

## AVANCES EN LA INTRODUCCIÓN DE AGLOMERANTES INORGÁNICOS EN FUNDICIÓN DE HIERRO

### Proyecto LIFE GREEN CASTING



#### El proceso de moldeo

El proceso de fabricación mediante moldeo en arena es un proceso muy versátil que permite la fabricación de piezas de diferentes materiales y aleaciones, como aleaciones de hierro (fundición gris, nodular y acero), aluminio y cobre, permitiendo una gran flexibilidad de diseño y una elevada calidad a un coste competitivo.

El moldeo en arena permite al diseñador una gran flexibilidad, pues le ofrece la posibilidad de obtener piezas de formas complicadas, cercanas a la forma final deseada, lo que reduce notablemente las operaciones de mecanizado, con las características mecánicas y físico-químicas deseadas, desde unos pocos gramos hasta más de 100 toneladas, permitiendo realizar tanto piezas unitarias o series cortas como grandes series.

Para la fabricación de piezas mediante moldeo en arena es necesario fabricar un molde, que es una reproducción en negativo de la pieza que queremos obtener, con las creces y los sistemas de alimentación y mazarotaje necesarios. Este molde se fabrica a partir del modelo y, una vez terminado, pintado si fuese necesario, colocados

los machos y accesorios y cerrado, será llenado completamente con el metal líquido y se dejará enfriar. Una vez frío, el molde se destruye para extraer la pieza de su interior, que será sometida a diferentes procesos de eliminación de los sistemas de alimentación, limpieza, repasado, tratamiento térmico, etc, hasta obtener la pieza con la forma y características mecánicas deseadas.

Para la fabricación del molde de arena se utilizarán diferentes tipos de arena (como arena de sílice, cromita, olivino o zirconio), cuyos granos estarán sueltos y será necesario aglomerarlos y unirlos sobre el modelo, para así obtener el molde con la forma en negativo de la pieza, suficientemente resistente para que pueda recibir y soportar el paso y la presión del metal fundido. Pero estos moldes deben, a su vez, tener plasticidad suficiente para permitir la contracción de las piezas durante su solidificación y enfriamiento y, una vez solidificado y frío el metal, deben colapsar con facilidad para permitir extraer la pieza. Según la precisión deseada, el número de piezas a realizar, el tamaño de las mismas y su complejidad se seleccionará el material y el proceso de moldeo.

A fin de garantizar un óptimo cumplimiento de su función, las arenas utilizadas en moldeo y su sistema de aglomeración deben tener una serie de propiedades que pueden ser contradictorias entre sí, y la fundición debe controlar frecuentemente las mismas. Entre otras destacan:

- **Refractariedad** para soportar la alta temperatura del metal que, en algunos casos, como en la fundición de acero, puede estar a más de 1600°C;
- **Resistencia a la compresión** que permita soportar el peso y la presión del metal líquido,
- **Permeabilidad** para facilitar la salida del aire que ocupa el molde, así como de los gases y vapores que se forman cuando se vierte el metal caliente dentro del molde,
- **Fluidez**, para permitir que la arena fluya hacia detalles intrincados y rincones estrechos sin procesos o equipos especiales y, de esta forma, poder fabricar piezas de forma compleja.
- **Cohesión**: capacidad de la arena de conservar una forma determinada después de separar el molde del modelo.
- **Plasticidad**: La plasticidad del molde de arena facilita que este se deforme ligeramente durante la solidificación y enfriamiento del metal fundido. Esta capacidad de deformación plástica permite que el molde se adapte a la contracción del metal, evitando así la generación de tensiones internas en la pieza.
- **Colapsabilidad**: La capacidad del molde de arena para desintegrarse o deshacerse fácilmente después de que la pieza fundida se ha solidificado y enfriado, y permitiendo extraer la pieza sin dañarla.
- **Facilidad de recuperación**, para reducir el consumo de arena y reducir la eliminación en vertedero de la arena ya utilizada.
- **Sostenibilidad**: respeto con la salud de los trabajadores y el medio ambiente.
- Y todo ello a un **coste competitivo**.

Como aglomerantes, para unir los granos sueltos de arena y conseguir un molde y los machos o núcleos con las características deseadas, se utilizan diferentes procesos, como el moldeo en verde, donde la arena se aglomera con agua, bentonita (un tipo de arcilla) y agua, o diferentes tipos de aglomerantes orgánicos e inorgánicos, que utilizan diversos tipos de resinas y catalizadores que, al mezclarse con arena, reaccionan entre sí para conseguir el endurecimiento del molde, en caliente o a temperatura ambiente.

Para la fabricación de los moldes y de los machos se pueden utilizar diferentes métodos manuales o mecanizados, con un mayor o menor grado de automatización, partiendo el molde en vertical u horizontal, y pudiendo utilizar, para fabricar el mismo molde, diferentes tipos de arena y de aglutinantes, lo que complica el proceso de fabricación y posterior recuperación de la arena ya utilizada.

### Aglomerantes orgánicos

Los aglomerantes orgánicos son utilizados masivamente en la industria de la fundición para la fabricación de moldes y machos, por las ventajas de versatilidad, pues se pueden utilizar en la fabricación de moldes para una amplia variedad de aleaciones y procesos de fundición, y permiten obtener, de forma consistente, moldes con buena resistencia mecánica, elevada permeabilidad, muy buena colapsabilidad, facilidad de uso y con un buen acabado superficial y precisión dimensional.

Sin embargo, presentan inconvenientes, principalmente la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y otros gases durante la fabricación de los moldes y machos, el llenado de los moldes con la aleación líquida caliente y finalmente, durante el enfriamiento y desmoldeo de las piezas fabricadas, lo que supone un riesgo sobre la salud de los trabajadores y un mayor impacto ambiental <sup>[1]</sup>. Además, los aglomerantes orgánicos son en general más caros que los aglomerantes inorgánicos.

Estas emisiones no sólo representan un riesgo potencial para la salud de los trabajadores expuestos, sino que también plantean desafíos significativos en términos de cumplimiento normativo ambiental y gestión de la calidad del aire en el entorno laboral.

La industria de la fundición se enfrenta así al reto de equilibrar las propiedades técnicas favorables de estos aglomerantes con la necesidad imperante de adoptar prácticas más sostenibles y seguras en sus procesos productivos.

### Aglomerantes inorgánicos

Por su parte, los aglomerantes inorgánicos, especialmente los basados en silicatos de sodio, están ganando relevancia y representan una alternativa prometedora para la industria de la fundición como una alternativa más sostenible a los aglomerantes orgánicos tradicionales. Estos

compuestos, al carecer de carbono en su estructura molecular, ofrecen una serie de ventajas en términos de seguridad y medio ambiente.

Entre las ventajas de los procesos inorgánicos destacan las mejores condiciones de trabajo, al no emitir compuestos orgánicos volátiles durante la fabricación de los moldes, machos y su posterior colada; menor porosidad por gas en las piezas fundidas debido a la reducción de emisiones de gases, buena precisión dimensional y los residuos de arena tienen una menor carga contaminante. En el marco del proyecto GREENCASTING se han testeado diferentes aglomerantes inorgánicos con arena de sílice y cromita, teniendo en ambos casos un resultado positivo.

El mejor comportamiento ambiental afecta, en particular, a parámetros como el volumen de gases emitidos, con especial énfasis en la reducción del contenido de sustancias de los grupos BTEX (Benceno, tolueno, etilbenceno y xileno), HAP, fenol, formaldehído, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y COV totales, así como el material particulado (PM 10, PM 2,5). Por otro lado, las arenas tras el desmoldeo presentan menos carga contaminante, reduciendo su concentración en un 90% respecto a las arenas con resina orgánica.<sup>[1]</sup>

Sin embargo, los aglutinantes inorgánicos tienen algunos inconvenientes, como la obtención de moldes más rígidos y, por tanto, con menor plasticidad y colapsabilidad, lo que dificulta la fabricación en piezas de geometría compleja y hace más difícil el proceso de desmoldeo y extracción de la pieza; son sensibles a la humedad y son, en general, menos versátiles. Las arenas aglomeradas con aglomerantes inorgánicos pueden ser recuperadas con métodos termo-mecánicos.

La adopción de sistemas de aglutinantes inorgánicos requiere un análisis exhaustivo del proceso de producción actual, así como una planificación metódica para abordar las potenciales modificaciones necesarias. Este proceso requiere de una evaluación cuidadosa de los procesos de moldeo y de la geometría de las piezas a fundir, la adaptación de equipos de fabricación, la modificación de los procedimientos de trabajo y el ajuste e, incluso, la renovación de los equipos de preparación y recuperación de arena.

### Recuperación y vertido

La fabricación de piezas mediante moldeo en arena requiere de un elevado consumo de arena, por lo que es necesario recuperar la arena en la mayor cantidad posible, evitando tanto el coste de

la compra de arena nueva como la saturación de los vertederos y el coste asociado.

En el marco de este proyecto GREENCASTING se han realizado pruebas de recuperación de arena aglomerada inorgánicamente, encontrándose que los sistemas de aglomerado inorgánico permiten una fácil recuperación, por vía termo-mecánica, con un porcentaje de aprovechamiento de hasta un 80%, llegándose incluso a fabricar moldes con un 100% de arena recuperada que había sufrido un único ciclo de recuperación, con resultados aceptables. De todas formas, teniendo en cuenta la arena que se pierde en el desmoldeo y en el proceso de recuperación, en forma de finos y granzas, difícilmente se conseguirán a largo plazo porcentajes superiores al 80%.

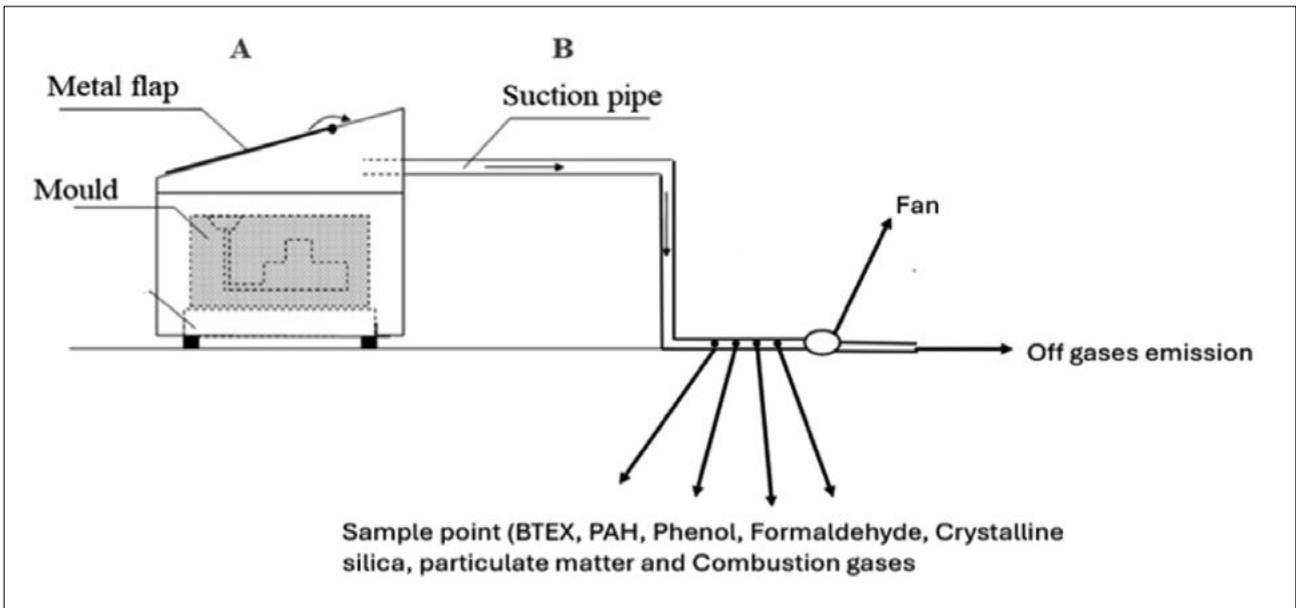
Y, por último, se han realizado caracterizaciones de la arena residual, que ya no es susceptible de ser aprovechada en la fundición, siendo clasificada como residuo "NO PELIGROSO", por lo que resulta admisible por los vertederos para residuos no peligrosos de tipo B1b y de tipo B3 y, más interesante aún, por su bajo contenido en materia orgánica 0,401%, y un Carbono Orgánico Total COT<0,2%, puede ser aprovechada como agregado secundario en construcción; para la fabricación de cementos o de ladrillos, entre otras posibles aplicaciones.

### Estudios en planta piloto

Con el objetivo de comparar las emisiones del sistema aglomerante inorgánico (base sodio-silicato) con los sistemas de moldeo en verde y orgánicos (furánico, fenólico-uretano, fenólico alcalino), se efectuaron ensayos a escala piloto en las instalaciones de FUNDACIÓN AZTERLAN. Para ello se emplearon nueve configuraciones distintas de moldes y machos. La cuantificación de emisiones se realizó mediante ensayos en cámara cerrada, diseñada ad hoc para el proyecto GREENCASTING., donde se coló acero líquido en los moldes con macho. Se midieron las siguientes emisiones: BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos), HAP (hidrocarburos aromáticos policíclicos), Fenol, Formaldehído, Partículas y sílice cristalina y Gases (CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>). Este entorno controlado minimiza la influencia de factores externos, permitiendo:

- Comparaciones directas entre los distintos sistemas de moldeo.
- Evaluaciones más precisas del impacto ambiental de cada sistema.

El uso de la cámara cerrada garantiza un alto grado de reproducibilidad y control experimental, mejorando la fiabilidad de los datos obtenidos.



Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

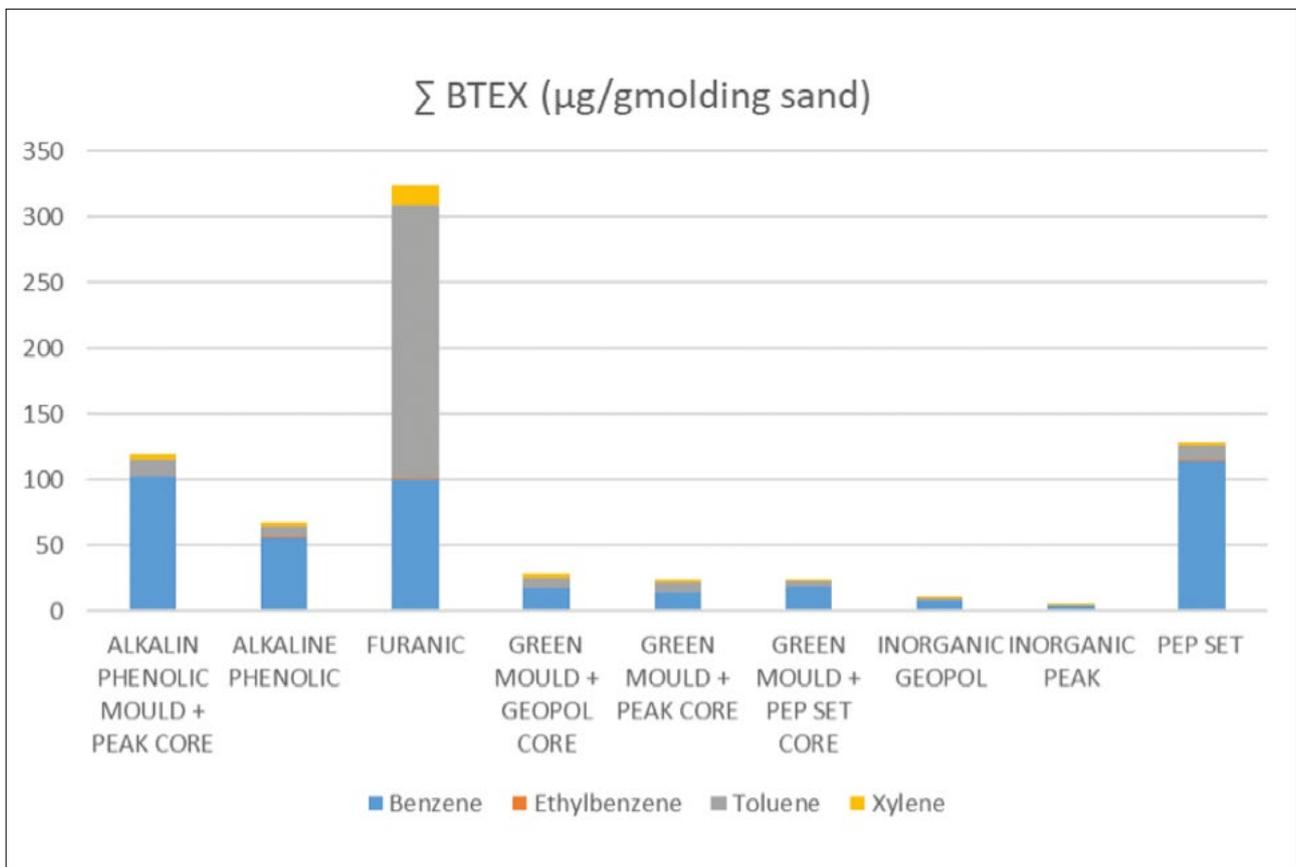
- Los sistemas inorgánicos redujeron las emisiones de BTEX en un 65-71% en comparación con la arena verde, y superaron el 90% de reducción frente a los aglomerantes orgánicos.
- El benceno constituyó el componente predominante de BTEX (>60%) en la mayoría de los sistemas.
- Los aglomerantes inorgánicos exhibieron una disminución superior al 98% en la emisión de material particulado en comparación con los sistemas orgánicos furánico y fenólico uretano
- Los sistemas orgánicos generaron mayores emisiones de NOx y SO2, mientras que los de arena verde y furánicos presentaron las mayores emisiones de CO.
- En cuanto a HAP, los aglomerantes inorgánicos lograron reducciones superiores al 94% frente a los orgánicos y más del 90% en comparación con la arena verde.

Estos resultados demuestran las ventajas ambientales significativas de los aglomerantes inorgánicos en aplicaciones de fundición, logrando reducciones sustanciales en diversos contaminantes atmosféricos.



### Estudios en planta real

Para contrastar los resultados obtenidos en los estudios en planta piloto, se realizaron mediciones en las instalaciones de Metalúrgica Madrileña S.A., donde se fabricaron diversas piezas con moldes realizados mediante proceso inorgánico, que se fundieron con acero líquido, realizándose mediciones de emisiones obteniéndose los siguientes resultados:

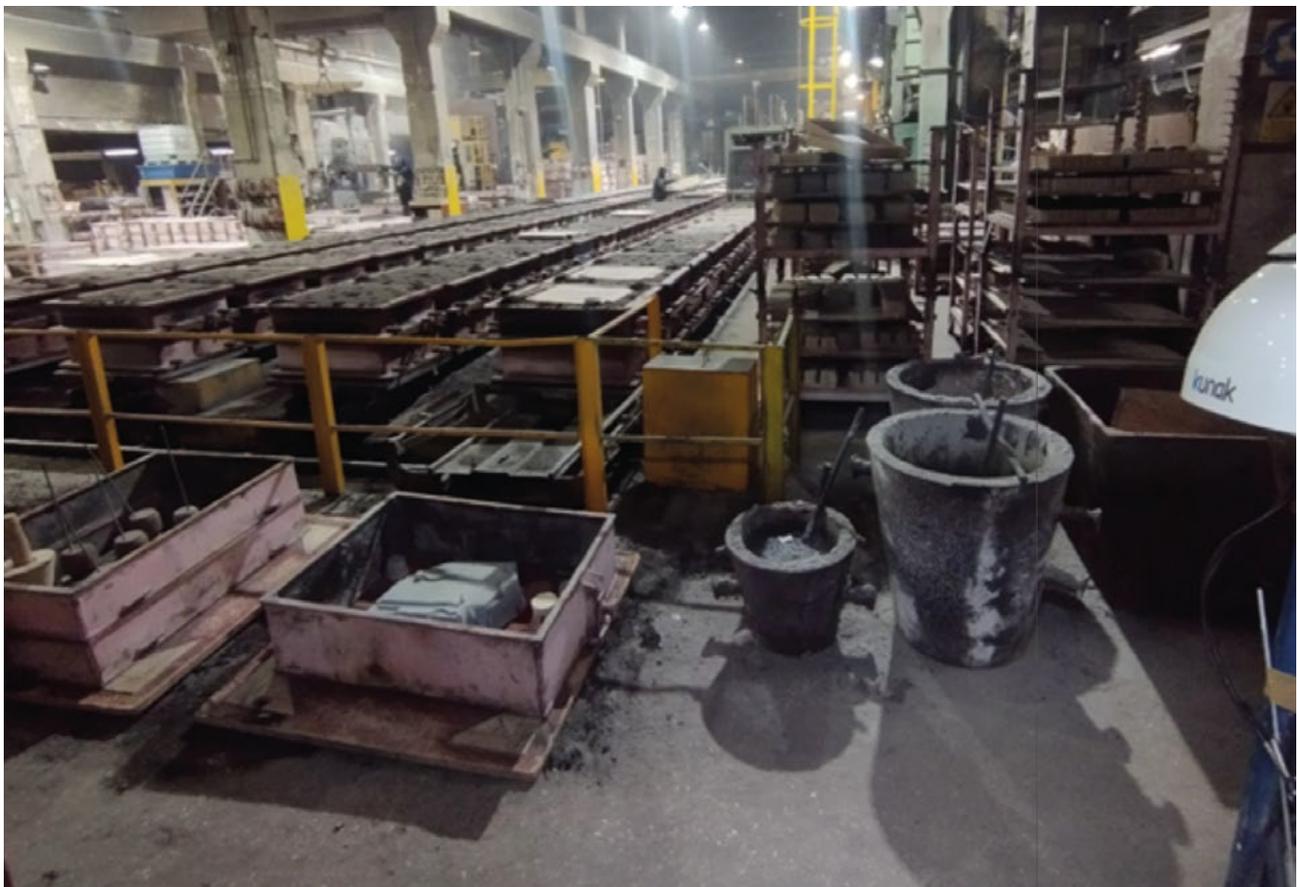


MOULDING			
	Formaldehyde	Cristalline silica	Particles
Lab result (µg)	0,77	13	<100
Concentration	<0,04	0,05	<0,41
Limit value Spain 8h (mg/m <sup>3</sup> )	0,37	0,05	fracción inhalable 10 fracción respirable 3
Limit value Spain 15 min (mg/m <sup>3</sup> )	0,74	-	-

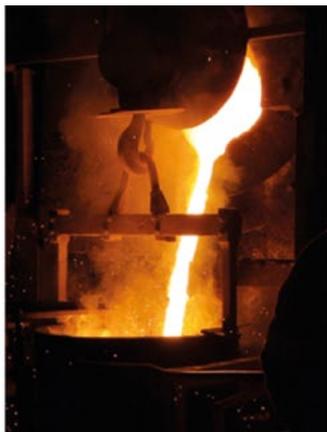
POURING								
	Bencene	Etilbencene	Toluene	m-xilene	o-xilene	p-xilene	Cristalline silica	Particles
Lab result (µg)	3	5	5	5	5	5	4,7	<100
Concentration	0,17	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,02	<0,46
Limit value Spain 8h (mg/m <sup>3</sup> )	3,25	441	192	221	221	221	0,05	fracción inhalable 10 fracción respirable 3
Limit value Spain 15 min (mg/m <sup>3</sup> )	-	884	384	440	440	440	-	-

Se hicieron mediciones de otros parámetros medioambientales, dando en todos los casos por debajo de los límites legales establecidos.

Donde se pone de manifiesto que los valores obtenidos mediante el empleo de aglomerantes inorgánicos son muy inferiores a los límites establecidos por la legislación en España.



Ubicación de los modelos y el equipo de medición.



Diferentes fases del proceso de producción: moldeo, fundición y colada.

## Proyectos LIFE <sup>[2], [3]</sup>

LIFE (L'Instrument Financier pour l'Environnement') es un instrumento financiero de la Unión Europea (UE) que apoya proyectos de conservación de la naturaleza y del medio ambiente en toda Europa. Su objetivo es contribuir a la aplicación de la política medioambiental de la UE y alcanzar los objetivos establecidos en diversas directivas medioambientales de la UE. Desde 1992 se han aprobado más de 970 proyectos LIFE en España y 5.500 en toda la UE.

## Proyecto LIFE GREEN CASTING

El proyecto LIFE GREEN CASTING tiene como objetivo demostrar la viabilidad técnica y ambiental del uso de nuevos aglutinantes inorgánicos, en lugar de los orgánicos tradicionales, en fundiciones de hierro y acero, permitiendo una reducción en la liberación a la atmósfera de compuestos peligrosos (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>2,5</sub>, HAP, BETX, etc.), reduciendo notablemente o incluso eliminando la exposición de los trabajadores a este riesgo, y evitando sus emisiones en áreas industriales y urbanas, contribuyendo a la mejora de la calidad del aire en zonas industriales.

La introducción de aglomerantes inorgánicos permitirá además reducir los residuos de arena contaminada que van los vertederos, permitiendo una mayor recuperación y que las arenas que finalmente son desechadas tengan una carga contaminante mucho menor, lo que facilitará su uso en aplicaciones de reutilización externa.

La sustitución de los aglomerantes orgánicos por inorgánicos requiere de una cuidadosa planificación, que aborde y plantee soluciones para los desafíos técnicos que supone este cambio. En el proyecto GREEN CASTING LIFE, 6 fundiciones de España, Polonia, Estonia,

Finlandia e Italia, de hierro y acero, heterogéneas y complementarias, se han unido al consorcio para implementar la sustitución de los aglomerantes orgánicos por inorgánicos en su proceso productivo, lo que implica cambios importantes que comienzan con la selección del sistema inorgánico adecuado, cambios en los procesos e inversiones en nuevos equipos. Al mismo tiempo, se demostrarán diferentes métodos de recuperación de arena y se estudiarán aplicaciones de reutilización externa.

Con base en los resultados obtenidos se obtendrá un nivel de conocimiento que permitirá estudiar su posible aprobación como mejores técnicas disponibles (BAT) que permitirán disponer de procesos y productos más sostenibles.

## Conclusiones

El uso de aglomerantes inorgánicos para la fabricación de piezas fundidas mediante moldeo en arena aglomerada químicamente tiene un nivel de impacto ambiental y sobre la salud de los trabajadores, derivado de la emisión a la atmósfera de compuestos peligrosos, muy inferior a la fabricación de los moldes y machos mediante aglomerantes orgánicos, con una reducción de casi el 90% en alguno de los parámetros evaluados, e inferiores a los establecidos por la legislación vigente, tanto en laboratorio como luego en planta real.

Los moldes obtenidos mediante aglomerado inorgánico tienen, en comparación con los aglomerantes orgánicos, propiedades similares e incluso mejores, con alguna dificultad por su mayor rigidez y menor colapsabilidad, pero que no es impedimento para su utilización en la mayor parte de las piezas. Tan solo la fabricación de huecos angostos puede requerir el uso de

machos aglomerados orgánicamente, que permitan un buen desarenado, pero con un peso prácticamente nulo en comparación con el peso total del molde.

La arena aglomerada inorgánicamente se puede recuperar por vía termo-mecánica, pudiendo fabricar moldes con hasta un 100% de arena recuperada sin afectar a la calidad de las piezas, aunque con las pérdidas de arena en todo el proceso, se alcanzan tasas de recuperación del orden de un 80%, y la arena residual tiene una carga ambiental mucho menor, pudiéndose utilizar para otros usos, como la fabricación de cemento o de ladrillos, aspecto que deberá ser desarrollado.

Sin embargo, la implementación de estos procesos requiere de inversiones en equipos y de pruebas cuidadosas, así como de la colaboración de entidades de diferente tipo, además de fundiciones que produzcan diferentes tipos de piezas, los fabricantes de resinas y centros de investigación. Es aquí donde los proyectos LIFE de la Unión Europea han jugado un papel fundamental.

**Financiación**

Este proyecto y las investigaciones asociadas están financiada por el proyecto GREEN CASTING LIFE. El proyecto GREEN CASTING LIFE está cofinanciado por el programa LIFE de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención LIFE21-ENV-FI-10107443.

**Nota:**

Las opiniones y puntos de vista expresados son únicamente los de los autores y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea o CINEA. Ni la Unión Europea ni la autoridad que concede la subvención pueden considerarse responsables de ellos.

Metalúrgica Madrileña SA y la Fundación Azterlan forman parte del Consortium of Green Casting LIFE project.



**Autores:** David Valle (a), Erika Garitaonandia (b), Javier Abello (a) y Ramón Domínguez (a)  
 (a) Metalúrgica Madrileña, S.A.  
 (b) Azterlan | Centro de Investigación Metalúrgica

**REFERENCIAS**

- [1] Angelika Kmita et al. Eco-Friendly Inorganic Binders: A Key Alternative for Reducing Harmful Emissions in Molding and Core-Making Technologies; Int. J. Mol. Sci. 2024, 25, 5496.
- [2] European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency. LIFE Programme. [https://cinea.ec.europa.eu/programmes/life\\_en](https://cinea.ec.europa.eu/programmes/life_en)
- [3] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Programa LIFE de la Unión Europea: <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/servicios/ayudas-subvenciones/programa-life.html>



With the contribution of the LIFE programme of the European Union  
LIFE21-ENV-FI-10107443

**DURATION**

01/09/2022-28/03/2026  
42 months

**CONSORTIUM**

16 partners from  
8 countries

**BUDGET**

Total costs 7 162 398 €  
EU contribution 4 297 432 €

**TOWARDS ZERO EMISSIONS IN EUROPEAN FERROUS FOUNDRIES USING INORGANIC BINDER SYSTEMS**

**OBJECTIVES**

Green Casting LIFE aims to demonstrate the technical and environmental feasibility of using **INORGANIC BINDERS**, instead of traditional organic ones, in **FERROUS FOUNDRIES**.



Develop **tailor made inorganic binder** systems solutions



Demonstrate three different types of **sand reclamation methods**



Implement and validate inorganic binders in **six flagship foundries** from five European countries



Exploitation and replication; assist **15 selected foundries** in testing inorganic binders

**EXPECTED RESULTS**

Full scale **IMPLEMENTATION** and **DEMONSTRATION** of tailor-made inorganic binders in six flagship foundries in Europe by step-by-step implementation plan. Inorganic foundry **SAND RECLAIMABILITY AND REUSE** solutions. Piloting actions in 15 followers foundries.



Emission reduction by 80-90 % (VOC, PM, NOx, SO2...)



Training workshops in partner countries



Indoor air quality improvement by 70 % (CO, PM, phenols, formaldehyde...)



Feasible reclamation methods for each flagship foundries



**Coordinator**



Meehanite Technology Oy  
Sara Tapola  
Mobile +358 40 5518761  
Email: sara.tapola@ains.fi

**Partners**