

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EVALUAR LAS EMISIONES DE POLVO Y SILICE CRISTALINA RESPIRABLE ASOCIADAS AL MECANIZADO EN SECO DE BALDOSAS CERÁMICAS

A. López-Lilao, D. Bou, C. Roldan, V. Archiles, E. Monfort

Instituto de Tecnología Cerámica (ITC-AICE), Universitat Jaume I. Castellón. España

1. RESUMEN

La Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC) clasifica la sílice cristalina respirable (SCR) en forma de cuarzo y cristobalita como carcinogénico para humanos (grupo 1). En este sentido, la Unión Europea ha incluido recientemente los "Trabajos que supongan exposición al polvo respirable de sílice cristalina generado en un proceso de trabajo" como agente cancerígeno en la Directiva que regula la exposición a agentes carcinógenos o mutágenos durante el trabajo (Directiva 2019/983, que modifica la Directiva 2004/37/CE). Por este motivo, las empresas en las que haya puestos de trabajo expuestos a SCR deberán tomar las medidas necesarias para reducir al máximo la exposición de sus trabajadores mediante todos los recursos técnicos a su alcance, extremando las medidas de protección durante su manipulación.

En el caso de manipulación de materiales pulverulentos, existen ensayos estandarizados que permiten evaluar la tendencia de los materiales pulverulentos a emitir polvo durante su manipulación (poder de emisión de polvo). No obstante, en el caso de productos conformados, no existe una metodología equivalente que permita evaluar las emisiones asociadas a su mecanizado en seco bajo condiciones controladas y estandarizadas.

En este sentido, dado que la información disponible indica que las actividades que incluyen operaciones de corte y rectificado de baldosas cerámicas son potenciales focos de emisión de SCR, en el presente trabajo se ha desarrollado una metodología para evaluar la emisión de polvo respirable y sílice cristalina respirable asociada al mecanizado de productos cerámicos.

El sistema desarrollado consiste en un túnel de viento cuyo diseño y construcción se basa en la Norma EN 1093 "Seguridad de las máquinas. Valoración de la emisión de sustancias peligrosas transportadas por el aire", una herramienta de corte automatizada y un tren de muestro. Específicamente, el sistema desarrollado posibilita la medida en continuo de polvo inhalable, torácico, respirable y nanopartículas, así como la captación de muestra para posterior análisis off-line, incluyendo: análisis químico, mineralógico, morfológico y toxicológico.

Adicionalmente, a partir de los resultados obtenidos, se puede determinar la tasa de emisión de polvo y de sílice cristalina respirable.

Cabe comentar que el montaje desarrollado posibilita la determinación de la eficacia de medidas preventivas y/o correctoras.

Los resultados obtenidos a partir de la realización del ensayo se consideran de gran utilidad a fin de obtener información relevante sobre la potencial exposición de los trabajadores durante el mecanizado de productos cerámicos. Cabe comentar que las condiciones de realización del ensayo no son representativas del amplio abanico de escenarios industriales en los que se llevan a cabo operaciones de corte. No obstante, la realización de la operación en un túnel de viento normalizado, utilizando una herramienta automatizada y bajo condiciones de ensayo controladas garantiza la replicabilidad del ensayo posibilitando la comparativa entre productos, así como la evaluación de la reducción alcanzada mediante la implementación de diferentes medidas preventivas y/o correctoras.

2. INTRODUCCIÓN

La silicosis provocada por la exposición a sílice cristalina respirable (SCR) es una enfermedad conocida desde la antigüedad. Además, la exposición a SCR se ha asociado con el desarrollo de cáncer de pulmón. De hecho, En 1997, la IARC (Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer) concluyó que la sílice cristalina inhalada en los lugares de trabajo podía provocar cáncer de pulmón en los humanos [1], ratificando dicha clasificación en 2012 [2]. En este sentido, la Directiva (UE) 2017/2398 incorporó como agente cancerígeno los "Trabajos que supongan exposición al polvo respirable de sílice cristalina generado en un proceso de trabajo». Dicha Directiva europea se ha traspuesto al derecho español mediante el Real Decreto 1154/2020, sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes cancerígenos durante el trabajo, incluyendo los trabajos con exposición a SCR como agente cancerígeno. Además, el Real Decreto 257/2018 modificó el cuadro de enfermedades profesiones y se incluyó el cáncer de pulmón por inhalación de polvo de sílice como enfermedad profesional (Tabla 1).

Principales actividades capaces de producir silicosis y cáncer de pulmón por exposición a polvo de sílice libre
Trabajos en minas, túneles, canteras, galerías y obras públicas
Tallado y pulido de rocas síliceas, trabajos de canterías
Trabajos en seco de trituración, tamizado y manipulación de minerales o rocas
Fabricación de carborundo, vidrio, porcelana, loza y otros productos cerámicos, fabricación y conservación de ladrillos refractarios a base de sílice
Fabricación y manutención de abrasivos y polvos de detergentes
Trabajos de desmoldeo, desbarbado y desarenado de las fundiciones
Trabajos con muelas (pulido, afinado) que contengan sílice libre
Trabajos en chorro de arena y esmeril
Industria cerámica
Industria siderometalúrgica
Fabricación de refractarios
Fabricación de abrasivos
Industria del papel
Fabricación de pinturas, plásticos y gomas

Tabla 1. Actividades con capacidad reconocida (RD 257/2018) para generar silicosis y cáncer de pulmón

A este respecto, cabe comentar que, adicionalmente a la problemática asociada a la manipulación y/o procesado de materiales pulverulentos que contienen sílice cristalina, existe también la necesidad de controlar la exposición a SCR generada durante la fabricación, post-procesado e instalación de productos que contienen sílice cristalina. En este sentido, la información disponible indica que las actividades que incluyen operaciones de mecanizado (corte, pulido, etc.) de productos que contienen sílice cristalina son potenciales focos de emisión de SCR [3].

3. OBJETIVOS

Un parámetro de gran interés para evaluar, controlar y minimizar los riesgos asociados a las emisiones de material particulado generadas durante la manipulación de materiales pulverulentos es su poder de emisión de polvo, es decir, su tendencia a producir polvo cuando son manipulados. En este sentido, existen métodos normalizados para determinar dicho parámetro (EN 15051).

En el caso de mecanizado de productos conformados, existen diferentes metodologías desarrolladas con el fin de evaluar las emisiones asociadas a su mecanizado [4] [5] [6], incluyendo iniciativas con el objetivo de certificar maquinaria [7]. Cabe comentar que dichas metodologías se basan mayoritariamente en procedimientos internos que difícilmente pueden ser replicados.

No obstante, el centro NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health, USA) desarrolló un sistema, basado en la norma EN 1093, para evaluar las emisiones de sílice asociadas al corte de fibrocemento [8] que han empleado recientemente para evaluar las emisiones de polvo y SCR asociadas a la molienda de piedra natural y artificial [9]. Asimismo, el INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité, Francia) y el FIOH (Finnish Institute of Occupational Health, FIOH) se han basado también en dicha norma para desarrollar metodologías que permitan evaluar de forma estandarizada las emisiones de polvo de madera generadas durante operaciones de corte y lijado de productos de madera [10] [11].

Por este motivo, el objetivo de este trabajo es el desarrollo de un ensayo, basado en dicha norma (EN 1093 "Seguridad de las máquinas. Valoración de la emisión de sustancias peligrosas transportadas por el aire"), que posibilite llevar a cabo la caracterización de las emisiones asociadas al mecanizado de baldosas cerámicas. Este ensayo debe permitir determinar, bajo condiciones rigurosamente controladas y estandarizadas, la concentración en masa y en número de polvo inhalable, torácico, respirable y nanopartículas, así como posibilitar la toma de muestras para posterior análisis off-line (Figura 1). Cabe destacar que, según la información disponible, dicho ensayo estandarizado sería el primero a nivel mundial diseñado y construido específicamente para evaluar las emisiones asociadas al mecanizado de productos cerámicos.

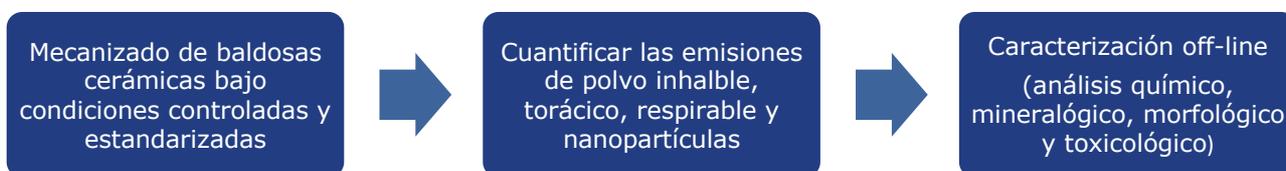


Figura 1. Objetivos del trabajo realizado

4. METODOLOGÍA

Se ha diseñado y construido un túnel de viento cuyo diseño se basa en la Norma EN 1093 "Seguridad de las máquinas. Valoración de la emisión de sustancias peligrosas transportadas por el aire". El túnel de viento consiste en una cabina en la que se lleva a cabo la operación de mecanizado. El polvo generado es transferido por una corriente de aire al conducto de muestreo (Figura 2).

El caudal de aire se selecciona a fin de garantizar que el contaminante objeto de estudio sea transportado desde la máquina a la sección de muestreo. Para partículas finas y gases (humos, partículas respirables, etc.) la norma indica que una velocidad de 0.1 m/s en la sección de la cabina debería ser suficiente.

El muestreo de partículas debe realizarse de manera isocinética y la duración de la medición debe de ser suficiente para garantizar la captación de suficiente cantidad de muestra para los posteriores análisis off-line.

El conducto de muestreo debe estar dotado de equipos que posibiliten la medida en continuo de las distintas fracciones granulométricas con relevancia sobre la salud (inhalable, torácica, respirable y nanopartículas) así como de equipos que permitan llevar a cabo la captación de muestra para posterior análisis off-line, incluyendo análisis químico, morfológico, mineralógico y toxicológico.

A fin de evaluar las emisiones asociadas al corte de baldosas cerámicas, se ha diseñado y construido una máquina de corte automatizada que se ha ubicado en el túnel de viento.

Por último, se ha testeado el sistema desarrollado con diferentes productos cerámicos lo que ha permitido validar el sistema y definir el procedimiento de ensayo y análisis de datos.

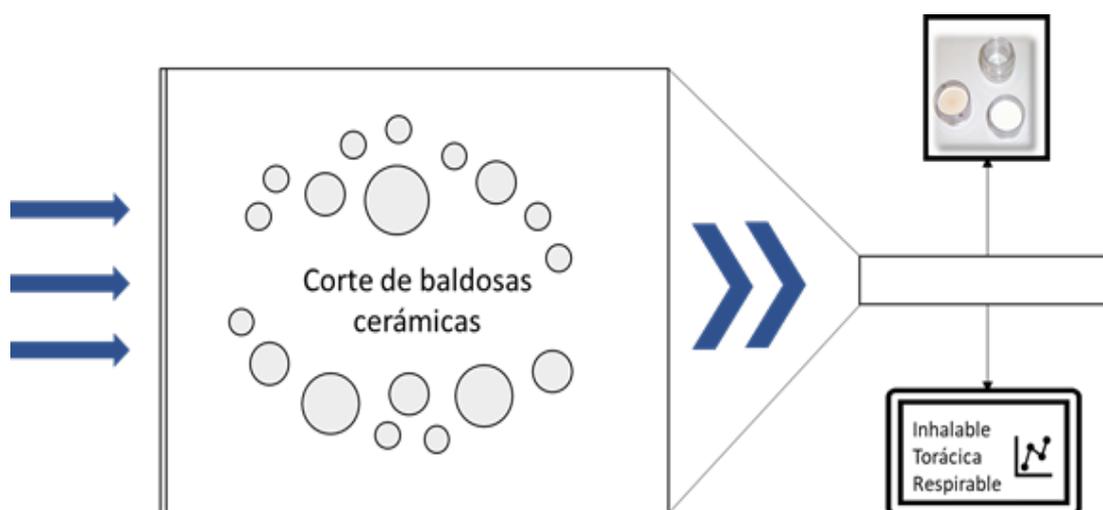


Figura 2. Esquema del túnel de viento desarrollado

5. RESULTADOS

5.1. CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO

En base a las especificaciones de la norma citada previamente (EN 1093), se ha construido un túnel de viento formado por los siguientes componentes (Figura 3):

- Panel filtrante a la entrada de la cabina
- Cabina en la que se lleva a cabo la operación de corte
- Zona de transición cabina-conducto de muestreo
- Conducto de muestreo

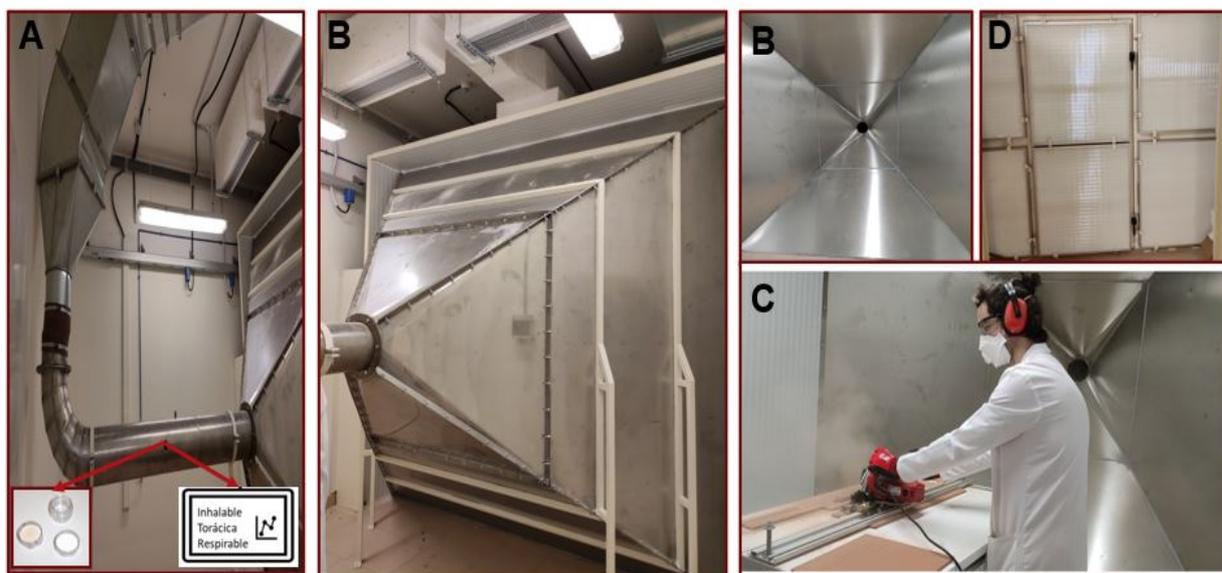


Figura 3. Componentes del túnel de viento: A) conducto de muestreo, B) transición de la cabina al conducto de muestreo, C) cabina en la que se lleva a cabo la operación de corte y D) panel filtrante a la entrada de la cabina.

5.2. SISTEMA DE MUESTREO

Dado que el objetivo del muestreo es caracterizar las emisiones de polvo inhalable, torácico, respirable y nanopartículas, así como llevar a cabo la toma de muestra para posterior análisis off-line, se ha desarrollado un tren de muestreo que consiste básicamente en una sonda isocinética y un divisor de flujo al que se conectan al menos un ciclón de muestreo de la fracción respirable y un medidor en continuo de material particulado (Tabla 2 y Tabla 3). Cabe comentar que, dado que se debe realizar el muestreo en condiciones isocinéticas, se dispone de diferentes boquillas de muestreo y de una bomba externa que permiten realizar los ajustes necesarios para garantizar el isocinetismo. Adicionalmente, pueden conectarse equipos que permitan medir la concentración de nanopartículas y/o dispositivos específicos para la captación de muestra para posterior análisis químico, mineralógico, morfológico o toxicológico.

Equipo	Características / Funcionamiento	Requerido/Opcional
	<p>Sonda isocinética (set isocinético Grimm 1152): La sonda isocinética dispone de varias boquillas que permiten realizar el muestreo en condiciones isocinéticas</p>	Requerido
	<p>Divisor de flujo (TSI 3708) Permite conectar distintos dispositivos durante el ensayo</p>	Requerido
	<p>Bomba de muestreo (AirChek TOUCH Pump): A fin de garantizar el isocinetismo, se dispone de una bomba externa que permite ajustar el caudal de muestreo</p>	Requerido

Tabla 2. Componentes requeridos para garantizar el muestreo isocinético y posibilitar la conexión de diferentes equipos de muestreo

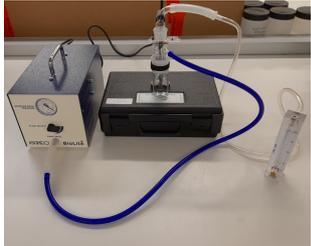
Equipo	Características / Funcionamiento	Requerido/Opcional
	<p>Ciclón (GK2.69) y bomba de muestreo (AirChek TOUCH Pump)</p> <p>Separa la fracción respirable, que se recoge en un filtro de PVC para posterior análisis de la muestra. La determinación de la sílice cristalina respirable se realiza a partir de la muestra recogida en dichos filtros.</p>	<p>Requerido</p>
	<p>Monitor en tiempo real de material particulado rango micrométrico (Grimm EDM264)</p> <p>Medidor óptico que proporciona la concentración de polvo inhalable, torácico y respirable en tiempo real (0,35-35 μm).</p>	<p>Requerido</p>
	<p>Monitor en tiempo real de material particulado rango nanométrico (ELPI+)</p> <p>Proporciona en tiempo real la concentración en número y masa de partículas y la distribución de tamaño de partícula (6 nm y 10 μm).</p>	<p>Opcional</p>
	<p>Biosampler: Dispositivo empleado para captar muestra para posterior análisis toxicológico</p>	<p>Opcional</p>
	<p>TEM: Dispositivo empleado para captar muestra para posterior análisis morfológico</p>	<p>Opcional</p>

Tabla 3. Componentes requeridos para llevar a cabo el muestreo de material particulado

Cabe comentar que se podrían conectar otros dispositivos de medida adicionales en función de los requerimientos específicos del estudio.

5.3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE CORTE

A fin de garantizar la replicabilidad y reproducibilidad del corte y, en base a los resultados obtenidos, se automatizó la herramienta de corte (Figura 4). Se ha instalado un servomotor y un husillo que permiten el avance automático de la herramienta. La velocidad de avance, tiempo de encendido/apagado y longitud de corte se pueden regular mediante un sistema PLC y una pantalla.

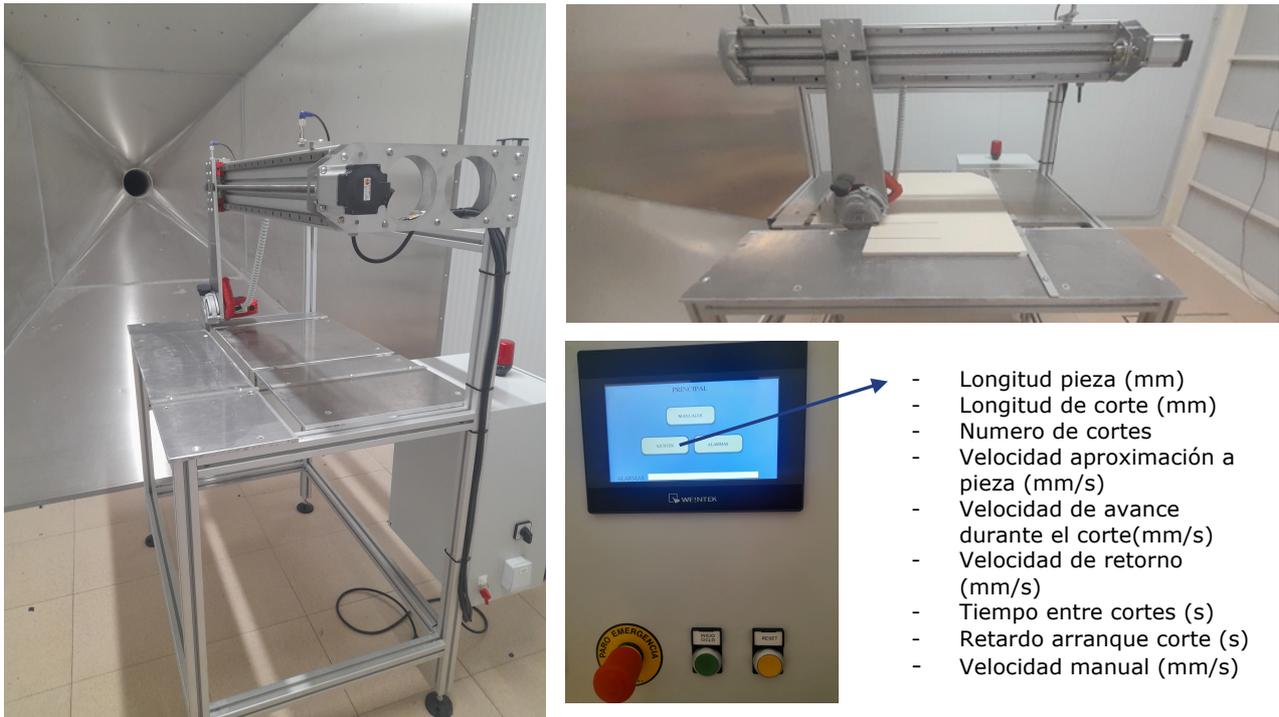


Figura 4. Vista general del sistema de automatización (izq.) y detalle del servomotor y husillo (dcha. arriba) y de la pantalla y ajustes (dcha. abajo).

5.4. DESARROLLO DEL PROCEDIMIENTO DE ENSAYO Y ANÁLISIS DE DATOS

Con el fin de garantizar la representatividad de los resultados y recoger suficiente muestra para los posteriores análisis off-line, se ha definido el siguiente protocolo experimental (Figura 5):



Figura 5. Esquema del procedimiento de ensayo descrito

En el montaje se dispone de un medidor en continuo que permite definir en tiempo real si se requieren cortes adicionales para conseguir suficiente cantidad de muestra.

A partir de los resultados obtenidos, se obtiene la siguiente información: concentración de polvo inhalable, torácico, respirable y nanopartículas.

Por otro lado, en cada replica se obtiene un filtro de muestreo de la fracción respirable que puede ser analizado para determinar el contenido en SCR mediante DRX. En este sentido, los filtros se analizan de acuerdo con la norma ISO 16258-2:2015 Workplace air — Analysis of respirable crystalline silica by X-ray diffraction — Part 2: Method by indirect análisis.

Los filtros se someten a un proceso de redeposición sobre membrana de plata (Figura 6). El porcentaje de sílice cristalina en forma de cuarzo se cuantifica utilizando una recta de calibrado sobre filtros obtenida mediante adiciones conocidas de un patrón certificado.

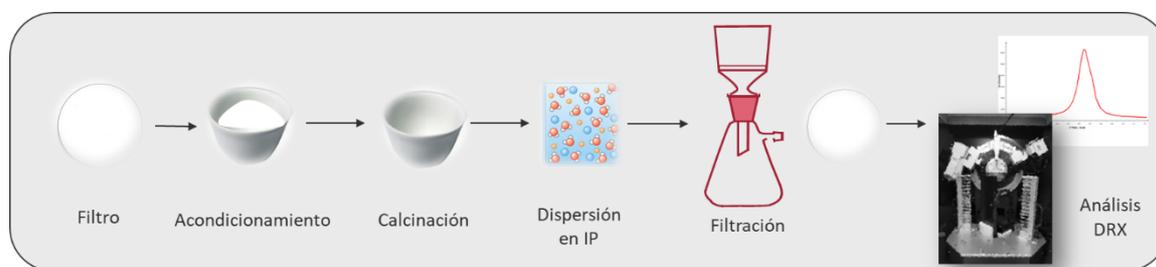


Figura 6. Procedimiento de análisis de los filtros para cuantificar la sílice cristalina respirable

Cabe comentar que, dado que la concentración registrada va a depender del escenario (renovaciones de aire, dimensiones, etc.) y de la ubicación del punto de muestreo, a fin de normalizar los resultados, se realiza una estimación de la tasa de emisión (masa de polvo y SCR emitida por minuto de corte [E.1], por metro lineal de baldosa cortada [E.2] o por gramo de baldosa eliminada durante el corte [E.3]). Este parámetro va a depender de las variables de operación (herramienta, velocidad de avance, diámetro del disco, etc.) y del producto procesado, pero va a ser independiente del entorno en el que se lleve a cabo la operación.

$$FE_{i,t} = \frac{\bar{c}_i \cdot Q \cdot t_{total}}{t_{corte\ activo}} \quad [E.1] \quad FE_{i,l} = \frac{\bar{c}_i \cdot Q \cdot t_{total}}{l} \quad [E.2] \quad FE_{i,m} = \frac{\bar{c}_i \cdot Q \cdot t_{total}}{m} \quad [E.3]$$

Siendo:

- $FE_{i,t}$: Factor de emisión de la fracción de polvo i expresado en mg de polvo emitidos por minuto de corte activo (mg/min)
- $FE_{i,l}$: Factor de emisión de la fracción de polvo i expresado en mg de polvo emitidos por metro lineal de baldosa cortada (mg/m)
- $FE_{i,m}$: Factor de emisión de la fracción de polvo i expresado en mg de polvo emitidos por gramo de baldosa eliminada durante el corte (mg/g)
- \bar{c}_i : Concentración media de la fracción de polvo i durante el ensayo (mg/m^3)
- Q : Caudal de aspiración (m^3/min)
- t_{total} : Tiempo del ensayo (min)
- $t_{corte\ activo}$: Tiempo durante el cual el corte está activo (min)
- l : longitud cortada (m)
- m : masa de baldosa eliminada durante el corte (g). Se estima a partir del espesor y densidad de la pieza, el espesor del disco de corte y la longitud cortada.

A partir del contenido de sílice de los filtros de la fracción respirable, puede determinarse la tasa de emisión de SCR según las ecuaciones [E.4], [E.5] y [E.6].

$$FE_{SCR_t} = \frac{\bar{c}_R \cdot Q \cdot t_{total}}{t_{corte\ activo}} \cdot SC \quad [E.4] \quad FE_{SCR_l} = \frac{\bar{c}_R \cdot Q \cdot t_{total}}{l} \cdot SC \quad [E.5] \quad FE_{SCR_m} = \frac{\bar{c}_R \cdot Q \cdot t_{total}}{m} \cdot SC \quad [E.6]$$

Siendo:

- FE_{SCR_t} : Factor de emisión de SCR en mg de SCR emitidos por minuto de corte activo (mg/min).
- FE_{SCR_l} : Factor de emisión de SCR en mg de SCR emitidos por metro lineal de baldosa cortada (mg/m).
- FE_{SCR_m} : Factor de emisión de SCR en mg de SCR emitidos por gramo de baldosa eliminada durante el corte (mg/m).
- SC: Porcentaje de sílice cristalina en la muestra de polvo respirable captada durante el ensayo (%).
- c_R : Concentración media de polvo respirable durante el ensayo (mg/m³)
- Q: Caudal de aspiración (m³/min)
- t_{total} : Tiempo del ensayo (min)
- $t_{corte\ activo}$: Tiempo durante el cual el corte está activo (min)
- L: longitud cortada (m)
- m: masa de baldosa eliminada durante el corte (g). Se estima a partir del espesor y densidad de la pieza, el espesor del disco y la longitud cortada.

5.5. EVALUACIÓN DE LA EFICACIA DE MEDIDAS CORRECTORAS

La metodología desarrollada permite evaluar la eficacia de la implementación de medidas correctoras (aspiración, corte en húmedo, etc.) y preventivas (reducción del contenido de sílice cristalina de un producto, etc.).

A fin de determinar la eficacia de dichas medidas, se sigue el procedimiento de ensayo previamente descrito y se calcula la eficacia de la medida evaluada mediante la ecuación [E.7]:

$$Eficacia (\%) = \left(1 - \frac{FE_2}{FE_1}\right) \cdot 100 \quad [E.7]$$

Siendo:

- FE_2 : Factor de emisión obtenido a partir de la realización del ensayo con medidas correctoras.
- FE_1 : Factor de emisión obtenido a partir de la realización del ensayo sin medidas correctoras.

5.6. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA

A fin de validar la aplicabilidad del sistema desarrollado para el estudio de las emisiones asociadas a corte de baldosas cerámicas, así como evaluar la replicabilidad del ensayo, se ha llevado a cabo el corte de diferentes productos cerámicos.

A modo de ejemplo, se muestra la evolución temporal de las concentraciones de polvo inhalable y respirable durante dos de los ensayos realizados (Figura 7: producto A y Figura 8: producto B). En la Figura 9 se muestra la evolución temporal de la concentración de nanopartículas durante el ensayo del producto C.

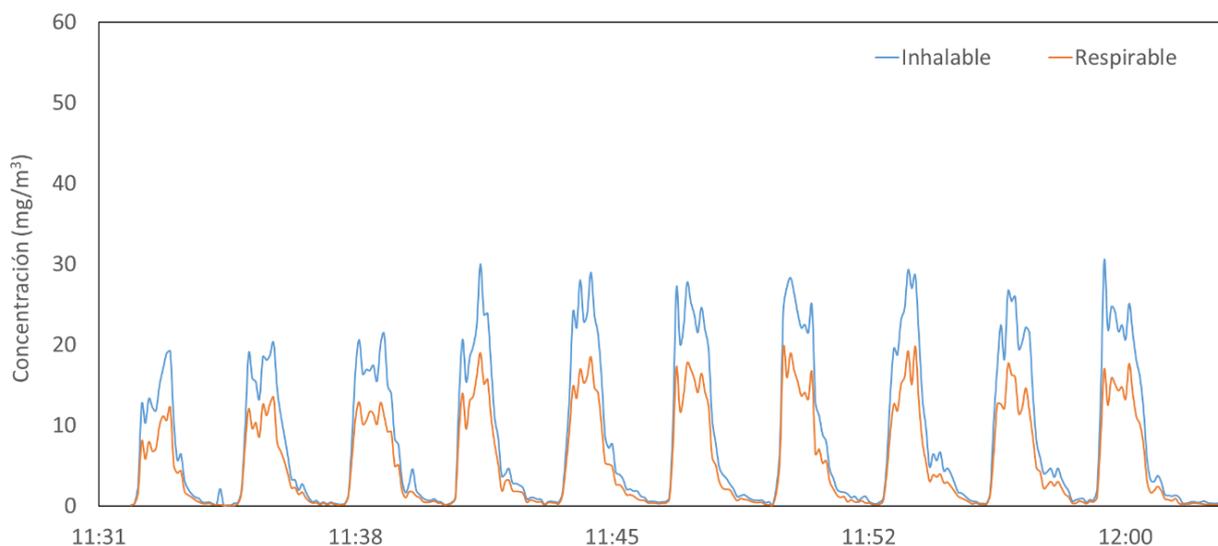


Figura 7. Evolución de las concentraciones de polvo inhalable y respirable durante el ensayo del producto A.

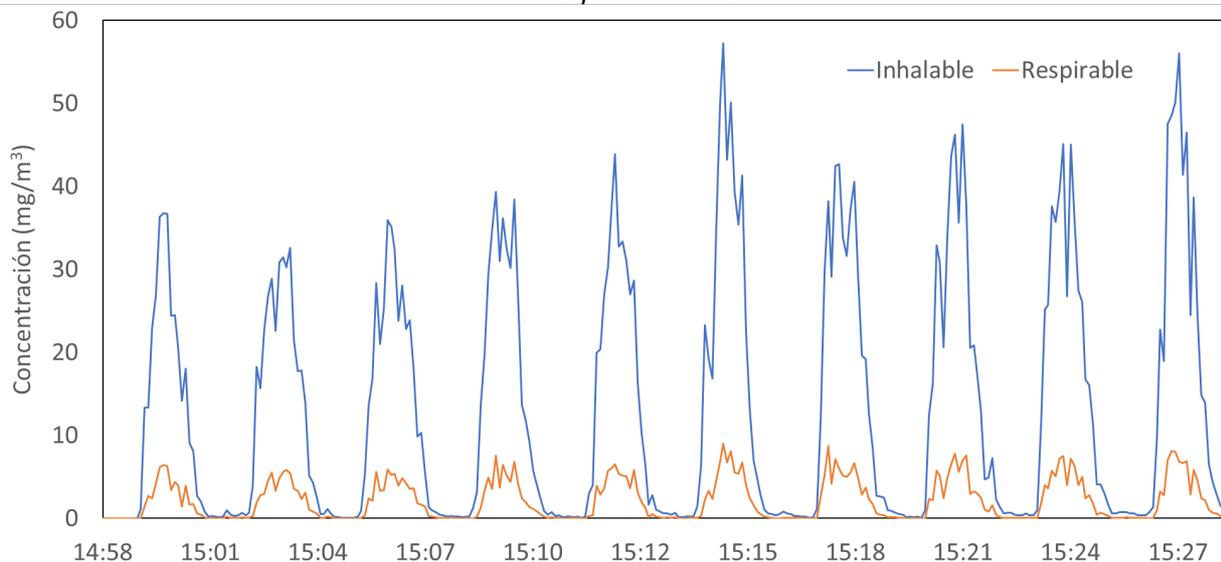


Figura 8. Evolución de las concentraciones de polvo inhalable y respirable durante el ensayo del producto B

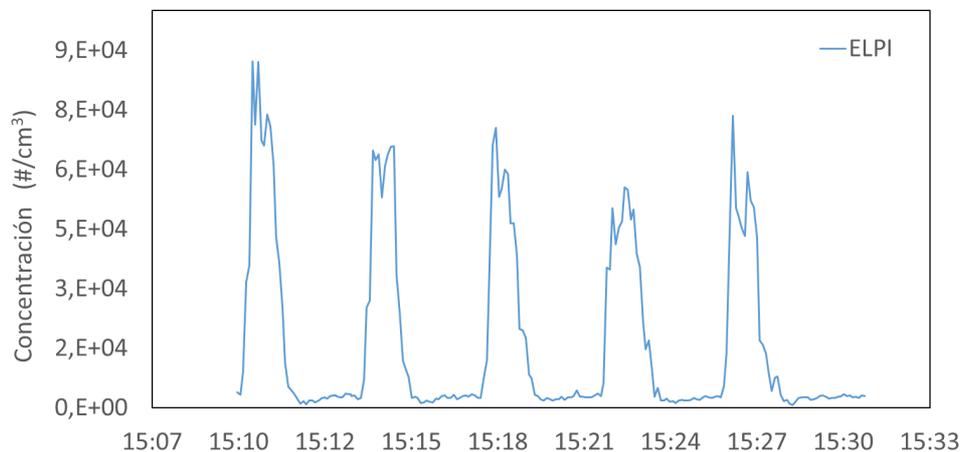


Figura 9. Evolución de las concentraciones de nanopartículas durante el ensayo del producto C

A partir de los experimentos, se puede determinar el factor de emisión, aplicando las ecuaciones previamente descritas (Tabla 4).

	Fracción	FE _t (mg/min)	FE _l (mg/m)	FE _m (mg/g)
Producto A	Inhalable	1 695	2825	88
	Respirable	1 077	1795	56
	*Nanopartículas	6·10 ¹³	1·10 ¹⁴	3·10 ¹²
Producto B	Inhalable	2 537	4229	131
	Respirable	405	675	21
	*Nanopartículas	8·10 ¹²	1·10 ¹³	4·10 ¹¹
Producto C	Inhalable	1979	6598	205
	Respirable	275	917	28
	*Nanopartículas	3·10 ¹²	9·10 ¹²	3·10 ¹¹

*En el caso de las nanopartículas, el factor de emisión está expresado en #/min, #/m y #/g

Tabla 4. Factores de emisión de polvo inhalable, respirable y nanopartículas

A partir de la determinación del contenido en sílice de los filtros, según la metodología descrita en la sección 5.4, se puede determinar el porcentaje de sílice cristalina presente en el polvo respirable y la tasa de emisión de sílice cristalina respirable (Tabla 5).

Producto	FE _{t,SCR} (mg/min)	FE _{l,SCR} (mg/m)	FE _{m,SCR} (mg/g)
A	140	233	7
B	73	122	4
C	58	193	6

Tabla 5. Factores de emisión de SCR

Por otro lado, a modo de ejemplo, en la Tabla 6 se muestra la reducción alcanzada en uno de los experimentos llevados a cabo para evaluar la eficacia de medidas correctoras. Estos datos se detallan únicamente con la finalidad de mostrar las posibles aplicaciones de la metodología desarrollada, no deben tomarse como valores medios ni representativos, ya que se basan en resultados preliminares. Los valores de eficacia en sistemas de aspiración dependen de muchas variables (caudal, diseño del sistema de captura, grado de encerramiento del elemento de corte, etc.).

	Sin medidas correctoras	Con medidas correctoras (herramienta conectada a aspiradora)
FE_{t,R} (mg/min)	748	581
Eficacia (%)	22	

Tabla 6. Evaluación de la eficacia asociada a la implementación de medidas correctoras

Adicionalmente, tal y como se ha indicado, el montaje desarrollado posibilita llevar a cabo una caracterización de la muestra, incluyendo: análisis mineralógico, químico, morfológico y toxicológico. A modo de ejemplo, se muestra una micrografía y análisis EDX realizado por microscopia electrónica de barrido con detector de energía dispersiva (MEB-EDX)

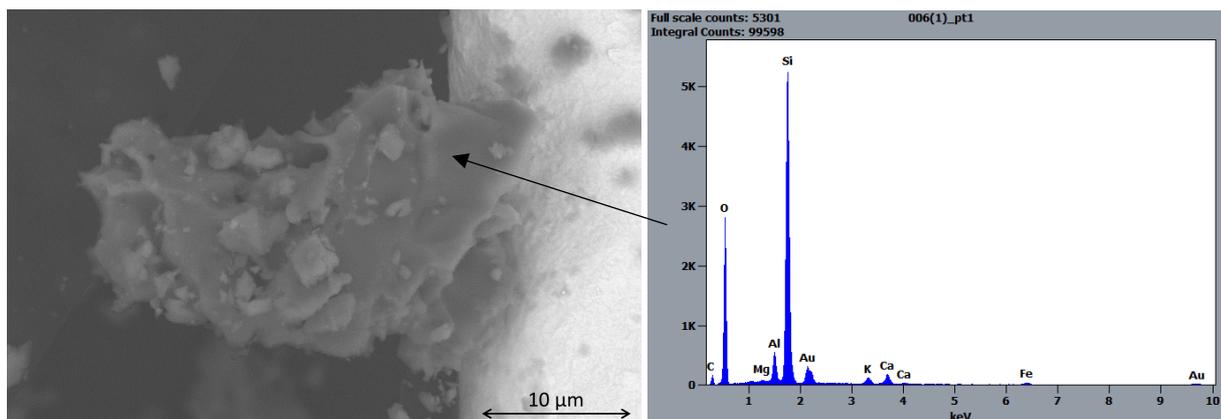


Figura 10. Micrografía MEB y análisis EDX de la partícula señalada.

CONCLUSIONES

- Se ha diseñado y construido un túnel de viento normalizado, así como una metodología que permite la cuantificación, bajo condiciones estandarizadas, de las emisiones de polvo inhalable torácico, respirable y nanopartículas en el mecanizado de piezas conformadas. Cabe destacar que dicho ensayo estandarizado es el primero a nivel mundial diseñado y construido específicamente para evaluar las emisiones asociadas al mecanizado en seco de productos cerámicos.
- La metodología desarrollada posibilita la captación de muestra para posterior análisis off-line, incluyendo: análisis químico, mineralógico, morfológico y toxicológico.
- Disponer de una metodología estandarizada se considera de gran utilidad a fin de comparar las emisiones generadas durante el procesado de diferentes productos, así como para evaluar la eficacia de la implementación de medidas preventivas y/o correctoras.
- No obstante, dado el gran número de variables (material, elementos de corte o medidas correctoras) y posibles escenarios industriales (grado de ventilación y/o confinamiento), aún se requiere desarrollar un trabajo sistemático para discriminar la influencia de las diferentes variables para poder disponer de resultados consistentes.

6. REFERENCIAS

- [1] IARC. (1997). Silica, some silicates, coal dust and para-aramid fibrils.
- [2] IARC (2012). Arsenic, Metals, Fibres, and Dusts
- [3] BASEQUIM 032. SITUACIONES DE EXPOSICIÓN A AGENTES QUÍMICOS. https://www.insst.es/documents/94886/791398/BASEQUIM_032.pdf/6417b82a-5371-271b-c02d-5a76cbb46b5c?t=1637877173889
- [4] Hall, S., Stacey, P., Pengelly, I., Stagg, S., Saunders, J., & Hambling, S. (2022). Characterizing and comparing emissions of dust, respirable crystalline silica, and volatile organic compounds from natural and artificial stones. *Annals of Work Exposures and Health*, 66(2), 139-149.
- [5] Ramkissoon, C., Gaskin, S., Thredgold, L., Hall, T., Rowett, S., & Gun, R. (2022). Characterisation of dust emissions from machined engineered stones to understand the hazard for accelerated silicosis. *Scientific Reports*, 12(1), 4351.
- [6] Kouam, J., Songmene, V., Bahloul, A., & Samuel, A. M. (2022). Characterization of Si and SiO₂ in dust emitted during granite polishing as a function of cutting conditions. *Materials*, 15(11), 3965.
- [7] TNO. <https://stofvrijwerken.tno.nl/en/innovatie/testfaciliteiten/>
- [8] Qi, C., Echt, A., & Gressel, M. G. (2016). On the characterization of the generation rate and size-dependent crystalline silica content of the dust from cutting fiber cement siding. *Annals of Occupational Hygiene*, 60(2), 220-230.
- [9] Thompson, D., & Qi, C. (2023). Characterization of the emissions and crystalline silica content of airborne dust generated from grinding natural and engineered stones. *Annals of work exposures and health*, 67(2), 266-280.
- [10] Keller, F. X., & Chata, F. (2018). Characterization of wood dust emission from hand-held woodworking machines. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 15(1), 13-23.
- [11] Welling, I., Lehtimäki, M., Rautio, S., Lähde, T., Enbom, S., Hynynen, P., & Hämeri, K. (2008). Wood dust particle and mass concentrations and filtration efficiency in sanding of wood materials. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 6(2), 90-98.