



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Universidad Politécnica de Valencia
Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño
Departamento de Máquinas y Motores Térmicos



Análisis de los efectos de la inyección de agua en un filtro de partículas diesel sobre la acumulación de hollín

TRABAJO FIN DE GRADO
GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



AUTOR:

Jesús Martínez Gil

TUTOR:

Pedro Piqueras Cabrera

DIRECTOR EXPERIMENTAL:

Emanuele Angiolini

Valencia, Julio de 2016

Resumen

En los motores Diesel se ha convertido en un estándar la implantación de los filtros de partículas Diesel en la línea de escape como elemento de post-tratamiento. Esto ha venido motivado por las cada vez más estrictas normativas de emisiones de partículas. Sin embargo, la utilización de los mismos penaliza en gran medida las prestaciones del motor, debido al aumento de la contrapresión de escape que está obligado a vencer cuando el hollín se acumula en el interior de este sistema de post-tratamiento.

La distribución de hollín en el filtro de partículas, y por tanto la caída de presión, puede modificarse mediante una inyección de agua en la entrada del DPF. En este marco se desarrolla el siguiente proyecto, en el cual se pretende analizar cómo afecta la inyección de agua a la pérdida de presión y a la distribución de partículas en un filtro previamente cargado de hollín.

Para realizar dicho análisis en primer lugar se ha medido en banco de flujo la pérdida de presión en el filtro antes y después de la inyección de agua y se ha comparado cómo varía ésta. En segundo lugar se ha cortado el filtro para observar cómo se ha visto afectada la distribución de hollín, tanto de la macro-estructura de la capa de partículas superficial como de la micro-estructura en el interior de la pared porosa.

Analizando todos los datos obtenidos se puede concluir que la inyección de agua es una buena técnica para reducir la pérdida de presión en el filtro de partículas. El agua inyectada antes del filtro arrastra la capa de hollín hacia el final del filtro, por lo que queda limpio gran parte del mismo y se obtiene la citada mejora en la pérdida de presión.

Palabras clave: Filtro de partículas, DPF, inyección de agua, pérdida de presión.

Agradecimientos

Quiero aprovechar estas líneas para agradecer a todo el personal del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, especialmente al Dr. D. Pedro Piqueras Cabrera por haber depositado en mí la confianza para colaborar en este proyecto y por todo lo que me ha enseñado. Especial agradecimiento también para D. Emanuele Angiolini, que ha dedicado gran parte de su tiempo a colaborar conmigo y hacer que este proyecto salga adelante.

Por otro lado quiero agradecer a todas las personas que he ido conociendo a lo largo de estos cuatro años y que no han quedado en simples compañeros de clase, sino que se han convertido en algo mucho más importante para mí. Sin vosotros estos últimos cuatro años habrían sido completamente diferentes. Ahora acabamos una época y nos separaremos ligeramente, pero espero que solo sea una forma de vivir experiencias que nos contaremos en el futuro cuando los caminos se vuelvan a encontrar.

Mi familia ha sido otro de los grandes pilares en los que me he apoyado siempre que lo he necesitado. Me resultaría imposible devolverles todo lo que ellos me han aportado, en todos los sentidos. Mis padres se merecen una especial mención en este apartado. Estos últimos años han sido especialmente duros y difíciles para vosotros, pero quiero que sepáis que sois unos padres geniales y que no os cambiaría por nada.

Por último quiero acabar con una persona que ha sido realmente especial en mi vida, Laura. Siempre que te he necesitado has estado ahí. Los dos hemos compartido grandes momentos estos últimos años. Muchas gracias por estar ahí siempre.

Índice

Índice de tablas	3
Índice de figuras	5
I Memoria	9
1 Introducción	11
1.1 Motivación del estudio	11
1.2 Antecedentes	12
1.3 Objetivos del estudio	12
1.4 Metodología	12
1.5 Viabilidad del estudio	13
1.6 Desarrollo del trabajo	13
2 Sistemas de post-tratamiento de gases de escape en MCIA	15
2.1 Introducción	15
2.2 Emisiones contaminantes	15
2.3 Normativa	18
2.4 Sistemas de post-tratamiento	18
2.5 Tipos de filtros de partículas	21
2.6 Filtros de partículas diesel de flujo de pared	25
3 Análisis de la pérdida de presión en el DPF	31
3.1 Introducción	31
3.2 Caracterización de la pérdida de presión en banco de flujo	31
3.3 Inyección de agua y efecto en la pérdida de presión	35
4 Visualización y análisis del medio poroso	41
4.1 Herramientas de visualización	41
4.2 Metodología de ensayo	42
4.3 Post-procesado de imágenes	47
4.4 Análisis de resultados	51
5 Conclusiones	57
Anexo: Imágenes	59
Bibliografía	67

II	Pliego de condiciones	69
III	Presupuesto	77
1	Introducción	79
2	Presupuesto	81
2.1	Planificación y reuniones	81
2.2	Ensayos en banco de flujo	83
2.3	Visualización de la pared porosa	84
2.4	Post-procesado de imágenes	86
2.5	Presupuesto total	88

Índice de Tablas

I. Memoria	11
Tabla 2.1 Tabla resumen con las características más relevantes de los principales tipos de DPF [3].	24
Tabla 3.1 Características del DPF utilizado.	31
Tabla 3.2 Características del motor utilizado en el proceso de carga.	32
Tabla 3.3 Punto de funcionamiento del motor durante el proceso de carga.	32
Tabla 3.4 Condiciones bajo las que se realizó la inyección de agua.	37
Tabla 3.5 Masa de los cuartos de DPF antes y después de la inyección de agua.	38
Tabla 4.1 Resultados obtenidos en la comparación de las medidas de la capa de partículas obtenidas con Matlab y con el microscopio.	51
Tabla 4.2 Espesor de la capa de partículas obtenido mediante el programa de post-tratamiento del servicio de microscopía.	51
III. Presupuesto	79
Tabla 2.1 Coste de la mano de obra asociado a las reuniones de planificación del trabajo.	81
Tabla 2.2 Coste de la mano de obra asociado a las reuniones entre ingeniero superior (Tutor) y junior.	82
Tabla 2.3 Coste de la mano de obra asociado a las reuniones entre ingeniero superior y junior.	82
Tabla 2.4 Coste de la mano de obra asociado a las reuniones entre ingeniero superior (Tutor) y junior.	82
Tabla 2.5 Coste de la mano de obra asociado a la partida de reuniones.	82
Tabla 2.6 Coste de la mano de obra asociado a los ensayos en banco de flujo.	83
Tabla 2.7 Equipos utilizados durante los ensayos en banco de flujo.	83
Tabla 2.8 Amortización de los equipos utilizados durante los ensayos en banco de flujo.	83
Tabla 2.9 Coste del material fungible asociado a los ensayos en banco de flujo.	84
Tabla 2.10 Coste asociado a la partida de ensayos en banco de flujo.	84
Tabla 2.11 Coste de la mano de obra asociado a la obtención de imágenes mediante la cámara y lupa electrónica.	84
Tabla 2.12 Coste de la mano de obra asociado a la obtención de imágenes mediante el microscopio electrónico de barrido.	85
Tabla 2.13 Equipos utilizados durante la partida de visualización de la pared porosa.	85
Tabla 2.14 Amortización de los equipos utilizados durante la partida de visualización de la pared porosa.	85

Tabla 2.15	Coste del material fungible asociado a la visualización de la pared porosa.	86
Tabla 2.16	Coste de utilización del microscopio electrónico de barrido.	86
Tabla 2.17	Coste asociado a la partida de visualización de la pared porosa.	86
Tabla 2.18	Coste de la mano de obra asociado al post-procesado de imágenes. . .	87
Tabla 2.19	Equipos utilizados durante la partida de post-procesado de imágenes. .	87
Tabla 2.20	Amortización de los equipos utilizados durante la partida de post- procesado de imágenes.	87
Tabla 2.21	Coste del material fungible asociado al post-procesado de imágenes. .	87
Tabla 2.22	Coste total asociado a la realización del proyecto.	88

Índice de Figuras

I. Memoria	11
Figura 2.1 Esquema de la composición media típica de las partículas [1].	17
Figura 2.2 Normativa europea sobre la emisión de partículas y NO_x para vehículos diesel ligeros [2].	18
Figura 2.3 Catalizador.	19
Figura 2.4 Esquema de la configuración del catalizador SCR con inyección de urea [1].	20
Figura 2.5 Esquema comparativo de la estructura wall-flow y flow-through.	22
Figura 2.6 Substrato genérico de espuma cerámica [3]	23
Figura 2.7 Filtro de partículas metálico [4].	24
Figura 2.8 Esquema de un filtro de partículas de flujo de pared [5].	25
Figura 2.9 Esquema de los mecanismo de filtrado en un filtro de partículas diesel [3].	25
Figura 2.10 Esquema con diferentes tipos de canales. a) Cuadrado; b) Hexagonal/Triangular; c) Cuadrado/Rectangular; d) Octogonal/Cuadrado; e) Cuadrado asimétrico; f) Celda ondulada [3].	26
Figura 2.11 Esquema de la estructura celular [3].	27
Figura 2.12 Efecto del diámetro medio de poro en la pérdida de presión y la emisión de partículas [2].	28
Figura 3.1 Filtro de partículas utilizado antes de separar los cuatro cuartos que lo forman.	32
Figura 3.2 Estructura para el ensayo de los cuartos de DPF con un cuarto montado y sellado.	33
Figura 3.3 Montaje en banco de flujo para la medida de la pérdida de presión.	33
Figura 3.4 Instrumentos para la medida de pérdida de presión: A la izquierda columnas de agua y mercurio para la medida de saltos de presiones y a la derecha armario de control para modificar el gasto másico.	34
Figura 3.5 Caída de presión en cada cuarto de DPF antes de la inyección de agua para diferentes temperaturas: a) Temperatura ambiente. b) 100 °C. c) 200 °C.	35
Figura 3.6 Elementos para inyección de agua: a) Depósito de agua a presión. b) Inyector de agua instalado en el cono de entrada a la carcasa.	36
Figura 3.7 Caída de presión en cada cuarto de DPF antes y después de la inyección de agua para una temperatura de 200 °C.	37
Figura 3.8 Disminución de la pérdida de presión en cada cuarto de DPF provocado por la inyección de agua para una temperatura de 200 °C.	38
Figura 4.1 Microscopio electrónico de barrido utilizado para la obtención de imágenes.	42

Figura 4.2	Esquema con las secciones de DPF para la observación con lupa electrónica y cámara.	43
Figura 4.3	Montaje utilizado para la obtención de imágenes mediante lupa electrónica.	43
Figura 4.4	Esquema de los puntos en los que se han tomado las fotos con la lupa electrónica.	44
Figura 4.5	Esquema de cómo se obtienen las muestras para el microscopio electrónico de barrido.	45
Figura 4.6	Ejemplo de aplicación de la detección de elementos en un punto o región: a) Imagen sobre la que se ha aplicado la detección de elementos; b) Espectro obtenido del análisis en la región en la que se detecta mayoritariamente carbono; c) Espectro obtenido del análisis en el punto en la que se detecta mayoritariamente silicio.	45
Figura 4.7	Ejemplo de aplicación de la detección de elementos en una línea: a) Imagen sobre la que se ha aplicado la detección de elementos; b) Espectros obtenidos del análisis: en azul silicio y en rojo carbono.	46
Figura 4.8	Ejemplo de aplicación de mapa de elementos: a) Carbono detectado; b) Silicio detectado; c) Carbono y silicio superpuestos en la imagen de electrones secundarios.	46
Figura 4.9	Ejemplo de aplicación del programa creado para contar el número de anales abiertos: a) Imagen de partida; b) Imagen sometida a los tres primeros pasos del post-tratamiento; c) Imagen con marcas rojas en cada una de las áreas contabilizadas.	48
Figura 4.10	Esquema en el que se representa la suposición de que el hollín se deposita de forma uniforme sobre las paredes.	49
Figura 4.11	Estudio de sensibilidad del espesor de la capa de hollín al valor de corte.	49
Figura 4.12	Efecto del valor de corte en el post-tratamiento de imágenes: a) Imágen de partida; b) Valor de corte de 0,02; b) Valor de corte de 0,15; b) Valor de corte de 0,39.	50
Figura 4.13	Imágenes utilizadas para comparar las medidas relizadas por el programa y las obtenidas mediante el SEM: a) Sección #2; b) Sección #5.	50
Figura 4.14	a) Evolución de los canales abiertos para todos los cuartos frente a la posición axial; b) Canales que se han limpiado debido a la inyección de agua.	52
Figura 4.15	Espesor de la capa de hollín en el cuarto de referencia frente a la posición axial.	53
Figura 4.16	Espesor de la capa de partículas en algunos puntos del cuarto #2 en una zona afectada por la inyección de agua.	53
Figura 4.17	Canal del cuarto #4 analizado con el microscopio electrónico de barrido: a) Imagen de electrones secundarios; b) Mapa de elementos obtenido con EDS.	54
Figura 4.18	Pared porosa del canal de la imagen 4.17 analizada con el microscopio electrónico de barrido: a) Imagen de electrones secundarios; b) Mapa de elementos obtenido con EDS.	55
Figura 4.19	Canal del cuarto #2 analizado con el microscopio electrónico de barrido: a) Imagen de electrones secundarios del canal completo; b) Mapa de elementos obtenido con EDS del canal completo; c) Imagen de electrones secundarios de la pared porosa; b) Mapa de elementos obtenido con EDS de la pared porosa.	55

Figura 4.20 Fragmentos de capa de partículas acumulados en el final del DPF: a) Imagen del cuarto #3 a 21,5 cm de la entrada; b) Esquema que muestra como se depositan los trozos de capa de partículas al final del hollín. 56

Documento I

Memoria

1. Introducción

1.1. Motivación del estudio

En la actualidad la mayoría de los automóviles están propulsados por motores de combustión interna alternativos (MCIA), que se dividen en dos grandes grupos: motores de encendido provocado (MEP) o motores de encendido por compresión (MEC). Los problemas principales que presentan son la alta contaminación que estos producen debido al uso de combustibles basados en el petróleo, la producción de ruido y la contribución al aumento del efecto invernadero. Éstos

Los motores de encendido por compresión, más conocidos como motores diesel, en la actualidad tienen una ventaja principal frente a sus competidores, ya que poseen un consumo más reducido con unas prestaciones similares a los MEP. Esto se debe a la mejora de los sistemas de inyección y combustión, al uso de control electrónico y a la implantación de la sobrealimentación. Sin embargo estos motores tienen el inconveniente de una elevada producción de óxidos de nitrógeno (NO_x) y de partículas, por lo que las cada vez más estrictas normativas han propiciado el desarrollo de sistemas que posibiliten su reducción afectando lo mínimo posible a las prestaciones del motor.

En cuanto a la reducción de la emisión de NO_x se han implementado técnicas activas, que consisten en modificar el proceso de combustión para que se genere menor cantidad, como es la recirculación de gases de escape (EGR, del inglés Exhaust Gas Recirculation) y técnicas pasivas, que no modifican la cantidad de emisiones generada pero evita que salgan al exterior, como son las trampas de NO_x (LNT, del inglés Lean NO_x Trap) y los reductores catalíticos (SCR, del inglés Selective Catalytic Reduction).

En lo que a la emisión de partículas respecta, el principal medio para su reducción es la utilización de filtros de partículas diesel o DPF, dentro de los cuales el más extendido es el filtro de partículas de flujo de pared. Éste posee una elevada eficiencia de filtrado, muy cercana al 100 %, pero su principal inconveniente es la gran pérdida de carga que éste produce, especialmente cuando la cantidad de hollín y cenizas acumuladas en su interior es elevada. Para solucionar este problema se suele recurrir a la regeneración del DPF cuando la cantidad de partículas en el mismo aumenta, lo que necesita una elevada temperatura en el filtro que permita la oxidación del hollín. Sin embargo, las cenizas no se oxidan en este proceso, por lo que se siguen acumulando en el filtro. Por tanto, la única manera de eliminar la ceniza del filtro de partículas es mediante procesos mecánicos, para los cuales es necesario retirar momentáneamente el filtro del vehículo.

El Departamento de Máquinas y Motores Térmicos ha desarrollado una técnica de inyección de agua pre-DPF que ha sido patentada y permite reducir la pérdida de carga en el filtro de partículas. Esta inyección de agua modifica la distribución del hollín en su interior.

En este método se basa el presente proyecto, ya que servirá para conocer en más detalle cómo afecta ésta a la pérdida de presión y a la distribución de hollín en el mismo.

1.2. Antecedentes

El presente trabajo se enmarca dentro de una serie de trabajos cuyo objetivo es la comprensión de los fenómenos que afectan a la operación del filtro de partículas diesel de flujo de pared. Dentro de esta serie de trabajos se encuentran los realizados por P. Piqueras [3] y O. García [2], además de numerosos trabajos finales de grado. Además, se han realizado varios trabajos centrados en la inyección de agua pre-DPF, como es el realizado por A. Blanco [5] basado en simulaciones computacionales. Por otra parte, se han publicado tres artículos [6–8] por parte del personal del departamento que analizan el efecto de la inyección de agua en los filtros de partículas.

1.3. Objetivos del estudio

El presente proyecto se centra en el estudio de los efectos de la inyección de agua en un filtro de partículas, ya que la acumulación de hollín en su interior aumenta en gran medida la contrapresión que debe vencer el motor para expulsar los gases de escape, aumentando por tanto el consumo de combustible y las emisiones de CO_2 . Para abordar dicho estudio se pueden establecer una serie de sub-objetivos que permitan proceder a dicho análisis.

- Analizar cómo afecta la inyección de agua a la pérdida de presión en el filtro de partículas, comparando el salto de presiones antes y después de la inyección.
- Analizar cómo afecta la inyección de agua a la distribución de hollín en el interior del DPF.
- Conocer cómo afectan las condiciones de inyección de agua tanto a la distribución de hollín como a la pérdida de presión.

1.4. Metodología

Para cumplir con los objetivos anteriormente mencionados se va a seguir la siguiente metodología:

- Ensayo en banco motor en el que se produjo la carga de partículas del DPF.
- Corte del filtro en cuatro cuartos para ensayarlos por separado.
- Ensayo en banco de flujo antes y después de la inyección de agua para ver las variaciones de presión que se generan.
- Corte y observación macroscópica de la capa de hollín para analizar los cambios que se producen en la misma.
- Observación microscópica de la pared porosa con la ayuda del microscopio electrónico de barrido para ver si la penetración de hollín en el interior de la misma se ha visto afectada.

1.5. Viabilidad del estudio

El Departamento de Máquinas y Motores Térmicos dispone de los recursos necesarios para la realización del presente trabajo ya que dispone de las herramientas informáticas necesarias para su realización y de los laboratorios necesarios, como es el banco de flujo. Sin embargo no dispone de microscopio electrónico de barrido, pero la Universidad Politécnica de Valencia dispone de un servicio de microscopía electrónica. Por otro lado, el personal del Departamento disponen de la cualificación y aptitudes necesarias para llevar a cabo los ensayos y el tratamiento de los resultados obtenidos a lo largo del trabajo. En lo que se refiere a los recursos económicos, el Departamento se encarga de su financiación.

Con todo lo expuesto anteriormente se puede asegurar la viabilidad del presente trabajo.

1.6. Desarrollo del trabajo

El presente proyecto consta de tres documentos: Memoria, Pliego de condiciones y Presupuestos. No se incluye un documento con Planos ya que no se ha realizado ninguna etapa de diseño.

En primer lugar se encuentra *Documento I: Memoria* que contiene cinco capítulos, cuyo contenido se especifica a continuación:

- 1. Introducción:** Corresponde al presente capítulo y comprende la motivación del estudio, los antecedentes, sus objetivos, la metodología seguida en el mismo y su viabilidad.
- 2. Sistemas de post-tratamiento de gases de escape en MCIA:** Consiste en una revisión bibliográfica sobre las emisiones contaminantes de los MCIA y los sistemas de post-tratamiento existentes en la línea de escape, haciendo especial hincapié en el DPF, elemento en el que se basa dicho proyecto
- 3. Análisis de la pérdida de presión en el DPF:** En este capítulo se aborda el experimento realizado en banco de flujo. En primer lugar se explicará brevemente en que condiciones se cargó de hollín el filtro de partículas, ya que esto determina la pérdida de presión existente en el filtro de partículas. Seguidamente se explicará cómo se realizó el experimento en banco de flujo, en el que se midió la pérdida de presión existente en el filtro de partículas. A continuación se explica la técnica de inyección de agua pre-DPF, comentando las condiciones bajo las que se realizó la inyección en cada uno de los filtros. Para terminar este capítulo se muestran los valores de la pérdida de presión en el filtro de partículas después de la inyección de agua.
- 4. Visualización y análisis del medio poroso:** En primer lugar se hablará de las diferentes técnicas de visualización que se han utilizado para obtener las imágenes que permiten observar, tanto micro como macroscópicamente. A continuación se explicará la metodología de ensayo en cada una de las herramientas, incluyendo la preparación de las muestras en cada caso. Acto seguido se explicará el post-procesado de imágenes que se ha realizado y los resultados obtenidos con ellas.
- 5. Conclusiones:** Con este capítulo acaba este documento y en él se recogen las conclusiones que se han podido desarrollar a lo largo del proyecto.

1. INTRODUCCIÓN

Además de los cinco capítulos, la memoria también contiene un *Anexo* en el que se incluye una selección de algunas de las fotografías obtenidas durante la realización del proyecto.

A continuación se encuentra *Documento II: Pliego de condiciones* que contiene las condiciones de seguridad e higiene mínimas que se deben dar en el puesto de trabajo.

Para concluir, en el *Documento III: Presupuesto* se detallan los costes asociados al proyecto, así como el coste global del mismo.

2. Sistemas de post-tratamiento de gases de escape en MCIA

2.1. Introducción

Debido al progresivo aumento de la población mundial, que ha provocado un gran aumento de actividades industriales y del número de vehículos utilizados para el transporte, la contaminación del medio ambiente se ha visto muy acelerada en las últimas décadas, especialmente en los últimos años. Para intentar paliar este efecto, los estados están desarrollando unas normativas cada vez más estrictas en lo que a emisiones contaminantes se refiere. Esto obliga a desarrollar e implementar sistemas de post-tratamiento de gases de escape cada vez más efectivos para poder ajustarse a dichos límites.

Antes de proceder a explicar en más detalle cómo funcionan éstos o los diferentes tipos que existen, es necesaria una explicación de las diferentes emisiones contaminantes que se producen en los motores de combustión interna alternativos y las normativas sobre emisiones que se están implantando.

Una vez ya tenemos en mente las diferentes emisiones contaminantes ya estamos en disposición de explicar los diferentes sistemas de post-tratamiento existentes en la línea de escape de los motores y ver cómo afectan a cada una de las emisiones. Se hará especial hincapié en los filtros de partículas, desarrollando en primer lugar las diferentes tipologías de filtros de partículas, continuando por la explicación de una tipología en concreto: los filtros de partículas de flujo de pared. Éstos son los más utilizados para evitar la salida de partículas a la atmósfera, además de ser la tipología utilizada en este proyecto. Además de explicar las propiedades concretas que posee este tipo de filtros se comentarán las propiedades específicas del filtro de partículas utilizado en el presente proyecto.

2.2. Emisiones contaminantes

Debido a que la combustión en el interior del motor no es ideal, se produce una cierta cantidad de sustancias contaminantes para el medio ambiente que, además, tienen efectos perjudiciales para la salud. Estas sustancias son las siguientes:

- **Óxidos de nitrógeno (NO_x):** Se produce una gran variedad de óxidos de nitrógeno en el proceso de combustión, aunque se suelen designar en conjunto bajo el símbolo NO_x . En orden decreciente en lo referente a formación de los mismos son: NO , NO_2 , N_2O , NO_3 , N_2O_3 ... Sin embargo, a pesar de la gran cantidad de óxidos de nitrógeno que se producen, los que se producen en cantidades relativamente grandes y, por tanto, a los que se les da más importancia son NO , NO_2 y N_2O .

A pesar de que el que se produce en un número mayor es el óxido nítrico (NO), éste se puede convertir en NO_2 en condiciones de temperatura baja y alta concentración de oxígeno. Los principales efectos negativos que los óxidos de nitrógeno tienen, tanto fisiológica como bioquímicamente, son los siguientes:

- Son el principal responsable de la lluvia ácida, con todos los efectos negativos que ésta conlleva para el medio ambiente.
 - El NO participa en la reducción de ozono en la atmósfera, lo que facilita la entrada de radiación solar ultravioleta a la superficie terrestre.
 - El NO_2 es irritante para los pulmones, llegando a reducir la resistencia que las personas presentan frente a enfermedades infecciosas si su nivel alcanza los 600 mg/m^3 .
 - Contribuye en gran medida a la formación de smog fotoquímico, una nube amarillo-parduzca con propiedades oxidante y tóxica que causa irritaciones en los ojos y en las vías respiratorias.
- **Monóxido de carbono (CO):** Se produce como resultado de una combustión incompleta, producida por un mal control del dosado. En concreto, se produce cuando tratamos con mezclas ricas. Su producción se da en mayor medida en los motores de gasolina, siendo el principal contaminante que este tipo de motor emite. Los principales efectos negativos que provoca son:
- Reacciona con el oxígeno presente en la atmósfera, generando CO_2 , uno de los principales responsables del efecto invernadero.
 - Se combina con la hemoglobina presente en la sangre con mucha mayor facilidad que el oxígeno, por lo que en función del tiempo durante el que se esté expuesto y de la concentración en la que se encuentre sus efectos puede ir desde dolor de cabeza y somnolencia hasta incluso la muerte.
- **Hidrocarburos (HC):** La emisión de hidrocarburos sin quemar se debe a una combustión incompleta, por lo que pueden tener una composición muy heterogénea. Es por esto que pueden tener muchos y diversos efectos, aunque los principales suelen ser:
- Son sustancias muy tóxicas, por lo que pueden afectar a los pulmones y al sistema nervioso.
 - En contacto con la piel pueden producir irritaciones. Además, son susceptibles de producir cáncer.
 - Afectan negativamente a la atmósfera, ya que alteran los hábitats naturales.
- **Partículas:** Se consideran partículas cualquier materia en estado sólido o líquido presente en los gases de escape. Según el proceso mediante el que se formen se pueden distinguir dos tipos: primarias si son producto directo de la combustión y secundarias si son resultado de otros fenómenos, como evaporación, condensación o sedimentación en el proceso de dilución en la atmósfera. Las que se producen en mayor medida en los motores diesel son las segundas.

Las partículas están formadas por dos partes: una fracción orgánica soluble, compuesta por hidrocarburos y compuestos orgánicos procedentes del lubricante y del combustible; y una parte insoluble, compuesta por hollín principalmente, aunque también puede contener sulfatos, sales y agua.

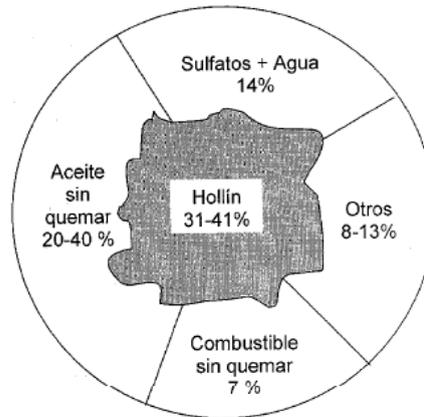


Figura 2.1: Esquema de la composición media típica de las partículas [1].

Además de diferenciarse por el mecanismo de formación, también lo hacen por su tamaño. Esto es especialmente importante, ya que según el tamaño tendrán diferentes efectos para la salud. Hasta la EURO 5 las normativas no regulaban el tamaño de las partículas liberadas, sino que únicamente regulaban la masa total emitida. Sin embargo, en la normativa actual (EURO 6) se limitan tanto en masa como en número. Cabe destacar que las partículas más peligrosas son las de menor tamaño debido a lo siguiente:

- La superficie específica de estas partículas es mayor, lo que facilita la absorción de los compuestos que las componen, muchos de ellos cancerígenos.
- El tiempo de residencia en la atmósfera es mayor, por lo que su probabilidad de ser inhaladas aumenta. Además, contribuyen al ensuciamiento de edificios.
- Debido a su pequeño tamaño penetran muy fácilmente en los pulmones e, incluso, en el torrente sanguíneo. De este modo pueden causar infecciones y enfermedades del sistema respiratorio.

Uno de los problemas que tienen las partículas más pequeñas es que en algunos casos son capaces de atravesar las trampas de partículas, ya que algunas de ellas son incapaces de retenerlas en su interior.

- **Óxidos de azufre (SO_x):** La mayoría de los combustibles líquidos presenta cierta cantidad de azufre. Dicha sustancia es muy peligrosa y contribuye a la formación de óxidos de azufre o SO_x , por lo que se intenta reducir todo lo posible la cantidad de azufre en los combustibles. Sin embargo esto entraña varios problemas: las centrales de refinado de los combustibles aumenta la producción de CO_2 debido a la gran cantidad de energía necesaria para el proceso de hidrosulfuración y los motores pierden la lubricidad que le aporta el azufre, lo que puede conllevar el desgaste de sus componentes y la necesidad de añadir mayores cantidades de lubricante para contrarrestarlo.

Los efectos más perjudiciales de los óxidos de azufre para la salud son:

- Son altamente tóxicos, pudiendo llegar a producir daños neurológicos, cardíacos y respiratorios.
- Afectan negativamente a la vista y a la piel.

2.3. Normativa

Una vez que ya conocemos exactamente las emisiones contaminantes que producen los motores de combustión interna alternativos ya nos podemos centrar en las limitaciones que se han ido imponiendo a lo largo de los años. En este aspecto cobra especial importancia el año 1992, ya que se produjo un importante cambio en las legislaciones europeas. En dicho año se impuso la EURO 1, a partir de la cual se han ido imponiendo normativas más estrictas con el paso del tiempo y se han ido nombrando como EURO 2, 3... hasta llegar a la EURO 6, la normativa actual.

Los motores diesel tienen unas prestaciones y una eficiencia mayor que los motores de encendido provocado, pero también producen una mayor cantidad de emisiones contaminantes, especialmente óxidos de nitrógeno y partículas. Es por ello que las normativas europeas se centran especialmente en reducir las emisiones de éstos. En la siguiente figura se muestra cómo han ido avanzando las emisiones a lo largo de los años desde 1992.

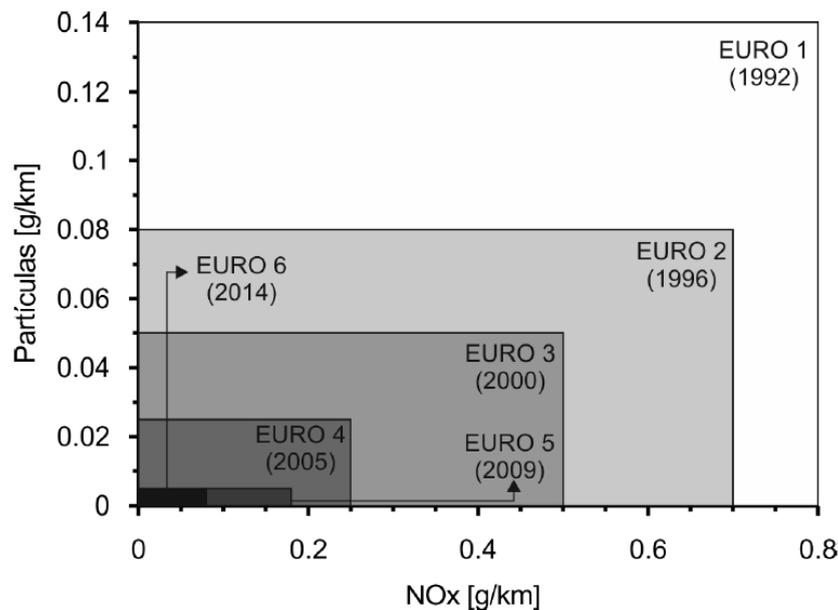


Figura 2.2: Normativa europea sobre la emisión de partículas y NO_x para vehículos diesel ligeros [2].

De la figura anterior cabe destacar la notable reducción de emisión de partículas conforme se han ido implementando las normativas, especialmente en las normas EURO 5 y 6, lo que ha obligado a que todos los motores incorporen el filtro de partículas en la línea de escape. A continuación se exponen los diferentes sistemas de post-tratamiento que se han implementado para reducir las emisiones y ajustarse a las normativas.

2.4. Sistemas de post-tratamiento

Una vez que ya conocemos las diferentes emisiones contaminantes que producen los motores de combustión interna alternativos, vamos a explicar los diferentes sistemas implementados en la línea de escape para reducir cada emisión, explicando las ventajas e inconvenientes que presentan cada uno de ellos [1].

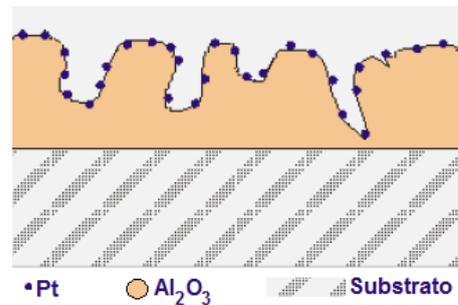
Catalizadores

Su principal función es la de acelerar las reacciones de oxidación o reducción que no han conseguido alcanzar el equilibrio químico. Contienen una sustancia catalizadora, que permite alcanzar un mayor rendimiento y/o una mayor velocidad, unido a una temperatura de funcionamiento menor, lo que facilita en gran medida las reacciones de oxidación o reducción. La nombrada sustancia catalizadora se deposita sobre un sustrato alrededor del que han de pasar los gases de escape. Al pasar alrededor del mismo entran en contacto con la sustancia catalizadora, beneficiando las reacciones mencionadas. Los catalizadores suelen estar compuestos por paladio (Pd), platino (Pt), rodio (Rh) o por una mezcla de los anteriores.

Suelen estar compuestos por un monolito con una estructura de panel de abeja en su interior fabricada con materiales metálicos o cerámicos. Además, para aumentar la superficie de contacto con las sustancias catalizadoras se añade un recubrimiento (washcoat) sobre la superficie que forman los canales del monolito. En la figura 2.3 se pueden observar tanto la estructura de un catalizador monolítico como la estructura de los canales con el washcoat para aumentar la superficie de contacto.



(a) Estructura de un catalizador de monolito cerámico.

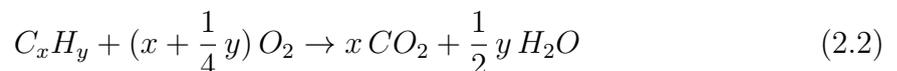


(b) Estructura de los canales con washcoat.

Figura 2.3: Catalizador.

Existen tres tipos de catalizadores:

- Catalizador de oxidación: El catalizador de oxidación diesel (DOC, del inglés Diesel Oxidation Catalyst) permite oxidar el monóxido de carbono, los hidrocarburos sin quemar y la fracción másica soluble. Dichas reacciones de oxidación son las siguientes:



Cabe destacar que la oxidación del NO en NO_2 es beneficiosa, ya que aumenta la eficiencia de los sistemas de post-tratamiento de NO_x , como son el SCR y el LNT que se explicarán más tarde. Además, es un oxidante del hollín presente en el filtro de

partículas a bajas temperaturas. Por otra parte, el SO_3 contribuye a la desactivación del catalizador, por lo que la reacción de oxidación de azufre es indeseada.

- Catalizador de reducción: Permite la reducción de óxidos de nitrógeno, para lo que es necesario una mezcla rica en gases de escape y con poco oxígeno. Su principal problema es que ante muestras con mucho oxígeno son muy ineficaces, por lo que son necesarios otros sistemas de reducción de NO_x , como son el SCR y el LNT.
- Catalizador de tres vías: Puede comportarse como catalizador de oxidación o de reducción en función de la cantidad de oxígeno presente. El rendimiento de conversión de CO , HC y NO es elevado en un rango bastante estrecho de dosado relativo, muy cercano al estequiométrico. Esto provoca que se suelen emplear en motores con mezcla homogénea que tengan un control de inyección de combustible muy preciso.

Sistema de reducción catalítica selectiva

El sistema de reducción catalítica selectiva o SCR (del inglés Selective Catalytic Reduction) permite la reducción de los óxidos de nitrógeno a pesar de que la concentración de oxígeno en los gases de escape no sea reducido. Sin embargo, para ello, necesita la presencia de amoníaco, cuya inyección añade el problema de su elevada toxicidad. Para solucionar dicho problema se inyecta urea, que permite generar amoníaco cuando se inyecta aguas arriba de un catalizador de hidrólisis. Además, para evitar que se emita amoníaco a la atmósfera se suele incorporar otro catalizador tras el SCR.

Habitualmente se suele colocar aguas arriba de la inyección de urea un catalizador de oxidación, ya que de este modo se reduce la concentración de HC y CO y se oxida parte de NO y NO_2 antes de llegar al SCR. En la figura 2.4 se muestran un esquema de configuración del catalizador SCR con inyección de urea.

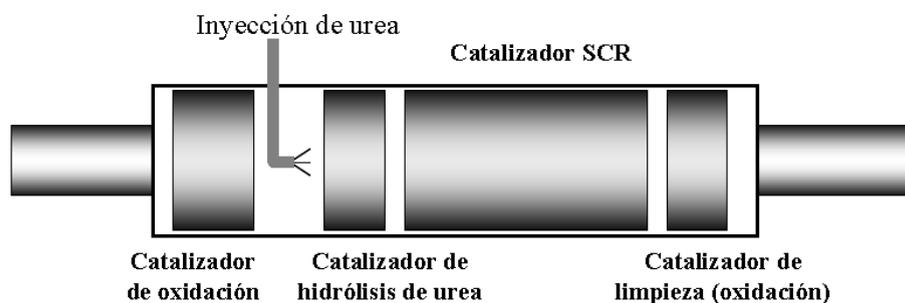
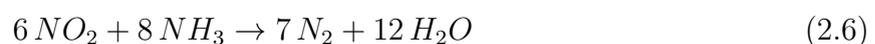
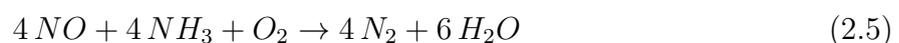


Figura 2.4: Esquema de la configuración del catalizador SCR con inyección de urea [1].

Las reacciones químicas más importantes que se dan en el interior del catalizador SCR son las siguientes:



LNT

La trampa de NO_x o LNT (del inglés, Lean NO_x Trap) es un mecanismo para reducir la concentración de óxidos de nitrógeno. En su interior se oxidan los NO_x a NO_2 y se acumulan cuando se trabaja con mezclas pobres, mientras que cuando la mezcla es rica el NO reacciona con CO y se forma CO_2 y N_2 , que se liberan. Puesto que los motores de encendido por compresión trabajan siempre con mezclas pobres, para regenerar dichas trampas se inyectan hidrocarburos en el escape o en el interior del cilindro durante la etapa de expansión.

Este sistema de post-tratamiento presenta el mejor comportamiento en la retención de NO_x en mezclas pobres, pero tienen el problema de sufrir envenenamiento si el combustible posee azufre.

Filtro de partículas

El filtro de partículas o DPF (del inglés Diesel Particulate Filter) es un sistema de post-tratamiento pasivo que reduce la emisión de partículas al exterior. Debido a las cada vez más estrictas normativas en emisión de partículas, se han convertido en un elemento ampliamente utilizado en los motores actuales. Para reducir la emisión de partículas las acumula en su interior, lo que conlleva el problema de un aumento en la contrapresión de escape que el motor ha de vencer.

Los requerimientos más importantes que deben cumplir los filtros de partículas son los siguientes:

- No deben generar una pérdida de presión muy elevada, puesto que esto conllevaría una disminución de las prestaciones del motor.
- Eficiencia de filtrado elevada, necesaria para cumplir las normativas cada vez más exigentes.
- Vida útil larga ante las elevadas temperaturas que se dan en el DPF.
- Resistencia mecánica, al choque térmico y al ataque químico.
- Gran capacidad de almacenamiento de partículas con pérdidas de presión no muy elevadas.
- No causar efectos negativos en la conducción, como pueden ser ruidos o vibraciones.
- Bajo coste de fabricación y de mantenimiento.

Puesto que es el dispositivo en el cual se centra el presente estudio, se va a desarrollar en los próximos apartados con mayor detalle las diferentes tipologías que hay, cada una con sus ventajas e inconvenientes.

2.5. Tipos de filtros de partículas

Para empezar a explicar los diferentes tipos haremos una distinción en función de si los gases se ven obligados a atravesar una pared (wall-flow) o si únicamente pasan junto a ellas,

pero no existe tal obligación (flow-through). A continuación se muestra un esquema de ambas configuraciones:



Figura 2.5: Esquema comparativo de la estructura wall-flow y flow-through.

La ventaja principal de la estructura wall-flow es su elevada eficiencia de filtrado, pero su desventaja principal es la elevada pérdida de presión en este tipo de filtros, que a medida que se va acumulando el hollín en su interior se hace aún mayor. Por contraposición, los filtros flow-through tienen la ventaja de presentar menor pérdida de presión, a costa de una eficiencia de filtrado mucho menor. Es por ello que a medida que se van endureciendo las normativas de emisiones de partículas se tiende a filtros de tipo wall-flow. Dentro de estos los más utilizados son los monolitos cerámicos de flujo de pared. A continuación se expondrán cada una de las diferentes tipologías de filtros de partículas.

Fibras cerámicas

Existen multitud de filtros de partículas diesel que están fabricados con fibras cerámicas resistentes a elevadas temperaturas. Dentro de éstos los más comunes son los de cartuchos de fibras cerámicas, que están fabricados con fibras de hilo de empaquetado continuo alrededor de un soporte de acero, y los basados en láminas delgadas de fibras cerámicas.

En los primeros los gases entran en una especie de depósito cuya única salida es pasar a través de la capa de fibra porosa y, de ese modo, pasar a los conductos perforados que forman el filtro. Uno de los principales problemas de este tipo de filtros es que las cenizas quedan atrapadas entre las fibras, por lo que resulta imposible su extracción. Por otra parte tienen el problema de soportar únicamente temperaturas de hasta 900°C , bastante baja en comparación con las altas temperaturas que se pueden producir, lo que limita su utilización.

En el segundo tipo de filtros basados en fibras cerámicas se fabrican láminas a modo de papel o tela a partir de las fibras. Este tipo de filtros opera, al igual que los filtros de fibras cerámicas de empaquetado continuo, en régimen de filtrado en lecho profundo, en el que el hollín se va acumulando en el interior de la pared porosa. La diferencia entre ambos es que a medida que se van acumulando partículas en la pared, en los filtros basados en láminas puede llegar a producirse filtrado superficial, donde las partículas se van depositando en la superficie de la pared.

Ambos tipos de filtros permiten la regeneración de los mismos mediante la aditivación de catalizadores en el combustible, quemadores de combustible o resistencias eléctricas. Sin embargo, no permiten impregnar las fibras con catalizadores, lo que limita en gran medida su implantación a nivel comercial.

Espumas cerámicas

En el pasado las estructuras de espumas rígidas cerámicas fueron muy estudiadas para los filtros de partículas. Sin embargo, en la actualidad han caído en desuso. Éstas poseen poros esféricos grandes y abiertos. Para su fabricación se impregna una matriz de espuma de poliuretano con una pasta cerámica y, una vez ha solidificado la pasta cerámica se calcina para descomponer el poliuretano. Los materiales con los que se fabrican suelen ser cordierita o carburo de silicio, permitiendo ambos la catalización del filtro. En la figura 2.6 se puede observar la estructura resultante de una espuma cerámica. Como consecuencia de su estructura, con grandes poros, poseen una eficiencia de filtrado bastante baja, en torno al 60% o 70%. Además pueden emitirse partículas que habían sido previamente acumuladas. Para evitar esta emisión habría que aumentar considerablemente el volumen del filtro. Otro de los problemas que presentan son sus débiles características mecánicas, lo que unido a una baja resistencia al choque térmico limita en gran medida su uso actualmente frente a otros que poseen mejores propiedades.

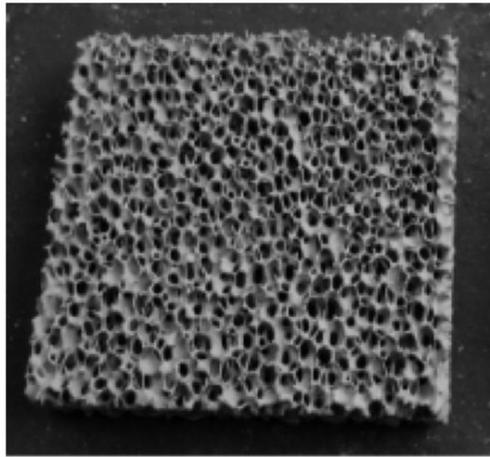


Figura 2.6: Substrato genérico de espuma cerámica [3]

Filtros metálicos

Su principal ventaja frente a otros tipos de filtros es la posibilidad de regeneración que presentan, ya que son compatibles con una amplia variedad de métodos. Además presentan una alta conductividad térmica, lo que reduce el riesgo de puntos calientes y facilita la distribución de temperaturas uniforme, muy beneficioso en el proceso de regeneración. Por otro lado, la pérdida de presión no se ve muy afectada por el aumento de masa de partículas y se mantiene bastante.

No obstante, estos también presentan varios inconvenientes, ya que son más susceptibles de ser afectados por corrosión que los cerámicos. Además tienen la desventaja de expulsar parte de las partículas ya filtradas si la masa de partículas aumenta mucho debido a su elevada porosidad.

Los filtros metálicos más comunes están basados en el empleo de fibras y están fabricados por paquetes de mallas o lanas metálicas. Al igual que pasa con los filtros de fibras cerámicas, predomina el filtrado en lecho profundo. Cuando no poseen partículas en su interior poseen una eficiencia de filtrado no muy elevada, pero a medida que aumenta la cantidad de partículas de su interior aumenta la eficiencia de filtrado. Ésto es así hasta que alcanza un

máximo provocado por la emisión de partículas que estaban retenidas en su interior. Para aumentar la eficiencia de filtrado se suelen añadir polvos de metales sinterizados. En este caso sus propiedades mecánicas vienen controladas por la malla metálica, mientras que los parámetros del medio poroso dependen del polvo metálico y del proceso de sinterizado. La estructura más común en estos últimos es el diseño basado en láminas de malla de acero inoxidable recubierta de polvos metálicos sinterizados. A continuación se muestra una imagen de la estructura de los filtros metálicos y cómo son sus canales.

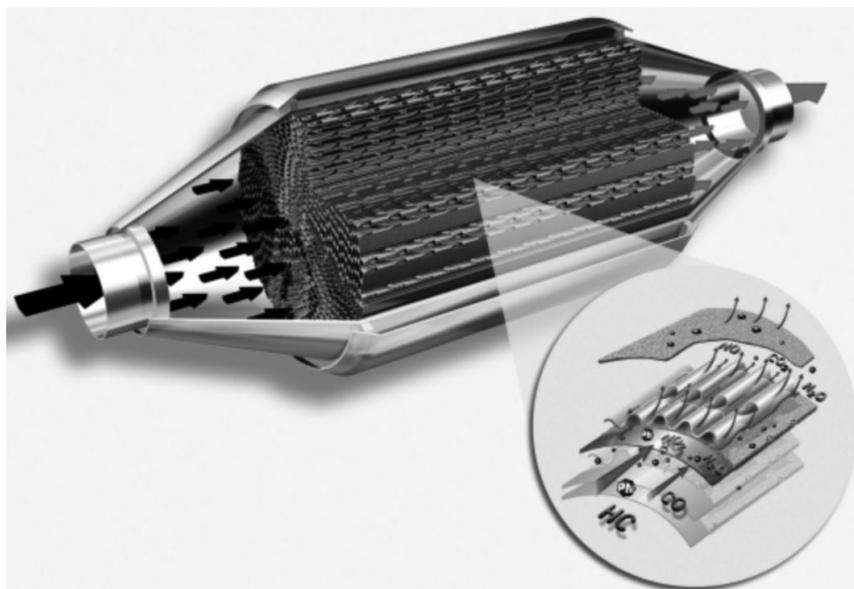


Figura 2.7: Filtro de partículas metálico [4].

Monolito cerámico de flujo de pared

Debido a que este tipo de filtro es el más extendido y el utilizado en el presente trabajo se va a dedicar el siguiente apartado a explicar con mucho más detalle que los anteriores cuales son sus propiedades. A continuación se muestra una tabla resumen de los tipos de filtros de partículas más utilizados en la que se pone en manifiesto las importantes ventajas que supone este tipo de filtros.

Tabla 2.1: Tabla resumen con las características más relevantes de los principales tipos de DPF [3].

Tipo de filtro de partículas	Temperatura máxima [°C]	Eficiencia de filtrado [%]	Flexibilidad de regeneración
Monolito cerámico de flujo de pared	1200-1800	>95	Máxima
Fibras cerámicas	700-900	65-90	No posible uso de catalizadores impregnados
Filtro metálico	1000	20-70	En algunos casos, no posible el uso de catalizadores impregnados

2.6. Filtros de partículas diesel de flujo de pared

El monolito cerámico de flujo de pared, como ya se ha dicho, es el tipo de trampa de partículas que presenta una mayor difusión. Esto se explica por la robustez que presenta y por la elevada eficiencia de filtrado que posee. Suelen tener una forma cilíndrica con conductos en su interior. El gas de escape entra por la mitad de los canales que poseen abierta la entrada y sellada la salida. De este modo, se obliga al gas a atravesar la pared porosa que comparte dicho canal de entrada con el correspondiente canal de salida, encontrándose este último con la entrada sellada y la salida libre. En el esquema de la figura 2.8 se ve claramente cómo es la estructura de un filtro de partículas de flujo de pared.

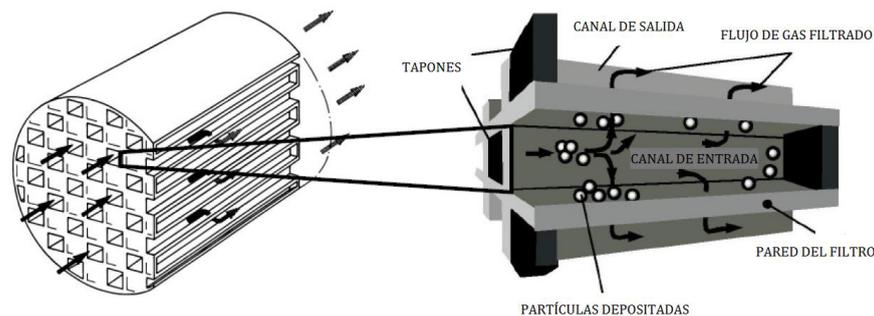


Figura 2.8: Esquema de un filtro de partículas de flujo de pared [5].

Este tipo de filtros se puede fabricar de dos materiales diferentes: carburo de silicio o cordierita. La cordierita es una cerámica sintética con bajo coeficiente de expansión térmica, lo que la convierte en un material muy resistente a elevadas temperaturas y a ciclos térmicos. Por otro lado, el carburo de silicio presenta una elevada resistencia a la temperatura y alta conductividad térmica, pero posee un coeficiente de expansión más elevado que la cordierita. Además su coste es mayor. Es por esto que está más extendido el uso de cordierita para la fabricación de los filtros de gran tamaño, como son los utilizados en motores de camión, mientras que para filtros de tamaño más reducido se utiliza el carburo de silicio.

Como ya se había nombrado antes, existen dos mecanismos de filtrado: filtrado en lecho profundo y filtrado superficial. Cuando el filtro está limpio el mecanismo de filtrado predominante es el filtrado en lecho profundo, donde las partículas se van depositando en el interior de la pared porosa. No obstante cuando se satura la pared porosa las partículas no pueden entrar en el interior de los poros y comienzan a acumularse sobre la superficie externa de la pared, mecanismo conocido como filtrado superficial. A continuación se muestra un esquema de ambos mecanismos de filtrado.

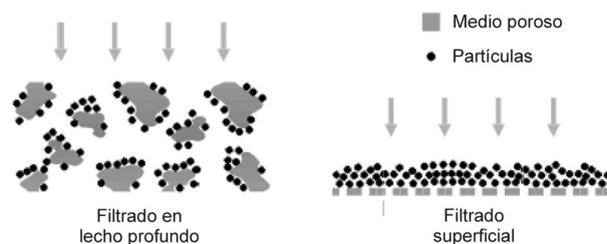


Figura 2.9: Esquema de los mecanismos de filtrado en un filtro de partículas diesel [3].

A continuación se exponen los parámetros que caracterizan dichos filtros.

Parámetros de la estructura celular

Para comenzar hablando de la estructura celular de este tipo de filtros se van a exponer las diferentes geometrías de los canales. En el presente proyecto se ha utilizado un filtro de partículas con una geometría de canales cuadrados, similar a la geometría mostrada en la sección a) de la figura 2.10. En esta geometría los canales de salida y entrada son exactamente iguales con la única diferencia de si éstos poseen un tapón en la entrada o en la salida.

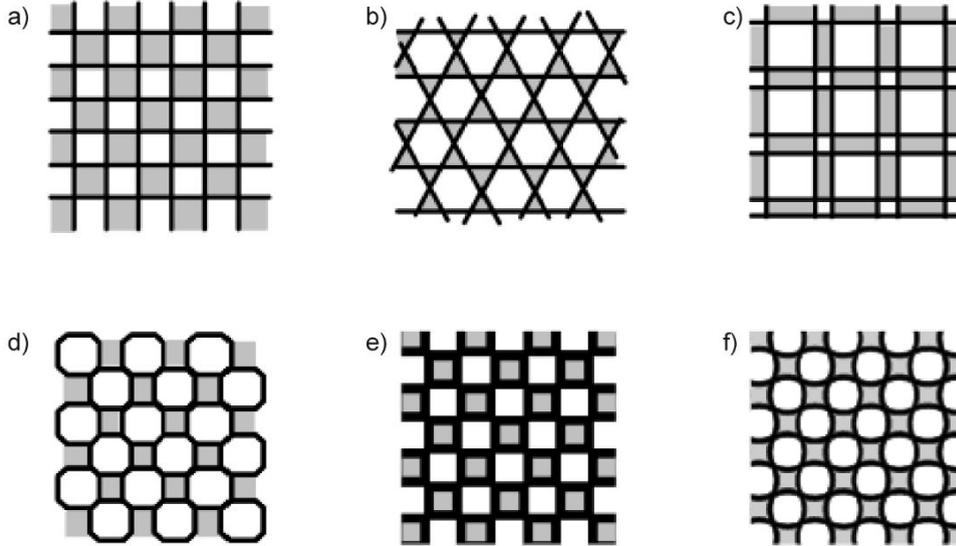


Figura 2.10: Esquema con diferentes tipos de canales. a) Cuadrado; b) Hexagonal/Triangular; c) Cuadrado/Rectangular; d) Octogonal/Cuadrado; e) Cuadrado asimétrico; f) Celda ondulada [3].

Para caracterizar los DPF se suele utilizar la densidad de celdas del monolito (σ), definida como el número de canales por unidad de área de la sección transversal. En nuestro caso, al tratar con una geometría de canales cuadrados, la densidad de celdas se puede definir a través del lado del canal (α) y del espesor de la pared porosa (w_w) mediante la ecuación 2.7. Las unidades de medida de la densidad de celdas en el sistema internacional es $1/m^2$, pero en la industria se suele utilizar el número de celdas por pulgada cuadrada o *cpsi* (del inglés, *cells per square inch*)

$$\sigma = \frac{1}{(\alpha + w_w)^2} \quad (2.7)$$

El número de canales que posee el monolito se puede definir de manera muy simple a partir de la densidad de celdas y del área transversal del monolito (A_t)

$$N_{canales} = A_t \sigma \quad (2.8)$$

Otro parámetro importante es la fracción abierta de área frontal (*OFA*, del inglés *open frontal area*), que se puede obtener del siguiente modo:

$$OFA = \frac{A_{abierta}}{A_t} = \frac{\alpha^2 \cdot N_{c.entrada}}{A_t} = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{2} = \frac{\alpha^2}{2(\alpha + w_w)^2} \quad (2.9)$$

También suele ser importante definir la superficie de filtrado específica (SFA, del inglés Specific Filtration Area). Este parámetro relaciona la superficie de filtrado del monolito completo (FA, del inglés Filtration Area) con el volumen total del monolito (V_{filtro}). La ecuación que permite obtener este parámetro a partir de los parámetros geométricos del filtro de partículas es la siguiente:

$$SFA = \frac{2\alpha}{(\alpha + w_w)^2} \quad (2.10)$$

El área de filtrado se puede definir a partir de varios parámetros geométricos del filtro, como son la longitud total del filtro (L), la longitud del sellado de los canales (l_s) y la anchura del canal. En la figura 2.11 se muestra un esquema con los parámetros geométricos descritos. Además se necesita conocer el número de canales de entrada. La ecuación mediante la que se puede obtener es la siguiente:

$$FA = 4\alpha(L - l_s) N_{c.entrada} = SFA \cdot V_{filtro} \quad (2.11)$$

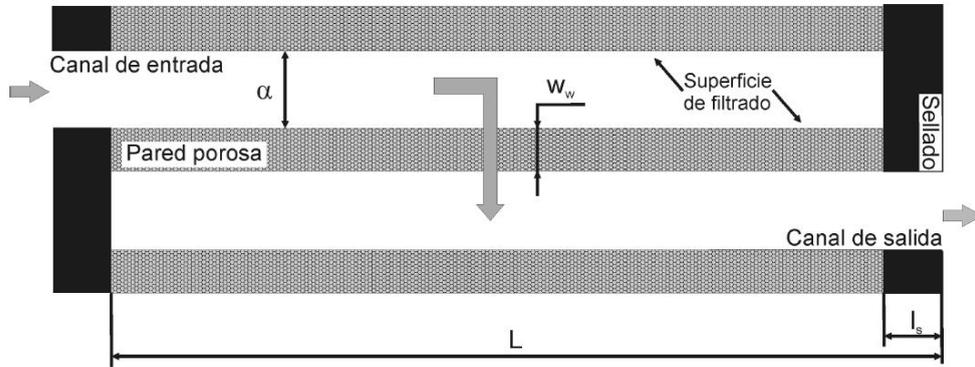


Figura 2.11: Esquema de la estructura celular [3].

Una vez descritos los principales parámetros que definen la estructura celular se van a exponer los parámetros que definen la pared porosa.

Parámetros de la estructura porosa

Se van a definir a continuación los tres parámetros principales que definen la pared porosa: la porosidad, el diámetro medio de poro y la permeabilidad.

Porosidad(ϵ)

Representa la fracción del volumen de la muestra que está ocupada por poros.

Cabe destacar la existencia de tres tipos diferentes de poros, donde no todos ellos contribuyen al filtrado de partículas. Los tres tipos de poros posibles son:

1. Poros interconectados: Este tipo de poros forman una fase continua, ya que conectan poros a más de un espacio vacío. Este tipo de poros son el principal contribuyente al proceso de filtrado. Es por tanto que este tipo de poros determina la porosidad efectiva.
2. Poros aislados: Este tipo de poros no está conectado con ningún otro, por lo que no contribuyen al proceso de filtrado y no están contemplados en la porosidad efectiva.

3. Poros ciegos: Son poros que están conectados únicamente por un lado a otro poro, por lo que su contribución al proceso de filtrado resulta despreciable.

Diámetro medio de poro (d_p)

Otro punto a tener en cuenta con los poros es su tamaño. Éstos no son regulares, por lo que para su caracterización se realiza una idealización, considerando que tienen forma esférica. Por tanto, para definir su tamaño se define el diámetro medio de poro (d_p).

Con el diámetro medio de poro, la porosidad y la interconectividad de los poros queda definida la capacidad de filtrado de partículas por parte del medio poroso. Ésto a su vez, junto con las propiedades geométricas del monolito, define la pérdida de presión en el DPF.

Puesto que se busca una elevada eficiencia de filtrado viene impuesta una baja porosidad del medio poroso y un tamaño de poro pequeño. Esto hace que los filtros sean muy resistentes y permiten la acumulación de una gran cantidad de partículas, pero provoca que la caída de presión en el filtro sea elevada. En la figura 2.12 se muestra como afecta el tamaño de los poros a la pérdida de presión y a la eficiencia de filtrado.

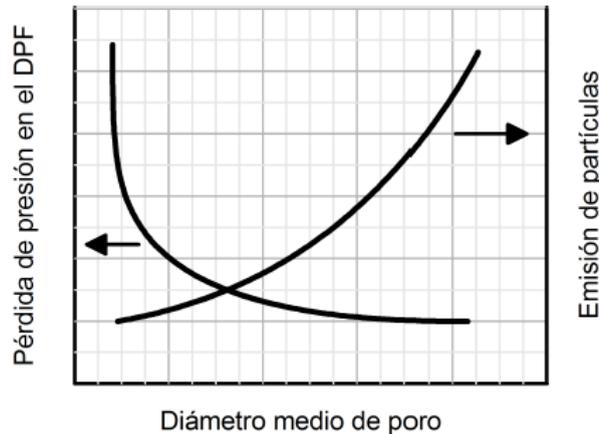


Figura 2.12: Efecto del diámetro medio de poro en la pérdida de presión y la emisión de partículas [2].

Permeabilidad

La permeabilidad es el término que mejor define el medio poroso. Determina la capacidad de penetración en el medio poroso de un fluido newtoniano. El problema principal es que depende tanto de las propiedades del medio poroso como del fluido. Es por esto que se suele utilizar dicho término para referirnos a la permeabilidad específica, que únicamente depende del medio poroso.

La permeabilidad (k) se puede definir a partir de la ley de Darcy (ecuación 2.12) de los medios porosos. Ésta relaciona el gradiente de presiones con la viscosidad dinámica (μ), la velocidad de pared o de filtrado (u_w) y la permeabilidad.

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\mu}{k} u_w \quad (2.12)$$

Cabe destacar que la permeabilidad depende tanto del diámetro medio de poro como de la porosidad y que varios autores han propuesto diferentes ajustes.

Una vez se han explicado los principales parámetros que permiten definir las propiedades de los filtros de partículas se va a explicar en qué consiste el método de la regeneración para la reducción de la pérdida de presión en el DPF debida a la acumulación de hollín en el mismo

Regeneración

Como ya se ha comentado, a medida que se va acumulando hollín en el filtro de partículas y el espesor de la capa de partículas presente sobre la superficie de filtrado se hace mayor aumenta en mayor medida la pérdida de presión, perjudicando en gran medida a las prestaciones del motor. Esto obliga a realizar procesos para reducir dicha pérdida de presión. Actualmente el método que se lleva a cabo es la regeneración, que consiste en la oxidación del hollín presente en el mismo. Para el proceso de regeneración se requiere una temperatura elevada, por lo que en función de la temperatura del gas y de las paredes del monolito se podría llevar a cabo de forma continua o periódica.

Hay varios mecanismos de regeneración y se pueden dividir en activos y pasivos. Los sistemas pasivos se basan en la introducción de aditivos en el combustible o la catalización del filtro, mientras que en la regeneración activa se necesitan de sistemas auxiliares para alcanzar en momentos puntuales temperaturas elevadas necesarias para comenzar el proceso de regeneración. Los mecanismos activos más comunes son el uso de post-inyección o una postcombustión aguas arriba del DPF y la disposición de resistencias eléctricas alrededor del filtro. Cabe destacar que los mecanismos activos aumentan el consumo de combustible por el motor, por lo que se suelen desarrollar sistemas de regeneración mixta, en los que parte del hollín se va regenerando poco a poco, pero cuando se llega a niveles de hollín elevados se realiza una regeneración activa puntual.

Cabe destacar que el proceso de regeneración es útil para la oxidación del hollín acumulado en el filtro, pero además del hollín también se depositan cenizas en su interior, que no son regeneradas. A pesar de generarse en una proporción mucho menor que el hollín, debido a que no son eliminadas, se van acumulando poco a poco y provocan un aumento progresivo de la pérdida de presión.

3. Análisis de la pérdida de presión en el DPF

3.1. Introducción

Los filtros de partículas actuales, necesarios para reducir las emisiones de partículas, conllevan una pérdida de presión. Ésta provoca un aumento en el trabajo de bombeo del motor, lo que penaliza al consumo de combustible y las prestaciones del motor.

Tal y como se ha comentado en el capítulo anterior, hasta ahora se recurría al uso de la regeneración para eliminar el hollín acumulado dentro del filtro, de modo que se reduce la pérdida de presión en el motor. Sin embargo, el método de inyección de agua pre-DPF, actualmente en estudio y que todavía no se ha implementado en motores, permite reducir la contrapresión de escape sin necesidad de recurrir al proceso de regeneración y sin reducir la masa de partículas acumulada. Previa a la realización de este proyecto ya se habían realizado estudios que demostraban la eficacia de la técnica de inyección de agua pre-DPF para reducir y/o controlar la pérdida de presión [6–8]

En este apartado se explican en primer lugar las propiedades del filtro utilizado en el proyecto. A continuación se explicará en qué condiciones se realizó la carga de partículas del filtro. Acto seguido se explicará cómo se realizó el ensayo en banco de flujo en el que se midió la pérdida de presión antes de la inyección de agua pre-DPF. Seguidamente se explicará la técnica de inyección de agua y las condiciones en las que se realizó, para acabar con los valores de pérdida de presión medidos después de la inyección de agua.

3.2. Caracterización de la pérdida de presión en banco de flujo

Para la realización del experimento en banco de flujo era necesario un filtro de partículas que previamente hubiera sido cargado con hollín. Las propiedades del filtro utilizado en el presente estudio vienen recogidas en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Características del DPF utilizado.

Parámetro	Unidades	Valor	Parámetro	Unidades	Valor
Longitud	[mm]	225	Diámetro	[mm]	140
Volumen	[l]	3,46	Área de filtrado	[m ²]	2,64
Anchura canales	[mm]	1,42	Espesor pared porosa	[mm]	0,46
Número de canales	[-]	4240	Densidad de celdas	[cpsi]	180
Porosidad	[-]	0,39	Diámetro medio de poro	[μm]	18,8

El filtro de partículas utilizado en los ensayos está formado por cuatro cuartos unidos por una pequeña capa de cemento tal y como se muestra en la figura 3.1. Para la realización del ensayo en banco de flujo se separaron los cuatro cuartos después del proceso de carga, lo que permite analizar el efecto de la inyección de agua bajo tres condiciones diferentes y dejar un cuarto como referencia, lo que ha sido especialmente útil para la visualización de la capa de partículas que se comentará en el próximo capítulo.

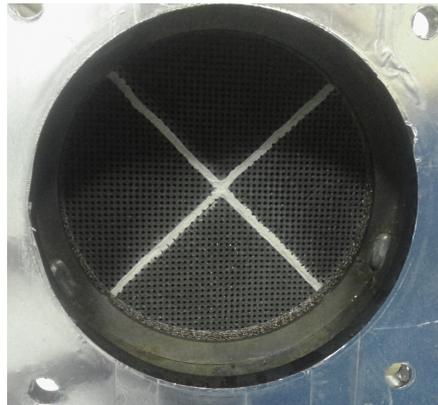


Figura 3.1: Filtro de partículas utilizado antes de separar los cuatro cuartos que lo forman.

Además de las propiedades del filtro, es importante conocer cómo se realizó la carga del DPF. Para ello se montó el filtro en un banco motor y estuvo funcionando durante ocho horas, durante las cuales se acumuló una masa de partículas en el DPF de 44,6 g. En dicho banco se utilizó un motor diesel con las características que se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Características del motor utilizado en el proceso de carga.

Parámetro	Unidades	Valor
Número de cilindros	[-]	4
Cilindrada	[cm ³]	1461
Diámetro	[mm]	76
Carrera	[mm]	80,5
Válvulas	[-]	4 por cilindro
Relación de compresión	[-]	15,3:1
Potencia máxima	[kW]	77 a 4000 rpm

Además de las propiedades del motor es importante conocer los datos del punto de funcionamiento del motor durante el proceso de carga. Estos se exponen en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Punto de funcionamiento del motor durante el proceso de carga.

Parámetro	Unidades	Valor
Régimen de giro	[rpm]	2250
Grado de carga	[%]	20
Gasto másico de aire	[kg/h]	75
Combustible inyectado	[kg/h]	2,7
Inyección principal	[mg/cc]	8,7 – SOI -3,55 ^o
Pre-inyección	[mg/cc]	1,3 – SOI -26,5 ^o

Para poder ensayar y caracterizar los cuartos de DPF fue necesario construir una estructura en la que se pudiera instalar los cuartos de DPF. Dicha estructura está compuesta por un tubo cilíndrico con dos planchas separadas exactamente la longitud del filtro, de modo que las planchas coinciden con las superficies de entrada y salida del DPF. Las planchas permiten tapar tres cuartas partes de la superficie frontal y dejar una cuarta destapada. Esto permite la colocación del cuarto de filtro y su sellado, de forma que el aire pase únicamente por los canales y no presente fugas que puedan alterar las medidas de pérdida de presión. En la figura 3.2 se puede observar dicha estructura con un cuarto colocado y listo para proceder al ensayo.



Figura 3.2: Estructura para el ensayo de los cuartos de DPF con un cuarto montado y sellado.

Una vez se ha explicado cómo es la estructura que permite ensayar los cuartos de DPF se va a explicar cómo se hizo el montaje en el banco de flujo. Para poder realizar el experimento a diferentes temperaturas se colocó un calentador de aire aguas arriba del filtro de partículas. Ésto permitió realizar las medidas de pérdida de presión en los cuartos de DPF a temperatura ambiente y a 100 y 200 °C, temperaturas más cercanas a las que se dan realmente en el DPF cuando está instalado en la línea de escape del motor. En la figura 3.3 se puede observar el montaje en banco de flujo con el calentador de aire y la estructura con el cuarto de filtro listo para proceder al ensayo.

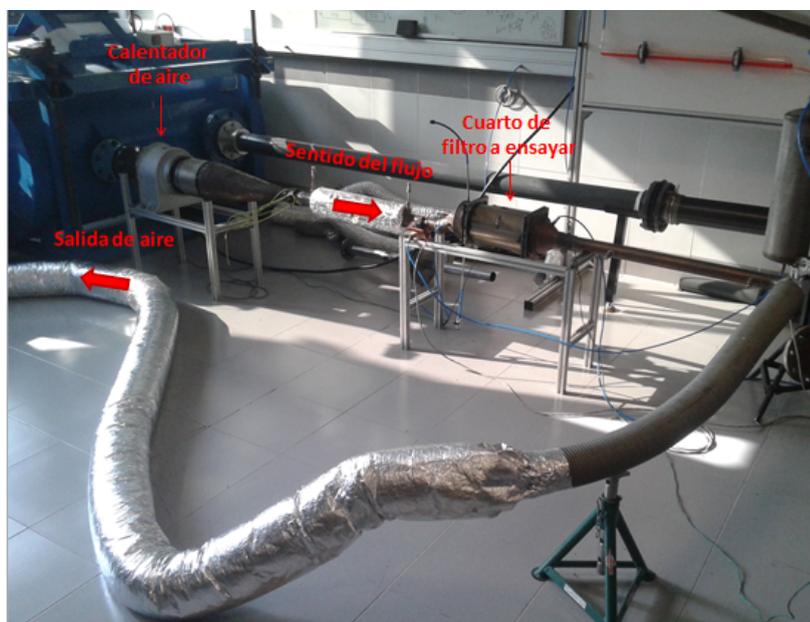


Figura 3.3: Montaje en banco de flujo para la medida de la pérdida de presión.

3. ANÁLISIS DE LA PÉRDIDA DE PRESIÓN EN EL DPF

Para cuantificar la pérdida de presión en el filtro de partículas se midió la diferencia de presión entre los conos de entrada y salida de la estructura que contiene el cuarto de filtro. Además se midió el salto de presión entre el ambiente y el remanso que se encontraba aguas arriba del calentador de aire para saber las condiciones del aire antes de pasar por el mismo y por la trampa de partículas. También se midió el salto de presiones entre la entrada de la estructura que contiene los cuartos de DPF y el ambiente. Además se midió la presión ambiente, lo que permite conocer todas las presiones, ya que por diferencias de presiones se puede obtener el valor de presiones en cada punto.

No solo se midió la presión, sino que se colocó un sensor de temperatura en el cono de entrada del DPF, lo que permitió conocer en cada momento la temperatura del aire en la entrada del filtro de partículas y asegurar así que el ensayo se estaba realizando en las condiciones deseadas. También se colocó un sensor de temperatura en la salida del DPF para saber cuando se estabiliza la misma y saber cuando acaba el transitorio térmico. Además se midió la temperatura ambiente.

Para obtener las diferencias de presión anteriormente nombrados se utilizaron columnas de agua o de mercurio. Las columnas utilizadas se muestran en la figura 3.4. Además en dicha figura se muestra el armario de control que permite ajustar el gasto másico que trasiega el filtro de partículas.



Figura 3.4: Instrumentos para la medida de pérdida de presión: A la izquierda columnas de agua y mercurio para la medida de saltos de presiones y a la derecha armario de control para modificar el gasto másico.

En la figura 3.5 se muestran los resultados de pérdida de presión obtenida durante el ensayo para cada cuarto de filtro para valores de gasto másico entre 5 y 35 kg/h. Para cada

valor de gasto másico se tomaron dos valores: uno aumentando el gasto másico partiendo desde 5 kg/h y otro descendiendo desde el máximo gasto másico alcanzado. Esto permitió asegurar que durante el ensayo no habían aparecido fugas que cambiaran la pérdida de presión en el filtro y evitar errores de medida, además de poder comprobar que la estructura del hollín no se ve modificada durante el ensayo a elevadas presiones. Cabe destacar que para los cuartos #2 y #4 no se pudo llegar a 35 kg/h por limitaciones en el compresor, especialmente a medida que se aumentaba la temperatura de entrada al DPF.

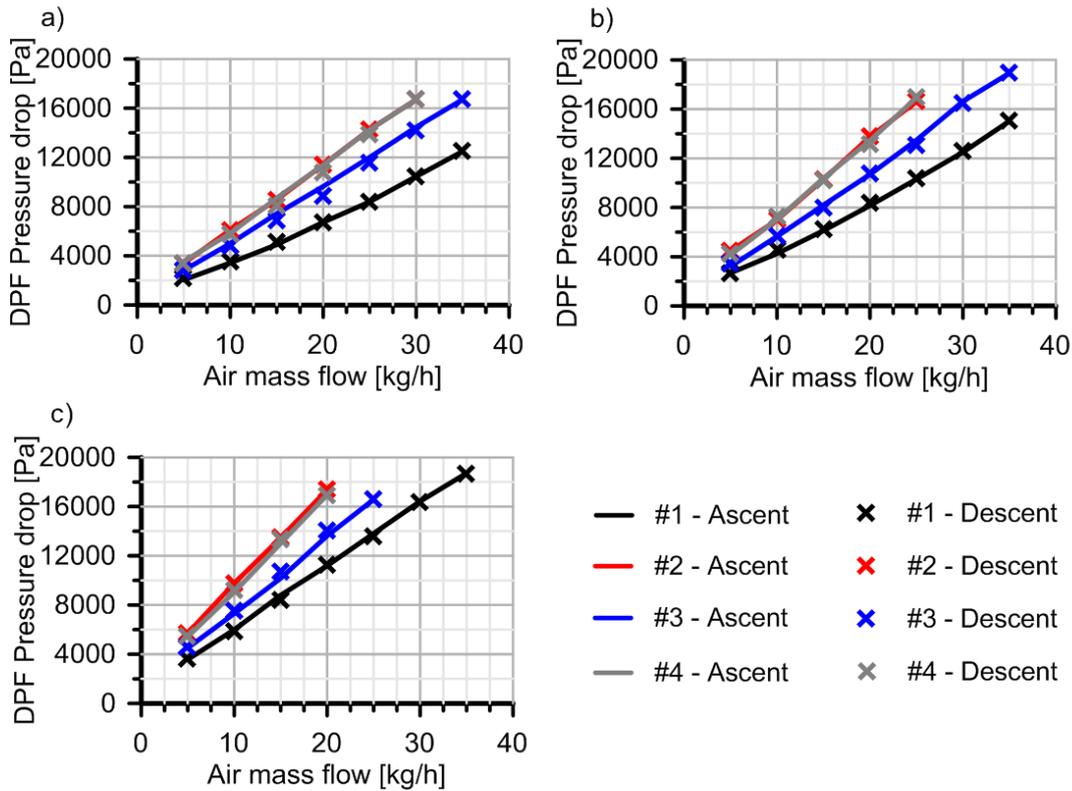


Figura 3.5: Caída de presión en cada cuarto de DPF antes de la inyección de agua para diferentes temperaturas: a) Temperatura ambiente. b) 100 °C. c) 200 °C.

Tal y como se puede observar, todos los cuartos no presentan la misma caída de presión a pesar de provenir del mismo filtro de partículas. Esto se debe a que el flujo de aire en la entrada del filtro de partículas presenta una gran turbulencia y no es uniforme. Se observa una gran similitud entre los cuartos #2 y #4, por lo que se dejará el #4 como referencia y no se le inyectará agua.

3.3. Inyección de agua y efecto en la pérdida de presión

La técnica de inyección de agua pre-DPF se realiza para reducir la pérdida de presión en el mismo cuando éste se encuentra cargado. En ella se inyecta agua a presión en la entrada del filtro, de modo que ésta recorre los canales y modifica la estructura de la capa de partículas, arrastrándolas consigo. No obstante, dicha técnica no afecta a la eficiencia de filtrado del filtro ni expulsa partículas al exterior, manteniéndose la masa de partículas constante en su interior.

3. ANÁLISIS DE LA PÉRDIDA DE PRESIÓN EN EL DPF

Esta técnica está pensada para realizarse por parte de la unidad de control del motor o ECU cuando se detecta un valor de pérdida de presión determinado. De este modo se reducirá la caída de presión, reduciendo el consumo de combustible del motor y mejorando las prestaciones del motor sin necesidad de regeneración. No obstante el motor seguirá circulando y acumulando partículas en el filtro. Por tanto, la pérdida de presión volverá a subir y, cuando se alcance de nuevo la presión objetivo, se realizará una nueva inyección de agua. A medida que se vayan realizando sucesivas inyecciones de agua, debido a que no se eliminan las partículas del filtro de partículas, se reduce el tiempo hasta que se alcanza la presión objetivo y las inyecciones de agua se hacen de manera más frecuente. Esto obliga a realizar procesos de regeneración del filtro cuando ya se ha hecho un número elevado de inyecciones, aunque de forma mucho más distanciada en el tiempo. Con esto se consigue un ahorro de combustible y un aumento de la eficiencia del motor, ya que trabaja durante más tiempo con una contrapresión menor.

A pesar de lo expuesto anteriormente, en el presente trabajo se ha realizado una única inyección de agua en el filtro de partículas para poder ver más claramente los efectos que esta técnica tiene sobre la pérdida de presión y cómo modifica la capa de partículas existente en el filtro.

Para la realización de la técnica se utilizó el mismo montaje en banco de flujo que para la caracterización de los cuartos de filtro de partículas, con la única diferencia de que se utilizó además un depósito de agua a presión y un inyector que permite controlar la cantidad de agua inyectada. En la figura 3.6 se observan ambos. Cabe destacar que el depósito permite controlar la presión a la que se encuentra el agua, lo que modificará la tasa de inyección. Por otro lado, el inyector permite controlar el tiempo de inyección. Por tanto, para controlar la masa de agua inyectada se pueden variar la presión de inyección y el tiempo de inyección. De este modo se pueden controlar perfectamente las condiciones de inyección de agua.

a)



b)

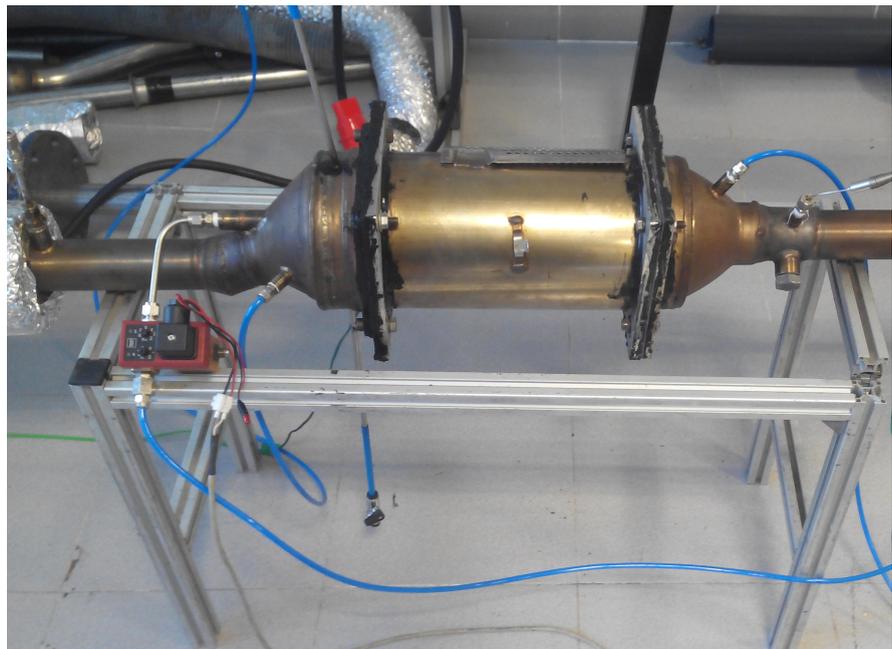


Figura 3.6: Elementos para inyección de agua: a) Depósito de agua a presión. b) Inyector de agua instalado en el cono de entrada a la carcasa.

Las condiciones bajo las que se realizó la inyección de agua en los tres cuartos de filtro se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4: Condiciones bajo las que se realizó la inyección de agua.

Cuarto	Gasto másico de aire [kg/h]	Temperatura [°C]	Presión de inyección [bar]	Masa de agua inyectada [g]	Tiempo de inyección [s]	Tasa de inyección [g/s]
#1	35	200	4,9	168,5	2	84,2
#2	20	200	4,9	170,5	2	85,3
#3	20	200	4,9	83,2	1	83,2

Se puede comprobar en la tabla anterior que entre los cuartos #1 y #2 se varió el gasto másico de aire que trasiega el cuarto de DPF manteniendo el resto de parámetros constantes, mientras que entre los cuartos #2 y #3 se modificó el tiempo de inyección, lo que modificó la masa de agua inyectada, pero manteniendo el resto de parámetros iguales.

Tras la inyección de agua pre-DPF con las condiciones que se acaban de nombrar se repitió la caracterización de pérdida de presión en los cuartos de filtros de partículas. Para observar las diferencias de pérdida de presión provocadas por la inyección de agua se han representado éstas en la misma gráfica antes y después de la inyección de agua para cada uno de los cuartos a 200 °C. Estas gráficas se muestran en la figura 3.7.

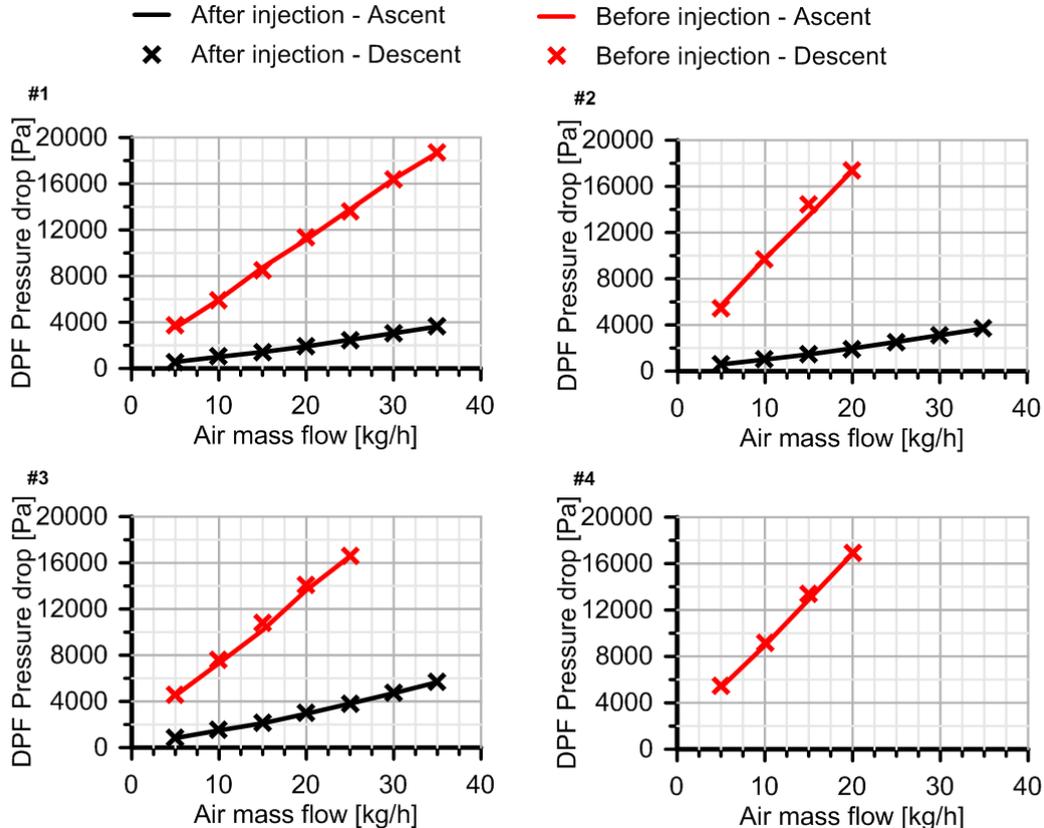


Figura 3.7: Caída de presión en cada cuarto de DPF antes y después de la inyección de agua para una temperatura de 200 °C.

3. ANÁLISIS DE LA PÉRDIDA DE PRESIÓN EN EL DPF

Para comprobar si se había emitido parte de la masa de partículas retenida en cada uno de los cuartos se pesaron cada uno de los cuartos de DPF antes y después de inyectar agua. Los valores de masa obtenidos para cada cuarto se detallan en la tabla 3.5. Como se puede comprobar la masa de partículas no se vio afectada durante la inyección de agua.

Tabla 3.5: Masa de los cuartos de DPF antes y después de la inyección de agua.

Cuarto	Masa antes de inyección	Masa después de inyección
	[g]	[g]
#1	790,6	790,8
#2	792,1	791,7
#3	802	801,6
#4	793,9	-

Para poder comparar mejor las diferencias de pérdida de presión se han representado en la figura 3.8 la reducción de pérdida de presión que se ha producido gracias a la técnica de la inyección de agua pre-DPF.

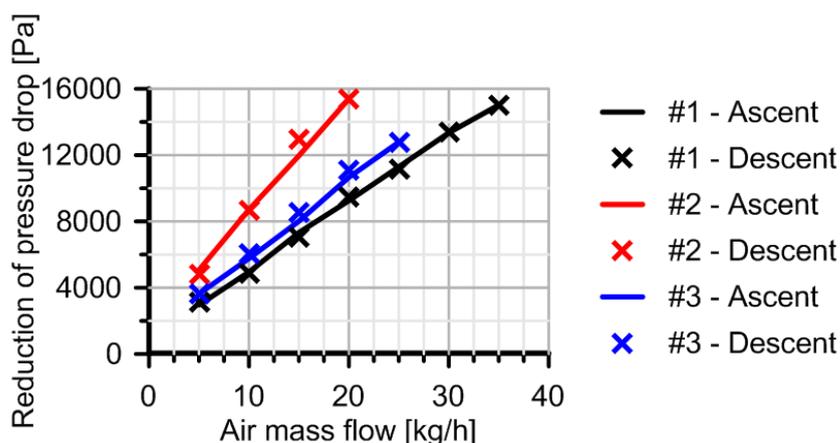


Figura 3.8: Disminución de la pérdida de presión en cada cuarto de DPF provocado por la inyección de agua para una temperatura de 200 °C.

Si comparamos estos resultados podemos observar lo siguiente:

- Se ha reducido considerablemente la pérdida de presión en todos los cuartos de DPF, lo que demuestra la eficacia de esta técnica para reducir la pérdida de presión en el DPF. Ésto es especialmente notable en los cuartos #2 y #3, en los que antes de la inyección no se pudieron alcanzar los 35 kg/h y después de la misma se obtuvo una pérdida de presión de apenas 4000 Pa. En el caso del cuarto #1, que sí había permitido alcanzar los 35 kg/h la diferencia en pérdida de presión es de aproximadamente 15 kPa, pasando de unos 19 kPa a poco menos de 4 kPa.
- Comparando los resultados de los cuartos #1 y #2 podemos observar que se llegó al mismo valor de pérdida de presión pero, debido a que no partían de la misma pérdida de presión, la reducción de la pérdida de presión no es la misma en ambos casos. Esto dificulta la comparación de ambos casos. Por un lado podría haber una diferencia en la reducción debida al hecho de haber modificado el gasto másico de aire que trasiega

los cuartos de DPF. Por otro lado está la posibilidad de que el gasto másico de aire que trasiega el cuarto de DPF no presenta influencia en la técnica, ya que en ambos casos se llega a la misma caída de presión en el cuarto de DPF. Debido a que la mayor reducción se produce en el cuarto por el que pasa un gasto másico menor la opción más probable es que este parámetro no tenga influencia y esta diferencia se deba a que se ha partido de valores de caída de presión diferentes.

- Comparando los resultados de los cuartos #2 y #3, donde se varió el tiempo de inyección si se observa una diferencia entre los valores de pérdida de presión obtenidos después de la inyección de agua. Además, la reducción de pérdida de presión en el cuarto #3 es menor que en el cuarto #2. Por tanto, podemos extraer que la cantidad de agua inyectada tiene una gran influencia en la reducción de pérdida de presión conseguida con esta técnica.

4. Visualización y análisis del medio poroso

En este capítulo se va a explicar cómo se han obtenido las imágenes para observar tanto la macroestructura como la microestructura de la capa de partículas y la pared porosa. Esto permitirá conocer mejor cómo funciona la técnica de inyección de agua y cómo contribuye a la disminución de la pérdida de presión en el DPF.

En este capítulo se explican en primer lugar las diferentes herramientas utilizadas para la visualización. A continuación se expondrá la metodología de ensayo, incluyendo el corte de los filtros para obtener las muestras y la toma de imágenes. Seguidamente se explicará el post-procesado que se ha hecho de las imágenes para poder extraer la máxima información de las mismas y de esa forma comprender en mayor detalle la técnica de inyección de agua pre-DPF. Para finalizar este capítulo se expondrán los resultados obtenidos a partir de las imágenes.

4.1. Herramientas de visualización

Para la observación de la macroestructura se utilizaron tanto una cámara de fotos Nikon D3200 como una lupa electrónica PCE-MM200. La cámara de fotos se utilizó para tomar fotos de cada una de las secciones completas de los cuartos de DPF, mientras que la lupa electrónica se utilizó para fotografiar con más detalle los canales y la capa de partículas.

Por otro lado, para la observación de la microestructura se utilizó el microscopio electrónico de barrido (SEM, del inglés Scanning Electron Microscope). Como ya se ha comentado en el primer capítulo, el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos no dispone de este tipo de microscopio, por lo que se utilizó el existente en el servicio de Microscopía Electrónica. Este instrumento permite obtener mucha información diferente de las muestras. Para su funcionamiento se barre un haz de electrones sobre la muestra y en función de los detectores que se utilicen se obtendrá una información u otra. Los detectores existentes en el servicio de Microscopía Electrónica de la Universidad Politécnica de Valencia [9] son los siguientes:

- **Detector de electrones secundarios (SE):** Ofrece una imagen en blanco y negro de la topografía de la superficie iluminada. Debido a su elevada resolución es la más adecuada para la observación de las muestras.
- **Detector de electrones retrodispersados (BSE):** Ofrece una imagen de la superficie, pero de menor resolución que el anterior. Sin embargo presenta una gran ventaja con respecto al anterior: es sensible a variaciones en el número atómico de los elementos presentes en la superficie, observándose diferentes tonos de gris en función de los elementos existentes.

- **Detector de rayos X (EDS):** Recibe los rayos X emitidos por los diferentes puntos de la superficie sobre los que pasa el haz de electrones. Puesto que la energía de cada rayo X es característica de cada elemento, podemos obtener información acerca de los diferentes elementos que componen una superficie y el tamaño que presentan. Es por ello que se conoce a esta técnica como Microanálisis por EDS.
- **Detector de rayos X (WDS):** Es similar a la anterior, con la única diferencia que únicamente mide la energía de los rayos X procedente de un solo elemento. Es por ello que es mucho más lenta que la de EDS, aunque también mucho más precisa. No obstante, las dos técnicas son complementarias y se pueden utilizar simultáneamente: la técnica EDS para obtener información acerca de todos los elementos presentes en la muestra y la WDS para diferenciar los picos de diferentes elementos que están muy cercanos o para detectar concentraciones muy pequeñas.
- **Detector de electrones retrodispersados difractados (BSED):** Este detector sólo recibe los electrones difractados que cumplen la ley de Bragg en el punto en que son generados, por lo que proporciona información sobre la estructura cristalina de la muestra. Además puede proporcionar información sobre orientación de granos, identificación de fases, fronteras de grano...

En este proyecto únicamente se han usado el detector de electrones secundarios (SE) para obtener las imágenes y el detector de rayos X (EDS) para el análisis de elementos. En la figura 4.1 se puede observar el microscopio utilizado para la obtención de imágenes que permiten observar la microestructura de la pared porosa y la capa de partículas.



Figura 4.1: Microscopio electrónico de barrido utilizado para la obtención de imágenes.

4.2. Metodología de ensayo

Para proceder a la visualización de los cuartos de DPF ensayados en banco de flujo lo primero fue cortar los mismos. En primer lugar se explicará cómo se cortaron las muestras para la visualización con la lupa electrónica y la cámara de fotos y el montaje necesario para obtenerlas con cada uno de ellos. Acto seguido se explicará el proceso de corte para obtener las muestras para llevarlas al SEM y la metodología seguida para obtener las imágenes con esta herramienta.

Cámara y lupa electrónica

Cada cuarto se cortó en cinco secciones con la ayuda de una sierra circular de diamante. Las dimensiones de las cinco secciones son las siguientes: una primera de 2,5 cm de espesor, tres secciones de 6 cm y una última de 2,5 cm. Las secciones se cortaron de este modo para tener datos cercanos a los tapones de entrada y salida que miden 0,5 cm y varios valores más a lo largo del DPF. De este modo se puede observar cómo afectan los diferentes parámetros de la inyección de agua para diferentes posiciones axiales. En la figura 4.2 se muestra un esquema con las diferentes secciones en las que se cortaron los cuartos de DPF, siendo la sección #1 la entrada y la #5 la salida.

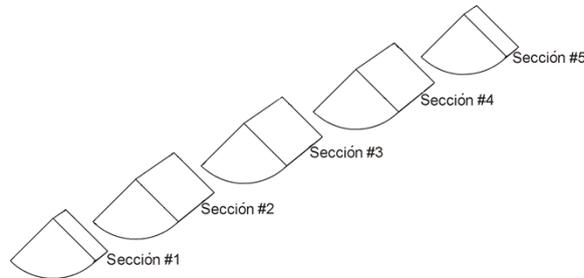


Figura 4.2: Esquema con las secciones de DPF para la observación con lupa electrónica y cámara.

Para obtener imágenes con la cámara se necesitó un soporte con el que poder anclarla a la mesa óptica del laboratorio, de modo que se permitiera obtener las imágenes del modo más repetitivo posible y no alterar el fondo de la imagen. Además se necesitó un soporte regulable en altura para colocar las muestras a fotografiar a la distancia y altura que permitieran obtener la imagen con la mayor calidad posible. Por otro lado se utilizó un fondo liso detrás de las imágenes, de forma que se facilita el posterior post-tratamiento de imágenes y se eliminan las posibles fuentes de error por detección de puntos negros o blancos del fondo.

Acto seguido de la obtención de imágenes con la cámara se procedió a obtener imágenes con más detalle mediante la lupa electrónica. Para ello se colocó el soporte de la lupa electrónica en un posicionador mecánico controlado con el ordenador, lo que permitió mover la misma con precisión y realizar las fotografías de un modo repetitivo y asegurando encontrarse siempre en el lugar deseado. En la figura 4.3 se puede observar el montaje con la lupa electrónica sujeta al posicionador mecánico y el soporte sobre el que se colocan las muestras a fotografiar con el primer cuarto colocado encima antes de su corte en secciones.

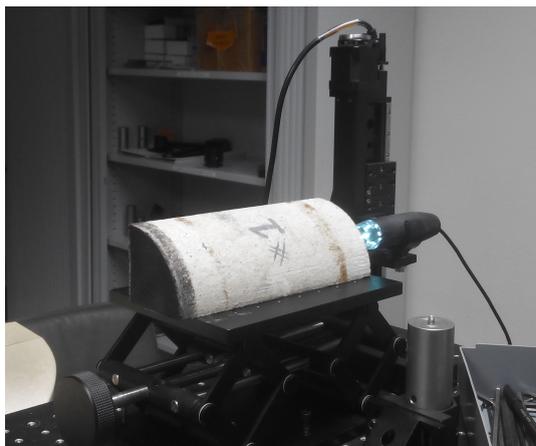


Figura 4.3: Montaje utilizado para la obtención de imágenes mediante lupa electrónica.

De cada sección se obtuvieron 17 fotografías con el fin de observar todas las zonas de cada sección. Además estas 17 fotografías se realizaron tanto en la entrada como en la salida de la misma, tomándolas en modo espejo en la salida para poder comparar más fácilmente con el resto de secciones. Al fotografiar tanto la entrada como la salida de cada una de las secciones se tienen fotografías de la misma posición axial de dos secciones diferentes, coincidiendo la salida de una sección con la entrada de la siguiente. Esto permite comparar ambas y si aparece polvo del proceso de corte en alguna de ellas descartarla. A continuación se muestra un esquema sobre una fotografía tomada con la cámara de los puntos sobre los que se toman las 17 fotografías y la numeración que se ha seguido para nombrarlas. Como se puede observar se han tomado 5 fotografías en dirección radial en cuatro ángulos diferentes, separados 30° entre ellos.

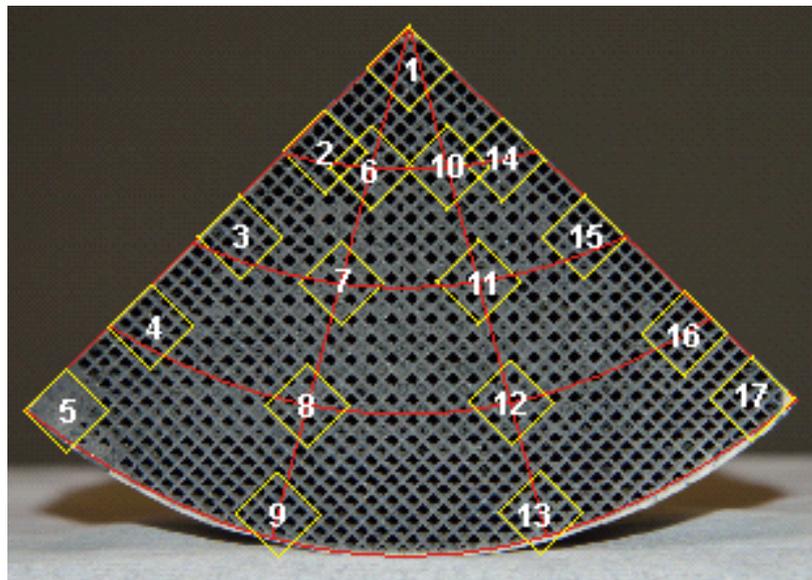


Figura 4.4: Esquema de los puntos en los que se han tomado las fotos con la lupa electrónica.

Microscopio electrónico de barrido

El microscopio electrónico de barrido no permite la observación de muestras de gran tamaño, por lo que tuvieron que cortarse muestras de un tamaño menor que las que se tenían para la observación con la lupa electrónica y la cámara. En concreto las dimensiones de las muestras son 10 mm de espesor, 35 mm de ancho y 15 mm de alto.

Puesto que el proceso de obtención de imágenes con esta herramienta es muy lento sólo se tomaron dos muestras del cuarto #4, que se había tomado como referencia y no se había sometido a la técnica de inyección de agua, y tres muestras del #2 que, como se observó en el capítulo anterior, tenía una pérdida de presión muy similar antes de la inyección de agua. En el caso del cuarto #4 las dos muestras se tomaron de la entrada de las secciones #2 y #5 y en el caso del cuarto #2 se tomaron las muestras de las dos secciones anteriormente mencionadas y de la salida de la sección #3.

Para la obtención de las muestras en primer lugar se cortó una loncha de 1 cm de espesor en cada una de las secciones anteriormente nombradas y luego se extrajo la muestra de la zona donde la inyección de agua tuvo más efecto, zona que está muy próxima a donde se realizaron las fotografías 8, 9, 12 y 13 con la lupa electrónica y cuyo esquema se muestra en la figura 4.4. En la figura 4.5 se pueden observar por un lado las tres secciones de donde se

tomaron las lonchas de 1 cm de espesor y por otro cómo se obtienen las muestras a partir de estas lonchas.

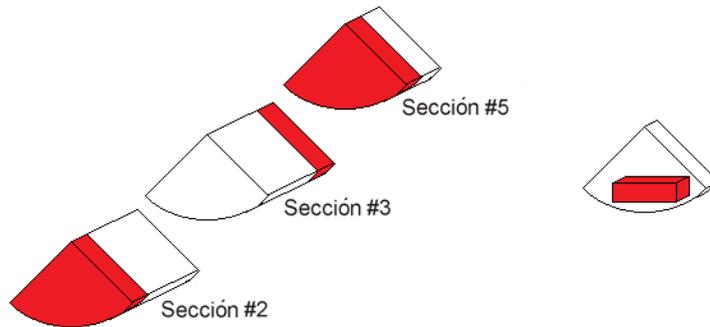


Figura 4.5: Esquema de cómo se obtienen las muestras para el microscopio electrónico de barrido.

Una vez ya se tienen las muestras preparadas ya se pueden llevar al microscopio electrónico de barrido. A continuación se detallan todas las posibilidades que este microscopio ofrece:

- Imagen mediante detector de electrones secundarios: permite observar con gran detalle tanto la pared porosa como la capa de partículas. Además es la base sobre la que se realizan todos los análisis de elementos mediante EDS como se explica a continuación. Otro punto positivo que presenta este tipo de imagen es que sobre ella se pueden realizar medidas, lo que ha permitido medir el tamaño de los canales y la pared porosa, además del espesor de la capa de partículas en cada una de las muestras y ver cómo va variando.
- Detección de elementos en un punto o región mediante EDS: Una vez se ha obtenido la imagen del detector de electrones secundarios se puede obtener el espectro de elementos presentes en un punto concreto, observándose picos más acusados a mayor cantidad de ese elemento. También se puede realizar esta técnica en una región, donde en el espectro se mostrará la suma de todos los elementos detectados en el área seleccionada. En la figura 4.6 se muestra un ejemplo de una imagen obtenida con el detector de electrones secundarios sobre la que se ha aplicado la detección en un punto y un área.

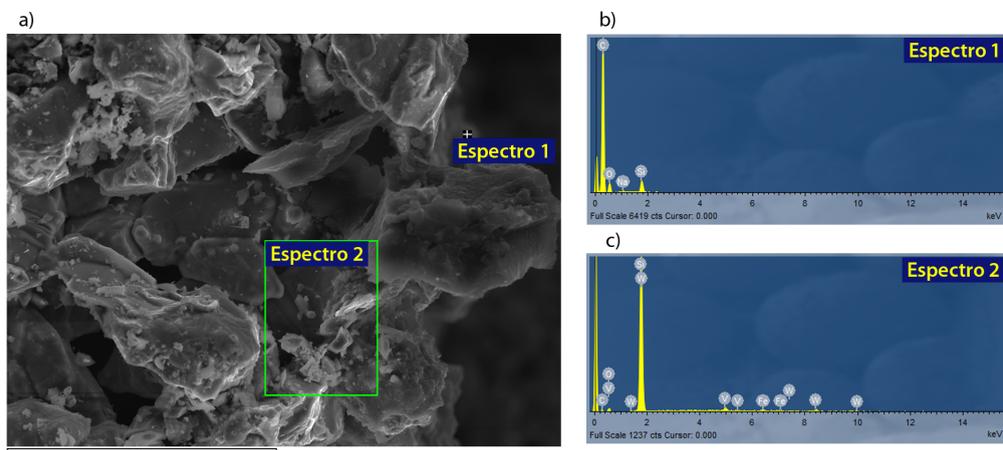


Figura 4.6: Ejemplo de aplicación de la detección de elementos en un punto o región: a) Imagen sobre la que se ha aplicado la detección de elementos; b) Espectro obtenido del análisis en la región en la que se detecta mayoritariamente carbono; c) Espectro obtenido del análisis en el punto en la que se detecta mayoritariamente silicio.

- Detección de elementos en una línea mediante EDS: Esta técnica es muy similar a la anterior con la única diferencia que permite analizar los elementos a lo largo de una línea y mostrar únicamente los elementos que se desea analizar. En nuestro caso son el silicio y el carbono, representativos del hollín y de la pared porosa. Al igual que la detección en un punto necesitan haber obtenido una imagen con electrones secundarios. En la figura 4.7 se puede observar un ejemplo de un análisis en una línea.

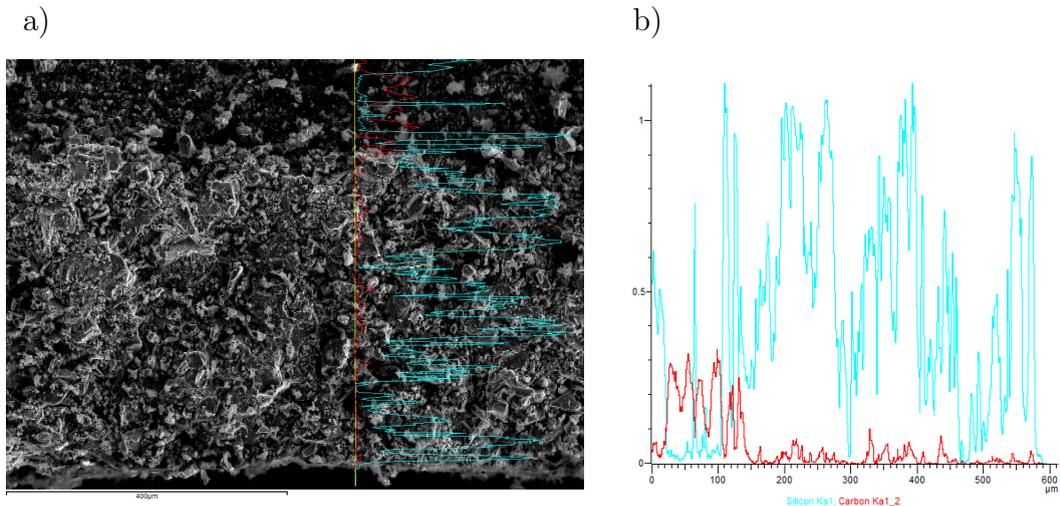


Figura 4.7: Ejemplo de aplicación de la detección de elementos en una línea: a) Imagen sobre la que se ha aplicado la detección de elementos; b) Espectros obtenidos del análisis: en azul silicio y en rojo carbono.

- Mapa de elementos mediante EDS: Esta técnica recorre toda la parte de la muestra que se había fotografiado mediante electrones secundarios varias veces con el detector de EDS. De este modo va detectando todos los elementos que hay en la superficie de la muestra, pudiéndose elegir los que se desean mostrar, que en nuestro caso son silicio y carbono. Tal y como se muestra en la figura 4.8 se pueden mostrar por separado cada uno de los elementos o superponerlos en la imagen de electrones secundarios de base. Cabe destacar que en parte de la muestra no se detecta la capa de partículas con el elemento de carbono debido a que el detector EDS está colocado con un ángulo de 60° respecto a la muestra, por lo que parte de la muestra apantalla otras y no permite que se detecten los elementos presentes en dichas zonas.



Figura 4.8: Ejemplo de aplicación de mapa de elementos: a) Carbono detectado; b) Silicio detectado; c) Carbono y silicio superpuestos en la imagen de electrones secundarios.

De todas las formas a través de las que se puede extraer información de las muestras a través del microscopio electrónico, las que se han utilizado en este trabajo han sido la obtención de imágenes mediante detector de electrones secundarios y el mapa de elementos mediante EDS.

En el *Anexo* se muestra una selección de las fotografías obtenidas de mediante las tres herramientas que se han detallado en esta sección.

4.3. Post-procesado de imágenes

Para poder obtener más datos de las imágenes obtenidas se ha procedido a post-procesar con el programa informático Matlab. Para ello se han realizado diversos programas cuya finalidad se explica a continuación.

Evaluación de la eficiencia de la inyección de agua

Este programa permite contar el número de canales abiertos que presenta una sección de DPF. Puede utilizarse tanto en la cara de entrada como en la de salida de todas las secciones, incluidas la entrada y salida del DPF. Para ello sólo se necesita una imagen en la que se vea completamente la sección que se desea analizar, por lo que se utilizaron las fotografías obtenidas mediante la cámara. Puesto que se cuentan también los canales limpios en la cara de salida del DPF, donde únicamente están abiertos los canales de salida, se pueden restar éstos a cada sección para evaluar los canales que se han limpiado con la técnica de inyección de agua. Los pasos que sigue el programa para identificar los canales abiertos son los siguientes:

1. Convierte la imagen a blanco y negro.
2. Se selecciona un valor de corte: todos los grises que sean más claros que éste se convierten en blancos y todos los que sean más oscuros se convierten en negros.
3. Se realizan pequeñas mejoras a la imagen en blanco y negro resultante, como son eliminar los pequeños puntos aislados que quedan o perfeccionar el borde.
4. Mediante un comando se calcula el área de todas las regiones blancas y se almacenan sus valores.
5. Se compara el valor de cada una de las áreas obtenidas en el punto anterior con un valor determinado por el usuario, el cual debe ser elegido de forma que todas las áreas abiertas sean seleccionadas y las que no lo están no se seleccionen.
6. Para terminar se dibuja una marca en el centro de cada una de las áreas que han sido seleccionadas y se muestra al usuario, permitiéndole añadir áreas abiertas que no hayan sido seleccionadas automáticamente.

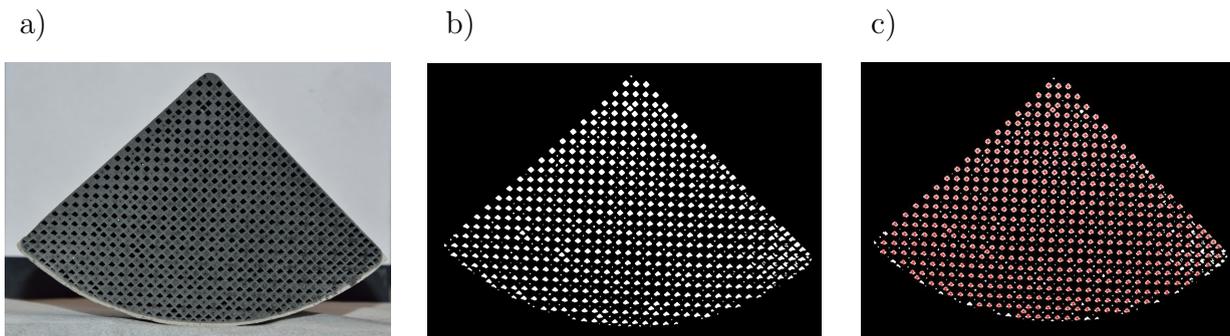


Figura 4.9: Ejemplo de aplicación del programa creado para contar el número de canales abiertos: a) Imagen de partida; b) Imagen sometida a los tres primeros pasos del post-tratamiento; c) Imagen con marcas rojas en cada una de las áreas contabilizadas.

Repitiendo todos los pasos para cada una de las secciones tanto en la entrada como en la salida se puede saber cómo ha ido variando el número de canales abiertos con la posición axial para cada uno de los cuartos. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente sección, en la que se analizan todos los resultados obtenidos en todo el capítulo.

Estimación del espesor de la capa de partículas

Este programa permite medir el espesor de la capa de partículas presente sobre la superficie de la pared porosa. Puede utilizarse tanto en la cara de entrada como en la de salida de todas las secciones que presentan capa de partículas. Para poder observar con más detalle la capa de partículas se han utilizado las imágenes tomadas con la lupa electrónica. Los pasos que sigue el programa para medir el espesor de la capa de partículas son:

- 1-4. Los cuatro primeros pasos son los mismos que en el programa para contar los canales abiertos.
5. El usuario hace click en el centro de los canales de salida, lo que permite al programa conocer la escala de la fotografía a partir de las áreas de dichos canales y de la separación entre ellos utilizando los valores de anchura de canal y espesor de la pared porosa del DPF.
6. El usuario hace click en el centro de los huecos que hay en los canales que presentan capa de partículas, guardando el programa el valor de dichas áreas.
7. A partir de la escala obtenida gracias al punto 5 y las áreas del punto 6 se puede obtener el área en mm^2 de la parte que no ha sido tapada por el hollín. Por tanto, como se conoce el área total del canal se puede conocer el área que ocupa el hollín y suponiendo que éste se ha depositado de forma uniforme por las paredes y suponiendo que el hueco tiene forma cuadrada se puede estimar el espesor de la capa de partículas. En la figura 4.10 se puede observar un esquema en el que se representa la suposición de que el hollín se deposita uniformemente y en la ecuación 4.1 se puede ver la fórmula utilizada para obtener el espesor de la capa de hollín a partir del área limpia.

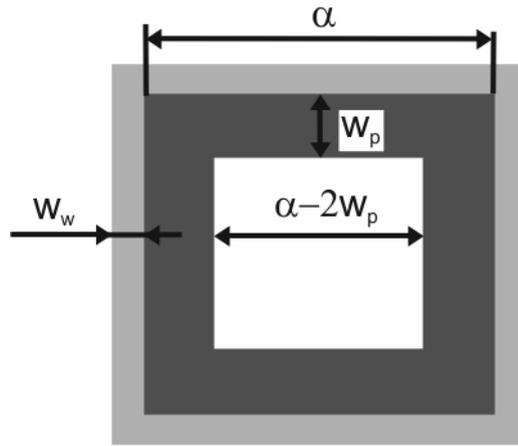


Figura 4.10: Esquema en el que se representa la suposición de que el hollín se deposita de forma uniforme sobre las paredes.

$$A_{limpia} = (\alpha - 2w_p)^2 \quad \rightarrow \quad w_p = \frac{\alpha - \sqrt{A_{limpia}}}{2} \quad (4.1)$$

El valor del espesor calculado mediante este programa tiene dependencia del valor de corte que se selecciona para el paso 2, por lo que se obtendrá un área mayor o menor, afectando en gran medida al espesor de la capa de partículas que se obtiene. Para ver cómo afecta al mismo se hizo un estudio de sensibilidad en el que se analizó la misma imagen para valores de corte entre 0.01 y 0.4, correspondiendo el valor de 0 al negro y el valor de 1 al blanco. Los valores de espesor de capa de hollín obtenidos en función del valor de corte quedan recogidos en la figura 4.11.

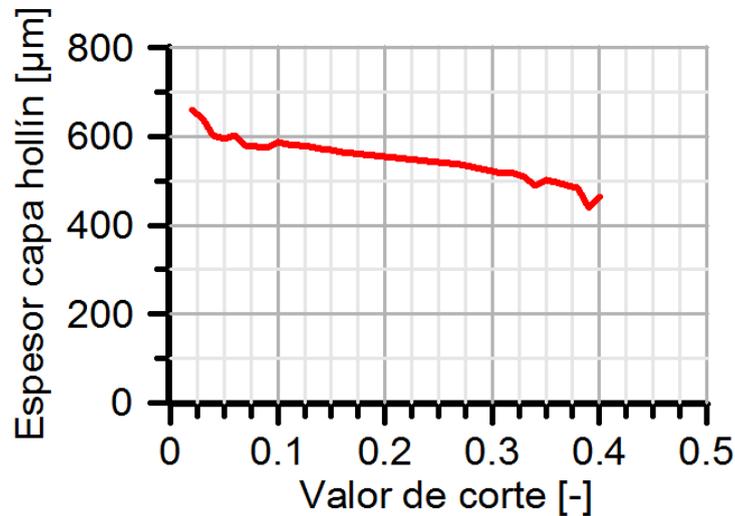


Figura 4.11: Estudio de sensibilidad del espesor de la capa de hollín al valor de corte.

En la figura se observa que entre los valores de corte de 0.1 y 0.3 el espesor de la capa de partículas disminuye de manera lineal y con una pendiente muy pequeña, por lo que pequeños cambios en el valor de corte en esa zona no son muy influyentes. Comparando las imágenes con las que se obtienen al aplicar el post-tratamiento de las mismas se ha fijado el valor de corte en 0.15. Este valor de corte se ha aplicado a todas las fotos de cada una de las secciones del cuarto #4 para obtener el espesor medio de la capa de partículas antes de la inyección de agua. Para observar las diferencias en el tratamiento de imágenes que produce el valor de corte se muestran en la figura 4.12 las imágenes que se obtienen tras aplicar diferentes valores de corte.

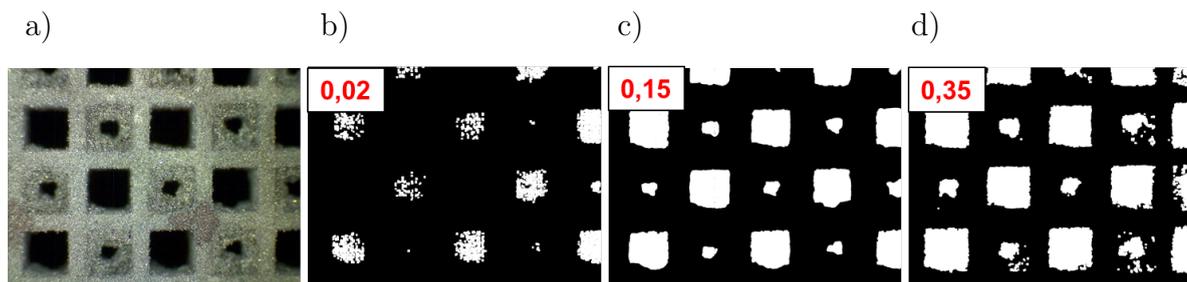


Figura 4.12: Efecto del valor de corte en el post-tratamiento de imágenes: a) Imágen de partida; b) Valor de corte de 0,02; c) Valor de corte de 0,15; d) Valor de corte de 0,35.

Además del post-tratamiento realizado con Matlab, se ha realizado un pequeño post-tratamiento de las imágenes obtenidas mediante el microscopio electrónico de barrido con el software propio del Servicio de Microscopía Electrónica. Mediante este programa se midió el espesor de la capa de partículas tanto en el cuarto de referencia como en el que se había inyectado agua. Las medidas del cuarto de referencia han servido para comprobar si los espesores obtenidos con el post-tratamiento en Matlab coinciden con los que hay realmente en la pared, mientras que los del cuarto #2 se tomaron para obtener algunos datos de los cuartos en los que se había inyectado agua, puesto que con el programa de Matlab no es posible medir con exactitud capas de partículas muy pequeñas ni capas de partículas no uniformes.

Para comprobar si las medidas del espesor de la capa de partículas cuando no se había inyectado agua eran correctas se tomaron las medidas de la capa de partículas de dos canales con capa de partículas, uno de la sección #2 y otro de la #5, y posteriormente se analizaron los mismos canales con el programa de Matlab. Además, se compararon ambas medidas con el espesor obtenido de un canal con un espesor similar mediante el programa de Matlab de una imagen obtenida con la lupa electrónica. Las fotografías analizadas se muestran en la figura 4.13.

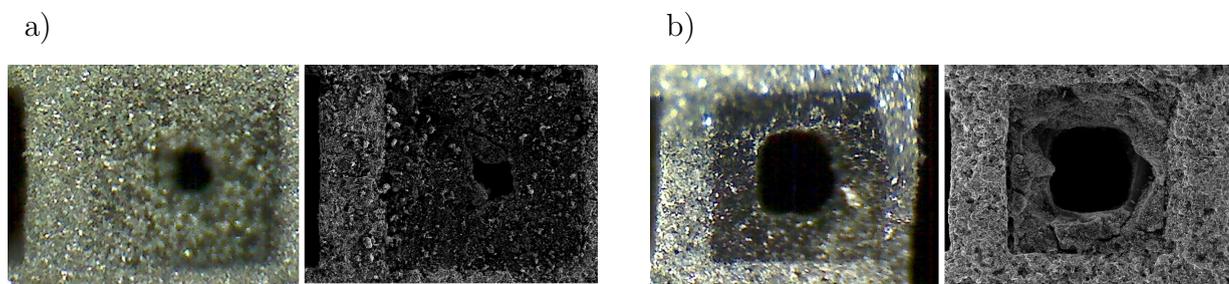


Figura 4.13: Imágenes utilizadas para comparar las medidas realizadas por el programa y las obtenidas mediante el SEM: a) Sección #2; b) Sección #5.

Cabe destacar que las imágenes a comparar no son de los mismos canales, por lo que esto ya puede introducir una diferencia entre ambos. Además, se puede ver que las imágenes del microscopio tienen mucha más resolución que las de la lupa electrónica, lo que también puede introducir un error. Las medidas obtenidas en cada caso vienen recogidas en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Resultados obtenidos en la comparación de las medidas de la capa de partículas obtenidas con Matlab y con el microscopio.

Sección	Espesor medido con matlab sobre la imagen de lupa [μm]	Espesor medido con matlab sobre la imagen de SEM [μm]
#2	570,9	594,6
#5	385,2	389,3

Además, se ha medido el espesor de la capa de partículas en los canales mediante el programa de post-tratamiento del servicio de microscopía, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 4.2. Cabe destacar que los valores mostrados son la media de las cuatro medidas obtenidas en dirección perpendicular a la pared, por lo que se introduce un error al no ser la capa uniforme.

Tabla 4.2: Espesor de la capa de partículas obtenido mediante el programa de post-tratamiento del servicio de microscopía.

Sección	Espesor medido [μm]
#2	562,5
#5	359,1

Se puede observar que las medidas directas obtenidas con el microscopio son menores que las obtenidas con el programa de Matlab sobre la misma imagen, lo que puede deberse a que se ha hecho la suposición de suposición uniforme al aplicar el programa de Matlab. No obstante, en ambos casos se han obtenido espesores de capa de partículas del mismo orden de magnitud. Por otro lado, en el caso de las imágenes analizadas con el programa de Matlab el espesor de la capa de partículas obtenido a partir de las imágenes del microscopio es ligeramente mayor, lo que se debe en gran parte a la mayor resolución de las imágenes y a que la zona libre de partículas se observa mucho más negra. No obstante, la diferencia que se ha observado entre los dos métodos está en torno al 5% por lo que se considera que las medidas obtenidas son aceptables.

4.4. Análisis de resultados

A continuación se van a mostrar los resultados obtenidos mediante las técnicas utilizadas anteriormente. En primer lugar se explicarán los resultados obtenidos mediante el programa que permite contar los canales abiertos en cada sección. Acto seguido se exponen los resultados obtenidos a partir del programa que permite medir el espesor de la capa de partículas para cada sección. Se finaliza explicando los resultados que se pueden obtener de analizar las fotografías obtenidas en el microscopio electrónico de barrido.

Evaluación de la eficiencia de la inyección de agua

En la figura 4.14 a) se muestra cómo han ido variando el número de canales abiertos con la posición axial para cada uno de los cuartos. Además, tal y como se ha comentado, se han podido obtener el número de canales los canales que se han limpiado debido al proceso de inyección de agua pre-DPF, lo que se muestra en la figura 4.14 b).

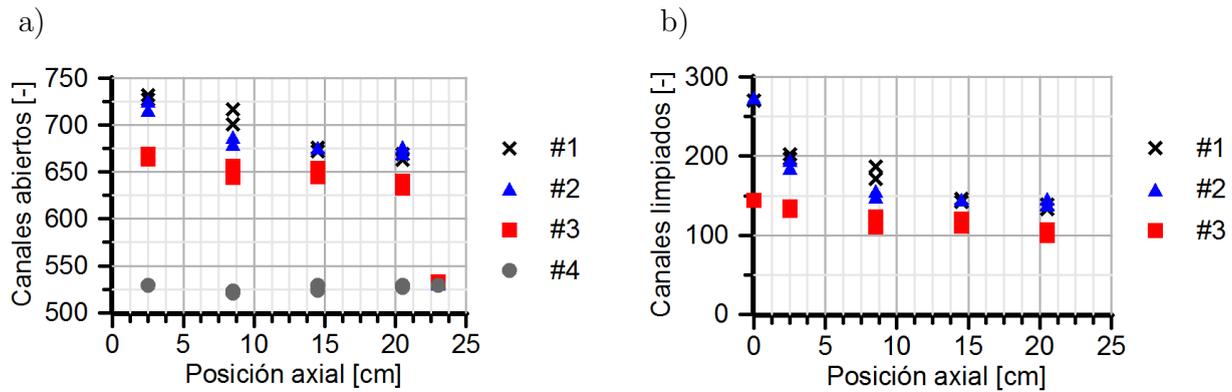


Figura 4.14: a) Evolución de los canales abiertos para todos los cuartos frente a la posición axial; b) Canales que se han limpiado debido a la inyección de agua.

Debido a que se han contados los canales en la entrada y salida de todas las secciones hay algunos casos en los que aparece una pequeña diferencia entre ambas, siendo representada en la misma posición axial ambas. Esto se debe a que debido al proceso de corte en algunas secciones se han quedado tapadas algunas zonas o a pequeñas diferencias en los canales contados por el programa, siendo la diferencia detectada en torno a los 5 canales, aunque en un caso llega a 15.

Se puede observar claramente que uno de los efectos de la inyección de agua pre-DPF es limpiar los canales de hollín, arrastrando las partículas que había acumuladas hacia el final del DPF. Esto permite reducir la pérdida de presión en gran medida por separarse gran parte de la capa de partículas de la superficie de filtrado. No obstante, tan y como puede observarse en las imágenes de la figura 4.20 los fragmentos de partículas que se desplazan hacia el final del DPF no forman un tapón de partículas.

Comparando los cuartos #1 y #2 se observa que la diferencia de gasto másico que trasiega el cuarto de DPF tiene una ligera influencia en la cantidad de canales limpiados. Los canales limpiados en la entrada y en el final de los cuartos coinciden, pero se observa que cuando hay más gasto másico trasiegando el cuarto se empuja ligeramente más agua a través de algunos canales, por lo que se limpia una mayor cantidad de canales en la zona intermedia del DPF. Por otro lado, comparando los cuartos #2 y #3 se observa que la cantidad de agua inyectada tiene un gran efecto en los canales limpiados, ya que se ha limpiado una cantidad de canales significativamente inferior en el cuarto #3.

Espesor de la capa de partículas

En la figura 4.15 se ha representado la media de los valores obtenidos de espesor de la capa de partículas en cada una de las posiciones axiales del cuarto de referencia, contabilizando tanto los datos de la salida de una sección como los de entrada de la siguiente.

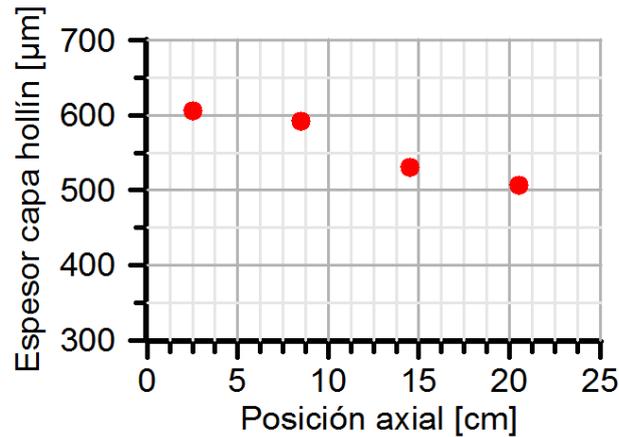


Figura 4.15: Espesor de la capa de hollín en el cuarto de referencia frente a la posición axial.

Para la obtención de estos valores se han analizado 40 canales por cada posición axial, considerando tanto la salida de una sección como la entrada de la siguiente, lo que hace un total de 160 canales analizados a lo largo del cuarto.

Se puede observar que el espesor de hollín disminuye lentamente a medida que vamos avanzando en la posición axial. Esto se debe a que el área libre de partículas es muy pequeña y, por tanto, las partículas pasan muy cerca de la capa de partículas y en algunos casos se adhieren a ella, provocando que en la entrada se deposite una mayor cantidad de partículas.

Microscopio electrónico de barrido

Con la ayuda del programa de post-tratamiento de imágenes del microscopio electrónico de barrido se ha medido el espesor de la capa de partículas en las zonas que se han visto afectadas por la inyección de agua del cuarto #2. En la figura 4.16 se muestra un canal del cuarto #2 con varias medidas de la capa de partículas en algunos puntos del canal.

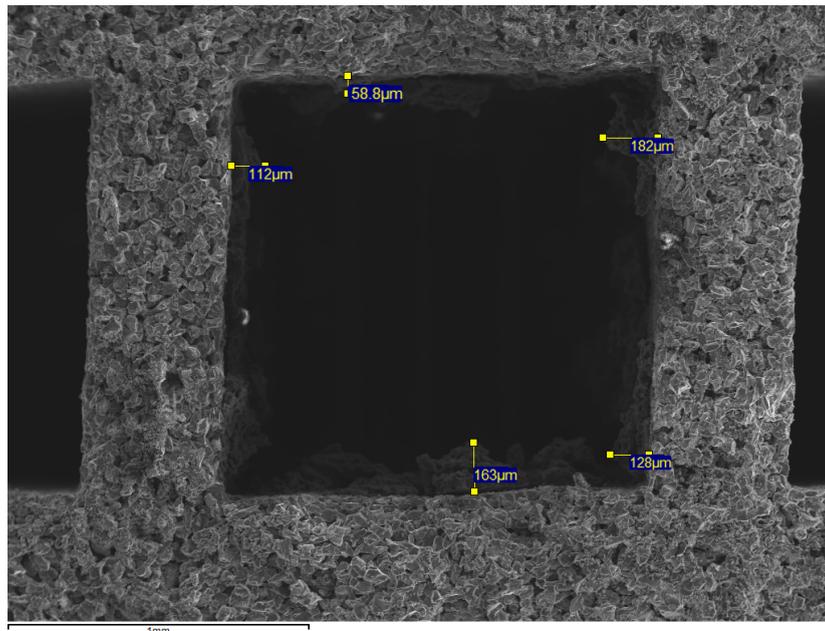


Figura 4.16: Espesor de la capa de partículas en algunos puntos del cuarto #2 en una zona afectada por la inyección de agua.

Tal y como se puede observar en la imagen hay una gran dispersión en las medidas en los canales, presentando los canales zonas con una capa muy fina y otras con un espesor de la capa de hollín del orden de $180\ \mu\text{m}$. Es por ello que no tiene sentido calcular un valor medio. El máximo valor de las medidas tomadas ha sido de $192\ \mu\text{m}$, mientras que el mínimo ha sido de $53\ \mu\text{m}$. Cabe destacar que se aprecian zonas con un espesor menor de la capa de partículas en las imágenes. Para obtener estos valores se han analizado 32 canales con numerosas medidas en cada uno de ellos. No se han observado diferencias en las medidas entre las diferentes secciones, por lo que se han analizado todas ellas en conjunto.

En la imagen anterior también se puede observar como queda adherida una pequeña capa de partículas a pesar de la inyección de agua, lo que explica que la eficiencia de filtrado no se vea afectada por la inyección de agua, pues se sigue en régimen de filtrado superficial.

A continuación se muestra un ejemplo de imagen del cuarto de referencia en el que no se ha inyectado agua obtenido con el SEM, en el que en primer lugar se toma una imagen con el detector de electrones secundarios y en segundo lugar se realiza un mapa de elementos con la ayuda del detector EDS.

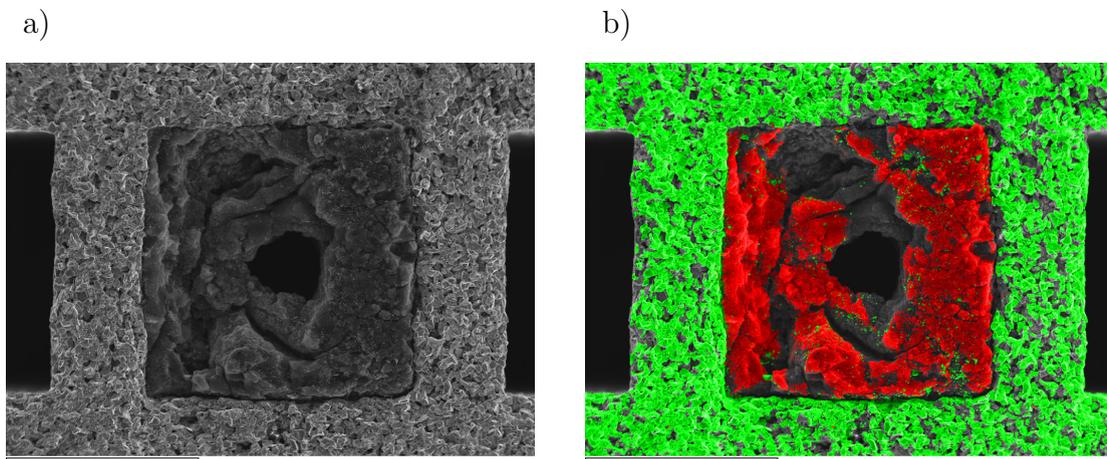


Figura 4.17: Canal del cuarto #4 analizado con el microscopio electrónico de barrido: a) Imagen de electrones secundarios; b) Mapa de elementos obtenido con EDS.

Después de haber obtenido la imagen del canal completo se amplía la pared porosa mostrando algún poro y se repite el mismo procedimiento que en el caso del canal completo. Un ejemplo de lo anterior se muestra en la figura 4.18

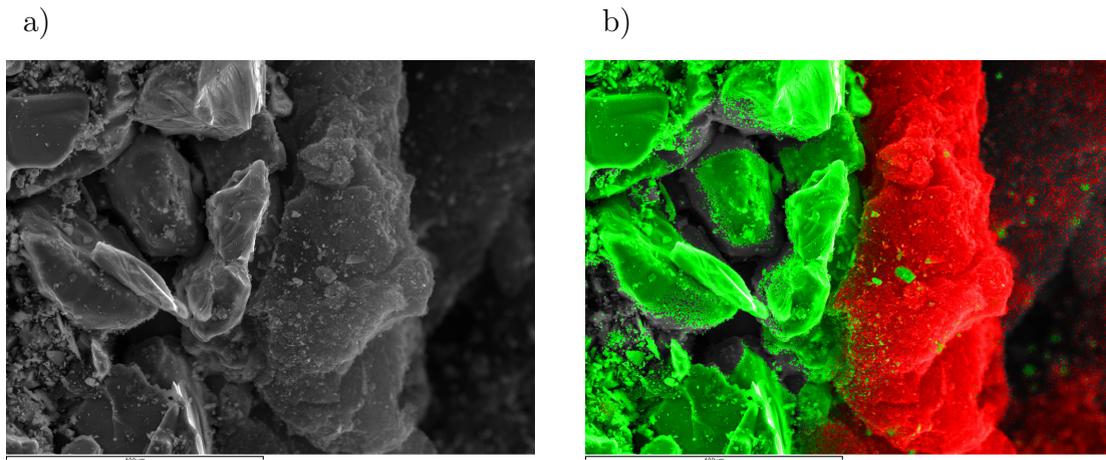


Figura 4.18: Pared porosa del canal de la imagen 4.17 analizada con el microscopio electrónico de barrido: a) Imagen de electrones secundarios; b) Mapa de elementos obtenido con EDS.

Tal y como se puede observar, la pared porosa está completamente limpia de hollín antes de la inyección de agua. A continuación se repite el mismo análisis con un canal del cuarto #2 afectada por la inyección de agua.

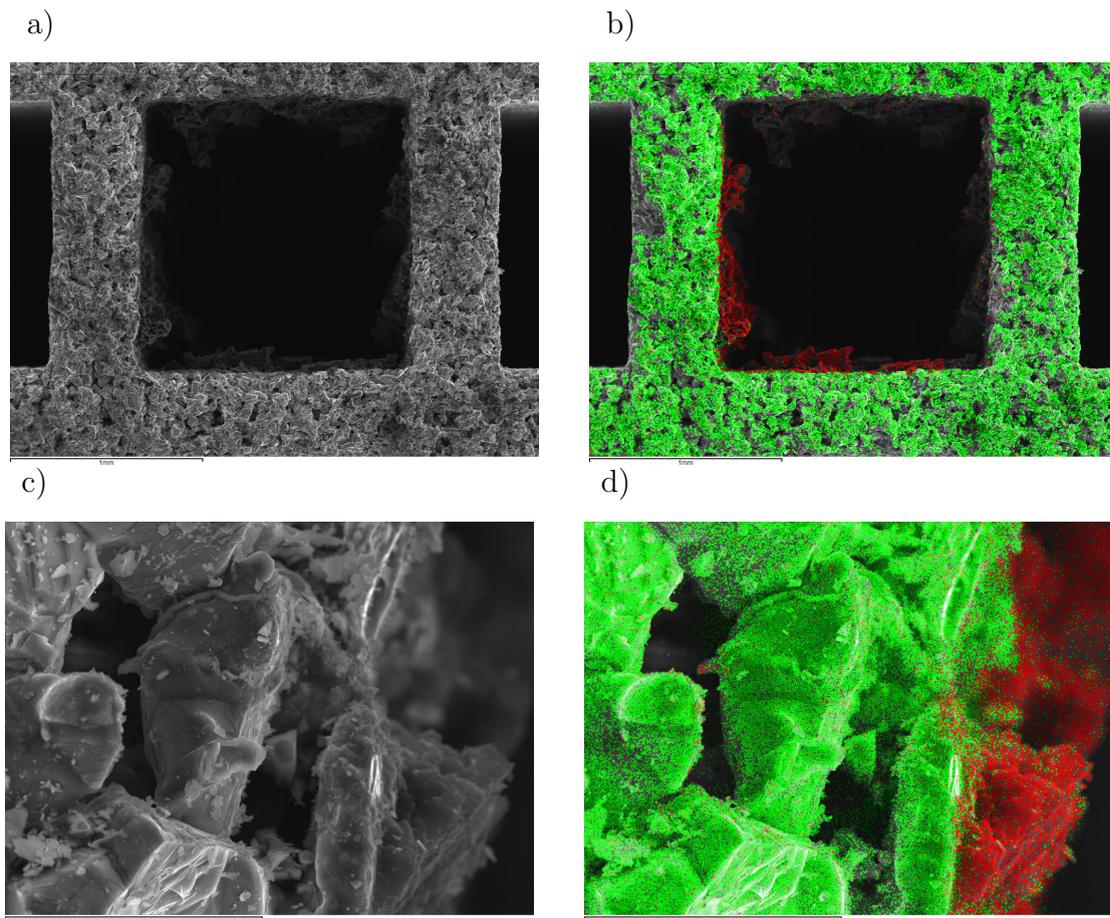


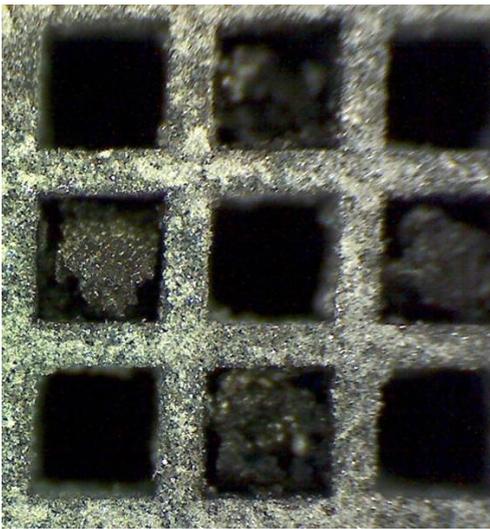
Figura 4.19: Canal del cuarto #2 analizado con el microscopio electrónico de barrido: a) Imagen de electrones secundarios del canal completo; b) Mapa de elementos obtenido con EDS del canal completo; c) Imagen de electrones secundarios de la pared porosa; b) Mapa de elementos obtenido con EDS de la pared porosa.

4. VISUALIZACIÓN Y ANÁLISIS DEL MEDIO POROSO

Tal y como ocurría con el cuarto #4 no se detecta penetración de hollín en el interior de la pared porosa, de lo que se puede deducir que la técnica de inyección de agua no tiene ningún efecto en la pared porosa y el único efecto que tiene es desplazar parte de la capa de partículas hacia el final.

Debido a que se cortó una sección de 1 cm de la sección #5 de los cuartos para poder obtener las muestras para observarlos con el microscopio electrónico de barrido se analizaron con la lupa estas secciones situadas a 21,5 cm de la entrada y se observó que se depositan fragmentos de capa de partículas en el final de los cuartos, pero que éstos no forman un tapón compacto. Esto se puede observar en la figura 4.20 a) en la que se muestra una imagen de la sección final del cuarto #3.

a)



b)

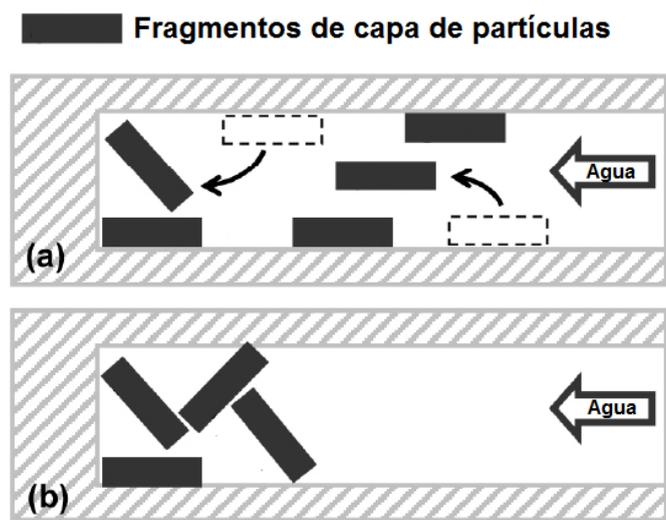


Figura 4.20: Fragmentos de capa de partículas acumulados en el final del DPF: a) Imagen del cuarto #3 a 21,5 cm de la entrada; b) Esquema que muestra como se depositan los trozos de capa de partículas al final del hollín.

5. Conclusiones

En el presente proyecto se ha evaluado experimentalmente el efecto de técnica de la inyección de agua en la entrada del DPF sobre la pérdida de presión. Para ello se han realizado ensayos en banco de flujo barriendo diferentes temperaturas y gastos máscicos trasegados por el DPF. La pérdida de presión medida se ha comparado antes y después de la inyección. Para justificar la pérdida de presión medida experimentalmente se ha recurrido a técnicas ópticas avanzadas. De este modo se ha llegado a las conclusiones que se recopilan a continuación.

En primer lugar, se puede observar que la técnica de inyección de agua es una técnica que permite reducir considerablemente la pérdida de presión en el filtro de partículas, dejando inalterada la eficiencia de filtrado, como ya habían obtenido otros autores. Comparando las muestras sometidas a inyección con una de referencia se ha observado que el paso del agua actúa sobre la capa de partículas, arrastrándola hacia el final de los canales de entrada y reduciendo notablemente su espesor. Consecuentemente, después de cada inyección la pérdida de presión se ve drásticamente reducida. Con respecto a la pared porosa, el microscopio electrónico ha permitido demostrar que la inyección de agua no influye en la penetración del hollín dentro de la misma. Consecuentemente, las propiedades de la pared porosa no se ven afectadas. Esto y la nombrada persistencia de una pequeña capa de partículas permiten mantener valores elevados de eficiencia de filtrado a pesar de la inyección de agua.

Comparando las diferentes muestras sometidas a inyecciones en condiciones diferentes se puede concluir que:

- Masa de agua inyectada: este parámetro, controlado por medio del tiempo de apertura del inyector ha resultado ser el parámetro que mas influye sobre la eficacia de esta técnica, ya que a mayor masa de agua inyectada se corresponde un número más alto de canales limpiados. Esto se traduce directamente en una notable reducción de la pérdida de presión generada por el filtro, lo cual conlleva una reducción en el consumo específico del motor.
- Gasto máscico de aire trasegado en el momento de la inyección: se ha observado que el efecto de este parámetro sobre la eficacia de la técnica es limitado. En concreto, puesto que las gotas de agua vienen empujadas por el flujo de aire, un mayor gasto máscico se refleja en una penetración del chorro ligeramente mayor a lo largo del canal. No obstante, ésto no se traduce en una reducción significativa en la pérdida de presión.

Analizando las imágenes de las secciones completas de las muestras se ha podido concluir que la eficacia de la técnica de inyección de agua no es uniforme en toda la sección de la muestra. En concreto se ha observado que por la peculiar manera en la que se llevó la inyección de agua, la zona más afectada es la zona inferior de la muestra. En menor medida se han visto afectados los canales más cercanos a la zona donde chocaba el chorro. Esta conclusión sugiere que una mejor distribución del chorro de agua hubiera permitido una

mayor reducción en la pérdida de presión. De aquí la importancia de mejorar la técnica de inyección y buscar el modo de distribuir el chorro de agua uniformemente en toda la superficie frontal del filtro.

Por todo lo anterior se puede concluir que se han desarrollado satisfactoriamente todos los objetivos planteados al inicio del proyecto. Además el presente estudio ha servido para desarrollar una metodología que permite evaluar el efecto de la inyección de agua en el DPF. Esto se realiza de dos maneras: por un lado se realiza una campaña de medidas en banco de flujo de la caída de presión antes y después de la inyección. Por otro lado, se ha abierto camino al uso de técnicas ópticas avanzadas en el campo de los sistemas de post-tratamiento que ha resultado de gran utilidad y que se seguirá aprovechando en el futuro. Concluir diciendo que se han desarrollado dos códigos en Matlab a utilizar junto con estas técnicas ópticas que permiten obtener el máximo provecho de las mismas.

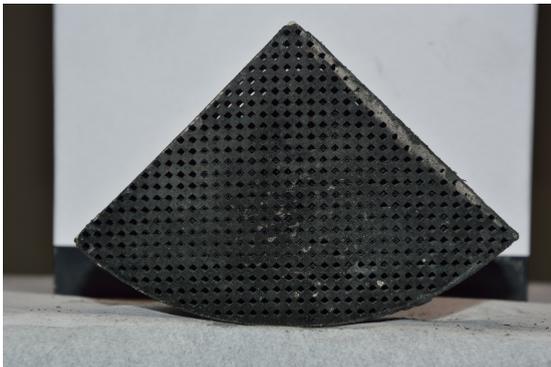
Anexo: Imágenes

En este anexo se añaden parte de las imágenes realizadas durante el presente trabajo separadas en secciones en función de la herramienta con la que han sido obtenidas. En primer lugar se muestran las imágenes realizadas con la cámara, para seguir con las realizadas con la lupa electrónica y acabar con las imágenes obtenidas con el microscopio electrónico de barrido.

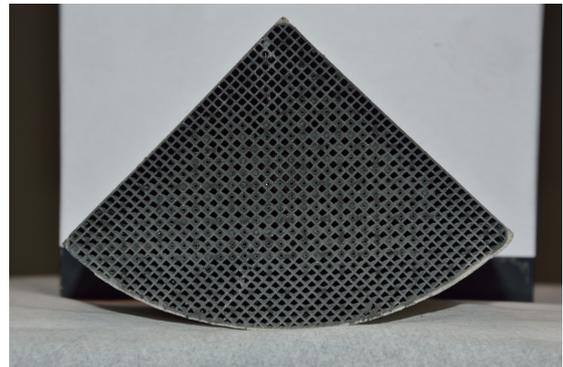
Cámara

A continuación se van a mostrar las fotografías de cuatro posiciones axiales para cada cuarto. Las posiciones axiales se van a mostrar son la entrada de cada cuarto (a), una fotografía a 2,5 cm (b), otra a 14,5 cm (c) y una última a 20,5 cm (d), todas las medidas tomadas desde la entrada. De este modo se puede ver la progresión de la capa de partículas acumulada en cada cuarto.

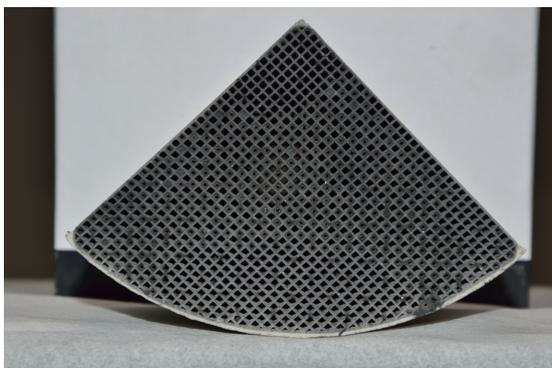
a)



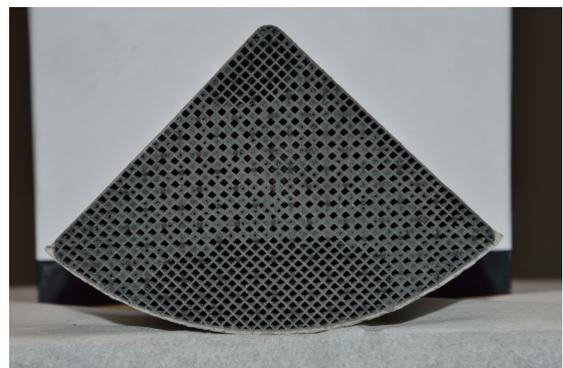
b)



c)

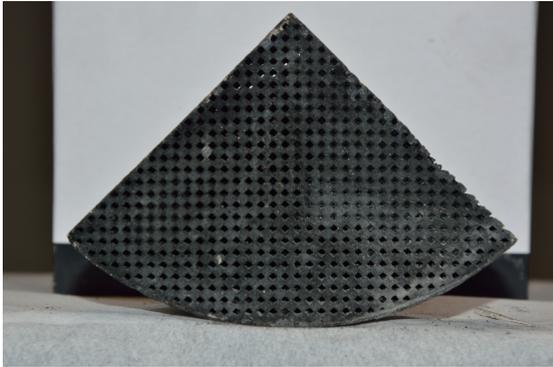


d)

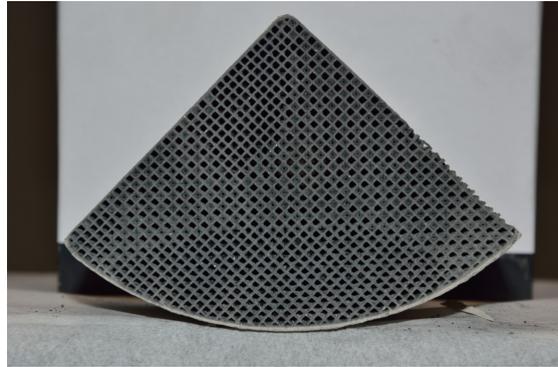


Imágenes obtenidas con la cámara del cuarto #1.

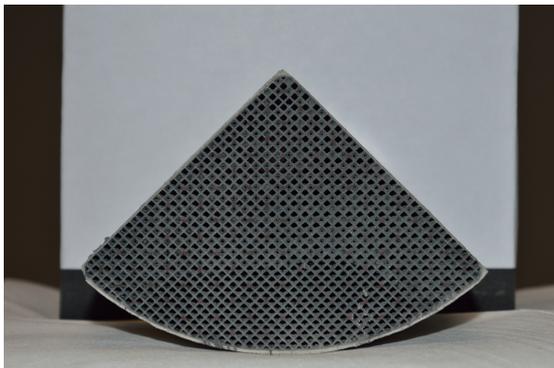
a)



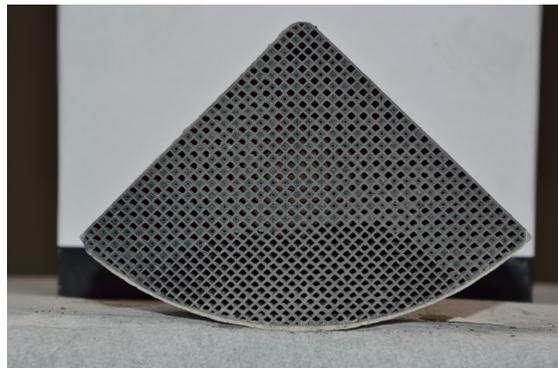
b)



c)



d)

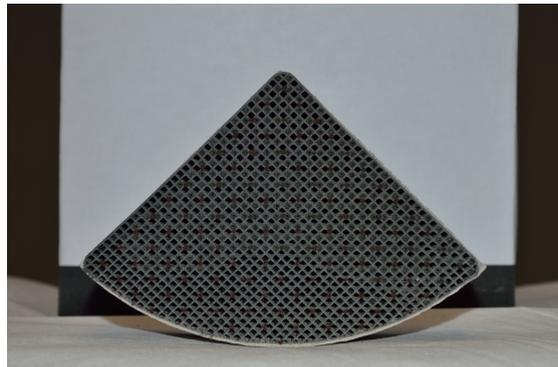


Imágenes obtenidas con la cámara del cuarto #2.

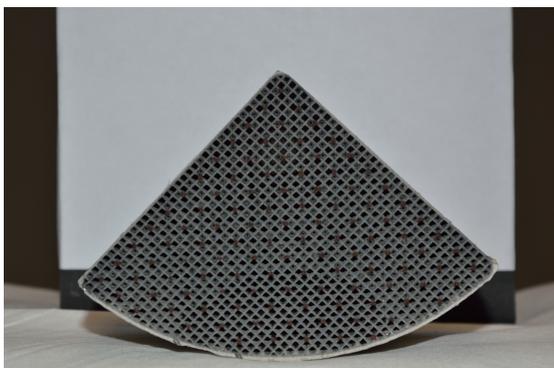
a)



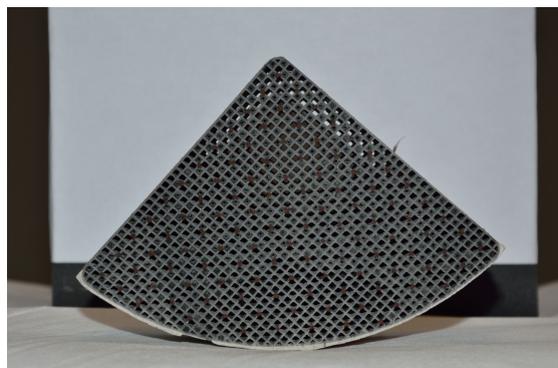
b)



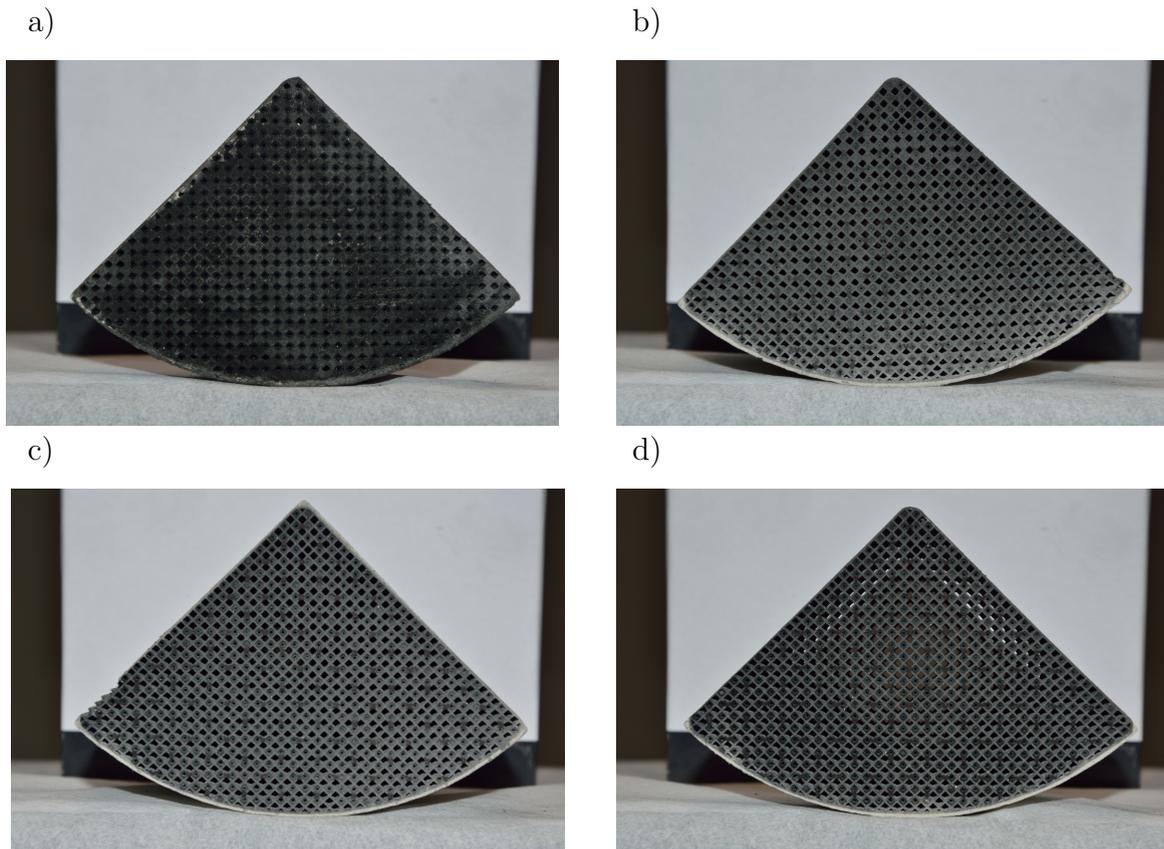
c)



d)



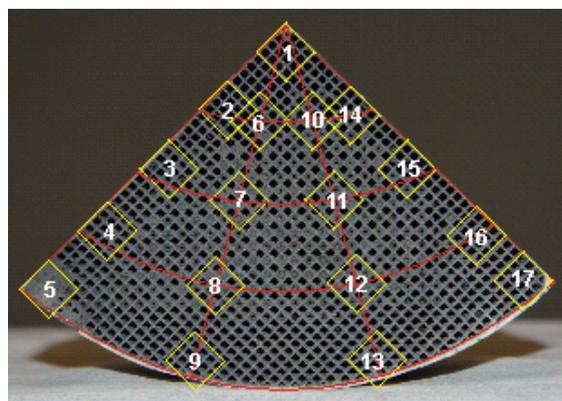
Imágenes obtenidas con la cámara del cuarto #3.



Imágenes obtenidas con la cámara del cuarto #4.

Lupa electrónica

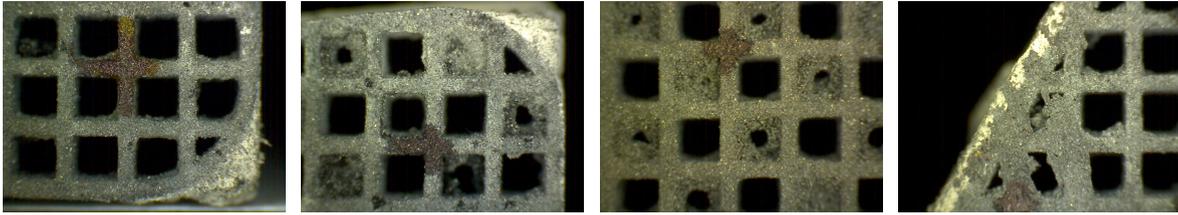
A continuación se van a mostrar las fotografías realizadas con la lupa electrónica. De las 17 imágenes que se tomaron de cada cuarto se van a mostrar cuatro de cada sección, correspondientes a las posiciones 1, 5, 11 y 13 que se muestran en el esquema de la siguiente figura.



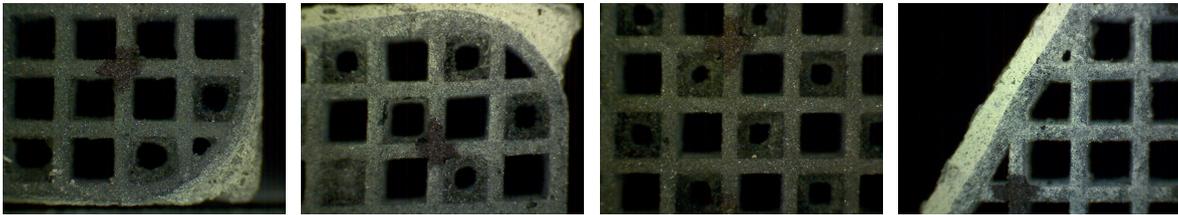
Esquema de las posiciones en las que se tomaton las imágenes con la lupa electrónica.

Estas cuarto imágenes se van a mostrar para tres secciones, que corresponden a las posiciones axiales a 2,5 cm (a), a 14,5 cm (b) y a 20,5 cm (c), todas las medidas tomadas desde la entrada. Estas imágenes se muestran para cada cuarto.

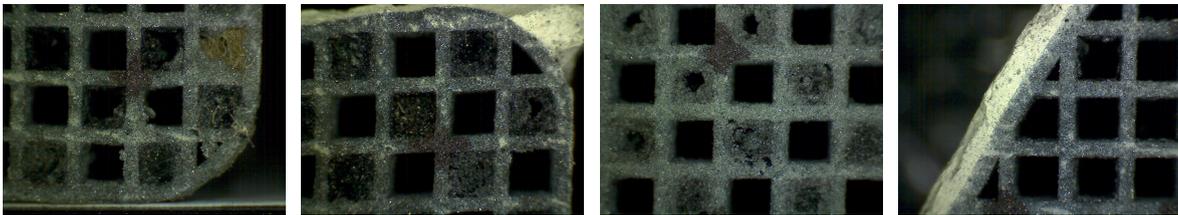
a)



b)

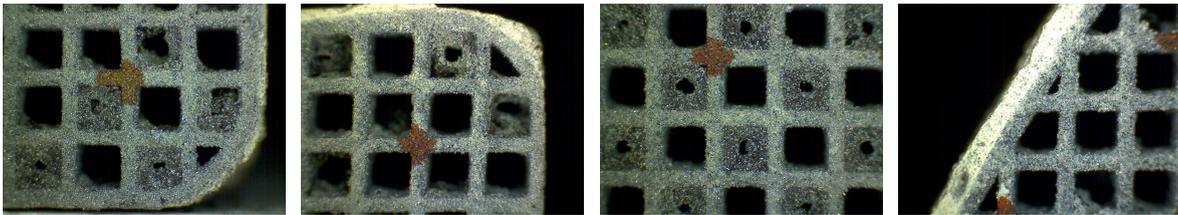


c)

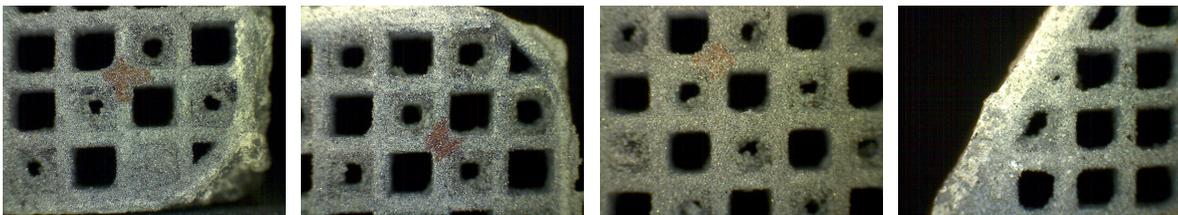


Imágenes obtenidas con la lupa electrónica del cuarto #1.

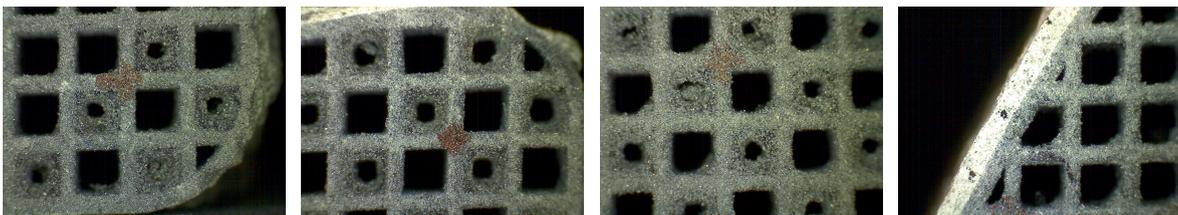
a)



b)

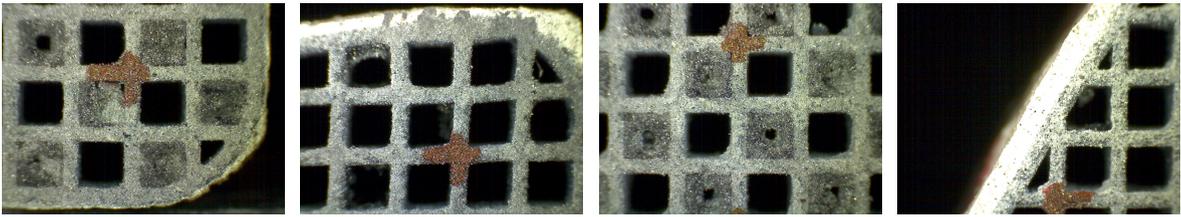


c)

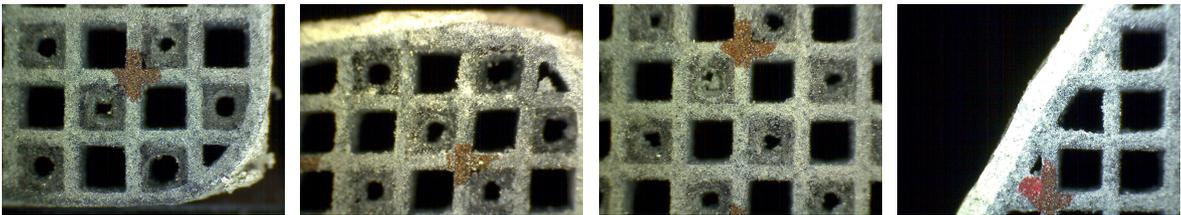


Imágenes obtenidas con la lupa electrónica del cuarto #2.

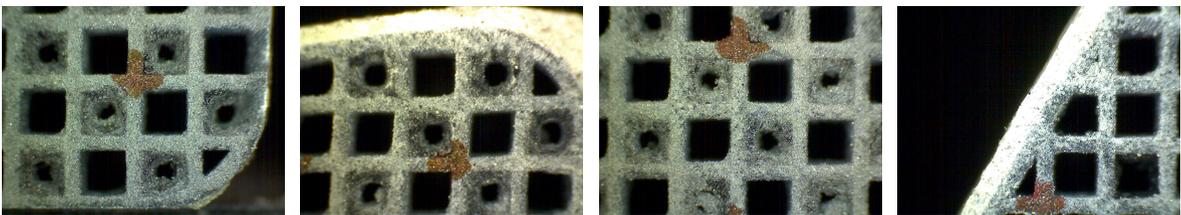
a)



b)

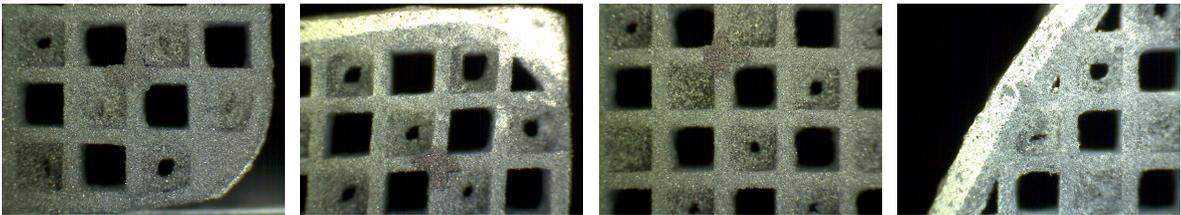


c)

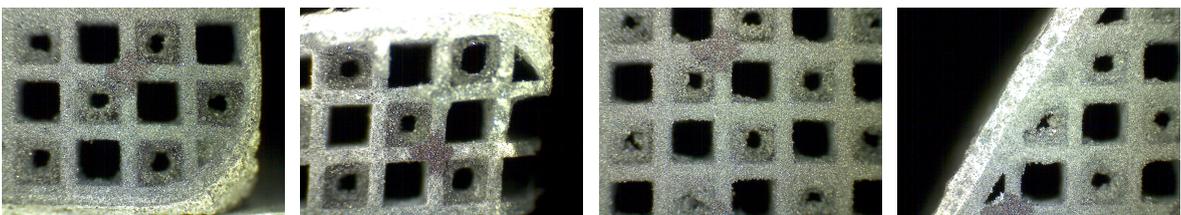


Imágenes obtenidas con la lupa electrónica del cuarto #3.

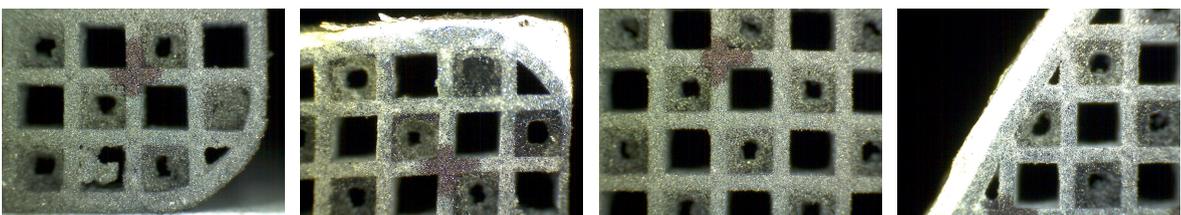
a)



b)



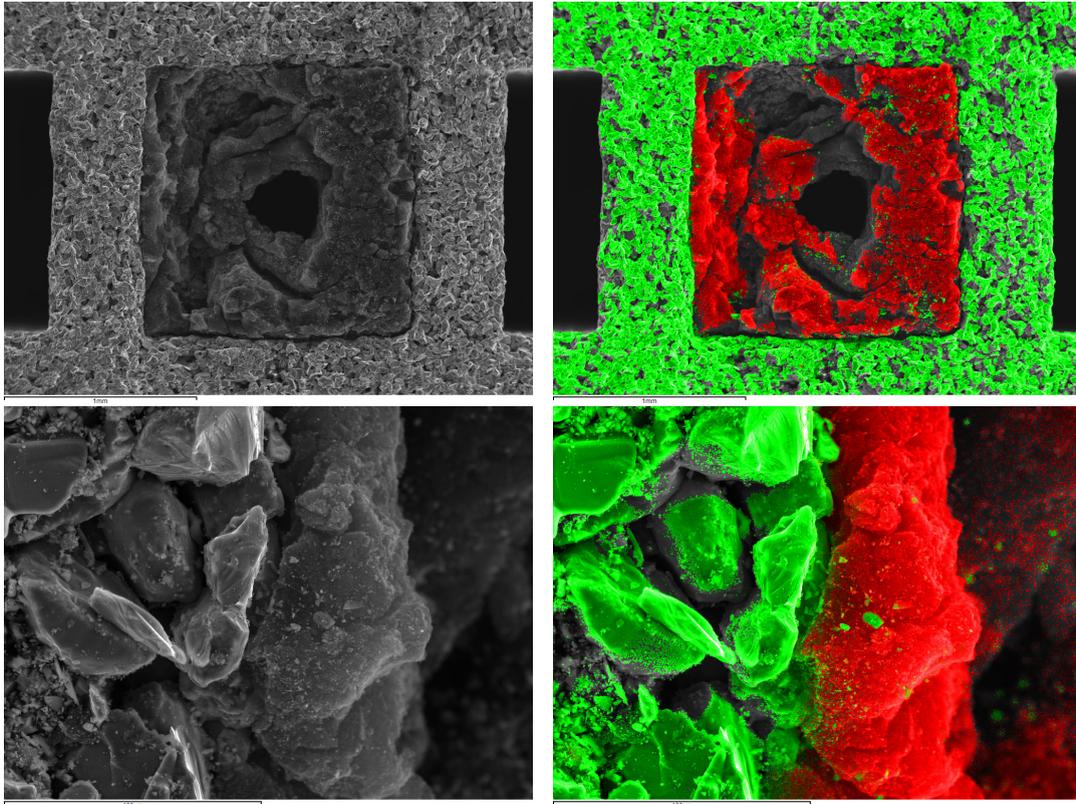
c)



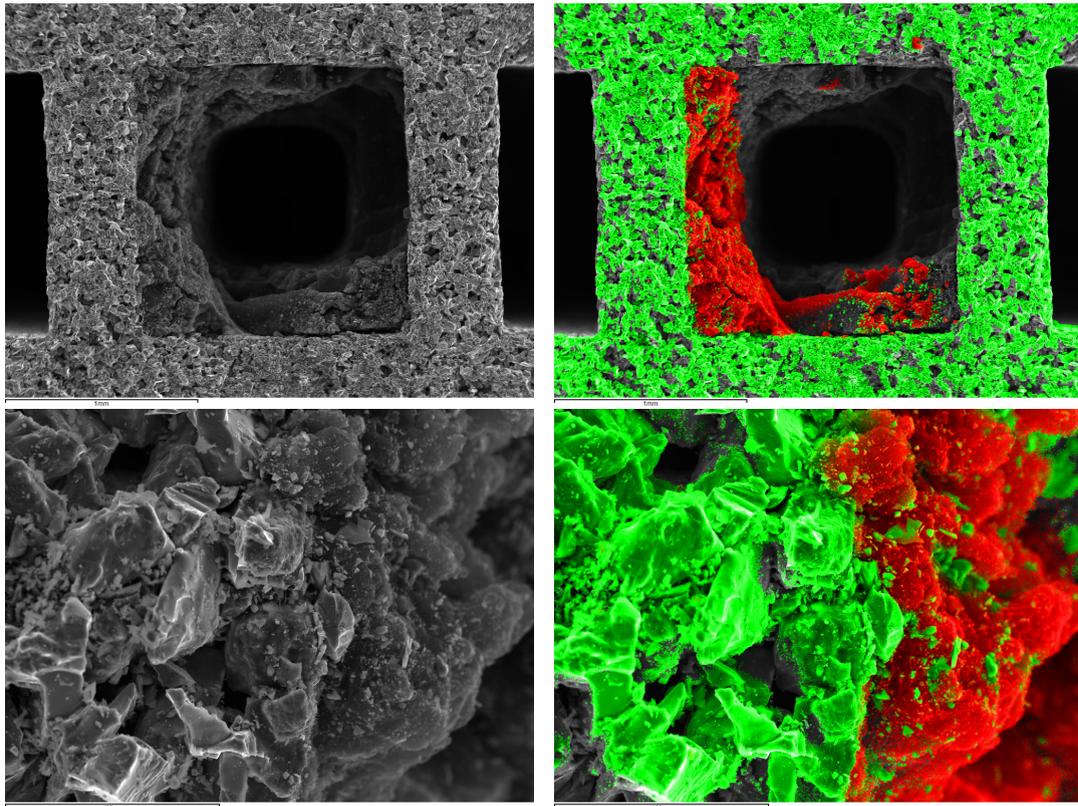
Imágenes obtenidas con la lupa electrónica del cuarto #4.

Microscopio electrónico de barrido

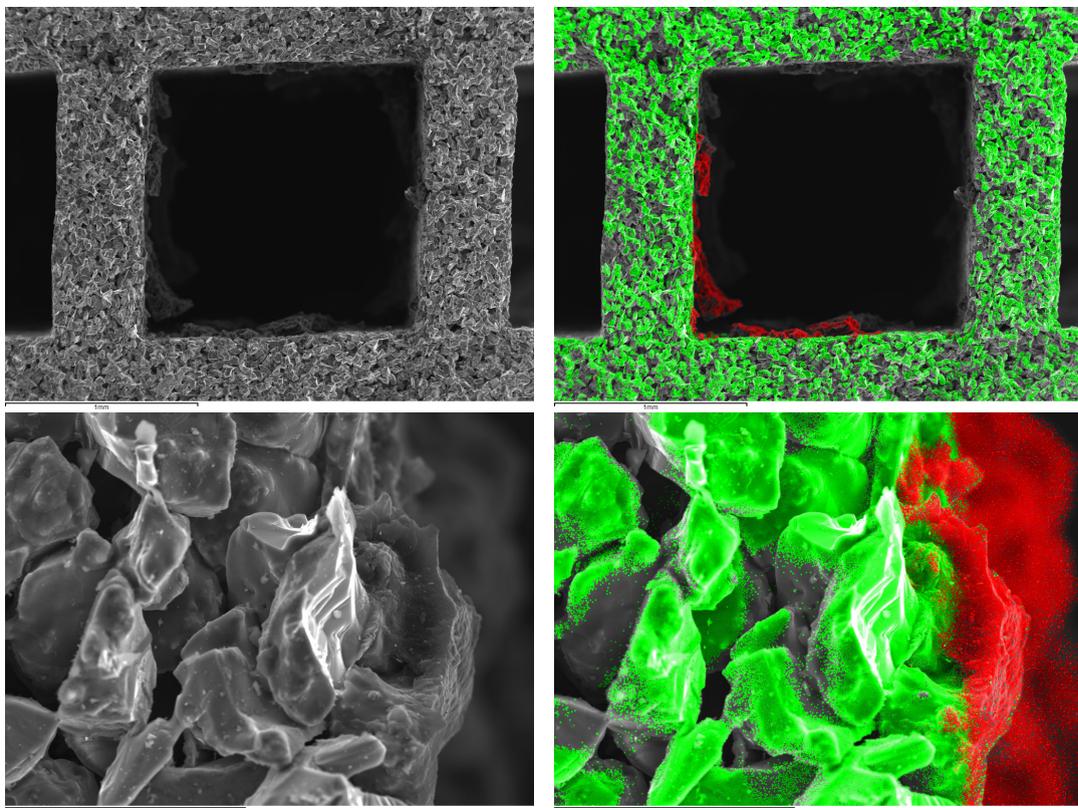
A continuación se van a mostrar cuatro fotografías por cada muestra que se analizó mediante microscopio electrónico de barrido. Las dos primeras se corresponden a imágenes del canal completo: una obtenida mediante el detector de electrones secundarios (SE) y otra mediante detector de rayos X (EDS). Acto seguido se muestran dos imágenes de una parte de la pared porosa que forma parte de los canales anteriormente mostrados. De las dos imágenes, al igual que en el caso anterior han sido tomadas mediante el detector de electrones secundarios (SE) y otra mediante detector de rayos X (EDS). Las cinco muestras analizadas con la ayuda del SEM son dos secciones del cuarto #4 que no fue sometido a la inyección de agua y tres secciones del cuarto #2.



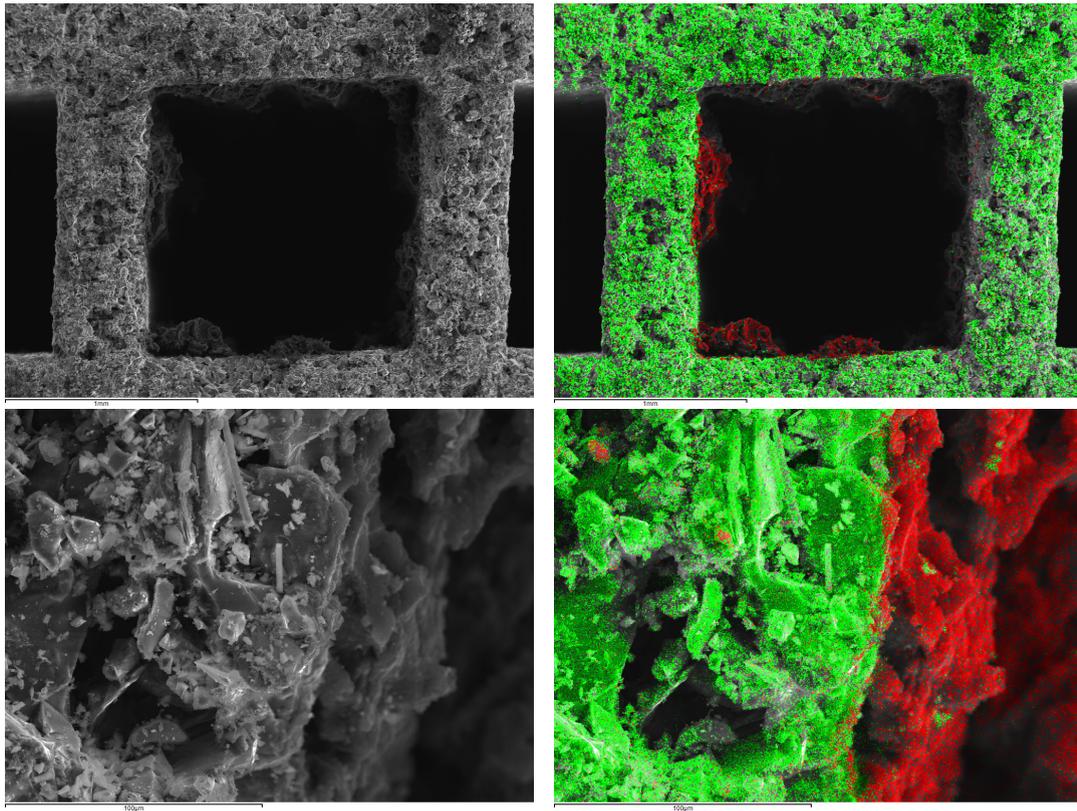
Imágenes obtenidas con el microscopio electrónico de barrido del cuarto #4 en la posición axial a 3 cm de la entrada.



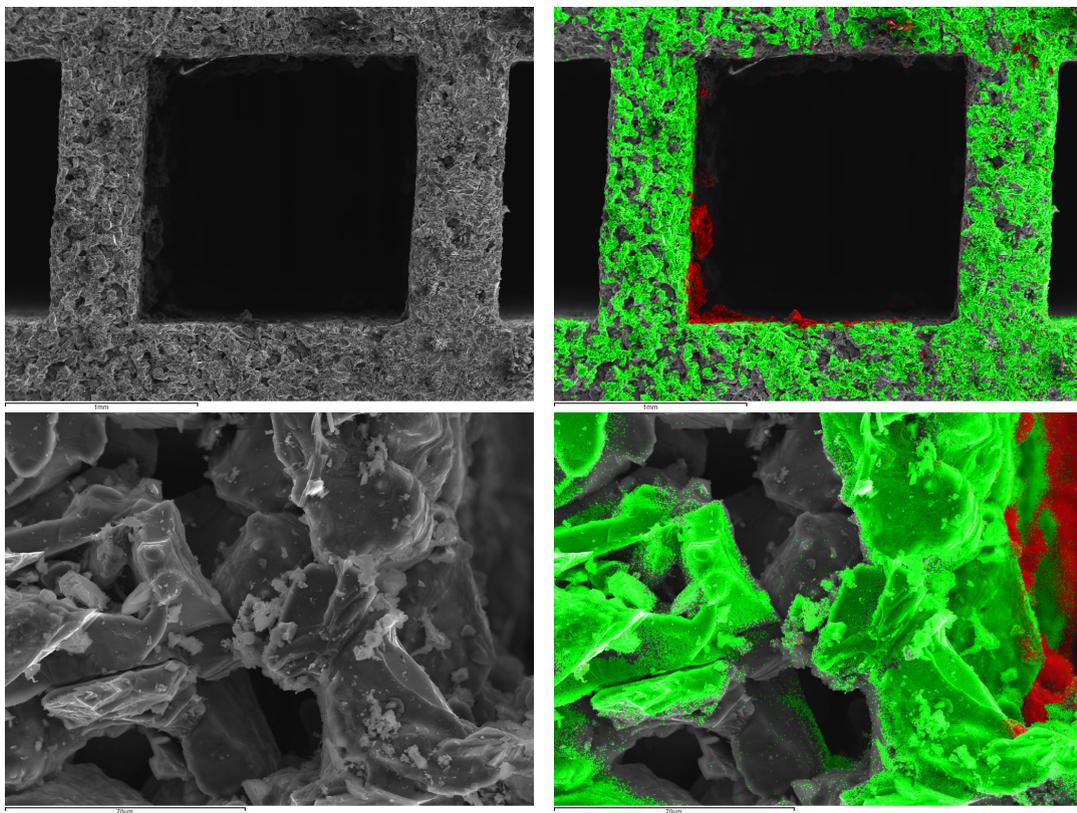
Imágenes obtenidas con el microscopio electrónico de barrido del cuarto #4 en la posición axial a 21 cm de la entrada.



Imágenes obtenidas con el microscopio electrónico de barrido del cuarto #2 en la posición axial a 3 cm de la entrada.



Imágenes obtenidas con el microscopio electrónico de barrido del cuarto #4 en la posición axial a 15 cm de la entrada.



Imágenes obtenidas con el microscopio electrónico de barrido del cuarto #2 en la posición axial a 21 cm de la entrada.

Bibliografía

- [1] F. Payri and J. M. Desantes. *Motores de combustión interna alternativos*. Universitat Politècnica de València, 2011.
- [2] Oscar Garcia Afonso. *Análisis teórico-experimental de la arquitectura pre-turbo de sistemas de post-tratamiento en MCIA*. PhD thesis, Universitat Politècnica de València, 2013.
- [3] Pedro Piqueras Cabrera. *Contribución al modelado termofluidodinámico de filtros de partículas Diesel de flujo de pared*. PhD thesis, Universitat Politècnica de València, 2010.
- [4] “PM Metalit”. Continental Emitec GmbH, www.emitec.com. (Consultado en Junio de 2016).
- [5] Ana Blanco Hocasar. *Análisis del efecto de la distribución del hollín sobre la pérdida de presión de filtros de partículas diésel*. Trabajo Final de Grado, Universitat Politècnica de València, 2015.
- [6] V. Bermúdez, J.R. Serrano, P. Piqueras, and O. García. Pre-dpf water injection technique for pressure drop control in loaded wall-flow diesel particulate filters. *Applied Energy*, 140:234–245, 2015.
- [7] V. Bermúdez, J.R. Serrano, P. Piqueras, and D. Campos. Analysis of the influence of pre-DPF water injection technique on pollutants emission. *Energy*, 89:778–792, 2015.
- [8] J.R. Serrano, V. Bermúdez, P. Piqueras, and E. Angiolini. Application of pre-DPF water injection technique for pressure drop limitation. *SAE Technical Paper*, 2015.
- [9] Servicio de Microscopía Electrónica de la Universidad Politécnica de Valencia. <http://www.upv.es/entidades/SME/info/753120normalc.html>. (Consultado en Julio de 2016).

Documento II
Pliego de condiciones

Ordenanza general de seguridad e higiene en el trabajo

En el presente capítulo del documento Pliego de condiciones se exponen los diferentes artículos de la ordenanza general de seguridad e higiene en el trabajo que se han de tener en cuenta para la realización del presente trabajo.

Obligaciones y derechos de los trabajadores

Incumbe a los trabajadores, la obligación de cooperar en la prevención de riesgos profesionales en la empresa y el mantenimiento del máximo higiene en la misma, a cuyos fines deberán cumplir fielmente los preceptos de esta Ordenanza y de sus instrucciones complementarias, así como las órdenes e instrucciones, que a tales efectos les sean dados por sus superiores.

Los trabajadores, expresamente, están obligados a:

- Recibir las enseñanzas sobre materia en Seguridad e Higiene y sobre salvamento y socorrismo en los centros de trabajo que les sean facilitados por la empresa o en las instrucciones del Plan Nacional.
- Usar correctamente los medios de protección personal y cuidar de su perfecto estado de conservación.
- Dar cuenta inmediatamente a sus superiores de las averías y las deficiencias que puedan ocasionar peligros en cualquier centro o puesto de trabajo.
- Cuidar y mantener su higiene personal para evitar enfermedades contagiosas o molestias a los compañeros de trabajo.
- Someterse a los reconocimientos médicos preceptivos y vacunaciones o inmunizaciones ordenados por las Autoridades Sanitarias competentes o por el Servicio Médico de las Empresas.
- No introducir bebidas u otras sustancias no autorizadas en los centros de trabajo. Tampoco se podrá presentar o permanecer en los mismos en estado de embriaguez o de cualquier otro género de intoxicación.
- Cooperar en la extinción de siniestros y en el salvamento de las víctimas de accidentes de trabajo en las condiciones que, en cada caso, fueren racionalmente exigibles.
- Todo trabajador, después de solicitar de su inmediato superior medios de protección personal de carácter preceptivo para la realización de su trabajo, queda facultado para demostrar la ejecución de éste, en tanto no le sean facilitados dichos medios, si bien deberá dar cuenta del hecho al Comité de Seguridad e Higiene o a uno de sus compañeros, sin perjuicio, además de ponerlo en conocimiento de la Inspección Provincial de Trabajo.

Seguridad estructural

Todos los edificios permanentes o provisionales, serán de construcción segura y firme para evitar riesgos de desplome y los derivados de los fenómenos atmosféricos. Por este motivo

los cimientos, pisos y demás elementos de los edificios ofrecerán resistencia suficiente para sostener y suspender con seguridad, las cargas para los que han sido calculados.

Además, para preservar esta seguridad, se indicará por medio de rótulos o inscripciones las cargas que los locales pueden soportar o suspender, quedando totalmente prohibido sobrecargar los pisos y plantas de los edificios.

Superficies y cubicación

Los locales de trabajo reunirán las siguientes condiciones mínimas:

- Tres metros de altura desde el piso al techo.
- Dos metros cuadrados de superficie por cada trabajador.
- Diez metros cúbicos para cada trabajador.

No obstante, en los establecimientos comerciales, de servicios y locales destinados a oficinas y despachos la altura a que se refiere el apartado 1 podrá quedar reducida hasta 2.5 m., pero respetando la cubicación que se establece en el tercer apartado y siempre que el aire se renueve suficientemente.

Para el cálculo de la superficie y el volumen, no se tendrá en cuenta los espacios ocupados por máquinas, aparatos, instalaciones y materiales.

Suelo, techos y paredes

El pavimento constituirá un conjunto homogéneo, llano y liso, sin soluciones de continuidad; será de material consistente, no resbaladizo o susceptible de serlo con el uso y además de fácil limpieza. Estará al mismo nivel, y de no ser así, se salvarán las diferencias de altura por medio de rampas con pendientes no superiores al 10 %.

Por otro lado, tanto los techos como las paredes, deberán reunir las condiciones suficientes para resguardar a los trabajadores de las inclemencias del tiempo. Si han de soportar o suspender cargas deberán reunir las condiciones que se establezcan para estos en el artículo segundo.

Disposiciones generales

Todos los lugares de trabajo o tránsito tendrán iluminación natural, artificial o mixta, pero en cualquier caso apropiado a las operaciones que en ellos se esté realizando. Aunque la luz, como se acaba de comentar puede ser natural o artificial, se intentará en la medida de lo posible que ésta sea natural.

Se deberá intensificar la iluminación en máquinas peligrosas, lugares de tránsito con riesgo de caídas, escaleras y salidas de urgencia.

Iluminación de emergencia

En todos los centros de trabajo, se dispondrá de medios de iluminación de emergencia adecuados a las dimensiones de los locales y al número de trabajadores ocupados simultáneamente, capaces de mantener al menos durante una hora la intensidad de cinco luxes y mediante una fuente de energía que será independiente del sistema normal de iluminación.

Ventilación, temperatura y humedad

En los lugares de trabajo y sus anexos se mantendrá, por medios naturales o artificiales, unas condiciones atmosféricas adecuadas, evitando el aire viciado, exceso de calor o de frío, humedad o sequía y los olores desagradables.

En ningún caso, el anhídrido carbónico ambiental, podrá sobrepasar la proporción de 50/10000, y el monóxido de carbono, la de 1/10000.

En los locales de trabajo cerrados, el suministro de aire fresco y limpio por hora y por trabajador, será al menos de 30 metros cúbicos, salvo que se efectúe una renovación total del aire varias veces por hora, no inferior a seis veces para trabajos sedentarios, ni a diez veces para trabajos que exijan un esfuerzo físico superior al normal. En el otro extremo, la circulación de aire en locales cerrados se acondicionará de modo que los trabajadores no estén expuestos a corrientes molestas y que la velocidad del aire no exceda de 15 metros por minuto con temperatura normal, ni de 45 metros por minuto en ambientes extremadamente calurosos.

En los centros de trabajo expuestos a altas y bajas temperaturas, serán evitadas las variaciones bruscas por el medio que se considere más eficaz. Cuando la temperatura sea extremadamente distinta entre los lugares de trabajo, deberán existir locales de paso para que los operarios se adapten gradualmente de unas condiciones a las otras.

De acuerdo con todo lo anterior, se fijan como límites de temperatura y humedad en locales y para los distintos trabajos, siempre que el procedimiento de fabricación lo permita, los siguientes:

- Para trabajos sedentarios: de 17 a 22 °C.
- Para trabajos ordinarios: de 15 a 18 °C.
- Para trabajos que exija acusado esfuerzo muscular: de 12 a 15 °C.

A pesar de estas limitaciones, todos los trabajadores estarán debidamente protegidos contra las irradiaciones directas y excesivas de calor. La humedad relativa de la atmósfera oscilará del 40 al 60 %, salvo en instalaciones que haya peligro de generarse electricidad estática, en cuyo caso este valor se deberá limitar necesariamente por debajo del 50 %.

En aquellos trabajos, en los que por exigencias del proceso los locales están sometidos a un calor o frío extremo, se eliminará la permanencia de los operarios estableciendo, en cada caso, los turnos adecuados.

Ruidos vibraciones y trepidaciones

Los ruidos y vibraciones se evitarán o reducirán en la medida de lo posible en su foco de origen, tratando de aminorar su propagación en los locales en lo que se encuentren personas trabajando.

De esta forma, el anclaje de las máquinas y aparatos que produzcan ruidos, vibraciones y trepidaciones se realizarán con las técnicas más eficaces, a fin de lograr su óptimo equilibrio estático y dinámico, tales como bancadas cuyo peso sea superior entre 1.5 y 2.5 veces el peso de la máquina que soportan, por aislamiento de la estructura general o por otros recursos técnicos.

Además del anclaje, las máquinas que produzcan ruidos o vibraciones molestas se aislarán adecuadamente y en el recinto de aquellas, sólo trabajará el personal para su mantenimiento durante el tiempo indispensable.

Se extremará el cuidado y mantenimiento de las máquinas u aparatos que produzcan vibraciones molestas o peligrosas a los trabajadores y muy especialmente los órganos móviles y los dispositivos de transmisión de movimiento de las vibraciones que generan estas máquinas.

El control de ruidos agresivos en los centros de trabajo no se limitará al aislamiento del foco que los produce, sino que también deberán adoptarse las prevenciones técnicas necesarias para evitar que los fenómenos de reflexión y resonancia alcancen niveles peligrosos para la salud de los trabajadores.

Las máquinas-herramientas que originen trepidaciones deberán además estar provistas de horquillas u otros dispositivos amortiguadores, y al trabajador que las utilice se le proveerá de equipo de protección personal anti vibratorio (cinturón, guantes, almohadillas y botas).

Protección contra contactos en equipos eléctricos

En las instalaciones y equipos eléctricos, para la protección de las personas contra los contactos con partes habitualmente en tensión, se adoptarán alguna de las siguientes prevenciones:

- Se alejarán las partes activas de la instalación a distancia suficiente del lugar donde las personas habitualmente se encuentran o circulan, para evitar un contacto fortuito o por la manipulación de objetos conductores, cuando éstos puedan ser utilizados cerca de estas partes activas de la instalación.
- Se recubrirán las partes activas con el aislamiento apropiado, que permita conservar indefinidamente las propiedades del conductor y que limiten la corriente de contacto a un valor inocuo para las personas.
- Se interpondrán obstáculos que impidan todo contacto accidental con las partes activas de la instalación. Los obstáculos de protección deben estar fijados en forma segura y ser capaces de resistir los esfuerzos mecánicos usuales. Para la protección contra los riesgos de contacto con las masas de las instalaciones que puedan quedar accidentalmente con tensión, se adoptarán, en corriente alterna uno o varios de los siguientes dispositivos de seguridad:
 - Puesta a tierra de las masas. Las masas deben estar unidas eléctricamente a una toma de tierra o a un conjunto de tomas de tierra interconectadas, que tengan una resistencia apropiada. Las instalaciones, tanto con neutro aislado como con neutro unido a tierra, deben estar permanentemente controladas por un dispositivo que indique automáticamente la existencia de cualquier defecto de aislamiento, o que separe automáticamente al instalación o parte de la misma, en la que esté el defecto de la fuente de energía de la que alimenta.
 - Dispositivos de corte automático o de aviso, sensibles a la corriente de defecto (interruptores diferenciales), o a la tensión de defecto (relés de tierra).
 - Unión equipotencial o por superficie aislada de tierra o de las masas (conexiones equipotenciales).

- Separación de los circuitos de utilización de las fuentes de energía, por medio de transformadores o grupos convertidores, manteniendo aislados de tierra todos los conductores del circuito de utilización, incluso el neutro.
- Poner doble aislamiento de los equipos y máquinas eléctricas.

En el caso de que existan en la empresa circuitos alimentados mediante corriente continua, se adoptarán sistemas de protección adecuados para cada caso, similares a los que se acaban de mencionar para la corriente alterna.

Electricidad estática

Para evitar peligros por la acumulación de electricidad estática, y especialmente aquellos que pueden venir propiciados por la producción de una chispa en ambientes inflamables, se adoptarán en general algunas o incluso ambas precauciones que a continuación se especifican:

1. La humedad relativa del aire se mantendrá siempre con un valor por debajo del 50 %.
2. Las cargas de electricidad estática que puedan acumularse en los cuerpos metálicos, serán neutralizadas por medio de la conexión de conductores a tierra. La forma de realizar estas conexiones puede variar dependiendo del tipo de máquina.

Recomendaciones sobre materias inflamables

Con respecto al almacenamiento y a la manipulación de las sustancias inflamables, dado su peligrosidad, estas serán todas las precauciones que se deberán cumplir para evitar cualquier accidente:

1. Se prohíbe el almacenamiento conjunto de materiales que al reaccionar entre sí puedan originar incendios.
2. Sólo podrán almacenarse materiales inflamables en los lugares y con los límites cuantitativos señalados por los reglamentos técnicos vigentes. De esta forma se almacenarán en locales distintos a los de trabajo. Si el local de trabajo es único, se deberán construir recintos aislados. En los puestos de trabajo, sólo se depositará la cantidad estrictamente necesaria para el proceso de fabricación.
3. En los almacenes de materias inflamables, los pisos deberán ser incombustibles y además impermeables, a fin de evitar la propagación del posible fuego y evitar escapes hacia sótanos, sumideros o desagües respectivamente.
4. Antes de almacenar sustancias inflamables pulverizadas, se comprobará su enfriamiento.
5. El llenado de los depósitos de líquidos inflamables, se efectuará lentamente y evitando la caída libre desde orificios de la parte superior, para evitar la mezcla de aire con los vapores explosivos. Estos recipientes de líquidos, además se rotularán indicando su contenido y las precauciones necesarias que se deberán tomar para su manipulación.
6. Antes de almacenar envases de productos inflamables, se comprobará su cierre hermético y si han sufrido algún deterioro o rotura, para evitar posibles fugas.
7. El envasado y embalaje de sustancias inflamables se efectuará, siempre que sea posible, fuera de los almacenes de donde procedan, con las precauciones y equipo de protección adecuado a cada caso.

Prevención y extinción de incendios

En los centros de trabajo que ofrezcan peligro de incendios, con o sin explosión, se adoptarán las prevenciones que se indican a continuación, combinando su empleo con la protección general más próxima que puedan prestar los servicios públicos contra incendios:

1. Donde existan conducciones de agua a presión, se instalarán suficientes tomas o bocas de agua a distancia conveniente entre sí y cercanas a los puestos fijos de trabajo y lugares de paso personal, colocando junto a tales tomas las correspondientes mangueras, que tendrán la sección y resistencia adecuadas para soportar la presión.
2. Cuando se carezca normalmente de agua a presión o ésta sea insuficiente, se instalarán depósitos con un volumen suficiente para poder combatir los posibles incendios.
3. En los incendios provocados por líquidos, grasas, pinturas inflamables o polvos orgánicos, solo se deberá emplear agua, y esta deberá estar además muy pulverizada.
4. No se empleará agua para extinguir fuegos en polvos de aluminio o magnesio en presencia de carburo de calcio u otras sustancias que al contacto con el agua produzcan explosiones, gases inflamables o incluso nocivos.
5. En incendios que afecten a instalaciones eléctricas con tensión, se prohibirá el empleo de extintores de espuma química, soda ácida o agua.
6. En la proximidad a los puestos de trabajo con mayor riesgo de incendio, se dispondrán, colocados en sitio visible y accesible fácilmente, extintores portátiles o móviles sobre ruedas, de espuma física o química, mezcla de ambas o polvos secos, anhídrido carbónico o agua, según convenga a la causa determinante del fuego a extinguir que sea más probable que haga su aparición.
7. Cuando se empleen distintos tipos de extintores serán rotulados con carteles indicadores del lugar o clase de incendio en el que deban emplearse. Estos extintores serán revisados periódicamente y cargados según las normas de las casas constructoras inmediatamente después de usarlos.
8. Se instruirá al personal, cuando sea necesario, del peligro que presenta el empleo de tetracloruro de carbono y cloruro de metilo en atmósferas cerradas y de las reacciones químicas peligrosas que puedan producirse en los locales de trabajo entre los líquidos extintores y las materias sobre las que puedan proyectarse.
9. En las dependencias con alto riesgo de incendio, queda terminantemente prohibido fumar o introducir cerillas, mecheros o útiles de ignición. Esta prohibición se indicará con carteles visibles a la entrada y en los espacios libres de las paredes de tales dependencias.
10. Se prohíbe igualmente al personal introducir o emplear útiles de trabajo, no autorizados por la empresa que puedan ocasionar chispas por contacto o proximidad a sustancias inflamables.
11. Es obligatorio el uso de guantes, manoplas, mandiles o trajes ignífugos, y de calzado especial contra incendios, que las empresas facilitarán a los trabajadores para uso individual.

Documento III

Presupuesto

1. Introducción

El presente presupuesto corresponde al proyecto *Análisis de los efectos de la inyección de agua en un filtro de partículas diesel sobre la acumulación de hollín* realizado en el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia.

Tal y como se ha comentado en el capítulo 1 el departamento es el encargado de la financiación del mismo.

En este documento se expone una aproximación del coste de la realización del presente proyecto. Para ello se ha dividido el proyecto en cuatro partes: 1. Planificación y reuniones; 2. Ensayos en banco de flujo; 3. Visualización de la pared porosa y 4. Post-procesado de imágenes. A continuación se detalla en que consistió cada una de las partes.

1. Planificación y reuniones: En esta parte se aborda tanto la primera etapa de planificación de los objetivos que se debían cumplir con el presente proyecto como las reuniones que se han ido abordando a lo largo del presente proyecto para su cumplimiento.
2. Ensayos en banco de flujo: En esta segunda parte se aborda el coste de todos los equipos necesarios para la realización de los ensayos, así como el coste asociado a la mano de obra necesaria para la realización del mismo.
3. Visualización de la pared porosa: En esta parte se engloban tanto la obtención de imágenes mediante la cámara y la lupa electrónica como la realizada en el Servicio de Microscopía Electrónica mediante microscopio electrónico de barrido.
4. Post-procesado de imágenes: Esta última etapa abarca toda la fase de post-procesado de imágenes mediante el software informático Matlab realizado sobre las imágenes obtenidas mediante las tres herramientas utilizadas en el presente proyecto

En cada una de las partes se contemplan los costes de amortización de equipos, los de los materiales utilizados y los recursos humanos necesarios.

A continuación se detalla el presupuesto correspondiente a cada una de las etapas.

2. Presupuesto

Tal y como se ha introducido el presupuesto de este trabajo vendría dado por los recursos humanos que han sido necesarios, la amortización de los equipos y los materiales fungibles. La mano de obra comprende el coste de los dos ingenieros superiores senior cuyo valor es de 60 €/h, y el del autor del trabajo que lleva asociado un coste de 30 €/h puesto que se trata de un ingeniero junior. Por otro lado, la amortización de los equipos viene dada por los distintos equipos informáticos junto con la licencia de software necesario. Finalmente, el material fungible es aquel que se ha consumido durante el proyecto y que, por tanto, no tiene costes de amortización asociados.

Es importante señalar que todos los equipos informáticos y licencias utilizados durante el desarrollo de este trabajo ya habían sido adquiridos con anterioridad al mismo por lo que el coste asociado a su compra no se tiene en cuenta y sólo se achacarán gastos a los mismos debido a su amortización.

A continuación se entra en detalle en cada una de las fases que han comprendido dicho estudio.

2.1. Planificación y reuniones

En la primera fase del trabajo se realizaron reuniones entre los dos ingenieros superiores senior durante un tiempo de 8 horas para fijar los objetivos y planificar el desarrollo del proyecto. Su coste se presenta en la tabla 2.1

Tabla 2.1: Coste de la mano de obra asociado a las reuniones de planificación del trabajo.

Concepto	Unidades [h]	Coste unitario [€/h]	Importe [€]
Ingeniero superior senior	16	60	960
	Subtotal		960

Además se realizaron numerosas reuniones durante la realización del proyecto, que se han dividido en función de quien participó en las mismas:

- Reuniones entre ingeniero superior (Tutor) e ingeniero junior con una frecuencia de 30 min/2 semanas (Tabla 2.2).

Tabla 2.2: Coste de la mano de obra asociado a las reuniones entre ingeniero superior (Tutor) y junior.

Concepto	Unidades	Coste unitario	Importe
	[h]	[€/h]	[€]
Ingeniero superior senior	8	60	480
Ingeniero junior	8	30	240
Subtotal			720

- Reuniones entre ingeniero superior e ingeniero junior con una frecuencia de 30 min/semana (Tabla 2.3).

Tabla 2.3: Coste de la mano de obra asociado a las reuniones entre ingeniero superior y junior.

Concepto	Unidades	Coste unitario	Importe
	[h]	[€/h]	[€]
Ingeniero superior senior	16	60	960
Ingeniero junior	16	30	480
Subtotal			1440

- Reuniones entre dos ingenieros superiores e ingeniero junior con una frecuencia de 30 min/2 semanas (Tabla 2.4).

Tabla 2.4: Coste de la mano de obra asociado a las reuniones entre ingeniero superior (Tutor) y junior.

Concepto	Unidades	Coste unitario	Importe
	[h]	[€/h]	[€]
Ingeniero superior senior	16	60	960
Ingeniero junior	8	30	240
Subtotal			1200

De este modo el coste total de la mano de obra asociado a las reuniones llevadas a cabo en esta etapa se resume en la tabla 2.5

Tabla 2.5: Coste de la mano de obra asociado a la partida de reuniones.

Concepto	Importe	
	[€]	
Ingeniero superior senior	3360	
Ingeniero junior	960	
Subtotal		4320

2.2. Ensayos en banco de flujo

Esta parte conlleva costes asociados a la mano de obra, amortización de equipos y material fungible.

La mano de obra se corresponde con el trabajo realizado por el autor del trabajo y el técnico de laboratorio durante las horas de realización del mismo y su coste viene recogido en la tabla 2.6.

Tabla 2.6: Coste de la mano de obra asociado a los ensayos en banco de flujo.

Concepto	Unidades [h]	Coste unitario [€/h]	Importe [€]
Ingeniero junior	140	30	4200
Técnico de laboratorio	140	25	3500
Subtotal			7700

El coste de amortización de los equipos es el siguiente. Para su cálculo se ha considerado que el periodo de amortización es de 5 años para todos los elementos que conforman la tabla 2.7. El coste de amortización de los equipos durante el tiempo utilizado en el proyecto viene detallado en la tabla ref:amort2.

Tabla 2.7: Equipos utilizados durante los ensayos en banco de flujo.

Concepto	Importe [€]
Ordenador	700
Microsoft Office	200
Grapher	500
Calentador de aire	200
Columnas de agua (x4)	420
Multímetro digital	30
Termopar (x3)	60
Herramientas	50
Subtotal	2160

Tabla 2.8: Amortización de los equipos utilizados durante los ensayos en banco de flujo.

Coste equipos	2160	[€]
Periodo de amortización	5	[años]
Tiempo de amortización	1	[mes]
Coste/año	432	[€]
Coste/mes	36	[€]
Coste	36	[€]

El coste del material fungible utilizado durante la realización de los ensayos en banco de flujo viene recogido en la tabla 2.9.

Tabla 2.9: Coste del material fungible asociado a los ensayos en banco de flujo.

Concepto	Unidades	Coste unitario	Importe
	[-]	[€/ud]	[€]
Film transparente	1	8	8
Silicona para sellado	2	8	16
	Subtotal		24

Con todo lo expuesto anteriormente el coste total asociado a la partida de ensayos en banco de flujo queda resumido en la tabla 2.10

Tabla 2.10: Coste asociado a la partida de ensayos en banco de flujo.

Concepto	Importe
	[€]
Mano de obra	7700
Amortización de equipos	36
Material fungible	24
Subtotal	7760

2.3. Visualización de la pared porosa

En esta sección se van a detallar los costes asociados a la visualización de la pared porosa separando por un lado la visualización mediante lupa electrónica y cámara de fotos y por otro la visualización mediante microscopio electrónico de barrido. En esta parte se contempla también el corte de los filtros de partículas para la obtención de las muestras que luego se observan con cada una de las herramientas. Además en esta parte se incluye el coste de utilización del microscopio electrónico de barrido.

La mano de obra para la obtención de imágenes mediante la cámara y la lupa electrónica se corresponde con el trabajo realizado por el autor del trabajo y viene recogido en la tabla 2.11.

Tabla 2.11: Coste de la mano de obra asociado a la obtención de imágenes mediante la cámara y lupa electrónica.

Concepto	Unidades	Coste unitario	Importe
	[h]	[€/h]	[€]
Ingeniero junior	140	30	4200
	Subtotal		4200

La mano de obra para la obtención de imágenes mediante el microscopio electrónico de barrido se corresponde con el trabajo realizado por el autor del trabajo y un ingeniero superior senior y viene recogido en la tabla 2.12.

Tabla 2.12: Coste de la mano de obra asociado a la obtención de imágenes mediante el microscopio electrónico de barrido.

Concepto	Unidades [h]	Coste unitario [€/h]	Importe [€]
Ingeniero superior senior	20	60	1200
Ingeniero junior	20	30	600
Subtotal			1800

En lo que se refiere a los costes de amortización también se establece un periodo de amortización y en las tablas 2.13 y 2.14 se detallan el coste de los equipos y su coste de amortización.

Tabla 2.13: Equipos utilizados durante la partida de visualización de la pared porosa.

Concepto	Importe [€]
Ordenador	700
Cámara de fotos	450
Lupa electrónica	50
Sierra circular	150
Elementos de laboratorio de óptica	450
Subtotal	1800

Tabla 2.14: Amortización de los equipos utilizados durante la partida de visualización de la pared porosa.

Coste equipos	1800	[€]
Periodo de amortización	5	[años]
Tiempo de amortización	1	[mes]
Coste/año	360	[€]
Coste/mes	30	[€]
Coste	30	[€]

El coste del material fungible utilizado durante la realización de las imágenes con las tres herramientas utilizadas viene recogido en la tabla 2.15.

Tabla 2.15: Coste del material fungible asociado a la visualización de la pared porosa.

Concepto	Unidades [-]	Coste unitario [€/ud]	Importe [€]
Hojas de sierra	16	4	64
Recipiente para muestras	12	3	36
Subtotal			100

Como se ha detallado al principio de la presente sección también se considera el coste de utilización del microscopio electrónico de barrido. Su coste viene recogido en la tabla 2.16

El coste del material fungible utilizado durante la realización de los ensayos en banco de flujo viene recogido en la tabla 2.9.

Tabla 2.16: Coste de utilización del microscopio electrónico de barrido.

Concepto	Unidades [h]	Coste unitario [€/h]	Importe [€]
Empleo del SEM	20	13	260
Subtotal			260

En la tabla 2.17 se resumen los costes asociados a la partida de visualización de la pared porosa.

Tabla 2.17: Coste asociado a la partida de visualización de la pared porosa.

Concepto	Importe [€]
Mano de obra	6000
Amortización de equipos	30
Material fungible	100
Empleo del SEM	260
Subtotal	4330

2.4. Post-procesado de imágenes

En esta sección se detalla el coste del post-procesado de imágenes mediante el programa informático Matlab, incluyendo la mano de obra, amortización de equipos y los materiales fungibles utilizados.

Los costes de mano de obra asociados al post-procesado de imágenes se corresponde con el trabajo realizado por el autor del trabajo y viene recogido en la tabla 2.18.

Tabla 2.18: Coste de la mano de obra asociado al post-procesado de imágenes.

Concepto	Unidades [h]	Coste unitario [€/h]	Importe [€]
Ingeniero junior	140	30	4200
Subtotal			4200

Los costes de amortización de equipos asociados al post-procesado de imágenes quedan recogidos en las tablas 2.19 y 2.20.

Tabla 2.19: Equipos utilizados durante la partida de post-procesado de imágenes.

Concepto	Importe [€]
Ordenador	700
Grapher	500
Matlab	500
Microsoft Office	230
Impresora	80
Subtotal	2010

Tabla 2.20: Amortización de los equipos utilizados durante la partida de post-procesado de imágenes.

Coste equipos	2010	[€]
Periodo de amortización	5	[años]
Tiempo de amortización	1	[mes]
Coste/año	402	[€]
Coste/mes	33,5	[€]
Coste	33,5	[€]

Por último quedan recogidos en la tabla 2.21 los costes asociados al material fungible utilizado durante esta última etapa.

Tabla 2.21: Coste del material fungible asociado al post-procesado de imágenes.

Concepto	Unidades [-]	Coste unitario [€/ud]	Importe [€]
Papel	100	0,01	1
Tinta para impresora	1	45	45
Subtotal			46

2.5. Presupuesto total

A continuación se agrupan todos los costes parciales expuestos anteriormente, detallando los subtotales asociados a cada una de las secciones en las que se ha dividido el trabajo, para obtener el presupuesto total del trabajo. Esto se muestra en la tabla 2.22

Tabla 2.22: Coste total asociado a la realización del proyecto.

Concepto	Importe [€]
Planificación y reuniones	4320
Ensayos en banco de flujo	7760
Visualización de la pared porosa	4330
Post-procesado de imágenes	4279,5
TOTAL	20689,5