

Efecto de los sistemas de nebulización en la exposición a sílice cristalina en una marmolería

Natividad Montes Beneitez

Centro Nacional de Verificación de Maquinaria. INSST

M.ª Nieves de la Peña Loroño

Instituto Vasco de Seguridad y Salud Laborales. OSALAN

Durante las operaciones de corte, mecanizado y acabado realizadas para la elaboración de piezas en las marmolerías se puede generar un aerosol que conlleva una exposición a polvo respirable de sílice cristalina. Dado que es necesario reducir al mínimo posible la presencia de sílice cristalina respirable en el ambiente de trabajo, algunas empresas han puesto en marcha sistemas de nebulización como una de las medidas de prevención y protección para reducir este riesgo. El objetivo de este artículo es describir el efecto de estos sistemas sobre la concentración ambiental a la que pueden estar expuestos los trabajadores durante dichas operaciones.

INTRODUCCIÓN

“Sílice” es el nombre por el que se conoce habitualmente al dióxido de silicio, sólido muy presente en la corteza terrestre. La sílice puede estar en forma amorfa (ópalo, por ejemplo) u ordenada, espacialmente en una red tridimensional, es decir, cristalizada, formando, por ejemplo, cuarzo, cristobalita o tridimita.

La expresión “sílice cristalina respirable” (en adelante SCR) se refiere al dióxido de silicio cristalizado cuyo tamaño de partícula es tal que es capaz de penetrar en las vías respiratorias no ciliadas (alveolos pulmonares). La SCR se consi-

dera un agente químico peligroso (Real Decreto 374/2001, de 6 de abril, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo (en adelante RD 374/2001) al disponer de VLA en el documento “Límites de Exposición Profesional para Agentes Químicos en España”, editado por el INSST, y la Directiva (UE) 2017/2398 de 12 de diciembre de 2017, que modifica la Directiva 2004/37/CE relativa a la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes carcinógenos o mutágenos durante el trabajo, que incluye, en el anexo

I, “trabajos que supongan exposición a polvo respirable de sílice cristalina generado en un proceso de trabajo”.

La exposición laboral a SCR puede producirse en cualquier situación del lugar de trabajo donde se genera polvo en el aire que contiene sílice cristalina respirable, ya sea porque la sílice cristalina es materia prima o porque está contenida en los artículos mecanizados, como es el caso de las marmolerías, donde se utilizan tableros de piedra natural, aglomerados de cuarzo y/o materiales porcelánicos, conteniendo todos ellos sílice cristalina en mayor o menor proporción.

■ Figura 1 ■ Corte de tablero en húmedo.



La elaboración de piezas en una marmolería se inicia con la recepción del material: tablero de piedra natural, aglomerado de cuarzo o material porcelánico, de acuerdo con los pedidos de los clientes, generalmente para hacer encimeras, pudiéndose realizar también otro tipo de piezas como lápidas, baldosas, elementos decorativos, etc. Una vez recepcionados los tableros, estos se cortan a las dimensiones deseadas mediante sierras de disco, que trabajan en húmedo. Las piezas cortadas pueden seguir otros procesos de acabado con máquinas o herramientas manuales, como el contorneado o el pulido de cantos, el mecanizado de orificios para insertar lavabos, placas de cocinas, grifos, fregaderos o cualquier otro tipo de elemento que forme parte de la instalación y la eliminación de aristas vivas, todos ellos procesos en húmedo en la marmolería objeto de estudio. Finalmente, en ocasiones, algunas de las piezas cortadas y mecanizadas se montan y encolan en el taller. Una vez finalizadas las piezas en el taller, estas se envían al cliente o, en caso de requerirlo —es lo habitual con las encimeras—, se instalan, lo que puede hacer necesaria la realización de operaciones de ajuste y de pulido de algunas piezas mediante herramientas manuales “in situ”, para lo que se utiliza aspiración o se vuelve al taller para hacerlo en húmedo.

Durante las operaciones de corte, mecanizado y acabado se genera un aerosol que contiene SCR, al formar parte de la composición del material utilizado. La mayor o menor presencia de SCR en el aerosol está asociada, en principio, al contenido de sílice en el material que se manipula. Como datos generales, los mármoles contienen en torno a un 15% de sílice cristalina en su polimorfo de cuarzo; el granito un 30%, aunque hay granitos con más presencia de sílice y algunos con menos; los aglomerados de cuarzo pueden llegar a contener hasta un

95%, con una carga importante de cristobalita en algunas de las formulaciones, y los materiales porcelánicos entre un 10% y un 15% de cuarzo cristalino.

La permanencia en el aire del aerosol generado, en concreto la parte pulvígena, y el riesgo de su entrada en el organismo humano por vía respiratoria están asociados al tamaño de partícula (peso) de dicho polvo. Las partículas grandes o pesadas se depositarán pronto, pero una vez en el aire la fracción respirable de dicho polvo puede tardar un tiempo variablemente largo en sedimentar. Además, en situaciones en las que el aire se encuentra constantemente agitado y no existen renovaciones de aire, esta fracción respirable puede permanecer suspendida en el lugar de trabajo durante días en concentraciones significativas.

La actuación frente a esta exposición, tal y como se indica en el artículo 5 del Real Decreto 374/2001 “Medidas específicas de prevención y protección”, se debe dirigir a la eliminación o reducción al mínimo de los riesgos derivados de la presencia del agente químico si no se

han podido eliminar, aplicando medidas de prevención y protección que sean coherentes con la evaluación de riesgos. El objetivo final de las medidas preventivas no es solo que la exposición se halle por debajo del valor límite de exposición profesional, sino que esta sea tan baja como resulte técnicamente posible.

En el caso concreto de una marmolería, el principal objetivo del conjunto de medidas preventivas es, por un lado, minimizar la generación de polvo durante las operaciones con los tableros y, por otro, evitar su paso al ambiente de trabajo.

Estas medidas técnicas de control del riesgo, por orden de prioridad, se pueden agrupar de la siguiente forma:

1. Evitar o reducir la emisión de polvo, realizando todos los trabajos en húmedo. El agua es el elemento más antiguo y más usado como supresor de polvo en aquellos trabajos que conllevan la manipulación de materias primas que contienen sílice. Así, el agua se guía sobre la zona de mecanizado

Figura 2 ■ Sistemas de nebulización instalados sobre la máquina de corte.



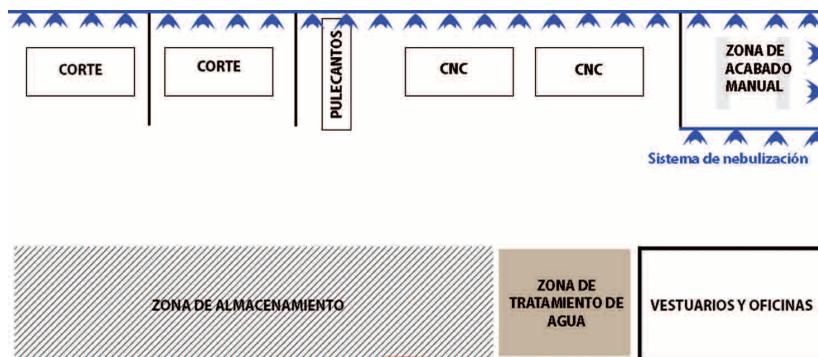
mediante una serie de boquillas, evitando que se generen nubes de polvo (véase la Figura 1).

2. Evitar o reducir la dispersión del polvo en el ambiente mediante la utilización de sistemas de extracción localizada en la zona de generación y/o la utilización de sistemas de nebulización. La nebulización consiste en pulverizar agua a tamaño de gota muy fino, generando una pequeña

niebla en el taller o en una zona de trabajo específica, de forma que las partículas en suspensión se humectan y aumentan de peso y volumen, lo que favorece su precipitación (véase la Figura 2).

3. Limpieza de los equipos y de la zona de trabajo, evitando así que las partículas con contenido en sílice cristalina depositadas en las superficies puedan pasar de nuevo al ambiente.

Figura 3 ■ Esquema de la marmolería en estudio.



En azul se muestran la situación de los sistemas de nebulización y la posición y orientación de las boquillas. En rojo, la puerta y las ventanas que permiten las renovaciones de aire.

ESTUDIO DE CAMPO

Durante la campaña “Exposición a Sílice Cristalina en las marmolerías del País Vasco” del plan de gestión 2010 – 2011, realizada por OSALAN con la colaboración del CNVM-INSST, se tomaron muestras de polvo respirable y SCR en 37 marmolerías con el fin de conocer la exposición a SCR en este sector y proponer medidas preventivas. La recomendación básica fue la implantación de los trabajos en húmedo en todo el proceso, ya que en muchos casos las operaciones con herramientas manuales se hacían en seco. Sin embargo, los resultados obtenidos en los locales que ya habían implantado todo en húmedo exigieron la necesidad de otras medidas: ventilación de los locales, extracciones localizadas (cuestión problemática por estar asociada a aerosoles húmedos) y la nebulización, medida sobre la que había ciertas dudas sobre su efectividad.

En 2018 se puso en marcha un nuevo estudio de la exposición a SCR en marmolerías, realizado por el INSST y OSALAN. Uno de sus objetivos fue evaluar la efectividad de la nebulización como medida preventiva. Para ello, se realizaron muestreos para conocer la concentración de polvo respirable y SCR en el ambiente de trabajo, así como el tamaño de las partículas presentes en dicho ambiente, tanto con el sistema de nebulización funcionando como desconectado.

Descripción del lugar de trabajo

El estudio se llevó a cabo en una marmolería que desarrolla su actividad en una nave de 35 m de largo por 15 m de ancho y 9 de alto. A la derecha de la nave se encuentran ubicadas la zona de mecanizado de las piezas, que consta de

dos máquinas de corte, una pulecanta, dos máquinas de control numérico (CN o CNC) y la zona de acabado manual. A la izquierda de la nave se encuentra la zona de almacenamiento de material, el sistema de tratamiento de aguas y la zona de vestuarios y oficinas (véase la Figura 3).

El taller dispone de dos sistemas de nebulización independientes: uno que cubre toda la zona de acabado manual, con 10 boquillas instaladas en U, y otro con 19 boquillas dispuestas en línea paralela a la pared que discurre sobre las zonas de mecanizado (máquinas de corte, pulecanta y CNC).

Al no disponer de sistemas de ventilación forzada, las renovaciones de aire en el local se consiguen mediante ventilación natural.

Realización de los muestreos

Para determinar la eficacia de la nebulización se muestrearon tres jornadas de trabajo completas con el sistema de nebulización conectado y otras tres sin él. Los muestreos se realizaron entre marzo y mayo de 2018, mientras se mecanizaban diferentes piezas en función de la programación establecida. La distribución de trabajo durante esos días fue de un 55% de tableros de aglomerado de cuarzo, 35% de materiales porcelánicos y 10% de tableros naturales, en su mayoría de granito. Esta distribución puede considerarse representativa de la actividad habitual de la empresa.

Se llevaron a cabo tanto muestreos personales como ambientales o estáticos. Los muestreos personales se realizaron en los cinco trabajadores que desempeñan de forma habitual sus tareas en el taller, con la siguiente distribución: dos trabajadores realizan operaciones de corte de tableros, un trabajador realiza las tareas de pulido en la máquina

pulecanta y mecanizado con CNC y los otros dos realizan las operaciones de acabado de piezas, empleando para ello herramientas manuales.

Para los muestreos estáticos, los muestreadores se colocaron en tres zonas de la nave, cubriendo en la medida de lo posible las distintas zonas en las que se encuentra dividido el espacio de trabajo y colocados a una altura de aproximadamente 1,5 m. Los puestos en los que se colocaron fueron: en el panel de mando de una de las máquinas de corte, lo más próximos posible a los controles de mando de las máquinas de control numérico y en la parte central de la zona de acabado, evitando interferir con las actividades normales de los trabajadores.

La toma de muestra se realizó con ciclón europeo (tipo Higgins-Dewell) para muestreo de fracción de polvo respirable en aire, diseñado para un D_{50}^1 de 4,0 μm a 2,2 l/min, de SKC. Las bombas utilizadas fueron calibradas a un caudal de 2,2 l/min antes de la toma de muestra y verificadas una vez finalizado el muestreo.

La determinación gravimétrica de la fracción respirable se realizó de acuerdo con el método MTA/MA-014/A11 y el posterior análisis de cuarzo y cristobalita se llevó a cabo siguiendo el método MTA/MA – 056/A06.

Distribución por tamaño de partículas en suspensión en el aire

Como se ha indicado anteriormente, la nebulización tiene como objetivo que las partículas pequeñas precipiten más

¹ D_{50} es el diámetro aerodinámico mediana de la distribución de partículas y corresponde con el tamaño de partícula del percentil 50.

fácilmente mediante su humectación y consecuente aumento de peso y volumen.

Por ello, para determinar el tamaño de las partículas presentes en el ambiente, cada día de muestreo se incluyeron tres impactadores de cascada Marple 298 a un caudal de 2,0 l/min. Estos muestreadores aprovechan las fuerzas de inercia que se producen al pasar aire por su interior y son capaces de separar las partículas por tamaño en función de su diámetro aerodinámico. Los puntos de corte en las diferentes etapas son los siguientes: etapa 1: 21,3 μm ; etapa 2: 14,8 μm ; etapa 3: 9,8 μm ; etapa 4: 6,0 μm ; etapa 5: 3,5 μm ; etapa 6: 1,55 μm ; etapa 7: 0,93 μm ; etapa 8: 0,52 μm y etapa 9: < 0,52 μm . Las partículas separadas en cada etapa corresponden a intervalos definidos de tamaño de partícula y se depositan en un filtro de membrana adecuado para su posterior análisis.

A partir de la masa recogida en cada una de las etapas del impactador, se ha estimado la distribución por tamaños de las partículas en suspensión en el aire. La figura 4 muestra la distribución obtenida en la sección de acabado en función de si se usa o no la nebulización. Cuando esta está desconectada, la distribución de las partículas es básicamente unimodal, con un máximo de un diámetro aerodinámico equivalente próximo a 4,5 μm , mientras que con la nebulización la distribución puede considerarse bimodal, con la segunda moda a aproximadamente 1,2 μm de diámetro aerodinámico equivalente. La nebulización parece conducir, por tanto, a un descenso de las partículas con tamaños entre 2 y 9,8 μm , que es coherente con el convenio de la fracción respirable, definido como la distribución logarítmico-normal acumulada de mediana 4,25 μm y desviación típica geométrica 1,5 μm .

Figura 4 Distribución por tamaño de partículas en función de la nebulización.

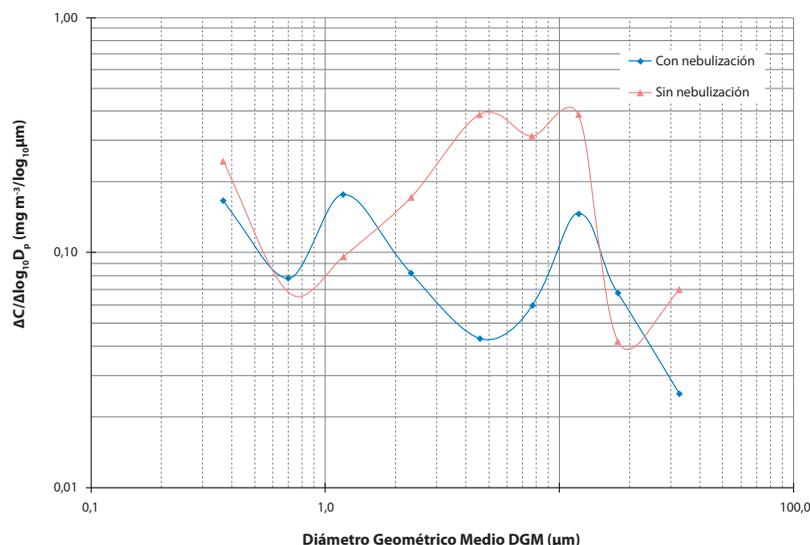


Tabla 1 Distribución por tamaños de la sílice cristalina en el aire encontrada en dos muestreos.

Etapa	DGM	SIN NEBULIZACIÓN			CON NEBULIZACIÓN		
		Polvo µg	Cuarzo µg	Cristobalita µg	Polvo µg	Cuarzo µg	Cristobalita µg
4	7,67	67	26	< 3	64	14	10
5	4,58	98	27	< 3			
6	2,33	104	14	< 3	41	< 3	< 3
7	1,20	55	< 3	< 3	43	< 3	23,6
8	0,70	44	< 3	< 3	33	< 3	31,2
9	0,37	107	< 3	< 3	43	< 3	< 3

Una vez analizada la distribución de partículas gravimétricamente, se realizó la determinación de sílice cristalina respirable considerando únicamente las etapas 4 a 9, por ser estas en las que se recogen las partículas con diámetro

aerodinámico inferior a 10 µm. En función de la masa recogida en cada caso, se agruparon varias etapas para solventar el problema del límite de cuantificación (LOQ, por sus siglas en inglés) de la sílice cristalina. La tabla 1 recoge los

resultados obtenidos en el análisis de algunos de los impactadores, representativos de los datos obtenidos.

De las 18 muestras tomadas con el impactador, se ha encontrado cuarzo en las 9 muestras correspondientes a los días sin nebulización, presentando tamaños de partículas entre 9,8 y 1,55 µm, con un diámetro geométrico medio (DGM) de 4 µm, es decir: su presencia estaba limitada a las tres primeras etapas compatibles con la fracción respirable. Con respecto a la cristobalita, en las 6 muestras en las que se ha encontrado esta presenta tamaños de partículas más pequeñas, siendo su prevalencia mayor en las etapas 7 y 8, es decir, que presentan tamaños de partículas comprendidos entre 1,55 y 0,52 µm. Estos resultados son comparables con los estudios previos realizados en 2011, donde se observaron tamaños de partículas similares para la cristobalita.

Concentraciones de SCR en el ambiente

Durante los muestreos para determinar las concentraciones de SCR en el ambiente, se recogieron, en total, 58 muestras válidas de jornada completa, con una duración media de muestreo de 470 minutos, así como dos blancos de campo por día de muestreo. Cuando se realizaron los análisis de sílice cristalina, diez de las 58 muestras devolvieron resultados por debajo del LOQ del cuarzo, 9 µg/muestra, y solo en cinco de ellas se pudo cuantificar la cristobalita, que presenta el mismo LOQ, es decir: la concentración de cuarzo y cristobalita en dichos casos fue inferior a 0,008 mg/m³. En el caso de los blancos de campo, no se detectó la presencia de polvo o sílice cristalina en ninguno de ellos.

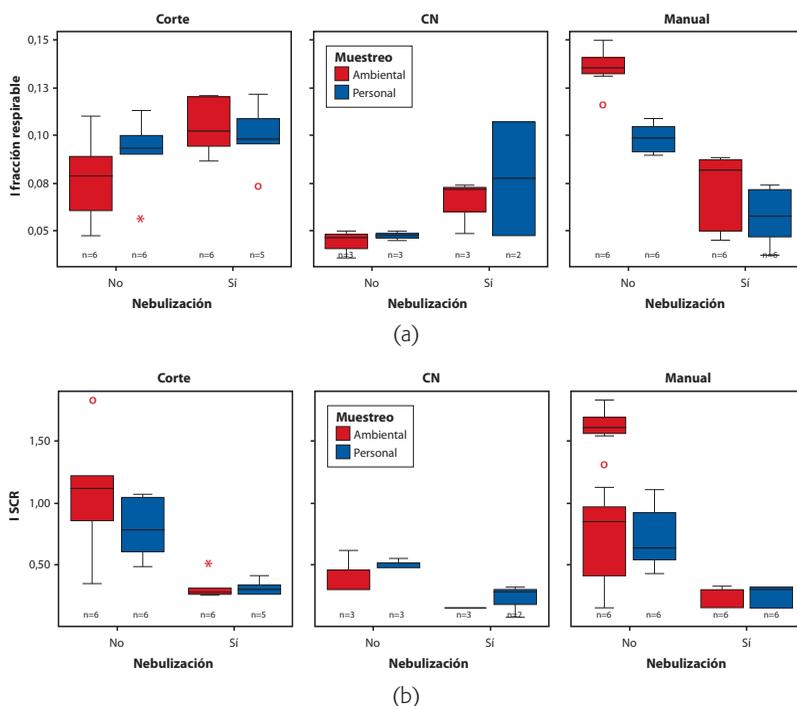
Tabla 2 Resumen de las concentraciones ambientales obtenidas en los distintos puestos y tipo de muestreo, en función de la nebulización.

PUESTO	Nebulización	Tipo muestreo	N	Cpolvo respirable mg/m ³ n; MG (DSG)	Ccuarzo mg/m ³ n; MG (DSG)	Ccristobalita mg/m ³ n; MG (DSG)
CORTE	No	Personal	6	6; 0,27 (1,27)	6; 0,04 (1,28)	1; 0,01 (—)
		Ambiental	6	6; 0,22 (1,35)	6; 0,05 (1,73)	2; 0,01 (1,10)
	Sí	Personal	5	5; 0,30 (1,20)	5; 0,01 (1,28)	--
		Ambiental	6	6; 0,31 (1,14)	6; 0,01 (1,34)	--
MECANIZADO	No	Personal	3	3; 0,14 (1,05)	3; 0,02 (1,13)	1; 0,01 (—)
		Ambiental	3	3; 0,13 (1,19)	3; 0,01 (1,69)	--
	Sí	Personal	2	2; 0,21 (1,77)	2; 0,01 (1,19)	1; 0,01 (—)
		Ambiental	3	3; 0,19 (1,27)	--	--
ACABADO	No	Personal	6	6; 0,30 (1,08)	6; 0,03 (1,60)	1; 0,01 (—)
		Ambiental	6	6; 0,40 (1,09)	5; 0,03 (1,62)	1; 0,01 (—)
	Sí	Personal	6	6; 0,17 (1,31)	5; 0,01 (1,26)	--
		Ambiental	6	6; 0,21 (1,36)	2; 0,01 (1,08)	--

La tabla 2 muestra la distribución de los resultados obtenidos en función del puesto y del tipo de muestreo, considerando si se usa o no la nebulización, incluyendo el número de muestras para cada caso (N), la media geométrica (MG) y la desviación estándar geométrica (DSG) de las concentraciones en aire de polvo respirable, cuarzo y cristobalita con indicación del número de resultados superiores al límite de cuantificación (n). Los resultados por debajo del LOQ se han excluido de los cálculos mostrados para no censurar la distribución.

La comparación de las distribuciones obtenidas, para cada uno de los puestos analizados y tipo de muestreo, pone de manifiesto que el empleo de un sistema de nebulización produce un descenso significativo en las concentraciones de cuarzo cristalino respirable en el ambiente de trabajo ($p < 0,01$, $\alpha = 0,05$). Esto es coherente con los resultados obtenidos de los impactadores, puesto que, como se ha mostrado en el apartado anterior, la nebulización produce un descenso de las partículas con mayor contenido en

Figura 5 Diagrama de cajas que muestra la distribución de los índices de exposición obtenidos en cada puesto en función del uso o no del sistema de nebulización. (a) polvo fracción respirable (b) sílice cristalina respirable (SCR).



cuarzo. Sin embargo, este efecto no es apreciable cuando se evalúa únicamente la presencia de polvo (fracción respirable), ya que, en este caso, no se observan variaciones en la concentración ($p = 0,49$, $\alpha = 0,05$).

Asimismo, los resultados del estudio han mostrado que la realización de los trabajos en húmedo, sin otras medidas técnicas de control, puede conducir a situaciones donde la exposición a sílice cristalina esté muy próxima al VLA-ED®, establecido en $0,05 \text{ mg/m}^3$ tanto para el cuarzo como para la cristobalita, superándose en alguno de los casos para las operaciones de corte y acabado manual. En la figura 5 se muestra la distribución de los índices de exposición para el polvo (fracción respirable), que tiene establecido un VLA-ED® de 3 mg/m^3 , y para la SCR calculada teniendo en cuenta las concentraciones ambientales de los dos polimorfos ($I_{SCR} = I_{\text{cuarzo}} + I_{\text{cristobalita}}$). Para

aquellos resultados en los que no se ha podido cuantificar la concentración de cuarzo y/o cristobalita, se ha considerado una concentración igual a la mitad del LOQ.

CONCLUSIONES

La realización de las operaciones en húmedo no es suficiente para garantizar un nivel de riesgo aceptable por exposición a sílice cristalina respirable, superándose en algún caso su VLA-ED® de $0,05 \text{ mg/m}^3$, por lo que es necesario la implantación de otras medidas de control de la exposición.

Los resultados del estudio realizado indican la efectividad de los sistemas de nebulización en el control de la exposición a sílice cristalina respirable, ya que su utilización conduce a un descenso significativo de la concentración de SCR en el ambiente de trabajo y a una situa-

ción de exposición aceptable. Por tanto, el uso de sistemas de nebulización es una de las posibles medidas a implantar para controlar el riesgo de exposición, que debería contemplarse junto con otras medidas de control, como extracciones localizadas y ventilación general forzada, para reducir al mínimo posible la exposición a SCR.

Asimismo, dado los efectos sobre la salud asociados a este agente químico, y a pesar de estar en una situación de riesgo aceptable, se recomienda el uso complementario de protección respiratoria.

Finalmente, es necesario recordar que la limpieza de equipos, suelos, instalaciones, tablas... es esencial para evitar que el polvo depositado puede pasar fácilmente al ambiente de nuevo una vez se seque, por las corrientes generadas, paso de personas, etc. ●

■ Bibliografía ■

- Real Decreto 374/2001, de 6 de abril, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo. BOE n.º 104, de 1 de mayo.
- Directiva (UE) 2017/2398 de 12 de diciembre de 2017, que modifica la Directiva 2004/37/CE relativa a la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes carcinógenos o mutágenos durante el trabajo.
- De la Peña, M.ª Nieves. "Exposición a sílice" Revista ROC Máquina N.º 130, págs. 28-31 (2012). ISSN: 0214-0217.
- Rojo Aparicio, José María. "Mecanizado de aglomerados de sílice: factores a considerar para la evaluación del riesgo". Proceedings of the 10th International Conference on Occupational Risk Prevention. Ed: Mondelo PR et al. Spain (2012) ISBN: 978-84-615-7900-6.
- European Network for Silica (NEPSI). "Guía de Buenas Prácticas para la Protección de la Salud del Trabajador para la Adecuada Manipulación y Uso de la Sílice Cristalina y de los Productos que la contengan". 2006.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) en colaboración con CC AA (2011). "Mecanizado de planchas de aglomerados de sílice mediante el uso de herramientas portátiles: exposición a sílice cristalina". Situaciones de Trabajo Peligrosas, STP: Exposición a Agentes Químicos, BASEQUIM.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Nota Técnica de Prevención (NTP) n.º 890. "Aglomerados de cuarzo: medidas preventivas en operaciones de mecanizado." 2010.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Métodos de Toma de Muestra y Análisis. MTA/MA-014/A11 "Determinación de materia particulada (fracciones inhalable, torácica y respirable) en aire – Método gravimétrico" 2011.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Métodos de Toma de Muestra y Análisis. MTA/MA-056/A06: "Determinación de sílice libre cristalina (cuarzo, cristobalita, tridimita) en aire – Método del filtro de membrana / Difracción de rayos X". 2006.