

03-057

Assessment of the sustainability of the use of steel residues in substitution of silica sand

Aitana Díaz; Valeriano Álvarez Cabal; Lorena De Arriba; Francisco Ortega Fernández

Universidad de Oviedo;

There are several applications that require the use of abrasives as a treatment for the preparation of surfaces, such stone, concrete, steel or wood, as a previous step to the application of paints or other coatings, in order to achieve their perfect adhesion.

Sand blasting consists of projecting silica sand through a stream of air driven by a compressor over parts and structures to clean the surface or prepare it for further treatments.

In addition to a series of products and by-products of value, the industrial system of steel manufacturing generates important volumes of waste, whose treatment requires the development of advanced technologies to reduce its environmental impact and to make the productive process compatible with sustainable development and circular economy.

Therefore, it is intended to study the use of the wastes from the steelmaking process as possible substitutes for the silica sand that has traditionally been used in the blasting processes, for which the correct characterization will be carried out and a study of its potential application market.

Keywords: Steel Making;blasting;slag

Valoración de la sostenibilidad del uso de residuos siderúrgicos en sustitución de arena de sílice

Existen multitud de aplicaciones que requieren el uso de abrasivos como tratamiento de preparación de superficies como paso previo a la aplicación de pinturas u otro tipo de revestimiento, a fin de conseguir una perfecta adhesión de los mismos. Los sectores de aplicación de esta técnica son muy diversos, desde la industria naval o la eliminación de óxidos en piezas férricas hasta el tratamiento de maderas o fachadas. Durante las últimas décadas han aparecido ciertas restricciones al uso de este material a causa de los problemas en la salud y seguridad que representa, por lo que se han introducido en el mercado otros materiales abrasivos, que pueden tener un origen natural o sintético. La fabricación de acero genera, además de una serie de productos y subproductos de valor, importantes volúmenes de residuos, cuyo tratamiento requiere el desarrollo de tecnologías avanzadas para reducir su impacto medioambiental y compatibilizar el proceso productivo con el desarrollo sostenible y la economía circular. Por ello, se pretende estudiar el uso de los residuos del proceso siderúrgico como posibles sustitutos de la arena de sílice que tradicionalmente se viene utilizando en los procesos de chorreado, para lo que se llevará a cabo su correcta caracterización.

Palabras clave: Siderurgia;residuos;chorreado

Correspondencia: Valeriano Alvarez Cabal valer@api.uniovi.es



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

1. Introducción

El chorreado superficial es un método de preparación de superficies que consiste en la aplicación de abrasivos a presión, cuyo propósito es asegurar la eliminación de materias perjudiciales para los posteriores tratamientos a realizar sobre la superficie, tales como aplicación de pinturas u otro tipo de revestimientos, de modo que, mediante la erosión, las partículas limpian y pulen la superficie, eliminando todo tipo de impurezas (Hutchings & Shipway, 1992).

Los parámetros a tener en cuenta en dicho tratamiento son presión, flujo de abrasivo, distancia a la superficie y ángulo de contacto. La relación entre la dureza de la superficie y la dureza del material abrasivo resulta fundamental a la hora de evaluar la validez del tratamiento, además de los efectos del tamaño y forma de partícula de abrasivo en el ratio de material eliminado (Gaspar et al., 2003).

Las principales aplicaciones del chorreado superficial son la limpieza de superficies de acero y hormigón, como pretratamiento del material para una mejor adhesión de las pinturas u otros tratamientos superficiales que se pretendan aplicar, el decapado superficial y la descontaminación de zonas radioactivas. Asimismo, el chorreado es uno de los métodos más utilizados como tratamiento anti-corrosivo, permitiendo la eliminación de la corrosión respetando al material base. Además, permite mejorar la apariencia física de determinados componentes, eliminar rebabas o mejorar la resistencia de materiales sometidos a grandes esfuerzos (Hansel, 1999).

El chorreado con abrasivos en seco es el método de preparación superficial más extendido en la mayoría de las industrias, como la industria de la automoción, la construcción de puentes o la construcción y reparación de barcos, entre otras (Kambham et al., 2009). Esto se debe, fundamentalmente, a las ventajas de esta tecnología sobre otras técnicas de tratamiento superficial: mejor protección de la superficie, reducción de los costes de mantenimiento, obtención de un coeficiente de fricción adecuado en el contacto entre dos superficies, incremento de la resistencia a la corrosión y a la oxidación de la superficie y mejora de la resistencia mecánica de las piezas o superficies tratadas.

La industria tradicional del chorreado superficial emplea como abrasivo la arena de sílice. En las últimas décadas, y debido a las graves afecciones que la sílice provoca en la seguridad y salud de las personas, han surgido restricciones a su uso, lo que ha fomentado la aparición de nuevos productos abrasivos de chorreado con menores cantidades de tal elemento en su composición.

2. Descripción del proceso

El chorreado superficial con abrasivos consiste en el impacto de una corriente de abrasivos de alta energía cinética propulsados con aire sobre una superficie, de modo que, mediante la fuerza del impacto, permitan la eliminación de los contaminantes superficiales, como se establece en la norma ISO 12944-4:1998 de pinturas y barnices sobre tipos y preparación de superficies. Los abrasivos más empleados para chorreado superficial son: arena, abrasivo vegetal (como cáscara de nuez), corindón (marrón o blanco), granalla cerámica, granalla plástica, granalla de acero esférica y angular, granalla de inoxidable, microesferas de vidrio, silicato de aluminio y silicato de hierro.

El personal encargado de la realización de este pretratamiento superficial deberá disponer de un equipo adecuado y de un conocimiento técnico suficiente de los procedimientos necesarios para poder realizar el trabajo de conformidad con las especificaciones exigidas. Para ello, deberán tenerse en cuenta las pertinentes normas de salud y seguridad. Es

sumamente importante que las superficies a tratar sean fácilmente accesibles y estén lo suficientemente iluminadas. Además, todo el trabajo de preparación de la superficie deberá ser debidamente supervisado e inspeccionado.

Las técnicas de chorreado superficial se pueden diferenciar, dependiendo de los materiales requeridos para la aplicación, en dos tipos: chorreado superficial en seco y chorreado superficial en húmedo, según indica la norma ISO 8504-2:2000 sobre métodos de preparación de superficies mediante limpieza por chorreado abrasivo. La diferencia entre las dos tipologías radica, fundamentalmente, en el uso de agua.

2.1 Chorreado en seco

El chorreado en seco es uno de los métodos más efectivo y utilizado en tratamiento superficial. Es el método empleado en astilleros, refinerías, industria del automóvil y otras instalaciones para eliminación de óxido, viejos revestimientos y otras impurezas (US Army Corps of Engineers, 1995), y consiste en la limpieza de la superficie mediante chorro de abrasivo impulsado por aire, de manera que impacte sobre la superficie con la energía suficiente como para asegurar que cualquier material extraño se elimina, aunque aparezca en forma de ligeras sombras o pequeños puntos. Este tipo de chorreado se puede llevar a cabo mediante diferentes métodos:

- Chorreado centrífugo

Este método se desarrolla tanto en instalaciones fijas como en unidades móviles donde el abrasivo se alimenta a ruedas rotativas o impulsores posicionados para lanzar el abrasivo a alta velocidad, mediante fuerza centrífuga, hacia la superficie a ser tratada.

El chorreado centrífugo puede aplicarse en modo continuo en piezas con superficies accesibles, así como en piezas con diferentes grados de oxidación, logrando un grado de preparación de la superficie Sa3 (Limpieza por chorro hasta que el acero quede visiblemente limpio, "metal blanco") dentro de los grados de preparación establecidos en la norma ISO 8501 de protección anticorrosiva de estructuras de acero mediante pintura.

No obstante, el chorreado centrífugo se debe llevar a cabo de manera cautelosa, por lo que suele quedar restringido a tareas repetitivas asociadas a altos volúmenes de rendimiento o procesos continuos.

- Chorreado mediante aire comprimido

En este caso, el método se desarrolla alimentando el abrasivo dentro de una corriente de aire y dirigiendo la mezcla abrasivo/aire a alta velocidad desde una boquilla hacia la superficie a tratar. El abrasivo se inyecta dentro de la corriente de aire mediante un tanque presurizado, o puede ser aspirado hacia la corriente de aire mediante succión desde un tanque despresurizado. Se emplea en la limpieza de piezas, incluso de grandes dimensiones, de todo tipo, así como en piezas con diversos grados de oxidación. Puede ser usado en tratamientos en continuo o de manera intermitente, así como cuando el chorreado centrífugo no puede ser aplicado.

Este sistema es muy versátil, y, al igual que ocurría en el caso anterior, permite alcanzar un grado de preparación Sa3, según norma ISO 8501. Aun así, el método cuenta con algunas limitaciones: da lugar a la aparición de polvo libre, por lo que su uso queda restringido a aplicaciones en las que existan sistemas de eliminación o retención del mismo, de forma que se cumplan con los niveles permitidos en cuanto a contaminación medioambiental.

- Chorreado mediante succión o vacío

Aunque este método es muy similar al chorreado mediante aire comprimido, en este caso la boquilla se encuentra encerrada en una cabeza de succión sellada a la superficie de acero,

de modo que recoge los restos de abrasivo y los contaminantes. Por ello, es válido para limpiezas superficiales localizadas donde el polvo y los residuos resultantes de otras técnicas de chorreado anteriores sean inaceptables.

Se trata de un método limpio, que produce poco polvo en el área, y permite la obtención de un grado de preparación de la superficie metálica Sa1/2 (Limpieza por chorro abrasivo a fondo). No obstante, tras un periodo extenso de limpieza, se puede alcanzar, mediante esta técnica, un grado de preparación Sa3, al igual que con los otros dos métodos. Debido a ello, este método es menos eficiente, en cuanto a consumo de tiempo, que los demás, y no es válido para limpieza de superficies de acero muy corroídas. Asimismo, no es aplicable en superficies con formas irregulares debido a la necesidad de sellar la cabeza de succión a la superficie y a las dificultades que podría generar el manejo del equipo.

2.2 Chorreado en húmedo

El chorreado en húmedo consiste en la proyección de abrasivo humectado mediante aire comprimido. Se trata de una técnica similar al chorreado con aire comprimido comentado en el apartado anterior, con la particularidad de que, en este caso, se añade, aguas arriba de la boquilla de proyección una pequeña cantidad de líquido (habitualmente agua limpia) a la corriente de aire/abrasivo. La corriente de agua permite obtener un método de chorreado libre de polvo en las partículas cuyo tamaño sea menor de 50 μm . El consumo de agua está controlado, y por lo general varía en el rango 15-25 l/h. Para paliar por completo la generación de polvo en el proceso, se puede añadir un inhibidor de polvo al líquido empleado.

La adición de agua está totalmente supervisada, de modo que no gotee por la boquilla. De esta forma se consigue que cada una de las partículas de abrasivo, individualmente, estén envueltas por una finísima capa de líquido que, con la eclosión de la partícula, prevenga la formación de polvo alrededor de la superficie que esté siendo tratada. Para este tipo de aplicaciones, el agua empleada ha de tener un bajo contenido en sales que evite la contaminación de las superficies tratadas.

Este tipo de chorreado es de aplicación en la limpieza de piezas de todo tipo, incluso en aquellas de gran tamaño. Además, es aplicable a materiales metálicos con diferentes grados de oxidación, ya que el líquido que forma parte del proceso permite el control de la cantidad de polvo generada.

3. Chorreado con arena de sílice

Una de las técnicas de chorreado superficial más empleadas tradicionalmente es el chorreado con arena de sílice, también denominado arenado, según establecen Young, Urquhart y Laing (2003). Tal es la importancia del uso de la arena de sílice en aplicaciones de chorreado, que con frecuencia cualquier tipo de chorreado con diferentes abrasivos se conoce como chorreado con arena.

El chorreado con arena consiste en proyectar las partículas de arena de sílice con aire comprimido para proporcionar una corriente de partículas de alta velocidad que permitan limpiar objetos metálicos, como estructuras de acero, o proporcionar textura al hormigón proyectado.

Este tipo de chorreado se puede realizar al aire libre, en salas de chorreado o en cabinas. En el caso de buques o estructuras de gran tamaño, suelen emplearse unidades móviles de chorreado. El proceso, como norma general, produce una gran cantidad de polvo proveniente de arena o de la propia pieza que esté siendo tratada (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo).



Figura 1: Tarea de chorreado al aire libre

La generación de polvo durante el tratamiento se debe a que, durante el chorreado, los gránulos de arena se descomponen en partículas muy pequeñas, de tamaños inferiores a 5 μm y no visibles a simple vista, que se denomina “fracción respirable”, susceptibles de ser inhaladas e incrustadas en los alveolos pulmonares, llegando a causar problemas respiratorios graves como la silicosis pulmonar (The National Institute for Occupational Safety and Health [NIOSH], 1974). El compuesto químico de mayor toxicidad presente en el polvo generado en este proceso es la sílice cristalina (SiO_2 , también denominado óxido de silicio), es decir, dióxido de silicio cristalizado como cuarzo o cristobalita. La arena de sílice empleada en los procesos de chorreado suele contener en su composición entre 94 y 95% de dicho agente químico.

3.1 Daños para la salud

La tarea de chorreado con arena produce daños en el sistema respiratorio principalmente, pero también puede provocar irritación en ojos y piel.

Como se ha mencionado en el apartado anterior, la principal vía de entrada de la sílice cristalina en el organismo humano es la vía respiratoria. La inhalación de la fracción respirable de la sílice cristalina puede producir silicosis, tuberculosis, cáncer de pulmón y enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC).

Tradicionalmente, la sílice ha estado asociada a la silicosis (Rosenberg, Yuan & Fulmer, 2006), que es una enfermedad respiratoria grave, progresiva e irreversible, que puede ocasionar incapacidad laboral e incluso la muerte. Está reconocida como enfermedad profesional en caso de que se diagnostique en personas que hayan realizado trabajos con exposición a la inhalación de polvo libre de sílice. Esta enfermedad está caracterizada por la formación de fibrosis en los pulmones a consecuencia de la sedimentación de sílice en los alvéolos. Su sintomatología es la dificultad en la respiración, asociada a la realización de un esfuerzo físico, además de tos repentina, dolor torácico y debilidad física en algunos casos. La tuberculosis, el cáncer de pulmón y la EPOC se presentan principalmente en personas que ya están enfermas de silicosis, si bien esta última puede cursar sin síntomas que alerten de su evolución.

Los factores de riesgo que aumentan la probabilidad de que aparezcan daños para la salud humana como consecuencia de la exposición a la sílice cristalina son, además de la propia composición de la arena, los siguientes:

- El tamaño de las partículas de arena fragmentada. Las partículas inferiores a 16 μm aumentan la probabilidad de alcanzar la zona alveolar de los pulmones a medida que disminuyen en tamaño.

- La concentración ambiental de la sílice cristalina.
- El tiempo de exposición y la carga de trabajo.
- La exposición a otros agentes. Los operarios encargados de las tareas de chorreado se encuentran expuestos, además de a la inhalación de la propia arena de sílice, a las partículas desprendidas de las superficies metálicas sobre las que se trabaja.
- El grado de implantación y la adecuación de las medidas preventivas.

Para poder eliminar los riesgos asociados a la tarea de chorreado con arena, el operario destinado a efectuar el trabajo ha de estar completamente protegido mediante un equipo de protección respiratoria que le aisle de la inhalación de la fracción respirable. Otras medidas de eliminación del riesgo para la salud humana serían la realización del chorreado en un proceso cerrado y confinado, de forma que la operación se realice en el interior de una sala o unidad de trabajo, permaneciendo los operarios en el exterior, sin entrar en contacto con la corriente de abrasivo, o su realización en salas de chorreado con sistemas de ventilación que permitan suministro de aire limpio que asegure la captación y extracción del polvo generado en el proceso.



Figura 2: Tarea de chorreado en sala de chorreado

3.2 Situación actual de la técnica

Como se ha comentado en el epígrafe anterior, el chorreado con arena de sílice provoca una gran cantidad de polvo durante su ejecución que provoca daños en la salud humana, además de en el medio ambiente. Debido a ello, en muchos países está comenzando a prohibirse el uso de abrasivos que contengan más de 0,1% de sílice libre. La arena de sílice empleada en tareas de chorreado contiene mucha más cantidad de sílice libre que este valor, ya que, como se ha indicado, presenta en su composición entre 90 y 95% de sílice, e incluso más. Por este motivo, en numerosos países se han establecido leyes que prohíben el uso de arena de sílice como abrasivo de chorreado. Tal es el caso de Holanda, donde esta técnica está prohibida desde 1956.

Las afecciones para la salud humana de la arena de sílice y las medidas legislativas restrictivas en cuanto a su uso establecidas hasta el momento podrían reducir la demanda de la arena de sílice en muchos mercados.

El uso de la arena de sílice como abrasivo se está sustituyendo progresivamente por otros abrasivos que contienen menor cantidad de sílice cristalina en su composición, tales como escorias de cobre, granate, olivino, microesferas de vidrio o silicatos de aluminio, entre otros, cuyo uso se considera más seguro.

No obstante, la arena de sílice sigue empleándose en tareas de chorreado. Por ejemplo, en Estados Unidos, durante el año 2014, uno de los mayores consumos de arena de sílice se produjo en este tipo de operaciones (U.S. Geological [USGS], 2014):

Tabla 1: Consumo de arena de sílice para chorreado en EE.UU. durante el año 2014 (USGS, 2014)

Uso	Cantidad (toneladas métricas)	Valor (\$)	Valor unitario (\$/ton)
Abrasivos, chorreado	416,000	23,100,000	55.62

4. Otros abrasivos de chorreado

Debido a la prohibición del chorreado con arena de sílice que ha surgido en números países a causa de las enfermedades respiratorias ocasionadas por el mismo, han comenzado a aparecer otro tipo de abrasivos que contienen porcentajes de sílice libre menores, y cuya elección depende de la superficie a tratar y del resultado que se pretenda obtener.

El término abrasivo de chorreado engloba a una gran variedad de materiales empleados para establecer un determinado grado de limpieza o preparación superficial sobre superficies de acero u hormigón, permitiendo la eliminación de contaminantes superficiales o revestimientos previos (Hansink, 1984). Los abrasivos son materiales caracterizados por su alta dureza y su capacidad de corte. La mayoría de ellos tienen un origen mineral, y son obtenidos directamente de la naturaleza, como la arena, mientras que otros se obtienen mediante procesos químicos. Suelen tener estructura cristalina, formados por enlaces químicos de alta resistencia, que les conceden una gran estabilidad frente a las alteraciones químicas y dureza frente a la compresión. Además, son malos conductores tanto de electricidad como de calor. En la actualidad, están regulados, a través de ISO 8504-2:2000, para su uso como abrasivo de chorreado una gran variedad de materiales sólidos, naturales y sintéticos, y varios líquidos. Cada uno de ellos proporciona un rendimiento característico y un acabado superficial determinado.

Las características más importantes de un abrasivo son su dureza, el tamaño del grano y la estructura afilada de sus bordes. El tamaño y la forma de las partículas de un abrasivo afectan a su comportamiento y a la textura resultante en la pieza tratada. Wadell (1933) y Heywood (1933) fueron los primeros en realizar estudios sobre la forma de la partícula, considerándola según dos parámetros distintos: las proporciones relativas y la forma geométrica. Por otro lado, Khan y Haque (2007) sostiene que la dureza de las partículas de abrasivo influye directamente en la geometría del corte, y que la profundidad de penetración del chorro de abrasivo depende de la relación entre la dureza del material a tratar y la dureza del abrasivo (Boud et al., 2010).

Tabla 2: Forma de la partícula de abrasivo según ISO 8504-2:2000

Designación y forma inicial de la partícula	Símbolo
Shot - redondeado	S
Grit – angular, irregular	G
Cilíndrico - afilado	C

Los materiales sólidos empleados comúnmente se reflejan en la figura 3, y se diferencian en materiales abrasivos metálicos y materiales abrasivos no metálicos.

El tipo de abrasivo permite determinar los estándares de limpieza, la velocidad del tratamiento y el perfil de superficie resultante tras la aplicación del chorro de abrasivo. Además, a la hora de seleccionar un abrasivo, es muy importante tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La influencia de determinado tamaño de partícula en el perfil de superficie resultante es habitualmente mayor para los abrasivos metálicos debido a las características de rotura, y a que las diferencias de densidad afectan a la energía cinética de las partículas abrasivas.
- Una mezcla equilibrada de tamaños de partícula producirá el nivel óptimo de limpieza y rugosidad en la pieza tratada.

Debido a la importancia del uso correcto de los abrasivos para el medio ambiente y la salud humana, los gobiernos establecen requisitos técnicos generales para los abrasivos, que se resumen a continuación:

- Los abrasivos deben estar secos (excepto cuando se agreguen a sistemas de chorreo en húmedo o mediante lodos) y deberán fluir libremente para circular de manera continua por el chorro de proyección.
- Los abrasivos deberán cumplir con los requisitos especificados en las normas ISO 11124 e ISO 11126, y estar libres de contaminantes corrosivos o que afecten a la adherencia.
- Los abrasivos sintéticos provenientes de escorias industriales que hayan sido granuladas con agua salina (como agua de mar), o los abrasivos reutilizables que no se hayan limpiado de manera apropiada antes de volver a usarse, no están permitidos debido a su efecto perjudicial sobre la superficie de acero que se vaya a tratar.

4.1 Abrasivos no metálicos

Como se ha mencionado con anterioridad, los abrasivos que se pueden emplear en el tratamiento de superficies de acero antes de la aplicación de pinturas y otros tipos de revestimientos superficiales se dividen abrasivos metálicos y no metálicos.

Los abrasivos metálicos tienen un coste superior a los abrasivos no metálicos, pero pueden ser recuperados, lo que incrementa su eficiencia. Sin embargo, el reciclado del producto no es viable en todas las operaciones de chorreado. Por ejemplo, cuando se chorrea al aire libre, el abrasivo se pierde. Por ello, las partículas de abrasivo metálicas se utilizan principalmente en túnel de chorreado, mientras que en tareas de chorreo en exterior se prefiere el uso de abrasivos no metálicos.

Los abrasivos de chorreado no metálicos se clasifican de acuerdo con el material del que provienen y su origen o modo de fabricación (natural o sintético), tal y como queda reflejado en la figura 3. Presenta una dureza superior a 6 Mohs.

Los abrasivos no metálicos sintéticos se obtienen mediante procesos mecánicos, electrónicos o industriales, como subproductos de industrias diversas. Tal es el caso de la escoria de horno alto, o silicato de hierro, originado como residuo sólido en la fabricación del acero en la industria siderúrgica.

La reutilización de residuos sólidos, y su conversión en subproductos, supone un desafío para la sociedad, pues además de añadir valor a los residuos de diferentes industrias para fomentar el desarrollo sostenible, permite competir con los materiales tradicionales. Además,

mientras que la producción industrial continúe aumentando, también lo harán los costos asociados a su eliminación y vertido.

Type		Abbreviation	Initial particle shape (see Table 2)	Comparator ^a	Remarks	
Metallic (M) blast-cleaning abrasives ^c	Cast iron	Chilled	M/CI	G	G	Mainly for compressed-air blast-cleaning
	Cast steel	High-carbon	M/HCS	S or G	S ^b	Mainly for centrifugal blast-cleaning
		Low-carbon	M/LCS	S	S	
	Cut steel wire	—	M/CW	C	S ^b	
Non-metallic (N) blast-cleaning abrasives ^c	Natural	Olivine sand	N/OL			Mainly for compressed-air blast-cleaning
		Staurolite	N/ST	S	G	
		Garnet	N/GA	G	G	
	Synthetic	Iron furnace slag (Calcium silicate slags)	N/FE	G	G	Mainly for compressed-air blast-cleaning
		Copper refinery slag (Ferrous silicate slags)	N/CU			
		Nickel refinery slag	N/NI			
		Coal furnace slag (Aluminium silicate slags)	N/CS			
	Fused aluminium oxide	N/FA	G	G	—	
^a Comparator to be used when assessing the resultant surface profile. The method for evaluating the surface profile by comparator is described in ISO 8503-2.						
^b Certain types of abrasive rapidly change their shape when used. As soon as this happens, the appearance of the surface profile changes and becomes closer to that of the "shot" comparator.						
^c International Standards for the range of abrasives given here are listed in annex A: the ISO 11124 series for metallic blast-cleaning abrasives and the ISO 11126 series for non-metallic blast-cleaning abrasives.						

Figura 3: Abrasivos para chorreo en limpieza de superficies de acero según ISO 8504-2:2000

4.2 Residuos siderúrgicos como abrasivos no metálicos

La industria del acero genera un gran número de residuos inherentes al proceso industrial que requieren un tratamiento posterior que reduzca su impacto ambiental y permita su uso para hacerlos compatibles con el desarrollo sostenible, de modo que puedan ser considerados como subproductos.

De todos los residuos generados en el proceso siderúrgico, las escorias representan el mayor volumen. Las escorias siderúrgicas se obtienen en diferentes escenarios del proceso de fabricación del acero. Existen tres tipos de escoria siderúrgica, principalmente: escoria de horno alto (escoria BF), escoria de convertidor (escoria BOF) y escoria de horno de arco eléctrico (escoria EAF) (Amaral de Lima, 1999). De todas las escorias siderúrgicas, la escoria BOF es la que presenta un mayor problema en cuanto a los volúmenes generados y las dificultades presentadas para su valorización. Se trata de un material no peligroso, que en la actualidad se envía a vertedero.

Como ha quedado reflejado en apartado anterior, la escoria BF aparece registrada en la norma ISO 8504-2 como un abrasivo no metálico de origen sintético, ya que satisface las características requeridas para un abrasivo de esta categoría, sustituyendo al empleo de arena de sílice para este tipo de operaciones. Para su utilización como abrasivo, la escoria BF se somete a un proceso de granulación en agua, secado y tamizado, con o sin molienda

mecánica. Los requisitos que ha de cumplir la escoria BF para su uso como abrasivo aparecen en la norma ISO 11126-6:1993, y se recogen en la tabla siguiente. En cuanto al tamaño de partícula, no debe exceder los 3.15 mm, y la proporción de partículas de tamaño inferior a 0.2 mm ha de ser menor del 5%.

Tabla 3: Requisitos para los abrasivos de escoria de horno alto

Propiedad	Símbolo
Densidad aparente (kg/m ³)	(3.0 – 3.3) x 10 ³
Dureza Mohs	min. 6
Humedad (%)	máx. 0.2
Conductividad del extracto acuoso (mS/m)	máx. 25
Cloruros solubles en agua (%)	máx. 0.002

Sin embargo, la escoria BOF no aparece reflejada en las normas ISO mencionadas. En cambio, en comparación con los abrasivos no metálicos sintéticos contemplados en ellas, se observa que las propiedades de dicha escoria son parecidas. Cabe destacar que la escoria BOF presenta un contenido en sílice menor que los otros tipos de abrasivos que se utilizan en sustitución de la arena de sílice, tal y como se puede apreciar en la tabla 4. La composición química de la escoria BOF difiere bastante de la de la escoria BF, principalmente por la presencia de cal, que se encuentra, en parte, es forma de cal libre.

Tabla 4: Comparativa de las composiciones químicas de la escoria BF y BOF (Centro de estudios y experimentación de obras públicas [CEDEX], 2007)

Compuesto	Escoria BF	Escoria BOF
SiO ₂	32-37	16
Al ₂ O ₃	10-14	1.20
CaO	38-42	48
FeO	0.4-0.81	16-27

La escoria BOF es limpia, dura (presenta una dureza Mohs de 7, superior a la de la mayoría de los abrasivos no metálicos que actualmente sustituyen a la arena de sílice), pesada, angular y muy poco pulida. Se trata de un material de color grisáceo cuando se encuentra seco, que presenta textura porosa y áspera. Su densidad aparente es elevada, del orden de 3 t/m³ o más, como consecuencia de su contenido en hierro. Sus características físicas se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 5: Características físicas de la escoria BOF (Andrés Vizán, 2011)

Característica	Valor
Peso unitario	2.77
Absorción de agua (%)	1.29
Dureza Mohs	7
Pérdida de abrasión (Los Ángeles) (%)	17.6

pH	9.6
Peso específico de las partículas (t/m ³)	3.45
Porosidad real (%)	4.33

5. Conclusiones

Tal y como se ha visto a lo largo de este artículo, la técnica de chorreado mediante abrasivos como pretratamiento de superficies se encuentra muy extendida a lo largo de todo el mundo, estando presente en multitud de sectores industriales, tales como el sector naval, la construcción u otro tipo de industrias.

Si bien los procesos de chorreado superficial se encontraban ligados históricamente al uso de arena de sílice como abrasivo, en las últimas décadas su uso ha ido disminuyendo, existiendo países donde la técnica está totalmente prohibida, debido a las afecciones al medio ambiente y a la salud de las personas generadas por su aplicación. Por ello, han surgido nuevos abrasivos, con origen natural o sintético, cuyo uso puede considerarse nocivo para el ser humano y más respetuoso con el medio ambiente.

Los abrasivos de origen sintético comentados en el artículo presentan la ventaja añadida de favorecer la economía circular y el desarrollo sostenible, ya que, al tener origen en diferentes industrias, permiten el paso de residuo, considerado como un problema a eliminar, a subproducto con valor añadido como materia prima para procesos de chorreado superficial. No se debe olvidar que la industria siderúrgica genera, junto a sus productos, un gran volumen de residuos que, de no ser posible su valorización, terminarán almacenados en vertederos, con el consiguiente impacto medioambiental y ocupación del territorio.

Por lo tanto, la industria del tratamiento superficial se presenta como una potencial consumidora de dichos residuos siderúrgicos, puesto que satisfacen las condiciones establecidas para ser considerados abrasivos para chorreado. Por este motivo, la escoria de horno alto (escoria BF) ya aparece registrada en las normas ISO como abrasivo no metálico de origen sintético.

Mediante este estudio se ha comprobado que las escorias de acería (escorias BOF), debido a sus propiedades químicas y físicas, podrían tener cabida en este sector, pues presentan un grado de dureza superior a algunos de los abrasivos actualmente considerados, y la principal ventaja de presentar menor cantidad de sílice en su composición.

Para poder garantizar su validez como abrasivo para chorreado sería conveniente desarrollar ensayos a escala de laboratorio y a escala industrial, a fin de comprobar y monitorizar su comportamiento en situaciones de trabajo reales.

6. Bibliografía

- Amaral de Lima, L. (1999). *Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental*. Tesis doctoral no publicada, Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Andrés Vizán, S. (2011). *Valoración tecno-ambiental de las escorias de acería LD mediante análisis dinámico del ciclo de vida*. Tesis doctoral no publicada, Universidad de Oviedo, España.
- Boud, F., Carpenter, C., Folkes, J., & Shipway, P.H. (2010). Abrasive waterjet cutting of a titanium alloy: the influence of abrasive morphology and mechanical properties on workpiece grit embedment and cut quality. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 2197-2205.

- Centro de estudios y experimentación de obras públicas (2007). *Actualización del catálogo de residuos reutilizables en construcción*. Ministerio de Fomento. Gobierno de España.
- Gaspar, P., Hubbard, C., McPhail, D., & Cummings, A. (2003). A topographical assessment and comparison of conservation cleaning treatments. *Journal of Cultural Heritage*, 4, 294-302.
- Hansel, D. (1995). Abrasive blasting systems, *Metal finishing*, 97, 29-55.
- Hansink, J.D. (1984). An introduction to abrasives for protective coating removal operations, *Journal of Protective Coatings & Linings*, 17, 8755-1985.
- Heywood, H. (1933). Calculation of the specific surface of a powder, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 125, 383-459.
- Hutchings, I. M., & Shipway, P. (1992). Tribology. Friction and wear of engineering materials. *Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 207.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo. 006. *Chorroado con arena de piezas y estructuras metálicas: exposición a sílice cristalina*. Madrid: Gobierno de España.
- Kambham, K., Sangameswaran, S., Datar, S., & Kura, B. (2009). Evaluation of total particulate matter emission factors for copper slag in dry abrasive blasting. *Int. J. Environment and Pollution*, 37, 422-436.
- Khan, A. A., & Haque, M. M. (2007). Performance of different abrasive materials during abrasive water jet machining of glass. *Institution of Mechanical Engineers. Journal of Materials Processing Technology*, 191, 404-407.
- Rosenberg, B., Yuan, L., & Fulmer, S. (2006). Ergonomics of abrasive blasting: A comparison of high pressure water and steel shot. *Applied Ergonomics*, 37, 659-667.
- The National Institute for Occupational Safety and Health (1974). *Industrial Health and Safety Criteria for Abrasive Blast Cleaning Operations* (número de publicación 75-122). Cincinnati: U.S. Department of health education and welfare. Public Health Service.
- U.S. Geological Survey (2016). *2014 Minerals Yearbook. Silica [Advance Release]*. U.S. Department of the Interior.
- US Army Corps of Engineers (1995). Painting: new construction and maintenance. *Surface preparation*, 4-15.
- Wadell, H. (1933). Sphericity and roundness of rock particles, *The Journal of Geology*, 41, 310-331.
- Young, M.E., Urquhart, C.C., & Laing, R.A. (2003). Maintenance and repair issues for stone cleaned sandstone and granite buildings. *Building and environment*, 38, 1125-1131.