

Procesamiento y Reciclado de Residuos de Arenas de Moldeo para la Recuperación de Sílice de  
Grado Refractario

Camilo H. Ricaurte Cortés

Trabajo de Grado para optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Isaías Andrés Rentería Rincón

Magister en Ciencia de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Ingeniería Metalúrgica

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

A mis padres Elsa y Hernando, por su amor incondicional su apoyo constante y por creer en mí incluso en los momentos más difíciles. Gracias por ser mi ejemplo más grande de fortaleza y por enseñarme que con esfuerzo y fe todo es posible, son lo más importante en mi vida.

A mis hermanos, mis sobrinas y mi sobrino, porque su cariño y alegría han sido mi mayor fuente de motivación para seguir adelante y convertirme en una mejor persona cada día.

Y a mis amigos y demás personas que hicieron parte de este camino, quienes siempre confiaron en mí y en mi sueño de convertirme en ingeniero de la prestigiosa Universidad Industrial de Santander.

Gracias por acompañarme en este camino y por ser parte de este logro que también les pertenece.

### **Agradecimientos**

A Dios, por otorgarme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para afrontar cada desafío y culminar con éxito esta importante etapa de mi vida académica.

A mis padres Elsa y Hernando, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser el ejemplo de esfuerzo, dedicación y fe que me ha guiado a lo largo de este camino. Su confianza en mi ha sido la base sobre la cual he construido cada logro.

A mi familia, hermanos, sobrinas, sobrino y cuñadas, por su comprensión, compañía y aliento permanente, especialmente en los momentos más exigentes de este proceso.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi director de proyecto Isaías Rentería, por su orientación, compromiso y valiosos aportes en cada etapa del desarrollo de este trabajo. Su guía fue determinante para la culminación exitosa de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander, por ser el espacio que me brindó las herramientas, los conocimientos y los valores necesarios para mi formación profesional y personal.

Finalmente, me agradezco a mí mismo por la determinación, la fortaleza y la resiliencia demostradas a lo largo de este camino; por no rendirme ante las múltiples adversidades y por hacer de este sueño una realidad.

Gracias.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	11
1 Objetivos.....	13
1.1 Objetivo General.....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2 Composición e impurezas de los Residuos de Arenas de Moldeo.....	13
2.1 Arenas de moldeo: composición y función.....	13
2.1.1 Arenas en Verde (Aglomeradas con Arcilla).....	14
2.1.2 Arenas con Aglomerante Químico.....	14
2.2 Residuos de Arenas de Moldeos.....	15
2.2.1 Composición Química e Impurezas Relevantes en las WFS.....	16
2.2.2 Impurezas inorgánicas.....	17
2.2.2.1 Óxidos metálicos.....	17
2.2.2.2 Contaminación por Metales Pesados.....	17
2.2.2.3 Arcillas Residuales.....	18
2.2.3 Impurezas Orgánicas y Residuos de Aditivos.....	18
2.3 Recuperación de sílice grado refractario.....	18
3 Métodos para la recuperación de Sílice a Partir de Residuos de WFS.....	21

3.1 Reclamación Mecánica.....	21
3.1.1 Reclamación Mecánica en Seco .....	21
3.1.2 Reclamación Mecánica en Húmedo .....	21
3.2 Métodos de Beneficio o Procesamiento .....	22
3.2.1 Separación Magnética.....	22
3.2.2 Flotación.....	22
3.2.3 Separación Gravimétrica.....	23
3.3 Métodos de Lixiviación Ácida.....	23
3.3.1 Ácido Sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ).....	24
3.3.2 Ácido Clorhídrico (HCl).....	24
3.3.3 Mezclas de Ácidos.....	24
3.3.4 Lavado Tríptico .....	24
3.4 Eliminación de Compuestos Orgánicos .....	25
3.4.1 Reclamación Térmica .....	25
3.4.2 Biorremediación .....	25
4 Propuesta de un Proceso de Beneficio para la Recuperación de Sílice Grado Refractario .....	26
4.1 Pretratamiento Biológico/Térmico.....	27
4.2 Reclamación Mecánica en Seco.....	27
4.3 Separación Magnética .....	28
4.4 Separación Gravimétrica .....	28

4.5 Descripción del Proceso por Etapas .....	28
4.5.1 Etapa 1. Trituración y eliminación de compuestos orgánicos.....	29
4.5.2 Etapa 2. Reclamación mecánica y clasificación granulométrica .....	30
4.5.3 Etapa 3. Separación magnética y por corrientes de Foucault.....	30
4.5.4 Etapa 4. Separación gravimétrica .....	31
4.5.5 Etapa 5. Control de calidad y verificación química.....	31
4.6 Consideraciones Ambientales y Viabilidad Económica .....	31
5 Conclusiones .....	32
Referencias Bibliográficas.....	34

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Comparación entre los valores máximos permitidos por ASTM para los refractarios de sílice y las composiciones típicas de las WFS reportadas en la literatura.....	20

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Diagrama de flujo esquemático de la propuesta de procesamiento de los residuos de arenas de moldeo para obtención de sílice grado refractario.....	29

## Resumen

**Título:** Procesamiento y Reciclado de Residuos de Arenas de Moldeo para la Recuperación de Sílice de Grado Refractario\*<sup>1</sup>

**Autor:** Camilo H. Ricaurte Cortés\*\*<sup>2</sup>

**Palabras Clave:** Refractarios de sílice, Arenas de moldeo de desecho, Reclamación de arenas de moldeo, Procesamiento de residuos

### Descripción:

El aprovechamiento de arenas de moldeo de desecho (waste foundry sands, WFS, por sus siglas en inglés) representa una alternativa estratégica para la recuperación de sílice de alta pureza y la reducción del impacto ambiental asociado a su disposición. En este trabajo se presenta una revisión bibliográfica orientada a identificar las principales impurezas presentes en las WFS, así como los métodos físicos y químicos reportados para su tratamiento, reutilización y disposición, con el propósito de proponer un proceso de beneficio que permita obtener sílice con calidad refractaria conforme al estándar ASTM C416. La literatura señala que las impurezas más comunes comprenden óxidos de hierro, aluminio y calcio, además de residuos carbonosos derivados de aglutinantes orgánicos y trazas metálicas. Con base en la información recopilada, se propone una estrategia integrada de procesamiento que combina etapas físicas y químicas complementarias incluyendo trituración y biorremediación, reclamación mecánica y clasificación granulométrica, separación magnética de alta intensidad, separación por corrientes de Foucault y separación gravimétrica, orientada a maximizar la pureza del dióxido de silicio. Esta propuesta constituye una alternativa ambientalmente sostenible y técnicamente viable para el tratamiento y valorización de las WFS y la obtención de un producto de valor agregado para la industria siderúrgica.

---

<sup>1</sup> \*Trabajo de Grado

<sup>2</sup> \*\*Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Ingenierías Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director Isaías Andrés Rentería Rincón.

### Abstract

**Title:** Processing and recycling of waste foundry sands for the recovery of refractory grade silica\*<sup>3</sup>

**Author:** Camilo H. Ricaurte Cortés\*\*<sup>4</sup>

**Key Words:** Silica refractories, Waste foundry sands, Foundry sand reclamation, Waste processing

#### **Description:**

The utilization of waste foundry sands (WFS) represents a strategic alternative for recovering highpurity silica and reducing the environmental impact associated with their disposal. This work presents a literature review aimed at identifying the main impurities present in WFS, as well as the physical and chemical methods reported for their treatment, reuse, and disposal, with the purpose of proposing a beneficiation process to obtain refractory-grade silica in accordance with the ASTM C416 standard. The literature indicates that the most common impurities include iron, aluminum, and calcium oxides, in addition to carbonaceous residues derived from organic binders and metallic traces. Based on the information gathered, an integrated processing strategy is proposed, combining complementary physical and chemical stages, including crushing and bioremediation, mechanical reclamation and particle size classification, high-intensity magnetic separation, eddy current separation, and gravity separation, aimed at maximizing silicon dioxide purity. This proposal constitutes an environmentally sustainable and technically feasible alternative for the treatment and valorization of WFS, leading to a value-added product for the steel industry.

---

<sup>3</sup> \*Bachelor Thesis

<sup>4</sup> \*\*Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Ingenierías Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director Isaías Andrés Rentería Rincón.

## Introducción

La industria de la fundición genera grandes volúmenes de arenas de moldeo usadas, conocidas como waste foundry sands (WFS), las cuales se consideran residuos industriales con un alto contenido de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), pero contaminadas con aglutinantes orgánicos, óxidos metálicos y partículas finas de arcilla. A pesar de que estas arenas conservan una composición rica en sílice —en muchos casos superior al 85 %—, la presencia de impurezas limita su reutilización directa y conduce a su disposición en vertederos, lo que representa un problema ambiental y económico significativo para el sector metalúrgico y para las industrias locales que dependen del cuarzo natural como materia prima (Penkaitis & Sígolo, 2012). Diversos estudios han evidenciado que las WFS pueden ser transformadas en una fuente secundaria de sílice de alta pureza mediante procesos de separación física y purificación controlada. Sin embargo, los enfoques existentes suelen centrarse en la reutilización de las arenas en aplicaciones de bajo valor agregado, como materiales de construcción o rellenos de pavimentos, sin explorar en profundidad su potencial para la obtención de materiales de calidad refractaria (Garitaonandia et al., 2018). La recuperación de sílice con las especificaciones establecidas por la norma ASTM C416 —que regula los límites de óxidos como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  y  $\text{CaO}$ — permitiría incorporar este residuo dentro de la cadena de valor de la industria refractaria, contribuyendo a la economía circular y a la reducción del consumo de recursos minerales vírgenes (Alonso-Santurde et al., 2011).

En este contexto, el presente trabajo desarrolla una revisión bibliográfica orientada a identificar las impurezas más relevantes presentes en las WFS y a analizar los diferentes métodos físicos y químicos empleados para su tratamiento, incluyendo la biorremediación, la separación magnética y gravimétrica, y los procesos térmicos de reclamación. A partir del análisis comparativo de los procedimientos descritos en la literatura, se propone un esquema integrado de

procesamiento que combina etapas sucesivas de acondicionamiento, separación selectiva y concentración, diseñado para maximizar la pureza del  $\text{SiO}_2$  y aproximar su composición a los estándares de los refractarios de sílice. Esta propuesta busca sentar las bases para futuras investigaciones experimentales que validen la viabilidad técnica y económica de los procesos planteados, y promover el aprovechamiento de las WFS como una materia prima secundaria de alto valor agregado. Con ello, se contribuye tanto a la gestión sostenible de los residuos industriales de fundición como al desarrollo de materiales refractarios más sostenibles y competitivos.

## **1 Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Realizar una revisión bibliográfica que permita determinar un método de procesamiento de arenas de moldeo de desecho, para la obtención de sílice grado refractario de alta calidad.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Identificar a partir de revisión bibliográfica las impurezas más comunes que pueden presentarse en las arenas de moldeo de desecho.

Evaluar la aplicabilidad de diferentes métodos de beneficio económicamente rentables y con el menor impacto ambiental para la recuperación de sílice a partir de arenas de moldeo de desecho.

Proponer un proceso de beneficio específico para recuperación de sílice a partir de arenas de moldeo para la fabricación de refractarios de sílice.

## **2 Composición e impurezas de los Residuos de Arenas de Moldeo**

### **2.1 Arenas de moldeo: composición y función**

Las arenas de moldeo constituyen el principal material empleado en la industria de fundición para la fabricación de moldes y machos destinados a la colada de metales. Su función es conferir la forma al metal fundido y resistir las condiciones térmicas y mecánicas extremas durante el proceso de colado. Estas arenas están compuestas principalmente por sílice ( $\text{SiO}_2$ ) en forma de cuarzo, a la que se adicionan materiales aglutinantes y aditivos que mejoran su cohesión,

plasticidad y estabilidad térmica. La composición base puede variar según el tipo de proceso de fundición, el metal a colar y el tipo de aglutinante empleado (Khan et al., 2020).

Las arenas de moldeo pueden clasificarse principalmente según el sistema de aglomeración empleado, lo que determina su composición inicial y su ciclo de vida en el proceso.

### ***2.1.1 Arenas en Verde (Aglomeradas con Arcilla)***

Representan cerca del 90% del material de moldeo utilizado en la industria (Mehta, 2024). Su composición típica consiste en 85-95% de arena de sílice, 4-10% de arcilla bentonita como aglomerante principal, 2-10% de aditivos carbonosos (como polvo de carbón) y 2-5% de agua (Aissaoui et al., 2025; Mehta, 2024; Paul et al., 2021). Este tipo de arena se reutiliza típicamente en el proceso entre 8 y 10 veces antes de ser desechada (Khan & Mahajani, 2024).

### ***2.1.2 Arenas con Aglomerante Químico***

Estas arenas se componen de 93-99% de sílice y 1- 3% de aglomerantes químicos orgánicos (Mehta, 2024). Entre los aglomerantes más comunes se encuentran resinas sintéticas como las fenólicas, epoxi o furfurílicas (Khan & Mahajani, 2024; Paul et al., 2021). Se emplean principalmente para la fabricación de machos y, a diferencia de las arenas en verde, se utilizan una sola vez y se descartan por completo de la fundición (Khan & Mahajani, 2024).

El intenso proceso de fundición, altera drásticamente estas composiciones iniciales, lo que conduce a una profunda degradación de sus componentes y a la consiguiente pérdida de sus propiedades funcionales. Por ello, tras varios ciclos de uso, las arenas pierden sus propiedades originales, se saturan de residuos metálicos y orgánicos y se transforman en un residuo conocido como residuos de arenas de moldeo por sus siglas en inglés WFS (Waste Foundry Sand), UFS (Used Foundry Sand) o SFS (Spent Foundry Sand) (Khan & Mahajani, 2024; K. Nyembwe et al., 2016).

## 2.2 Residuos de Arenas de Moldeos

Las WFS constituyen uno de los subproductos sólidos más voluminosos generados por la industria de la fundición de metales a nivel mundial (Xiang et al., 2019). Su estudio ha cobrado una gran importancia debido a la considerable presión ambiental que suponen y al creciente interés, desde la perspectiva de la economía circular, en desarrollar métodos para su recuperación y reutilización. La valorización de este residuo permite: (i) reducir el consumo de materias primas vírgenes, (ii) minimizar las emisiones atmosféricas asociadas y (iii) disminuir la cantidad de material depositado en vertederos (Cioli et al., 2022). La magnitud de su generación es notable: se estima que por cada tonelada de producción de fundición se generan aproximadamente 600 kg de WFS (K. Nyembwe et al., 2016; Xiang et al., 2019). Es importante destacar que las WFS no son un material uniforme, ya que pueden existir distintas corrientes de residuos con características propias, como arenas de granallado (shot blast), polvo de filtros (bag house dust) y arena de desmoldeo, cada una con granulometrías e impurezas específicas (J. K. Nyembwe et al., 2018).

El análisis de los mecanismos de degradación de las arenas de moldeo es fundamental para comprender su estado final como residuo. Los procesos térmicos, químicos y mecánicos a los que se somete la arena durante su ciclo de vida en la fundición la convierten en un desecho y también definen su composición final, la naturaleza de sus impurezas y, en última instancia, su potencial para ser valorizada en aplicaciones alternativas. El ciclo de fundición expone la arena de moldeo a condiciones extremas. El contacto directo con el metal fundido a temperaturas que pueden alcanzar los 1500 °C provoca la degradación térmica y química de sus componentes (Paul et al., 2021). Estos factores son los responsables de desactivar los aglomerantes y alterar la estructura del material, haciéndolo progresivamente inadecuado para cumplir con las estrictas especificaciones de moldeo (J. K. Nyembwe et al., 2018).

El fenómeno central en la pérdida de propiedades es la desactivación de los aglomerantes. El intenso calor del metal fundido descompone térmicamente los aglomerantes inorgánicos, como la bentonita, formando una "capa muerta" o inerte sobre la superficie de los granos de arena. Esta capa, compuesta por el aglomerante degradado, polvo de carbón y otros subproductos del proceso, es la principal causa de la pérdida de las propiedades de cohesión y plasticidad. Las observaciones microestructurales revelan que esta capa cubre por completo la superficie de algunos granos, mientras que en otros se deposita preferentemente en los recovecos superficiales (Da Silva Magalhães et al., 2023).

De manera concurrente a la desactivación de los aglomerantes inorgánicos, la degradación de los aditivos orgánicos contribuye de forma significativa a las características finales del residuo. El característico color oscuro de la mayoría de las WFS es un indicador visual de la degradación térmica de compuestos orgánicos como el polvo de carbón (Da Silva Magalhães et al., 2023). Este fenómeno se ha correlacionado con los resultados obtenidos mediante análisis termogravimétricos, los cuales muestran una pérdida de masa significativa en el rango de temperaturas de 200 a 700 °C, asociada directamente a la descomposición de la bentonita y del polvo de carbón presentes en la mezcla (Da Silva Magalhães et al., 2023; Mymrin et al., 2020). Esta degradación de los componentes originales da como resultado una composición química final muy diferente a la de la arena virgen, marcada por la presencia de numerosas impurezas que definen sus características como residuo.

### ***2.2.1 Composición Química e Impurezas Relevantes en las WFS***

Aunque el análisis por difracción de rayos X confirma que el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) sigue siendo la fase cristalina principal en las WFS (Martins et al., 2021; Mymrin et al., 2020), el valor y la viabilidad de su reutilización dependen críticamente de la naturaleza y concentración de las

impurezas añadidas y generadas durante el proceso de fundición. La composición química general de las WFS se caracteriza por un alto contenido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), si bien su concentración es notablemente menor que en la arena virgen (Bhardwaj & Kumar, 2017). Esta reducción es una consecuencia directa de la dilución por óxidos metálicos introducidos a través de los aditivos, principalmente el óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y el óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) procedentes del aglomerante de arcilla bentonita (Martins et al., 2021; Mymrin et al., 2020). Junto a estos, el óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y el óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) se encuentran entre los óxidos más comunes y significativos (Paul et al., 2021). Un análisis más detallado revela un complejo panorama de impurezas que pueden clasificarse en dos grandes grupos.

### **2.2.2 Impurezas inorgánicas**

**2.2.2.1 Óxidos metálicos.** La presencia de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{MgO}$  en concentraciones más altas que en la arena natural está directamente asociada a la adición de bentonita, que es un aluminosilicato hidratado de aluminio y magnesio (Mymrin et al., 2020; Martins et al., 2021). El  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  también puede provenir del propio metal fundido durante el proceso de colada y fundición (Martins et al., 2021), identificándose en algunos casos la presencia de la fase cristalina hematita (Aissaoui et al., 2025; Zalyhina et al., 2024).

**2.2.2.2 Contaminación por Metales Pesados.** El contacto directo con la aleación fundida durante el vertido introduce contaminación metálica en la matriz de la arena (J. K. Nyembwe et al., 2015). Los metales que se encuentran con mayor frecuencia incluyen Al, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni y Zn (K. Nyembwe et al., 2016). Cabe destacar que ciertos sistemas de aglomerantes, como los de uretano alquídico, pueden elevar de forma particular las concentraciones de metales pesados como Co y Pb (Miguel et al., 2012).

**2.2.2.3 Arcillas Residuales.** La arcilla residual, procedente de la bentonita degradada, es una impureza importante. Se clasifica en dos tipos: arcilla débilmente adherida, que es más fácil de eliminar, y arcilla fuertemente adherida, que forma depósitos oolíticos sobre los granos de arena (Khan et al., 2020). Esta última es especialmente difícil de retirar mediante procesos de regeneración mecánica convencionales (Khan & Mahajani, 2024).

### **2.2.3 Impurezas Orgánicas y Residuos de Aditivos**

Este grupo incluye residuos de compuestos orgánicos como carbón no quemado, resinas degradadas y otros aditivos (Bhardwaj & Kumar, 2017). El proceso de degradación térmica de estos compuestos puede llevar a la formación de contaminantes con importantes implicaciones ambientales, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) y los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) (K. Nyembwe et al., 2016). Estos niveles de impureza pueden ser evaluados de forma objetiva contrastándolos con los estrictos límites establecidos por normativas industriales para materiales de alta pureza (Dyer et al., 2021; Othman et al., 2023).

### **2.3 Recuperación de sílice grado refractario**

El aprovechamiento de las waste foundry sands (WFS) ha adquirido relevancia como estrategia de economía circular orientada a mitigar los impactos ambientales asociados a la disposición final de residuos industriales y a la extracción de materias primas vírgenes. Su reciclaje contribuye a disminuir el consumo energético y los costos derivados de la explotación, extracción y acondicionamiento de arenas silíceas naturales. Tradicionalmente, los estudios sobre valorización de las WFS se han centrado en su aplicación en la industria de la construcción, donde han sido empleadas en la producción de pavimentos (Balulmath, 2022), cemento Portland (Guney et al., 2010), terraplenes (Siddique & Singh, 2011), rellenos fluidos y mezclas asfálticas (Bakis et al., 2006), así como en la agricultura como sustrato fértil (United States Environmental Protection,

2007). Estas aplicaciones resultan viables debido a que el acondicionamiento previo de las WFS no requiere operaciones de alta complejidad, limitándose generalmente a procesos de tamizado y separación magnética (Raghavan et al., 2017).

No obstante, un campo de investigación con mayor valor agregado reside en la reutilización de las WFS como fuente de sílice para la fabricación de materiales refractarios. Dado que la fracción mineral de estos residuos está compuesta principalmente por cuarzo, y que su granulometría y pureza pueden ajustarse mediante etapas de tamizaje y clasificación, las WFS podrían representar una alternativa viable como materia prima en la producción de refractarios de sílice. Los refractarios de sílice son esenciales en la industria siderúrgica, particularmente en hornos de acero y en la producción de coque, debido a su elevada refractariedad y resistencia a la corrosión por escorias ácidas (Kapur, 1974). En este contexto, la recuperación del contenido silíceo de las WFS no solo permitiría reducir el impacto ambiental de la fundición, sino también diversificar las fuentes de materias primas en la industria refractaria como valor agregado.

De acuerdo con la norma ASTM C416-97 (2022), la clasificación de los ladrillos refractarios de sílice se establece en función de su composición química, particularmente del contenido de óxidos que pueden modificar el comportamiento térmico del material (ASTM, n.d.). Esta norma define límites máximos para los principales componentes secundarios, considerados como impurezas o fundentes, debido a su capacidad de reducir la refractariedad y promover la formación de fases líquidas a altas temperaturas.

En este contexto, resulta de interés comparar la composición típica reportada para las waste foundry sands (WFS) con los límites establecidos por la norma ASTM C416, con el propósito de evaluar su potencialidad como materia prima en la fabricación de refractarios de sílice. La Tabla 1 presenta una síntesis de dicha comparación.

**Tabla 1.**

*Comparación entre los valores máximos permitidos por ASTM para los refractarios de sílice y las composiciones típicas de las WFS reportadas en la literatura*

<b>Impureza</b>	<b>Límite según ASTM C416-97 (2022)</b>	<b>Composición típica reportada para las WFS</b>	<b>Fuente</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	< 1.50 %	11.9 % - 13.9 %	(Paul et al., 2021; Martins et al., 2021)
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	< 2.50 %	8.3 % - 8.36 %	(Martins et al., 2021; Paul et al., 2021)
<b>TiO<sub>2</sub></b>	< 0.20%	Presente en cantidades traza	(Aissaoui et al., 2025; Martins et al., 2021)
<b>CaO</b>	< 4.00%	Presente; en WFS de olivino junto con MgO	(Furlani et al., 2012; Khan & Mahajani, 2024)

Este análisis es concluyente, las concentraciones de óxido de aluminio y óxido de hierro reportadas habitualmente en las WFS superan los límites permitidos por la norma ASTM C416-97 (2022) para refractarios de sílice. El contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> puede ser hasta 9 veces superior al límite, mientras que el de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> puede excederlo en más de 3 veces. Además, la norma define un factor fundente para predecir la refractariedad, calculado como el porcentaje de alúmina más el doble del porcentaje de fundentes totales (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) y establece que estas impurezas actúan como fundentes, reduciendo significativamente el punto de fusión del material. Dado los altos niveles de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y la presencia reportada de otros óxidos alcalinos en las WFS, su "Factor de Flujo" sería muy elevado, lo que evidencia la necesidad de procesos de concentración o separación adecuados para disminuir el porcentaje de estos componentes en las WFS como materias primas.

### **3 Métodos para la recuperación de Sílice a Partir de Residuos de WFS**

#### **3.1 Reclamación Mecánica**

La reclamación mecánica constituye un método fundamental en el tratamiento de las WFS. Su objetivo principal es la desaglomeración de los terrones de arena y la eliminación de las capas de aglutinante débilmente adheridas mediante la aplicación de fuerzas físicas como la fricción, la abrasión y el impacto. Existen dos modalidades principales de este proceso (Kayal & Chakrabarti, 2008).

##### **3.1.1 Reclamación Mecánica en Seco**

Este proceso implica operaciones de trituración, molienda y atrición entre partículas para liberar los granos de sílice del aglutinante gastado (Dańko, 2015; Hernández et al., 2012; Park et al., 2012). Se considera un método económico, con costos de tratamiento de aproximadamente 0.01 €/kg (Zanetti & Fiore, 2003). Sin embargo, su eficiencia es limitada, logrando solo una limpieza parcial. Aunque se puede reducir el contenido de arcilla libre a aproximadamente un 2.2%, el producto resultante generalmente no es adecuado para aplicaciones exigentes como la fabricación de núcleos con aglutinantes químicos (Khan et al., 2021; Rayjadhav & Shinde, 2021).

##### **3.1.2 Reclamación Mecánica en Húmedo**

Este método utiliza una fricción intensa (scrubbing) en húmedo para remover las capas de arcilla y otros aglutinantes de la superficie de las partículas de las WFS (Rayjadhav & Shinde, 2021). Es un tratamiento significativamente más efectivo que el método seco, capaz de producir una arena recuperada casi tan limpia como la arena nueva. No obstante, esta alta eficiencia conlleva desventajas notables: un costo de tratamiento más elevado (0.02-0.03 €/kg) y la generación de lodos residuales que requieren una gestión adicional (Zanetti & Fiore, 2003). Este tratamiento mecánico en húmedo es superior en términos de pureza del producto final, pero a expensas de una

mayor complejidad operativa, un mayor costo y un impacto ambiental asociado a la gestión de lodos. Aunque estos métodos son esenciales para el acondicionamiento inicial, a menudo se requieren procesos de separación física adicionales para eliminar impurezas específicas y alcanzar grados de pureza más elevados.

### **3.2 Métodos de Beneficio o Procesamiento**

Los métodos de separación física o beneficio, aprovechan las diferencias en las propiedades físicas de las materias primas crudas, como el magnetismo y la densidad, para lograr una concentración selectiva con un bajo impacto ambiental.

#### **3.2.1 Separación Magnética**

Esta técnica es altamente efectiva para la eliminación de impurezas ferromagnéticas y paramagnéticas. Se ha demostrado que puede reducir el contenido de hierro en la arena de sílice del 0.41% al 0.06%, superando a otros métodos físicos como la flotación (Ravishankar et al., 2011). La eficiencia de la separación magnética aumenta a medida que disminuye el tamaño de las partículas, debido a un mayor grado de liberación de los minerales (Hacifazlioglu, 2011). Utilizando separadores de alta intensidad, tanto en seco como en húmedo (WHIMS), este método se postula como una técnica de beneficio "ambientalmente sostenible y económicamente viable", propuesta como una alternativa preferente a los métodos químicos más agresivos (Othman et al., 2023; Yadav et al., 2023).

#### **3.2.2 Flotación**

La flotación es un proceso fisicoquímico utilizado para remover selectivamente óxidos de hierro y titanio. Los estudios indican que los mejores resultados se obtienen operando en un rango de pH ácido, logrando remover hasta un 61.4% del hierro contenido en la muestra (Hacifazlioglu, 2011). Sin embargo, en comparación directa, la separación magnética puede alcanzar un menor

contenido de hierro residual (0.06% frente a 0.08% para la flotación). Además, la flotación implica el uso de reactivos químicos, lo que incrementa la sensibilidad ambiental del proceso y la complejidad del tratamiento de efluentes (Ravishankar et al., 2011).

### **3.2.3 Separación Gravimétrica**

Este método utiliza equipos como las mesas vibratorias para separar minerales en función de sus diferencias de densidad. Es particularmente eficaz para separar la sílice ( $\text{SiO}_2$ ), que es relativamente ligera, de óxidos metálicos más densos. En un estudio, la separación gravimétrica logró concentrar el  $\text{SiO}_2$  en la fracción ligera, mientras que los óxidos de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) se concentraron en la fracción pesada. Se cuantificó una reducción del contenido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  de 4.98% a 0.12% y de  $\text{TiO}_2$  de 0.33% a 0.12% en el producto purificado (Rahman et al., 2015).

A pesar de la utilidad de estos métodos, cuando la pureza requerida es extremadamente alta y las impurezas están finamente diseminadas o químicamente ligadas, la separación física puede no ser suficiente, lo que conduce al uso de métodos químicos más agresivos.

### **3.3 Métodos de Lixiviación Ácida**

La lixiviación ácida se posiciona como el método más potente para la eliminación de impurezas metálicas y alúmina, especialmente aquellas que no pueden ser removidas eficientemente por medios físicos. El principio de este proceso es disolver selectivamente los contaminantes óxidos sin afectar significativamente la matriz de sílice. Sin embargo, su aplicación conlleva importantes consideraciones ambientales debido al uso de reactivos corrosivos y la generación de efluentes ácidos. Diversos agentes de lixiviación han sido estudiados para este propósito, cada uno con una eficacia particular.

### 3.3.1 *Ácido Sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)*

Identificado como uno de los agentes más efectivos, es capaz de alcanzar tasas de eliminación de hasta un 97.9% para el hierro y un 94.2% para el aluminio en condiciones optimizadas de temperatura y tiempo (Anas Boussaa et al., 2017).

### 3.3.2 *Ácido Clorhídrico (HCl)*

Es otro agente comúnmente utilizado que ha demostrado reducir significativamente el contenido de hierro en la arena de cuarzo (Bouabdallah et al., 2015).

### 3.3.3 *Mezclas de Ácidos*

El uso de combinaciones de ácidos puede lograr una purificación de grado ultra-alto. Se ha reportado que mezclas como (HCl & H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) o (HCl, HF, HNO<sub>3</sub>) pueden elevar el contenido de SiO<sub>2</sub> de un 98.60% inicial hasta un 99.99% (Mohamed et al., 2023).

### 3.3.4 *Lavado Tríplico*

Un proceso de lavado sucesivo con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaOH y HCl ha demostrado ser eficaz para eliminar complejos metálicos indeseables de las WFS, dejando una estructura de sílice más porosa y purificada (Balbay, 2019).

Aunque la lixiviación ácida fue identificada como la "mejor técnica potencial para el beneficio" de la arena de sílice, existe un claro consenso en la literatura sobre la necesidad de reemplazarla por alternativas más sostenibles, como la separación magnética, siempre que sea posible, para mitigar su impacto ambiental (Yadav et al., 2023). Tras abordar las impurezas inorgánicas, es necesario enfocar la atención en los contaminantes orgánicos y los métodos específicos para su eliminación.

### **3.4 Eliminación de Compuestos Orgánicos**

La eliminación de aglutinantes orgánicos —como resinas poliméricas y sus derivados fenólicos— y del polvo de carbón representa un desafío distinto al de las impurezas inorgánicas. Estos compuestos no son susceptibles a la separación física convencional ni a la lixiviación ácida, por lo que requieren métodos térmicos o biológicos específicos para su degradación y remoción.

#### **3.4.1 Reclamación Térmica**

Este proceso se basa en la aplicación de altas temperaturas, típicamente entre 500 y 800 °C, para incinerar todos los componentes orgánicos y carbonosos adheridos a la superficie de los granos de arena (Rayjadhav & Shinde, 2021). La reclamación térmica es considerada el método más eficiente para la eliminación de residuos orgánicos, logrando una matriz de cuarzo de alta pureza (Łucarz et al., 2024). Su efectividad es tal que puede reducir drásticamente el contenido de arcilla suelta adherida (loosely bound clay) de un 15% a un rango de 0.5-0.6% (Khan et al., 2021). Sin embargo, sus principales inconvenientes son un alto consumo energético y un costo operativo superior en comparación con la reclamación mecánica (Rayjadhav & Shinde, 2021). Además, su eficacia puede verse comprometida si existen mezclas de aglutinantes orgánicos e inorgánicos, ya que los residuos inorgánicos pueden permanecer en la superficie del grano tras el tratamiento térmico (Łucarz et al., 2024).

#### **3.4.2 Biorremediación**

La biorremediación surge como una alternativa innovadora y ecológica para el tratamiento de WFS contaminadas con compuestos orgánicos peligrosos. Un estudio específico ha demostrado la viabilidad de utilizar bacterias del género *Burkholderia* para degradar los compuestos fenólicos presentes en la arena, como fenol, m-cresol y o-cresol, utilizándolos como única fuente de carbono (Rodrigues et al., 2021). El proceso alcanzó una eficiencia de degradación del 97% para el fenol y

del 100% para el m-cresol y o-cresol en un período de diez días. Las ventajas de este método son su bajo costo y su perfil "ecológicamente correcto", lo que le confiere un gran potencial para ser aplicado a escala industrial como una solución sostenible para la descontaminación de este tipo de residuos (Rodrigues et al., 2021).

La comprensión de este abanico de tecnologías permite ahora formular una propuesta de proceso integrado que aproveche las fortalezas de cada método de manera sinérgica, como se detallará en el siguiente capítulo.

#### **4 Propuesta de un Proceso de Beneficio para la Recuperación de Sílice Grado**

##### **Refractario**

El objetivo central de este capítulo es proponer un proceso integrado de múltiples etapas, diseñado para recuperar sílice de alta pureza a partir de arenas de moldeo de desecho (WFS), que maximice el valor del producto recuperado para su aplicación en industrias exigentes como la refractaria. La concepción de este proceso se guía por una filosofía de sostenibilidad y eficiencia. Para ello, se han establecido los siguientes criterios de diseño, derivados directamente de los mejores resultados reportados en la literatura científica:

El proceso debe ser ambientalmente sostenible, priorizando tecnologías de bajo impacto que minimicen el consumo de agua, energía y reactivos químicos peligrosos.

El proceso debe ser económicamente rentable, combinando etapas de bajo costo operativo para generar un producto de alto valor añadido a partir de un residuo.

El producto final debe tener como objetivo alcanzar niveles de pureza demostrados como factibles en la literatura, que cumplan con el estándar ASTM C416, tales como un contenido de

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inferior a 0.06% (Ravishankar et al., 2011) y un contenido de TiO<sub>2</sub> inferior a 0.12% (Rahman et al., 2015), para maximizar el valor del producto recuperado.

La selección y secuenciación de cada etapa del proceso propuesto se justificará a continuación, basándose en la evidencia y las conclusiones extraídas de la revisión bibliográfica del capítulo anterior.

La filosofía del proceso propuesto se basa en una combinación sinérgica de métodos físicos y mecánicos para maximizar la pureza del producto final minimizando al mismo tiempo el impacto ambiental y los costos operativos. Se ha optado por un enfoque escalonado que reserva los tratamientos más intensivos únicamente para los casos en que sean estrictamente necesarios, evitando por defecto el uso de lixiviación química. La elección de cada tecnología principal se justifica de la siguiente manera.

#### **4.1 Pretratamiento Biológico/Térmico**

Su inclusión como etapa inicial es necesaria si las WFS contienen altos niveles de aglutinantes fenólicos. La biorremediación (Rodrigues et al., 2021) se establece como la opción preferente debido a su bajo costo, mínimo impacto ambiental y alta eficacia en la degradación de fenoles. La reclamación térmica (Łucarz et al., 2024) se reserva como una alternativa para casos que requieran una eliminación más rápida y completa, asumiendo su mayor costo y consumo energético.

#### **4.2 Reclamación Mecánica en Seco**

Se elige como el paso fundamental de acondicionamiento por ser el método más económico (Fiore & Zanetti, 2006; Zanetti & Fiore, 2003) para la des aglomeración inicial de los terrones de WFS y la eliminación de la fracción más fina, que concentra aglutinantes sueltos y arcillas (Dańko, 2015; Khan et al., 2021).

### **4.3 Separación Magnética**

Esta tecnología constituye el pilar del proceso para la purificación inorgánica. Se defiende su uso por su alta eficiencia demostrada en la eliminación de óxidos de hierro y su perfil como una técnica "ambientalmente sostenible y económicamente viable" (Yadav et al., 2023; Ravishankar et al., 2011).

### **4.4 Separación Gravimétrica**

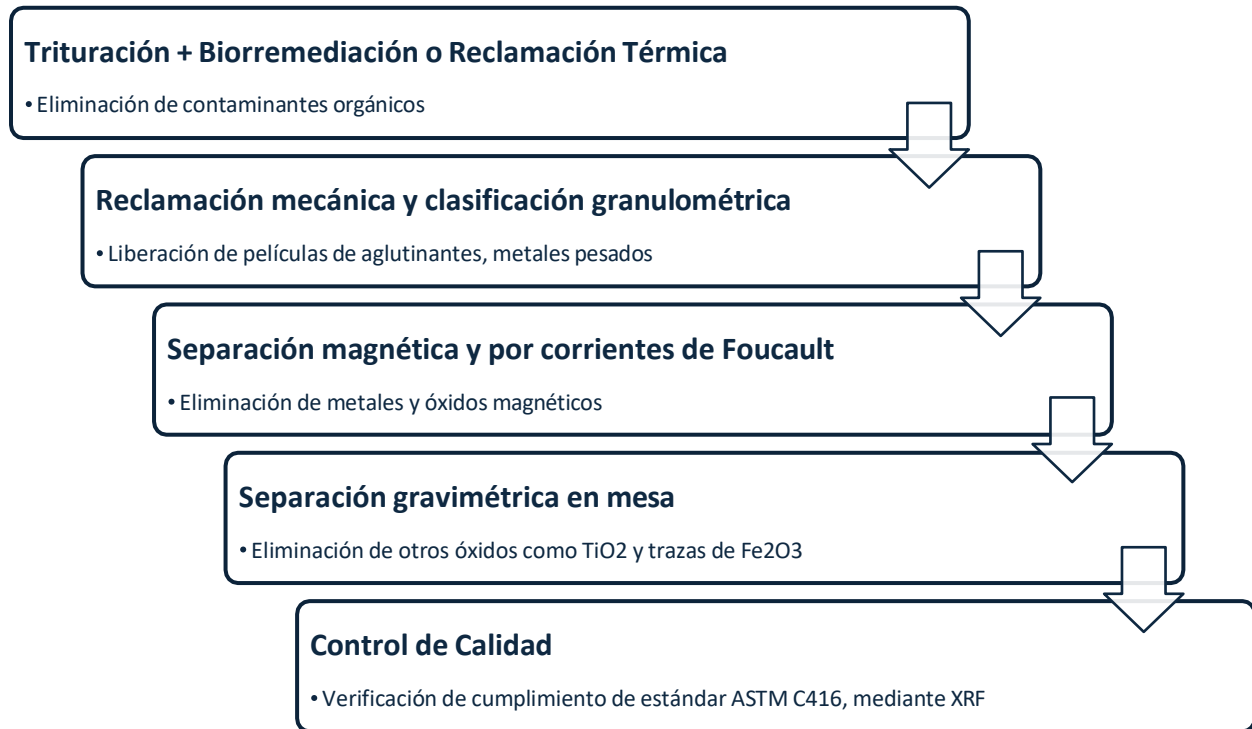
Se argumenta su inclusión como una etapa de afinado para la reducción específica de  $\text{TiO}_2$  y la posterior disminución de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  residual, basándose en su probada eficacia para separar minerales por densidad (Rahman et al., 2015).

### **4.5 Descripción del Proceso por Etapas**

A continuación, se describe en detalle el flujo de proceso diseñado a partir de esta selección de tecnologías. En la figura 1 se muestra un diagrama esquemático que describe el proceso propuesto para la recuperación de sílice grado refractario.

**Figura 1.**

*Diagrama de flujo esquemático de la propuesta de procesamiento de los residuos de arenas de moldeo para obtención de sílice grado refractario*



#### **4.5.1 Etapa 1. Trituración y eliminación de compuestos orgánicos**

La primera etapa corresponde al acondicionamiento y eliminación de compuestos orgánicos. En primer lugar, el material se tritura con el propósito de aumentar su superficie expuesta y facilitar la posterior remoción de contaminantes orgánicos, proceso necesario únicamente cuando las WFS presentan una proporción significativa de aglutinantes fenólicos o resinas. Para este fin, puede aplicarse un proceso de biorremediación mediante bacterias del género *Burkholderia* en un sistema biológico controlado durante aproximadamente diez días, considerado un método sostenible y ambientalmente favorable (Rodrigues et al., 2021). En los casos que demanden una descontaminación más rápida, aunque con mayor consumo energético, se puede

recurrir a la reclamación térmica a temperaturas cercanas a 700 °C, la cual permite la descomposición completa de los residuos orgánicos (Rayjadhav & Shinde, 2021).

#### ***4.5.2 Etapa 2. Reclamación mecánica y clasificación granulométrica***

Una vez eliminados los contaminantes orgánicos, las arenas pasan a la etapa de reclamación mecánica en seco y conminución secundaria y clasificación granulométrica. En esta fase, la arena es sometida a molienda en un molino de rotor, lo que facilita la abrasión entre partículas y la liberación de los granos de sílice cubiertos por restos de aglutinantes (Park et al., 2012; Daňko, 2015). Posteriormente, el material se somete a tamizado para separar la fracción fina (< 0.15 mm), donde tienden a concentrarse las impurezas minerales, las arcillas y los metales pesados (Park et al., 2012; Mohamed et al., 2023). El resultado es una fracción más homogénea y limpia, compuesta por granos individuales de sílice aptos para las etapas de purificación mineral.

#### ***4.5.3 Etapa 3. Separación magnética y por corrientes de Foucault***

El siguiente paso corresponde a la etapa de separación magnética de alta intensidad, destinada a la eliminación de minerales ferromagnéticos y óxidos metálicos, principalmente  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , así como de fragmentos metálicos retenidos tras la clasificación granulométrica previa. El material seco y clasificado se alimenta a un separador magnético de alta intensidad en seco, lo que permite una reducción significativa del contenido de hierro total (Ravishankar et al., 2011; Hacifazlioglu, 2011). Posteriormente, los metales no ferrosos pueden ser separados mediante corrientes de Foucault (eddy currents), que actúan por inducción electromagnética sobre los materiales conductores, generando su repulsión y permitiendo su separación del resto de la matriz no conductora (Park et al., 2012).

#### **4.5.4 Etapa 4. Separación gravimétrica**

El residuo no magnético obtenido se somete posteriormente a separación gravimétrica con el fin de eliminar los óxidos remanentes, en particular  $\text{TiO}_2$  y trazas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no captadas magnéticamente. Este procedimiento se realiza en una mesa vibratoria que aprovecha las diferencias de densidad entre las fases presentes para concentrar la fracción ligera rica en  $\text{SiO}_2$  (Rahman et al., 2015). El producto resultante de esta etapa presenta una composición química más próxima a los umbrales de pureza requeridos para los refractarios de sílice, con contenidos reducidos de óxidos de hierro y titanio.

#### **4.5.5 Etapa 5. Control de calidad y verificación química**

Finalmente, se realiza el control de calidad y verificación química del producto refinado. Mediante análisis por fluorescencia de rayos X (XRF), se determinan las concentraciones de los óxidos metálicos de interés ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ), comprobando que los valores obtenidos se encuentren dentro de los límites establecidos por la norma ASTM C416-97. En caso de que el contenido de óxido de aluminio permanezca por encima de los valores esperados —indicando una retención de fases arcillosas—, se considera la posibilidad de ajustar la ruta de procesamiento hacia una reclamación mecánica en húmedo, tal como se ha documentado en materiales con alto contenido de finos y aglutinantes minerales (Zanetti & Fiore, 2003).

### **4.6 Consideraciones Ambientales y Viabilidad Económica**

El proceso propuesto se distingue por su mitigación de impactos ambientales. Al priorizar métodos físicos y biológicos, se minimiza el consumo de agua y se elimina casi por completo la necesidad de reactivos químicos peligrosos como los ácidos, evitando la generación de efluentes contaminantes. Este enfoque permite la valorización de un residuo industrial, reduciendo la carga sobre los vertederos, y contribuye a la conservación de recursos naturales al disminuir la demanda

de explotación de sílice virgen. Se trata, por tanto, de una solución alineada con los principios de la economía circular.

Desde el punto de vista económico, la viabilidad del proceso es muy factible. Al basarse principalmente en métodos mecánicos y físicos de bajo costo operativo, como la reclamación en seco y la separación magnética (Zanetti & Fiore, 2003; Yadav et al., 2023), el costo total de tratamiento se mantiene competitivo. Este esquema permite transformar una materia prima de costo reducido (considerando los costos de disposición en vertedero) en un producto de alto valor comercial, como es la sílice de grado refractario.

## 5 Conclusiones

Las arenas de moldeo constituyen un material de alta complejidad cuya composición inicial basada principalmente en sílice, bentonita y aditivos carbonosos sufre una transformación sustancial durante los ciclos de fundición. Los procesos térmicos y químicos a los que son sometidas generan la desactivación de los aglomerantes, la formación de capas inertes y la incorporación de contaminantes metálicos, lo que convierte a las Waste Foundry Sands (WFS) en un residuo heterogéneo con una composición química y mineralógica marcadamente distinta de la arena virgen.

La caracterización de las WFS revela una matriz silíceo acompañada de impurezas inorgánicas y orgánicas relevantes. Entre las inorgánicas, destacan los óxidos de aluminio, hierro y titanio, además de trazas de metales pesados como Cu, Ni, Pb y Zn. Estas impurezas no solo reducen la pureza del material, sino que limitan directamente su reutilización en aplicaciones de alta exigencia, como los refractarios de sílice, al superar los límites establecidos por la norma ASTM C416-97 (2022) para óxidos fundentes.

Aunque los procesos de recuperación mecánica, magnética, gravimétrica y de lixiviación ácida han demostrado eficacia en la purificación parcial o total de las WFS, su selección debe balancear criterios técnicos, económicos y ambientales. En este sentido, la separación magnética y la biorremediación se perfilan como tecnologías sostenibles de primera elección, mientras que la lixiviación ácida, pese a su alta eficiencia, debe considerarse únicamente cuando se requieran grados de pureza extremadamente altos, debido a su impacto ambiental y costos de tratamiento de efluentes.

La recuperación de sílice grado refractario a partir de WFS es técnicamente factible, pero requiere un enfoque de procesamiento integrado que combine la remoción biológica o térmica de compuestos orgánicos con la purificación física y magnética de los granos de sílice. Solo mediante la integración secuencial y selectiva de estas etapas se podría obtener un material que cumpla con las especificaciones normativas y a la vez transformarlo de un residuo de alto volumen a una fuente secundaria de materia prima para la industria refractaria.

**Referencias Bibliográficas**

- Aissaoui, C., Diliberto, C., Mechling, J. M., & Aranda, L. (2025). Complete physico-chemical characterisation of foundry waste. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 46(3), 336–348. <https://doi.org/10.1080/09593330.2024.2356222>
- Alonso-Santurde, R., Andrés, A., Viguri, J. R., Raimondo, M., Guarini, G., Zanelli, C., & Dondi, Anas Boussaa, S., Kheloufi, A., Boutarek Zaourar, N., & Bouachma, S. (2017). Iron and aluminium removal from Algerian silica sand by acid leaching. *Acta Physica Polonica A*, 132(3-II), 1082–1086. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.132.1082>
- ASTM International. (2022). ASTM C416-97(2022): Standard classification of silica refractory brick. <https://doi.org/10.1520/C0416-97R22>
- Balbay, S. (2019). Recycling of waste foundry sands by chemical washing method. *China Foundry*, 16(2), 141–146. <https://doi.org/10.1007/s41230-019-8144-4>
- Balulmath, A. B. (2022). A critical review on potential use of waste foundry sand in geotechnical and pavement applications. [Manuscrito inédito].
- Bhardwaj, B., & Kumar, P. (2017). Waste foundry sand in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 156, 661–674. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.010>
- Bouabdallah, S., Bounouala, M., Idres, A., & Chaib, A. (2015). Iron removal process for high-purity silica production by leaching and magnetic separation technique. *Науковий Вісник Національного Гірничого Університету*, 5(5), 47–52. [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe)
- Characterisation of South African waste foundry moulding sand: Metallic contaminants. In

- Cioli, F., Abbà, A., Alias, C., & Sorlini, S. (2022). Reuse or disposal of waste foundry sand: An insight into environmental aspects. *Applied Sciences*, 12(13), 6420.  
<https://doi.org/10.3390/app12136420>
- Da Silva Magalhães, R., Dos Santos, L. F., De Almeida Santos, G. T., Pereira, L. A. S., Fernandes, J. D., De Souza Albas, A. E., & Teixeira, S. R. (2023). Reuse of spent foundry sand in development of glass-ceramic material with wollastonite phase. *Materials Research*, 26, e20220533. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2022-0533>
- Dańko, R. (2015). Reclamation of used molding sands. In *SpringerBriefs in Materials* (pp. 59–75). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-14583-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-14583-9_4)
- Dyer, P. P. O. L., Gutierrez Klinsky, L. M., Silva, S. A., e Silva, R. A., & de Lima, M. G. (2021). Fiore, S., & Zanetti, M. C. (2006). Industrial treatment processes for the recycling of green foundry sands. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 92, 67–76.  
<https://doi.org/10.2495/WM060081>
- Furlani, E., Tonello, G., Aneggi, E., & Maschio, S. (2012). Preparation and characterization of sintered ceramics made with spent foundry olivine sand and clay. *Ceramics International*, 38(4), 2619–2625. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.11.065>
- Garitaonandia, E., Delgado, C., Unamunzaga, L., Puche, A. M., García, I., Ríos, J., & Rodríguez, Gonçalves, P. C., Rodrigues, M. R. B., Lintz, R. C. C., Gachet, L. A., Martinez, C. B., & Melo, M. de L. N. M. (2021). Physical and chemical properties of waste foundry exhaust sand for use in self-compacting concrete. *Materials*, 14(19), 5629.  
<https://doi.org/10.3390/ma14195629>

- Guney, Y., Sari, Y. D., Yalcin, M., Tuncan, A., & Donmez, S. (2010). Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete. *Waste Management*, 30(8–9), 1705–1713. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.02.018>
- Hacifazlioglu, H. (2011). Methods used in the beneficiation of silica sand and comparison of flotation and magnetic separation in terms of iron removal. *Madencilik*, 50(3), 35–48.
- Hernández, A., Velázquez, J., Velasco, A., & Valdés, E. (2012). Sand recovery by the mechanical attrition method. In *70th World Foundry Congress 2012 (WFC 2012)* (pp. 334–337).
- Investigation of spent moulding sand using thermal treatment with regard to the possibility of recovering quartz matrix. *Materials*, 17(23), 5991. <https://doi.org/10.3390/ma17235991>
- J. L. (2018). Spent foundry sand valorization in construction sector through the validation of high-performance applications. In *73rd World Foundry Congress: Creative Foundry (WFC 2018)* (pp. 615–616).
- Kapur, P. C. (1974). Silica refractories—The state of the technology. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 33(1–2), 1–24. <https://doi.org/10.1080/0371750X.1974.10840831>
- Kayal, S., & Chakrabarti, B. K. (2008). Reclamation and utilisation of foundry waste sand. *High Temperature Materials and Processes*, 27(1), 51–60. <https://doi.org/10.1515/HTMP.2008.27.1.51>
- Khan, M. M., & Mahajani, S. M. (2024). Chemical reclamation of waste green foundry sand and its application in core production. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 4, 100038. <https://doi.org/10.1016/j.scca.2024.100038>
- Khan, M. M., Mahajani, S. M., Jadhav, G. N., Vishwakarma, R., Malgaonkar, V., & Mandre, S. (2021). Mechanical and thermal methods for reclamation of waste foundry sand. *Journal*

of Environmental Management, 279, 111628.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111628>

Khan, M. M., Singh, M., Jadhav, G. N., Mahajani, S. M., & Mandre, S. (2020). Characterization of waste and reclaimed green sand used in foundry processing. *Silicon*, 12(3), 677–691.

<https://doi.org/10.1007/s12633-019-00146-0>

Łucarz, M., Garbacz-Klempka, A., Brzeziński, M., Pribulová, A., & Fedorko, P. (2024).

M. (2011). Technological behaviour and recycling potential of spent foundry sands in clay bricks. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 994–1002.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.004>

Macro and microstructural characterisation of waste foundry sand reused as aggregate. *Road Materials and Pavement Design*, 22(2), 464–477.

<https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1625807>

Martins, M. A. de B., da Silva, L. R. R., Ranieri, M. G. A., Barros, R. M., Santos, V. C. dos,

Mehta, V. (2024). Sustainable approaches in concrete production: An in-depth review of waste foundry sand utilization and environmental considerations. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(16), 23435–23461. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32785-1>

Miguel, R. E., Ippolito, J. A., Leytem, A. B., Porta, A. A., Banda Noriega, R. B., & Dungan, R.

Mohamed, G., Hamed, T., & Fathy, M. (2023). Advanced chemical leaching process of Wadi El Dakhal silica sand to produce a high concentration of SiO<sub>2</sub> for electronic industry.

Mymrin, V., Borgo, S. C., Alekseev, K., Avanci, M. A., Rolim, P. H. B., Argenda, M. A.,

Klitzke, W., Gonçalves, A. J., & Catai, R. E. (2020). Galvanic Cr-Zn and spent foundry sand waste application as valuable components of sustainable ceramics to prevent

- environment pollution. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(3–4), 1239–1250. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05066-7>
- Nyembwe, J. K., Makhatha, M. E., Banganayi, F. C., & Nyembwe, K. (2018). Characterization of foundry waste sand streams for recycling applications in construction industry. *Waste and Biomass Valorization*, 9(9), 1681–1686. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9894-0>
- Nyembwe, J. K., Makhatha, M. E., Madzivhandila, T., & Nyembwe, K. D. (2015).
- Nyembwe, K., Makhatha, E., & Madzivhandila, M. T. (2016). Waste foundry sand characteristics. [Conference paper].
- Othman, N., Mustaffar, M. I., Ismail, S. A., & Ibrahim, M. H. (2023). Upgrading silica rock quality by using attrition scrubbing and magnetic separation techniques. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.659>
- Park, C. L., Kim, B. G., & Yu, Y. (2012). The regeneration of waste foundry sand and residue stabilization using coal refuse. *Journal of Hazardous Materials*, 203–204, 176–182. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.11.100>
- Paul, P., Belhaj, E., Diliberto, C., Apedo, K. L., & Feugeas, F. (2021). Comprehensive characterization of spent chemical foundry sand for use in concrete. *Sustainability*, 13(22), 12881. <https://doi.org/10.3390/su132212881>
- Penkaitis, G., & Sígolo, J. B. (2012). Waste foundry sand: Environmental implication and characterization. *Geologia USP – Série Científica*, 12(3), 57–70. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2012000300004>
- Preprint. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2685990/v1>
- Proceedings of the World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering.

- Raghavan, P., Ramaswamy, S., Chandrasekhar, S., & Sundararajan, M. (2017). Evaluation for the beneficiability of silica sands from Cherthala area of Alappuzha district, Kerala, India. *Indian Journal of Marine Sciences*, 46(8), 1596–1606.  
<http://nopr.niscpr.res.in/handle/123456789/42520>
- Rahman, M., Zaman, M., Biswas, P., Sultana, S., & Nandy, P. (2015). Physical separation for upgradation of valuable minerals: A study on sands of the Someswari river. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*, 50(1), 53–58.  
<https://doi.org/10.3329/bjsir.v50i1.23810>
- Ravishankar, S. A., Raitani, R., Jiang, S., Davis, M., & Holt, D. (2011). Chemical enhancement to magnetic separation for effective separation of silicates from titanium phases at finer particle size fraction. In *8th International Heavy Minerals Conference 2011* (pp. 271–281).
- Rayjadhav, S. B., & Shinde, V. D. (2021). Processing of moulding sand reclamation systems and environmental issues. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D*, 102(2), 481–487. <https://doi.org/10.1007/s40033-021-00289-8>
- Rodrigues, V. S., Andrade, L. M., & Tenório, J. A. S. (2021). Biodegradation of phenolic compounds in waste foundry sand: Physical and chemical characterization and bacterial degradation kinetics. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 16, 100575. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100575>
- S. (2012). Analysis of total metals in waste molding and core sands from ferrous and non-ferrous foundries. *Journal of Environmental Management*, 110, 77–81.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.025>

- Siddique, R., & Singh, G. (2011). Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 885–892.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.001>
- United States Environmental Protection Agency. (2007). Foundry sands recycling.  
<https://www.epa.gov/smm/foundry-sands-recycling>
- Xiang, R., Li, Y., Li, S., Xue, Z., He, Z., Ouyang, S., & Xu, N. (2019). The potential usage of waste foundry sand from investment casting in refractory industry. *Journal of Cleaner Production*, 211, 1322–1327. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.280>
- Yadav, M., Gautam, Y., Yadav, K., Singh, K., Dwivedi, S., Sharma, K., Dwivedi, M., Pandey, K., & Pati, K. (2023). Investigation of an eco-sustainable beneficiation technique for the Shankargarh silica sands, Uttar Pradesh (India), and its impact on soda-lime-silica glass compositions. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(11), 1–13.  
<https://doi.org/10.1007/s12517-023-11735-0>
- Zalyhina, V., Cheprasova, V., & Romanovski, V. (2024). Recycling of fine fraction of spent foundry sands into fireclay bricks. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 26(1), 322–330. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01825-2>
- Zanetti, M. C., & Fiore, S. (2003). Foundry processes: The recovery of green moulding sands for core operations. *Resources, Conservation and Recycling*, 38(3), 243–254.  
[https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00154-4](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00154-4)