

## Estimación de emisiones difusas de $PM_{10}$ y rendimiento de MTD's en el sector cerámico

E. MONFORT<sup>1</sup>, I. CELADES<sup>1</sup>, V. SANFELIX<sup>1</sup>, S. GOMAR<sup>1</sup>, J.L. LÓPEZ<sup>2</sup>, V. CALPE<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Tecnología Cerámica (ITC). Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE). Universitat Jaume I. Castellón. Spain

<sup>2</sup>Pamesa Ceramica, S.L. Almassora (Castellón)

<sup>3</sup>Onda Cogeneración, S.L. (Grupo Pamesa). Onda (Castellón)

La emisión de partículas a la atmósfera constituye uno de los mayores impactos de la industria cerámica, tanto por focos canalizados (chimeneas) como por focos difusos. Estos últimos producen las denominadas emisiones difusas o fugitivas, a las que tradicionalmente se les ha prestado poca atención, tanto por la normativa legal como por los estudios técnicos. No obstante, esta situación está cambiando dada la importancia de la contribución relativa de estas emisiones en algunas actividades industriales, como es el caso de la industria cerámica, lo que se está traduciendo en el establecimiento de requisitos específicos para su control en las autorizaciones ambientales, así como en la reciente introducción de la necesidad de cuantificar dichas emisiones en las declaraciones de emisiones requeridas por la Unión Europea (EPER-PRTR). Uno de los problemas que se plantea en el control de las emisiones difusas de partículas es la cuantificación de las mismas. En este trabajo, basándose en metodologías propuestas en la bibliografía se ha desarrollado una herramienta de estimación de estas emisiones, y se ha aplicado a procesos de fabricación de productos cerámicos, en diferentes escenarios tecnológicos. Concretamente se han utilizado dos métodos de estimación, uno analítico basado en el uso de ecuaciones y factores de emisión y otro totalmente experimental. Combinando apropiadamente ambos procedimientos se ha estimado el flujo másico de emisiones difusas de partículas en dos instalaciones industriales y en dos escenarios tecnológicos. El tratamiento de los resultados obtenidos ha permitido estimar los rendimientos alcanzados para la reducción de las emisiones difusas de material particulado en dos instalaciones industriales con un elevado grado de implantación de medidas correctoras.

*Palabras clave: industria cerámica, contaminación atmosférica, emisiones difusas de partículas,  $PM_{10}$ .*

### Estimation of fugitive emissions of $PM_{10}$ and bat efficiency in the ceramic sector

Particle emission into the atmosphere is one of the major impacts of the ceramic industry from both channelled sources (stacks) and fugitive sources. The latter give rise to so-called diffuse or fugitive emissions, which have traditionally received little regulatory attention and have been the focus of few technical studies. However, this situation is changing in view of the importance of the relative contribution of these emissions in certain industrial activities, such as the ceramic industry, which is leading to specific requirements for fugitive emission control in environmental authorisations, as well as in the recent introduction of the need to quantify these emissions in the emissions declarations required by the European Union (EPER-PRTR). One of the current issues in fugitive particle emission control is, in fact, the quantification of fugitive particle emissions. In this study, an instrument for estimating these emissions has been developed, based on methodologies proposed in the literature, which is applicable to ceramics manufacturing processes in different technological scenarios. Two estimation methods have been used: an analytical method, based on the use of equations and emission factors, and a completely experimental method. Appropriate combination of both methods has allowed estimation of the mass flow in fugitive particle emissions at two industrial facilities, in two technological scenarios. The treatment of the results has enabled the efficiencies achieved in reducing the fugitive emissions of particulate matter at the studied facilities to be estimated.

*Keywords: ceramic industry, atmospheric pollution, fugitive particle emissions,  $PM_{10}$ .*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los estudios más recientes sobre calidad de aire realizados en zonas cerámicas (1-3), indican que uno de los impactos medioambientales más importantes asociados a estos procesos es la emisión de material particulado. Estos trabajos se centran no sólo en las partículas en suspensión totales (PST), sino especialmente en la fracción  $PM_{10}$  (partículas con un diámetro aerodinámico inferior o igual a  $10\ \mu\text{m}$ ) e incluso más recientemente se está incluyendo el estudio de la fracción  $PM_{2.5}$  (partículas con un diámetro aerodinámico inferior o igual a  $2.5\ \mu\text{m}$ ). Los resultados obtenidos establecen que la concentración de  $PM_{10}$  en el ambiente, en zonas con elevada concentración

de industrias cerámicas, es uno de los parámetros más críticos para el cumplimiento de los límites de calidad de aire propuestos en el Real Decreto 1073/2002 (4).

Por otra parte, los estudios de emisiones de partículas en procesos de fabricación de productos cerámicos indican que la emisión de partículas por focos difusos, dependiendo del proceso de fabricación, pueden tener una importancia similar a las emisiones de partículas por fuentes canalizadas. Especialmente en zonas de clima mediterráneo con pocas lluvias y elevada irradiación solar (como Castellón o Bailén), donde las actividades de almacenamiento y homogenización

de arcillas se han venido realizando habitualmente al aire libre, lo que favorece la formación de emisiones difusas durante la realización de estas actividades.

En efecto, las emisiones difusas de partículas en la industria cerámica se generan fundamentalmente en los parques de almacenamiento de materiales pulverulentos a granel (que se realizan en recintos abiertos o cubiertos sólo parcialmente), aunque también en las operaciones de pretratamiento de estos materiales cuando no se encuentran confinadas (trituración y molienda) y en el transporte de estos materiales mediante camiones (operaciones de carga, descarga y en la propia circulación de los camiones).

En un estudio precedente realizado en la zona cerámica de Castellón (5), se ha observado que la emisión de partículas generada en la extracción y almacenamiento de arcillas es de granulometría relativamente gruesa. En las inmediaciones de instalaciones de extracción de arcillas se registraron niveles de  $1600 \mu\text{gPST}/\text{Nm}^3$  y de  $900 \mu\text{gPST}/\text{Nm}^3$  en almacenamiento de arcillas, de los que el 40% son  $\text{PM}_{10}$ , lo que supone  $640$  y  $360 \mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ , respectivamente, y de éste sólo el 6-11% es  $\text{PM}_{2.5}$ . Estos valores son similares a los obtenidos por otros autores (6) para la extracción de materias primas ( $700 \mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ ) y para la manipulación de material pulverulento ( $200 \mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ ).

Por otra parte, en la nueva legislación sobre emisiones en actividades industriales (7), las actividades afectadas, entre las que se encuentran la mayor parte de las industrias fabricantes de productos cerámicos, deben solicitar una Autorización Ambiental Integrada (AAI), en la que los valores límite de emisión (VLE), se establecen basándose en la implantación de las Mejores Técnicas Disponibles (MTD's), definidas para cada sector industrial en unos documentos de referencia aprobados por la Comisión Europea denominados Reference Document on Best Available Techniques (BREF), entre los que se incluye uno específico para la industria cerámica (8). En este documento se establecen requisitos para el control de las emisiones difusas de partículas, lo que se está traduciendo en que muchas de las AAIs que se están otorgando a fabricantes de productos cerámicos (baldosas, tejas, ladrillos, etc.) en España, y en otros países de la Unión Europea, estén incluyendo requisitos específicos para su control (8-12).

No obstante, los principales problemas en el estudio de las emisiones difusas es la dificultad intrínseca que conlleva su medida en instalaciones industriales relativamente complejas, con muchas operaciones potencialmente generadoras de emisiones difusas de partículas y ubicadas en zonas de elevada concentración industrial y con una problemática ambiental similar, lo que conlleva en muchas ocasiones el no poder asociar valores medios a una actividad.

En este sentido, el trabajo presentado desarrolla una metodología de control y estimación de emisiones difusas de partículas en actividades industriales, que utilizando un equipamiento y un procedimiento relativamente sencillos, permita su aplicación a instalaciones industriales de fabricación de productos cerámicos, y que pueda implantarse en procesos industriales con una problemática ambiental similar.

Realizando una exhaustiva recopilación bibliográfica (13-31) se ha encontrado que los métodos para la estimación del flujo másico de emisión de material particulado procedente de focos difusos en actividades al aire libre, tanto industriales como extractivas, se pueden clasificar en dos grupos:

**1. Métodos analíticos** basados en el uso de factores de emisión o ecuaciones semiempíricas (13-17). La principal

ventaja es que requieren pocos datos experimentales para la aplicación de las ecuaciones. Por el contrario, la mayor desventaja es que presentan incertidumbres elevadas, puesto que los factores de emisión y las condiciones en los que se han obtenido no siempre se ajustan a las condiciones reales de la instalación que se desea estudiar (materiales, máquinas, condiciones atmosféricas, etc.). En este trabajo las fuentes de información para la obtención de factores de emisión de partículas provenientes de focos difusos son el documento AP-42 de la U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (13) y el documento "Emisión Estimation Technique Manual for Mining", propuesto para elaborar el National Pollutant Inventory de Australia (14). Estos factores y ecuaciones se han validado en trabajos previos (32-33) para las condiciones específicas de la industria cerámica.

**2. Métodos experimentales**, que a su vez se pueden clasificar en dos grupos:

2.1 Basados en el uso de **modelos de dispersión inversa** (18-21)

La principal ventaja es que se realiza el cálculo a partir de datos experimentales de la instalación estudiada. Posteriormente permite simular con facilidad diferentes situaciones modificando alguna de las variables que supone el modelo. El problema es que se requieren una instrumentación y un tratamiento matemático de los datos relativamente complejo. En la práctica está limitado a instalaciones industriales que se encuentren alejadas de otros focos importantes del contaminante que se desee estudiar, lo que reduce mucho su aplicación. En la revisión bibliográfica realizada se han encontrado varias normas: una alemana de 2004 (VDI-4285) (18), y recientemente el Comité Europeo de Normalización ha aprobado la norma EN15445:2008: *Fugitive and diffuse emissions of common concern to industry sectors-Fugitive dust sources by Reverse Dispersion Modelling* (19), en cuyo grupo de trabajo ha participado el Instituto de Tecnología Cerámica.

2.2. Basados en balances de materia en instalaciones cerradas, denominados en la bibliografía "**roof monitor**" (31)

La ventaja es la posibilidad de calcular la emisión directamente a partir de datos experimentales de la instalación, y mediante un cálculo matemático muy sencillo, por lo que presenta una mayor precisión. Como mayor inconveniente destacar que sólo es aplicable a instalaciones que realicen todas las actividades en recintos cerrados.

## 2. OBJETO Y ALCANCE DEL TRABAJO

El principal objetivo de este estudio es, basándose en metodologías propuestas en la bibliografía, desarrollar una herramienta sencilla para la estimación de emisiones difusas de partículas y posteriormente poder determinar la eficacia global de las diferentes medidas correctoras implantadas en el sector cerámico en la actualidad.

A partir de la metodología desarrollada se pretenden alcanzar los siguientes objetivos concretos:

- Estimar tasas de emisión específicas de  $\text{PM}_{10}$  asociadas a las diferentes actividades generadoras de emisiones difusas de partículas en la industria cerámica. Las emisiones se determinarán en dos instalaciones de

la industria cerámica: una instalación de tratamiento de materias primas con cerramiento parcial o semicerrada (PS) y otra con cerramiento total (PC). Además, se consideran dos escenarios tecnológicos diferentes: antes de la implantación de una serie de medidas correctoras (**emisiones no controladas**) y después de la implantación de las mismas (**emisiones controladas**),

- Evaluar la eficiencia alcanzada en la reducción de las emisiones difusas de partículas en las dos instalaciones seleccionadas, dado que en muchas AAI se están requiriendo las medidas correctoras implantadas en dichas instalaciones. Por tanto, se considera importante evaluar la efectividad de dichas medidas dada la elevada inversión económica que suponen.
- Determinar la posible utilidad de la metodología propuesta para el control y diseño de planes de implantación de medidas preventivas y/o correctivas que deben aplicarse en la industria cerámica con el fin de disminuir el impacto asociado a las emisiones difusas de partículas.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES INDUSTRIALES ESTUDIADAS

A continuación se detalla la información más importante, desde el punto de vista del estudio de las emisiones difusas de partículas, de las instalaciones industriales estudiadas.

#### 3.1 Instalación de tratamiento de materias primas con cerramiento parcial o semicerrada (PS)

Durante la realización del trabajo esta instalación presentaba una producción media diaria de 1100 toneladas de composiciones en seco (de coloración blanca en cocido). Las medidas correctoras más importantes implantadas en el parque de almacenamiento durante la realización del estudio eran disponer de un recinto totalmente pavimentado, zonas de almacenamiento y manipulación de materias primas (arcillas y feldespatos) semicerradas, y cerramiento completo de la zona de carga de composiciones y de molienda.

#### 3.2. Instalación de tratamiento de materias primas totalmente cerrada (PC)

Está instalación se destina a la fabricación de gránulo atomizado a partir de mezclas de diferentes arcillas, y consta básicamente de un parque de recepción de arcillas, una fase de molienda vía húmeda, una fase de secado por atomización de las suspensiones obtenidas tras la molienda y la fase de almacenamiento y expedición del gránulo atomizado obtenido.

Durante la ejecución del trabajo se manipulaban diariamente una cantidad media de 4000 toneladas, de arcillas para alcanzar una producción equivalente de gránulo atomizado destinado a la fabricación de baldosas cerámicas de coloración roja en cocido.

Esta actividad se caracteriza por un elevado flujo de camiones. En efecto, durante el periodo de estudio se registró

TABLA I. ECUACIONES SEMIEMPÍRICAS PARA LAS PRINCIPALES OPERACIONES GENERADORAS DE EMISIONES DIFUSAS DE PARTÍCULAS (13)

Operación	Ecuación	Parámetros
Manipulación de materiales pulverulentos	$E = k \cdot (0.0016) \cdot \frac{(v/2.2)^{1.3}}{(M/2)^{1.4}}$	E: Factor de emisión (kg/ton) k: Factor según el tamaño de partícula v: Velocidad media del viento (m/s) M: Humedad (%)
Transporte zona asfaltada	$E = [k \cdot (sL/2)^{0.65} \cdot (W/3)^{1.5} - C]$	E: Factor de emisión por vehículo (g/km recorrido) k: Factor según el tamaño de partícula (g/km) sL: Carga de finos (d<75 μm) en superficie (g/m²) W: Peso medio de los vehículos (ton) C: Factor de emisión debido a humos de escape, desgaste de frenos y neumáticos
Transporte zona no asfaltada	$E = k \cdot (s/12)^a \cdot (W/3)^b \cdot ((365 - P)/365)$	E: Factor de emisión por vehículo (g/km recorrido) k: Factor según el tamaño de partícula s: Contenido en finos en superficie (d ≤ 75μm) (%) W: Peso medio del vehículo (ton) P: N° de días al año con al menos 0,25 l/m² de lluvia a, b: Constantes según el tamaño de partícula
Erosión	$E = k \cdot (58 \cdot (u^* - u_1^*)^2 + 25 \cdot (u^* - u_1^*))$	E: Factor de emisión (g/m²) k: Factor según el tamaño de partículas u*: Velocidad de fricción (m/s) u <sub>1</sub> *: Velocidad de fricción umbral (m/s)

TABLA II. FACTORES DE EMISIÓN PARA LAS PRINCIPALES OPERACIONES GENERADORAS DE EMISIONES DIFUSAS DE PARTÍCULAS (14)

Tamaño partícula	Manipulación de materiales pulverulentos		Trituración	Erosión
	F.E. arcillas (kg/ton)	F.E. finos (kg/ton)	F.E. (kg/ton)	F.E. (kg/ha/h)
PST	0.025	1.4	0.32	0.4
PM <sub>10</sub>	0.012	0.08	0.05	0.2

una media de 250 camiones diarios, contabilizando tanto los que entran cargados de materia prima como los que salen con el producto acabado (gránulo atomizado).

Las medidas correctoras más importantes implantadas en esta instalación para la minimización de las emisiones difusas durante el estudio fueron el cerramiento y pavimento completo de todas las instalaciones incluyendo: zona de almacenamiento y manipulación de arcillas (granero), zona de circulación interna de camiones, zona de carga de atomizado y el propio proceso de fabricación (molienda y atomización). Además, la gestión del reciclado de residuos de granulometría fina (residuos de la depuración de gases y de operaciones de limpieza), se realiza mediante un sistema de dispersión vía húmeda.

#### 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

##### 4.1 Metodología de estimación de la emisión no controlada

Para la estimación de la emisión no controlada (sin medidas correctoras implantadas) de la fracción  $PM_{10}$  desde focos difusos, se ha utilizado un método analítico basado en el uso de factores de emisión y ecuaciones semiempíricas.

Como se ha indicado anteriormente, la aplicación en procesos cerámicos de la metodología propuesta se ha validado en estudios anteriores (32-33), utilizando el modelo de dispersión inversa.

En las tablas I y II se especifican las ecuaciones y factores de emisión seleccionados de la bibliografía (13-14) para cada una de las operaciones generadoras de emisiones difusas de  $PM_{10}$  en la industria cerámica.

Con el fin de aplicar la metodología propuesta, se ha considerado en cada empresa las actividades susceptibles de generar emisiones difusas y éstas se han desglosado en subactividades, con el objeto de asignar a cada una de ellas, una operación básica para realizar los cálculos de emisión. En la tabla III, se especifica para cada operación la metodología de estimación empleada. El criterio establecido se basa en elegir la estimación que conlleva un mayor impacto ambiental, atendiendo al principio de selección de la opción más desfavorable.

En la aplicación de las ecuaciones semiempíricas son necesarios una serie de datos experimentales que se deben obtener para cada instalación en concreto. Los datos experimentales a determinar son:

a) Velocidad media del viento, determinada mediante la ubicación de una torre meteorológica en la instalación estudiada.

TABLA III. ACTIVIDADES GENERADORAS DE EMISIONES DIFUSAS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA

Actividad	Subactividad	Operación	Ecuación/F.E.		
1	Recepción de arcillas y materias primas	1.1	Transporte camión	Transporte zona asfaltada	Ecuación
		1.2	Descarga camión	Manipulación	F.E.
		1.3	Apilamiento pala	Manipulación	F.E.
2	Gestión de arcillas y materias primas	2.1	Carga del montón a tolva	Manipulación	F.E.
		2.2	Transporte en pala	Transporte zona asfaltada	Ecuación
3	Trituración	3.1	Trituración	Trituración	F.E.
4	Carga de producto	4.1	Transporte camión	Transporte zona asfaltada	Ecuación
		4.2	Carga camión	Manipulación	F.E.
5	Erosión por viento en ausencia de actividad			F.E.	

TABLA IV. ESTIMACIÓN DE LA EFICACIA DE LAS PRINCIPALES MEDIDAS CORRECTORAS IMPLANTADAS EN EL SECTOR CERÁMICO (14-15)

Operación	Medida correctora implantada	Rendimiento (%)
Transporte zona no asfaltada	Riego ( $\geq 2$ litros / $m^2$ / h)	75
	Pavimentar	90
	Pavimentar+barrer	97
	Pavimentar+barrer+riego con agua	99.4
Transporte zona asfaltada	Barrer	70
	Riego con agua	80
	Barrer+riego con agua	94
Manipulación	Riego por aspersión de los montones	50
	Cabina de cerramiento	70
	Cabina de cerramiento parcial+Instalación filtros de mangas	83
	Cabina de cerramiento total+Instalación filtros mangas	99
Trituración	Cabina de cerramiento	70
	Cabina de cerramiento parcial+Instalación filtros de mangas	83
	Cabina de cerramiento total+Instalación filtros mangas	99
Erosión	Vallas perimetrales	30
	Riego por aspersión de los montones	50

b) Número de días al año con lluvia superior a 0,25 l/m<sup>2</sup>, obtenido a partir del seguimiento de la meteorología de estaciones de la red pública de vigilancia y control de la contaminación atmosférica, próximas a cada instalación estudiada.

c) Valores de humedad de las arcillas almacenadas y valores de carga de finos (partículas que pasan a través de un tamiz de 75 μm) en la superficie de zonas asfaltadas.

**4.2 Metodologías de estimación de la emisión controlada**

En el caso concreto de la instalación PS, se ha realizado una estimación analítica, mientras que para la instalación PC, el cerramiento total de la misma ha permitido utilizar una de las metodologías experimentales descritas anteriormente ("roof monitor").

**4.2.2. Estimación analítica: Instalación PS**

En la instalación PS se ha realizado una estimación analítica de las emisiones controladas de la fracción PM<sub>10</sub> provenientes de focos difusos, a partir de las emisiones no controladas estimadas en el apartado 4.1 y del rendimiento

teórico asociado a cada una de las medidas correctoras implantadas en esta instalación.

Los rendimientos teóricos (14-15) de las principales medidas correctoras implantadas en algunas empresas del sector cerámico, para reducir el impacto asociado a la emisión difusa de partículas, se detallan en la tabla IV.

En el caso de que se aplique más de una medida correctora para una operación concreta los factores son multiplicativos y el rendimiento global de varias medidas individuales se calcula mediante la ecuación (1).






$$R_G = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \tag{1}$$

Donde:

R<sub>G</sub> = Rendimiento global de n medidas correctoras individuales (%)  
 R<sub>i</sub> = Rendimiento individual de una medida correctora (%)

En la tabla V se especifican las medidas correctoras más importantes implantadas en la empresa PS durante la realización del estudio y el rendimiento asociado a cada mejora.

TABLA V. FACTOR DE CORRECCIÓN DE LAS MEDIDAS CORRECTORAS IMPLANTADAS EN LA INSTALACIÓN PS

Operación	Medidas correctoras	Rendimiento
 Transporte interno	Pavimentado Barrer	$E = [k \cdot \left(\frac{sL}{2}\right)^{0.65} \cdot \left(\frac{W}{3}\right)^{1.5} - C]$
 Almacenamiento materias primas	Cerramiento lateral Cobertura parcial	70%
 Carga arcillas desde almacén a molienda	Tolva y cintas cerradas Aspiración filtros	99%
 Trituración y molienda de feldespatos	Nave cerrada Aspiración filtros	99%
 Carga de producto a granel	Cerramiento completo Aspiración filtros	99%



#### 4.2.2. Estimación experimental: Instalación PC

En la instalación PC, todas las actividades de gestión de materias primas se realizan en el interior de naves, desde la recepción hasta la carga del producto final obtenido (gránulo atomizado). Por tanto, las zonas de posibles emisiones difusas de polvo son las aberturas de las instalaciones, de las que cabe destacar fundamentalmente las puertas de entrada y salida de camiones a la empresa y las aberturas en las naves para favorecer la ventilación general de las mismas.

En el caso donde las actividades se desarrollan íntegramente en instalaciones completamente cerradas, para la estimación de las emisiones difusas se ha aplicado el método denominado en la bibliografía "Roof Monitor" (31), basado en calcular el flujo de materia en las principales aberturas. Para aplicar este método, se mide la concentración y la velocidad del viento en cada una de las aberturas principales de la instalación susceptibles de generar emisiones difusas. La emisión total (ecuación 2), será la suma de todas las emisiones individuales, en cada una de las aberturas.

$$E = \sum_{i=1}^n v_i \cdot C_i \cdot A_i \cdot 10^{-6} \quad [2]$$

Donde:

E = Emisión global de n aberturas (g PM<sub>10</sub>/s)  
 v<sub>i</sub> = Velocidad media del viento en la abertura i (m/s)  
 C<sub>i</sub> = Concentración de PM<sub>10</sub> en la abertura i (µg PM<sub>10</sub>/m<sup>3</sup>)  
 A<sub>i</sub> = Área de la abertura i (m<sup>2</sup>)

Para determinar la concentración de PM<sub>10</sub> en las aberturas, dado que éstas son de dimensiones relativamente grandes y no existe una circulación forzada de aire, no es posible

realizar muestreos isocinético de partículas como si se tratase de conductos (34). Por esta razón, para la medida de la concentración se han utilizado captadores gravimétricos utilizados habitualmente para el control de calidad de aire.

El principio de medida de un captador gravimétrico consiste en aspirar un caudal conocido de aire que se mantiene constante durante todo el periodo de muestreo, dicho caudal de aire atraviesa un cabezal de corte de partículas apropiado para el tipo de partícula a medir (PM<sub>10</sub>) y posteriormente pasa a través de un filtro donde quedan retenidas las partículas presentes en dicha corriente. La concentración de material particulado (µg/m<sup>3</sup>), se determina por diferencia de pesada del filtro y dividiendo por el volumen total de aire muestreado.

Para la realización del presente trabajo, se han utilizado tres equipos gravimétricos de medida de partículas en ambiente, cuyas principales características se detallan en la tabla VI. La ubicación de los equipos debe ser representativa del lugar de muestreo, como principio deben situarse alejados de obstáculos que puedan alterar las medidas por apantallamiento, aunque en este caso existe la limitación práctica de no obstaculizar la circulación de vehículos en la empresa.

Estos equipos inicialmente están diseñados para ser utilizados en medidas de calidad de aire en fondos urbanos, industriales, etc. Por ello, para que se puedan utilizar en medidas en actividades industriales y extractivas, con unos niveles de partículas mucho más elevados, ha sido necesario realizar una serie de modificaciones y adaptaciones para asegurar su correcto funcionamiento (35).

Durante el desarrollo del trabajo se ha realizado una calibración de los equipos usados, para demostrar su equivalencia respecto al de referencia basándose en la Norma UNE-EN 12341 (36) que propone una metodología de comparación. Las consideraciones adoptadas a la hora de realizar la comparación de los diferentes equipos han sido:

TABLA VI CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS DE MEDIDA DE LA CONCENTRACIÓN DE PM<sub>10</sub>

Equipo	Tipo de muestreo	Caudal (m <sup>3</sup> /h)
Captador secuencial bajo volumen	Gravimétrico	2.3
Captador alto volumen	Gravimétrico	30
Captador bajo volumen	Gravimétrico	1

TABLA VII. DATOS EXPERIMENTALES PARA LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ANALÍTICA

Parámetro	Unidades	Valor Instalación PC	Valor Instalación PS
V <sub>media viento</sub>	m/s	1	0.5
Nº días lluvia > 0.25l/m <sup>2</sup>	d/año	70	70
Humedad materias primas	%	2-11	2-19
Contenido en finos (d ≤ 75µm)	g/m <sup>2</sup>	50-100	7-9
Trayecto camión descarga materias primas	km	1	0.2
Trayecto pala manipulación materias primas	km	0.3	0.4
Trayecto camión carga producto	km	0.03	0.1
Material manipulado	ton/d	4000	1100
Producción	ton/d	4000	1100

muestrear de forma paralela en al menos dos localizaciones diferenciadas y cubrir diferentes escenarios ambientales, uno durante una estación fría (invierno) y otro durante una estación más cálida (verano). El número mínimo de datos validados (parejas de medias diarias) ha sido superior a 25 para cada uno de los equipos (35).

Los filtros utilizados han sido de fibra de vidrio y de cuarzo, concretamente: Schleicher & Schuell, de fibra de cuarzo QF-20 de 47 y de 150 mm de diámetro, de fibra de vidrio GF-9 de 47 mm de diámetro y Whatman de fibra de vidrio GF-A de 150 mm de diámetro.

Los filtros se han acondicionado convenientemente para su pesada antes y después del muestreo. La pesada se ha realizado en una balanza de resolución 0.01mg. En la pesada de filtros después del muestreo se ha tenido en cuenta las condiciones ambientales de la habitación de pesada, temperatura y humedad relativa, manteniendo éstas dentro de la tolerancia permitida respecto a las condiciones ambientales de la pesada inicial.

Con el fin de determinar la velocidad y dirección del viento en las principales aberturas de la instalación PC, se han medido dichos parámetros con la ayuda de una estación meteorológica colocada "in situ" en cada una de estas aberturas, teniendo en cuenta para su ubicación los mismos criterios que para el caso de los captadores gravimétricos.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Estimación de tasas de emisión de PM<sub>10</sub> en la instalación PS

En la tabla VII se especifican los valores de los diferentes parámetros determinados para poder aplicar las ecuaciones de estimación en la instalación PS. Las tasas de emisión de PM<sub>10</sub> para

las diferentes operaciones generadoras de emisiones difusas de partículas, se presentan en la tabla VIII para los dos escenarios tecnológicos considerados, antes y después de la implantación de una serie de medidas correctoras para la disminución de dichas emisiones, así como el rendimiento individual alcanzado en cada operación con las mejoras implantadas.

En la instalación PS, a pesar de que tanto el circuito interno de circulación como los accesos desde las vías principales están totalmente pavimentados, y de que los valores de carga de finos en la superficie obtenidos en la fase experimental del estudio se encuentran en el rango de 7-9 g/m<sup>2</sup> (valor relativamente bajo comparando con valores obtenidos en otras instalaciones (30)), se observa en la tabla VIII que la operación que conlleva una mayor emisión difusa de PM<sub>10</sub> es el transporte interno de camiones, como consecuencia del alto grado de implantación de medidas correctoras en el resto de actividades generadoras de emisiones difusas.

Esta situación revela que el transporte de materiales pulverulentos en el interior de la empresa, es una de las actividades con mayor impacto en la generación de emisiones difusas de partículas.

### 5.2 Estimación de tasas de emisión específicas de PM<sub>10</sub> en la instalación PC

Los datos experimentales obtenidos en instalación PC para la estimación de las emisiones no controladas se detallan también en la tabla VII.

En la metodología aplicada para la estimación de la emisión controlada de partículas se ha considerado una velocidad de viento media, y una dirección siempre de salida (emisión), aplicando el criterio de considerar siempre la opción más desfavorable (mayor emisión). A partir de los niveles de concentración de PM<sub>10</sub> y de la velocidad del aire

TABLA VIII. ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES DE PM<sub>10</sub> Y RENDIMIENTOS DE LAS MEDIDAS CORRECTORAS IMPLANTADAS EN LA INSTALACIÓN PS. RESULTADOS POR OPERACIÓN

Operación	Emisión PM <sub>10</sub> (gPM <sub>10</sub> emitido/ ton producto)		Rendimiento (%)
	No controlada	Controlada	
Transporte zona asfaltada	222	67	70
Manipulación	54	12	78
Trituración	50	>1	99
Erosión	17	5	70

TABLA IX. CÁLCULO DE LA EMISIÓN DIFUSA DE PM<sub>10</sub> A TRAVÉS DE LAS ABERTURAS

Punto muestreo	Superficie (m <sup>2</sup> )	V viento (m/s)	Emisión controlada (gPM <sub>10</sub> /ton producto)
Puerta 1	143	1.2	6
Puerta 2	143	1.2	6
Puerta 3	28	0.8	1
TOTAL			13

TABLA X. MEDIDAS CORRECTORAS IMPLANTADAS EN LA INSTALACIÓN PC


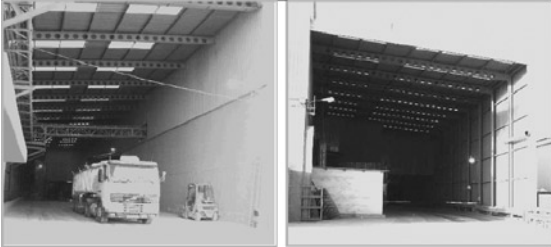
Operación		Medidas correctoras
		Almacenamiento y manipulación
		Transporte interno
		Cerramiento total Aspiración filtros
		Circuito pavimentado y totalmente cubierto

TABLA XI. ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES DE PM10 Y RENDIMIENTO GLOBAL DE LAS MEDIDAS CORRECTORAS IMPLANTADAS EN LA INSTALACIÓN PC.

Operación	Emisión PM <sub>10</sub> (gPM <sub>10</sub> emitido/ ton producto)		Rendimiento (%)
	No controlada	Controlada	
Transporte zona asfaltada	193	-	-
Manipulación	61	-	-
Total	254	13	95

TABLA XII. ESTIMACIÓN RENDIMIENTO GLOBAL DE LAS MEDIDAS CORRECTORAS IMPLANTADAS EN LAS INSTALACIONES ESTUDIADAS

Instalación	Emisión PM <sub>10</sub> (g/ton producto)	MTDs	Método de estimación	Emisión PM <sub>10</sub> (g/ton producto)	Rendimiento global (%)
	No controlada			Controlada	
PS	342	Recinto pavimentado Cerramiento lateral y cubierta parcial Barredoras Carga producto cerrada	Analítico	84	75
			Experimental	n.a <sup>(1)</sup>	n.a <sup>(1)</sup>
PC	254	Recinto pavimentado Cerramiento completo e instalación filtros Gestión del reciclado de residuos de granulometría fina mediante un sistema vía húmeda	Analítico	11	96
			Experimental	13	95

(1) n.a.: El método "roof monitor" no es aplicable a la instalación estudiada (PS)



se han determinado los valores de emisión controlada de partículas que se muestran en la tabla IX, para cada una de las aberturas, considerando las medidas correctoras detalladas en la tabla X.

En la tabla XI se presentan las tasas de emisión difusa de PM<sub>10</sub> en los dos escenarios tecnológicos considerados, así como el rendimiento global alcanzado con las medidas correctoras implantadas. En la misma se observa, como el transporte de materiales mediante camiones, es la principal fuente de emisiones difusas en el escenario más desfavorable. Asimismo cabe destacar el elevado rendimiento global alcanzado debido al cerramiento total de la instalación (95%), valor relativamente próximo al asignado teóricamente en la bibliografía a instalaciones completamente cerradas (99%).

### 5.3. Rendimiento global de las medidas correctoras implantadas

En la tabla XII se observa que los valores de rendimiento obtenidos para las instalaciones semicerrada (PS) y cerrada (PC) son del orden 75 y 95% respectivamente, lo que indica que las medidas correctoras adoptadas presentan una reducción muy importante de las emisiones difusas de PM<sub>10</sub> y pueden considerarse como MTD's para este tipo de actividades.

Finalmente, dado que la instalación PC permite el uso de las dos metodologías propuestas, se han estimado analíticamente los valores de emisión de PM<sub>10</sub> controlada y del rendimiento global para compararlos con los obtenidos experimentalmente. Estos valores se han incluido en la tabla XII, observándose que por ambos métodos se obtienen resultados muy similares, lo que válida el uso de ambas metodologías para la estimación de emisiones en este tipo de instalaciones. En el caso de la planta PS no ha sido posible realizar dicha comparación, dado que el método experimental utilizando (roof monitor) sólo es aplicable a instalaciones cerradas.

## 6. CONCLUSIONES

Del estudio realizado se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La combinación de las metodologías analíticas y experimentales utilizadas constituye una herramienta de estimación de emisiones difusas de partículas muy útil para realizar diagnósticos, de forma simple y económica, en instalaciones de la industria cerámica. Estas metodologías permiten calcular el flujo másico de material particulado, así como los rendimientos alcanzados en la reducción de las emisiones difusas de partículas.
- En las plantas de tratamiento de materias primas estudiadas, los valores obtenidos de emisión específica no controlada (sin medidas correctoras implantadas) son similares entre sí (342 y 254 gPM<sub>10</sub>/ton producto); a pesar de tratarse de dos instalaciones con materiales y procesos productivos relativamente diferentes.
- En las instalaciones estudiadas se observa que el transporte interno de materiales mediante camiones es la operación que presenta una mayor contribución

a la generación de emisiones difusas, a pesar de realizarse sobre zonas asfaltadas. Para reducir estas emisiones es importante minimizar la cantidad de partículas finas ( $\leq 75\mu\text{m}$ ) sobre la superficie de estas zonas de circulación.

- El estudio demuestra que se pueden alcanzar elevadas reducciones de las emisiones difusas de partículas en los procesos de tratamiento de materias primas en la industria cerámica, si se adoptan las medidas correctoras apropiadas. Concretamente, en la instalación de tratamiento de materias primas con cerramiento parcial y en la instalación con cerramiento total se han alcanzado rendimientos del 75 y del 95% respectivamente, en la disminución de las emisiones difusas de PM<sub>10</sub> por lo que pueden considerarse como MTD's para este tipo de instalaciones.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología en el marco del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica con referencia REN2003-08916-C02-01 y por el Instituto de la Mediana y Pequeña Industria Valenciana en el programa de Investigación, Desarrollo e Innovación con referencia IMIDIC/2007/117.

## BIBLIOGRAFÍA

1. E. T. Gómez, T. Sanfeliu, J. Rius, D. Hernández. Caracterización granulométrica y mineralógica de la materia particulada atmosférica en el área cerámica de Castellón. *Bol Soc Esp Ceram Vidr*, 40(3), 185-194, 2001.
2. X. Querol, A. Alastuey, S. Rodríguez, F. Plana, E. Mantilla, C.R. Ruiz. Monitoring of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> ambient air levels around primary anthropogenic emissions. *Atmospheric Environment* 35, 5 848-858.
3. X. Querol, A. Alastuey, M.M Viana., S. Rodríguez, B. Artífano, P. Salvador, S. Garcia Do Santos, R.Fernandez Patier, C. Ruiz, J.De La Rosa, A. Sanchez De La Campa, M. Menendez, J.I. Gil. Speciation and origin of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in Spain. *Journal of Aerosol Sciences* 35, 1151-1172.
4. Real Decreto 1073/2002, de 18 de octubre, sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente en relación con el dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, óxidos de nitrógeno, partículas, plomo, benceno y monóxido de carbono.
5. E. Monfort, I. Celades, S. Mestre, V. Sanz, X. Querol. Industrial PMx data processing in ceramic tile manufacturing emissions. *Key Engineering Materials*. Vols. 264-268, 2453-2456 (ISBN 0-87849-946-6).
6. A. Alastuey, E. Mantilla, X. Querol, S. Rodríguez. Estudio de la evaluación de la contaminación atmosférica por material particulado en España: necesidades derivadas de la propuesta de la directiva del consejo relativa a partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> e implicaciones en la industria cerámica. *Bol Soc Esp Ceram Vidr* 39(1) 135-148, 2000.
7. Directiva 2008/1/CE del 15 de enero de 2008 relativa a la prevención y control integrados de la contaminación.
8. IPTS, European Commission, 2007. Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry. August 2007. 232 pp (<http://eippcb.jrc.es>).
9. IPTS, European Commission, 2006. Reference Document on Best Available Techniques on Emissions from Storage. July 2006. 432 pp (<http://eippcb.jrc.es>).
10. Decreto 127/2006, de 15 de septiembre, del Consell, por el que se desarrolla la Ley de Prevención de la Contaminación y Calidad Ambiental. DOGV nº 5350
11. Decreto 151/2006, de 25 de julio, por el que se establecen los valores límite y la metodología a aplicar en el control de las emisiones no canalizadas de partículas por las actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera. BOJA nº 147
12. Decreto 31/2006, de 14 de febrero, por el que se aprueba el Plan de Mejora de la Calidad del Aire en el Municipio de Bailén. BOJA nº 56
13. US EPA (1995). AP 42, Fifth Edition, Volume I Chapter 13: Miscellaneous Sources PM

14. Environment Australia, 2001. Emission Estimation Technique Manual for Mining. [s.l.]
15. Generalitat de Catalunya. Direcció General de Qualitat Ambiental. Càlcul d'emissions fugitives de partícules en activitats extractives amb o sense planta de tractament de productes minerals associada i operacions similars. 1ª Edició Maig 2004. ([http://mediambient.gencat.net/Images/43\\_40110.pdf](http://mediambient.gencat.net/Images/43_40110.pdf))
16. Generalitat de Catalunya. Instrucció Tècnica de la Direcció General de Qualitat Ambiental (ITVCA 08). Realització de control d'emissions difuses a l'atmosfera a les activitats extractives de superfície amb o sense instal·lacions de tractament de productes minerals. 2ª Edició Maig 2004 ([http://mediambient.gencat.net/Images/43\\_40111.pdf](http://mediambient.gencat.net/Images/43_40111.pdf))
17. Generalitat de Catalunya. Direcció General de Qualitat Ambiental. Criteris per a la redacció dels projectes i avaluacions ambiental d'activitats extractives de superfície amb o sense instal·lacions de tractament de productes minerals. ([http://mediambient.gencat.net/Images/43\\_45069.pdf](http://mediambient.gencat.net/Images/43_45069.pdf))
18. VDI4285:2004 Part 1: Determination of diffusive emissions by measurements - Basic concepts
19. EN15445:2008: Fugitive and diffuse emissions of common concern to industry sectors-Fugitive dust sources by Reverse Dispersion Modelling
20. S.N. Crespi, I. Palomino, B. Aceña, F. Martín, A. Guerra, D. Gomis, F. Torres, J. Sáez. Development of a computer system for control and prevention of air pollution in the Valencia Port (Spain). Proceedings of the Seventh International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. 365-369.
21. F. Martín, M. Pujadas, B. Artiñano, F. Gómez-Moreno, I. Palomino, N. Moreno, A. Alastuey, X. Querol, J. Basora, J.A. Luaces, A. Guerra. Estimates of atmospheric particle emissions from bulk handling of dusty materials in Spanish Harbours. Atmospheric Environment (2007), doi: 10.1016/j.atmosenv.2006.12.003
22. A. Jaeger-Voirol, P. Pelt. PM<sub>10</sub> emission inventory in Ile de France for transport and industrial sources: PM<sub>10</sub> re-suspension, a key factor for air quality. Environmental Modelling & Software 15, 2000, 575-581.
23. A. Sabah. Impact of fugitive dust emissions from cement plants on nearby communities. Ecological Modelling 195, 2006, 338-348
24. A. Venkatram. A critique of empirical emission factor models: a case study of the AP-42 model for estimating PM<sub>10</sub> emissions from paved roads. Atmospheric Environment 34, 2000, 1-11
25. Chuen-Jinn Tsai, Chung-Tso Chang. An investigation of dust emissions from unpaved surfaces in Taiwan. Separation Purification Technology 29 (2002) 181-188
26. J.A. Gillies, V. Etyemezian, H. Kuhns, D. Nolic, D.A. Gillette. Effect of vehicle characteristics on unpaved road dust emissions. Atmospheric Environment 39 (2005) 2341-2347
27. Jason A. Roney, Bruce R. White. Estimating fugitive dust emission rates using an environmental boundary layer wind tunnel. Atmospheric Environment 40 (2006) 7668-7685
28. Peter Werner Grundnig, Wilhelm Höflinger, Gerd Mauschwitz, Zechang Liu, Guiqin Zhang, Zhiqiang Wang. Influence of air humidity on the suppression of fugitive dust by using a water-spraying system. China Particology, Vol. 4, N° 5, 229-233, 2006
29. V. Sai Bhaskar, Mukesh Sharma. Assessment of fugitive road dust emissions in Kanpur, India: A note. Transportation Research Part D. Article in press
30. E. Monfort, I. Celades, S. Gomar, V. Sanfelix. Control y estimación de emisiones difusas de material particulado en operaciones al aire libre. PROMA-X Congreso de Ingeniería Ambiental, Bilbao, 3-5 octubre 2006. Publicado en: Actas del X Congreso de Ingeniería Ambiental (DL: BI-2278-06)
31. Environment Australia, 1999. Emission Estimation Technique Manual for Fugitive Emissions. [s.l.]
32. E. Monfort; I. Celades, V. Sanfelix, S. Gomar, F. Martín; B. Aceña, A. de Pascual. Estimates of fugitive PM<sub>10</sub> emissions from the ceramic tile industry. 10 th International Conference and Exhibition of the European Ceramic Society Berlin 17 - 21 June 2007
33. E. Monfort; I. Celades, V. Sanfelix, S. Gomar, F. Martín; B. Aceña, A. de Pascual. Experimental fugitive PM10 emission factors from solid bulk handling areas in the open air. 8th International conference on emissions monitoring Zürich 5-6 September 2007
34. E. Monfort; Mª.F. Gazulla; I. Celades; P. Gómez. Variables en la medida de partículas sólidas y flúor en emisiones gaseosas de industrias cerámicas. En: Actas del VI Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico. Castellón. Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación. Vol.II, PGI 421-438, 2000. VI Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico (QUALICER 2000) Castellón (España) 12-15 Marzo 2000
35. E. Monfort, I. Celades, S. Gomar, M.F. Gazulla, V. Sanfelix, F. Martín, A. de Pascual, B. Aceña. Control de las emisiones difusas de material particulado en la industria cerámica. IX Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico (QUALICER 2006) Castellón, 12-15 febrero, 2006. Publicado en: Qualicer 2006: IX Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico. Castellón: Cámara oficial de comercio, industria y navegación, 2006. pp. P.BC137-P.BC150 (ISBN: 84-95931-17-6 O.C.)
36. UNE EN 12341 1999 Calidad del aire. Determinación de la fracción PM10 de la materia particulada en suspensión. Método de referencia y procedimiento de ensayo de campo para demostrar la equivalencia de los métodos de medida al de referencia

Recibido: 20/05/2008  
 Aceptado: 15/01/2009.

