

CARACTERÍSTICAS DE LA ARENA DE FUNDICIÓN ARTIFICIAL SINTERIZADA CERABEADS® Y CASO DE ESTUDIO SOBRE SU APLICACIÓN EN UNA FUNDICIÓN DE ACERO EN ESPAÑA

Introducción

La sílice cristalina (cuarzo) es el mineral más usado en la industria de la fundición. Se trata de un material barato, abundante y de características técnicas ideales para la confección de machos y moldes de arena. Sin embargo, la fracción respirable de sílice cristalina recientemente ha sido clasificada como un carcinógeno, lo que ha llevado a la imposición de normativas más estrictas en los entornos laborales. Por ello, reducir la presencia de polvo de sílice cristalina en las fundiciones se ha convertido en una prioridad a nivel global.

En particular, Europa y Estados Unidos han implementado regulaciones estrictas sobre la sílice cristalina respirable, con consecuencias severas como multas, riesgos de demandas laborales e incluso la suspensión de operaciones en algunas fundiciones. Para hacer frente a este problema, muchas fundiciones están optando por un sistema de reciclaje de arena sintética de fundición, conocido como Cerabeads, que contiene niveles extremadamente bajos de sílice cristalina.

Sin embargo, dado que las Cerabeads son más costosas en comparación con la arena de sílice convencional, es fundamental analizar el impacto en los costos operativos antes de hacer el cambio. Además, debido a las diferencias en sus propiedades, puede haber inquietudes sobre la calidad de los productos fundidos y la eficiencia del procesamiento de la arena, lo que dificulta la implementación inmediata de esta alternativa. A pesar de esto, existen pocos estudios que analicen en detalle los cambios que realmente ocurren en el proceso de producción al sustituir la arena de sílice.

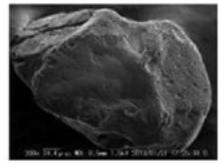
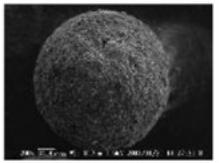
Por ello, este documento compara las propiedades de la arena de sílice de alta pureza y la arena Cerabeads, además de presentar un caso de estudio de una fundición que ha implementado con éxito el sistema de reciclaje con Cerabeads.

Características de las Cerabeads

La Tabla 1 compara la arena de sílice de alta pureza con la arena Cerabeads. En el caso de esta última su composición es mullita, lo que le otorga una mayor resistencia térmica que la arena de sílice. Gracias a esto, ayuda a prevenir defectos como los calcinados (*burn-on*).

Otra ventaja del Cerabeads es su baja expansión térmica, lo que permite fabricar piezas con alta precisión dimensional. Esto las hace ideales para la producción de componentes con dimensiones ajustadas al diseño (*near-net-shape*). Sin embargo, al cambiar de arena de sílice a Cerabeads, puede ser necesario ajustar los cálculos de expansión y contracción en los modelos de fundición.

Por otro lado, debido a su menor conductividad térmica y mayor capacidad de retención de calor, la arena Cerabeads puede reducir la velocidad de enfriamiento del molde. Esto podría requerir

	Silica sand	Cerabeads
		
Major constituent minerals	Quartz	Mullite
Crystalline Silica Content	Over 99%	Less than 0.1%
Chemical composition values	SiO ₂ 99%	Al ₂ O ₃ 61% SiO ₂ 36%
Refractoriness	SK34*/1,760°C	SK37/1,825°C
Bulk density	1.57 g/cm ³	1.67 g/cm ³
Thermal expansion coefficient*	1.5%	0.1%
Thermal Conductivity	0.68 W/(m · K)	0.53 W/(m · K)
Specific heat	1.07 MJ/(m ³ · K)	1.27 MJ/(m ³ · K)

*Thermal expansion coefficient test was conducted according to the test method (M-2) established by the Japan Foundry Association

modificaciones en el diseño de los bebederos o tiempos de enfriamiento más largos antes del desarenado.

En cuanto a la sílice cristalina, la arena de sílice de alta pureza contiene más del 99%, mientras que la arena Cerabeads tiene menos del 0.1%. Aunque medir la sílice cristalina en pequeñas concentraciones es complicado, en la siguiente sección se explica el método utilizado.

Análisis del Contenido de Sílice Cristalina en Cerabeads

La fracción respirable de sílice cristalina está clasificada como cancerígena en la categoría 1A según la Directiva (UE) 2017/2398 y el Real Decreto 1154/2020. Por consiguiente, es obligatorio documentarla en la Ficha de Datos de Seguridad (SDS) si su concentración es igual o superior al 0.1%. También se aplica un límite comunitario de exposición en el lugar de trabajo de 0,10 mg/m³, el cual es más estricto en España; 0,05 mg/m³.

Para el etiquetado según el GHS, es necesario cuantificar la sílice cristalina en cada una de sus fases minerales, como cuarzo y cristobalita. Sin embargo, los equipos típicos de difracción de rayos X (XRD) tienen dificultades para medir concentraciones cercanas al 0.1% con precisión. De hecho, en pruebas realizadas por terceros, el límite mínimo de detección suele ser del 0.5%.

Dado que la arena Cerabeads contienen niveles extremadamente bajos de sílice cristalina, se utilizaron mediciones por sincrotrón para obtener una evaluación más precisa, confirmando que el contenido de sílice cristalina es inferior al 0.1%.

Las mediciones se realizaron en el siguiente equipo de sincrotrón:

- **Institución:** Centro de Radiación Sincrotrón de Aichi (Japón).
- **Línea de haz:** BL8S1 (Difracción de rayos X en películas delgadas y medición de reflectividad)
- **Longitud de onda:** 1.355 Å.
- **Detector:** PILATUS (detector 2D).
- **Condiciones de medición:** Método 2θ/0, rango de 10–80°, pasos de 0.01°, velocidad de 10°/min.
- **Tiempo de medición:** Aproximadamente 7 minutos por muestra.

Para garantizar una cuantificación precisa, primero se realizaron curvas de calibración y una evaluación cuantitativa. Se utilizaron muestras estándar de sílice cristalina de la Japan Fibrous Materials Research Association, incluyendo Qtz.11 (cuarzo), Cri.21 (cristobalita baja) y Tri.31 (tridimita), con mullita (Al₂O₃: 60.7%) y alúmina (Al₂O₃: 99.7%) como materiales base.

Las muestras estándar fueron mezcladas con concentraciones de 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5% y 1.0% y luego medidas para generar curvas de calibración en microregiones. Durante el proceso, se consideraron variaciones en la mezcla y la orientación de la sílice cristalina. Para mayor precisión, cada muestra se midió en tres posiciones distintas y se calculó un valor promedio.

Para evitar interferencias entre picos en la difracción de rayos X, se seleccionaron tres picos característicos para cada fase mineral (excepto tridimita, con solo dos).

En la Figura 1, se muestran los patrones de difracción de rayos X (XRD) obtenidos al mezclar muestras de mullita con trazas de sílice

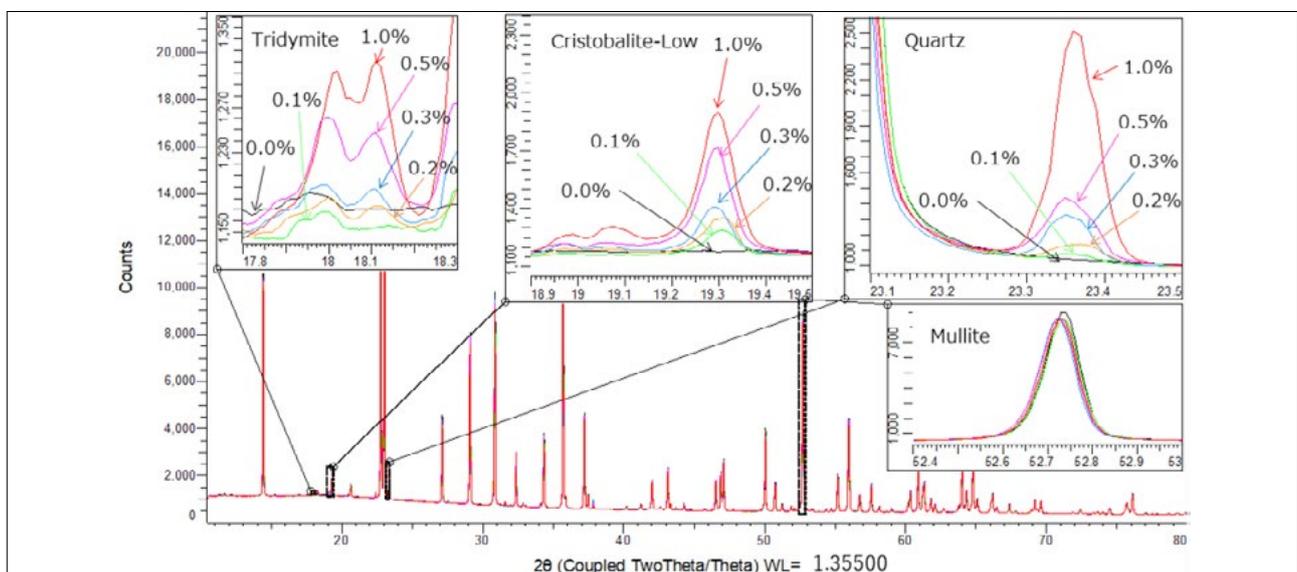


Figure 1. XRD pattern of a sample containing a small amount of crystalline silica.

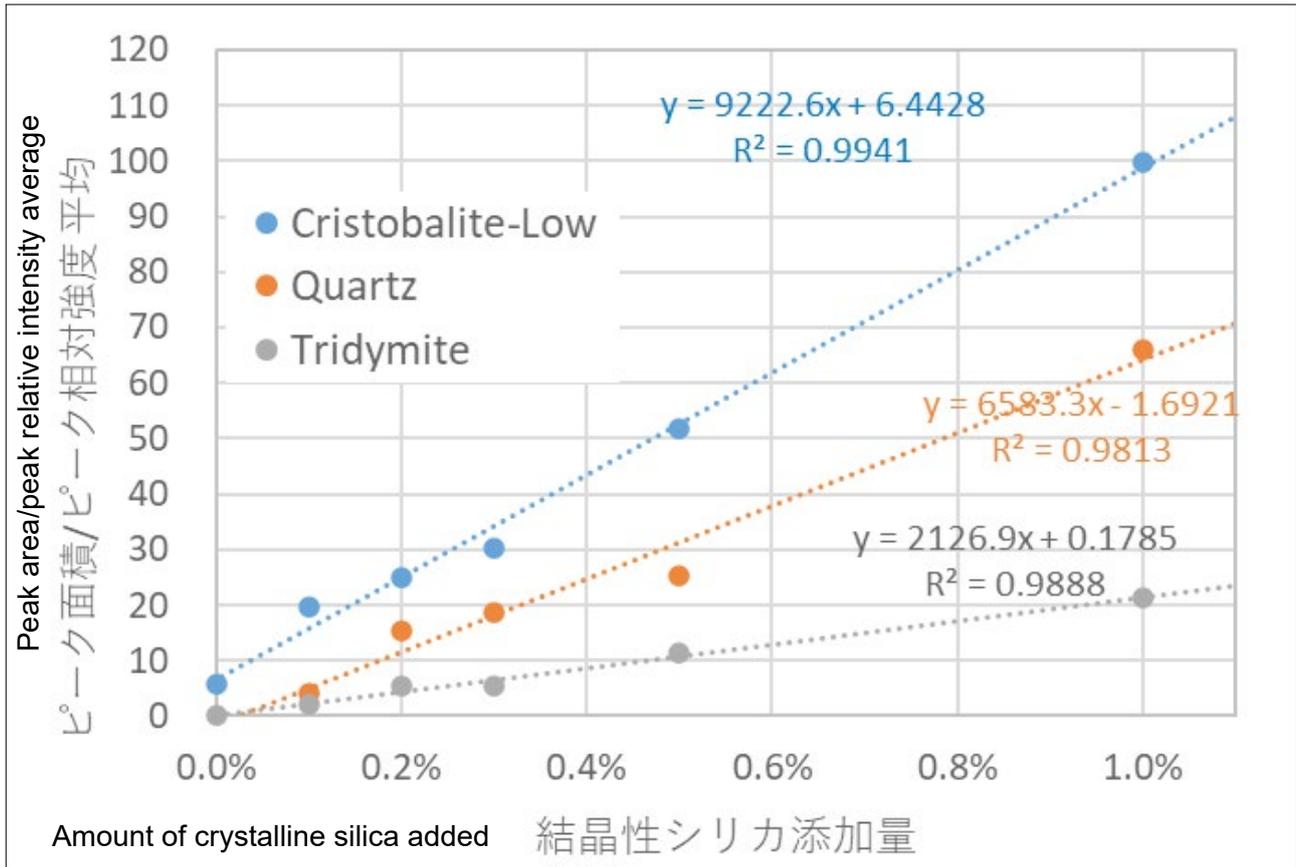


Figure 2. Created calibration curve.

crystalina. La ampliación en la parte superior derecha resalta el área del pico del plano (101) del cuarzo, donde incluso concentraciones del 0.1% y 0.2% fueron detectadas con claridad. En un análisis convencional con XRD (BRUKER D2 PHASER), estos valores podrían quedar enmascarados por el pico del plano (210) de la mullita a 23.07°.

Las curvas de calibración obtenidas se presentan en la Figura 2, donde todas las fases de sílice cristalina muestran un coeficiente de determinación $R^2 \geq 0.98$, lo que indica una alta precisión en los resultados.

Los resultados de la medición del contenido de sílice cristalina en la arena Cerabeads se muestra en la Figura 3. En ninguna de las

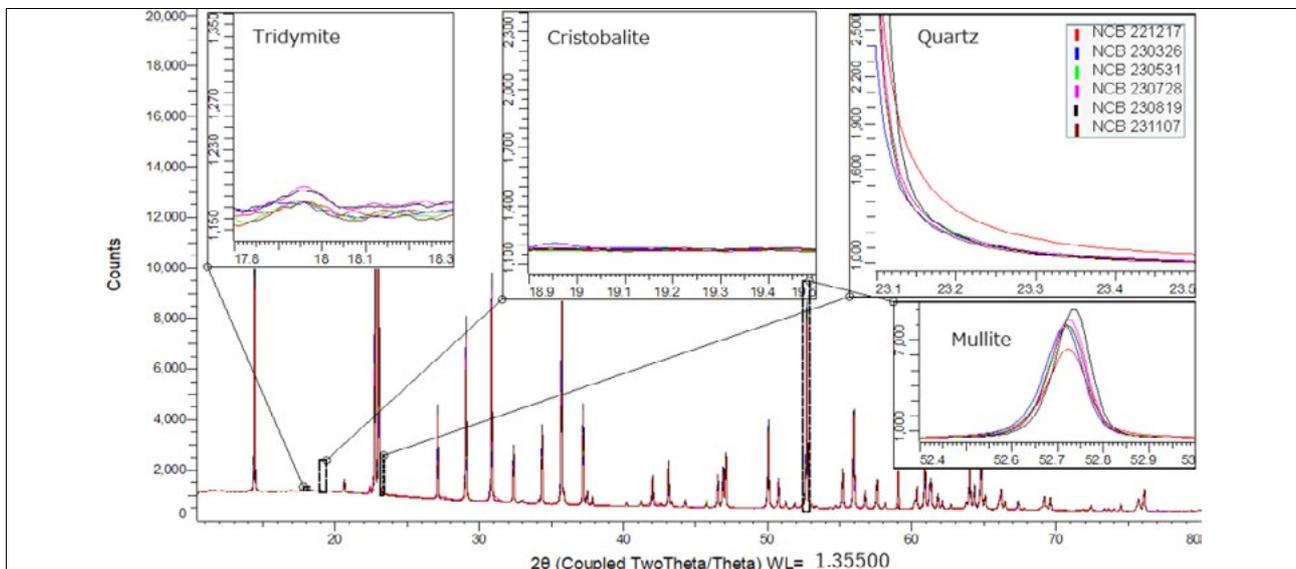


Figure 3. Measurement results of crystalline silica content in Cerabeads.

muestras analizadas se detectaron picos de sílice cristalina, lo que confirma que su contenido es inferior al 0.1%.

Caso de Estudio: Implementación de Cerabeads en una Fundición de Acero en España

Este estudio de caso analiza la introducción de Cerabeads en una fundición de acero en España. La Tabla 2 presenta una descripción general de la fundición.

La introducción de Cerabeads en esta fundición trajo mejoras en el proceso de producción, como se muestra en la Tabla 3.

Se redujo la cantidad de aglutinante utilizado y, gracias a la disminución de los defectos por burn-on, se eliminaron por completo los recubrimientos refractarios al agua. Los recubrimientos al alcohol se limitaron solo a ciertas áreas.

Como resultado, la empresa eliminó los costos de compra de estos recubrimientos y los costos operativos de los hornos de secado, lo que generó importantes ahorros.

Además, la recuperación de arena mejoró considerablemente, lo que permitió reducir tanto la cantidad de arena nueva comprada como la cantidad de residuos generados, incluyendo el polvo desechado.

Inicio del sistema de recirculación Cerabeads	2023
Proceso de aglutinante	Phenol urethane no bake (PUNB)
Productos	Piezas de desgaste, Piezas para minería
Metal	Acero resistente a la abrasión
Producción	500 toneladas/mes
Peso del producto	Máx. 280 kg/colada
Proceso de fusión	Horno de inducción
Proceso de recuperación	Mecánico y térmico
Propósito del sistema de recirculación Cerabeads	Reducir significativamente las concentraciones de sílice cristalina respirable en el entorno de trabajo

Table 2. Overview of the steel foundry that have introduced Cerabeads.

Antes		Después	
Arena	Arena de sílice y Cerabeads	Arena	Cerabeads
Binder	PUNB	Aglutinante	PUNB
Proporción de adición de aglutinante	1.0 - 1.1%	Proporción de adición de aglutinante	0.9 - 1.0%
Relación arena/metal	2.5	Relación arena/metal	2.5
Recubrimiento de lavado	All areas (splash) Water-based and alcohol-based, two-layer coating	Recubrimiento de lavado	Only in limited areas (spray) Alcohol-based, 1 layer
Recuperación	Mecánica y térmica	Recuperación	Mecánica y térmica
Eficiencia de recuperación	95%	Eficiencia de recuperación	99%

Tabla 3. Cambios en los procesos debido al sistema de recirculación Cerabeads.

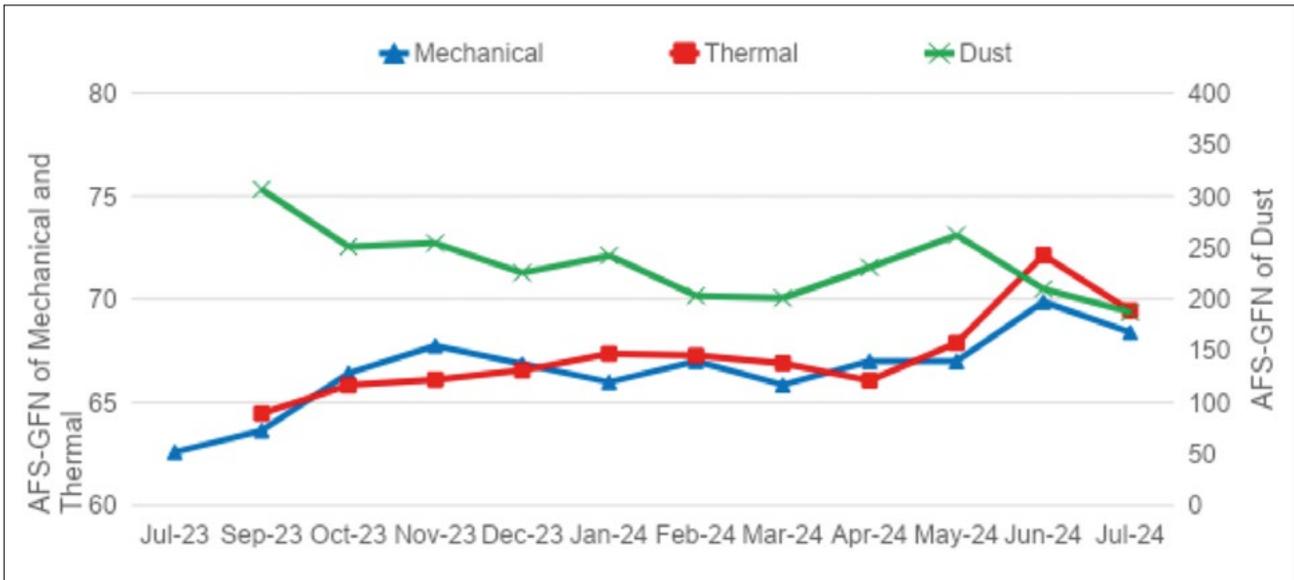


Figure 4. Changes in particle size after the introduction of Cerabeads loop system.

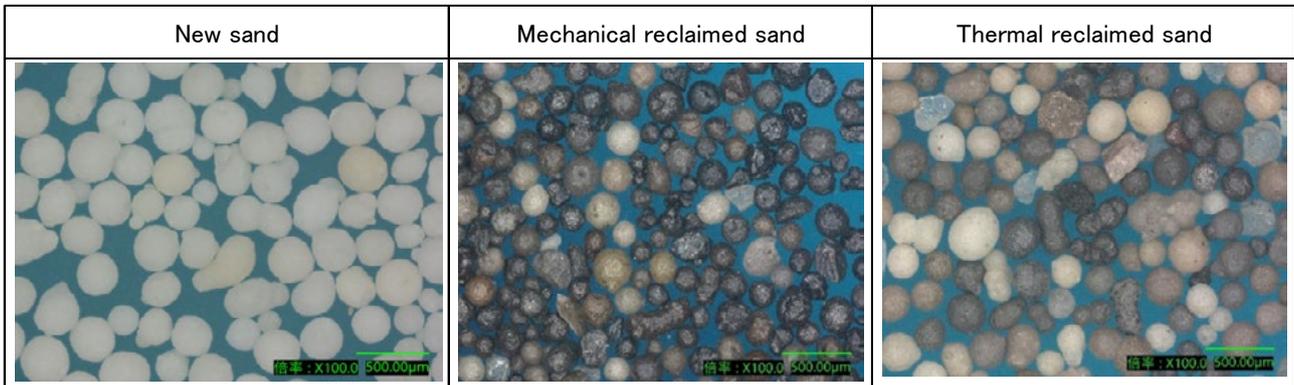


Figura 5. Observación fotográfica de las partículas de Cerabeads.

Después de implementar el sistema de recirculación, la distribución del tamaño de partícula de Cerabeads se mantiene estable en un rango de AFS 65-70, como se muestra en la Figura 4.

En la Figura 5, se pueden ver fotografías de la arena. Tanto la arena recuperada mecánicamente como la recuperada térmicamente conservan su forma original, sin signos de trituration o fusión, y lucen como arena nueva.

Beneficios adicionales de la introducción de Cerabeads en esta fundición incluyen:

La concentración de sílice cristalina respirable en el ambiente de trabajo, que antes de la introducción de Cerabeads excedía el límite reglamentario permitido y se redujo a aproximadamente $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tras la implementación del sistema de circuito cerrado con Cerabeads.

La compra de arena nueva se redujo en aproximadamente un 80% debido a una mayor eficiencia en la recuperación del material.

Los moldes no colapsaron incluso cuando se vertieron sin caja (en mota), lo que redujo las fugas de metal.

A pesar de la preocupación de que la menor capacidad de enfriamiento de la arena Cerabeads pudiera extender el tiempo de desmoldeo y reducir la productividad, se logró mantener el mismo tiempo de producción que con la arena de sílice.

Con base en estas razones, el estudio de caso concluyó que la sustitución de arena de sílice por Cerabeads redujo los costos totales de producción.

Cerabeads® se encuentra disponible en el mercado a través de HA Ilarduya, socio estratégico y tecnológico de larga trayectoria. Para consultas técnicas relacionadas con su aplicación, puede contactarse con Iñaki Ortiz de Zárate, responsable del producto en HA Ilarduya.

ITOCHU Cerasech Corporation
Daimu Muto / Yosuke Takai / Radim Opacity.