

# DESARROLLO DE SISTEMAS DE MOLDEO “ARENA-AGLOMERANTE” SOSTENIBLES Y DE BAJAS EMISIONES, PARA LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN



Figura 1. Principales emisiones de agentes químicos y contaminantes característicos de los procesos de moldeo orgánicos de fundición.

**E**l moldeo en arena representa el proceso más tradicional y ampliamente utilizado en fundición. La producción de los moldes es resultado de la compactación de la arena con un aglomerante, que forma una cavidad interna con la forma de la pieza metálica a fabricar tras el vertido y la solidificación del caldo. En todas las etapas del proceso de fundición donde está presente la arena, que incluyen las operaciones de 1) preparación de las mezclas de arena y moldeo, 2) colada y enfriamiento del caldo y 3) desmoldeo y recuperación de la arena, las emisiones contaminantes tienen un peso muy importante a la vez de preocupante, debido a la peligrosidad y riesgos sobre la salud asociados a los distintos agentes que se pueden generar.

La problemática ambiental es más acuciante en los procesos de moldeo que emplean aglomerantes orgánicos, donde además de las emisiones de finos y de sílice cristalina respirable (SCR) derivadas de las arenas de sílice, se generan una diversidad de compuestos orgánicos volátiles (Benceno-Tolueno-Xileno (BTX), formaldehido, alcohol furfurílico (AF), fenol, ...). A éstas hay que

sumarles las emisiones de gases de combustión que se generan durante la colada y solidificación de las piezas (Co, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, ...).

En el marco del proyecto CIRCOM, financiado con fondos de la convocatoria de Colaboración Público Privada 2021 (CPP2021-008798), del cual es socio el Centro de Investigación Metalúrgica AZTERLAN, las principales líneas de trabajo han estado centradas en desarrollar un sistema “arena-aglomerante” alternativo, con el propósito de mejorar las condiciones ambientales de la fundición.

Por una parte, el desarrollo de un material de moldeo procedente de la valorización del residuo de escoria negra de acería, un material exento de sílice libre en composición y por tanto de interés, desde el punto de vista de la eliminación de las emisiones de sílice cristalina respirable.

Por otra parte, el desarrollo de un aglomerante de naturaleza inorgánica (geopolímero) basado en la tecnología de activación alcalina (TAA), en el que como precursor sólido se utiliza igualmente escoria negra de acería debidamente tratada y seleccionada. En este caso, el beneficio ambiental

que se persigue es la reducción de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COVs).

Ambos desarrollos tienen como denominador común la búsqueda de nuevas rutas de valorización a la escoria negra de acería, principal residuo generado por la industria siderúrgica, un sector catalogado como de los más significativos en cuanto a impactos ambientales, por sus grandes consumos de materiales, energías no renovables y generación de residuos. Ello hace que la contribución ambiental del proyecto CIRCOM sea doble: incrementar la sostenibilidad y mejorar las condiciones ambientales en dos procesos productivos relevantes y con altas necesidades de mejora, el sector del Acero y el de Fundición.

### Características básicas de las arenas siderúrgicas

Las escorias negras están compuestas mayoritariamente por Fe, Ca, Si y Al, presentes en las principales fases mineralógicas, como son Westita ( $FeO$ ), Larnita ( $2CaOSiO_2$ ), Gehlenita ( $Ca_2Al_3SiO_7$ ), Brownmillerita [ $Ca_2(Al,Fe_3^+)_2O_5$ ]. Térmicamente destacan su alta conductividad térmica (1.7-1.3 W/mK) y similitud del calor específico (860-1000J/Kg) con respecto a la arena de sílice. El punto de fusión es elevado aunque algo inferior a la sílice (1.590 °C). Estas características térmicas y químicas convierten este material en buen candidato para aplicaciones de moldeo en fundición, no sólo como arena sino para el desarrollo de un material ligante basado en la TAA.

Para cada una de las aplicaciones, las escorias han sido tratadas y transformadas en los tamaños granulométricos necesarios, de cara a evaluar las aptitudes de uso en cada caso; tamaños de 500-125 micras para arenas de moldeo y tamaños muy finos <125 micras para la TAA.

### Diseño de las mezclas “arena-aglomerante”

Con el propósito de evaluar las prestaciones técnicas de los dos materiales desarrollados a base de escoria de acería (arena siderúrgica y

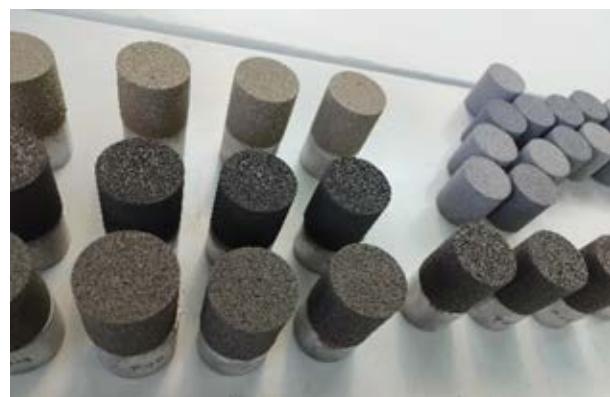


Figura 2. Probetas 50x50mm basadas en distintas mezclas “arena-ligante” para el ensayo de rotura a compresión.

geopolímero), se diseñaron distintas mezclas “arena/ligante” frente al sistema convencional (mezcla patrón) utilizado y seleccionado para el estudio por la fundición socia del proyecto RF&C (REINOSA FORGINGS&CASTINGS). Como resultado se seleccionaron 4 combinaciones de interés en las proporciones de los componentes, que permiten alcanzar similares especificaciones técnicas en frío que el patrón, en cuanto a resistencias a compresión y valores de permeabilidad se refiere, a las 24h y 48h de la preparación de las mezclas. En el caso concreto de la arena siderúrgica, el consumo de aglomerante, tanto en mezclas de cemento como de geopolímero, es menor al requerido por la arena de sílice para la obtención de las mismas propiedades.

En la siguiente Tabla 1 se recogen las cuatro combinaciones de mezclas “arena-ligante” seleccionadas para analizar las cualidades y prestaciones técnicas, frente al proceso de fundición y la consiguiente calidad del metal solidificado.

### Estudio de compatibilidad molde-metal

El equipo de CIRCOM ha desarrollado un método específico con el fin de evaluar la resistencia térmica, el comportamiento frente al caldo, las posibles reacciones molde-metal y la calidad del

| PROBETAS                | Sílice (%) | Siderúrg. (%) | Escoria < 160 $\mu m$ (%) | Cemento (%) | Geopolímero (%) | Agua (%) |
|-------------------------|------------|---------------|---------------------------|-------------|-----------------|----------|
| Sílice-cemento (patrón) | DC*        | ---           | ---                       | DC*         | ---             | DC*      |
| Siderúrgica-cemento     | ---        | 85,10         | ---                       | 9,36        | ---             | 5,54     |
| Sílice-geopolímero      | 85         | ---           | 10                        | ---         | 5               | ---      |
| Siderúrgica-geopolímero | ---        | 92,3          | ---                       | ---         | 3,85            | 3,85     |

Tabla 1. Composición de las 4 mezclas “arena-aglomerante” seleccionadas para el estudio. \*Dato confidencial de RF&C.

metal solidificado, en contacto con cada una de las cuatro mezclas de moldeo “arena-ligante” seleccionados (*Tabla 1*).

El método de ensayo ha consistido en la preparación de moldes diseñados para la colocación de 6 machos del tamaño y geometría de las probetas oblongas (22,4 x 22,4 x 170 mm) utilizadas para ensayar mezclas de arenas. De cada mezcla “arena-ligante” se fabricaron tres probetas y a la mitad de cada una de ellas se les aplicó pintura refractaria de zirconio, con el fin de evaluar el efecto de este recubrimiento sobre la calidad superficial de la pieza. La siguiente *Figura 3* muestra los dos moldes fabricados por medio de un sistema aglomerante tradicional y las 12 probetas test preparadas por las 4 mezclas aglomerantes objeto de evaluación, pintadas hasta la mitad.

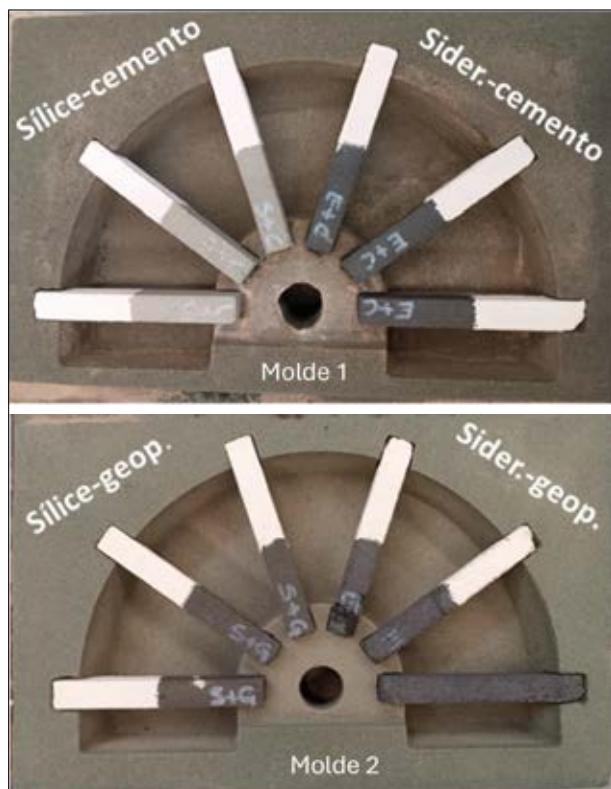


Figura 3. Probetas test (mitad pintada/sin pintar) colocadas en los moldes.

Ambos moldes fueron colados a una temperatura del acero de 1.650 °C en la planta de piloto de fundición Azterlan. Todas las mezclas describieron buen comportamiento y resistencias frente a la temperatura del caldo y tiempos habituales de enfriamiento. Tras la solidificación, se realizó una evaluación visual y una inspección microscópica de la calidad superficial del acero que había estado en contacto con cada mezcla “arena-ligante”, tanto en la sección pintada como en la no pintada. En todos los casos se observó que las zonas metálicas solidificadas al contacto de las secciones pintadas de las probetas presentan mejor acabado superficial (*Figura 4*). Por otro lado, las mezclas aglomeradas con geopolímero muestran muy alta resistencia frente al desarenado, resultando muy complicadas de desmoldear manualmente.

El análisis más detallado de la interfaz macho-metal se llevó a cabo por microscopía electrónica de barrido (SEM) tras el granallado de las piezas, lo que permitió analizar y determinar la posible penetración de la arena en el metal como indicador del grado de interacción entre ambos materiales. La Figura 5 presenta las medidas de penetración en el acero obtenidas para cada mezcla y la Figura 6 muestra las imágenes SEM de la interfaz macho-metal correspondientes a las mezclas patrón “sílice-cemento” y “sílice-geopolímero”. Esta última mezcla se caracteriza por presentar los menores valores de penetraciones, incluso inferiores a la mezcla patrón. Los valores mejorados se aprecian tanto en la sección con pintura y sin pintura.

El estudio concluye que las probetas de arena no pintadas presentan mayor reacción macho-metal y peor acabado superficial que las probetas pintadas, dado que la pintura reduce la interacción con el metal. Las mezclas con geopolímero muestran menor penetración que las mezclas de cemento y la arena siderúrgica es más reactiva con el metal fundido que la arena de sílice, puesto que se aprecian mayores inclusiones y porosidades en la superficie del metal.

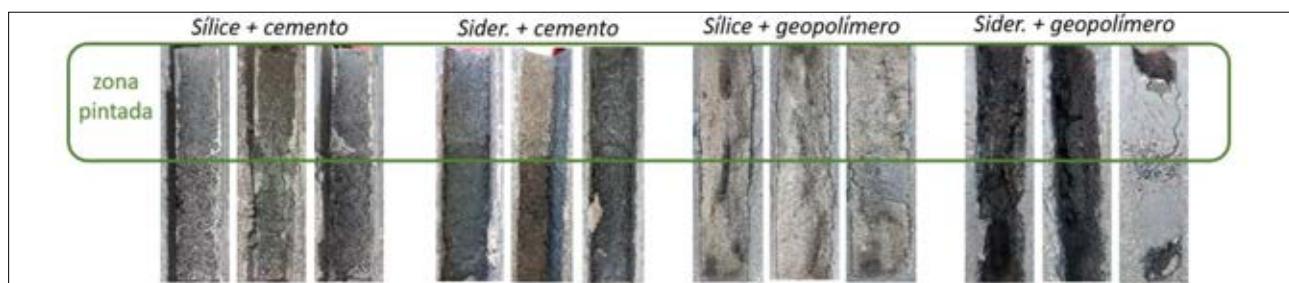


Figura 4. Aspecto visual de la superficie del metal solidificado al contacto de las distintas mezclas “arena-ligante”.

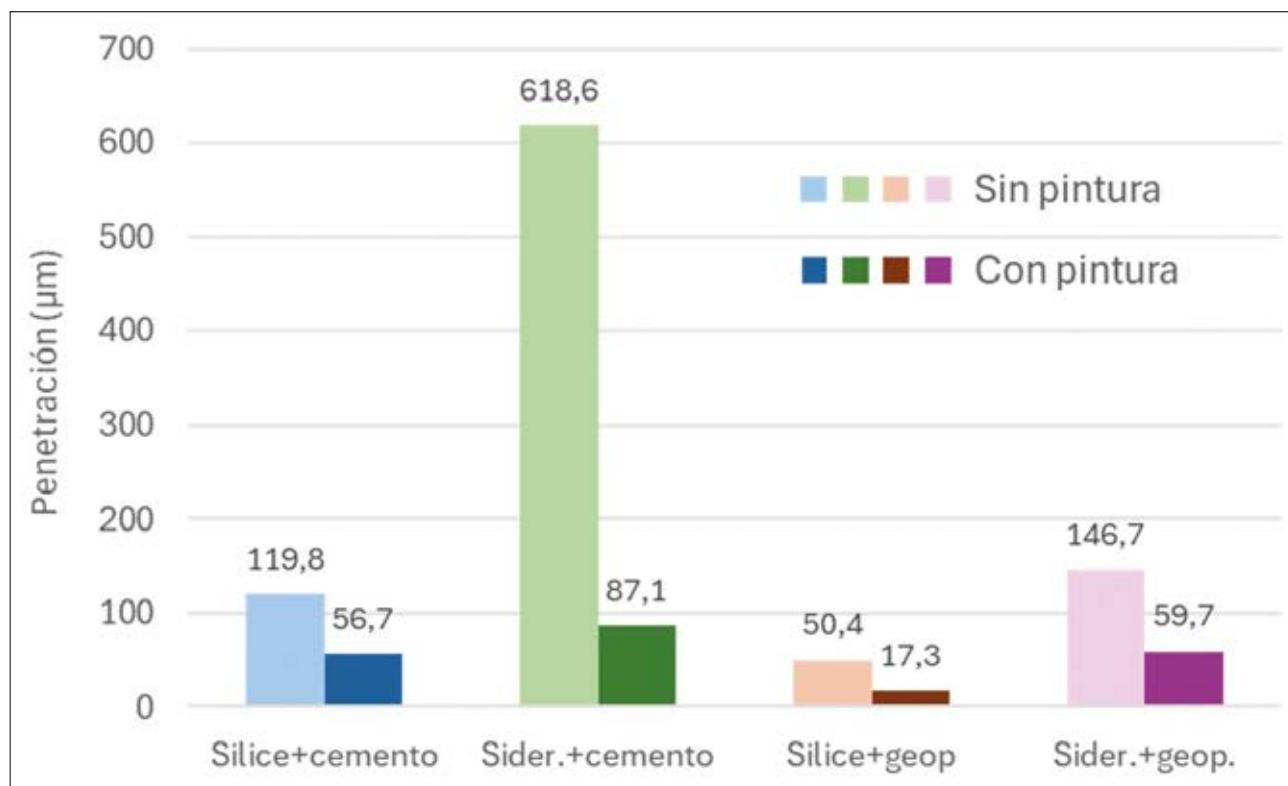


Figura 5. Medidas de penetración de cada mezcla “arena-ligante”.

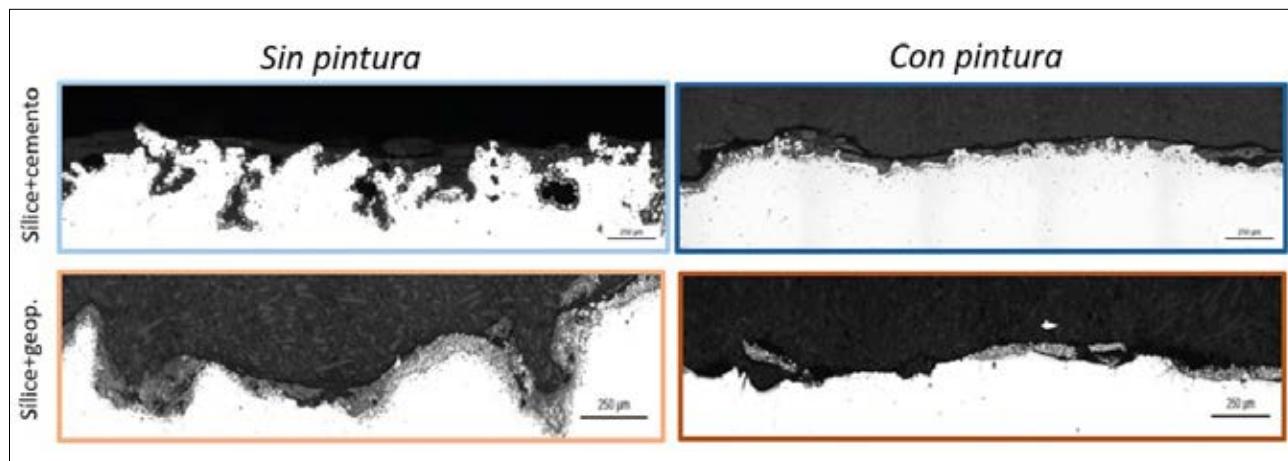


Figura 6. Imágenes SEM de la interfaz macho-metal de la mezcla patrón (azul) y la mezcla sílice + geopolímero (marrón).

El análisis de inclusiones en todos los casos corresponde a óxidos de cromo, hierro, calcio y

silicio (Figura 7), y la cantidad de éstas aumentan en el caso de las secciones no pintadas de las probetas.

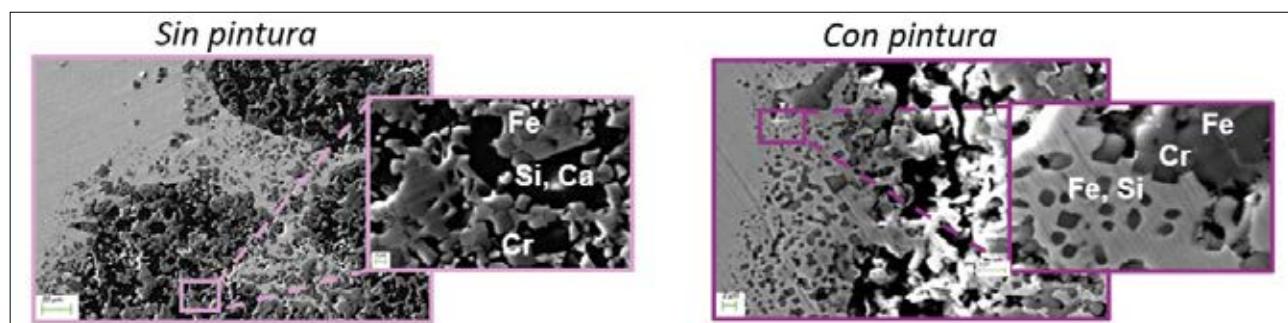


Figura 7. Imágenes SEM de las inclusiones en la mezcla arena siderúrgica + geopolímero, representativas de las observadas en todas las formulaciones.

## Estudio de emisiones de los distintos aglomerantes

Con el objetivo de evaluar y verificar la reducción del impacto de las emisiones asociadas al nuevo aglomerante “geopolímero”, se realizaron muestreos específicos para determinar y comparar el perfil de las emisiones generadas por el nuevo ligante “geopolímero” y los dos tipos de ligante habitualmente empleados en RF&C; el cemento y el sistema furánico.

Los ensayos se realizaron durante el proceso de colada de acero líquido en moldes fabricados con arena de sílice y aglomerados por cada uno de los tres sistemas aglomerantes, y mediante el confinamiento del proceso y de las emisiones por medio de una caja metálica cerrada. En esta configuración, los gases emitidos se dirigen mediante un sistema de tuberías, donde se acoplan los distintos equipos de muestreo y de medida

de los agentes contaminantes generados (*Figura 8*).

Los contaminantes analizados incluyen compuestos orgánicos volátiles como Benceno-Tolueno-Xileno (BTX), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), fenol, formaldehido y gases de combustión. La *Figura 9* muestra los resultados obtenidos para cada tipo de aglomerante.

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema orgánico furánico presenta niveles significativamente más altos de emisiones de BTEx, PAHs, así como de gases de combustión de monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOx) en comparación con los sistemas inorgánicos de cemento y geopolímero. Las concentraciones de fenol fueron muy similares en los tres sistemas analizados, y apenas se detectaron emisiones de formaldehido en los tres casos.



Figura 8. Procedimiento experimental en la Planta Piloto de Fundición de AZTERLAN y molde fabricado para la medición de emisiones.

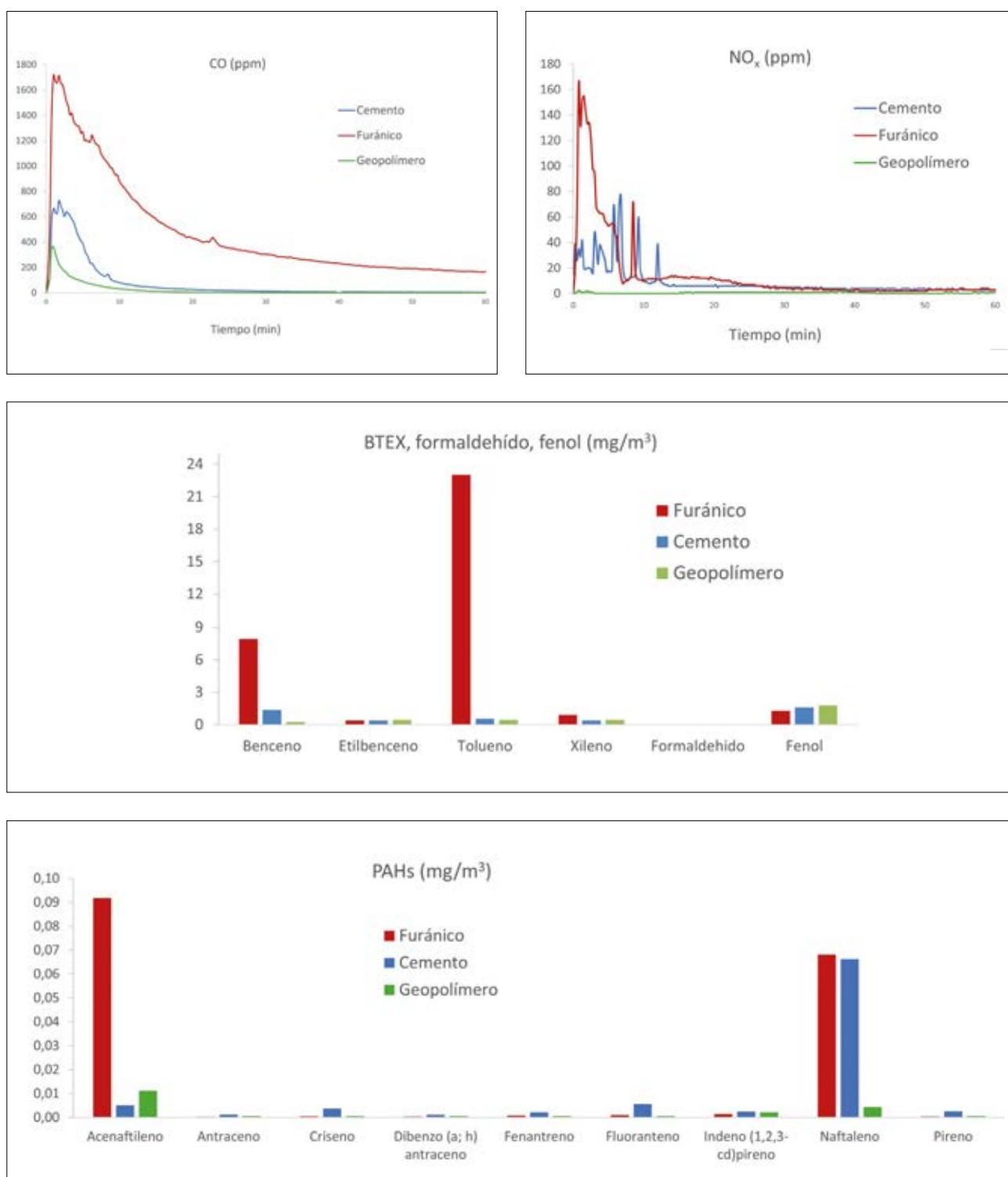


Figura 9. Emisiones de los distintos contaminantes para cada tipo de aglomerante.

Este estudio del comportamiento ambiental de los aglomerantes resalta el potencial del geopolímero como alternativa más sostenible en aplicaciones de moldes de fundición, siendo su perfil de emisiones mejorado con respecto al del cemento en contaminantes como CO, NOx y Naftaleno.

*Por Lucía Unamunzaga<sup>1</sup>, Claudia Pérez<sup>1</sup>, Lorena Freire<sup>2</sup>, Carolina Ramos<sup>3,x</sup>.*

<sup>1</sup>AZTERLAN Centro de Investigación Metalúrgica.

<sup>2</sup>Centro Tecnológico AIMEN.

<sup>3</sup>REINOSA Forging & Castings.

CONSORCIO:



FINANCIACIÓN:

