Cod. 9602 | Ingeniería y tecnología del medio ambiente | 3308.02 Residuos industriales

Evaluación de la utilización de escorias siderúrgicas bof para la preparación superficial de materiales por abrasión

Evaluation of the use of bof slags for preparing surface by blasting

Marina Díaz-Piloñeta , Francisco Ortega-Fernández , José-Manuel Mesa-Fernández y Henar Morán-Palacios

Universidad de Oviedo (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9602

El sistema productivo actual se encuentra en crisis frente a los avances de una sociedad que cada vez desarrolla una mayor conciencia y sensibilidad ante los problemas medioambientales. El modelo de producción lineal basado en "tomar-fabricar-consumir-eliminar" es agresivo con el medio y las estimaciones muestran que continuando en esta línea no tardarán en agotarse las fuentes de suministro, tanto materiales como energéticas. Además, tiene una fuerte dependencia de las materias primas, lo que conlleva un riesgo asociado al suministro, precios elevados y con mucha volatilidad, así como una reducción significativa del capital natural.

Como consecuencia, los países desarrollados están adoptando políticas para promover un cambio hacia la denominada economía circular [1]. La economía circular busca maximizar los recursos disponibles, tanto materiales como energéticos, para que permanezcan el mayor tiempo posible en el ciclo productivo y aspira a reducir al máximo la generación de residuos y aprovechar eficientemente aquellos cuya generación no se haya podido evitar. Pretende, por tanto, desvincular el crecimiento económico del consumo finito de recursos.

Concretamente, en la industria siderúrgica se generan una gran cantidad de residuos de forma inherente al proceso productivo. De todos estos residuos, los más importantes en términos de volumen de producción son las escorias (90%). A nivel mundial, estos residuos representan más de 400 millones de toneladas al año [2]. Solo en Europa se generan de media anualmente 45 millones de toneladas de escorias, lo que supone un verdadero reto para la economía circular [3]. Las escorias son residuos sólidos compuestos principalmente de sílice, óxido de calcio, óxido de magnesio y óxidos de aluminio y hierro. En función del tipo de proceso se generan tres tipos principales de escoria: escoria de horno alto (Blast Furnace, en adelante BF), escoria de acería, generalmente denominada BOF (Basic Oxygen Furnace) o LD por ser generada en el convertidor de acero mediante el proceso de Linz-Donawitz y escoria de horno de arco eléctrico, conocida como EAF (Electric Arc Furnace) [4]. Aunque todas se generan en grandes cantidades, el mayor problema de almacenamiento está asociado a la BF y la BOF. Por cada tonelada de acero se producen entre 130 y 100 kg de acuerdo con la composición y proceso de fabricación del acero [5]cold to cold, de modo que en 2018 se generaron entre 190 y 290 millones de toneladas de escoria en el mundo [6]. Aunque se han hecho esfuerzos por reciclar dicha escoria, por ejemplo, como material en el sector de la construcción, actualmente todavía una parte significativa acaba en el vertedero. En Europa, el porcentaje de utilización de dicha escoria es alrededor del 87 % y en Estados Unidos el 84,4 %, pero en otros países es muy inferior, como es el caso de China donde ronda el 30 % [7].

En la búsqueda de soluciones es preciso incidir en aquellas aplicaciones finales que consuman porcentajes significativos de la generación. El campo de la ingeniería civil resulta, por tanto, un candidato idóneo dado que es el que mayor cantidad de áridos y material consume.

Una de las funciones de la ingeniería civil es la construcción de estructuras de materiales muy diversos que tienen que aguantar condiciones en entornos hostiles de trabajo. La preparación inicial de las superficies, eliminando todo resto de suciedad o corrosión y dotándolas de una rugosidad adecuada [8], es una tarea vital para proteger la superficie mediante el recubrimiento con algún tipo de material protector frente a la degradación de la corrosión, la fatiga y el desgaste. El método más utilizado para ello es el chorreado superficial, que consiste en propulsar una corriente de material abrasivo disperso en un medio (líquido o gas) contra una superficie a alta presión. Además, también es adecuado para eliminar la corrosión y otros residuos en algunas industrias y estructuras civiles, mejorar la apariencia física de determinados componentes, eliminar rebabas, etc. Debido a ello, esta tecnología tiene cabida en multitud de sectores constructivos e industriales, como son, entre otros, el sector aeronáutico, la automoción, la energía eólica o la industria ferroviaria.

Actualmente esta operación se realiza con abrasivos tradicionales, como la arena de sílice o granalla metálica, lo que requiere la producción de material y consumo de recursos. Sin embargo, la escoria puede mejorar la sostenibilidad de las operaciones si se consigue reemplazar estos áridos de nueva producción por escoria residual ya almacenada.

Por tanto, el principal objetivo del presente trabajo es estudiar la posible utilización de las escorias siderúrgicas como abrasivos, así como de analizar las características y propiedades que deben cumplir para su introducción en el sector, minimizando la necesidad de extraer áridos naturales.

1. EL CHORREADO SUPERFICIAL

El chorreado superficial con abrasivos consiste en el impacto de una corriente de abrasivos con alta energía cinética propulsados sobre una superficie, de modo que, mediante la fuerza del impacto, se eliminen los contaminantes superficiales, como se establece en la norma UNE-EN ISO 12944-4 [9], cuyo objetivo fundamental es producir una superficie limpia y libre de todo tipo de suciedad. Las técnicas de chorreado superficial se pueden diferenciar en dos tipos, dependiendo de los materiales requeridos para la aplicación: chorreado superficial en seco y chorrea-

do superficial en húmedo, según indica la norma UNE-EN ISO 8504-2 [10].

Los abrasivos son materiales caracterizados por su alta dureza y capacidad de corte. La mayoría de ellos tienen origen mineral, y son obtenidos directamente de la naturaleza, como la arena, mientras que otros se obtienen mediante procesos químicos. Los parámetros técnicos del proceso, como la eficiencia o la rugosidad, están influenciados por muchos factores [11], como la distancia del dispositivo de pulverización de la superficie de trabajo, el tipo y tamaño de los granos o la presión y el tiempo de tratamiento. Las características más importantes de un abrasivo son su dureza, el tamaño del grano y la estructura afilada de sus bordes. La dureza de las partículas de abrasivo influye directamente en la geometría del corte [12] y la profundidad de penetración depende de la relación entre la dureza del material a tratar y la dureza del abrasivo [13].

Para una correcta utilización, los abrasivos deben estar secos (excepto cuando se agreguen a sistemas de chorreo en húmedo) y deben fluir libremente para circular de manera continua por el chorro de proyección. Los requisitos que deben cumplir vienen reflejados en las normas UNE-EN ISO 11124 [14] y UNE-EN ISO 11126 [15], y han de estar libres de contaminantes corrosivos o que afecten a la adherencia. En la actualidad, están regulados a través de UNE-EN ISO 8504-2:2002 [10] 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.

Básicamente, se diferencian entre metálicos y no metálicos. Los metálicos tienen un coste superior a los 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, ya que, 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 para chorreo en exterior se prefiere el uso de abrasivos no metálicos. Estos últimos se clasifican de acuerdo con el material de procedencia y su origen o modo de fabricación (natural o sintético).

El abrasivo más comúnmente empleado desde hace décadas es la arena de sílice [16]. El proceso, como norma general, produce una gran cantidad de polvo [17] ya 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, denominada "fracción respirable", susceptibles de ser inhaladas e incrustadas en los alveolos pulmonares, llegando a causar problemas respiratorios graves como la silicosis pulmonar [18]. Debido a estos problemas, no sólo de salud, sino también de calidad ambiental, en muchos países, como es el caso de Holanda, está comenzando a prohibirse el uso de abrasivos que contengan más de 0,1% de sílice libre. Por este motivo, el uso de la arena de sílice se está sustituyendo progresivamente por otros abrasivos tales como escorias de cobre, granate, olivino, microesferas de vidrio o silicatos de aluminio, entre otros, cuyo uso se considera más seguro.

Los abrasivos sintéticos se obtienen mediante procesos mecánicos, electrónicos o industriales, como subproductos de industrias diversas. Concretamente, la escoria BF resultante del proceso siderúrgico, aparece registrada en la norma UNE-EN ISO 8504-2 [10] como un abrasivo no metálico de origen sintético siendo una alternativa a la arena de sílice para este tipo de operaciones. Los requisitos que ha de cumplir para su uso aparecen reflejados en la norma UNE-EN ISO 11126-6 [19]. La escoria BOF, sin aplicaciones alternativas relevantes, no aparece reflejada en la norma mencionada, pero, en comparación con los abrasivos no metálicos sintéticos contemplados en ella, se observa un gran potencial debido a sus propiedades físicas y químicas. Para poder garantizar su validez como abrasivo de chorreado es necesario el desarrollo de ensayos a escala de laboratorio e industrial, a fin de comprobar su comportamiento en situaciones de trabajo reales.

2. METODOLOGÍA

La evaluación de la utilización de escorias siderúrgicas como material abrasivo en la preparación de superficies se llevó a cabo de la siguiente forma:

- Selección y preparación del material: teniendo en cuenta la necesidad de minimizar el procesamiento del material de partida se seleccionaron para su análisis posterior muestras de los siguientes tipos de escoria:
  1. Escoria BF granulada, todo uno, sin clasificación granulométrica.
  2. Escoria BOF, de la que se distinguen varios casos en función del cribado:
     a. Fracción 0-10mm (BOF-A).
     b. Todo uno, 0,2-2mm obtenida mediante tamizado-trituración-retamizado (BOF-B).
- Ensayos fisicoquímicos: para introducir un nuevo agente abrasivo en el mercado, resulta fundamental confirmar que el mismo cumple con todos los requisitos químicos y físicos establecidos en la normativa para los materiales que actualmente se encuentran normalizados para tal propósito. La norma ISO 11127 [20] se subdivide en siete partes en donde se especifican los ensayos necesarios y la metodología que sebe seguirse para su realización.
- Prueba de aplicación: para comprobar el comportamiento del material en un ambiente de trabajo real, se desarrolló una prueba de rendimiento industrial en una empresa especializada en tratamiento y reparación de superficies, utilizando escoria BOF y escoria BF granulada.

3. ENSAYOS FISICOQUÍMICOS

Las muestras correspondientes a la escoria BOF (Tabla 1) se caracterizaron mediante ensayos fisicoquímicos según se indicó en el apartado anterior para comprobar el cumplimiento de los requisitos establecidos en la norma UNE-EN ISO 11126 [19].

Composición	% presente Escoria BOF
CaO	48,73
SiO2	12,46
Al2O3	2,11
MgO	3,57
FeTotal	19,41
MnO	2,50
K2O	0,005
P2O5	1,19
S	0,105
Zn	0,011
Pb	<4 ppm
Mo	<4 ppm
As	<10 ppm
Cd	<2 ppm

Tabla 1: Composición química de la escoria BOF

Los resultados de la densidad aparente, dureza, humedad, conductividad y porcentaje de sales solubles se muestran en la Tabla 2 y se han comparado con los requisitos establecidos en la norma ISO 11126 para cada uno de los agentes abrasivos no metálicos considerados en la actualidad.

La densidad aparente se mantiene dentro de los rangos establecidos en la norma, siendo menor que en el caso de la escoria de refinado de cobre, un abrasivo no metálico cuyo uso está más extendido en la actualidad. Esto es una ventaja, principalmente para el operador de la ta-

UNE-EN ISO	Ensayo	Unid.	Requisito	Escoria de cobre	Escoria de carbón	Escoria BF	Escoria BOF
11127-3	Densidad aparente	kg/m^3	2600-3900	3300-3900	2400-2600	3000-3300	3390
11127-4	Dureza	Mohs	Min. 6	Min. 6	Min. 6	Min. 6	>6
11127-5	Humedad	%	Max. 0,2	Max. 0,2	Max. 0,2	Max. 0,2	2,62
11127-6	Conductividad	µS/cm	Max. 250	Max. 25	Max. 25	Max. 250	721
11127-7	Sales solubles	%	Max. 0,0025	Max. 0,0025	Máx. 0,0025	Máx. 0,0025	0,000

Tabla 2: Comparativa de los resultados obtenidos para la escoria BOF con la norma UNE-EN ISO 11126

Origen	Granulometría [mm]	Muestra	Conductividad [mS/m]	Media [mS/m]
BOF A	0-10	1	776	771
		2	766	
BOF B	0,2-2	1	815	801.5
		2	788	

Tabla 2: Ensayo de conductividad de la escoria cribada y tamizada

rea, ya que un abrasivo muy pesado dificultaría el manejo del equipo. Aunque la prueba de evaluación de la dureza no proporciona el valor exacto, se determina que la dureza es superior a 6 en la escala de Mohs superando el umbral establecido. La prueba de cloruro soluble en agua es satisfactoria, obteniendo un valor nulo. Los cloruros son una de las sales contaminantes más comunes en los abrasivos, por lo que el uso de escoria de BOF como abrasivo no contaminaría las superficies metálicas tratadas y no iniciaría ningún ciclo corrosivo.

Sin embargo, la prueba de humedad y conductividad del extracto acuoso muestra resultados significativamente diferentes de los valores establecidos en la norma. El material enviado para su análisis no había sido sometido a ningún tratamiento de secado, lo que podría explicar por qué el porcentaje de humedad presente en el material es tan elevado. El valor de conductividad también es superior al permitido por la norma para los abrasivos sintéticos no metálicos actualmente regulados.

Aunque en principio los materiales son idénticos salvo en su granulometría, se realizaron ensayos para comprobar este aspecto más crítico, la conductividad, en las escorias BOF de otras granulometrías puesto que, dado que el material es sintético, pueden existir diferencias apreciables. Las fracciones de distinta granulometría pueden contener proporciones diferentes de los componentes dada la anisotropía del material. Tanto las muestras de la fracción 0-10 mm como de la fracción 0,2-2 mm son pretratadas en una planta de tratamiento de separación magnética. Los resultados se muestran en la Tabla 2, presentando igualmente altos valores de conductividad. Estos valores pueden estar relacionados con la presencia de cal libre en su composición. Para verificar esta relación, sería interesante realizar un tratamiento de estabilización de la cal libre.

De los ensayos realizados se extraen como resultados:

1. La dureza de la escoria BOF cumple los requisitos establecidos. Su valor es superior a 6 Mohs, valor límite exigido en la norma ISO 11126 para los diversos abrasivos que actualmente se encuentran regulados en la misma.
2. La densidad se encuentra en los rangos permitidos. Su valor, 3390 kg/m3, podría incluso considerarse bajo con respecto al rango establecido para la escoria de refinado de cobre.
3. La humedad del material es elevada con respecto al límite máximo fijado en la norma. Mientras que la norma ISO 11126 establece un valor máximo de 0,2% de humedad, los ensayos realizados a la escoria BOF han revelado un valor de 2,62%. Esto se debe a que el material ensayado no se había secado previamente. Para su correcta caracterización la operación de secado resultaría fundamental.
4. La escoria BOF ensayada se encuentra libre de cloruros solubles en agua. Los cloruros, unas de las sales contaminantes más comunes en los abrasivos, no se encuentran presentes en la muestra ensayada. Es decir, el uso de la escoria BOF como agente abrasivo no contaminaría las superficies metálicas tratadas, por lo que no se iniciarían ciclos corrosivos.
5. La medición de la conductividad ha dado valores extremadamente elevados. Esta medida de la conductividad está relacionada directamente con la concentración de contaminantes solubles en agua (sales). El hecho de que los valores obtenidos para la escoria BOF sean tan elevados puede estar vinculado a la presencia de cal libre en su composición. Para comprobar dicha relación, sería conveniente realizar un tratamiento de estabilización de la cal libre.

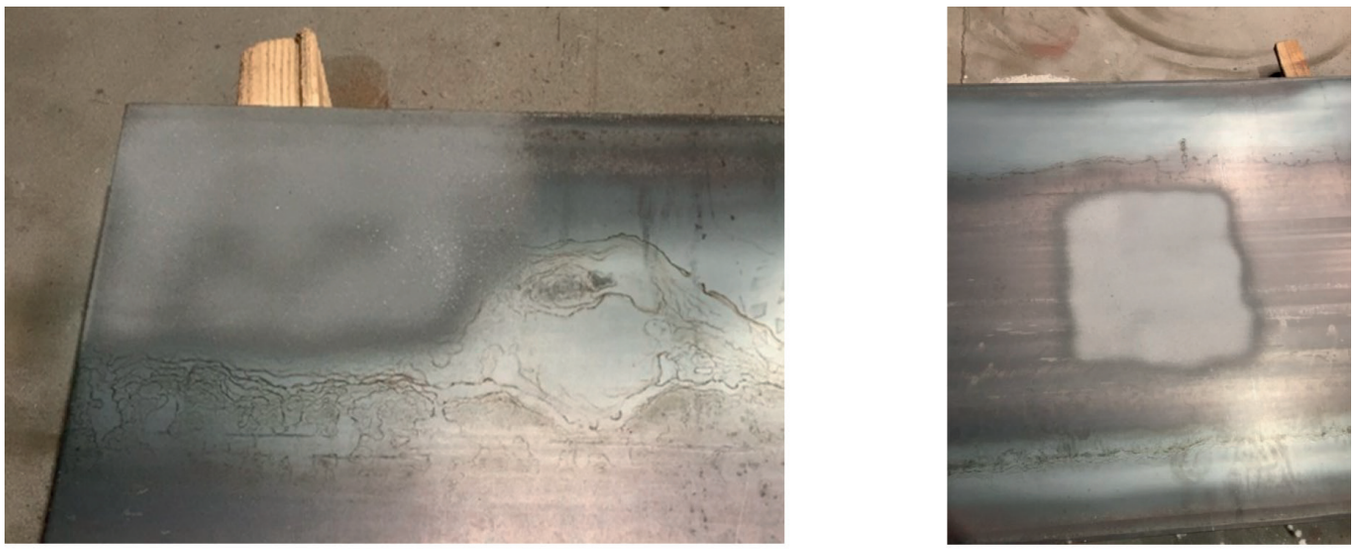
4. PRUEBA DE APLICACIÓN

Además de las propiedades químicas y físicas, un abrasivo ha de satisfacer su comportamiento (generación de polvo, rendimiento, rugosidad final, ...) durante el proceso de aplicación. Con tal objetivo, se desarrolló una prueba de rendimiento industrial en una empresa especializada en tratamiento y reparación de superficies. De acuerdo con la experiencia de dichos profesionales, la cantidad requerida de abrasivos para la limpieza en seco de una chapa de acero para nueva construcción oscila entre, aproximadamente, 45 y 60 kg/m2. En el caso del tratamiento de chapas de acero para mantenimiento, como eliminación de corrosión o limpieza de pinturas fenólicas típicas de tanques de almacenamiento de agua o productos químicos, la cantidad necesaria aumentaría hasta los 100 kg/m2.

En este caso la prueba industrial se realizó comparando el comportamiento del material en un ambiente de trabajo real, desarrollando una prueba de rendimiento industrial utilizando las escorias BOF y BF granulada. El equipo empleado para la realización de la prueba fue un compresor de 8 bares de presión, conectado por una manguera con una boquilla de 4 milímetros de diámetro.

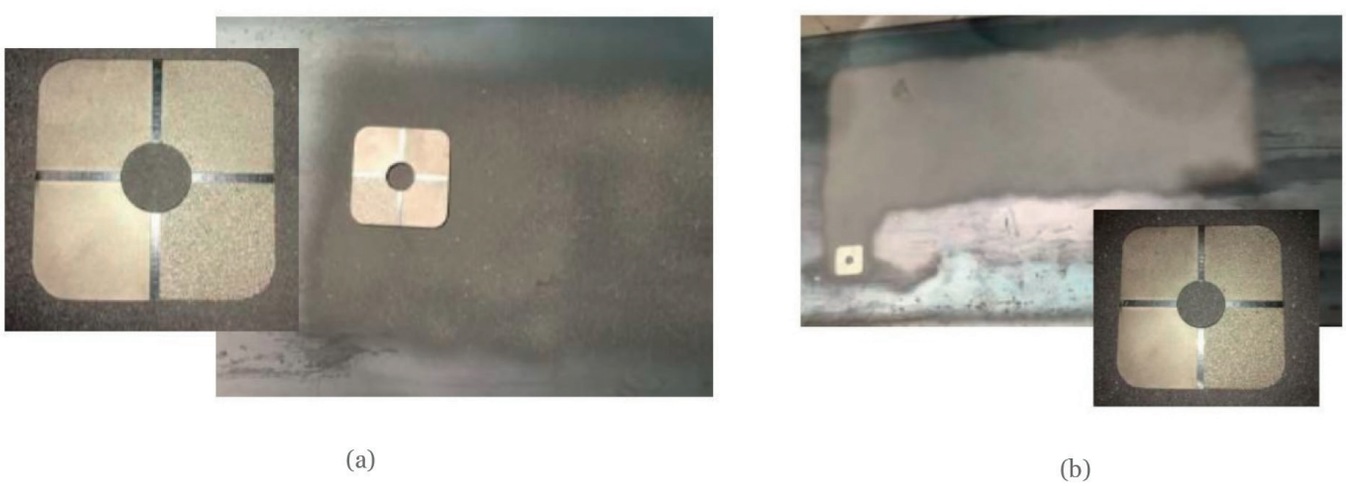
La utilización de ambas escorias todo uno, tanto escoria BF como BOF, consiguió una limpieza aceptable del material tratado (Figura 1).

Con la escoria BF como abrasivo, se obtuvo el nivel de limpieza y rugosidad requerido en las aplicaciones industriales más problemáticas, como los depósitos. En el caso de las escorias BOF, la rugosidad alcanzada en la superficie del acero



(a) (b)

Figura 1: Chapas de acero después de la aplicación usando como abrasivo: (a) escoria BF; (b) escoria BOF



(a) (b)

Figura 2: Lámina de acero tras el chorreado con (a) BOF-A; (b) BOF-B

fue baja, probablemente debido a la existencia de finos. Aun así, dicha escoria demostró su potencial para el chorreado en superficies donde no se requiere una alta dureza abrasiva. En ninguno de los casos el impacto de la escoria con la lámina dejó pigmentación ni manchas en la misma.

La utilización de las muestras de BOF trituradas y cribadas exige un proceso de preparación, pero permite proporcionar material comparable puesto que está dentro de los rangos de tamaños exigidos normalmente a los abrasivos en operaciones de chorreado superficial. La muestra de granulometría 0-10 mm dio lugar a la generación de polvo durante la prueba. Por el contrario, la fracción 0,2-2 mm generó muchos menos polvo y se utilizó para el tratamiento de aproximadamente un metro cuadrado de chapa de acero, lo que requirió una cantidad de 24,92 kg.

Para medir la evaluación del rendimiento se han utilizado superficies patrón de perfil medio conocido para comparación táctil-visual definidas de acuerdo con la norma ISO 8503 [21]. En el caso de la muestra 0-10 mm (escoria BOF-A), la rugosidad se sitúa entre los sectores 2 y 3, por lo que se trata de un perfil medio (Figura 2-a) equivalente al rango 60-100 µm de valor nominal (más cerca de 60 µm). En cuanto al caso de la escoria BOF-B (Figura 2-b), la rugosidad alcanzada se situó entre los sectores 3 y 4, es decir, entre 100 y 150 µm de valor nominal (más cerca de 100 µm), lo que satisface los requerimientos industriales actuales como, por ejemplo, la construcción de torres eólicas.

5. CONCLUSIONES

El chorreado superficial mediante abrasivos es un método muy extendido para la limpieza de superficies de diferentes materiales y estructuras civiles cuyo propósito principal es proteger la superficie contra la degradación de la corrosión, la fatiga y el desgaste. El mercado de los abrasivos de chorreado para la limpieza y preparación de superficies se encuentra en una necesaria evolución debido a las restricciones medioambientales y de seguridad causadas por el uso del abrasivo tradicional, la arena de sílice. Simultáneamente, las escorias BF y BOF representan un problema medioambiental debido a su alto volumen de generación por lo que su utilización como abrasivo contribuye a la valorización de los residuos generados en los diferentes procesos industriales y, por tanto, a la economía circular y al desarrollo sostenible. A partir de las pruebas realizadas se puede concluir que:

- Respecto a los abrasivos convencionales, las escorias BOF y BF presentan un rendimiento y unas características técnicas similares a la escoria de refinado de cobre, actualmente el abrasivo de origen sin-

tético más empleado en operaciones de chorreado al aire libre. Además, no requerirían equipamiento especial o adaptaciones de éste para su utilización.

- Para la correcta aplicación de la escoria como abrasivo de chorreado, se debe realizar un control de la curva granulométrica del material, tratando de aproximarlo lo más posible a tamaños cercanos a los 2 mm, con el objetivo de reducir el polvo generado y alcanzar mayores perfiles de rugosidad.
- El polvo generado en su aplicación es excesivo. Aunque parcialmente está causado por el impacto de la fracción mayoritaria (tamaños finos), el polvo de la escoria debe ser prefiltrado.
- Además, mientras que la aplicación de la escoria BF es inmediata, en el caso de la escoria BOF será preciso la disminución de su conductividad.
- El rendimiento es bajo. Los operadores y expertos calculan que es de, aproximadamente, el 80% en comparación con los abrasivos empleados actualmente. Esto tendría un impacto directo en el posible precio para su comercialización como agente abrasivo.

REFERENCIAS

[1] L. Marrucci, T. Daddi, y F. Iraldo, «The integration of circular economy with sustainable consumption and production tools: Systematic review and future research agenda», J. Clean. Prod., vol. 240, p. 118268, dic. 2019, http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118268.

[2] «FACT SHEET. Steel industry co-products.pdf», Worldsteel Association, 2018.

[3] «10th European Slag Conference - Cement Lime Gypsum», 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.zkg.de/en/artikel/zkg_10th_European_Slag_Conference_3322744.html. [Accedido: 11-dic-2019].

[4] «Statistics 2016», Euroslag. [En línea]. Disponible en: https://www.euroslag.com/products/statistics/statistics-2016/. [Accedido: 10-dic-2019].

[5] E. Furlani, G. Tonello, y S. Maschio, «Recycling of steel slag and glass cullet from energy saving lamps by fast firing production of ceramics», Waste Manag., vol. 30, n.o 8, pp. 1714-1719, ago. 2010, http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.030.

[6] A. M. Rashad, «A synopsis manual about recycling steel slag as a cementitious material», J. Mater. Res. Technol., vol. 8, n.o 5, pp. 4940-4955, sep. 2019, http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.038.

[7] J. Guo, Y. Bao, y M. Wang, «Steel slag in China: Treatment, recycling, and management», Waste Manag., vol. 78, pp. 318-330, ago. 2018, http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.045.

[8] K. Poorna Chander, M. Vashista, K. Sabiruddin, S. Paul, y P. P. Bandyopadhyay, «Effects of grit blasting on surface properties of steel substrates», Mater. Des., vol. 30, n.o 8, pp. 2895-2902, sep. 2009, http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.014.

[9] AENOR-ISO, «UNE-EN ISO 12944-4:2018 Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Parte 4: Tipos y preparación de superficies.» Asociación Española de Normalización y Certificación, 2018.

[10] AENOR-ISO, «UNE-EN ISO 8504-2:2002 Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Métodos de preparación de las superficies. Parte 2: Limpieza por chorreado abrasivo.» Asociación Española de Normalización y Certificación, 2002.

[11] D. Dudek, «Comparative research on abrasive blasting of 145Cr6 steel for various working media», IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 461, p. 012015, dic. 2018, http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/461/1/012015.

[12] A. A. Khan y M. M. Haque, «Performance of different abrasive materials during abrasive water jet machining of glass», J. Mater. Process. Technol., vol. 191, n.o 1, pp. 404-407, ago. 2007, http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.071.

[13] F. Boud, C. Carpenter, J. Folkes, y P. H. Shipway, «Abrasive waterjet cutting of a titanium alloy: The influence of abrasive morphology and mechanical properties on workpiece grit embedment and cut quality», J. Mater. Process. Technol., vol. 210, n.o 15, pp. 2197-2205, nov. 2010, http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.08.006.

[14] AENOR-ISO, «UNE-EN ISO 11124-2:2019 Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Especificaciones para materiales abrasivos metálicos destinados a la preparación de superficies por chorreado. Parte 2: Granalla angular de fundición de hierro.» Asociación Española de Normalización y Certificación, 2019.

[15] AENOR-ISO, «UNE-EN ISO 11126-1:2019 Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Especificaciones para materiales abrasivos no metálicos destinados a la preparación de superficies por chorreado. Parte 1: Introducción general y clasificación.» Asociación Española de Normalización y Certificación, 2019.

[16] M. E. Young, D. C. M. Urquhart, y R. A. Laing, «Maintenance and repair issues for stone cleaned sandstone and granite building façades», Build. Environ., vol. 38, n.o 9, pp. 1125-1131, sep. 2003, http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00084-2.

[17] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. Gobierno de España, «006. Chorreado con arena de piezas y estructuras metálicas: exposición a sílice cristalina. (2011) *en revisión* | Situaciones de Trabajo Peligrosas», 2011. [En línea]. Disponible en: http://stp.insht.es/stp/basequim/006-chorreado-con-arena-de-piezas-y-estructuras-met%C3%A1licas-exposici%C3%B3n-s%C3%ADlice-cristalina-2011. [Accedido: 11-dic-2019].

[18] B. J. Rosenberg, L. Yuan, y S. Fulmer, «Ergonomics of abrasive blasting: a comparison of high pressure water and steel shot.», Appl. Ergon., vol. 37, n.o 5, pp. 659-667, 2006, http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2005.05.014.

[19] AENOR-ISO, «UNE-EN ISO 11126-6:2019 Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Especificaciones para materiales abrasivos no metálicos destinados a la preparación de superficies por chorreado. Parte 6: Escoria de horno de hierro.» Asociación Española de Normalización y Certificación, 2019.

[20] AENOR-ISO, «UNE-EN ISO 11127:2012 Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Métodos de ensayo para materiales abrasivos no metálicos destinados a la preparación de superficies por chorreado.» Asociación Española de Normalización y Certificación, 2012.

[21] AENOR-ISO, «UNE-EN ISO 8503-1:2012 Preparación de substratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos afines. Características de rugosidad de los substratos de acero chorreados. Parte 1: Especificaciones y definiciones relativas a las muestras ISO de comparación táctil-visual para la evaluación de superficies preparadas mediante proyección de agentes abrasivos.» Asociación Española de Normalización y Certificación, 2012.

AGRADECIMENTOS

Este trabajo se realizó con ayuda del proyecto NEWSLAG, RTC-2017-6329-5, perteneciente al Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación orientada a los Restos de la Sociedad.