón de grano normalizado F80.

Conducción

Se comienza programando el temporizador de la máquina mediante un display para escoger la duración del ensayo. La duración de nuestro ensayo se ha escogido tras realizar dos pruebas con recortes sobrantes de material de fibra de carbono, y se ha llegado a la conclusión de que dicho ensayo debe durar un minuto.

Tras ello, se comienza propiamente el ensayo al iniciar el temporizador, al mismo tiempo que se abre la válvula de la tolva de alimentación. Es fundamental regular dicha válvula manualmente de la forma más rápida posible hasta una posición idónea. Así, esta posición de la válvula debe asegurar que el punto de contacto entre rueda y probeta reciba suficiente cantidad de partículas abrasivas, pero sin exceder un límite, con el objeto de evitar la acumulación de material abrasivo sobre la probeta.

Una vez se termina el minuto de ensayo, la máquina se detiene de forma automática, pero la válvula de la tolva de alimentación se debe cerrar manualmente.

Por último, se retira el contrapeso y se acciona el husillo para liberar la probeta, limpiando el abrasivo sobrante. Se debe destacar que, al finalizar el ensayo de las 4 probetas de cada bastidor, se deben liberar las probetas del citado, utilizando tras ello una lija para quitar los restos de silicona.

3.8.2.1. Medición de huella de probetas mediante laser

Tras realizar el ensayo de abrasión, se debe medir la huella de la probeta mediante algún método. En nuestro caso, el método escogido ha sido la medición mediante cabezal laser. El equipo de medición laser puede verse en la Fig. 3.27



Fig. 3.27 Montaje de la probeta sobre el carro de la máquina.

En primer lugar, se deben colocar las probetas a ensayar en serie, una a continuación de la otra y sin espacios entre ellas, teniendo en cuenta que cara de cada probeta se está ensayando (la A o la B). Esta colocación permite asegurar que los puntos de medición de todas las probetas son los mismos, además de permitir la medición de cada punto de todas las probetas de un solo barrido.

Después de esto, y con ayuda de una regla y la mesa de medición, se colocan todas las probetas de forma que sus huellas comiencen en el mismo punto de recorrido. Ahora, si medimos con la regla el primer punto de recorrido de la primera probeta (en nuestro caso a 1 cm del borde de la huella) y situamos el láser manualmente en ese punto, como todas las probetas comienzan en el mismo recorrido, podremos realizar un barrido completo de todos los puntos del primer recorrido de todas las probetas. La Fig. 3.28 muestra este procedimiento.

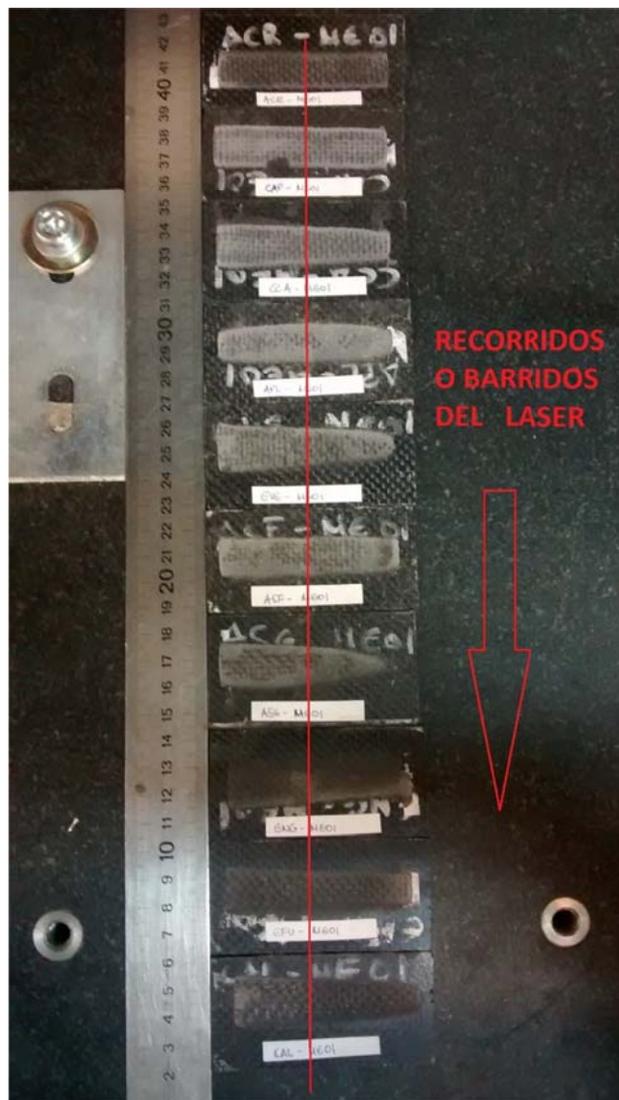


Fig. 3.28 Alineación de las probetas para la realización del primer barrido.

A continuación, se dan barridos rápidos moviendo el láser de forma manual para comprobar la distancia óptima de profundidad del láser, con el objetivo de obtener la máxima resolución en la medición. Si alguna probeta no queda en la zona óptima de profundidad, se regulará por separado más adelante (Fig. 3.29)

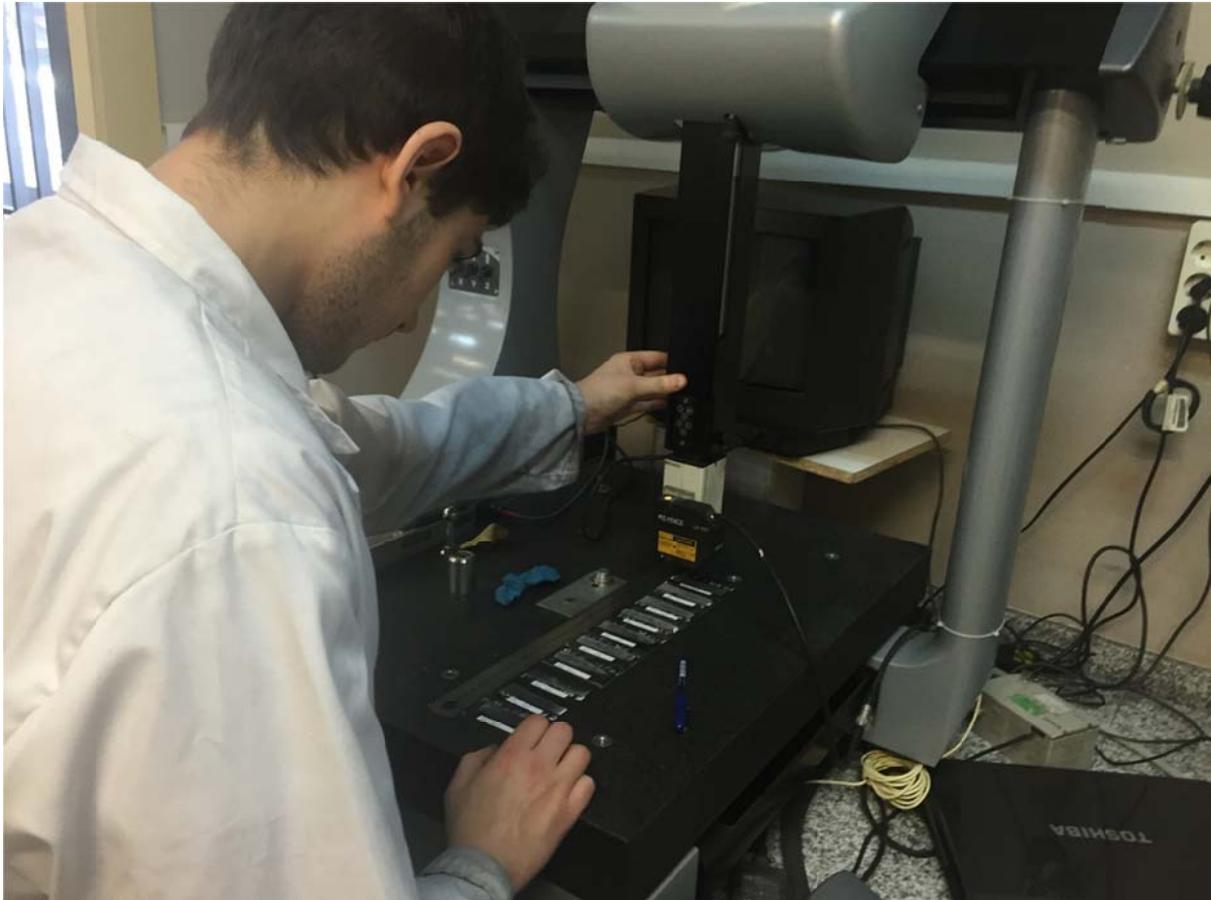


Fig. 3.29 Comprobación de la distancia óptima de profundidad del láser de forma manual.

Más tarde, se vuelve a colocar el cabezal del láser en el punto inicial del primer recorrido de la primera probeta, y se inicia la conexión con el sistema de adquisición de datos. Se utiliza la interfaz mediante ordenador para seleccionar los canales de adquisición de datos con sus escalas correspondientes. En nuestro caso:

- **Canal 0 – LASER** [Escala = 1]

- **Canal 1 – POSICIÓN** [Escala = 30.977]

Por último, se selecciona la velocidad adecuada de barrido y se actúa sobre el joystick del láser para realizar el barrido de todas las probetas a través del primer recorrido. Este

proceso se repetirá primero, para los dos barridos restantes por los recorridos 2 y 3 (Fig. 3.30), y posteriormente para los 3 barridos para la cara restante de la serie de probetas.

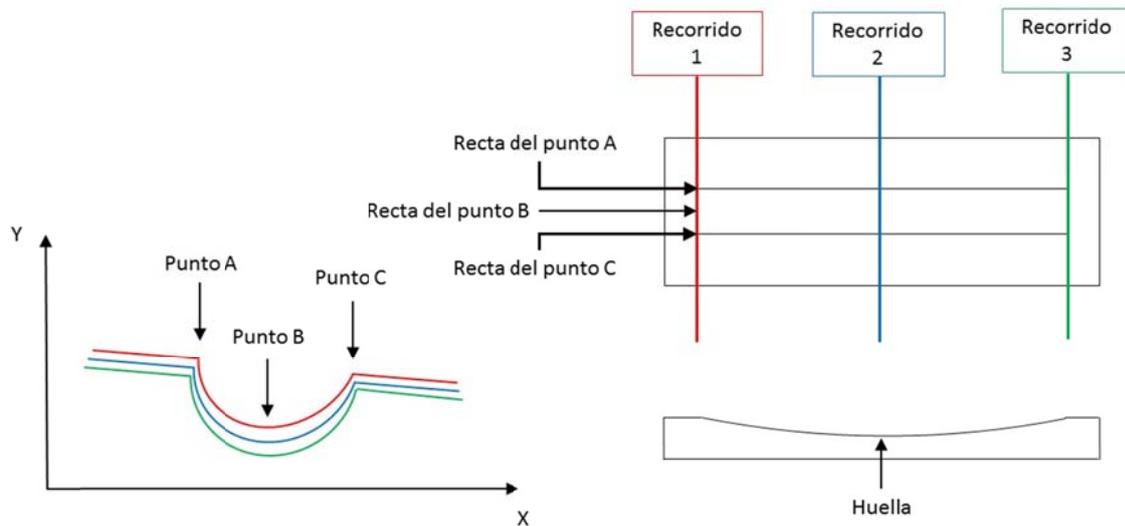


Fig. 3.30 Esquema de los recorridos y puntos de medición mediante láser.

3.8.3. Cálculo de resultados

Según la Norma UNE-EN 14617-4:2012 *Piedra aglomerada. Métodos de ensayo. Parte 4: Determinación de la resistencia a la abrasión* [33], el parámetro principal para caracterizar la resistencia al desgaste por erosión en los materiales de piedra aglomerada es la anchura de la huella.

Puesto que el ensayo se realiza en un material que no es piedra aglomerada, los parámetros principales para determinar la resistencia al desgaste por erosión en nuestras probetas de fibra de carbono no concuerdan completamente con los del ensayo normalizado. Por ello, a continuación, se presentan los parámetros elegidos para realizar la comparación de las probetas en cuanto a resistencia al desgaste por erosión.

- Anchura de la huella, A_h (mm): dimensión de la huella que se aprecia en la Fig 3.31
- Profundidad de la huella, Ph (mm): dimensión de la huella que se aprecia en la Fig 3.31

- Área triangular de la huella, S_h (mm^2): área ponderada de la huella que relaciona los parámetros de anchura y profundidad de la huella. También se aprecia un esquema en la Fig 3.31

$$S_h = (A_h * P_h)/2$$

- Volumen erosionado, V_h (mm^3): volumen ponderado de la cantidad de material que se erosiona durante el ensayo.

$$V_h = (S_h * L_h)$$

Donde,

L_h es la longitud de la huella en mm.

Dicha longitud de la huella siempre es de 65 mm, ya que es la dimensión del ancho de la rueda de erosión utilizada en los ensayos. Esta dimensión es constante.

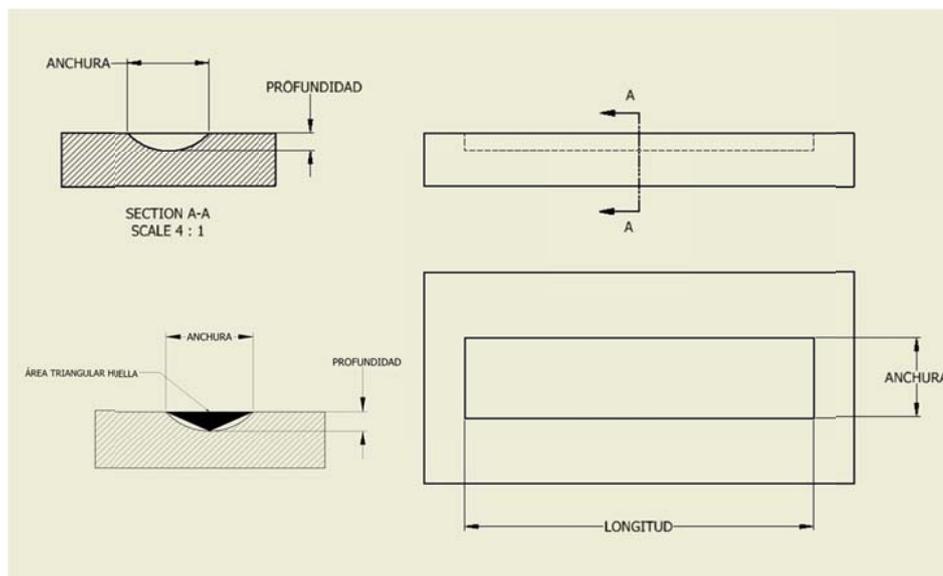


Fig. 3.31 Plano de los parámetros de comparación utilizados en las probetas del ensayo de erosión.

El sistema que se utiliza para evaluar la resistencia al desgaste por erosión de las probetas es la comparación directa entre los parámetros de anchura, área triangular de la huella y volumen erosionado de cada una de las probetas del ensayo. Así, se determina que la resistencia a desgaste por erosión de una probeta será mayor cuanto menor sea la anchura, área triangular de la huella y volumen erosionado de esta.

Capítulo 4.- Resultado de los ensayos

En este apartado se encuentran recogidos todos los resultados, gráficas y parámetros de especial interés, que se obtuvieron de cada uno de los ensayos realizados.

4.1. Ensayo de tracción

A continuación, se muestran las gráficas de tensión-deformación obtenidas de los ensayos de tracción realizados. Desde Fig. 4.1.1 hasta Fig. 4.1.9.

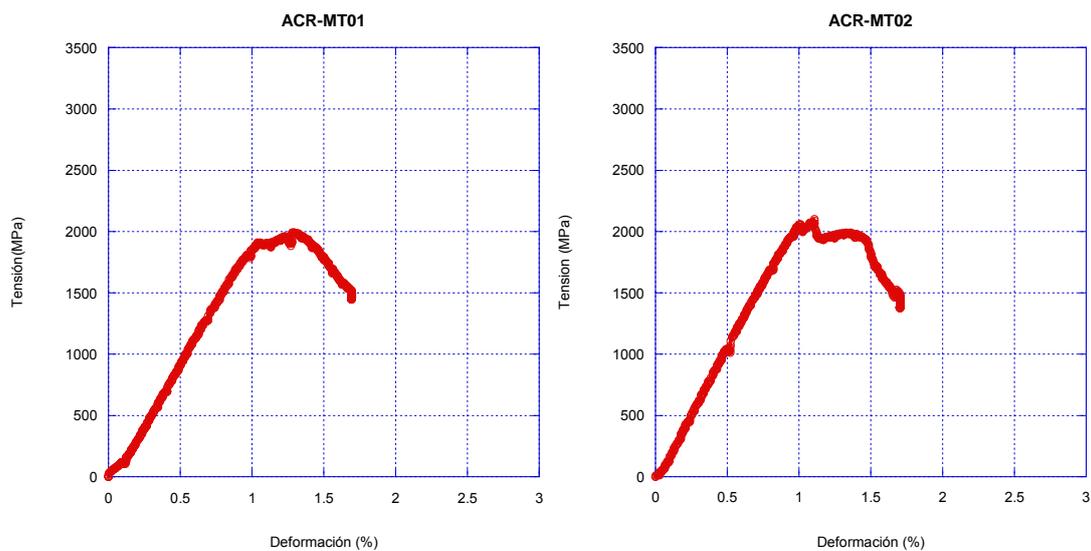


Fig 4.1.1 Ensayo de tracción del espécimen ACR-MT01 (izquierda) y ACR-MT02 (derecha).

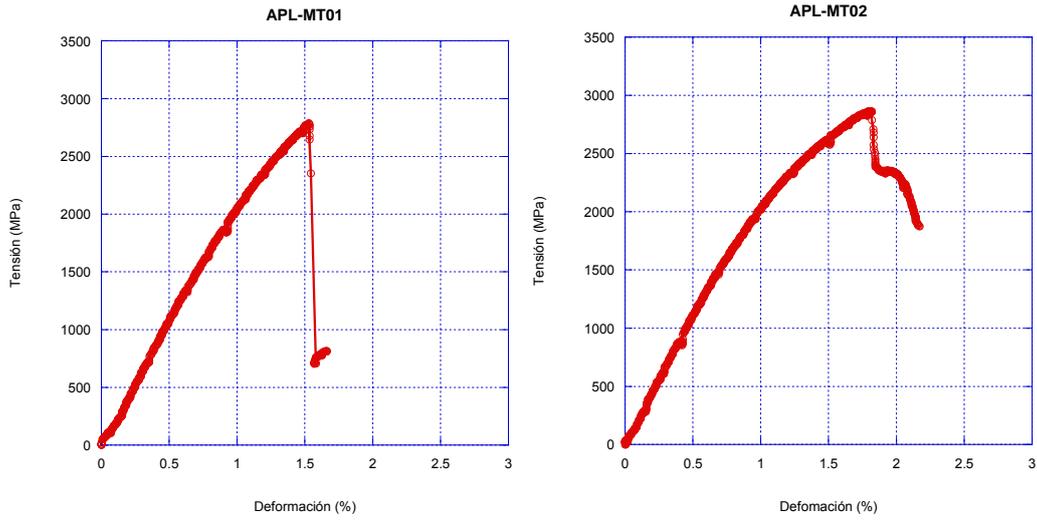


Fig 4.1.2 Ensayo de tracción del espécimen APL-MT01 (izquierda) y APL-MT02 (derecha).

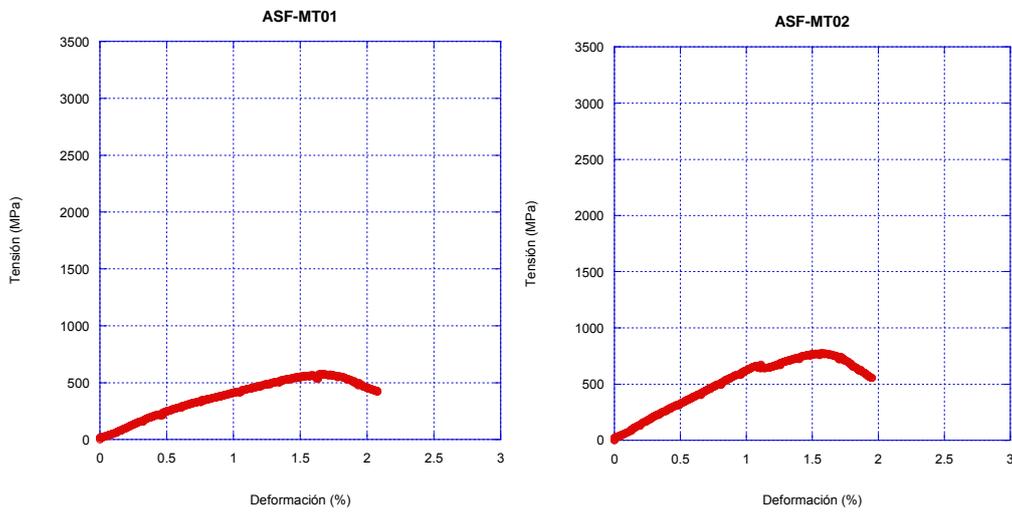


Fig 4.1.3 Ensayo de tracción del espécimen ASF-MT01 (izquierda) y ASF-MT02 (derecha).

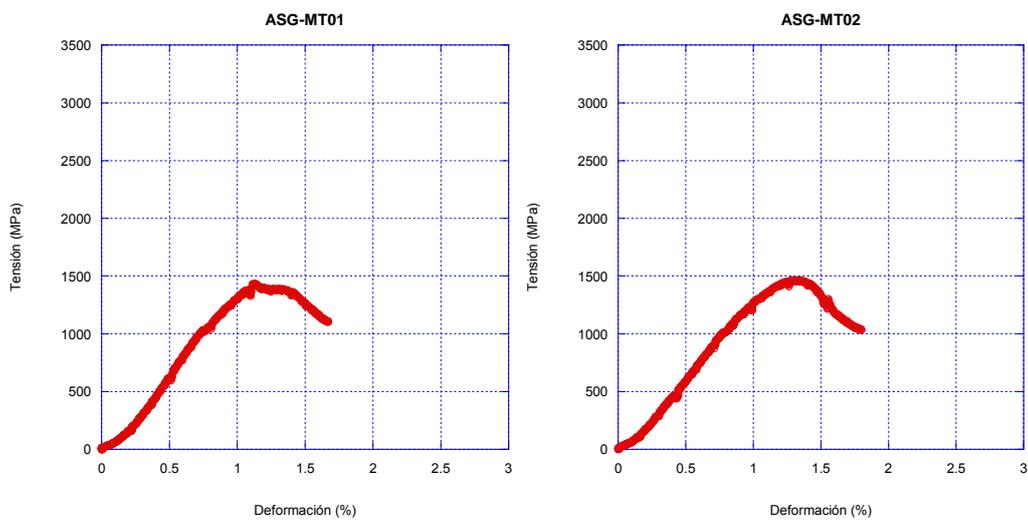


Fig 4.1.4 Ensayo de tracción del espécimen ASG-MT01 (izquierda) y ASG-MT02 (derecha).

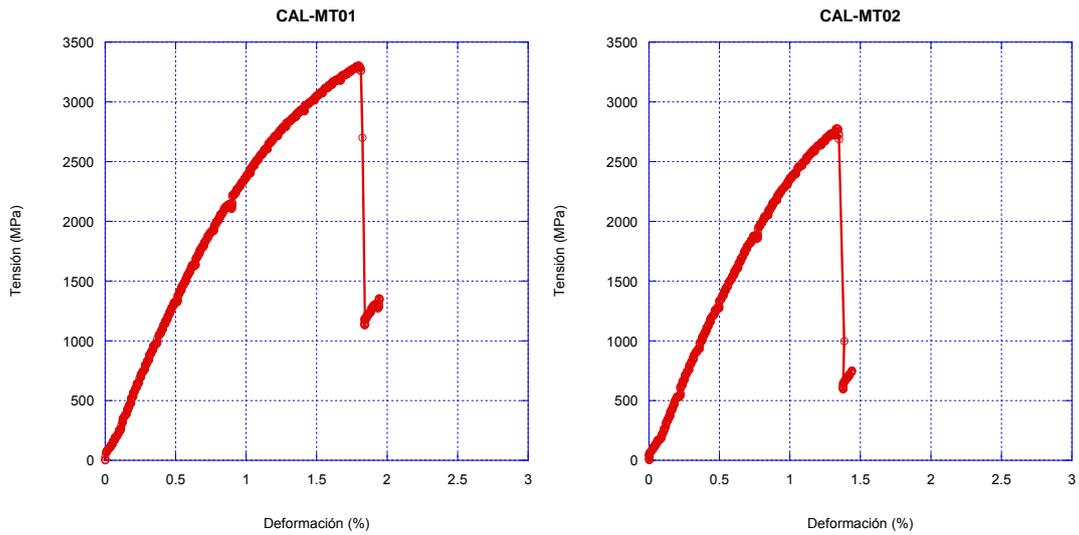


Fig 4.1.5 Ensayo de tracción del espécimen CAL-MT01 (izquierda) y CAL-MT02 (derecha).

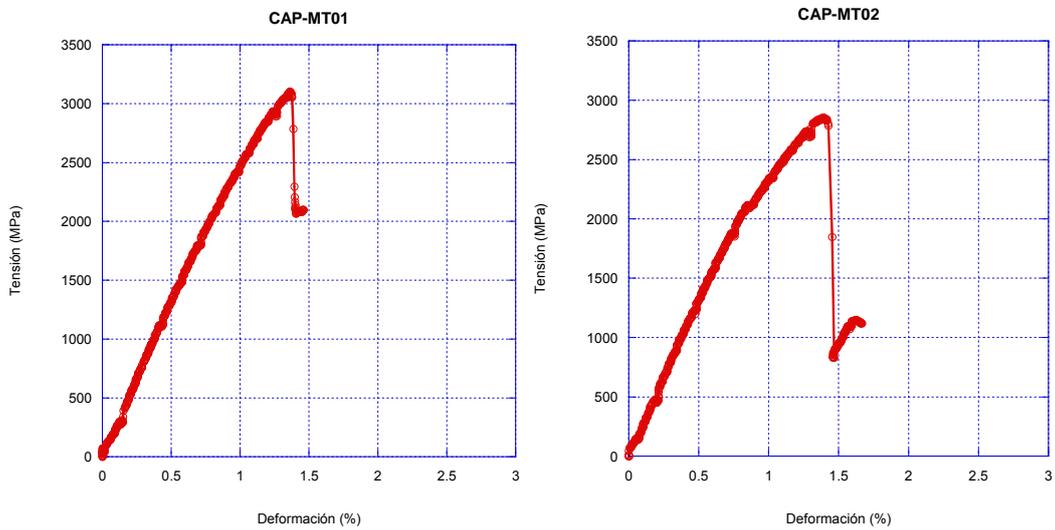


Fig 4.1.6 Ensayo de tracción del espécimen CAP-MT01 (izquierda) y CAP-MT02 (derecha).

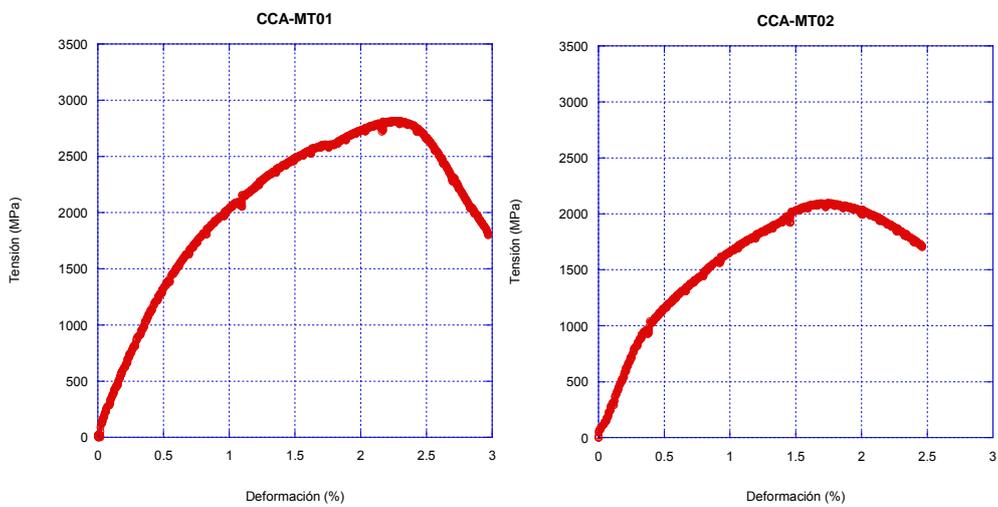


Fig 4.1.7 Ensayo de tracción del espécimen CCA-MT01 (izquierda) y CCA-MT02 (derecha).

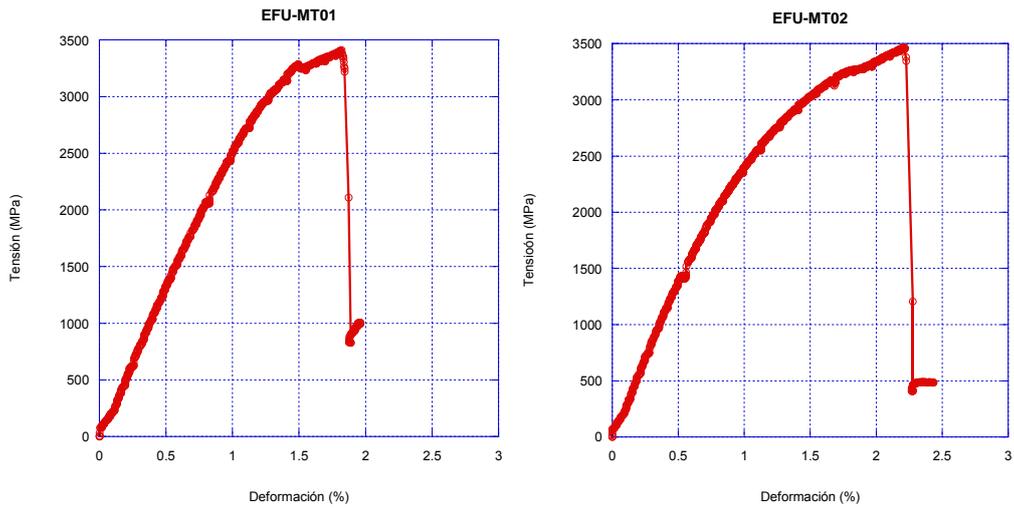


Fig 4.1.8 Ensayo de tracción del espécimen EFU-MT01 (izquierda) y EFU-MT02 (derecha).

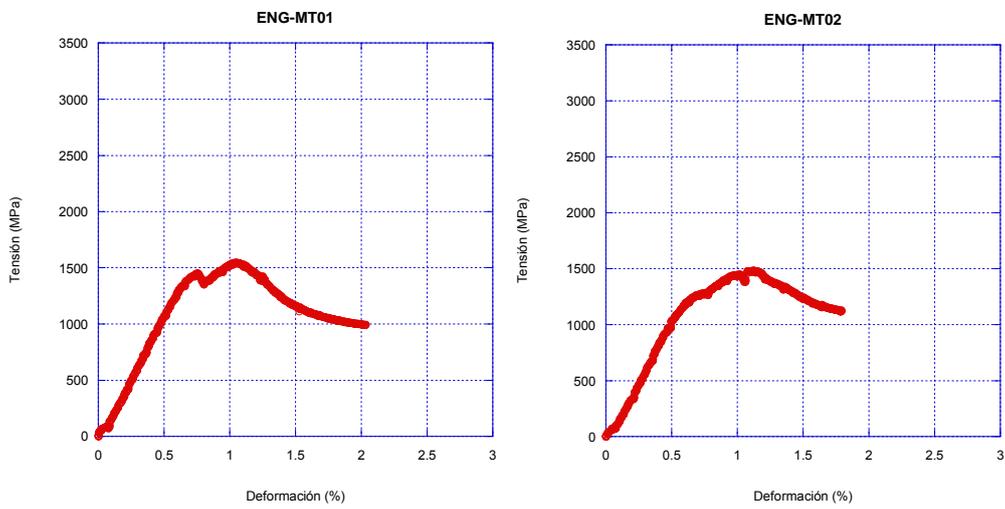


Fig 4.1.9 Ensayo de tracción del espécimen ENG-MT01 (izquierda) y ENG-MT02 (derecha).

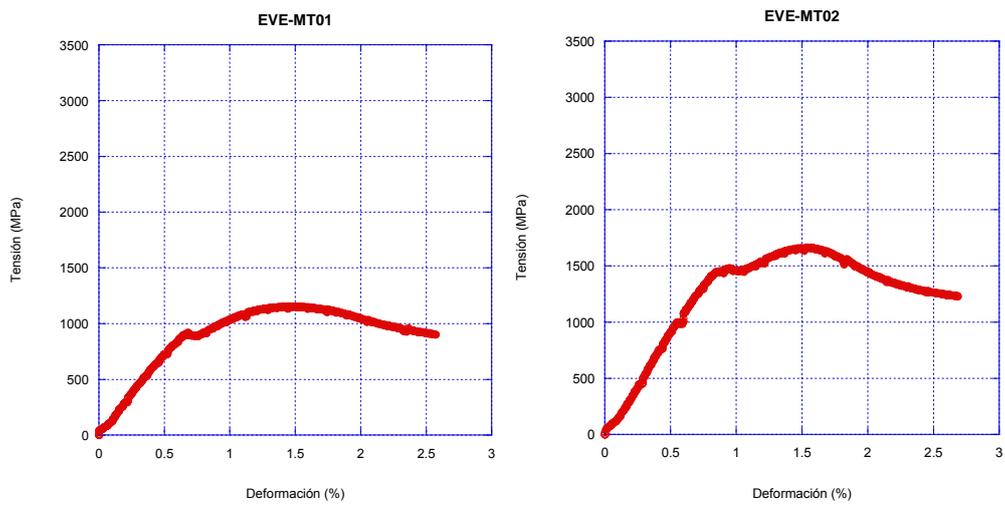


Fig 4.1.10 Ensayo de tracción del espécimen EVE-MT01 (izquierda) y EVE-MT02 (derecha).

De acuerdo a los principios teóricos expuestos en el apartado de metodología, se calculan los valores del Módulo de Elasticidad, E (GPa), y la Resistencia a Tracción (MPa)(Tabla 4.1.1). Además, se presentan valores de la media aritmética y desviación estándar de ambos parámetros (Tabla 4.1.2)

Tabla 4.1.1 Módulo de Elasticidad, E (GPa) y Resistencia a Tracción (MPa).

Probeta	Resistencia a Tracción (MPa)	Deformación (%)	Módulo de Elasticidad, E (GPa)
ACR-MT01	1975	1.31	203.80
ACR-MT02	2086	1.09	217.20
APL-MT01	2790	1.53	196.30
APL-MT02	2868	1.80	202.80
ASF-MT01	578	1.77	32.90
ASF-MT02	778	1.57	60.40
ASG-MT01	1417	1.13	171.60
ASG-MT02	1465	1.30	145.50
CAL-MT01	3296	1.82	229.40
CAL-MT02	2765	1.35	215.50
CAP-MT01	3100	1.38	231.70
CAP-MT02	2839	1.39	251.50
CCA-MT01	2829	2.28	252.40
CCA-MT02	2090	1.73	290.00
EFU-MT01	3403	1.82	256.70
EFU-MT02	3478	2.21	261.70
ENG-MT01	1549	1.06	229.20
ENG-MT02	1489	1.12	228.30
EVE-MT01	1156	1.49	142.10
EVE-MT02	1660	1.53	181.30

Tabla 4.1.2 Media aritmética y desviación estándar de los parámetros de la Tabla 4.1.1.

Probeta	Resistencia a Tracción (MPa)		Módulo de Elasticidad, E (GPa)	
	Media aritmética	Desviación estándar	Media aritmética	Desviación estándar
ACR-MT01	2030.50	78.49	210.50	9.48
ACR-MT02				
APL-MT01	2829.00	55.15	199.55	4.60
APL-MT02				

Probeta	Resistencia a Tracción (MPa)		Módulo de Elasticidad, E (GPa)	
	Media aritmética	Desviación estándar	Media aritmética	Desviación estándar
ASF-MT01	678.00	141.42	46.65	19.45
ASF-MT02				
ASG-MT01	1441.00	33.94	158.55	18.46
ASG-MT02				
CAL-MT01	3030.50	375.47	222.45	9.83
CAL-MT02				
CAP-MT01	2969.50	184.55	241.60	14.00
CAP-MT02				
CCA-MT01	2459.50	522.55	271.20	26.59
CCA-MT02				
EFU-MT01	3440.50	53.03	259.20	3.54
EFU-MT02				
ENG-MT01	1519.00	42.43	228.75	0.64
ENG-MT02				
EVE-MT01	1408.00	356.38	161.70	27.72
EVE-MT02				

4.2. Ensayo de flexión en tres puntos

Tras realizar los ensayos de flexión en tres puntos, se presentan los resultados en forma de gráficas de fuerza-desplazamiento. Desde la Fig. 4.2.1 hasta 4.2.9.

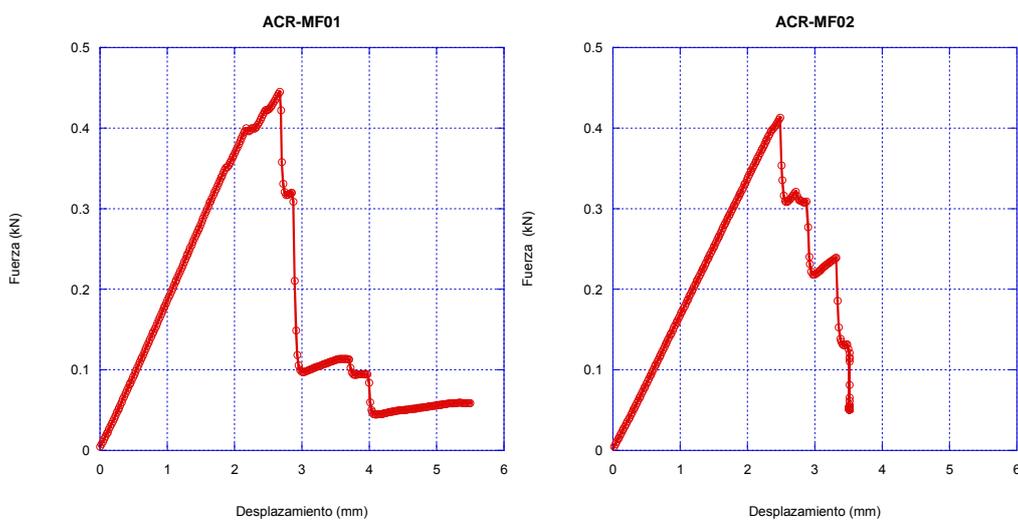


Fig 4.2.1 Ensayo de flexión en tres puntos del espécimen ACR-MF01 (izquierda) y ACR-MF02 (derecha).

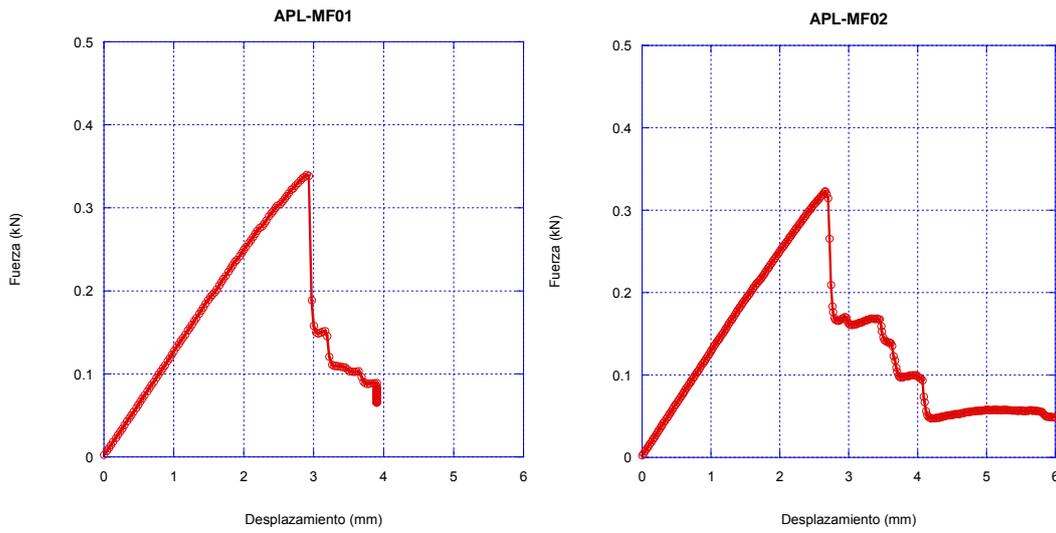


Fig 4.2.2 Ensayo de flexión en tres puntos del espécimen APL-MF01 (izquierda) y APL-MF02 (derecha).

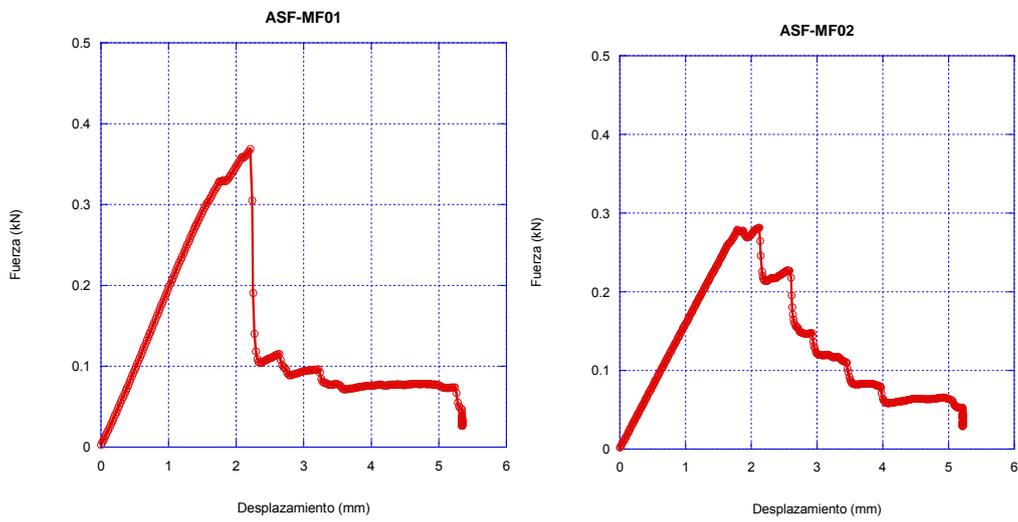


Fig 4.2.3 Ensayo de flexión en tres puntos del espécimen ASF-MF01 (izquierda) y ASF-MF02 (derecha).

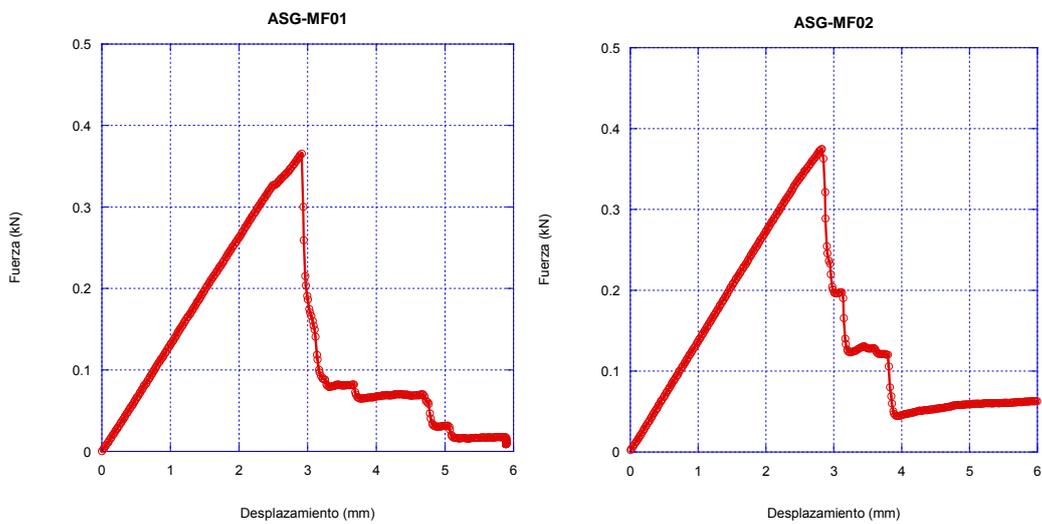


Fig 4.2.4 Ensayo de flexión en tres puntos del espécimen ASG-MF01 (izquierda) y ASG-MF02 (derecha).

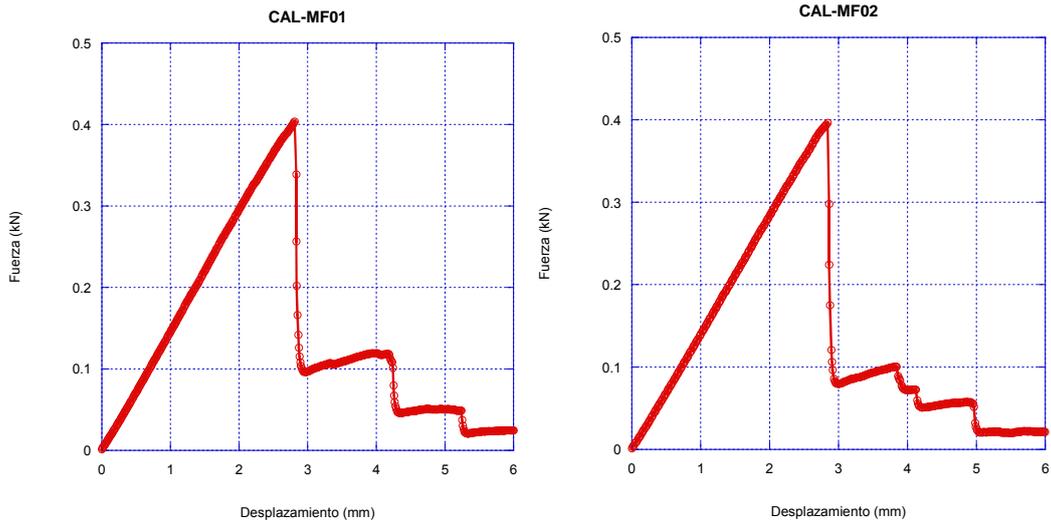


Fig 4.2.5 Ensayo de flexión en tres puntos del espécimen CAL-MF01 (izquierda) y CAL-MF02 (derecha).

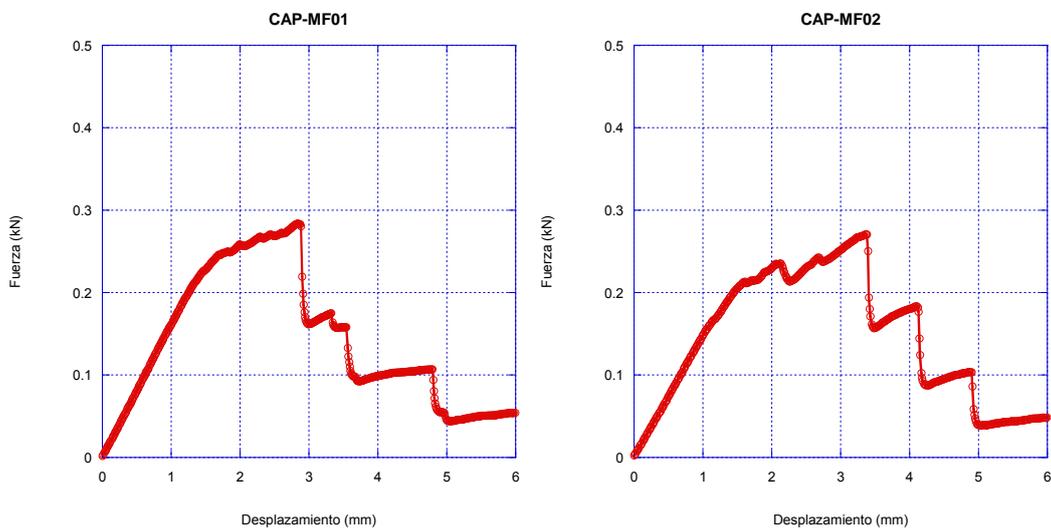


Fig 4.2.6 Ensayo de flexión en tres puntos del espécimen CAP-MF01 (izquierda) y CAP-MF02 (derecha).

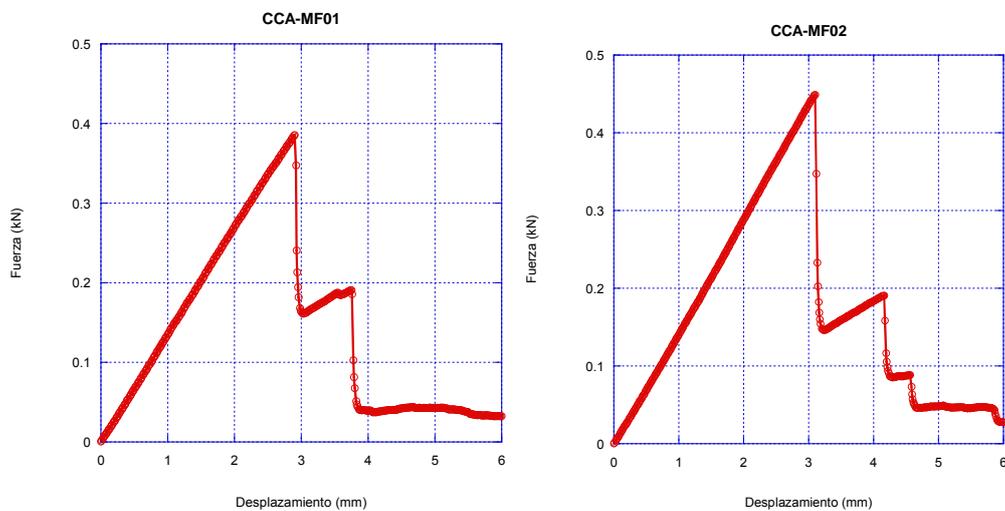


Fig 4.2.7 Ensayo de flexión en tres puntos del espécimen CCA-MF01 (izquierda) y CCA-MF02 (derecha).

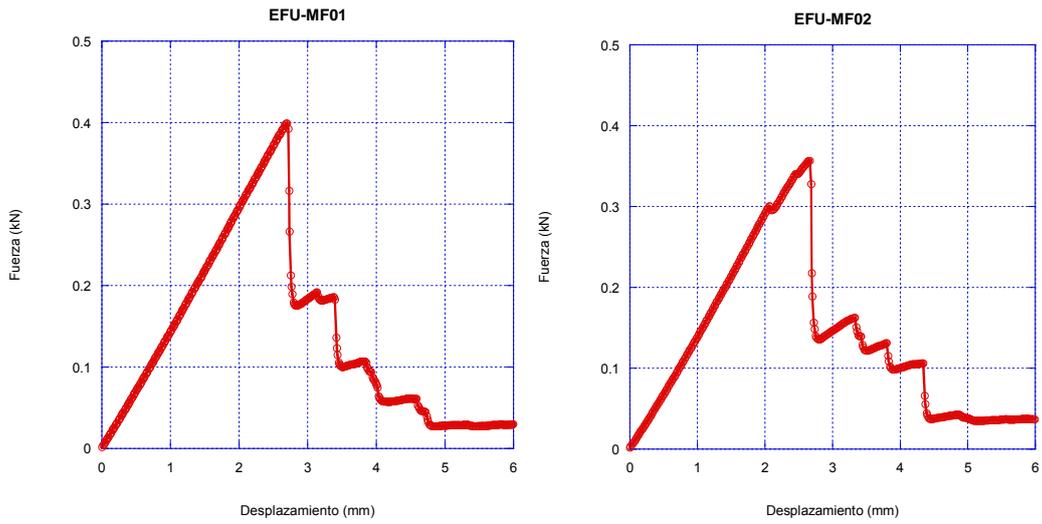


Fig 4.2.8 Ensayo de flexión en tres puntos del espécimen EFU-MF01 (izquierda) y EFU-MF02 (derecha).

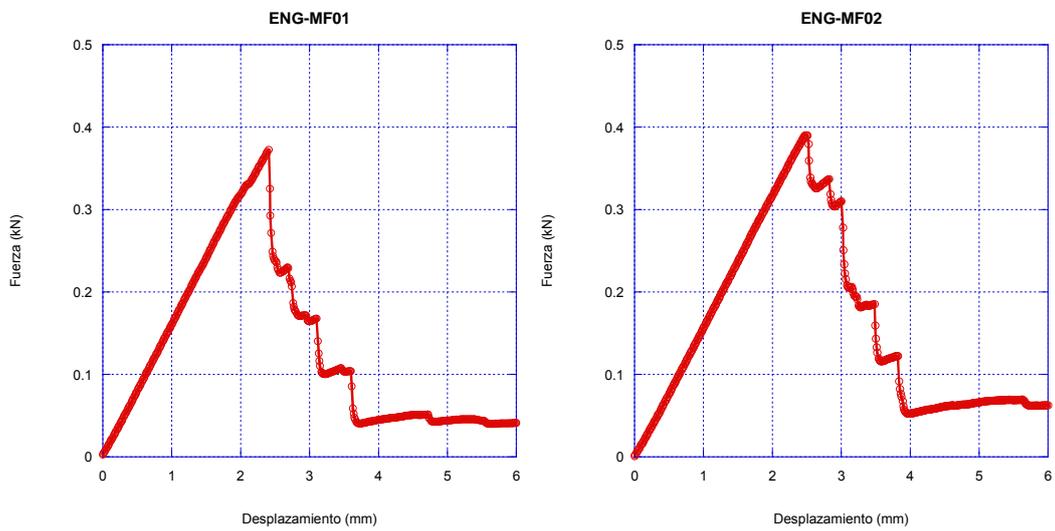


Fig 4.2.9 Ensayo de flexión en tres puntos del espécimen ENG-MF01 (izquierda) y ENG-MF02 (derecha).

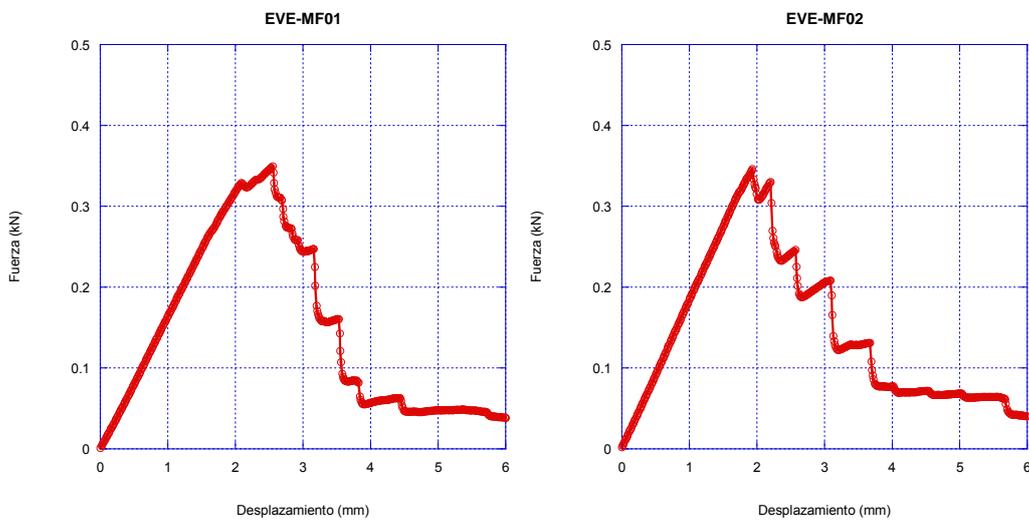


Fig 4.2.10 Ensayo de flexión en tres puntos del espécimen EVE-MF01 (izquierda) y EVE-MF02 (derecha).

De acuerdo a los principios teóricos expuestos en el apartado de metodología y a partir de los datos de fuerza máxima y desplazamiento bajo dicha fuerza máxima, se calculan los valores de Tensión Máxima en Tracción (MPa), y la Deformación asociada a dicha Tensión Máxima (%) (Tabla 4.2.1). Además, se presentan valores de la media aritmética y desviación estándar de ambos parámetros (Tabla 4.2.2).

Tabla 4.2.1 Tensión Máxima en Tracción (MPa) y Deformación bajo Tensión Máxima (%).

Probeta	Fuerza Máxima (kN)	Flecha bajo carga máxima (mm)	Tensión máxima en tracción (MPa)	Deformación bajo Tensión Máxima (%)
ACR-MF01	0.45	2.65	378.64	4.06
ACR-MF02	0.42	2.48	359.60	3.77
APL-MF01	0.34	2.98	334.27	4.27
APL-MF02	0.33	2.67	304.63	3.84
ASF-MF01	0.37	2.22	254.41	3.83
ASF-MF02	0.28	2.10	227.13	3.39
ASG-MF01	0.37	2.92	313.54	4.44
ASG-MF02	0.38	2.85	336.92	4.28
CAL-MF01	0.40	2.80	492.92	3.57
CAL-MF02	0.40	2.85	498.34	3.67
CAP-MF01	0.28	2.88	281.11	4.15
CAP-MF02	0.27	3.38	308.82	4.64
CCA-MF01	0.39	2.90	484.87	3.77
CCA-MF02	0.45	3.10	547.72	3.91
EFU-MF01	0.40	2.68	468.31	3.56
EFU-MF02	0.36	2.63	406.17	3.45
ENG-MF01	0.37	2.42	307.89	3.87
ENG-MF02	0.39	2.48	310.37	3.95
EVE-MF01	0.35	2.58	269.84	4.33
EVE-MF02	0.35	1.93	243.67	3.29

Tabla 4.2.2 Media aritmética y desviación estándar de los parámetros de la Tabla 4.2.1.

Probeta	Tensión máxima en tracción (MPa)		Deformación bajo Tensión Máxima (%)	
	Media aritmética	Desviación estándar	Media aritmética	Desviación estándar
ACR-MF01	369.12	13.46	3.92	0.21
ACR-MF02				

Probeta	Tensión máxima en tracción (MPa)		Deformación bajo Tensión Máxima (%)	
	Media aritmética	Desviación estándar	Media aritmética	Desviación estándar
APL-MF01	319.45	20.96	4.06	0.30
APL-MF02				
ASF-MF01	240.77	19.28	3.61	0.31
ASF-MF02				
ASG-MF01	325.23	16.53	4.36	0.12
ASG-MF02				
CAL-MF01	495.63	3.83	3.62	0.07
CAL-MF02				
CAP-MF01	294.96	19.59	4.39	0.35
CAP-MF02				
CCA-MF01	516.30	44.44	3.84	0.10
CCA-MF02				
EFU-MF01	437.24	43.94	3.50	0.07
EFU-MF02				
ENG-MF01	309.13	1.75	3.91	0.06
ENG-MF02				
EVE-MF01	256.76	18.50	3.81	0.74
EVE-MF02				

4.3. Ensayo de impacto Charpy

A partir los ensayos de impacto Charpy realizados y de acuerdo a los principios teóricos expuestos en el apartado de metodología, se presentan, a continuación, los resultados obtenidos en forma de gráficas de fuerza-flexión y energía-flexión, desde la Fig. 4.3.1 hasta la Fig. 4.3.10. Se remarca el hecho de que todas las probetas tuvieron un tipo de rotura completa.

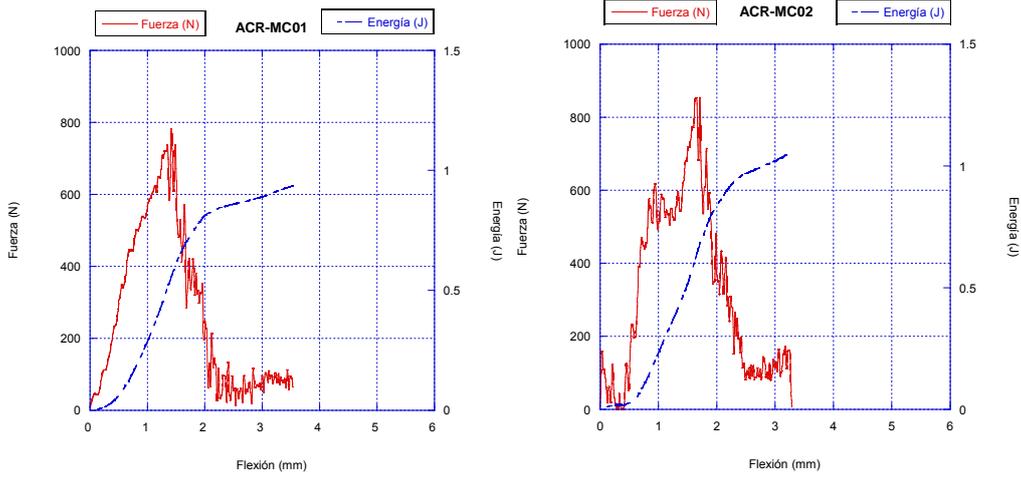


Fig 4.3.1 Ensayo de impacto Charpy del espécimen ACR-MC01 (izquierda) y ACR-MC02 (derecha).

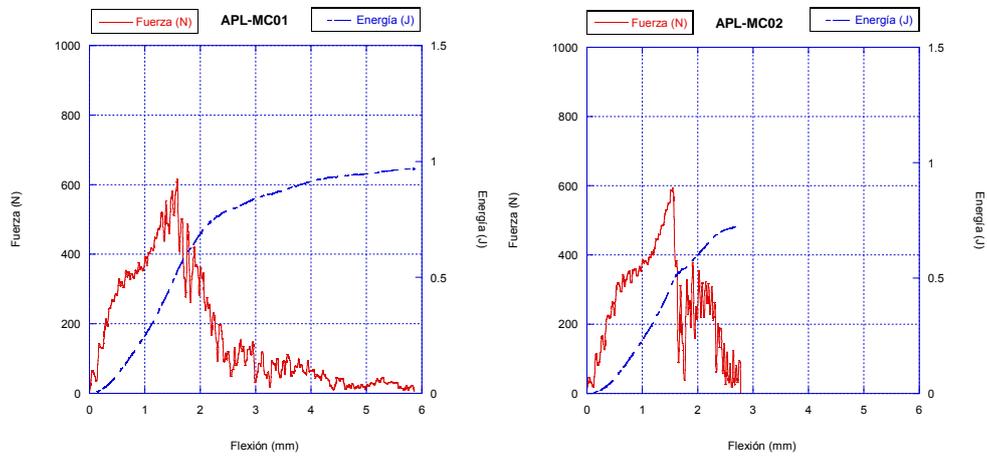


Fig 4.3.2 Ensayo de impacto Charpy del espécimen APL-MC01 (izquierda) y APL-MC02 (derecha).

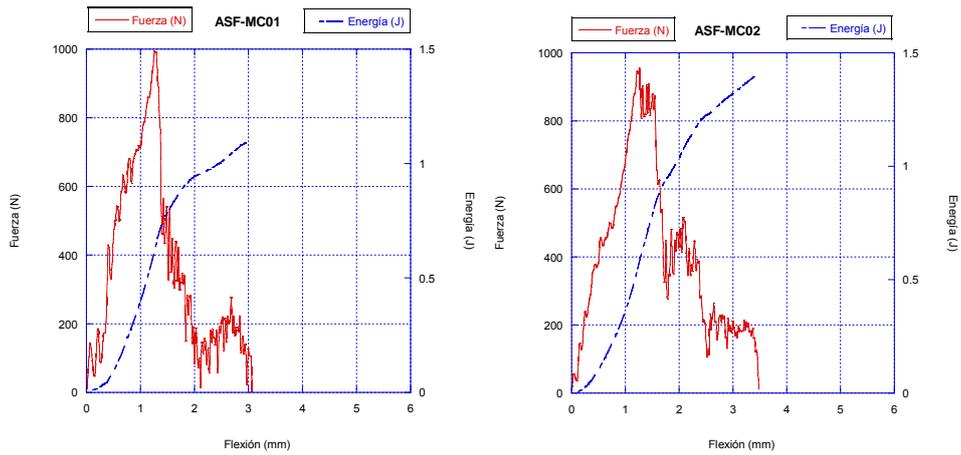


Fig 4.3.3 Ensayo de impacto Charpy del espécimen ASF-MC01 (izquierda) y ASF-MC02 (derecha).

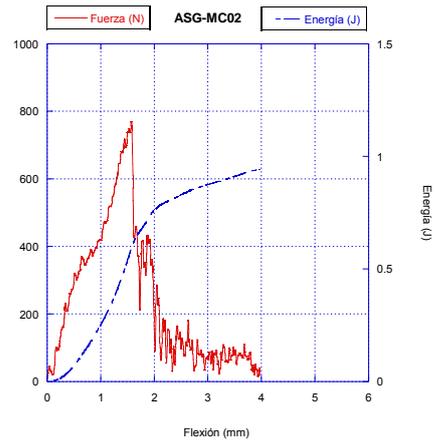
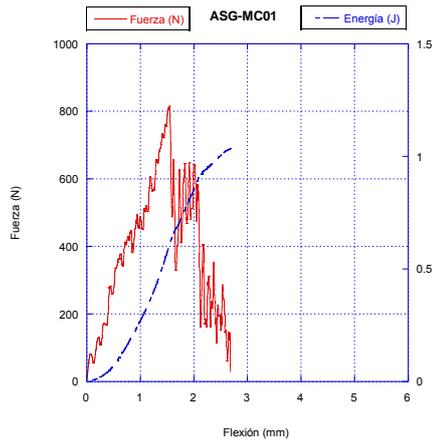


Fig 4.3.4 Ensayo de impacto Charpy del espécimen ASG-MC01 (izquierda) y ASG-MC02 (derecha).

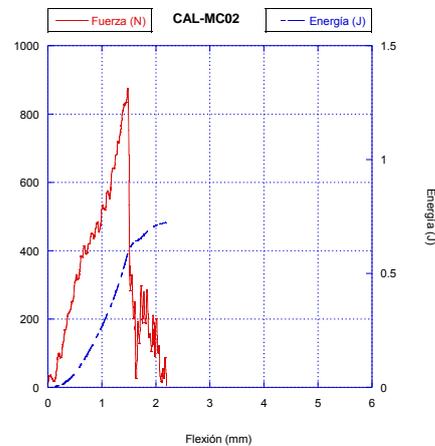
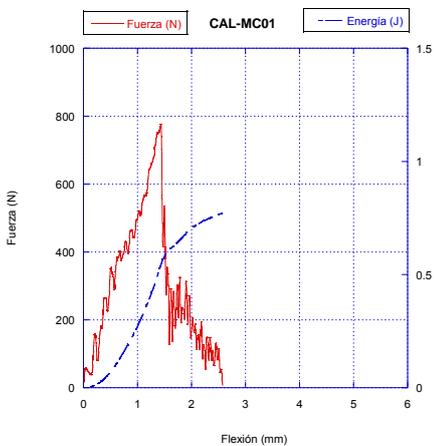


Fig 4.3.5 Ensayo de impacto Charpy del espécimen CAL-MC01 (izquierda) y CAL-MC02 (derecha).

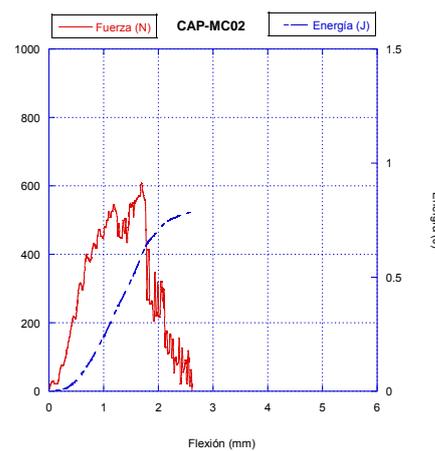
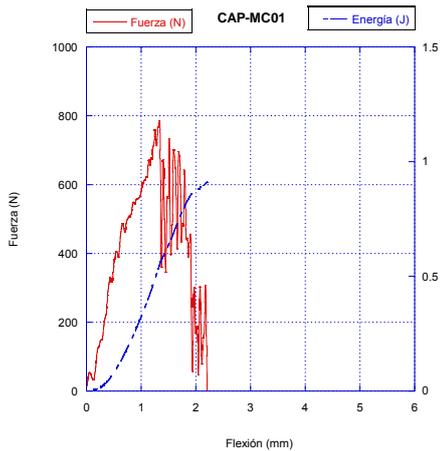


Fig 4.3.6 Ensayo de impacto Charpy del espécimen CAP-MC01 (izquierda) y CAP-MC02 (derecha).

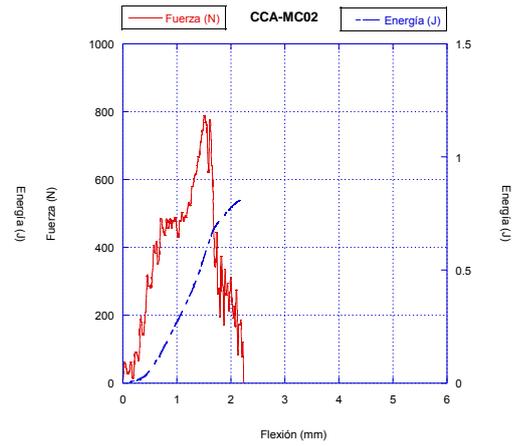
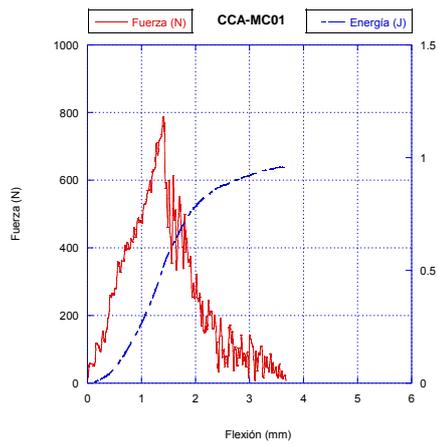


Fig 4.3.7 Ensayo de impacto Charpy del espécimen CCA-MC01 (izquierda) y CCA-MC02 (derecha).

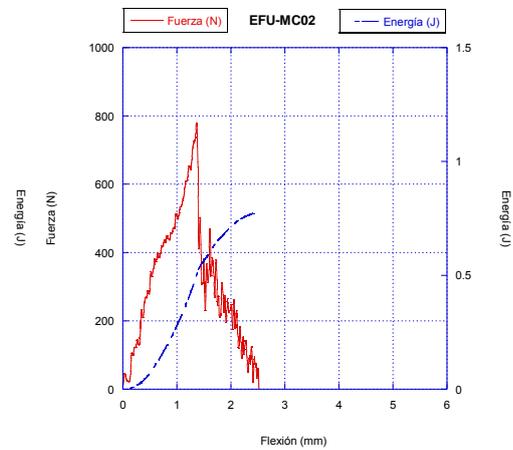
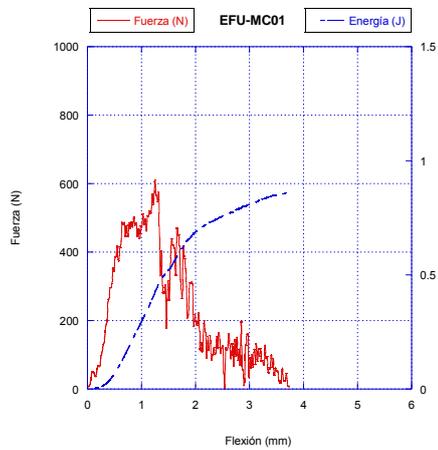


Fig 4.3.8 Ensayo de impacto Charpy del espécimen EFU-MC01 (izquierda) y EFU-MC02 (derecha).

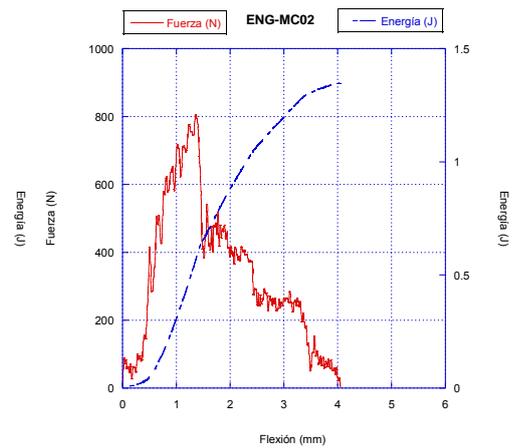
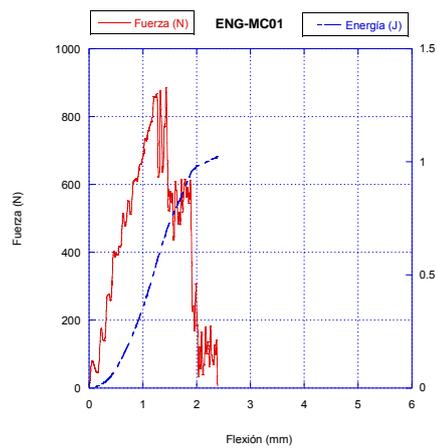


Fig 4.3.9 Ensayo de impacto Charpy del espécimen ENG-MC01 (izquierda) y ENG-MC02 (derecha).

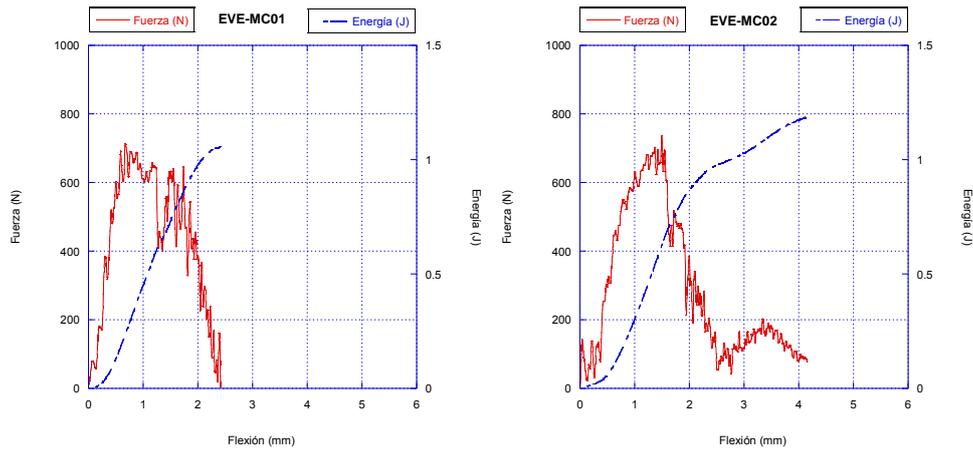


Fig 4.3.10 Ensayo de impacto Charpy del espécimen EVE-MC01 (izquierda) y EVE-MC02 (derecha).

En la tabla 4.3.1 se reflejan los valores de Fuerza Máxima (N), Energía Absorbida hasta Rotura (J), y la Resistencia al Impacto Charpy (kJ/m^2) (Tabla 4.3.1). Además, se presentan valores de la media aritmética y desviación estándar de estos parámetros (Tabla 4.3.2)

Tabla 4.3.1 Fuerza Máxima (N), Energía Absorbida hasta Rotura (J) y Resistencia al Impacto Charpy (kJ/m^2).

Probeta	Sección Resistente (mm^2)	Fuerza Máxima (N)	Energía Absorbida hasta Rotura (J)	Resistencia al Impacto Charpy (kJ/m^2)
ACR-MC01	22.54	782.22	0.89	39.50
ACR-MC02	22.79	850.00	1.12	49.15
APL-MC01	20.60	612.50	0.89	43.36
APL-MC02	20.29	588.33	0.77	38.17
ASF-MC01	26.37	994.44	1.11	41.89
ASF-MC02	24.08	955.56	1.36	56.49
ASG-MC01	22.51	813.89	0.94	41.56
ASG-MC02	22.92	768.89	0.94	40.76
CAL-MC01	18.31	775.56	0.79	43.33
CAL-MC02	19.03	875.00	0.72	37.64
CAP-MC01	20.68	786.11	0.94	45.22
CAP-MC02	21.55	608.61	0.87	40.25
CCA-MC01	18.99	786.67	0.91	48.15
CCA-MC02	19.17	791.11	0.85	44.31
EFU-MC01	18.62	611.11	0.83	44.48
EFU-MC02	20.04	780.00	0.80	39.77
ENG-MC01	23.69	883.33	1.08	45.43

Probeta	Sección Resistente (mm ²)	Fuerza Máxima (N)	Energía Absorbida hasta Rotura (J)	Resistencia al Impacto Charpy (kJ/m ²)
ENG-MC02	24.97	805.56	1.18	47.15
EVE-MC01	24.85	713.89	1.10	44.33
EVE-MC02	25.35	738.89	1.25	49.17

Tabla 4.3.2 Media aritmética y desviación estándar de los parámetros de la Tabla 4.3.1.

Probeta	Fuerza en rotura (N)		Energía Absorbida hasta Rotura (J)		Resistencia al Impacto Charpy (kJ/m ²)	
	Media aritmética	Desviación estándar	Media aritmética	Desviación estándar	Media aritmética	Desviación estándar
ACR-MC01	816.11	47.93	1.01	0.16	44.33	6.82
ACR-MC02						
APL-MC01	600.42	17.09	0.83	0.08	40.77	3.67
APL-MC02						
ASF-MC01	975.00	27.49	1.24	0.18	49.19	10.32
ASF-MC02						
ASG-MC01	791.39	31.82	0.94	0.00	41.16	0.57
ASG-MC02						
CAL-MC01	825.28	70.31	0.76	0.05	40.49	4.02
CAL-MC02						
CAP-MC01	697.36	125.51	0.91	0.05	42.74	3.51
CAP-MC02						
CCA-MC01	788.89	3.14	0.88	0.04	46.23	2.72
CCA-MC02						
EFU-MC01	695.56	119.42	0.82	0.02	42.13	3.33
EFU-MC02						
ENG-MC01	844.45	54.99	1.13	0.07	46.29	1.22
ENG-MC02						
EVE-MC01	726.39	17.68	1.18	0.11	46.75	3.42
EVE-MC02						

4.4. Ensayo de abrasión Taber

Los resultados obtenidos de los ensayos de abrasión Taber se presentan, a continuación, divididos conforme a las tres tandas en que se realizaron, cada una de ellas con sus condiciones de trabajo específicas.

4.4.1. Primera tanda

En esta primera tanda se obtuvieron los datos referentes a la pérdida de peso y espesor de la muestra respecto de los 100, 500, 1000 y 2000 ciclos de desgaste, así como sus correspondientes índices indicadores; el IDT (Índice de Desgaste Taber) y el IPE (Índice de Pérdida de Espesor). Los resultados se presentan en las gráficas de las Fig. 4.4.1.1 y Fig. 4.4.1.2, así como en la Tabla 4.4.1.1.

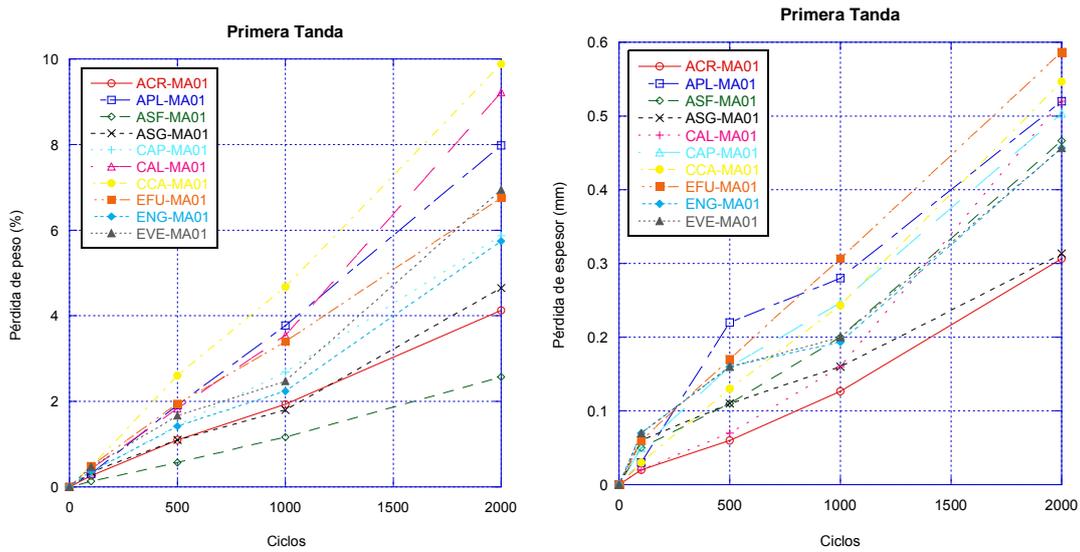


Fig 4.4.1.1 Pérdida de peso (%) frente a ciclos (izquierda). Pérdida de espesor (mm) frente a ciclos (derecha). Probetas del ensayo de abrasión. Primera tanda.

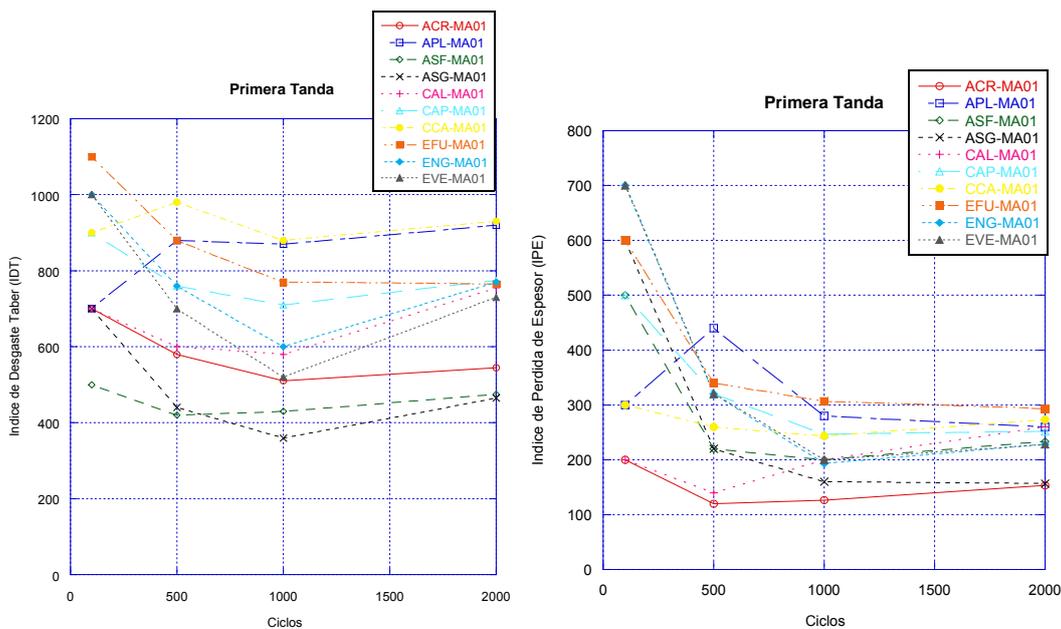


Fig 4.4.1.2 Índice de Desgaste Taber frente a ciclos (izquierda). Índice de Pérdida de Espesor frente a ciclos (derecha). Probetas del ensayo de abrasión. Primera tanda.

Tabla 4.4.1.1 Pérdida de peso, espesor, índice IDT e índice IPE frente a ciclos. Probetas del ensayo de abrasión. Primera tanda.

Muestra	Ciclos	Pérdida de peso Acumulada (%)	Índice de Desgaste Taber	Perdida de espesor acumulada media (mm)	Índice de Pérdida de Espesor
ACR-MA01	100.00	0.26	700.00	0.02	200.00
	500.00	1.10	580.00	0.06	120.00
	1000.00	1.93	510.00	0.13	126.67
	2000.00	4.12	545.00	0.31	153.33
APL-MA01	100.00	0.30	700.00	0.03	300.00
	500.00	1.91	880.00	0.22	440.00
	1000.00	3.77	870.00	0.28	280.00
	2000.00	7.98	920.00	0.52	260.00
ASF-MA01	100.00	0.14	500.00	0.05	500.00
	500.00	0.57	420.00	0.11	220.00
	1000.00	1.16	430.00	0.20	200.00
	2000.00	2.57	475.00	0.47	233.33
ASG-MA01	100.00	0.35	700.00	0.06	600.00
	500.00	1.10	440.00	0.11	220.00
	1000.00	1.80	360.00	0.16	160.00
	2000.00	4.65	465.00	0.31	156.67
CAL-MA01	100.00	0.43	700.00	0.02	200.00
	500.00	1.83	600.00	0.07	140.00
	1000.00	3.54	580.00	0.20	200.00
	2000.00	9.22	755.00	0.52	260.00
CAP-MA01	100.00	0.34	900.00	0.05	500.00
	500.00	1.44	760.00	0.16	320.00
	1000.00	2.69	710.00	0.25	246.67
	2000.00	5.87	775.00	0.50	251.67
CCA-MA01	100.00	0.48	900.00	0.03	300.00
	500.00	2.60	980.00	0.13	260.00
	1000.00	4.68	880.00	0.24	243.33
	2000.00	9.88	930.00	0.55	273.33
EFU-MA01	100.00	0.49	1100.00	0.06	600.00
	500.00	1.94	880.00	0.17	340.00
	1000.00	3.40	770.00	0.31	306.67
	2000.00	6.75	765.00	0.59	293.33

Muestra	Ciclos	Pérdida de peso Acumulada (%)	Índice de Desgaste Taber	Perdida de espesor acumulada media (mm)	Índice de Pérdida de Espesor
ENG-MA01	100.00	0.37	1000.00	0.07	700.00
	500.00	1.42	760.00	0.16	320.00
	1000.00	2.24	600.00	0.19	193.33
	2000.00	5.74	770.00	0.46	228.33
EVE-MA01	100.00	0.48	1000.00	0.07	700.00
	500.00	1.67	700.00	0.16	320.00
	1000.00	2.47	520.00	0.20	200.00
	2000.00	6.95	730.00	0.46	228.33

4.4.2. Segunda tanda

En esta segunda tanda se obtuvieron los datos referentes a la pérdida de peso y espesor de la muestra respecto de los 1000 ciclos de desgaste, así como sus correspondientes índices indicadores; el IDT (Índice de Desgaste Taber) y el IPE (Índice de Pérdida de Espesor). Además, se presenta un gráfico de evolución de temperatura de cada muestra a lo largo de los ensayos. Los resultados se presentan en las gráficas de las Fig. 4.4.2.1 y Fig. 4.4.2.2, así como en la Tabla 4.4.2.1

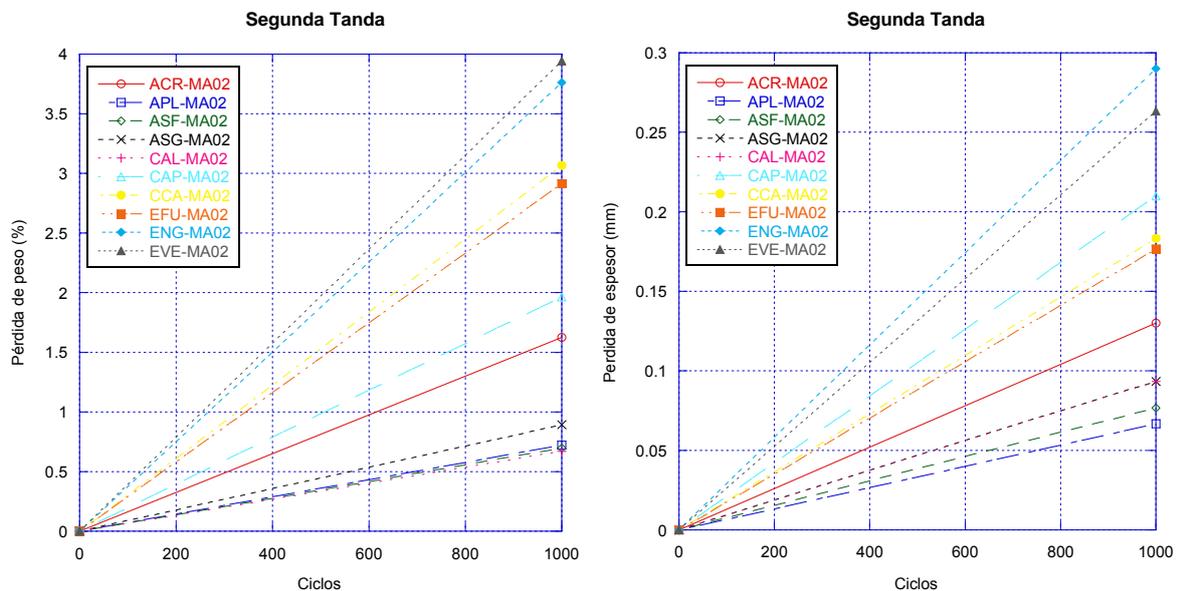


Fig 4.4.2.1 Pérdida de peso (%) frente a ciclos(izquierda). Pérdida de espesor (mm) frente a ciclos (derecha).
Probetas del ensayo de abrasión. Segunda tanda.

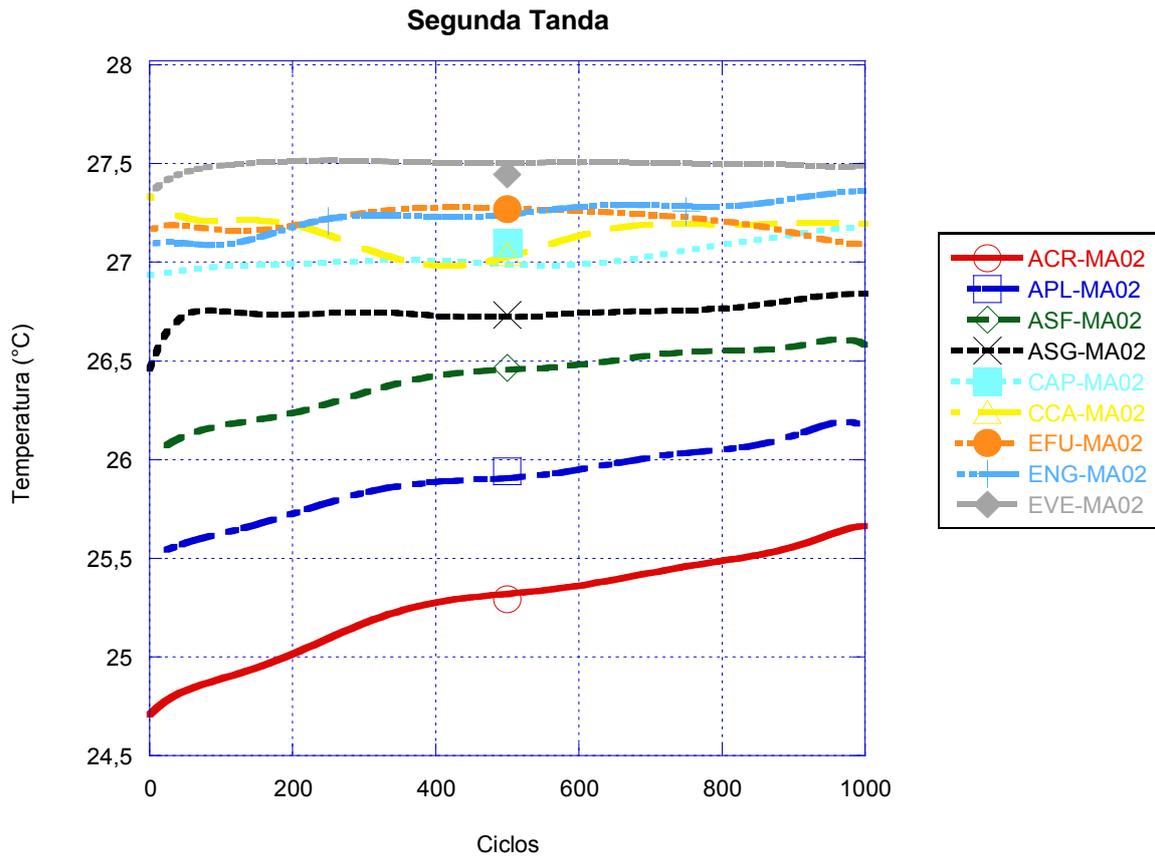


Fig 4.4.2.2 Gráfico de la evolución de la temperatura de las probetas del ensayo de abrasión. Segunda tanda.

Tabla 4.4.2.1 Pérdida de peso, espesor, índice IDT e índice IPE para 1000 ciclos. Probetas del ensayo de abrasión. Segunda tanda.

Muestra	Pérdida de peso Acumulada (%)	Índice de desgaste Taber	Pérdida de espesor acumulada Media (mm)	Índice de Perdida de Espesor
ACR-MA02	1.63	350.00	0.13	130.00
APL-MA02	0.72	160.00	0.07	66.67
ASF-MA02	0.70	180.00	0.08	76.67
ASG-MA02	0.89	170.00	0.09	93.33
CAL-MA02	0.67	110.00	0.09	93.33
CAP-MA02	1.96	510.00	0.21	210.00
CCA-MA02	3.07	640.00	0.18	183.33
EFU-MA02	2.92	600.00	0.18	176.67
ENG-MA02	3.76	870.00	0.29	290.00
EVE-MA02	3.94	810.00	0.26	263.33

4.4.3. Tercera tanda

En esta tercera tanda se obtuvieron los datos referentes a la pérdida de peso y espesor de la muestra respecto de los 1000 ciclos de desgaste, así como sus correspondientes índices indicadores IDT y IPE. En esta tanda, se realizó un aporte de calor externo hasta los 450 ciclos para conocer la influencia de la temperatura en el desgaste de las probetas. La razón de escoger un rango de 450 ciclos fue una limitación en el uso continuado del equipo de aporte de calor externo, ya que, para tiempos más prolongados de exposición, el equipo se recalentaba y perdía eficacia. Además, se presenta un gráfico de evolución de temperatura de cada muestra a lo largo de los ensayos. Los resultados se presentan en las gráficas de las Fig. 4.4.3.1 a Fig. 4.4.3.6, así como en la Tabla 4.4.3.1

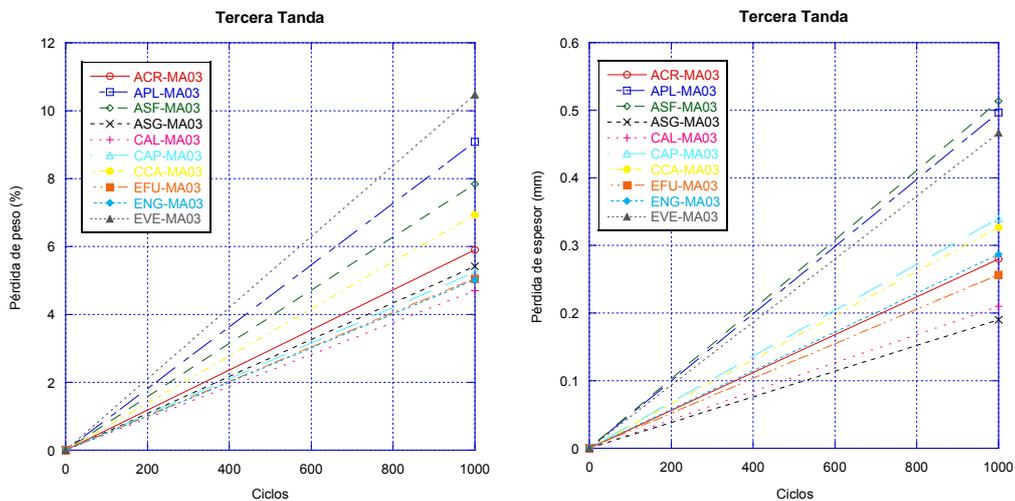


Fig 4.4.3.1 Pérdida de peso (%) frente a ciclos (izquierda). Pérdida de espesor (mm) frente a ciclos (derecha).
Probetas del ensayo de abrasión. Tercera tanda.

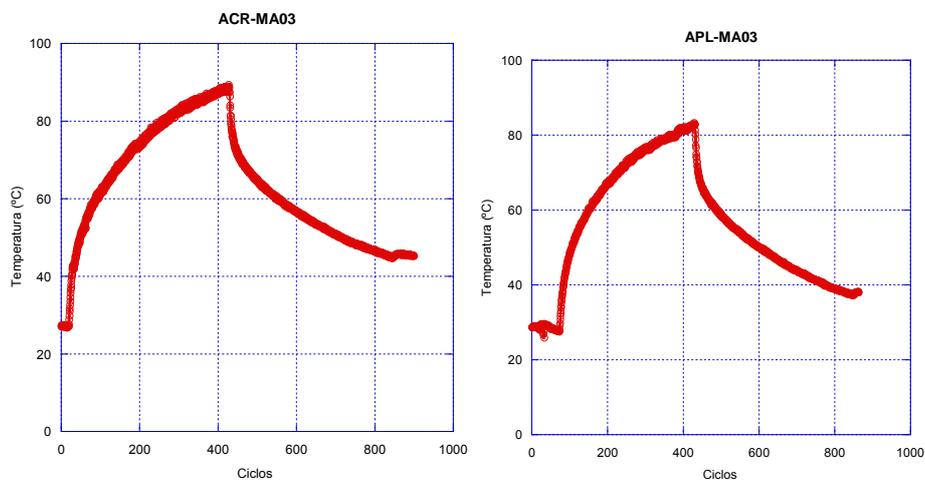


Fig 4.4.3.2 Evolución de la temperatura ACR-MA03 (izquierda) y APL-MA03 (derecha). Ensayo de abrasión.
Tercera tanda.

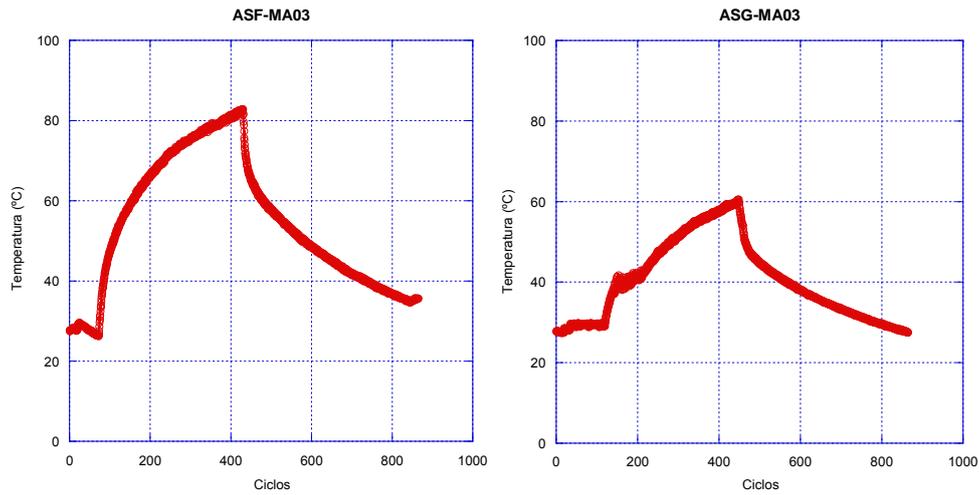


Fig 4.4.3.3 Evolución de la temperatura ASF-MA03 (izquierda) y ASG-MA03 (derecha). Ensayo de abrasión.
Tercera tanda.

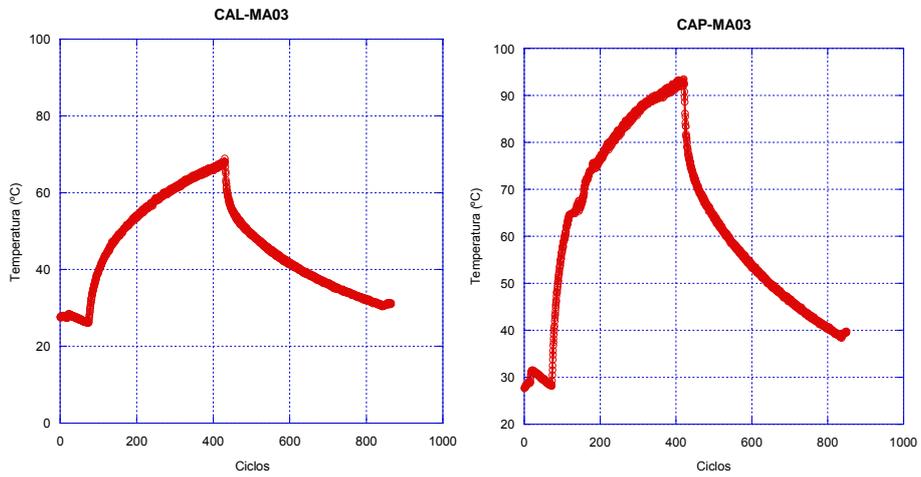


Fig 4.4.3.4 Evolución de la temperatura CAL-MA03 (izquierda) y CAP-MA03 (derecha). Ensayo de abrasión.
Tercera tanda

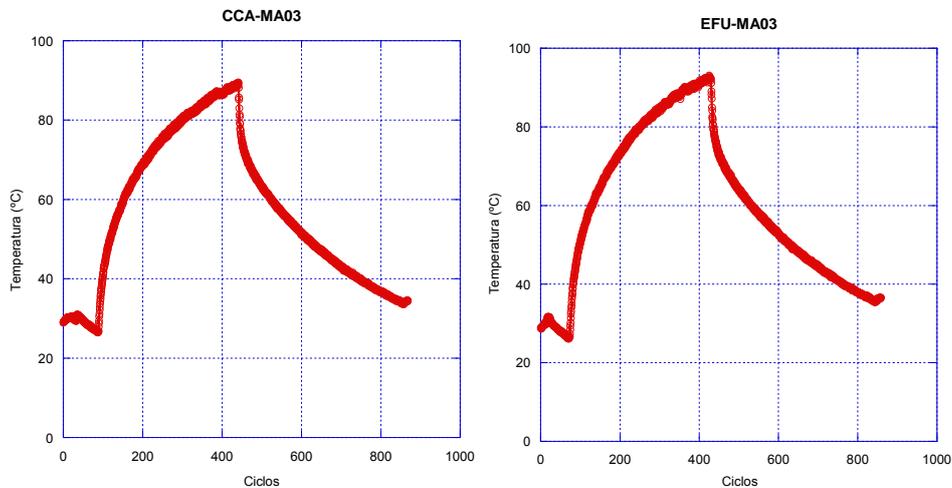


Fig 4.4.3.5 Evolución de la temperatura CCA-MA03 (izquierda) y EFU-MA03 (derecha). Ensayo de abrasión.
Tercera tanda.

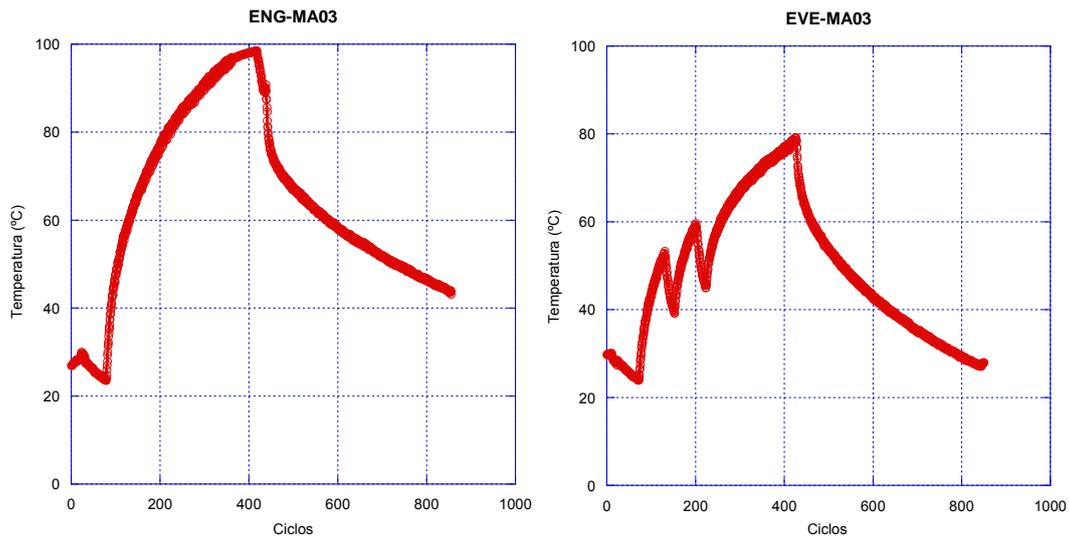


Fig 4.4.3.6 Evolución de la temperatura ENG-MA03 (izquierda) y EVE-MA03 (derecha). Ensayo de abrasión. Tercera tanda.

Tabla 4.4.3.1 Pérdida de peso, espesor, índice IDT e índice IPE para 1000 ciclos. Probetas del ensayo de abrasión. Tercera tanda.

Muestra	Pérdida de peso Acumulada (%)	Índice de Desgaste Taber	Pérdida de espesor acumulada Media (mm)	Índice de Pérdida de Espesor
ACR-MA03	5.90	1270.00	0.28	280.00
APL-MA03	9.08	1970.00	0.50	496.67
ASF-MA03	7.84	2040.00	0.51	513.33
ASG-MA03	5.42	970.00	0.19	190.00
CAL-MA03	4.70	780.00	0.21	210.00
CAP-MA03	5.24	1270.00	0.34	340.00
CCA-MA03	6.94	1310.00	0.33	326.67
EFU-MA03	5.05	1050.00	0.26	256.67
ENG-MA03	5.02	1140.00	0.29	286.67
EVE-MA03	10.48	2120.00	0.47	466.67

4.5. Ensayo de erosión

Tras realizar los ensayos de erosión en las probetas y las correspondientes mediciones con el barrido de láser, se presentan los resultados a través de las gráficas de las Fig. 4.5.1 hasta la Fig. 4.5.10. Estas gráficas representan el perfil de la huella resultante de los ensayos, tanto en anchura como en profundidad.

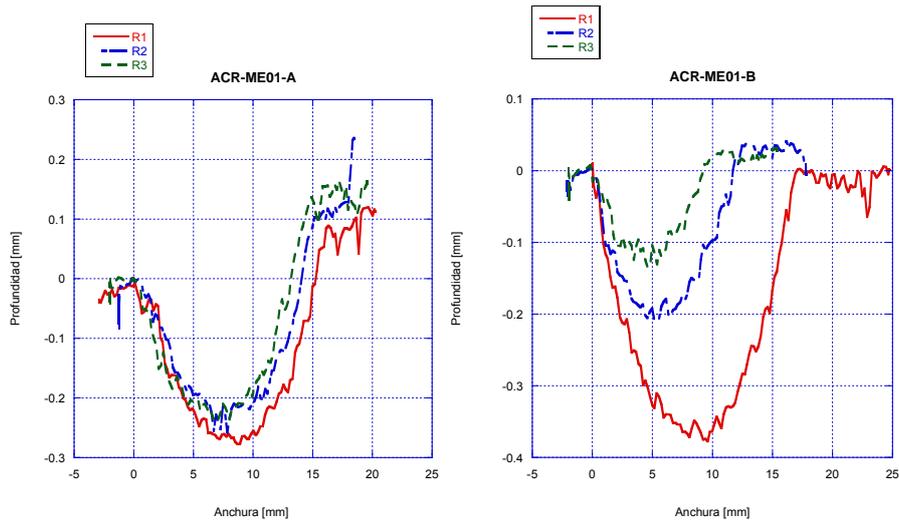


Fig 4.5.1 Perfil de la huella de las probetas ACR-ME01-A y ACR-ME01-B. Ensayo de erosión.

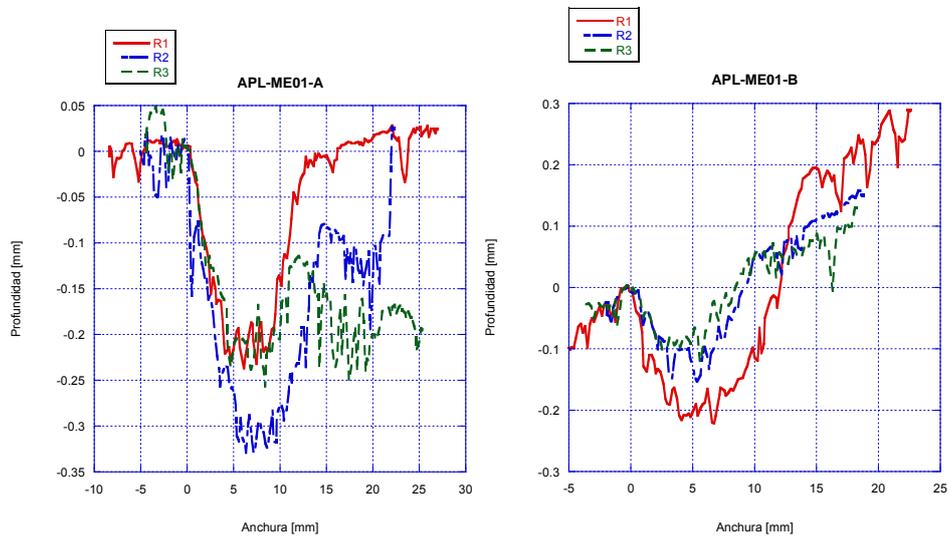


Fig 4.5.2 Perfil de la huella de las probetas APL-ME01-A y APL-ME01-B. Ensayo de erosión.

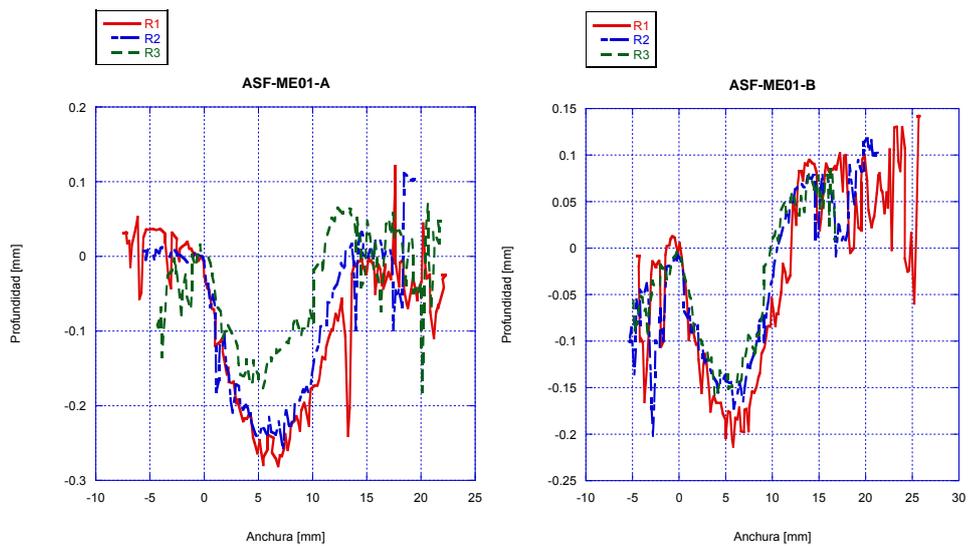


Fig 4.5.3 Perfil de la huella de las probetas ASF-ME01-A y ASF-ME01-B. Ensayo de erosión.

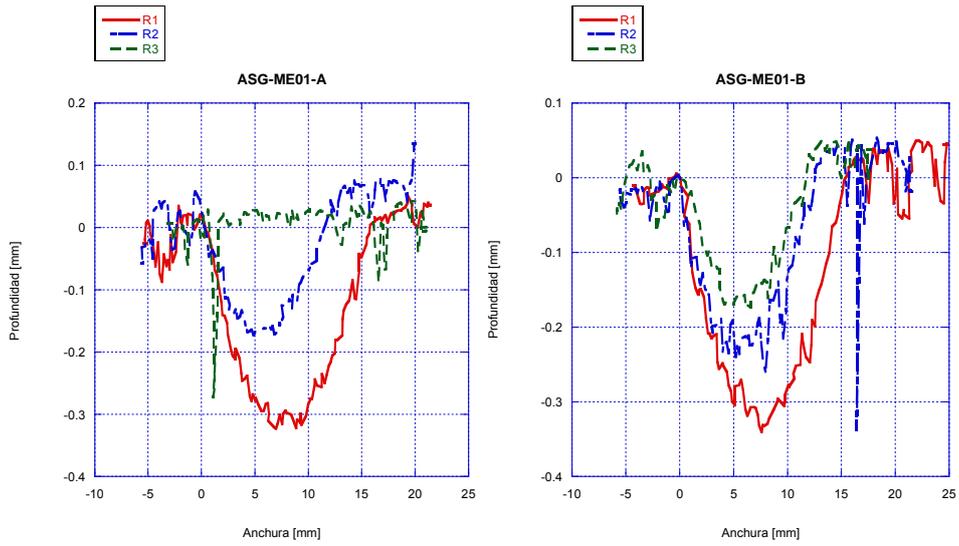


Fig 4.5.4 Perfil de la huella de las probetas ASG-ME01-A y ASG-ME01-B. Ensayo de erosión.

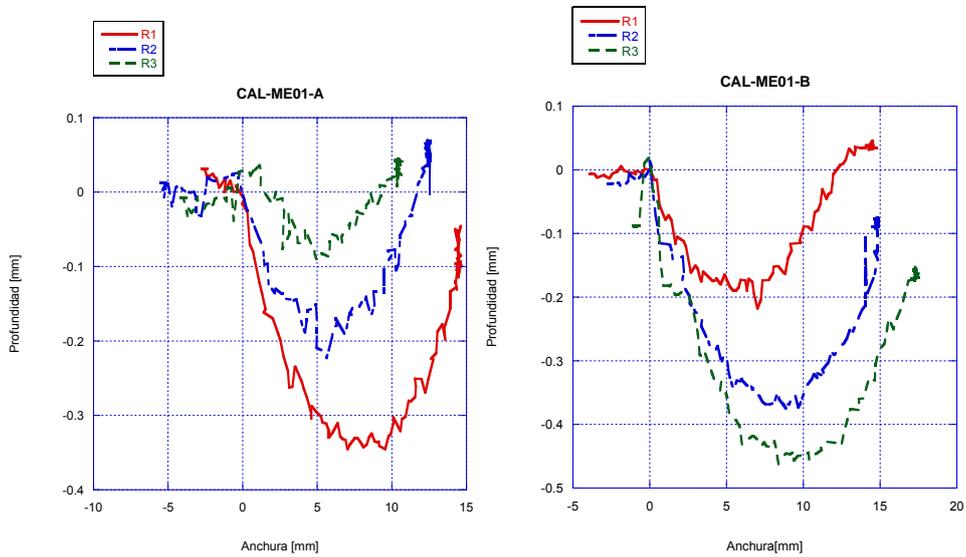


Fig 4.5.5 Perfil de la huella de las probetas CAL-ME01-A y CAL-ME01-B. Ensayo de erosión.

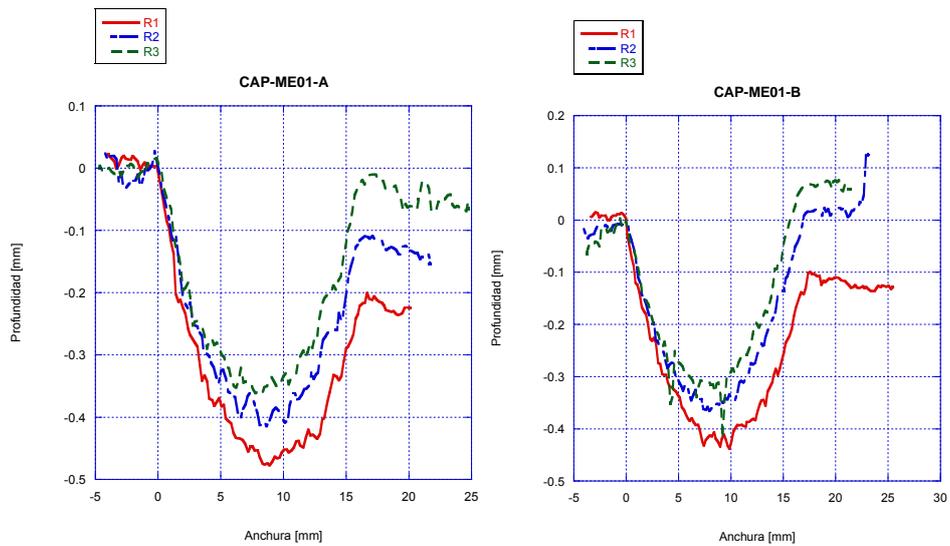


Fig 4.5.6 Perfil de la huella de las probetas CAP-ME01-A y CAP-ME01-B. Ensayo de erosión.

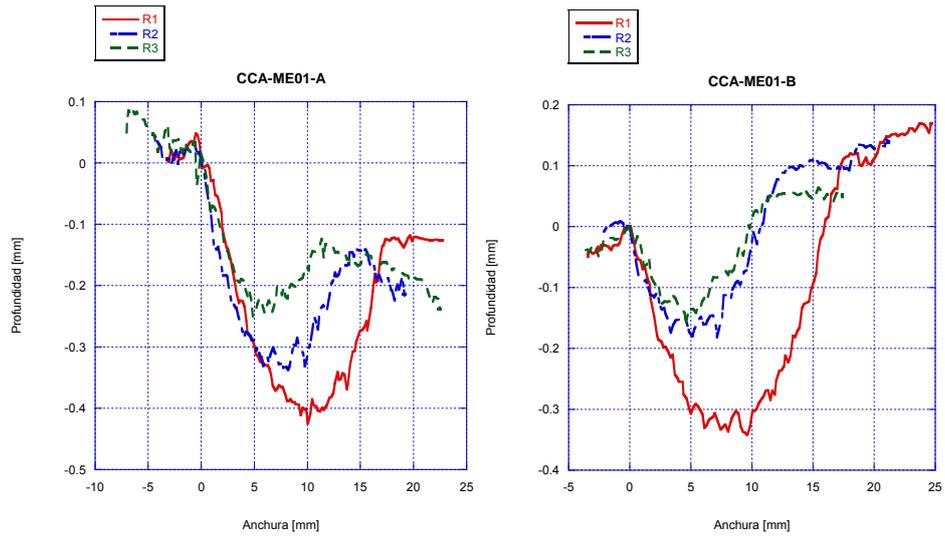


Fig 4.5.7 Perfil de la huella de las probetas CCA-ME01-A y CCA-ME01-B. Ensayo de erosión.

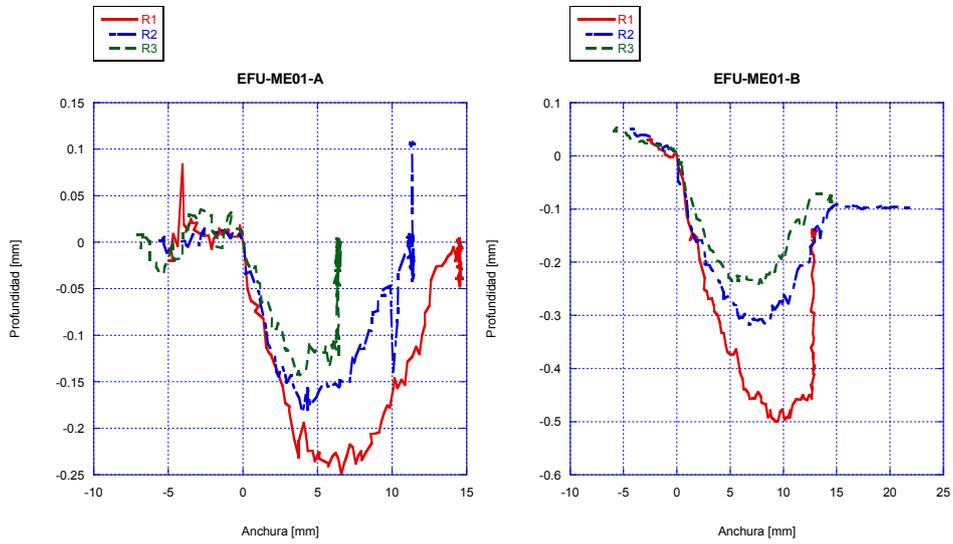


Fig 4.5.8 Perfil de la huella de las probetas EFU-ME01-A y EFU-ME01-B. Ensayo de erosión.

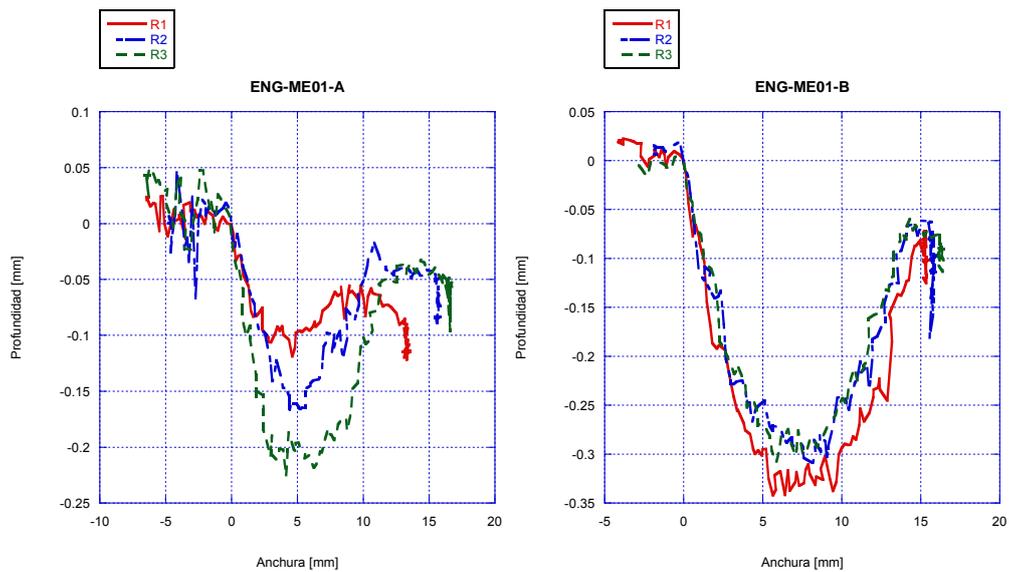


Fig 4.5.9 Perfil de la huella de las probetas ENG-ME01-A y ENG-ME01-B. Ensayo de erosión.

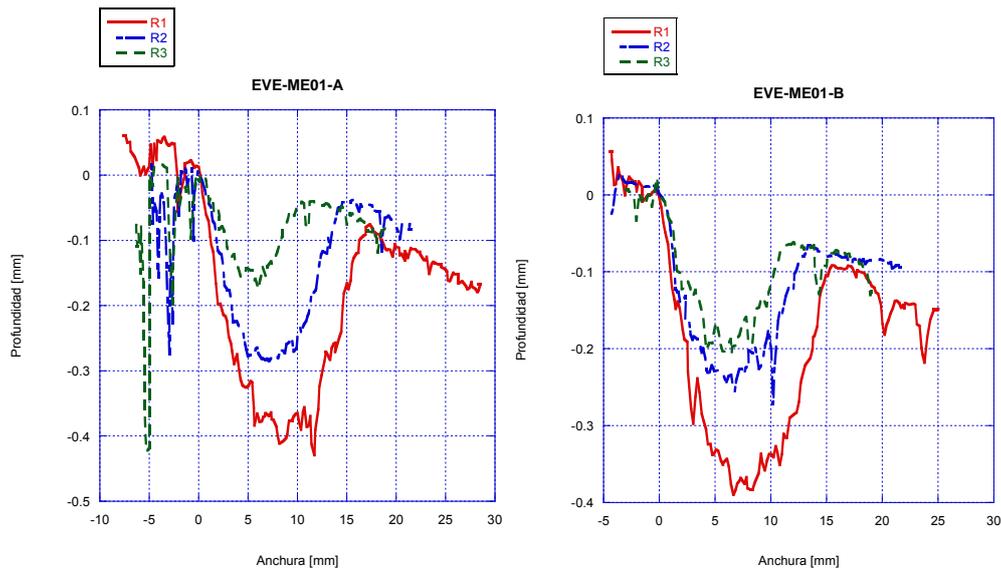


Fig 4.5.10 Perfil de la huella de las probetas EVE-ME01-A y EVE-ME01-B. Ensayo de erosión.

Además de los resultados de profundidad y anchura de la huella, y de acuerdo a lo expuesto en la metodología experimental del ensayo de erosión, se calcula también el área del triángulo de la huella y el volumen erosionado de la probeta. También se calculan la media aritmética y desviación estándar de estos dos últimos parámetros para cada probeta, teniendo en cuenta que cada probeta cuenta con dos caras y, por ende, dos huellas. Estos resultados se encuentran reflejados en las siguientes tablas 4.5.1 y 4.5.2.

Es necesario recordar el hecho de que, al haber tres recorridos, se obtendrán tres anchuras y profundidades de huella para cada cara de probeta. Por ello, para calcular un solo parámetro de área del triángulo de la huella (por claridad de comparación), se utilizará una anchura y profundidad de huella media, obtenida de las tres medidas correspondientes a los tres recorridos.

Tabla 4.5.1 Profundidad y anchura de la huella para los tres recorridos de cada probeta. Ensayo de erosión.

Material	Recorrido 1		Recorrido 2		Recorrido 3		Media aritmética	
	Prof. (mm)	Ancho (mm)	Prof. (mm)	Ancho (mm)	Prof. (mm)	Ancho (mm)	Material	Ancho (mm)
ACR-ME01-A	0.28	16.25	0.24	15.83	0.22	15.00	ACR-ME01	14.58
ACR-ME01-B	0.37	17.33	0.20	12.67	0.12	10.41		
APL-ME01-A	0.21	13.22	0.31	11.66	0.23	14.67	APL-ME01	11.68
APL-ME01-B	0.20	14.83	0.13	11.00	0.08	4.67		
ASF-ME01-A	0.26	14.69	0.23	14.11	0.16	14.30	ASF-ME01	13.74
ASF-ME01-B	0.19	13.76	0.15	13.22	0.14	12.33		
ASG-ME01-A	0.31	16.83	0.16	14.01	0.01	17.72	ASG-ME01	15.44
ASG-ME01-B	0.33	16.42	0.28	14.59	0.16	13.04		

Material	Recorrido 1		Recorrido 2		Recorrido 3		Media aritmética	
	Prof. (mm)	Ancho (mm)	Prof. (mm)	Ancho (mm)	Prof. (mm)	Ancho (mm)	Material	Ancho (mm)
CAL-ME01-A	0.34	14.44	0.20	12.43	0.09	10.42	CAL-ME01	13.70
CAL-ME01-B	0.18	12.94	0.37	14.83	0.45	17.15		
CAP-ME01-A	0.48	16.83	0.41	16.92	0.36	16.75	CAP-ME01	17.00
CAP-ME01-B	0.43	17.46	0.36	17.46	0.32	16.58		
CCA-ME01-A	0.41	17.61	0.32	15.18	0.23	11.68	CCA-ME01	12.98
CCA-ME01-B	0.33	8.25	0.17	13.92	0.14	11.25		
EFU-ME01-A	0.24	13.33	0.17	11.04	0.14	6.39	EFU-ME01	11.79
EFU-ME01-B	0.50	12.83	0.31	14.58	0.23	12.56		
ENG-ME01-A	0.11	9.17	0.16	10.83	0.20	13.00	ENG-ME01	12.83
ENG-ME01-B	0.33	15.00	0.30	14.44	0.30	14.51		
EVE-ME01-A	0.40	17.22	0.28	15.11	0.16	11.44	EVE-ME01	14.03
EVE-ME01-B	0.38	15.42	0.24	13.47	0.20	11.53		

Tabla 4.5.2 Área del triángulo de la huella, volumen erosionado y su media aritmética y desviación estándar.
Ensayo de erosión.

Material	Área del triángulo (mm ²)	Volumen erosionado (mm ³)	Material	Media aritmética		Desviación estándar	
				Área del triángulo (mm ²)	Volumen erosionado (mm ³)	Área del triángulo (mm ²)	Volumen erosionado (mm ³)
ACR-ME01-A	1.94	125.81	ACR-ME01	1.74	113.25	0.27	17.76
ACR-ME01-B	1.55	100.69					
APL-ME01-A	1.65	107.11	APL-ME01	1.17	76.14	0.67	43.81
APL-ME01-B	0.69	45.16					
ASF-ME01-A	1.56	101.17	ASF-ME01	1.30	84.44	0.36	23.66
ASF-ME01-B	1.04	67.71					
ASG-ME01-A	1.29	84.17	ASG-ME01	1.59	103.33	0.42	27.09
ASG-ME01-B	1.88	122.48					
CAL-ME01-A	1.31	84.83	CAL-ME01	1.90	123.52	0.84	54.71
CAL-ME01-B	2.50	162.21					
CAP-ME01-A	3.51	227.95	CAP-ME01	3.34	217.19	0.23	15.22
CAP-ME01-B	3.18	206.43					
CCA-ME01-A	2.37	154.16	CCA-ME01	1.78	115.70	0.84	54.39
CCA-ME01-B	1.19	77.24					
EFU-ME01-A	0.94	61.09	EFU-ME01	1.62	105.60	0.97	62.94
EFU-ME01-B	2.31	150.11					
ENG-ME01-A	0.86	56.01	ENG-ME01	1.57	101.80	1.00	64.76
ENG-ME01-B	2.27	147.60					
EVE-ME01-A	2.04	132.77	EVE-ME01	1.94	126.23	0.14	9.25
EVE-ME01-B	1.84	119.69					

Capítulo 5.- Análisis de los resultados de los ensayos

Antes de realizar el análisis de resultados de los ensayos, se debe destacar uno de los problemas más importantes que sufren actualmente los materiales compuestos con adiciones. Este gran problema es la incapacidad de distribuir de forma uniforme las partículas de adición por todo el material compuesto bajo un método repetitivo, que es lo que se conoce como el problema de la difusión. Por ello, probetas procedentes de una misma plantilla y material, y que debieran presentar las mismas propiedades, en realidad no tienen las mismas propiedades, pues la concentración de partículas de adición varía frecuentemente en las distintas partes de estas mismas plantillas.

En los ensayos, el resultado de este problema es la aparición causal de grandes desviaciones estándar para el conjunto de parámetros medidos para las probetas obtenidas a partir de una misma plantilla y adición. Por ello, cuando se analicen dichas desviaciones estándar en los siguientes ensayos, se considerará un problema de difusión de las partículas de adición de las plantillas.

5.1. Ensayo de tracción

En este ensayo, se van a analizar los parámetros de tensión máxima, módulo elástico, deformación bajo tensión máxima y forma de la curva tensión-deformación de cada adición del estudio.

Antes de comentar el análisis hay que clarificar que la rotura de ambas probetas de arena de sílice fina (ASF), así como de la rotura de la probeta 1 de escoria de fundición verde (EVE-MT01) y la probeta 2 de cemento B (CCA-MT02), se produjo por la zona de la mordaza, por lo que los resultados de estos ensayos resultaron no conformes. La causa de este problema fue la excesiva presión de apriete de las mordazas que fue necesaria utilizar, ya que, de lo contrario, los extremos de las probetas patinaban sobre las mordazas. Para el análisis de resultados se supondrá como nulo el valor de estas probetas citadas, ya que no representan los valores reales.

- *Resistencia a tracción*

En cuanto a la resistencia a tracción, se aprecia que la probeta con la adición de escoria vítrea (EFU) presenta el mayor valor medio con 3440.50 MPa, seguida de las adiciones de

cemento aluminoso (CAL), cemento A (CAP) y arena de playa (APL), con valores un 12%, 15% y 18% menores, respectivamente. Mientras, obviando los valores no conformes de las probetas ASF-MT01, ASF-MT02 y EVE-MT01, se aprecia que las peores adiciones en cuanto a resistencia a tracción son la arena de sílice grueso (ASG) y la escoria negra (ENG), con valores sobre 1500 MPa. La diferencia máxima entre adiciones es de un 239%, por lo que es un parámetro muy vinculado a este aspecto.

- *Módulo de elasticidad*

Los módulos de elasticidad difieren parcialmente respecto de la línea trazada por las resistencias a tracción. La probeta de escoria vítrea (EFU) presenta, al igual que en resistencia a tracción, el mayor valor de módulo elástico con 259.2 GPa, seguida de cerca por la probeta de cemento B (CCA) con 252.4 GPa, teniendo en cuenta la nulidad de la probeta CCA-MT02. Mientras, las probetas que peor se comportan son las de adición de arena de sílice de grano grueso (ASG) con 158.55 GPa, la adición de fundición verde (EVE) con 181.3 GPa y la adición de arena de playa (APL) con 199.55 GPa. Por su parte, las demás adiciones se mantienen en el rango entre 210 y 240 GPa.

- *Deformación*

En lo que respecta a las deformaciones de las probetas, se ha de destacar que las mayores deformaciones se producen con la probeta de cemento B (CCA-MT01) y con las probetas de escoria vítrea (EFU) con unos valores medios de 2.28% y 2.02% sobre la longitud inicial. Por su parte, los valores medios más bajos de deformación los presentan las adiciones de escoria negra (ENG) con 1.09%, arena de corindón (ACR) con 1.2% y la arena de sílice de grano grueso (ASG) con 1.22%.

- *Linealidad de la curva y rango elástico*

Finalmente, se analiza la linealidad y rango elástico de la curva tensión-deformación de cada tipo de adición. La probeta con adición de arena de corindón puede verse como aquella con la curva más lineal, es decir, aquella que presenta un comportamiento más elástico hasta su deformación bajo tensión máxima (la zona elástica se extiende prácticamente hasta la tensión máxima). Por su parte, la adición de cemento B (CCA) tiene un comportamiento muy poco lineal, donde su comportamiento elástico termina con una deformación mucho menor que la correspondiente a su tensión máxima (0.4-0.5% de deformación máxima en zona elástico-lineal frente a 1.8-2.2% de deformación bajo tensión máxima). Las demás adiciones presentan un comportamiento bastante lineal hasta tensión máxima, con zonas curvas no lineales en las proximidades de dicha tensión máxima. Se

destaca que en las adiciones de escoria negra (ENG) y escoria verde (EVE), existe una especie de escalón de cedencia, similar al del acero, que separa la zona lineal de la no lineal justo antes de la tensión máxima.

5.2. Ensayo de flexión en tres puntos

En este ensayo, se van a analizar los parámetros de tensión máxima en la cara de tracción, deformación bajo tensión máxima y forma de la curva fuerza-desplazamiento de cada adición del estudio.

- *Tensión máxima en la cara de tracción*

En primer lugar, vamos a hablar sobre la tensión máxima en la cara de tracción. Las adiciones más resistentes en tracción son la de cemento B (CCA) con un valor medio de 516.3 MPa, seguida de la adición de cemento aluminoso (CAL), cuyo valor medio es de 495.63 MPa. En la parte contraria, tenemos las adiciones de arena de sílice de grano fino (ASF) y de escoria verde (EVE), con valores medios de 240.77 MPa y 256.76 MPa, respectivamente. Las demás adiciones se mantienen en el rango intermedio entre 294.96 MPa y 437.24 MPa, con desviaciones no muy pronunciadas en la mayoría de los casos.

- *Deformación bajo tensión máxima*

Mientras, en el análisis de la deformación bajo tensión máxima, los resultados que se obtienen difieren respecto de la tendencia marcada por el parámetro anterior. Las adiciones que más se deforman son el cemento A (CAP) y la arena de sílice de grano grueso (ASG) con un 4.39% y un 4.36% respectivamente. Sin embargo, estas no son las adiciones que más tensión soportan, sino que ocupan los puestos octavo y quinto respectivamente en la lista de nuestras 10 adiciones, ordenadas de mayor a menor valor de tensión máxima en la cara de tracción.

Lo mismo ocurre con las adiciones que menos se deforman, que son la escoria vítrea (EFU), la arena de sílice de grano fino (ASF) y el cemento aluminoso (CAL), con valores de 3.5%, 3.61% y 3.62% respectivamente. En este caso, la escoria vítrea (EFU) y el cemento aluminoso (CAL) ocupan los puestos tercero y segundo respectivamente en la lista de nuestras 10 adiciones, ordenadas de mayor a menor valor de tensión máxima en la cara de tracción.

- *Linealidad de la curva*

Finalmente, en lo que se refiere a la linealidad de las curvas fuerza-desplazamiento, está claro que, en la generalidad de los casos, el comportamiento de las probetas es lineal hasta rotura, con la salvedad de la adición de cemento A (CAP). En la probeta con esta adición el comportamiento es lineal hasta un valor de aproximadamente 1.5 % de su deformación, valor a partir del cual la curva comienza a perder inclinación y volverse inestable. Este comportamiento es asemejable a un proceso en el que algunas de las fibras de la zona de aplicación de la carga alcanzan su valor máximo antes de rotura, debido a una distribución no uniforme de las tensiones, y se rompen de forma local, disminuyendo la sección resistente, y con ello la relación de deformación previa entre tensión y deformación. Este comportamiento es observado en especial en la probeta CAP-MF02.

Además de en las probetas con adición de cemento A (CAP), el fenómeno de rotura local de fibras se aprecia en las zonas finales previas a la rotura de las curvas de las probetas ACR-MF01, ASF-MF01, ASF-MF02, ASG-MF01, EFU-MF02 y EVE-MF01, aunque en mucho menor grado que en con la adición de cemento A (CAP).

5.3. Ensayo de impacto Charpy

En este ensayo se va a analizar el parámetro de resistencia al impacto Charpy, un indicador de la capacidad de un material de absorber energía y de su fragilidad. Además, se intentará relacionar este parámetro con los obtenidos del ensayo de flexión en tres puntos.

Del análisis de resultados del ensayo, obtenemos que la adición con mayor resistencia al impacto Charpy es la arena de sílice de grano fino (ASF) con 49.19 kJ/m². A pesar de la gran desviación estándar que presenta la medida, como se ha explicado al inicio de este capítulo, esto se atribuye al problema de difusión de las partículas de adición en la plantilla de donde se obtuvieron las probetas.

A su vez, las adiciones de cemento aluminoso (CAL), arena de playa (APL) y arena de sílice de grano grueso (ASG), se sitúan como las peores adiciones en cuanto a resistencia al impacto Charpy, con valores de 40.49 kJ/m², 40.77 kJ/m² y 41.16 kJ/m² respectivamente.

En cuanto al resto de adiciones, se aprecian dos grupos intermedios; uno, formado por las adiciones de escoria verde (EVE), escoria negra (ENG) y cemento B (CCA), con valores alrededor de los 46-47 kJ/m²; el otro, formado por las adiciones de escoria vítrea (EFU), cemento A (CAP) y arena de corindón (ACR), con valores del entorno de los 42-44 kJ/m².

Tras comparar los datos obtenidos del ensayo de flexión en tres puntos y del ensayo de impacto Charpy, se ha resuelto que no existe un patrón sólido, al menos, una directriz clara que correlacione los resultados de ambos ensayos para las probetas que contienen las mismas adiciones. Esto significa que los mecanismos de deformación y rotura en ambos casos son distintos, debido a factores inherentes a los propios ensayos como la velocidad de deformación, y por ello no hay correlación directa.

5.4. Ensayo de abrasión Taber

En este ensayo, se van a analizar los parámetros de pérdida de peso y pérdida de espesor frente a número de ciclos, así como los índices de desgaste Taber (IDT) y de pérdida de espesor (IPE). Además, se analizará la influencia de la temperatura en estos parámetros.

Primera tanda

- *Pérdida de peso*

En cuanto a pérdida de peso, la adición que más desgaste sufre es la de cemento B (CCA) a cualquier número de ciclos (9.88% a 2000 ciclos). Para los 2000 ciclos, la adición de cemento aluminoso (CAL) es la segunda que más pérdida de peso tiene (9.22%), seguida de la arena de playa (APL) con un 7.98%. Sin embargo, por debajo de los 1200 ciclos aproximadamente, los papeles entre APL y CAL se invierten, aunque con pequeñas diferencias.

En el lado opuesto, la adición que menor pérdida de peso sufre para cualquier número de ciclos es la arena de sílice de grano fino (ASF) con un 2.57% a 2000 ciclos. Para los 2000 ciclos, la adición de arena de corindón (ACR) es la segunda que menos pérdida de peso tiene (4.12%), seguida de la arena de sílice de grano grueso (ASG) con un 4.65%. Sin embargo, y al igual que con el caso anterior, por debajo de los 1200 ciclos aproximadamente, los papeles entre ACR y ASG se invierten, aunque con pequeñas diferencias.

El desgaste de las adiciones por pérdida de peso es bastante lineal en la mayoría de los casos, solo desviándose ligeramente en la adición de escoria verde (EVE). Esto se ve claramente por los ligeros cambios de tendencia en el índice de desgaste Taber (IDT) analizado a continuación.

- *Índice de Desgaste Taber (IDT)*

La adición de cemento B (CCA) presenta dos cambios de comportamiento en cuanto a su pérdida de peso a lo largo de los ciclos. El primer cambio se presenta a los 500 ciclos, donde su ritmo de pérdida de peso pasa de crecer a decrecer, al igual que ocurre con la adición de arena de playa (APL). El segundo cambio se produce a los 1000 ciclos, donde su ritmo de pérdida de peso pasa ahora de decrecer a crecer ligeramente hasta los 2000 ciclos. Lo mismo que ocurre con esta adición de cemento B (CCA) ocurre con la adición de arena de playa (APL).

Por la parte contraria, la adición de arena de sílice de grano fino (ASF) presenta un ritmo de desgaste en pérdida de peso decreciente de hasta los 500 ciclos, y creciente de ahí en adelante. Con las adiciones de arena de corindón (ACR) y arena de sílice de grano grueso (ASG), el patrón sigue un ritmo descendente hasta los 1000 ciclos, y ascendente de los 1000 a los 2000 ciclos.

En cuanto a las demás adiciones, el patrón general es el mismo que con las adiciones de arena de corindón (ACR) y arena de sílice de grano grueso (ASG), es decir, descenso-descenso-ascenso.

Por su parte, la variación global en el ritmo de desgaste de los tipos de adición es; pequeña (variación de 100-150 IDT) para el cemento B (CCA) arena de sílice de grano fino (ASF), cemento aluminoso(CAL) y arena de corindón (ACR); moderado (variación de 150-250 IDT) para la arena de playa (APL) y el cemento A (CAP); grande (variación de 250-500 IDT) para la arena de sílice de grano grueso (ASG) y adiciones de escoria vítrea (EFU), escoria negra (ENG) y escoria verde (EVE).

- *Pérdida de espesor*

En cuanto a pérdida de espesor, la adición que más desgaste sufre es la de escoria vítrea (EFU) a cualquier número de ciclos (0.59 mm a 2000 ciclos), salvo para un rango entre los 250 y 750 ciclos, donde es la adición de arena de playa la que más pérdida de espesor sufre. Para los 2000 ciclos, la adición de cemento B (CCA) es la segunda que más pérdida de espesor tiene (0.55 mm), seguida de la arena de playa (APL) con 0.52 mm. Sin embargo, por debajo de los 1750 ciclos aproximadamente, los papeles entre APL y CCA se invierten, con diferencias tan notables que, como se ha dicho antes, a 500 ciclos la pérdida de espesor de la arena de playa (APL) es la más alta de todas las adiciones.

En el lado opuesto, la adición que menor pérdida de espesor sufre para cualquier número de ciclos es la arena de corindón (ACR) con 0.31 mm a 2000 ciclos. Para los 2000 ciclos, la adición de arena de sílice de grano grueso (ASG) es la segunda que menos pérdida de espesor tiene (0.31 mm), con una diferencia prácticamente nula respecto de la arena de corindón (ACR). Sin embargo, por debajo de los 1000 ciclos, la adición de cemento aluminoso (CAL) mantiene el segundo menor desgaste por pérdida de espesor, siendo a partir de los 1000 ciclos, cuando la adición de arena de sílice de grano grueso (ASG) toma su relevo en este segundo puesto.

La linealidad en el desgaste de las adiciones por pérdida de espesor es menor que la que muestran para la pérdida de peso, es decir, que los cambios en el ritmo de pérdida de espesor de las adiciones son más pronunciados que en el caso de la pérdida de peso. Esto se ve claramente por los cambios bruscos de tendencia en el índice de pérdida de espesor (IPE) analizado a continuación.

- *Índice de pérdida de espesor (IPE)*

La adición de arena de playa (APL) presenta un solo cambio de comportamiento en cuanto a su pérdida de espesor a lo largo de los ciclos. Este cambio se presenta a los 500 ciclos, donde su ritmo de pérdida de peso pasa de crecer a decrecer. Todas las adiciones que presentan descensos importantes del índice de pérdida de espesor (IPE), siguen un patrón de descenso continuo (ASG y EFU) o de descenso-descenso-ascenso (ASF, CAP, ENG y EVE), con el ascenso a partir de los 1000 ciclos.

Por su parte, la variación global en el ritmo de desgaste de los tipos de adición es; pequeña (variación de 100-150 IDT) para el cemento B (CCA), cemento aluminoso (CAL) y arena de corindón (ACR); moderado (variación de 150-250 IDT) para la arena de playa (APL) y el cemento A (CAP); grande (variación de 250-500 IDT) para la arena de sílice de grano fino (ASF), arena de sílice de grano grueso (ASG) y adiciones de escoria vítrea (EFU), escoria negra (ENG) y escoria verde (EVE).

- *Diferencias entre pérdida de peso y pérdida de espesor: densidad de partículas.*

Del análisis de los resultados obtenidos es apreciable el hecho de que no siempre la adición que mayor pérdida de peso tiene es la que más espesor pierde. Esto es debido a la diferencia en la densidad de las partículas de adición. Dos probetas con igual pérdida de espesor pueden tener diferentes pérdidas de peso, ya que la primera adición pierde el mismo número de partículas que la segunda, pero el peso de estas partículas para un mismo volumen es diferente.

Por ejemplo, la adición de cemento B (CCA) es la que más pérdida de peso tiene a 2000 ciclos, pero, sin embargo, es la segunda adición que mayor pérdida de espesor tiene, por detrás de la adición de escoria vítrea (EFU). A su vez, la escoria vítrea se encuentra en una posición intermedia en la lista de adiciones en cuanto a pérdida de peso a los 2000 ciclos. Esto se debe a que las partículas de cemento B (CCA) son bastante más densas que las de escoria vítrea. Algo similar ocurre con la adición de cemento aluminoso (CAL), que es la tercera mayor en pérdida de peso a los 1000 ciclos, y de las que menos pérdida de espesor tiene para los mismos 1000 ciclos. Esto significa que la densidad de las partículas del cemento aluminoso (CAL) son muy densas.

En general, las adiciones de cementos son las más densas, seguidas de las arenas, y por último las escorias.

Segunda tanda

- *Pérdida de peso*

En cuanto a pérdida de peso, la adición que más desgaste sufre es la de escoria verde (EVE) con un 3.94% a 1000 ciclos. Supone un incremento de 1.6 veces respecto de su valor a temperatura ambiente. La segunda que más pérdida de peso tiene es la escoria negra (ENG) con un 3.76% (incremento de 1.68 veces respecto a temperatura ambiente).

En el lado opuesto, la adición que menor pérdida de peso sufre para 1000 ciclos es la arena de sílice de grano fino (ASF) con un 0.7% (0.6 veces respecto a temperatura ambiente). La segunda que menos pérdida de peso tiene es la arena de playa (APL) con un 0.72% (incremento de 0.2 veces respecto a temperatura ambiente).

La generalidad observada es que la mayoría de las adiciones pierden menos peso que en la experiencia de la primera tanda, cuando en verdad debería ser al revés, pues las probetas del primer ensayo han podido refrigerarse en las paradas a los 100 y 500 ciclos, frente al ensayo continuo a 1000 ciclos de la segunda tanda. Este fenómeno se explica por el citado problema de difusión de las partículas de adición, donde es probable que la concentración de las partículas de adición en las probetas de esta segunda tanda sea considerablemente diferente a las utilizadas en la primera tanda. Sin embargo, como las dos últimas adiciones han estado sometidas a temperaturas mayores, y en combinación con un menor problema de difusión, la pérdida de peso ha sido mayor que en la primera tanda, que es lo que se esperaba, es decir, que los materiales tienden a desgastarse más en condiciones de temperatura más severas.

- *Pérdida de espesor*

En cuanto a la pérdida de espesor, la adición que más desgaste sufre es la de escoria negra (ENG) con 0.29 mm a 1000 ciclos. Supone un incremento de 1.53 veces respecto de su valor a temperatura ambiente. La segunda que más pérdida de espesor tiene es la escoria verde (EVE) con 0.26 mm (incremento de 1.3 veces respecto a temperatura ambiente).

En el lado opuesto, la adición que menor pérdida de espesor sufre para 1000 ciclos es la arena de playa (APL) con 0.07 mm (0.25 veces respecto a temperatura ambiente). La segunda que menos pérdida de espesor tiene es la arena de sílice de grano fino (ASF) con 0.08 mm (incremento de 0.4 veces respecto a temperatura ambiente).

La generalidad observada es que la mayoría de las adiciones pierden menos espesor que en la experiencia de la primera tanda, al igual que ocurre con la pérdida de peso. La causa de este fenómeno es también la misma que en el caso de la pérdida de peso, la difusión de las partículas de adición. Una vez más, las dos últimas adiciones han estado sometidas a temperaturas mayores, y en combinación con un menor problema de difusión, la pérdida de espesor ha sido mayor que en la primera tanda.

Tercera tanda

- *Pérdida de peso*

En cuanto a pérdida de peso, la adición que más desgaste sufre es la de escoria verde (EVE) con un 10.48 % a 1000 ciclos. Supone un incremento de 4.93 veces respecto de su valor a temperatura ambiente. La segunda que más pérdida de peso tiene es la arena de playa (APL) con un 9.08% (incremento de 2.4 veces respecto a temperatura ambiente), seguida de la arena de sílice de grano fino (ASF) con un 7.84% (incremento de 6.75 veces respecto a temperatura ambiente).

En el lado opuesto, la adición que menor pérdida de peso sufre para 1000 ciclos es el cemento aluminoso (CAL) con un 4.7% (1.3 veces respecto a temperatura ambiente). La segunda que menos pérdida de peso tiene es la escoria negra (ENG) con un 5.02% (incremento de 2 veces respecto a temperatura ambiente), seguida de la escoria vítrea (EFU) con un 5.05% (incremento de 2.25 veces respecto a temperatura ambiente).

La generalidad observada es que todas las adiciones pierden más peso contra mayor temperatura, pero a unas las afecta más que a otras, siendo las arenas las más afectadas

por la temperatura y seguidas de las escorias, con la excepción de la escoria verde, que es la segunda más afectada. Los cementos se presentan como las adiciones más estables frente a la pérdida de peso con el incremento de temperatura.

La menos afectada por la temperatura, en cuanto a pérdida de peso, es el cemento aluminoso (CAL) con un incremento de 1.3 veces respecto a temperatura ambiente, seguido de las otras dos adiciones de cementos (CCA y CAP) con 1.5 veces y 1.95 veces respecto a temperatura ambiente.

La más afectada por la temperatura, en cuanto a pérdida de peso, es la arena de sílice de grano grueso (ASG) con un incremento de 6.75 veces respecto a temperatura ambiente, seguido de la escoria verde (EVE) con 4.25 veces respecto a temperatura ambiente, y las otras tres adiciones de arena (ACR, ASG y APL) con 3.05 veces, 3 veces y 2.4 veces respecto a temperatura ambiente.

Las adiciones de escoria negra (ENG) y vítrea (EFU), se posicionan en un rango intermedio, con 2.25 veces y 2 veces respecto a temperatura ambiente.

- *Pérdida de espesor*

En cuanto a pérdida de espesor, la adición que más desgaste sufre es la de arena de sílice de grano fino (ASF) con 0.51 mm a 1000 ciclos. Supone un incremento de 4.6 veces respecto de su valor a temperatura ambiente. La segunda que más pérdida de espesor tiene es la arena de playa (APL) con 0.5 mm (incremento de 1.8 veces respecto a temperatura ambiente), seguida de la escoria verde (EVE) con 0.47 mm (incremento de 2.35 veces respecto a temperatura ambiente).

En el lado opuesto, la adición que menor pérdida de espesor sufre para 1000 ciclos es la arena de sílice de grano grueso (ASG) con 0.19 mm (1.2 veces respecto a temperatura ambiente). La segunda que menos pérdida de espesor tiene es el cemento aluminoso (CAL) con 0.21 mm (incremento de 1.05 veces respecto a temperatura ambiente), seguida de la escoria vítrea (EFU) con 0.26 mm (incremento de 0.83 veces respecto a temperatura ambiente). Este último comportamiento es curioso, ya que la escoria vítrea parece perder menos espesor para un mismo número de ciclos conforme se incrementa la temperatura.

La generalidad observada es que todas las adiciones, salvo la escoria vítrea (EFU) pierden más espesor contra mayor temperatura, siendo el grado de afección general menor que en el caso de la pérdida de peso.

La menos afectada por la temperatura, en cuanto a pérdida de espesor, es la escoria vítrea (EFU) con un incremento de 0.83 veces respecto a temperatura ambiente, seguida de la adición de cemento aluminoso (CAL) con 1.05 veces respecto a temperatura ambiente, y la arena de sílice de grano grueso (ASG), con 1.2 veces respecto a temperatura ambiente.

La más afectada por la temperatura, en cuanto a pérdida de espesor, es la arena de sílice de grano fino (ASF) con un incremento de 4.6 veces respecto a temperatura ambiente, seguido de la escoria verde (EVE) con 2.35 veces respecto a temperatura ambiente, y arena de corindón (ACR) con 2.15 veces respecto a temperatura ambiente.

Las demás adiciones se posicionan en un rango intermedio de entre 1.36 veces y 1.8 veces respecto a temperatura ambiente.

5.5. Ensayo de erosión

En este ensayo se van a analizar los parámetros de anchura, área triangular de la huella y volumen erosionado de cada una de las probetas del ensayo. Así, se determina que la resistencia a desgaste por erosión de una probeta será mayor cuanto menor sea la anchura, área triangular de la huella y volumen erosionado de esta.

- *Anchura de la huella*

La adición que mayor anchura de huella presenta para el ensayo de erosión es el cemento A (CAP), con 17.00 mm de ancho de huella. A continuación, se encuentran la adición de arena de sílice de grano grueso (ASG) y la de arena de corindón (ACR) con 15.44 mm y 14.58 mm de ancho de huella, respectivamente.

En el otro extremo encontramos las adiciones con menor área triangular de huella, que son la adición de arena de playa (APL) con 11.68 mm de ancho de huella, seguida de cerca por la adición de escoria vítrea (EFU) con 11.79 mm de ancho de huella.

Por su parte, el resto de adiciones se mantienen en un grupo cuyo rango de valores va desde los 12.83 mm a los 14.03 mm de ancho de huella, existiendo pequeñas diferencias entre ellas.

- *Área triangular de la huella*

La adición que mayor área triangular de huella presenta para el ensayo de erosión, con mucha diferencia sobre las demás, es el cemento A (CAP), con 3.34 mm². A continuación,

se encuentran la adición de escoria verde (EVE) y la de cemento aluminoso (CAL) con 1.94 mm² y 1.90 mm² de área triangular de huella, respectivamente.

En el otro extremo encontramos las adiciones con menor área triangular de huella, que son la adición de arena de playa (APL) con 1.17 mm² de área triangular de huella, seguida de cerca por la adición de arena de sílice de grano fino (ASF) con 1.30 mm² de área triangular de huella.

Por su parte, el resto de adiciones se mantienen en un grupo cuyo rango de valores va desde los 1.57 mm² a los 1.78 mm² de ancho de huella, existiendo pequeñas diferencias entre ellas.

Existe una generalidad observada donde las adiciones con mayor anchura de huella tienden a ser también las que más área erosionada poseen, aunque exista una cierta alternancia en cuanto a posición en las dos clasificaciones (anchura de huella y área triangular de la huella). A primera vista esto es lógico por el simple planteamiento teórico del área de la huella, que depende directamente de la anchura de huella, pero también nos sirve para comprender qué importancia tiene cada parámetro que influye sobre el área de la huella (anchura y profundidad).

Si la profundidad hubiese sido el parámetro dominante para la determinación del resultado en cuanto a resistencia a la erosión, la clasificación de las adiciones en cuanto a anchura de huella hubiera sido muy distinta a la clasificación de las mismas adiciones en cuanto a área triangular de la huella. Sin embargo, como el parámetro de anchura de la huella es más importante que su profundidad, de cara a la comparación de resistencia frente a la erosión, las diferencias entre las clasificaciones antes citadas existen, pero son mucho menores.

- *Volumen erosionado*

Puesto que el volumen erosionado depende directamente de solo dos parámetros, área triangular de la huella y longitud de la huella, y la longitud de la huella es constante para todas las probetas del ensayo debido a cuestiones técnicas del método del ensayo, el volumen erosionado sigue exactamente la misma tendencia que el área triangular de la huella. Por tanto, los resultados expuestos en el apartado 4.5 sobre el volumen erosionado son meramente informativos, para facilitar la comprensión del fenómeno de erosión.

Capítulo 6.- Conclusiones

En general, los materiales compuestos con adiciones están gobernados por mecanismos muy complejos, por lo que antes de formular teóricamente estos mecanismos, es necesario tener un extenso historial experimental.

La difusión es el principal reto a solucionar, de cara a obtener materiales con alta homogeneidad. En particular, del presente trabajo pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Las propiedades mecánicas a tracción varían significativamente dependiendo de la adición. La escoria vítrea produce una mejora moderada, la arena de playa y los cementos mejoran ligeramente, mientras que las otras arenas y escorias tienden a empeorar el comportamiento general a tracción del material compuesto.
- La linealidad de la curva tensión-deformación a tracción del material compuesto no varía significativamente por la presencia de las adiciones, salvo en el caso del cemento B, donde el periodo elástico se reduce en gran medida respecto del material compuesto inicial.
- Las propiedades en flexión del material compuesto empeoran en general con la introducción de las adiciones. Esto se debe a que las partículas de adición introducen curvas en el entramado de fibras, y por tanto concentraciones de tensiones en las proximidades de dichas partículas.
- El tamaño de grano es directamente proporcional al empeoramiento de las propiedades en flexión. Los cementos son los que menos empeoran, seguido de las escorias y por último las arenas.
- La adición de cemento A favorece las roturas locales de fibras producidas por la delaminación. Por ello, sus propiedades en flexión son bastante peores que las otras adiciones de cementos.
- Las propiedades de resistencia al impacto varían ligeramente respecto a la introducción de adiciones. Las escorias tienden a mostrar los mejores resultados de

impacto, mientras que las arenas muestran los peores. Los cementos tienen mucha dispersión en cuanto a resultados al impacto.

- Existe una tendencia general en los materiales, incluso con adiciones, a desgastarse más a temperaturas de trabajo más altas.
- Existe una tendencia general en las adiciones ensayadas donde el ritmo de desgaste ya sea en pérdida de peso o espesor, decrece hasta los 1000 ciclos, y comienza a crecer ligeramente a partir de ahí.
- En general y a temperatura ambiente, las adiciones de arena presentan los menores desgastes tanto en espesor como el peso, con la salvedad de la arena de playa. Esto puede deberse a un efecto lubricante promovido por la rotura de las partículas de adición en partículas más pequeñas que protegen la superficie del material compuesto.
- Con el aumento de la temperatura de trabajo, el crecimiento del ritmo de desgaste no es igual para todas las adiciones. A altas temperaturas, la arena de corindón empeora hasta situarse en una posición intermedia, siendo el cemento aluminoso la nueva mejor adición para el desgaste.
- Los mecanismos de desgaste de abrasión y erosión son bastante distintos en el caso de los materiales compuestos. Mientras que la adición de arena de playa es pobre frente al desgaste por abrasión, es la mejor frente al desgaste por erosión. Esta misma tendencia, pero menos acentuada ocurre a la inversa con la adición de cemento aluminoso.

Capítulo 7.- Bibliografía

- [1] Jesús Setién Marquínez, Jose Antonio Casado del Prado, Soraya Diego Cavia, Carlos Thomas García, Departamento*de*Ciencia*e*Ingeniería*del* Terreno*y*de*los* Materiales* Lección'17.'Materiales'compuestos',.
- [2] Fratzl, P. , Weinkamer, R. Nature's hierarchical materials , 52 Pages 1263-1334.
- [3] E. Pete. A Brief History of Composites in the U.S - The Dream and the Success. Jom, 48 (2), (1996) 45--48.
- [4] TJ Reinhart et al., Engineered Materials Handbook. Volume 1, Composite, ASM international 1987.
- [5] Robert M. Jones, Mechanics Of Composite Materials. Pages 2 to 11, Second ed., Brunner-Routledge, New York & London, 1999.
- [6] Fratzl. P. Biomimetic materials research - what can we learn from Nature´s structural materials? J R Soc Interface 2007; 4-637-42, .
- [7] Carlos Thomas, Fotografía de Barrera *New Jersey*, (2017).
- [8] Arkiplus, Fotografía de hormigón armado, (2016).
- [9] Antonio de Toro Pintó, ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE PROTECCIONES DEPORTIVAS DE FIBRA DE CARBONO (Study of mechanical behaviour of Carbon fiber Shinpads). (Julio 2014).
- [10] NASA, Beam me to Mars, 2005.
- [11] Raúl Salinas Beltrán, ¿Como se fabrica el BMW i3? <http://www.autobild.es/reportajes/bmw-i3-como-se-hace-208223>. (2013).
- [12] CARBONTEK, Fotografía Aletas Fibra de Carbono,.
- [13] Brady, George S., Henry R. Clauser and John A. Vaccari, Materials Handbook, 2nd ed., McGraw-Hill, 1997,.
- [14] Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América, MIL-HDBK-17. COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK. VOLUME 3. POLYMER MATRIX COMPOSITES. MATERIAL USAGE, DESIGN, AND ANALYSIS, (Junio 2002).
- [15] ZOLTEK™, Carbon fiber - How it is made? (2017).
- [16] ZOLTEK™, Fotografía Bobina fibra de carbono ZOLTEK PX35,.
- [17] Carolina Llano Uribe, Revista Metalactual. Fibra de Carbono. Presente y futuro de un material revolucionario. 11 (2009) <http://docplayer.es/7874620-Fibra-de-carbono-presente-y-futuro-de-un-material-revolucionario-materiales-el-mercado-mundial-de-fibra-de-carbono-alcanzara-us-12-millones-en-2011.html>.
- [18] BricoBlog, Fotografía de resina epoxy junto a su endurecedor.

- [19] Isidro Carrascal Vaquero, Apuntes de carrera de Ingeniería Mecánica. Asignatura "Ingeniería de Materiales". Universidad de Cantabria. (2014).
- [20] Jose Luis Gonzalez Velazquez, Metalurgia mecánica, 1st ed., Limusa. Noriega Editores, Mexico, 2003.
- [21] Mehmet Aktaş, Cesim Atas, Bülent Murat İçten, Ramazan Karakuzu. Composite Structures. An experimental investigation of the impact response of composite laminates. 87 (2008) 307-313.
- [22] Fiber Profil, Pultrusión. Definición y descripción del proceso.
- [23] Dr. Paul Collins, A brief history and future of materials in the cycling industry. http://www.oldsalopians.org/Bicycles_Materials_Materials_Australia_Vol_46_No_2_June_2013.pdf. 46 (2013).
- [24] MilitaryHistoryNow, Two-Wheeled Warriors - A brief History of Bicycles on the Battlefield, 2012.
- [25] LADICM, Laboratorio de la división de ciencia e ingeniería de los materiales de la Universidad de Cantabria.
- [26] AENOR, Norma UNE-EN 2597:1999. Material Aeroespacial-Plásticos reforzados con fibra de carbono-Laminados unidireccionales. Ensayo de tracción perpendicular a la dirección de las fibras. (1999).
- [27] AENOR, UNE-EN ISO 178:2011/A1:2013. Plásticos. Determinación de las propiedades de flexión. (ISO 178:2010/Amd 1:2013). (2013).
- [28] AENOR, UNE-EN ISO 179-2:2000/A1:2012. Plásticos. Determinación de las propiedades frente al impacto Charpy. Parte 2: Ensayo de impacto instrumentado. Modificación 1: Datos de precisión. (ISO 179-2:1997/Amd 1:2011), (2011).
- [29] Real Academia Española de La Lengua, Definición de "abrasión".
- [30] Dr.ir. Anton van Beek, Advanced engineering design. Lifetime performance and reliability. 6th ed., Delft University of Technology. Mechanical engineering., Gante, Bélgica., 2015,.
- [31] AENOR, UNE-EN ISO 5470-1:1999. Tejidos recubiertos de plástico o caucho. Determinación de la resistencia a la abrasión. Parte 1: Aparato de ensayo de abrasión Taber. (ISO 5470-1:1999). (1999).
- [32] Taber Industries, Manual del Abrasímetro Taber® Modelo 5135 / 5155. Neurtek Instruments.
- [33] AENOR, UNE-EN 14617-4:2012. Piedra aglomerada. Métodos de ensayo. Parte 4: Determinación de la resistencia a la abrasión. (2012).