



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

MÁSTER INTERUNIVERSITARIO EN “DIRECCIÓN DE PROYECTOS”

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**ECONOMÍA CIRCULAR DE LOS RESIDUOS
SIDERÚRGICOS: SUSTITUCIÓN DE
ABRASIVOS TRADICIONALES**

JULIO 2017

AUTORA: AITANA DÍAZ SUÁREZ

DIRECTOR: FRANCISCO ORTEGA FERNÁNDEZ

CODIRECTORA: LORENA DE ARRIBA RODRÍGUEZ

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	Introducción	6
2.	Objetivos	8
3.	Residuos generados en el proceso siderúrgico	9
3.1.	Escoria de horno alto	11
3.1.1.	Escoria de horno alto cristalizada	13
3.1.2.	Escoria de horno alto granulada	14
3.2.	Escoria de acería LD.....	15
4.	El chorreado superficial.....	17
5.	Descripción del proceso	19
5.1.	Chorreado en seco	22
5.2.	Chorreado en húmedo	24
6.	Chorreado con arena de sílice.....	27
6.1.	Daños para la salud	28
6.2.	Situación actual de la técnica.....	30
7.	Otros abrasivos de chorreado	32
8.	Abrasivos no metálicos.....	37
8.1.	Escoria de horno de hierro.....	38
8.2.	Escoria del refinado de cobre.....	40
8.3.	Escoria de horno de carbón	42
9.	La escoria BOF como abrasivo.....	44
9.1.	Primera fase del ensayo industrial	44
9.2.	Segunda fase del ensayo industrial.....	47
9.2.1.	Tratamiento del material	47
9.2.2.	Desarrollo de la prueba industrial.....	54
9.2.3.	Resultados de la prueba	56
9.3.	Pruebas físicas y químicas	61
9.3.1.	Determinación de la densidad aparente.....	61
9.3.2.	Evaluación de la dureza mediante un ensayo sobre placa de vidrio	62
9.3.3.	Determinación de la humedad.....	63
9.3.4.	Determinación de los contaminantes solubles en agua por conductimetría	64
9.3.5.	Determinación de cloruros solubles en agua	65
9.3.6.	Resultados de los ensayos.....	67
9.4.	Análisis de los resultados	70

10.	Sector de aplicación	72
10.1.	Sector naval	72
10.2.	Sector industrial	76
10.2.1.	Limpieza superficial con abrasivo.....	76
10.2.2.	Tecnologías de descontaminación	77
10.3.	Sector de la construcción/edificación	78
10.3.1.	Limpieza de fachadas	78
10.3.2.	Técnica de abujardado	79
11.	Análisis de mercado	81
12.	Conclusiones.....	83
13.	Referencias.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso típico de producción de escoria	10
Figura 2. Volumen de escoria BOF generada en Asturias desde el año 2014.....	11
Figura 3. Escoria de horno alto granulada (GBFS)	12
Figura 4. Diferentes granulometrías de escoria BOF	16
Figura 5. Detalle de dos fachadas idénticas: (a) estado natural; (b) limpiada mediante granallado.....	17
Figura 6. Patrones fotográficos del grado de oxidación.....	20
Figura 7. Patrones fotográficos de los grados de preparación de superficie.....	21
Figura 8. Arena industrial o grava vendida o usada por los productores estadounidenses en 2014, por principales usos finales	31
Figura 9. Abrasivos para chorreo en limpieza de superficies de acero.....	34
Figura 10. Forma inicial de la partícula de abrasivo.....	34
Figura 11. Designaciones básicas de forma para las partículas de abrasivo: (a) “Grit” (granalla angular, irregular); (b) “Shot” (granalla esférica, redonda)	35
Figura 12. Métodos de aplicación de abrasivos: (a) en exterior; (b) en túnel de chorreado.....	37
Figura 13. Abrasivos no metálicos de chorreado empleados en la preparación de sustratos de acero.....	38
Figura 14. Requisitos particulares para los abrasivos de escoria de horno de hierro	39
Figura 15. Rango y distribución del tamaño de las partículas para los abrasivos de escoria de horno de hierro	40
Figura 16. Requisitos para los abrasivos de escoria del refinado de cobre	41
Figura 17. Rango y distribución del tamaño de las partículas para los abrasivos de escoria del refinado de cobre.....	42
Figura 18. Requisitos particulares para los abrasivos de escoria de horno de carbón	43
Figura 19. Rango y distribución del tamaño de las partículas para la escoria de horno de carbón	43
Figura 20. Equipo empleado en la prueba industrial	45
Figura 21. Realización del ensayo en nave industrial.....	45
Figura 22. Chapa de acero tras la aplicación de la escoria BOF como abrasivo.....	46
Figura 23. Chapa de acero tras la aplicación de la escoria BF como abrasivo	47
Figura 24. Esquema del tratamiento del material	48
Figura 25. Tamizadora <i>Retsch AS 450 control</i> empleada en el tratamiento de la escoria.....	49
Figura 26. Escoria BOF. (a) Fracción 2000 – 200 μm del primer tamizado. (b) Fracción <200 μm del primer tamizado.....	51
Figura 27. Molino de discos <i>Pulverisette 13</i> (marca <i>Fritsch</i>), abierto y cerrado	51

Figura 28. Escoria BOF. (a) Fracción 2000 – 200 μm de tamizado – molienda – retamizado. (b) Fracción >2000 μm de tamizado – molienda – retamizado.....	54
Figura 29. Muestra testeada: (a) Fracción granulométrica 2 – 0,2 mm de escoria BOF obtenida mediante tamizado-trituración-retamizado. (b) Fracción granulométrica 2 – 0,2 mm de escoria BOF obtenida mediante tamizado	55
Figura 30. Estado de la lámina de acero antes del chorreado	55
Figura 31. Arenero empleado en el segundo ensayo.....	56
Figura 32. Estado de la lámina de acero tras el chorreado con escoria obtenida del primer tamizado.....	57
Figura 33. Comparadores de superficie: (a) para proyección de agentes abrasivos de grano irregular (G); (b) proyección de agentes abrasivos de grano nodular (S)	57
Figura 34. Valores nominales y tolerancias de los perfiles de superficie de los sectores de las muestras ISO de comparación táctil-visual	58
Figura 35. Muestras para acero preparadas por proyección de agentes abrasivos de grano irregular (tipo “G”)	58
Figura 36. Límites de los tipos de perfil.....	59
Figura 37. Rugosidad obtenida tras el chorreado con escoria BOF obtenida del primer tamizado	59
Figura 38. Estado de la lámina de acero tras el chorreado con escoria obtenida mediante tamizado – molienda – retamizado.....	60
Figura 39. Rugosidad obtenida tras el chorreado con escoria BOF obtenida mediante tamizado – molienda – retamizado	60
Figura 40. Muestras de 100 g de escoria BOF (la muestra de 5 g fue descartada).....	68
Figura 41. Muestras tras haber reposado durante 1 hora	69
Figura 42. Mezcla de la escoria BOF.....	69
Figura 43. Agua final filtrada para medida de la conductividad	69
Figura 44. Método de limpieza del casco de los buques	73
Figura 45. Evolución internacional de las nuevas contrataciones en el mercado de astilleros..	74
Figura 46. Situación de Europa en el mercado de los astilleros: cartera de pedidos y reparaciones en el año 2011	74
Figura 47. Limpieza por chorro abrasivo en un tanque de almacenamiento de aceite.....	76
Figura 48. Operador desarrollando tareas de chorreado abrasivo en húmedo para descontaminación de grandes piezas	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los residuos siderúrgicos	9
Tabla 2. Composición química de la escoria BF	12
Tabla 3. Propiedades físicas de la escoria cristalizada	13
Tabla 4. Propiedades mecánicas de la escoria cristalizada	13
Tabla 5. Propiedades químicas de la escoria cristalizada.....	14
Tabla 6. Composición química de la escoria BOF.....	15
Tabla 7. Características físicas de la escoria BOF	16
Tabla 8. Grados de oxidación	19
Tabla 9. Grados de preparación obtenibles mediante limpieza por chorro abrasivo	20
Tabla 10. Métodos de chorreado superficial con abrasivos, según ISO 12944-4	22
Tabla 11. Composición química de la escoria del refinado de cobre	42
Tabla 12. Características técnicas de la tamizadora AS 450 control, marca Retsch	50
Tabla 13. Ejemplos de alta finura final alcanzada en el mínimo tiempo (referidos a 1 kg de alimentación y tamaño de partícula 20 mm)	52
Tabla 14. Características técnicas del molino de discos Pulverisette 13	53
Tabla 15. Características del arenero empleado en el segundo ensayo.....	55
Tabla 16. Resultados obtenidos en el ensayo de determinación de la densidad aparente	62
Tabla 17. Resultados obtenidos en la evaluación de la dureza mediante ensayo sobre placa de vidrio	63
Tabla 18. Resultados obtenidos en el ensayo de determinación de la humedad	64
Tabla 19. Resultados obtenidos en el ensayo de determinación de los contaminantes solubles en agua por conductimetría.....	65
Tabla 20. Resultados obtenidos en el ensayo de determinación de cloruros solubles en agua. 66	
Tabla 21. Comparativa de los resultados obtenidos para la escoria BOF con respecto a los valores límite recogidos en la norma ISO 11126.....	67
Tabla 22. Resultados de los ensayos de conductividad realizados a escorias BOF 1 y BOF 2.....	70
Tabla 23. Boletín informativo trimestral de la construcción naval (hasta 31/12/2016).....	75

1. Introducción

La actividad industrial, al igual que el resto de las actividades desarrolladas por el hombre, acarrea un impacto sobre el medio ambiente. Las industrias afectan a la naturaleza a causa de la ocupación del espacio, la utilización de los recursos naturales y la generación de residuos, ocasionando deterioro, degradación, contaminación u otros efectos perjudiciales sobre los ecosistemas.

El modelo económico convencional se fundamenta en el criterio lineal de “tomar-hacer-desechar”, y se basa en la disposición de grandes cantidades de energía y recursos baratos, si bien este modelo, y teniendo en cuenta que los recursos son finitos, está alcanzando sus límites físicos.

Debido a ello, y como respuesta al problema de escasez de recursos, se ha propuesto el concepto de economía circular, que funciona como un sistema sociotecnológico atractivo y viable radicalmente diferente al contemplado en la actualidad, interrelacionando aspectos ambientales y económicos para fomentar la sostenibilidad [1].

De acuerdo con la Fundación Ellen MacArthur [2] la economía circular es “reparadora y regenerativa, y pretende conseguir que los productos, componentes y recursos en general mantengan su utilidad y valor en todo momento”, y consiste en un ciclo continuo de desarrollo que preserva el capital natural mediante la optimización del uso de recursos y la minimización del riesgo generado al gestionar una cantidad finita de flujos de materiales.

Específicamente, en la industria siderúrgica se generan, de manera inherente al proceso productivo, grandes cantidades de otros elementos, considerados residuos, que requieren de un tratamiento adicional para reducir su impacto medioambiental y hacer su fabricación compatible con el desarrollo sostenible [3]. Debido a ello, surge la necesidad de valorizar estos residuos para su conversión en subproductos de valor en otras industrias.

De acuerdo a la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, relativa a los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas, se entiende por valorización “cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función, en la instalación o en la economía general” [4].

Dicha Directiva europea queda transpuesta a la legislación española mediante la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados [5]. De este modo, los residuos pasan de ser considerados un problema a eliminar a adquirir valor, ya que pueden ser utilizados como materia prima o en la generación de energía.

Las escorias (residuos sólidos minerales) son los principales residuos del proceso siderúrgico, y poseen un alto potencial en términos de valorización, por lo que son un recurso reseñable debido a sus múltiples aplicaciones, tanto actuales como potenciales [6].

Desde el punto de vista medioambiental, jurídico, social e incluso económico, es esencial realizar un esfuerzo adicional para llevar a cabo la recuperación de los residuos producidos y conseguir una reducción significativa de los residuos que deben enviarse a vertedero [7].

Existen múltiples aplicaciones que requieren el uso del chorreado con abrasivos como tratamiento de preparación de superficies como paso previo a la aplicación de pinturas u otro tipo de revestimientos, 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 la limpieza de fachadas.

En la industria del chorreado superficial, el agente abrasivo que tradicionalmente se utiliza es la arena de sílice, si bien durante las últimas décadas han aparecido ciertas restricciones al uso de este material a causa de los problemas que las partículas de dicho agente abrasivo ocasionan en la salud y la seguridad de las personas. Este hecho ha fomentado la incursión en el mercado de la industria del chorreado superficial de otros agentes abrasivos, de origen natural o sintético, cuyo uso se considera prácticamente nocivo para los trabajadores.

En el caso de los abrasivos de origen sintético, los materiales empleados a tal fin se obtienen fundamentalmente como subproductos de diversas industrias, reduciendo el impacto ambiental de los residuos generados en las mismas y compatibilizando los procesos productivos con el desarrollo sostenible y la economía circular.

Mediante la realización de este Trabajo Fin de Máster se pretende evaluar el uso de los mencionados residuos del proceso siderúrgico como posibles agentes abrasivos sustitutivos de la arena de sílice, y de otros materiales abrasivos empleados en la actualidad en procesos de chorreado superficial, para lo cual se llevará a cabo su correcta caracterización.

2. Objetivos

El presente Trabajo Fin de Máster parte de la necesidad de valorización de los residuos generados en la industria del acero, y presenta una nueva posible aplicación para las escorias siderúrgicas como abrasivo para chorreado superficial en sustitución de los agentes abrasivos tradicionales, contribuyendo a la disminución del impacto global tanto de la industria siderúrgica como de la industria del chorreado superficial.

El objetivo, por tanto, de este trabajo es introducir en este sector a la escoria de convertidor. Para ello, se procederá a la caracterización de las principales escorias siderúrgicas. Asimismo, se realizará un análisis sobre el proceso del chorreado superficial con abrasivos, concretamente en operaciones al aire libre, haciendo referencia a los diferentes agentes abrasivos que se emplean en la actualidad.

Posteriormente, se realizará una comparativa entre las escorias siderúrgicas y los abrasivos que se vienen utilizando tradicionalmente en la industria de los tratamientos superficiales, y que se encuentran registrados en las normas de aplicación. Con este fin, además de para comprobar la compatibilidad de dichos residuos con el proceso industrial, se llevarán a cabo ensayos tanto a escala de laboratorio como a escala industrial.

Por último, se realizará un estudio del sector de aplicación del chorreado superficial y su potencial análisis de mercado.

3. Residuos generados en el proceso siderúrgico

La industria siderúrgica genera, junto a sus productos principales, una gran cantidad de residuos que han de ser valorizados para hacerlos compatibles con el desarrollo sostenible. Dichos residuos se producen en diferentes escenarios de la cadena productiva, y se diferencian según su estado en residuos sólidos, líquidos y gaseosos.

Tabla 1. Clasificación de los residuos siderúrgicos [8]

Residuos siderúrgicos		
Sólidos	Minerales	Lodos, polvos y escorias de horno alto
		Lodos, polvos y escorias de acería
		Polvos de la planta de sinterizado
		Polvos de los electrofiltros y captadores
	Metálicos	Escarpa, cascarilla y viruta
	Químicos	Sulfato ferroso, amónico y óxidos férricos
	Líquidos	Grasas, aceites, ácidos, cianuros, etc.
	Gaseosos	Gases de horno alto, gas de LD y EAF, gas de coquización

Las escorias, residuos sólidos compuestos por sílice, óxidos de calcio, óxidos de magnesio y óxidos de aluminio y hierro, son uno de los residuos más importantes en cuanto a volúmenes generados.

En el proceso siderúrgico se generan, como se puede observar en la Figura 1, tres tipos principales de escoria: la escoria de horno alto (escoria BF), la escoria generada en el convertidor de acero mediante el proceso *Linz-Donawitz* (escoria de acería, BOF o LD) y, finalmente, la escoria generada en la alternativa a los convertidores para la producción de acero, el horno de arco eléctrico (escoria EAF).

De todas las escorias citadas, el principal problema detectado es con la escoria BOF, ya que representa el mayor volumen de residuo no valorizado debido a sus características físicas y químicas. Se trata de un material no peligroso, que por lo tanto se conduce a vertedero de residuos no peligrosos, pero su alto volumen da relevancia al problema.

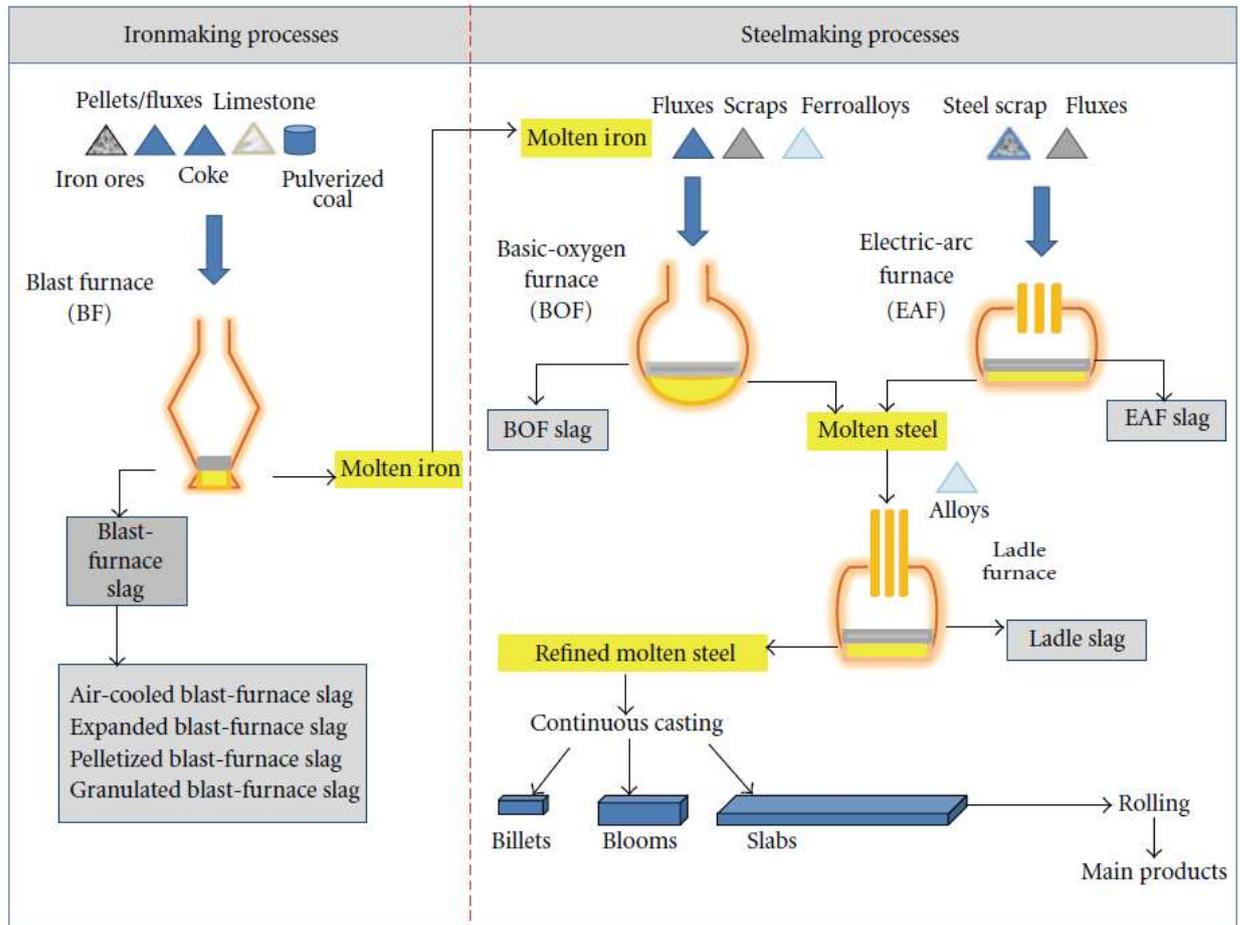


Figura 1. Proceso típico de producción de escoria [9]

De media, por cada tonelada de acero, se producen unos 200 kg de escoria de horno eléctrico (EAF) y 400 kg de escorias de horno alto (BF) y convertidor (BOF) [10].

Dichos residuos suponen, a nivel mundial, más de 400 millones de toneladas al año [10]. En el caso de Europa, se estima que la producción anual de escorias (tanto de hierro como de acero) asciende a 45 millones de toneladas [11].

En el ámbito nacional, el volumen total de escorias de horno alto generadas en el año 2005 se estimó en, aproximadamente, 1.000.000 toneladas, de las cuales el 48% se sometieron a tratamiento de granulación y el 52% se cristalizaron. Para ese mismo año, el volumen de escorias BOF se estimó en 585.000 toneladas.

En el año 2015 se generaron en España más de 600.000 toneladas de escoria BOF, de las cuales más de 400.000 se enviaron a vertedero (Figura 2):

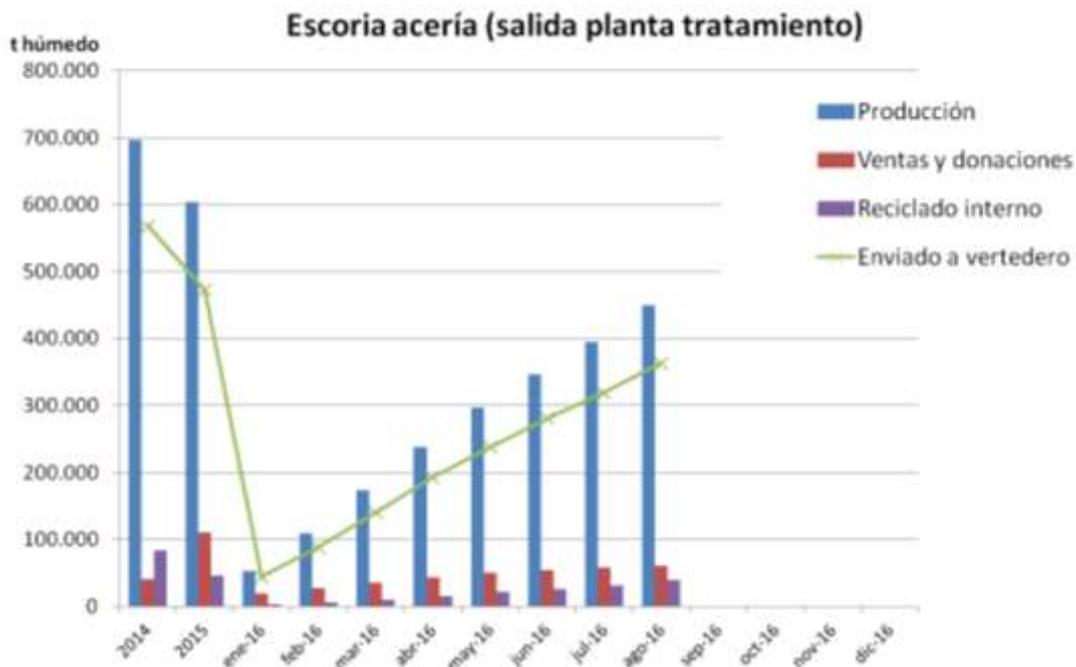


Figura 2. Volumen de escoria BOF generada en Asturias desde el año 2014 [12]

3.1. Escoria de horno alto

La escoria de horno alto (escoria BF) es un material no metálico compuesto de sílice y otras bases, fundamentalmente, producto de la fundición de hierro en el horno en forma de óxidos de estos metales.

Se produce junto con el hierro fundido (materia prima necesaria para la fabricación de acero) en el horno, mediante la reducción del mineral de hierro, consiguiendo la separación de todas las sustancias extrañas que acompañan al mineral. Los materiales empleados en el proceso son, básicamente, mineral de hierro, coque y piedra caliza como fundente. La escoria se recoge en el momento del sangrado junto con el hierro fundido, que se separa a un torpedo para su transporte a acería.

La escoria, que sale del horno a una temperatura cercana a 1500°C, puede someterse a diferentes técnicas de enfriamiento, obteniéndose materiales con características claramente diferenciadas: escoria cristalizada enfriada al aire, escoria vitrificada con agua presurizada (granulada o peletizada) y escoria expandida o dilatada [13].



Figura 3. Escoria de horno alto granulada (GBFS) [14]

La composición química de la escoria fundida depende de los minerales de hierro, las cenizas de coque utilizadas como combustible y los óxidos de los fundentes empleados. La homogeneidad de la carga, así como su regularidad a la salida del horno, contribuyen a que las variaciones en la composición de la escoria sean mínimas.

Los componentes principales de la escoria de horno alto son: CaO, SiO₂, MgO, Al₂O₃, S, FeO, MnO y K₂O. Los índices más utilizados son el Índice de Basicidad ($I_b = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$) y el Índice de Basicidad Simple ($I_{bs} = \frac{CaO}{SiO_2}$):

Tabla 2. Composición química de la escoria BF [13]

Compuesto	%
CaO	38-42
SiO ₂	32-37
MgO	7-9
Al ₂ O ₃	10-14
S	<1
FeO	0,4-0,8
MnO	0,2-0,6
TiO ₂	0,3-0,5
I_b	≤1,2
I_{bs}	≤1,3

Como se ha mencionado anteriormente, la escoria de horno alto puede ser sometida a diferentes técnicas de enfriamiento, en función de las cuales variarán sus propiedades físicas y químicas, así como sus posibles aplicaciones.

3.1.1. Escoria de horno alto cristalizada

La escoria cristalizada se obtiene por enfriamiento lento de la escoria líquida en grandes fosos. El material cristaliza formado diferentes componentes, dejando sólo una pequeña parte de él en estado vítreo.

El enfriamiento lento y controlado de la escoria fundida genera un material pedregoso similar a las rocas ígneas de origen volcánico: textura áspera, color gris oscuro, forma predominantemente cúbica y estructura con abundantes poros internos y externos. Presenta una granulometría 0/200, y una absorción de agua del orden del 6%, aunque se puede secar fácilmente.

Su gran porosidad favorece el drenaje y la reactividad química, reduciendo la sensibilidad a las heladas y la resistencia mecánica. Otras propiedades físicas interesantes de este material son su baja conductividad térmica y su insensibilidad al agua. Además, su textura áspera le proporciona una gran fricción interna y una elevada capacidad de soporte, pero daña su trabajabilidad.

Tabla 3. Propiedades físicas de la escoria cristalizada [13]

	Fracción 0-40	Fracción 0-50
Densidad aparente (kg/dm ³)	2,38	2,32
Densidad real (kg/dm ³)	2,63	2,60
Absorción (%)	3,70	4,20
Peso específico real(<80µm)	2,98	2,94
Porosidad aparente (%)	8,80	9,80
Porosidad real (%)	20,4	20,80

La escoria cristalizada es un material no plástico, no susceptible a la helada y con un buen comportamiento de drenaje. Se extiende y compacta de manera sencilla, y tiene una densidad de compactación a menudo inferior a la de los materiales de relleno convencionales.

Tabla 4. Propiedades mecánicas de la escoria cristalizada [13]

Desgaste Los Ángeles	35-45%
Estabilidad frente al sulfato sódico	12%
Ángulo de rozamiento interno	40º-45º
Dureza (escala de Mohs)	5-6
CBR	>250

En cuanto a las propiedades químicas, tal y como puede apreciarse en la composición mostrada en la Tabla 2, la escoria BF se compone en más del 95% de cuatro óxidos principales

(cal, sílice, alúmina y magnesia). Por lo general, la composición suele ser bastante constante en el tiempo a consecuencia de que las distintas coladas proporcionen una fundición homogénea.

La escoria en estado cristalizado puede presentar una cierta capacidad de autofraguado debida, en parte, a la escoria residual que queda en estado vítreo. La escoria cristalizada presenta ciertas inestabilidades, como la debida a la reacción de los compuestos de hierro, azufre y sulfatos.

Tabla 5. Propiedades químicas de la escoria cristalizada [13]

	Fracción 0-40	Fracción 0-50
Azufre total (expresado en S)	1,16%	1,02%
Sulfatos (expresado en S)	0,62%	0,59%
Óxido de hierro (FeO)	0,40%	0,38%

3.1.2. Escoria de horno alto granulada

La escoria granulada se obtiene por enfriamiento brusco de la escoria líquida, dejándola caer sobre un chorro de agua fría potente, favoreciendo su expansión a la vez que el propio chorro ejerce de vehículo de transporte hacia las balsas de decantación.

Este proceso, conocido como granulación, hace que la escoria se descomponga en pequeñas partículas con bordes afilados, con una apariencia similar a la de la arena. La granulación vitrifica la escoria, convirtiéndola en un sólido cuyas moléculas no han tenido tiempo a ser orientadas al estado cristalino por la rapidez del enfriamiento.

La escoria granulada aparece como arena 0/6 mm. La cantidad de finos (tamaños inferiores a 80 μm) que contiene es pequeña, del orden de 5 a 10%, aunque en el caso de escorias muy activas este porcentaje puede aumentar durante los procesos de manipulación. La fracción superior a 5 mm se caracteriza por la presencia de elementos inertes de color oscuro y alta dureza, que no se vitrifican sino que se cristalizan. Su densidad aparente es muy variable, entre 0,5 y 1,5 t/m³, y su peso específico es de, aproximadamente, 2,86. Tiene un ángulo de rozamiento interno de 60°, es alveolar y friable. Su contenido en agua varía entre 5 y 25%.

Como la escoria granulada se obtiene por enfriamiento brusco de la misma escoria líquida con agua presurizada, la composición química es idéntica a la de la escoria cristalizada. Este enfriamiento rápido se manifiesta en el aspecto externo de la escoria, otorgándole a la superficie de las partículas angulosidad y friabilidad.

3.2. Escoria de acería LD

La escoria de acería LD, también conocida como escoria BOF, por sus siglas en inglés (*basic oxygen furnace slag*) se origina en el proceso de afino del arrabio obtenido en el horno alto, eliminando por oxidación, en su totalidad o en parte, las impurezas existentes [15]. En el proceso *Linz-Donawitz* (LD) para la conversión del hierro fundido procedente del horno alto en acero, el afino se lleva a cabo inyectando oxígeno a presión en el baño que contiene las materias primas y las adiciones para la formación de escoria (fundamentalmente cal, dolomía y espato). El oxígeno se “sopla” mediante una lanza refrigerada hasta lograr eliminar del arrabio el exceso de carbono y las impurezas que lo acompañan.

El carbono se elimina por oxidación en forma de gas (CO y CO₂), mientras que el resto de impurezas remanan en forma de escoria semipastosa sobrenadando por encima del acero, lo que permite su separación para su posterior envío a un foso donde se riegan hasta alcanzar temperaturas inferiores a 50°C. Por lo tanto, la escoria tiene como misión fundamental atrapar las impurezas, principalmente fósforo y azufre. A cada carga de fundición se le añaden 75-80 kg de cal y dolomía, y se eliminan de 120 a 130 kg de escoria [13].

La composición química de este residuo es diferente a la de la escoria de horno alto. Una de sus características principales es su alto contenido en cal (45-50%), parte de la cual se encuentra en forma de cal libre, con un porcentaje que varía entre el 1 y el 20% [14].

Tabla 6. Composición química de la escoria BOF [13]

Compuesto	%
CaO	48
SiO ₂	16
MgO	5,20
Al ₂ O ₃	1,20
Fe _{total}	16,04
MnO	5,90
K ₂ O	0,20
P ₂ O ₅	0,50
Cu	0,03
Mo	0,08
B	0,17

La escoria BOF se caracteriza por ser un árido muy limpio, pesado, angular, mal pulido y muy duro. Se trata de un material de tipo granular, de color gris claro en estado seco, que presenta cierta porosidad y textura áspera.



Figura 4. Diferentes granulometrías de escoria BOF [14]

Tiene una densidad aparente elevada, del orden de 3 t/m³ o incluso más, como consecuencia de su alto contenido en hierro, que se presenta tanto en forma de metal libre como en forma de óxidos. La granulometría aproximada del material es 0/300 mm. La absorción de agua es moderada, inferior al 3%. La Tabla 7 muestra las principales propiedades físicas de esta escoria:

Tabla 7. Características físicas de la escoria BOF [15]

Peso unitario compactado (T/m ³)	2,77
Absorción de agua (%)	1,29
Fuerza de compresión (t/cm ²)	1,2
Dureza de Mohs	7
Pérdida de solidez (%)	1,33
Pérdida de abrasión (Ensayo de Los Ángeles) (%)	17,6
pH	9,6
Partículas con dos o más caras de fractura (%)	100
Limpieza superficial (%)	0,02
Índice de lajas (%)	7
Peso específico de las partículas (t/m ³)	3,45
Porosidad (%)	4,33

La escoria BOF tiene una muy buena angulosidad, una elevada dureza (6-7 en la escala Mohs) y una alta resistencia al corte y a la abrasión. Otra característica física que tiene gran importancia para la aplicación de este producto en diferentes industrias es su tamaño de partícula.

4. El chorreado superficial

El comportamiento de las superficies de acero y hormigón se ve afecto, de manera significativa, por la presencia de contaminantes como pueden ser polvo, óxido, aceites o grasas, entre otros. Por ello, la preparación de la superficie es un factor crítico.

Una preparación eficiente y adecuada de la superficie previa a la aplicación de un sistema de protección superficial proporcionará una mejor protección del material [16]. Además, supone una reducción de los costes de mantenimiento de la superficie.

El granallado (también conocido como chorreado superficial con abrasivos) es un método de preparación de la superficie mediante la aplicación de abrasivos bajo presión, cuyo propósito es asegurar la eliminación de la materia nociva a fin de obtener una superficie lista para el tratamiento que se le vaya a realizar posteriormente [17].

Esta técnica consiste en la proyección de partículas que, a través de la erosión que provocan, limpian y pulen la superficie, eliminando todo tipo de impurezas (Figura 5).



Figura 5. Detalle de dos fachadas idénticas: (a) estado natural; (b) limpiada mediante granallado [18]

En la limpieza mediante chorreado con abrasivos, como se ha comentado, el material contaminante se elimina de la superficie mediante un mecanismo de erosión [17]. Los parámetros a tener en cuenta en dicho tratamiento son: presión, flujo de abrasivo, distancia a distancia a la superficie y ángulo de contacto. La relación entre la dureza de la superficie y la dureza del abrasivo resulta fundamental a la hora de evaluar la validez del tratamiento, además de los efectos del tamaño y forma de la partícula de abrasivo en el ratio de material eliminado [19].

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 [20].

El chorreado con abrasivos en seco es el método de preparación superficial más extendido en la mayoría de las industrias (industria de la automoción, construcción de puentes o construcción y reparación de barcos, entre otras) [21]. Esto se debe, fundamentalmente, a las ventajas de esta tecnología sobre otras técnicas de tratamiento superficial, entre las que destacan las siguientes:

- 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
- Mejora de la resistencia mecánica de las piezas o superficies tratadas
- Permite la reconstrucción de piezas gastadas

Por ello, esta técnica cuenta con multitud de sectores de aplicación, como la aeronáutica, la automoción, la energía eólica, la industria del ferrocarril, la industria de fundición y forja, la ingeniería y la industria en general, entre otros.

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 la 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.

5. Descripción del proceso

El chorreado superficial consiste en el impacto de una corriente de pequeñas partículas, denominadas abrasivos, de alta energía cinética propulsada mediante aire sobre una superficie de modo que, mediante la fuerza del impacto, permita la eliminación de los contaminantes superficiales [22], cuyo objetivo fundamental es producir una superficie limpia y libre de todo tipo de suciedad.

El equipo de chorreado se utiliza como pretratamiento para todo tipo de recubrimientos: baños galvánicos, aplicación de pinturas, etc. A través de la proyección del abrasivo en la superficie, es posible obtener una rugosidad adecuada para procesos posteriores de pintura.

El comportamiento y la durabilidad de cualquier revestimiento posterior se ven afectados por el grado de preparación de la superficie a tratar. La preparación superficial previa a la aplicación de revestimientos tiene mayor relevancia en el caso de estructuras de acero, ya que asume gran importancia ante el efecto de la corrosión.

La norma ISO 8501-1 [23] diferencia entre cuatro niveles de grados de oxidación en los que se encuentran normalmente las superficies de acero no revestido:

Tabla 8. Grados de oxidación [23]

Grado de oxidación	Descripción
A	Superficie de acero revestido de calamina adherente, prácticamente sin corrosión
B	Superficie de acero con oxidación residual, donde la calamina empieza a desprenderse
C	Superficie de acero cuya calamina ha desaparecido por la acción de la oxidación o que se pueda eliminar raspando, pero con leves picadas visibles
D	Superficie de acero cuya calamina ha desaparecido por acción de la oxidación y en la que se ven numerosas picadas

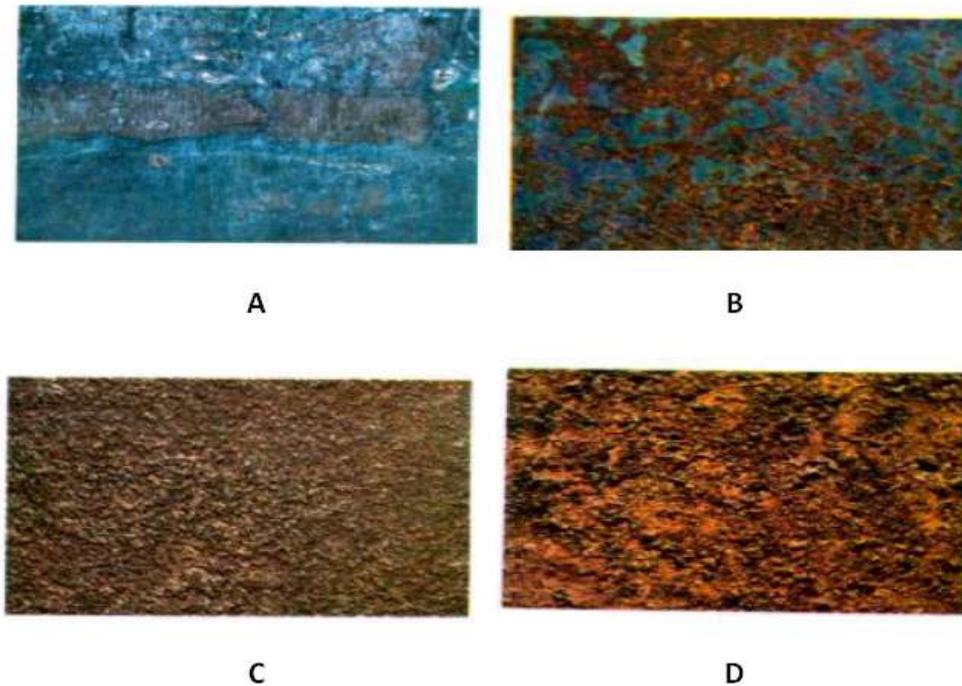


Figura 6. Patrones fotográficos del grado de oxidación [23]

En dicha norma se identifican ciertos grados de limpieza visual, denominados grados de preparación, tras la preparación de la superficie de acero no revestido y de las superficies de acero después de eliminar por completo cualquier revestimiento anterior. Según el método de limpieza empleado, se diferencian tres grados de preparación:

- Sa: Limpieza por chorro abrasivo
- St: Limpieza manual y mecánica
- Fl: Limpieza por llama (prácticamente no se utiliza)

En el caso de la limpieza por chorro abrasivo, la norma ISO 8501, en su parte 1, hace distinción entre cuatro grados de preparación:

Tabla 9. Grados de preparación obtenibles mediante limpieza por chorro abrasivo [23]

Limpieza por chorro abrasivo	
Grado de preparación	Descripción
Sa 1	Limpieza por chorro abrasivo ligero
Sa 2	Limpieza por chorro abrasivo intenso
Sa 2 ^{1/2}	Limpieza por chorro abrasivo a fondo
Sa 3	Limpieza por chorro hasta que el acero quede visiblemente limpio ("metal blanco")

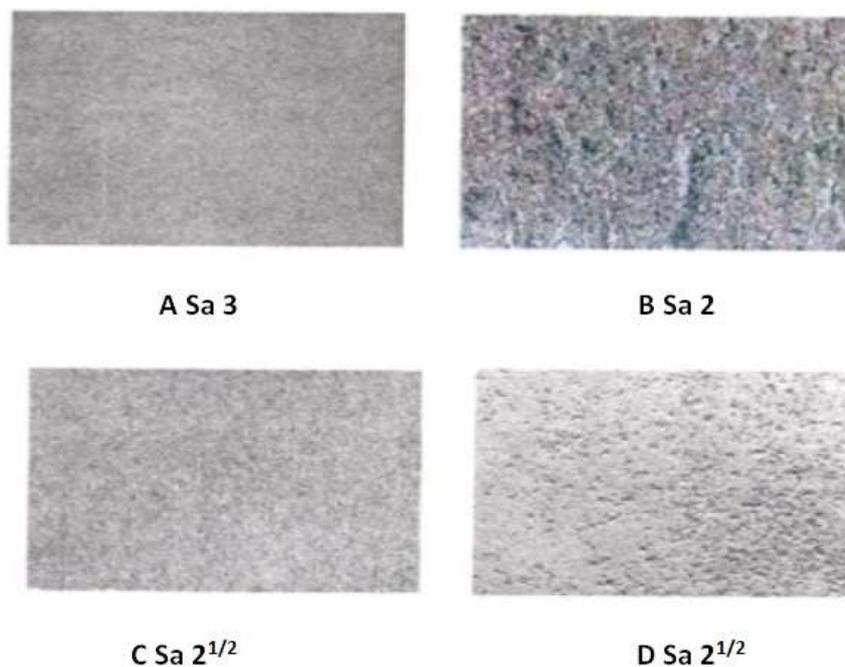


Figura 7. Patrones fotográficos de los grados de preparación de superficie [23]

Los abrasivos más empleados para chorreado superficial son, entre otros, la arena de sílice, 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 [24].

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, tal y como se refleja en la norma ISO 8504-2 sobre métodos de preparación de superficies mediante limpieza por chorreado abrasivo [24]. La diferencia entre los dos tipos radica, fundamentalmente, en el uso de agua.

En el caso del chorreado superficial en seco, durante la realización de la tarea de chorreado son únicamente los granos de abrasivo los que impactan, con gran energía, sobre las piezas o superficies objeto del tratamiento. Sin embargo, en el caso del chorreado en húmedo se añade una pequeña cantidad de líquido (normalmente agua) a la corriente de aire/abrasivo, dando como resultado un procedimiento de limpieza por chorro más libre de polvo, pero con rendimientos menores.

Tabla 10. Métodos de chorreado superficial con abrasivos, según ISO 12944-4 [25]

Limpeza por chorreado en seco	Chorreado centrífugo Chorreado mediante aire comprimido Chorreado con recuperación por aspiración
Limpeza con chorro abrasivo por inyección de humedad	No existe subdivisión
Limpeza por chorreado en húmedo	Chorreado mediante aire comprimido Chorreado en húmedo con abrasivo muy fino Chorreado de líquido presurizado
Aplicaciones particulares de limpieza por chorreado	Chorreado de barrido Chorreado por puntos

5.1. Chorreado en seco

El chorreado en seco es uno de los métodos más eficaces y utilizados en la preparación de superficies. Es el método empleado en astilleros, refinерías, industria del automóvil y otras instalaciones para eliminación de óxido, viejos revestimientos y otras impurezas [26].

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 éste aparezca en forma de ligeras sombras o pequeños puntos. La realización de esta tarea puede llevarse a cabo de diferentes formas, dependiendo del equipo que se emplee, tal y como se refleja en la Tabla 10.

1. Chorreado centrífugo

Este método se lleva a cabo 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. La rueda, que gira a alta velocidad, propulsa al abrasivo con una velocidad de impacto considerable sobre el material mediante la fuerza centrífuga de los extremos de las cuchillas [27]. El chorreado centrífugo puede aplicarse en modo continuo en piezas con superficies accesibles, así como en

piezas con diferentes grados de oxidación, permitiendo alcanzar un grado de preparación de la superficie Sa 3 (Limpieza por chorro hasta que el acero quede visiblemente limpio, “metal blanco”) dentro de los grados de preparación establecidos en la norma ISO 8501-1 de protección anticorrosiva de estructuras de acero mediante pintura [23].

No obstante, el chorreado centrífugo se debe configurar de manera cuidadosa para cada aplicación, por lo que este método se limita, por lo general, a tareas repetitivas asociadas a altos volúmenes de rendimiento o procesos continuos. Además, los productos químicos que contaminan la superficie del acero no pueden ser eliminados en su totalidad mediante chorreado centrífugo, por lo que se requiere un tratamiento adicional para su completa eliminación.

2. 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 [6]. 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 Sa 3, 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.

Además, los productos químicos que contaminan la superficie del acero no pueden ser eliminados en su totalidad mediante chorreado centrífugo, por lo que se requiere un tratamiento adicional para su completa eliminación.

3. Chorreado con recuperación por aspiración

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 Sa 2^{1/2} (Limpieza por chorro abrasivo a fondo) [6]. No obstante, tras un periodo extenso de limpieza, se puede alcanzar, mediante esta técnica, un grado de preparación Sa 3, 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.

5.2. Chorreado en húmedo

El chorreado en húmedo consiste en la proyección de abrasivo humectado mediante aire comprimido. Para este tipo de aplicaciones, el agua empleada ha de tener un bajo contenido en sales que evite la contaminación de las superficies tratadas.

Sin embargo, este tipo de chorreado queda restringido a aquellos materiales en los que la presencia de agua no sea dañina, principalmente a materiales no ferrosos fungibles.

Los diferentes tipos de chorreado en húmedo quedan reflejados en la Tabla 10.

1. Limpieza con chorro abrasivo por inyección de humedad

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.

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. El método permite obtener un grado de preparación de la superficie metálica Sa 3, según ISO 8501.

2. Chorreado mediante aire comprimido

Al igual que en el caso anterior, este método es muy similar al chorreado con aire comprimido en seco, pero con la adición de un líquido (generalmente agua fresca) aguas abajo de la boquilla de proyección a fin de obtener una corriente de aire, agua y abrasivo. Para evitar por completo la generación de polvo durante la tarea de chorreado, se puede añadir un inhibidor de polvo al líquido.

Este método puede aplicarse en la limpieza de piezas de todo tipo, así como en piezas metálicas con diferentes grados de oxidación, especialmente para acero picado y químicamente contaminado, siempre que esté permitida la presencia de agua. Puede ser empleado tanto en operaciones continuas como en intermitentes, particularmente donde se requiera que las superficies tratadas tengan bajos niveles de sales solubles residuales.

En el caso de preparación de la superficie durante su mantenimiento, esta técnica permite eliminar parcialmente o selectivamente los recubrimientos existentes mediante el ajuste de la presión y las proporciones de aire, agua y abrasivo en la mezcla.

Mediante el chorreado con aire comprimido en húmedo se alcanza un grado Sa3 de preparación de la superficie. El método es adecuado para reducir la cantidad de contaminantes solubles en agua y minimizar la generación de polvo durante la limpieza. Dado que el agua se añade aguas abajo de la boquilla, la acción de limpieza química es menos eficaz.

Sin embargo, este método cuenta con ciertas limitaciones. Por lo general, la superficie tratada se cubre con una suspensión que impide el examen visual por el operador. Esta suspensión ha de ser secada antes de la aplicación de la pintura, ya que, de no ser así, podría producirse una “oxidación rápida” de la superficie. La fina película de óxido formada en tal caso podría ser perjudicial para el recubrimiento posterior.

3. Chorreado en húmedo con abrasivo muy fino

Esta técnica consiste en dirigir una dispersión de partículas abrasivas finas en agua, u otro líquido, mediante el empleo de bombas o aire comprimido, hacia la superficie a tratar. Al igual que en las técnicas anteriores, se puede añadir un inhibidor de polvo al líquido empleado.

El chorreado de lechada es adecuado para producir un perfil superficial fino en superficies que requieran poco o nulo perfil secundario, a menudo necesario para piezas pequeñas. Este método conduce a una textura superficial particularmente fina y uniforme. Además, es adecuado para reducir la cantidad de sales solubles.

4. Chorreado de líquido presurizado

Se introduce un abrasivo (o mezcla de abrasivos) en una corriente de líquido, y se dirige la mezcla, a través de una boquilla, hacia la superficie a limpiar. Dicha corriente es predominantemente líquido a presión, siendo las adiciones de abrasivos menores que para la limpieza por chorro abrasivo húmedo con aire comprimido. El abrasivo puede ser introducido a la corriente en seco (con o sin aire) o como una suspensión húmeda.

Este método permite alcanzar un grado de preparación superficial Sa 3 en aceros con grados de oxidación A, B y C y Sa 2^{1/2} en aceros de grado de oxidación D [23]. La técnica resulta adecuada para reducir la cantidad de contaminantes solubles en agua, pero es menos fácil de controlar que la limpieza por chorro abrasivo húmedo con aire comprimido para la eliminación de sales solubles. Además, la alta presión es un peligro potencial.

6. 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 [18]. 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.

La arena de sílice como materia prima se obtiene mediante minería a cielo abierto, lo que incluye movimiento de tierras y excavación del depósito. Para adecuarla a los procesos productivos, es necesario procesarla en una planta de tratamiento en la que se eliminan las gangas del material excavado. La complejidad de la eliminación de la ganga, la concentración en sílice, así como el tamaño y forma de grano, condicionan el uso previsto de la arena [28].

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, suele 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 [29].

La generación de polvo en el tratamiento se debe a que, durante el chorreado, los gránulos de arena se descomponen en partículas muy pequeñas, de tamaños inferiores a $5\ \mu\text{m}$ 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, que puede incluso causar la muerte [30]. Como se ha comentado, el proceso de chorreado con arena produce una gran cantidad de polvo y, si el proceso no está completamente aislado del operador, puede suponer un grave riesgo para la salud.

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 99% de dicho agente químico.

6.1. 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).

La Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC) clasifica la sílice cristalina como “cancerígeno para los humanos” de grupo 1, lo que indica que existe suficiente evidencia de su efecto carcinogénico, aunque en la actualidad esta sustancia química no aparece en la normativa en materia de clasificación, envasado y etiquetado de sustancias y preparados peligrosos, ni figura en la lista de sustancias cancerígenas de la normativa específica de prevención de riesgos laborales relativa a cancerígenos [31].

Tradicionalmente, la sílice ha estado asociada a la silicosis [32], que es una enfermedad respiratoria grave, progresiva e irreversible, que puede ocasionar incapacidad laboral e incluso la muerte.

La silicosis pertenece al grupo de las neumoconiosis (grupo de enfermedades causadas por la acumulación de polvo en los pulmones y las reacciones tisulares debidas a su presencia), y se incluye en el grupo de las enfermedades pulmonares intersticiales difusas (EPID). 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, tanto en la lista europea de enfermedades profesionales como en el cuadro de enfermedades profesionales en España.

Esta enfermedad está caracterizada por la formación de fibrosis en los pulmones a consecuencia de la sedimentación de sílice en los alvéolos. Su sintomatología consiste en 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 los siguientes:

- **La composición de la arena.** La arena habitualmente utilizada en tareas de chorreado contiene entre 94% y 99% de sílice cristalina en forma de cuarzo.
- **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.** Durante el chorreado con arena se alcanzan exposiciones muy superiores al valor límite establecido.
- **El tiempo de exposición.** Además de tener en cuenta el tiempo de exposición directa durante la realización de la tarea, ha de considerarse el tiempo de colocación y retirada de las piezas de la zona en la que se ejecuta la tarea, así como el tiempo de permanencia en espacios próximos en los que se haya podido difundir el polvo de sílice cristalina.
- **La carga de trabajo.** A excepción de los procesos confinados, el trabajador que realiza la tarea de chorreado está expuesto a una carga física elevada debido a la obligación de llevar protección respiratoria asistida y otros EPI, unido a la fuerza que ha de ejercer para sujetar la lanza y las mangueras.
- **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 (principalmente óxidos metálicos y pigmentos de pintura).
- **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.

6.2. Situación actual de la técnica

Como se ha comentado en el epígrafe anterior, el chorreado con arena de sílice genera 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 [33]. 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 (Figura 8):

Major use	U.S. total		
	Quantity (thousand metric tons)	Value (thou- sands)	Unit value ² (dollars per ton)
Sand:			
Glassmaking:			
Containers	4,100	\$153,000	\$37.27
Flat, plate and window	2,650	87,400	33.04
Specialty	569	25,800	45.38
Fiberglass, unground	556	42,000	75.45
Fiberglass, ground	428	22,900	53.53
Foundry:			
Molding and core, unground	2,530	117,000	46.37
Molding and core, ground	20	1,370	68.45
Refractory	120	5,020	41.83
Metallurgical, flux for metal smelting	31	1,220	39.32
Abrasives, blasting	416	23,100	55.62
Chemicals, ground and unground	991	55,800	56.26
Fillers, ground, rubber, paints, putty, etc.	266	14,700	55.19
Whole-grain fillers/building products	1,850	65,300	35.25
Ceramic, ground, pottery, brick, tile, etc.	100	5,420	54.17
Filtration:			
Water, municipal, county, local	784	37,800	48.27
Swimming pool, other	58	3,680	63.43
Petroleum industry:			
Hydraulic fracturing	81,700	7,120,000	87.13
Well packing and cementing	649	26,800	41.25
Recreational:			
Golf course, greens and traps	563	22,500	39.90
Baseball, volleyball, play sand, beaches	300	14,200	47.46
Traction, engine	74	2,340	31.66
Roofing granules and fillers	449	11,700	26.10
Other, ground silica	1,840	48,500	26.41
Other, whole grain	8,560	338,000	39.46
Total or average	110,000	8,240,000	75.23
Gravel:			
Silicon, ferrosilicon	235	1,250	5.31
Filtration	32	1,180	36.94
Other uses, specified	253	3,610	14.25
Total or average	772	8,190	10.61
Grand total or average	110,000	8,250,000	74.78

Figura 8. Arena industrial o grava vendida o usada por los productores estadounidenses en 2014, por principales usos finales [34]

7. Otros abrasivos de chorreado

Debido a la prohibición del chorreado con arena de sílice que ha surgido en numerosos países a causa de las enfermedades respiratorias ocasionadas por el mismo [35], han comenzado a aparecer otro tipo de abrasivos que contienen porcentajes de sílice libre inferiores a los límites admitidos, y cuya elección dependerá de la superficie a tratar y del resultado que se pretenda conseguir.

El término “abrasivo de chorreado” engloba a una gran variedad de materiales empleados para lograr un determinado grado de limpieza o preparación superficial sobre superficies de acero u hormigón, permitiendo la eliminación de contaminantes superficiales o revestimientos previos [36].

Los abrasivos son materiales caracterizados por su alta dureza y su capacidad de corte. La mayoría de ellos son de origen mineral, y son obtenidos directamente de la naturaleza, como es el caso de la arena, mientras que otros se obtienen mediante procesos químicos, teniendo, por tanto, origen sintético. Suelen tener estructura cristalina, formada por enlaces químicos de alta resistencia que les otorga una gran estabilidad frente a las alteraciones químicas y dureza frente a la compresión. Además, suelen ser malos conductores tanto de la electricidad como del calor.

En la actualidad, los abrasivos se encuentran regulados mediante la norma ISO 8504-2:2000 para su uso como abrasivos de chorreado una gran variedad de materiales sólidos, naturales y sintéticos, así como varios líquidos [24]. Cada uno de ellos proporciona un rendimiento característico y un acabado superficial determinado.

El comportamiento de los revestimientos protectores de pintura aplicados al acero se ve afectado de manera significativa por el estado en el que se encuentre la superficie inmediatamente antes de la aplicación de la pintura. Los principales factores que influyen en este aspecto son:

- Presencia de óxido y rebabas
- Presencia de contaminantes superficiales (sales, polvo, aceite y grasas)
- Perfil superficial

La limpieza por chorro abrasivo es el método más eficaz y ampliamente aplicable para la preparación de superficies mecánicas debido a las numerosas ventajas que presenta, entre las que destacan las siguientes:

- Este método permite una alta tasa de producción
- El equipamiento puede ser estacionario o móvil, y se adapta a los objetos a limpiar
- El método es aplicable a la mayoría de los tipos y formas de superficie de acero
- Permite la obtención de muchos estados superficiales diferentes
- Produce efectos diversos tales como limpieza, rugosidad, nivelación, lapeado o endurecimiento superficial
- Permite eliminar revestimientos parcialmente fallidos de manera selectiva, dejando el resto de revestimiento intacto

Como se ha comentado, en la actualidad están regulados una amplia variedad de materiales sólidos, naturales y sintéticos, así como varios líquidos para la limpieza por chorro abrasivo. Los materiales sólidos comúnmente utilizados para la preparación de superficies de acero se reflejan en la Figura 9. Básicamente, se diferencian en abrasivos metálicos y no metálicos [25].

Tipo		Abreviatura	Forma inicial de las partículas (véase la tabla 2)	Comparador ^a	Observaciones		
Abrasivos metálicos (M) para limpieza por chorreado ^c	Acero moldeado	Fundición	M/CI	G	G	Principalmente para limpieza por chorreado con aire comprimido	
	Acero	Alto contenido en carbono	M/HCS	S o G	S ^b	Principalmente para limpieza por chorreado con utilización de un sistema centrífugo	
		Bajo contenido en carbono	M/LCS	S	S		
	Alambre de acero cortado	–	M/CW	C	S ^b		
Abrasivos no metálicos (N) para limpieza por chorreado ^c	Naturales	Arena de olivino	N/OL			Principalmente para limpieza por chorreado con aire comprimido	
		Estaurolita	N/ST	S	G		
		Granate	N/GA	G	G		
	Sintéticos	Escoria de horno de hierro	(Escorias de silicato de calcio)	N/FE	G	G	Principalmente para limpieza por chorreado con aire comprimido
		Escoria de refinado de cobre	(Escorias de silicato ferroso)	N/CU			
		Escoria de refinado de níquel		N/NI			
		Escorias de horno de carbón	(Escorias de silicato de aluminio)	N/CS			
		Oxido de aluminio fundido		N/FA			

Figura 9. Abrasivos para chorreo en limpieza de superficies de acero [24]

Las características técnicas más importantes de un abrasivo son su dureza, el tamaño de 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 [37] y Heywood [38] fueron los primeros en realizar estudios sobre la forma de la partícula, considerándola según dos parámetros distintos: las proporciones relativas y la forma geométrica. Debido a la importancia de estas características, se consideran en las normas de aplicación tal y como se refleja en la Figura 10:

Denominación y forma inicial de las partículas	Símbolo
Granalla esférica - redonda	S
Granalla angular – angular, irregular	G
Cilíndrica – con borde cortante	C

Figura 10. Forma inicial de la partícula de abrasivo [24]

Por otro lado, Khan y Haque [39] sostienen 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 [40].

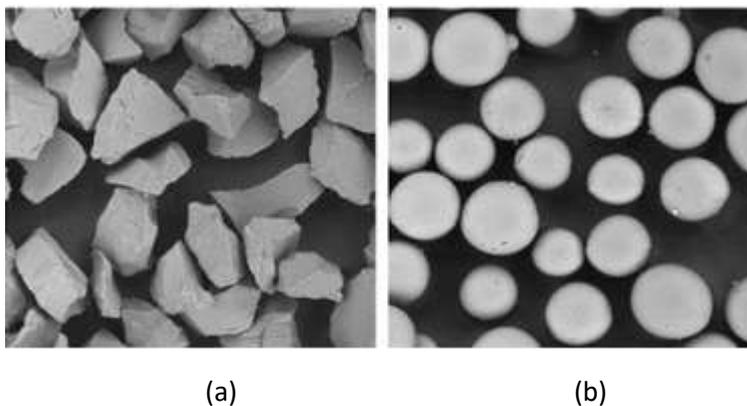


Figura 11. Designaciones básicas de forma para las partículas de abrasivo: (a) "Grit" (granalla angular, irregular); (b) "Shot" (granalla esférica, redonda) [41]

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. A la hora de seleccionar un abrasivo han de tenerse 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, las normas establecen requisitos técnicos generales para los abrasivos, que se resumen a continuación [23] [42]:

- 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 [43] de abrasivos metálicos e ISO 11126 [44] de abrasivos no metálicos, 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 ser usados, no están permitidos debido a su efecto perjudicial sobre la superficie de acero que se vaya a tratar.

8. Abrasivos no metálicos

Como se ha explicado con anterioridad, los abrasivos que se pueden emplear en el tratamiento de superficies de acero como paso previo a la aplicación de pinturas y otros tipos de revestimientos superficiales se dividen en metálicos y no metálicos. El tipo de abrasivo de chorreado y su forma de partícula pueden afectar, de forma significativa, al aspecto final y al perfil de la superficie tratada.

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 factible para 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 chorreado en exterior se prefiere el uso de abrasivos no metálicos (Figura 12).



Figura 12. Métodos de aplicación de abrasivos: (a) en exterior [45]; (b) en túnel de chorreado [29]

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), como se muestra en la Figura 13. Todos ellos presentan, como norma general, una dureza superior a 6 Mohs.

Tipo		Abreviatura	Forma inicial de la partícula (véase 3.2)	Muestra de comparación táctil-visual ⁽¹⁾
Natural	Arena de sílice	N/SI	G	G
	Arena de olivino	N/OL		
	Estaurolita	N/ST	S	G
	Granate	N/GA	G	G
Sintético	Escoria de horno de hierro	(Escoria de silicato de calcio)	N/FE	G
	Escoria del refinado del cobre	(Escoria de silicato de hierro)	N/CU	
	Escoria del refinado del níquel		N/NI	
	Escoria de horno de carbón	(Escoria de silicato de aluminio)	N/CS	
	Oxido de aluminio fundido	N/FA	G	

Figura 13. Abrasivos no metálicos de chorreado empleados en la preparación de sustratos de acero [46]

Este estudio se centra en los abrasivos no metálicos de tipo sintético, obtenidos mediante procesos mecánicos, electrónicos o industriales, como subproductos de diversas industrias. Tal es el caso del silicato de hierro, o escoria de horno alto, 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 reto para la sociedad ya que, además de añadir valor a los residuos para su utilización en diferentes campos, fomentando el desarrollo sostenible, permite competir con los materiales tradicionales, en consonancia con la preocupación por sus costes actuales [47]. Además, mientras que la producción industrial continúe en aumento, también lo harán los costes asociados a su eliminación y vertido.

8.1. Escoria de horno de hierro

La escoria de horno alto, u horno de hierro, (también denominada escoria de silicato cálcico) pertenece al grupo de los abrasivos no metálicos de origen sintético. La norma internacional ISO 11126, en su parte 6 [48], especifica los requisitos que ha de satisfacer este tipo de abrasivo para procesos de limpieza por chorreado, proporcionando rangos de tamaño de partícula, valores de densidad aparente, dureza Mohs, contenido en humedad, conductividad de extracto acuoso y cloruros solubles en agua.

Como queda definido en la citada norma, la escoria de horno de hierro es un abrasivo mineral de origen sintético para limpieza por chorreado obtenido mediante granulación en agua, y

posterior secado y tamizado, con o sin procesos de trituración mecánica, a partir de escoria procedente de la fundición de hierro.

Su forma inicial de partícula, al adquirir el material para su uso en operaciones de chorreado, ha de ser “Grit” (G). Es decir, se trata de granalla angular, con formas irregulares.

Los abrasivos de escoria de horno de hierro han de ser materiales vítreos amorfos que no absorban agua, pero que puedan ser humedecidos en la superficie solamente. Su contenido en sílice habrá de estar presente únicamente en forma de sílice combinada. El contenido en sílice cristalina libre (como cuarzo, tridimita o cristobalita) no debe exceder del 1%, y habrá de ser determinado mediante difracción de rayos X. Además, el material debe estar libre de componentes corrosivos y contaminantes que deterioren la adherencia.

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%.

Los requisitos particulares para los abrasivos de escoria de horno de hierro se especifican en la Figura 14, y el rango y distribución del tamaño de las partículas se muestra en la Figura 15.

Propiedad		Requisito	Método de ensayo
Intervalo de tamaño de partícula y su distribución		Véase la tabla 1	ISO 11127-2
Densidad aparente	kg/m ³ [kg/dm ³]	(3,0 a 3,3) × 10 ³ [3,0 a 3,3]	ISO 11127-3
Dureza Mohs ¹⁾		mín. 6	ISO 11127-4
Humedad	% (m/m)	máx. 0,2	ISO 11127-5
Conductividad del extracto acuoso	mS/m	máx. 25	ISO 11127-6
Cloruros solubles en agua	% (m/m)	máx. 0,002 5	ISO 11127-7
1) Puede ser usado otro método para determinar la dureza, con unos requisitos mínimos apropiados, por acuerdo entre las partes interesadas.			

Figura 14. Requisitos particulares para los abrasivos de escoria de horno de hierro [48]

Intervalo de tamaño de partícula ¹⁾		mm	0,2 a 0,5	0,2 a 1	0,2 a 1,4	0,2 a 2	0,2 a 2,8	0,5 a 1	0,5 a 1,4	1,0 a 2	1,4 a 2,8
Sobredimensionadas	Abertura del tamiz	mm	0,5	1	1,4	2	2,8	1	1,4	2	2,8
	% Residuo (m/m)	máx.	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Tamaño nominal	Abertura del tamiz	mm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	1	1,4
	% Residuo (m/m)	mín.	85	85	85	85	85	80	80	80	80
Infradimensionadas	Abertura del tamiz	mm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	1	1,4
	% Pasa (m/m)	máx.	5	5	5	5	5	10	10	10	10

1) Por acuerdo entre las partes interesadas, pueden ser mezclados entre sí abrasivos de distintos intervalos de tamaño de partícula. Los detalles en las proporciones de partículas con tamaño nominal, partículas sobredimensionadas y partículas infradimensionadas deben especificarse. El tamaño máximo de partícula no debe exceder los 3,15 mm y la proporción de partículas menores de 0,2 mm no debe exceder del 5% (m/m).

Figura 15. Rango y distribución del tamaño de las partículas para los abrasivos de escoria de horno de hierro [48]

8.2. Escoria del refinado de cobre

La escoria del refinado de cobre, o escoria de silicato de hierro, es un residuo procedente de la industria de fundición de cobre, y se utiliza de manera habitual en la eliminación de óxido, revestimientos viejos o cualquier otra contaminación en el chorreado abrasivo en seco. Se trata de un proceso costoso en cuanto a consumo de abrasivo, ya que precisa de cantidades significativas de partículas abrasivas [49]. Por cada tonelada de producción de cobre, se generan alrededor de 2,2 toneladas de este tipo de escoria [50].

La escoria de cobre es el agente abrasivo que, en la actualidad, se ofrece como sustitutivo a la arena de sílice en el mercado mundial para aplicaciones de chorreado en seco [45].

Este material, de apariencia vítrea, vesicular cuando se encuentra granulado y color negro, está recogido en la parte 3 de la norma ISO 11126 [51] como abrasivo mineral sintético formado por escoria procedente de la fundición de cobre, y constituido por escoria de silicato de hierro, destinado a la preparación de superficies por chorreado y obtenido tras operaciones de granulación en agua, secado y tamizado, con o sin procesos de trituración mecánica.

En los abrasivos, resulta esencial comprobar que, tras su uso, el residuo remanente no sea peligroso. Los ensayos de toxicidad en la escoria de refinado de cobre, realizados para comprobar la posible contaminación de las aguas subterráneas, revelan que dicha escoria puede clasificarse como no peligrosa [52].

La reutilización de la escoria de cobre es respetuosa con el medio ambiente, a la vez que económicamente viable, ya que no contribuye solo a la liberación de terreno empleado como vertedero de la misma, sino que, a su vez, satisface la disminución de consumo de agregados naturales en la industria [53].

Los abrasivos de escoria de refinado de cobre han de ser materiales vítreos amorfos que no absorban agua, sino que solo puedan ser humectados superficialmente. Las propiedades físicas y mecánicas más relevantes de la escoria del refinado de cobre se recogen en la Figura 16. Su peso unitario es ligeramente superior al de los agregados naturales empleados en chorreado superficial. En cambio, su capacidad de absorción es significativamente baja (0,13%) [50].

Propiedad	Requisito	Método de ensayo
Intervalo de tamaño de partícula y su distribución	Véase la tabla 1	ISO 11127-2
Densidad aparente kg/m ³ [kg/dm ³]	(3,3 a 3,9) × 10 ³ [3,3 a 3,9]	ISO 11127-3
Dureza Mohs ¹⁾	mín. 6	ISO 11127-4
Humedad % (m/m)	máx. 0,2	ISO 11127-5
Conductividad del extracto acuoso mS/m	máx. 25	ISO 11127-6
Cloruros solubles en agua % (m/m)	máx. 0,002 5	ISO 11127-7

1) Puede ser usado otro método para determinar la dureza, con unos requisitos mínimos apropiados, por acuerdo entre las partes interesadas.

Figura 16. Requisitos para los abrasivos de escoria del refinado de cobre [51]

Al igual que sucede en el caso de la escoria de horno de hierro, su forma inicial de partícula, al adquirir el material para su uso en operaciones de chorreado, ha de ser “Grit” (G). Es decir, se trata de granalla angular, con formas irregulares. El rango y distribución del tamaño de partículas se refleja en la Figura 17.

Intervalo de tamaño de partícula ¹⁾		mm	0,2 a 0,5	0,2 a 1	0,2 a 1,4	0,2 a 2	0,2 a 2,8	0,5 a 1	0,5 a 1,4	1,0 a 2	1,4 a 2,8
Sobredimensionadas	Abertura del tamiz	mm	0,5	1	1,4	2	2,8	1	1,4	2	2,8
	% Residuo (m/m)	máx.	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Tamaño nominal	Abertura del tamiz	mm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	1	1,4
	% Residuo (m/m)	mín.	85	85	85	85	85	80	80	80	80
Infradimensionadas	Abertura del tamiz	mm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	1	1,4
	% Pasa (m/m)	máx.	5	5	5	5	5	10	10	10	10

1) Por acuerdo entre las partes interesadas, pueden ser mezclados entre sí abrasivos de distintos intervalos de tamaño de partícula. Los detalles en las proporciones de partículas con tamaño nominal, partículas sobredimensionadas y partículas infradimensionadas deben especificarse. El tamaño máximo de partícula no debe exceder los 3,15 mm y la proporción de partículas menores de 0,2 mm no debe exceder del 5% (m/m).

Figura 17. Rango y distribución del tamaño de las partículas para los abrasivos de escoria del refinado de cobre [51]

La composición química típica de la escoria queda reflejada en la Tabla 11. Su contenido en cobre se encuentra limitado a 0,5-2%, siendo sus componentes principales hierro, sílice, alúmina y óxido de calcio. Debido a que este residuo se obtiene en operaciones mineras, su composición es relativamente variable, pudiendo tener pequeños cambios en los porcentajes.

Tabla 11. Composición química de la escoria del refinado de cobre [54]

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CuO	ZnO
26,0 %	55,0 %	7,0 %	2,0 %	2,7 %	3,3 %	1,1 %	0,6 %	1,4 %	0,9 %

Al igual que en el caso anterior, el contenido en sílice libre (cristalizada como cuarzo, tridimita o cristobalita) no debe exceder del 1%.

8.3. Escoria de horno de carbón

La escoria de horno de carbón (escoria de silicato de aluminio) es un mineral sintético inerte derivado de la fusión del carbón. Se trata de un material abrasivo que se utiliza para la limpieza mediante chorreado superficial en acero y hormigón, eliminando así las escamas metálicas, óxidos, restos de pinturas antiguas y suciedad [55].

Este material se obtiene mediante granulación en agua, secado y tamizado, con o sin procesos de trituración mecánica, a partir de escorias originadas cuando se quema el carbón en una

central térmica de carbón [56]. Se trata, básicamente, de escoria de silicato de aluminio que, por lo general se utiliza en procesos de chorreado a presión.

El material se somete a procesos de calentamiento, trituración y separación de los granos por tamizado, obteniéndose partículas irregulares, angulares y con perfiles variados, de bordes ligeramente agudos. En el proceso de chorreado las partículas de abrasivo actúan por fricción y se deslizan junto con sus bordes de corte, ejerciendo una acción de cizallamiento a baja presión.

Este abrasivo no contiene sílice libre (por lo que no hay riesgo de causar silicosis), partículas férricas, materiales corrosivos ni materiales solubles en agua. Sus requisitos específicos se encuentran especificados en la norma internacional ISO 11126, en su parte 4 [56].

Propiedad		Requisito	Método de ensayo
Intervalo de tamaño de partícula y su distribución		Véase la tabla 1	ISO 11127-2
Densidad aparente	kg/m ³ [kg/dm ³]	(2,4 a 2,6) x 10 ³ [2,4 a 2,6]	ISO 11127-3
Dureza Mohs ¹⁾		mín. 6	ISO 11127-4
Humedad	% (m/m)	máx. 0,2	ISO 11127-5
Conductividad del extracto acuoso	mS/m	máx. 25	ISO 11127-6
Cloruros solubles en agua	% (m/m)	máx. 0,002 5	ISO 11127-7

1) Puede ser usado otro método para determinar la dureza, con unos requisitos mínimos apropiados, por acuerdo entre las partes interesadas.

Figura 18. Requisitos particulares para los abrasivos de escoria de horno de carbón [56]

Su granulometría (Figura 19), muy estrecha y controlada, tiene la ventaja de realizar una acción homogénea y delicada sobre las superficies a tratar, especialmente sobre los metales y, dentro de estos, más específicamente sobre el hierro.

Intervalo de tamaño de partícula ¹⁾	mm	mm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	1,0	1,4
			a 0,5	a 1	a 1,4	a 2	a 2,8	a 1	a 1,4	a 2	a 2,8
Sobredimensionadas	Abertura del tamiz	mm	0,5	1	1,4	2	2,8	1	1,4	2	2,8
	% Residuo (m/m)	máx.	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Tamaño nominal	Abertura del tamiz	mm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	1	1,4
	% Residuo (m/m)	mín.	85	85	85	85	85	80	80	80	80
Infradimensionadas	Abertura del tamiz	mm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	1	1,4
	% Pasa (m/m)	máx.	5	5	5	5	5	10	10	10	10

1) Por acuerdo entre las partes interesadas, pueden ser mezcladas entre sí abrasivos de distintos intervalos de tamaño de partícula pueden ser mezclados entre sí. Los detalles en las proporciones de partículas con tamaño nominal, partículas sobredimensionadas y partículas infradimensionadas deben especificarse. El tamaño máximo de partícula no debe exceder los 3,15 mm y la proporción de partículas menores de 0,2 mm no debe exceder del 5% (m/m).

Figura 19. Rango y distribución del tamaño de las partículas para la escoria de horno de carbón [56]

9. La escoria BOF como abrasivo

Tras haber realizado un análisis de la técnica de chorreado superficial y el uso de abrasivos en este proceso, especialmente en operaciones al aire libre, en este Trabajo Fin de Máster se considera la posibilidad del uso de escoria de convertidor (escoria BOF) como nuevo abrasivo no metálico.

En la actualidad, el uso de otro residuo siderúrgico, la escoria BF, se encuentra registrada en la norma ISO 8504 como abrasivo de limpieza por chorreado sintético y no metálico. El uso de residuos sólidos industriales supone una alternativa respetuosa con el medio ambiente, ya que contribuye a la reducción de consumo de recursos naturales.

Tras haber definido las características de la escoria BOF, así como de los diversos abrasivos que se encuentran normalizados en la actualidad, se pretende estudiar la compatibilidad de dicho residuo con el proceso industrial, así como su comparativa con los otros materiales establecidos por los estándares como abrasivos.

9.1. Primera fase del ensayo industrial

Además de las propiedades químicas y físicas, un abrasivo ha de satisfacer su comportamiento durante el proceso de aplicación. Como ya se ha explicado en este documento, el chorreado con abrasivos es un método para preparación de superficies que consiste en el impacto de abrasivos a presión sobre la misma. Durante la realización de la tarea, los granos de abrasivo impactan con una gran energía en las superficies o piezas a tratar.

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.

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.



Figura 20. Equipo empleado en la prueba industrial

Un operario profesional realizó el ensayo sobre una lámina de acero con corrosión (Figura 21). En primer lugar, se realizó el chorreado utilizando la escoria BOF como agente abrasivo y, posteriormente, con la escoria BF granulada.



Figura 21. Realización del ensayo en nave industrial

Los resultados de los ensayos fueron satisfactorios para ambos materiales. Mediante el proceso de chorreado se alcanzaron grados aceptables de limpieza.

Cabe destacar que la aplicación de la escoria BOF estaba condicionada por la granulometría del material aportado al ensayo. La escoria BOF tuvo que ser tamizada para el ensayo, a fin de lograr su adecuación a la boquilla de 4 mm de diámetro.

Como se muestra en la Figura 22, al emplear la escoria BOF como abrasivo de chorreo, el acero perdió la corrosión, pero la rugosidad obtenida en la superficie era muy sutil. Probablemente, la falta de rugosidad se deba al uso de finos en lugar de material tratado (triturado y tamizado) y a la pequeña cantidad de material disponible para el ensayo (unos 5 kg).

Aun así, la escoria demostró su potencial para limpieza superficial en superficies donde no se requiera una gran dureza del abrasivo. Es importante destacar que el impacto de la escoria BOF con la lámina no dejó pigmentación ni manchas sobre la misma.



Figura 22. Chapa de acero tras la aplicación de la escoria BOF como abrasivo

Por otro lado, el resultado fue satisfactorio en el caso de la aplicación de escoria BF granulada como abrasivo (Figura 23). A pesar de la poca cantidad de material aportada para el ensayo (aproximadamente 5 kg), se obtuvo el grado de rugosidad requerido en las limpiezas industriales más problemáticas, como es el caso de tanques.

Como se ha comentado a lo largo de este documento, el uso de la escoria BF como abrasivo está regulado en la normativa. Sin embargo, su uso en el ámbito industrial es prácticamente inexistente.



Figura 23. Chapa de acero tras la aplicación de la escoria BF como abrasivo

9.2. Segunda fase del ensayo industrial

Tras haber realizado ensayos con escoria BF y BOF en una primera prueba a nivel industrial realizada en abril, y a fin de demostrar la viabilidad de esta última en un estado de tratamiento adecuado a la aplicación industrial, se determinó llevar a cabo su adecuación a los tamaños exigidos normalmente a los abrasivos en operaciones de chorreado superficial.

El test industrial fue desarrollado en las instalaciones de una empresa especializada en tratamientos superficiales, empleando como agente abrasivo una mezcla granulométrica de escoria BOF no metálica.

9.2.1. Tratamiento del material

Para adecuar el material a los equipos industriales empleados en las operaciones de limpieza superficial mediante chorreado con abrasivos, se trituró y tamizó el material hasta obtener una granulometría 2000/200 μm .

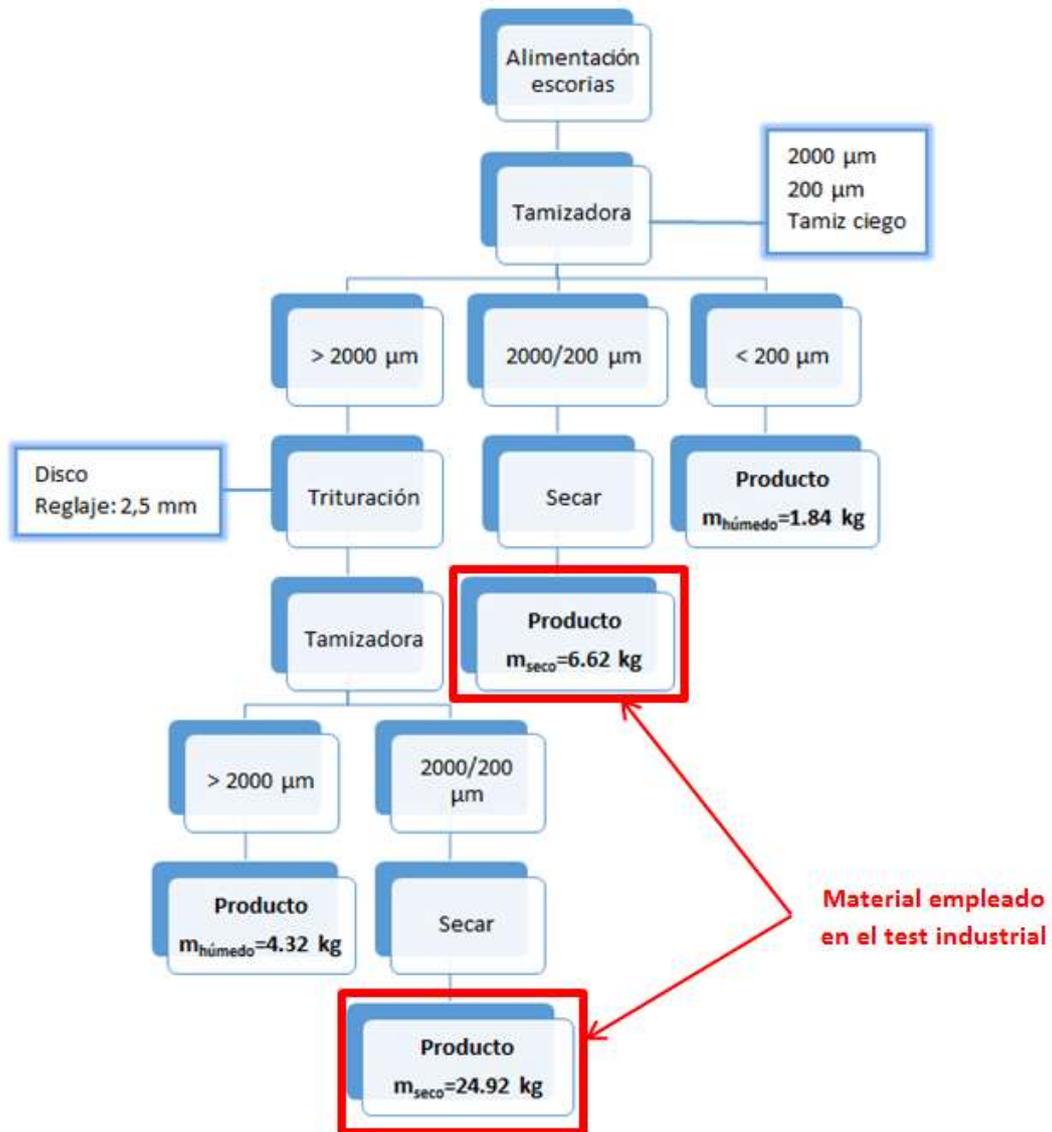


Figura 24. Esquema del tratamiento del material

Tamizado

Como primer paso para el tratamiento del material, se llevó a cabo el tamizado del todo uno en estado bruto mediante tamices de luces de malla 2 mm y 0,2 mm, además del tamiz ciego. El equipo empleado en dicha operación fue una tamizadora analítica *Retsch AS 450 control*.



Figura 25. Tamizadora *Retsch AS 450 control* empleada en el tratamiento de la escoria

La tamizadora analítica *AS 450 control* es adecuada para tamizar productos tales como minerales, arena, agentes químicos, carbón, clínker, coque, menas, suelos, plásticos o materiales de construcción [57]. Se trata de una tamizadora analítica con movimiento de vibración tridimensional para tamices de diámetros 400 mm y 450 mm, que puede usarse tanto en tamizado en seco como en húmedo, que permite la separación, fraccionamiento y determinación del tamaño de grano de tanto de polvos como de materiales a granel o suspensiones.

La tamizadora *AS 450 control* combina los beneficios del tamizado con accionamiento electromagnético regulado -amplitud controlada con la más alta reproducibilidad- con la tecnología CET (transferencia continua de energía), que le permite alcanzar amplitudes de hasta 2,2 mm, incluso con cargas de hasta 25 kg.

El accionamiento electromagnético produce un movimiento de proyección tridimensional que reparte el material a tamizar por toda la superficie del tamiz con tiempos de trabajo cortos, pero con alta eficacia de separación.

Este equipo presenta las ventajas que se enumeran a continuación:

- Tamizado con efecto 3-D
- Excelente eficiencia de separación, sin necesidad de re-tamizado

- Alta precisión en la separación en tiempos cortos de tamizado
- Altas cargas de material (hasta 25 kg)
- Válido tanto para tamizado en seco como en húmedo
- Rango de medida desde 25 μm hasta 125 mm
- La torre de tamices alcanza una altura máxima de 963 mm, para tamices de diámetro máximo de 450 mm
- Sencillo de manejar, diseño ergonómico
- No necesita mantenimiento
- Ajuste digital libre de los parámetros de tamizado (tiempo, amplitud, aceleración de la base de los tamices, intervalo)

Tabla 12. Características técnicas de la tamizadora AS 450 control, marca Retsch [57]

Rango de medida	25 μm – 125 mm
Movimiento del producto a tamizar	Proyección por impulso de rotación – Movimiento 3D
Máxima capacidad de alimentación	25 kg
Máximo número de fracciones	13/9 (min.3)
Masa máxima del bloque de tamices	50 kg
Ajuste de los parámetros de tamizado	
Amplitud	Digital, 0,2 – 2,2 mm
Aceleración de tamizado	1 – 11 g
Indicación de tiempos	Digital, 1 – 99 min
Operación por intervalos	10 – 99 s
Procedimientos operativos estándar almacenables (SOPs)	9
Adecuado para tamizado en seco	Sí
Adecuado para tamizado en húmedo	Sí
Diámetros de tamices apropiados	400 mm / 450 mm
Altura máxima de la torre de tamices	963 mm
Conexión eléctrica	Diferentes voltajes
Alimentación de red	Monofásica

Mediante la operación de tamizado se obtuvieron tres fracciones de escoria diferenciadas:

- Fracción mayor de 2 mm ($>2000 \mu\text{m}$), que posteriormente se trató mediante trituración.
- Fracción 2 – 0,2 mm ($2000 - 200 \mu\text{m}$), que una vez tamizada se secó en estufa, obteniéndose un peso en seco de 6,62 kg.
- Fracción menor de 0,2 mm ($<200 \mu\text{m}$), de la que se obtuvo un peso en húmedo de 1.84 kg.

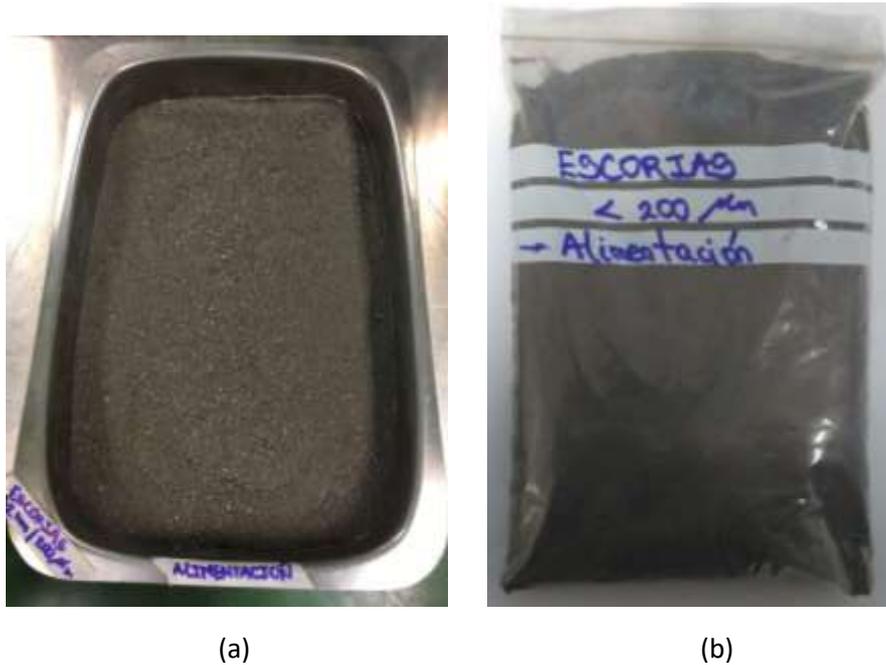


Figura 26. Escoria BOF. (a) Fracción 2000 – 200 µm del primer tamizado. (b) Fracción <200 µm del primer tamizado

Trituración

Una vez tamizado el material en bruto, la fracción mayor de 2 mm (2000 µm) se trituró mediante molino de discos de reglaje 2,5 mm. La trituración del material se llevó a cabo con un pulverizador (molino) de discos de laboratorio *Pulverisette 13*, de la marca *Fritsch*, diseñado para la molienda fina de muestras duras y quebradizas [58].



Figura 27. Molino de discos *Pulverisette 13* (marca *Fritsch*), abierto y cerrado

Permite el tratamiento de material con un flujo alimentación máximo de 150 kg/h incluso en funcionamiento en continuo, dependiendo de la distancia entre discos y de la dureza del material. Este flujo, relativamente alto, permite el uso del aparato en plantas piloto y

producciones pequeñas, como es el caso del tratamiento de escoria para recuperación de metales preciosos.

El tamaño máximo admisible para el material a moler es de unos 20 mm, siendo la finura final ajustable en función de la distancia entre discos, entre 12 mm (distancia más grande) y 0,1 mm (distancia más estrecha).

El material a tratar se tritura mediante presión y cizallamiento entre dos discos de rectificado con dientes de enclavamiento gruesos, que actúan uno contra otro. Una vez molido, el material cae de manera automática a través de un espacio de salida en el recipiente colector. La finura final deseada se puede definir desde el exterior, variando la anchura de dicha abertura.

Entre las ventajas que presenta el molino de discos, además de su alto rendimiento de operación (flujo de alimentación de hasta 150 kg/h) y los tamaños de molienda finos que permite alcanzar (0,1 mm), destacan las siguientes:

- Sencillo y seguro en su uso
- Trituración rápida y precisa, alta finura en un tiempo de molienda muy corto (Tabla 13)
- Resultados de molienda reproducibles con exactitud
- Permite el ajuste de precisión de la finura, incluso durante la molienda
- Equipo robusto (incluso para materiales muy duros) de larga vida útil, debido a las dimensiones generosas de los cojinetes

A parte de las ventajas citadas, cabe destacar que este aparato permite ahorros de tiempo en su manejo, ya que la cámara de molienda puede abriese completamente, haciendo que su limpieza sea especialmente sencilla y que los discos de molienda sean fácilmente accesibles para su cambio.

Tabla 13. Ejemplos de alta finura final alcanzada en el mínimo tiempo (referidos a 1 kg de alimentación y tamaño de partícula 20 mm) [58]

Material	Tiempo de molienda (min)	Ajuste de abertura (mm)	Finura (μm)		Rendimiento (kg/h)
			90% < x	50% < x	
Basalto	2,1	1,0		600	28
	3,5	0,1	220	60	17
Clínker	2,0	0,5	900	450	30
	10,0	0,1	220	60	6
Pizarra	1,4	1,0		1500	45
	2,2	0,1	300	90	27

Carbón duro	3,5	1,0		800	17
	13,5	0,1	250	100	4
Caliza	2,0	1,0	1000	420	30
	6,3	0,1	210	100	10
Potasa	1,3	1,0	1000	350	45
	2,3	0,5	350	150	36
Piedra pómez	3,5	0,5	600	250	17
	5,0	0,1	150	30	12
Vidrio	2,5	3,0	4000	2240	25
	3,3	2,0	2500	1600	18
	3,8	1,0	1400	800	16

Los sectores en los que resulta de aplicación este aparato son diversos, destacando los siguientes:

- Minería y metalurgia: minerales, carbón, coque, escorias
- Industria cerámica: esteatita, cerámica sinterizada, porcelana electrotécnica, arcilla ignífuga, cerámica dental
- Rocas y suelos: bauxita, escorias, cuarzo, clínker, yeso, tiza
- Industria del vidrio: materias primas, diferentes tipos de vidrio
- Investigación del suelo: muestras de suelo seco, lodos de depuradora, sedimentos hidrológicos, núcleos de perforación

En la siguiente tabla se recogen las características técnicas del molino de discos *Pulverisette 13* empleado en este ensayo:

Tabla 14. Características técnicas del molino de discos *Pulverisette 13* [58]

Voltaje	400 V (3~)
Intensidad de corriente	3,23 A
Frecuencia	50 Hz
Potencia	1830 W
Tamaño máximo de alimentación	20 mm (3/4")
Finura final (según separación de los discos)	0,1 – 12 mm
Dimensiones	44x87x40 cm (17x34x16")
Peso	140 kg
Mínima cantidad de muestra	20 – 30 ml
Máximo rendimiento (flujo de alimentación)	150 kg/h

Tras haber triturado la fracción correspondiente, se volvió a tamizar mediante la tamizadora *AS 450 control*, obteniéndose en este caso dos fracciones diferenciadas:

- Fracción mayor de 2 mm (>2000 μ m), con un peso en húmedo de 4,32 kg.

- Fracción 2 – 0,2 mm (2000 – 200 μm), que una vez tamizada se secó en estufa, obteniéndose un peso en seco de 24,92 kg.



Figura 28. Escoria BOF. (a) Fracción 2000 – 200 μm de tamizado – molienda – retamizado. (b) Fracción >2000 μm de tamizado – molienda – retamizado

9.2.2. Desarrollo de la prueba industrial

Tal y como se ha descrito en los apartados anteriores, con el tamizado y triturado de la escoria se obtuvieron tres fracciones granulométricas:

- Fracción mayor de 2 mm (>2000 μm), con un peso en húmedo de 4,32 kg, obtenida directamente del tamizado inicial.
- Fracción 2 – 0,2 mm (2000 – 200 μm), obteniéndose un peso total en seco de 31,54 kg, de los cuales 24,92 kg provenían de la fracción mayor de 2 mm que fue triturada y tamizada y 6,62 kg se habían obtenido directamente del primer tamizado realizado.
- Fracción menor de 0,2 mm (<200 μm), con un peso en húmedo de 1,84 kg, obtenida directamente del tamizado inicial.

Finalmente, se optó por desarrollar el test industrial con la fracción 2 – 0,2 mm, es decir, con un total de 31,54 kg de escoria diferenciados en material obtenido directamente del tamizado inicial y material obtenido mediante proceso de tamizado-trituración-retamizado.



Figura 29. Muestra testada: (a) Fracción granulométrica 2 – 0,2 mm de escoria BOF obtenida mediante tamizado-trituración-retamizado. (b) Fracción granulométrica 2 – 0,2 mm de escoria BOF obtenida mediante tamizado

La prueba se desarrolló, al igual que en el primer ensayo, sobre una lámina de acero con corrosión. La zona donde se efectuó el chorreado está marcada, como se puede observar en la Figura 30.



Figura 30. Estado de la lámina de acero antes del chorreado

El arenero empleado en la tarea tenía una capacidad de carga de 30 litros. En la siguiente tabla se muestran sus características principales:

Tabla 15. Características del arenero empleado en el segundo ensayo

Capacidad de carga	30 l
Presión mínima de aire en la boquilla	6 bar
Diámetro de la manguera	1" (2,54 cm)
Paso de la boquilla Venturi	9,5 mm



Figura 31. Arenero empleado en el segundo ensayo

9.2.3. Resultados de la prueba

Se realizaron dos chorreados utilizando los diferentes materiales aportados como abrasivo:

1. Escoria BOF tamizada
2. Escoria BOF tamizada, triturada y retamizada

En primer lugar, la prueba industrial se llevó a cabo utilizando como abrasivo la escoria BOF obtenida directamente de tamizado (Figura 29 – b). Como se ha comentado, la cantidad de material era de 6,62 kg.

Esta primera parte de la prueba tuvo las siguientes limitaciones:

1. La pequeña cantidad de material empleado, y
2. La fracción granulométrica, que presentaba mayor cantidad de tamaños finos que de tamaños gruesos.

Debido a la cantidad de partículas finas presentes en el material usado como abrasivo, se generó una gran cantidad de polvo durante la operación de chorreado.

A pesar de ello, la corrosión superficial fue eliminada, aunque la rugosidad obtenida en la chapa de acero fue muy sutil (Figura 32).



Figura 32. Estado de la lámina de acero tras el chorreado con escoria obtenida del primer tamizado

Para determinación in-situ de la rugosidad superficial tras el chorreado, y como paso previo a la aplicación de pinturas u otros tratamientos de protección, se han utilizado superficies patrón de perfil medio conocido para comparación táctil-visual definidas en ISO 8503, Parte 1 [59].

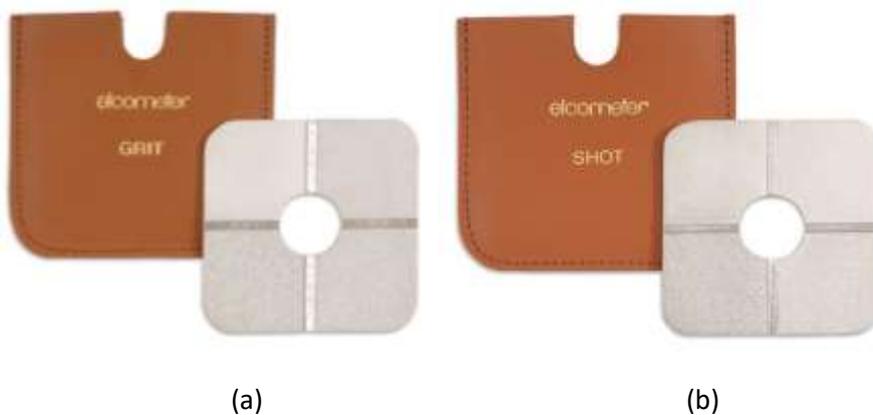


Figura 33. Comparadores de superficie: (a) para proyección de agentes abrasivos de grano irregular (G); (b) proyección de agentes abrasivos de grano nodular (S)

Los comparadores de superficies patrón para inspección táctil-visual (Figura 33) se encuentran divididos en cuatro sectores de diferentes perfiles, cuyos valores nominales de rugosidad varían según se trate de un comparador para muestras de acero preparadas por proyección de agentes abrasivos de grano irregular (*grit* - G) o muestras para acero chorreadas con agentes abrasivos de grano nodular (*shot* - S):

Muestras para acero preparadas por proyección de agentes abrasivos de grano irregular		
Sector	Valor nominal ⁰⁾ µm	Tolerancia µm
1	25	3
2	60	10
3	100	15
4	150	20
Muestras para acero chorreadas con agentes abrasivos de grano nodular		
Sector	Valor nominal ⁰⁾ µm	Tolerancia µm
1	25	3
2	40	5
3	70	10
4	100	15
a) En los casos en que se utilice microscopio (véase la Norma ISO 8503-3), el valor nominal se refiere a λ_y . Cuando se utilice el palpador (véase la Norma ISO 8503-4), el valor nominal se refiere a R_{15} .		

Figura 34. Valores nominales y tolerancias de los perfiles de superficie de los sectores de las muestras ISO de comparación táctil-visual [59]

Dado que el material empleado como abrasivo tenía grano irregular (granalla angular-irregular, denominada “*grit*”), la muestra de referencia usada en el test era tipo “G”, adecuada para perfiles chorreados con agente abrasivo de grano irregular.

Muestras para acero preparadas por proyección de agentes abrasivos de grano irregular		
Sector	Valor nominal ⁰⁾ µm	Tolerancia µm
1	25	3
2	60	10
3	100	15
4	150	20

Figura 35. Muestras para acero preparadas por proyección de agentes abrasivos de grano irregular (tipo “G”) [59]

A fin de clasificar los perfiles de rugosidad obtenidos mediante chorreo con abrasivo, se posiciona el comparador contra un área de la superficie chorreada, y se comparan, uno por uno, los cuatro sectores de la muestra con la superficie sometida a ensayo.

Se eligen los perfiles de la muestra de comparación más parecidos al perfil de la superficie tratada y, según esto, se determina el tipo de perfil:

Fino	Perfiles correspondientes al sector 1 y hasta el sector 2, excluido este último
Medio	Perfiles correspondientes al sector 2 y hasta el sector 3, excluido este último
Grueso	Perfiles correspondientes al sector 3 y hasta el sector 4, excluido este último

Figura 36. Límites de los tipos de perfil [60]

Aumentando la Figura 32, puede observarse que, de acuerdo a la norma ISO 8503, la rugosidad del perfil alcanzada se encuentra entre los sectores 2 y 3, por lo que se trata de un perfil medio. Debido a ello, la rugosidad obtenida está, aproximadamente, entre 60 y 100 μm de valor nominal (valor más próximo a 60 μm).



Figura 37. Rugosidad obtenida tras el chorreado con escoria BOF obtenida del primer tamizado

Tras haber usado la fracción de escoria BOF de tamaño 2000-200 μm obtenida directamente del tamizado, se realizó la prueba con la escoria de la misma granulometría que se obtuvo tras un tratamiento intermedio de molienda (Figura 29 – a).

El peso total de este segundo material testado era de 24,92 kg, por lo que los resultados son más representativos que en el caso previo. Esta cantidad de escoria BOF permitió el tratamiento de, aproximadamente, un metro cuadrado de la superficie de la lámina de acero (Figura 30).



Figura 38. Estado de la lámina de acero tras el chorreado con escoria obtenida mediante tamizado – molienda – retamizado

En este caso, se obtuvo un perfil de rugosidad mayor, mientras que el polvo generado durante la operación resultó mucho menor que en el caso anterior, posiblemente debido a la menor presencia de partículas finas en la composición del material.

De acuerdo a la norma ISO 8503, el perfil de rugosidad alcanzado en la segunda parte de la segunda prueba industrial se encuentra entre los sectores 3 y 4, tratándose, por tanto, de un perfil grueso. Es decir, la rugosidad obtenida se encuentra entre 100 y 150 μm de valor nominal, siendo más cercana a 100 μm . Esta rugosidad satisface los requerimientos industriales actuales, como es el caso del sector de las torres eólicas.



Figura 39. Rugosidad obtenida tras el chorreado con escoria BOF obtenida mediante tamizado – molienda – retamizado

9.3. Pruebas físicas y químicas

Para llegar a 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.

Existe una norma internacional que regula los métodos de ensayo para materiales abrasivos no metálicos para preparación de superficies por chorreado, la norma ISO 11127 [61]. Dicha norma se subdivide en siete partes en donde se especifican los ensayos necesarios y la metodología que se debe seguirse para su realización.

- Parte 1: Toma de muestras
- Parte 2: Análisis granulométrico
- Parte 3: Determinación de la densidad aparente
- Parte 4: Evaluación de la dureza mediante un ensayo sobre placa de vidrio
- Parte 5: Determinación de la humedad
- Parte 6: Determinación de los contaminantes solubles en agua por conductimetría
- Parte 7: Determinación de cloruros solubles en agua

Los ensayos físicos y químicos de la escoria BOF, establecidos en las partes 3, 4, 5, 6 y 7 de la citada norma, fueron realizados en los laboratorios de un centro tecnológico especializado en materiales avanzados.

9.3.1. Determinación de la densidad aparente

La densidad aparente de un abrasivo no metálico se determina según la metodología descrita en la parte 3 de la norma ISO 11127 [62], haciendo uso del método del picnómetro.

El equipo necesario para el desarrollo del ensayo es el siguiente:

- Picnómetro de tipo Gay-Lussac, de 50 ml de capacidad, con tapa provista de tubo capilar.
- Estufa capaz de mantenerse a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Balanza, con precisión de 0,01 g.
- Desecador que contenga un producto higroscópico (como, por ejemplo, gel de sílice deshidratado), impregnado en cloruro de cobalto.

La densidad aparente se determina por duplicado. La metodología a seguir para el desarrollo de la prueba consiste en los pasos que se enumeran a continuación:

1. Se seca una cantidad suficiente de muestra, calentándola durante una hora a una temperatura de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$. Se deja enfriar en el desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente.
2. Se pesa el picnómetro, seco y limpio, con una precisión de 0,01 g, y posteriormente se le adicionan unos 10 g de la muestra de ensayo seca, volviendo a pesar nuevamente.
3. Se añade agua destilada o desionizada al picnómetro, hasta llenarlo completamente. Se coloca la tapa y se agita cuidadosamente para eliminar el aire adherido a la muestra de ensayo. Se retira la tapa, se rellena de nuevo el picnómetro con agua y se vuelve a colocar la tapa, forzando al exceso de agua a ser expulsado mediante el tubo capilar. Se seca cuidadosamente el exterior del picnómetro, verificando que no queden burbujas de aire en el interior. Se pesa de nuevo el picnómetro junto a su contenido.
4. Se vacía el picnómetro de agua y de la porción de ensayo, enjuagando varias veces para que no queden restos de abrasivo. Se rellena de nuevo el picnómetro con agua destilada o desionizada, se coloca la tapa y se verifica que no se encuentran presentes burbujas de aire. Se seca el exterior del picnómetro y se pesa.
5. Se ha de procurar manipular el picnómetro lo menos posible para evitar el calentamiento del mismo por las manos. Asimismo, el picnómetro, la porción a ensayar y el agua deben encontrarse a la misma temperatura, en la medida de lo posible.

Una vez desarrollado el procedimiento operatorio, se calcula la media de las dos determinaciones requeridas.

Los resultados obtenidos en este ensayo se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 16. Resultados obtenidos en el ensayo de determinación de la densidad aparente

Muestra	Probeta	Densidad aparente (kg/m^3)	Media (kg/m^3)
Escoria	1	3330	3390
	2	3450	

9.3.2. Evaluación de la dureza mediante un ensayo sobre placa de vidrio

La parte 4 de la norma ISO 11127 [63] describe la metodología a seguir para evaluar la dureza del material. Mediante este ensayo solamente se determina si la dureza es superior o inferior a 6 en la escala de Mohs.

Para este ensayo, los aparatos a emplear son un microscopio de 10 aumentos y un portaobjetos de vidrio utilizado en microscopía.

El procedimiento operatorio consiste en examinar una pequeña cantidad de material al microscopio, y se seleccionan unos cuantos granos de los diferentes colores o tamaños que haya en la muestra.

Los granos seleccionados se posicionan entre dos placas portaobjetos de vidrio y, mientras se aplica presión, se hace desplazar una placa sobre la otra durante 10 segundos. Una vez transcurrido este tiempo, se examina la superficie de las placas. Si se encuentran arañadas, se considera que el material ensayado presenta una dureza mínima de 6 en la escala de Mohs.

La Tabla 17 recoge los resultados obtenidos para este ensayo:

Tabla 17. Resultados obtenidos en la evaluación de la dureza mediante ensayo sobre placa de vidrio

Muestra	Probeta	Dureza Mohs
Escoria	1	> 6

9.3.3. Determinación de la humedad

El método de ensayo para la determinación de los niveles de humedad retenida en los abrasivos no metálicos para chorreado queda definido en la parte 5 de la norma ISO 11127 [64]. La cantidad de humedad presente en el material de ensayo se determina midiendo la masa perdida al calentar.

El equipamiento necesario para la realización del ensayo, aparte de los aparatos de vidrio de uso habitual en laboratorio, se enumera a continuación:

- Contenedor o cubeta capaz de resistir el calor aplicado, con capacidad suficiente para permitir que la muestra de ensayo pueda ser esparcida en forma de capa fina.
- Estufa capaz de mantenerse a una temperatura de 110 ± 5 °C.
- Balanza con precisión de 0,01 g.
- Desecador que contenga un producto higroscópico (como, por ejemplo, gel de sílice deshidratado), impregnado en cloruro de cobalto.

La humedad, al igual que la densidad aparente, se determina por duplicado. Debe asegurarse que la muestra a ensayar se conserve en un recipiente hermético hasta que se vaya a realizar

el ensayo, para que no se produzca contaminación de la misma. La metodología a seguir consta de los siguientes pasos:

1. Se seca el contenedor o cubeta en la estufa, a $110\pm 5^{\circ}\text{C}$, durante 15 min, y se deja enfriar hasta temperatura ambiente en el desecador.
2. Se pesa el contenedor, y posteriormente se introduce una porción de ensayo de, aproximadamente, 100 g, volviendo a realizar la pesada ajustando a 0,01 g más próximo.
3. Se coloca el contenedor con la porción de material de ensayo en la estufa, previamente atemperada a $110\pm 5^{\circ}\text{C}$, y se deja dentro durante 1 hora.
4. Se transfiere el contenedor al desecador y se deja enfriar hasta temperatura ambiente.
5. Se vuelve a pesar el contenedor con la porción de ensayo seca, ajustando a 0,01 g más próximo, y se determina la porción de ensayo seca.

Una vez desarrollado el procedimiento operatorio, se calcula la media de las dos determinaciones requeridas.

Los resultados obtenidos en este ensayo se muestran a continuación:

Tabla 18. Resultados obtenidos en el ensayo de determinación de la humedad

Muestra	Temperatura de secado ($^{\circ}\text{C}$)	Probeta	Humedad (%)	Media (%)
Escoria	110 $^{\circ}\text{C}$	1	2,38	2,62
		2	2,85	

9.3.4. Determinación de los contaminantes solubles en agua por conductimetría

La capacidad del agua para conducir la electricidad se incrementa con la concentración de sales [65]. Midiendo la conductividad eléctrica del agua, la salinidad se puede estimar de manera rápida y fiable.

Las aplicaciones como el chorreado, requieren que el material empleado como agente abrasivo sea estable químicamente. Por este motivo, se requieren mediciones de la conductividad para determinar la capacidad de oxidación que el agente abrasivo presentaría sobre el material a limpiar, principalmente en el caso de que la superficie a tratar sea metálica.

En aquellos casos en los que el material testeado cuente con baja conductividad, se podrá considerar su uso como abrasivo, mientras que por el contrario, las altas conductividades

reducirían las posibilidades de emplear el material como agente abrasivo para operaciones de chorreado superficial.

El método para determinar los contaminantes solubles en agua en los abrasivos no metálicos para chorreado queda establecido en la parte 6 de la norma ISO 11127 [66], y se basa en la medición de la conductividad.

Además de los aparatos de vidrio de uso corriente en laboratorio, los equipos necesarios para la realización del ensayo son: puente conductimétrico y célula de conductividad, con compensación de temperatura e intervalo de 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y balanza con precisión 0,1 g.

El ensayo se realiza por duplicado, siguiendo los pasos que se enumeran a continuación:

1. Se pesa una porción de ensayo de $100\pm 0,1$ g de muestra en un matraz de 250 ml, y se adicionan 100 ± 1 ml de agua para la determinación de la conductividad. El agua empleada ha de ser de una pureza de calidad 2 como mínimo.
2. Se agita durante 5 minutos y se deja reposar durante 1 hora. Se agita de nuevo durante 5 minutos y se deja sedimentar. Si el líquido no está completamente claro, se filtra mediante un método adecuado.
3. Se llena con el líquido obtenido la célula de conductividad del puente conductimétrico. Se mide la conductividad de la solución en milisiemens por metro a 20°C.

Una vez desarrollado el proceso de evaluación, se calcula la media de dos determinaciones válidas, indicando el resultado redondeando al 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ más cercano.

Tabla 19. Resultados obtenidos en el ensayo de determinación de los contaminantes solubles en agua por conductimetría

Muestra	Probeta	Conductividad eléctrica (mS/m)	Media (mS/m)
Escoria	1	734	721
	2	707	

9.3.5. Determinación de cloruros solubles en agua

Las sales contaminantes más comunes son los cloruros, sulfatos y nitratos. Pequeñas cantidades de cloruros y sulfatos, que son incoloros en solución acuosa, son suficientes para iniciar un ciclo corrosivo [67]. Si los agentes abrasivos empleados en la tarea de chorreado están contaminados con estas sales, la superficie tratada con ellos podrá verse contaminada con el impacto sobre la superficie.

La norma ISO 11127, en su parte 7 [68], especifica el método para la determinación de los cloruros solubles en agua de los abrasivos no metálicos destinados a la preparación de superficies por chorreado.

Para la realización del ensayo se emplea agua de pureza 3, como mínimo, además de ácido sulfúrico de aproximadamente 96% de concentración y densidad 1,84 g/ml, y nitrato de plata de concentración 0,01 mol/l.

Junto a los aparatos y material de vidrio de uso común en laboratorios, el equipamiento necesario para el desarrollo de la prueba consiste, fundamentalmente, en un equipo de valoración amperométrica, microbureta y balanza de precisión 0,1 g.

El procedimiento operatorio, que ha de desarrollarse por duplicado, marcado por la norma de aplicación es el siguiente:

1. Se pesa una porción de ensayo de 100 g en un matraz de 250 ml, y se adicionan 100 ml de agua. Se agita la mezcla durante 5 min, y se deja reposar durante 1 h.
2. Se agita nuevamente durante 5 min, y se deja sedimentar. En el caso de que la solución no se encuentre completamente clara, se filtra mediante el método apropiado.
3. Se cogen 25 ml de la solución. Se añaden 0,1 ml de ácido sulfúrico y se diluye con agua hasta, aproximadamente, 75 ml.
4. Se valora la solución con el nitrato de plata, haciendo uso de la microbureta, y se toma como punto final el potencial al que la aguja del galvanómetro invierte su dirección.

Se calcula la media de las dos determinaciones válidas y se indica el resultado redondeando al 0,0001% más próximo.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos con el desarrollo de este ensayo:

Tabla 20. Resultados obtenidos en el ensayo de determinación de cloruros solubles en agua

Muestra	Probeta	Cloruros solubles (% en masa)	Media (% en masa)
Escoria	1	0,0000	0,0000
	2	0,0000	

9.3.6. Resultados de los ensayos

Los resultados obtenidos en los ensayos físicos y químicos realizados a la escoria BOF 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:

Tabla 21. Comparativa de los resultados obtenidos para la escoria BOF con respecto a los valores límite recogidos en la norma ISO 11126

Propiedad		Escoria de refinado de cobre	Escoria de horno de hierro	Escoria de horno de carbón	Escoria BOF
Densidad aparente	kg/m ³	(3,3 a 3,9)x10 ³	(3,0 a 3,3)x10 ³	(2,4 a 2,6)x10 ³	3,39 x10 ³
Dureza Mohs		mín.6	mín.6	mín.6	>6
Humedad	%	máx.0,2	máx.0,2	máx.0,2	2,62
Conductividad del extracto acuoso	mS/m	máx. 25	máx. 25	máx. 25	721
Cloruros solubles en agua	%	máx. 0,0025	máx. 0,0025	máx. 0,0025	0,000

Como puede observarse en la Tabla 21, el valor de densidad aparente obtenido para la escoria BOF es concordante con los valores reflejados en la bibliografía técnica [15]. Dicho valor se encuentra en los rangos fijados en la norma ISO 11126, siendo menor que para el caso de la escoria de refinado de cobre, abrasivo no metálico cuyo uso está más extendido en la actualidad. Esto supone una ventaja principalmente para el operador de la tarea, ya que un abrasivo muy pesado dificultaría el manejo del equipo.

La dureza es superior a 6 en la escala de Mohs, si bien el ensayo de evaluación de la dureza establecido en la norma ISO 11127-5 [63] no permite conocer el valor exacto de la dureza, únicamente permite determinar si se supera el valor umbral establecido.

El ensayo de cloruros solubles en agua ha resultado satisfactorio, habiéndose obtenido un valor nulo. Sin embargo, el ensayo de humedad y conductividad del extracto acuoso han reflejado resultados que distan de manera significativa de los valores establecidos en la norma.

El material enviado a ensayo no se había visto sometido a ningún tratamiento de secado, lo que podría explicar que el porcentaje de humedad presente en el material sea tan elevado en comparación con los abrasivos considerados en la norma.

El valor de la conductividad del extracto acuoso ha resultado muy superior al permitido por ISO 11126 para los abrasivos sintéticos no metálicos regulados en la actualidad. Para comprobar

que no se hubiese producido ningún error durante la realización del ensayo de conductividad, se procedió a la realización de un segundo ensayo que verificó el valor obtenido.

Este segundo ensayo se realizó con muestras de escoria BOF generada en el proceso LD y procesada en planta de tratamiento mediante separación magnética, obteniendo una fracción no metálica 0-10 mm (en adelante, escoria BOF A). La cantidad de material seleccionado fue de 15 kg, aproximadamente.

Para asegurar que el valor de este segundo ensayo fuese representativo, se simultaneó el ensayo de la escoria BOF A con otro ensayo de escorias BOF procesadas en otra planta de tratamiento (en adelante escoria BOF B), con granulometría 0-3 mm.

La metodología seguida para la determinación de la conductividad fue la establecida en la norma ISO 11127-6, explicada en el Apartado 9.3.4 del presente documento. Tal y como indica la norma, los ensayos fueron realizados por duplicado para cada material.

Las escorias BOF se separaron en botes de 1 litro de capacidad. Dichos botes se llenaron con material de diferentes puntos para obtener muestras representativas. Posteriormente, cada bote se agitó para proporcionar una buena mezcla del material.

Para preparar la muestra, se introdujeron 100 g de material en 4 vasos de vidrio diferentes. Después, se añadieron 100 ml de agua destilada a cada vaso de precipitados, procediendo a la agitación de las mismas durante 5 minutos cada una.



Figura 40. Muestras de 100 g de escoria BOF (la muestra de 5 g fue descartada)

Una vez agitadas, las muestras se dejaron reposar durante 1 hora. Posteriormente, las muestras volvieron a ser agitadas durante 5 minutos.



Figura 41. Muestras tras haber reposado durante 1 hora



Figura 42. Mezcla de la escoria BOF

Finalmente, la mezcla se dejó sedimentar y se filtró. El agua clara resultante se recogió en diferentes vasos para medir su conductividad.



Figura 43. Agua final filtrada para medida de la conductividad

Los resultados de los ensayos realizados a las muestras de escoria BOF se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 22. Resultados de los ensayos de conductividad realizados a escorias BOF 1 y BOF 2

Muestra	Probeta	Conductividad eléctrica (mS/m)	Media (mS/m)
BOF A (0-10)	1	776	771
	2	766	
BOF B (0-3)	1	815	801,5
	2	788	

Queda por tanto demostrado que los valores de conductividad de la escoria BOF son mucho mayores que los requeridos para este tipo de aplicaciones. Observando esto, podría concluirse que la mayor problemática en el uso de la escoria BOF como agente abrasivo para granallado es en los valores de conductividad.

9.4. Análisis de los resultados

Tras el desarrollo de las pruebas a escala industrial, puede concluirse lo siguiente:

1. **Es posible el uso de escoria BOF como agente abrasivo para chorreado superficial.** No requiere de equipamiento especial o adaptaciones para su utilización.
2. **La granulometría del material es un factor esencial para alcanzar un perfil de rugosidad aceptable.** Los tamaños de grano cercanos a 2 mm parecen los más adecuados, aun así se debe realizar una mejor definición de la curva granulométrica del material.
3. **El polvo generado es excesivo.** Aunque parcialmente está causado por el impacto de la fracción mayoritaria (tamaños finos), el polvo de la escoria debe ser pre-filtrado.
4. **El rendimiento es bajo.** Los operadores y expertos calculan que es de, aproximadamente, el 80% en comparación con los abrasivos empleados actualmente. Esto tiene un impacto en el posible precio para su comercialización como agente abrasivo.

En cuanto a los resultados aportados por los ensayos químicos y físicos, las conclusiones son las siguientes:

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/m^3 , 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 interesante realizar un tratamiento de estabilización de la cal libre.

10. Sector de aplicación

El objetivo de este estudio, como se ha comentado , es introducir un nuevo abrasivo para su aplicación en tareas de limpieza mediante chorreado, que sustituya a la arena de sílice o al resto de abrasivos establecidos en las normas, como la escoria de horno de hierro o la escoria del refinado de cobre.

El material sustituto debe satisfacer los requisitos técnicos, pero también ha de ser viable económicamente y competitivo con el resto de productos similares.

Las aplicaciones típicas de las técnicas de chorreado superficial se desarrollan en los sectores naval, industrial y de la construcción.

10.1. Sector naval

En la industria de la construcción naval y de la reparación de buques y otras naves, el chorreado con abrasivo es la técnica más extendida de preparación superficial, utilizada para eliminar capas de pintura antiguas y otros materiales superficiales tales como óxido, incrustaciones, sales o suciedad en general.

El chorreado abrasivo se emplea tanto en la fase de fabricación del buque (en tuberías, placas de acero, elementos de acero utilizados en conjuntos estructurales y otros materiales) como durante las operaciones de mantenimiento y reparación, que incluyen el chorreado superficial como paso previo a la aplicación de nuevas pinturas sobre el casco o tanques y espacios interiores de la nave [69].

El pretratamiento de la superficie es un paso muy importante en la industria naval. Sin una adecuada preparación superficial, los revestimientos posteriores fallarán prematuramente debido a la mala adhesión [52].

El proceso de chorreado con abrasivo para limpieza superficial del casco de los buques implica el choque de la granalla propulsada con aire a alta presión contra la chapa para eliminar la pintura, el óxido y la materia contaminante que pueda estar adherida a la superficie [53].

El mantenimiento principal de los buques consiste en la eliminación periódica de las adherencias marítimas y el recubrimiento desgastado del casco, para el posterior repintado del casco (Figura 44). Este proceso se repite cada 4 o 5 años, y tiene como principales finalidades

preservar la integridad del casco, garantizar las condiciones de navegación y mantener la superficie lisa, minimizando el consumo de combustible, reduciendo los costos de operación y evitando la contaminación atmosférica [70].



Figura 44. Método de limpieza del casco de los buques [71] [72]

El sector de la construcción naval mundial opera en un mercado altamente dinámico e internacionalizado. Como consecuencia, la actividad contractual global registrada a lo largo de los años muestra un comportamiento inestable.

En la Figura 45 se puede observar que con el paso de los años se tiende a construir un menor número de barcos, pero con mayor tonelaje bruto (*GT*) o tonelaje bruto compensado (*CGT*). Prueba de ello es que, al analizar la capacidad de los más de 124000 buques construidos desde 1970 hasta la actualidad existe un aumento significativo en el tonelaje bruto promedio (*GT*) por unidad, pasando de los 3000 *GT* contemplados en el citado año, a los más de 30000 *GT* registrados en el año 2014.

El tonelaje bruto (*GT*) es la unidad de medida correspondiente a la capacidad o volumen de todos los espacios situados debajo de la cubierta superior más los espacios cerrados situados en la superestructura, representando, por tanto, las dimensiones del buque. Por otra parte, el tonelaje bruto promedio (*CGT*) se obtiene a partir del tonelaje bruto (*GT*), y se relaciona con la sofisticación en la construcción del buque mediante dos coeficientes, que son función de su complejidad (*A* y *B*). Su definición y cálculo son propuestos por la OECD (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos):

$$CGT = A \cdot GT^B$$

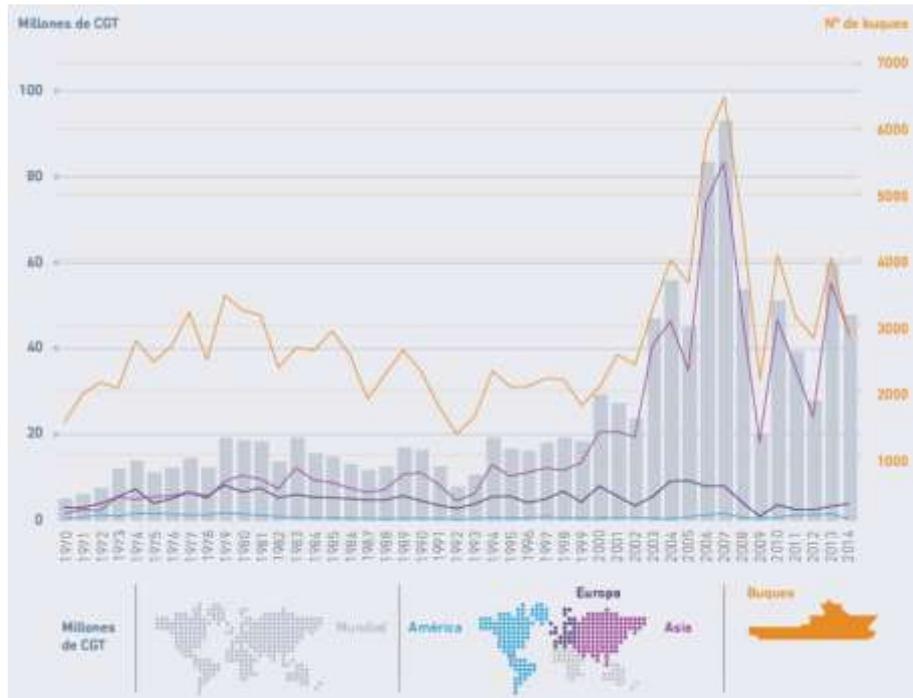


Figura 45. Evolución internacional de las nuevas contrataciones en el mercado de astilleros [73]

Respecto a España, es importante destacar que se trata de un país de tradición marítima. Más de tres cuartas partes del perímetro del territorio español son litorales. Las costas españolas miden 7880 kilómetros, 3200 kilómetros en la vertiente mediterránea y 4680 kilómetros en la vertiente atlántica. Por esta razón, los astilleros nacionales ocupan un papel predominante dentro de Europa (Figura 46).

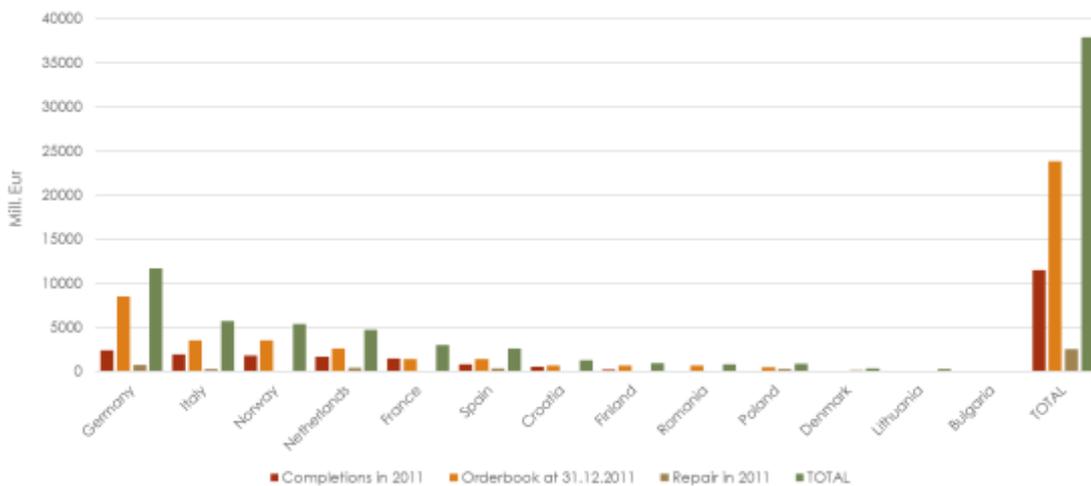


Figura 46. Situación de Europa en el mercado de los astilleros: cartera de pedidos y reparaciones en el año 2011 [74]

La mayor parte de los astilleros españoles están situados a lo largo de la costa que bordea el mar Cantábrico (Galicia, Asturias, Cantabria y País Vasco). Además, destaca la existencia de un

astillero en la capital de España. Esto se debe a que Navantia S.A. es una empresa pública dedicada a la construcción naval civil y militar cuya sede se encuentra en Madrid.

Con periodicidad trimestral, el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España evalúa el sector naval y publica un informe sobre la actividad productiva que las 19 empresas navales localizadas en el país desarrollan durante ese tiempo, con la cantidad de buques encargados y su tamaño (Tabla 23).

Tabla 23. Boletín informativo trimestral de la construcción naval (hasta 31/12/2016) [75]

ASTILLEROS	Nuevos contratos			Cartera de pedidos		
	Nº	GT	CGT	Nº	GT	CGT
A. Armón	6	2,216	10,547	9	3,681	16,957
A. Armón Vigo	4	3,282	11,243	4	3,282	11,243
A. Gondán	1	5,610	9,708	6	18,213	37,376
A. J. Valiña	0	0	0	0	0	0
A. Murueta	0	0	0	2	2,090	5,084
A. Zamakona Pasaia	0	0	0	0	0	0
Auxnaval	0	0	0	0	0	0
A. Ría de Avilés	0	0	0	0	0	0
F. Cardama	1	950	3,228	5	3,540	12,737
A. Zamakona	0	0	0	10	8,154	26,909
Balenciaga	1	5,893	10,008	2	9,812	14,519
C. N. Freire	2	9,800	20,012	4	17,810	35,317
F. Vulcano	0	0	0	1	15,966	19,289
Nodosa	3	2,563	8,290	7	6,359	20,433
H.J. Barreras	0	0	0	0	0	0
Metalships & Docks	1	4,950	10,078	1	4,950	10,078
A. Armón Gijón	0	0	0	0	0	0
C.N.N. Sestao	1	58,500	48,500	4	120,932	114,100
Navantia	0	0	0	5	349,610	143,788
TOTAL	20	93,764	131,614	60	564,399	467,830

En reuniones técnicas establecidas con compañías especializadas en limpiezas industriales, se confirmó que, excepto para operaciones muy específicas, el abrasivo utilizado para llevar a cabo las limpiezas superficiales de los barcos es la escoria de refinado de cobre. Esto se debe a que su rendimiento es muy alto, además de ser el agente abrasivo más barato recogido en la normativa de aplicación al sector, contando con un precio aproximado de 26 €/t, sin tener en cuenta el transporte al lugar de realización de la tarea.

En cuanto a la cantidad de abrasivo necesario para el proceso de chorreado superficial, esta es dependiente de los requisitos técnicos y estéticos que se pretendan alcanzar. Aun así, se estima que para un barco nuevo de 1000 GT, se precisan 850 toneladas de escoria de cobre, aproximadamente. En el caso de mantenimiento de un buque en servicio, se exige un 40% más de abrasivo que para el caso de nueva construcción.

10.2. Sector industrial

Durante las últimas cuatro décadas, la limpieza por chorreado abrasivo al aire libre se ha considerado como el método más eficaz y rentable de preparación de superficies de acero a gran escala antes de la aplicación de recubrimientos [76]. Por esta razón, el chorreado juega un papel relevante en los procesos industriales.

Los sectores más importantes de aplicación del chorreado superficial en la industria son la limpieza o pretratamiento de las superficies y la descontaminación de lugares con radioactividad. En el primer caso, el método es el mismo que se emplea en los astilleros. Las partículas de abrasivo impactan con gran energía sobre las piezas a tratar para limpiarlas o para prepararlas para procesos de acabado, como el pintado.

10.2.1. Limpieza superficial con abrasivo

La limpieza superficial con abrasivos se aplica en el mantenimiento de la instalación industrial (Figura 47). La idea fundamental del proceso es proteger las infraestructuras contra el ataque de materiales corrosivos, proporcionando una buena apariencia.

La limpieza abrasiva está considerada como el mejor método de preparación del acero antes de pintar [77]. La tarea consiste en proyectar partículas de abrasivo a través de una corriente de aire accionada por un compresor sobre las estructuras a tratar, a fin de limpiar la superficie o dejarla preparada para un tratamiento posterior.



Figura 47. Limpieza por chorro abrasivo en un tanque de almacenamiento de aceite [78]

10.2.2. Tecnologías de descontaminación

La descontaminación se define como la eliminación de la contaminación de superficies de instalaciones o equipos. En ocasiones, puede referirse también a la limpieza de la radiactividad que se encuentre contaminando al material en profundidad [79].

Uno de los objetivos fundamentales de este proceso es la restauración de lugares o instalaciones que se hayan visto expuestas a focos de contaminación. Para lograr tal propósito, en los programas de descontaminación se suelen incluir técnicas como lavado, calentamiento, acción química o electroquímica, limpieza mecánica u otras técnicas [80].



Figura 48. Operador desarrollando tareas de chorreado abrasivo en húmedo para descontaminación de grandes piezas [79]

Las tecnologías aplicadas a este campo incluyen, como se ha mencionado, métodos mecánicos, como el chorreado. Para las tareas de descontaminación, el sistema de limpieza por chorro se utiliza para eliminar contaminantes de la superficie a través de la acción abrasiva de las partículas que, con la eclosión, golpean la superficie contaminada [81]. La tecnología de descontaminación mecánica es idéntica a las técnicas necesarias para eliminar el polvo, la suciedad o los agentes de corrosión no radiactivos [82].

Los materiales a descontaminar son, básicamente, hormigón y metal. En el caso del hormigón, la limpieza se realiza sobre un material poroso. Debido a ello, y aunque en realidad la contaminación resida normalmente en el cuarto de pulgada superior bajo la superficie, puede darse el caso de que la contaminación afecte a toda la estructura. Por el contrario, los metales habitualmente se encuentran contaminados únicamente de manera superficial.

Las técnicas de chorreado abrasivo, y más concretamente las realizadas con granalla angular, han demostrado ser muy versátiles tanto para la descontaminación in situ como para componentes desmontados (como bloques de protección, recipientes, etc.). Las capas de hormigón de varios milímetros de grosor pueden eliminarse con altos ratios de producción siempre y cuando se elija un abrasivo adecuado a tal fin [83]. A pesar de ello, la posible contaminación cruzada de las superficies es un problema a tener en cuenta al planificar la operación.

10.3. Sector de la construcción/edificación

La limpieza de edificios o estructuras se realiza, principalmente, por dos razones: para mejorar la apariencia de la infraestructura o para eliminar revestimientos antiguos o dañados, suciedad, manchas y otros contaminantes que puedan producir deterioro en la construcción [51]. En este aspecto, la limpieza con chorro abrasivo se considera un método adecuado para limpiar fachadas, reparar estructuras de hormigón o para obtener un determinado acabado del hormigón.

10.3.1. Limpieza de fachadas

El chorreado con abrasivos es una técnica mecánica que se ha utilizado durante muchos años para el mantenimiento y reparación de fachadas. El procedimiento se basa en la aplicación de agentes abrasivos propulsados mediante energía cinética para romper la unión entre depósitos de superficie y el sustrato por impacto, corte o fricción, tanto en edificios de interés histórico como en otros no catalogados como tal [84].

Como caso particular de limpieza de fachadas, aparece la eliminación de *graffiti*. El problema tiene tanta relevancia en la actualidad como para ser mencionado en una sección separada de la limpieza de fachadas tradicional con abrasivos debido a la resistencia de los productos empleados en esta técnica, que llegan incluso a estropear el área de la construcción. Se trata de un problema creciente, visible en la mayoría de ciudades y pueblos de todo el mundo. Alrededor de 3.500.000 monumentos protegidos en las ciudades europeas se ven afectados por este fenómeno [85]. El problema se extiende a través de las propiedades públicas y privadas, afectando a los materiales de la edificación, e incluso suponiendo la pérdida de valor de la construcción. Además, para la eliminación de estas pintadas se hace necesaria una inversión monetaria que cubra equipos, vehículos y personal [86].

El chorreo abrasivo se considera una técnica mecánica tradicional para eliminación de grafitis, siempre y cuando se realice a baja presión de chorro. En este campo de aplicación, el método se denomina limpieza abrasiva blanda. La razón es que un impacto fuerte de las partículas abrasivas puede dañar la superficie sobre la que se asienta el *graffiti*.

La limpieza de *graffiti* es una parte esencial de los tratamientos de conservación, necesarios por razones estéticas, pero también para garantizar una mejor preservación de los materiales de piedra.



Figura 49. Aplicación de técnicas de chorreado superficial para eliminación de *graffiti*

Aunque los métodos de limpieza de *graffiti* son potencialmente eficaces, presentan en algunos casos el potencial de eliminación excesiva de material u otros cambios en las superficies, pudiendo ocasionar daños superficiales e incluso estructurales [87]. Algunos métodos de limpieza de *graffiti* pueden acelerar también la descomposición de la piedra a través de la interacción con ciertos sustratos, o la generación de subproductos que, permaneciendo dentro del material tratado, pueden afectar a la preservación futura [88].

10.3.2. Técnica de abujardado

La preparación de la superficie es un factor crítico en el rendimiento de revestimientos y materiales de reparación aplicados al hormigón. Durante muchos años, la técnica del abujardado se ha utilizado para tratar las superficies realizadas con este material. La técnica consiste en erosionar el material mediante chorreado o con una máquina que realiza pequeñas perforaciones. En este último caso, solo resulta posible la aplicación sobre superficies horizontales debido a las características del propio equipo de trabajo, mientras que el chorreado puede ser utilizado en todo tipo de superficies, ya sean verticales u horizontales, de hormigón.

La utilización del chorreado como técnica de rotura del hormigón para su acondicionamiento tiene dos aplicaciones principales:

- Por un lado, la eliminación del hormigón deteriorado de las estructuras, como el caso de rehabilitación de puentes, especialmente para reparar los daños ocasionados por la corrosión [89].
- Por otro lado, esta técnica puede ser el paso final del proceso de construcción de las infraestructuras de hormigón, donde el proyectista define, según su criterio estético, el hormigón superficial con determinada rugosidad.

11. Análisis de mercado

En este documento se evalúa el uso de la escoria BOF como agente abrasivo. En comparación con los abrasivos convencionales, la escoria de acería, una vez realizado el tratamiento adecuado, presenta un rendimiento y unas características técnicas similares a la escoria del refinado de cobre. Este subproducto de la industria de fundición del cobre es, como ya se ha comentado, el abrasivo de origen sintético más empleado en operaciones de chorreado al aire libre mediante aire comprimido [49].

En la actualidad, el mercado de la escoria de refinado proveniente de la industria del cobre en España se encuentra prácticamente limitado a dos compañías, que se dividen la comercialización de la misma como agente abrasivo en función de la distribución geográfica: Abrasivos Mendiola en el norte y Atlantic Cooper en el sur. La diferencia fundamental entre los mismos es que Atlantic Cooper es productor y distribuidor de la escoria, mientras que Abrasivos Mendiola simplemente la distribuye.

En el primer caso, el complejo metalúrgico de Atlantic Cooper, situado en Huelva, se dedica al uso integral de materiales que contienen el concentrado de cobre, pero cuentan solamente con una planta para el secado y tamizado de la escoria de cobre resultante del proceso integral de la metalurgia del cobre para su uso como agente abrasivo [90].

Por el contrario, Abrasivos Mendiola, con sede en Erandio (Bilbao), recibe la escoria de refinado de cobre de fundiciones de cobre cercanas a su planta de tratamiento, en la cual le realizan un tratamiento consistente en lavado, molienda, tamizado y secado de la escoria para su comercialización.

En el año 2015, Atlantic Cooper obtuvieron 620.000 toneladas de escoria de cobre [91], vendidas a un precio medio del orden de 26 €/t (sin contar el precio del transporte). Para la realización de este proyecto, se han mantenido reuniones con compañías dedicadas al sector de la limpieza superficial mediante chorreado de abrasivos que han verificado el alto rendimiento y la buena relación calidad/precio de la escoria de cobre como agente abrasivo.

De acuerdo con la experiencia de los profesionales dedicados al sector, 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.

Además, el mercado de los nuevos abrasivos se incrementa cada día debido a las restricciones ambientales y de seguridad al uso de arena de sílice, ocasionadas tanto por los riesgos que acarrea para la salud de los trabajadores (silicosis, cáncer de pulmón, etc.) como por el gran volumen de polvo generado en la aplicación.

12. Conclusiones

Mediante la realización del presente Trabajo Fin de Máster se han obtenido las siguientes conclusiones:

- El mercado de los abrasivos de chorreado se encuentra en constante evolución a causa de las restricciones tanto ambientales como de seguridad que ocasiona el uso del agente abrasivo tradicional, la arena de sílice.
- La industria de la limpieza y preparación superficial recoge abrasivos no metálicos de origen sintético, contribuyendo a la valorización de residuos generados en diferentes procesos industriales, y por lo tanto, a la economía circular y al desarrollo sostenible.
- Por ello, se presenta como posible consumidora de residuos siderúrgicos, fomentando la sinergia entre actividades industriales y facilitando la mejora de la sostenibilidad de ambos procesos por combinado.
- De este modo, se reducen los gastos de la beneficiación de la arena de sílice de las explotaciones a cielo abierto y se consiguen ahorros en cuanto a la gestión y envío a vertedero de las escorias siderúrgicas, reduciendo los daños que ambos procesos suponen para el medio ambiente.
- Para su adecuación a los estándares fijados a los diversos abrasivos no metálicos recogidos en la normativa de aplicación actual, la escoria de convertidor (escoria BOF) ha de ser tamizada y triturada.
- El uso de la escoria BOF como agente abrasivo no metálico es posible a escala industrial. Para su correcto desempeño en las tareas de chorreado, se debe realizar un control sobre la curva granulométrica del material, intentando aproximarla lo máximo posible a tamaños cercanos a 2 mm, con el objetivo de disminuir el polvo generado y alcanzar mayores perfiles de rugosidad.
- A pesar de que el uso de la escoria BOF en procesos industriales de chorreado superficial no requiera de equipamientos especiales o adaptaciones de los sistemas industriales actuales para su utilización como agente abrasivo, sería interesante realizar un proceso de pre-filtrado del polvo de la escoria para lograr la disminución del polvo generado en la tarea.
- La escoria BOF ha mostrado un rendimiento industrial del 80% con respecto al de la escoria de refinado de cobre (agente abrasivo no metálico que se viene utilizando actualmente, y que tiene un coste aproximado de 26 €/t, sin contar el transporte). Esto se traduce en un impacto en el posible precio para su comercialización.

- Resulta interesante que la industria siderúrgica se encuentre próxima a las industrias navales, lo que favorece la reducción del coste en el transporte de los agentes abrasivos derivados de escorias siderúrgicas hasta el lugar de aplicación.
- En cuanto al cumplimiento de los valores (propiedades físicas y químicas) reflejados en las normas internacionales para los agentes abrasivos que actualmente se encuentran recogidos, la escoria BOF ha mostrado resultados satisfactorios en dureza, densidad y ausencia de cloruros solubles en agua.
- Los valores obtenidos en el ensayo de humedad, han revelado valores elevados, por lo que para el correcto desempeño de la escoria BOF en operaciones de chorreado abrasivo resultaría imprescindible realizar el secado del material.
- La escoria BOF ha mostrado valores extremadamente elevados en el ensayo de conductividad, lo cual indica la presencia, en porcentajes elevados, de contaminantes solubles en agua en su composición. Este hecho puede estar condicionado por la elevada proporción de cal libre que se encuentra intrínseca en la composición de la escoria BOF, y que le otorga cierta inestabilidad química y volumétrica.
- Los altos valores de conductividad de la escoria BOF limitan la aplicación de la misma como agente abrasivo, principalmente en el caso de estructuras metálicas, donde la corrosión por oxidación es más acusada.
- Como futura línea de investigación, resultaría interesante realizar ensayos sobre la escoria una vez que se le hayan realizado tratamientos de estabilización de la cal.
- Se ha de valorar la viabilidad económica del tratamiento a realizar a la escoria para la adecuación a los estándares fijados por las normas de abrasivos no metálicos.

13. Referencias

- [1] Fundación para la economía circular, «<http://economiecirculaire.org/>».
- [2] Ellen MacArthur Foundation, «Towards the circular economy. Economic and business rationale for an accelerated transition». 2013.
- [3] B. Das, S. Prakash, P. S. R. Reddy, y V. N. Misra, «An overview of utilization of slag and sludge from steel industries», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 50, n.º 1, pp. 40-57, mar. 2007.
- [4] Diario Oficial de la Unión Europea, «Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas». <http://eur-lex.europa.eu>, 2008.
- [5] Jefatura del estado, *Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados*, vol. BOE-A-2011-13046. 2011, p. 52.
- [6] H. G. Van Oss, «Slag-Iron and Steel». U.S. geological survey mineral yearbook, 2003.
- [7] I. Álvarez González, S. Díez Fernández, y S. Rodríguez Sousa, «ZeroRes», API-UNIOVI, 2009.
- [8] E. Elías Castells, *Reciclaje de residuos industriales*. 2000.
- [9] I. Z. Yildirim y M. Prezzi, «Chemical, mineralogical and morphological properties of steel slag». *Advances in Civil Engineering*, oct-2011.
- [10] Worldsteel Association, «Steel industry by-products». <https://www.worldsteel.org/>, jun-2016.
- [11] EUROSLAG, «European association of organisations and companies concerned with all aspects of the manufacture and utilisation of slag products». <http://www.euroslag.com/>.
- [12] «Resumen escoria de acería (Comunicación interna)». sep-2016.
- [13] Centro de estudios y experimentación de obras públicas (CEDEX), «Actualización del catálogo de residuos reutilizables en construcción». Ministerio de fomento. Ministerio de medio ambiente, medio rural y marino., 2007.
- [14] I. Steyn, «Technical Guideline for the use of steel slag in road construction (pavement layerworks, asphalt mixes and surface seals)». jun-2016.
- [15] S. Andrés Vizán, «Valoración tecno-ambiental de las escorias de acería LD mediante análisis dinámico del ciclo de vida», Universidad de Oviedo, 2011.
- [16] N. P. Mailvaganam, G. B. Pye, y M. R. Arnott, «Surface Preparation of the Concrete Substrate», *Construction Technology Update*, vol. 24, dic. 1998.
- [17] I. M. Hutchings y P. Shipway, «Tribology: friction and wear of engineering materials», 1992.
- [18] M. E. Young, D. C. C. Urquhart, y R. A. Laing, «Maintenance and repair issues for stone cleaned sandstone and granite buildings facades».
- [19] P. Gaspar, C. Hubbard, D. McPhail, y A. Cummings, «A topographical assessment and comparison of conservation cleaning treatments», *J. Cult. Herit.*, vol. 4, Supplement 1, pp. 294-302, Enero 2003.
- [20] D. Hansel, «Abrasive blasting systems», *Met. Finish.*, vol. 97, n.º 5, pp. 29-55, Enero 1999.
- [21] K. Kambham, S. Sangameswaran, S. Datar, y B. Kura, «Evaluation of total particulate matter emission factors for copper slag in dry abrasive blasting», *Int. J. Environ. Pollut.*, vol. 37, n.º 4, pp. 422-436, Enero 2009.
- [22] ISO, «ISO 12944-4:1998: Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Parte 4: Tipos y preparación de superficies». 1998.
- [23] ISO, «ISO 8501-1:2007: Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Evaluación visual de la limpieza de las superficies. Parte 1: Grados de óxido y preparación de sustratos de acero no pintados después de eliminar totalmente los recubrimientos anteriores». 2007.

- [24] ISO, «ISO 8504-2:2000: 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». 2000.
- [25] A. Momber, *Blast Cleaning Technology*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [26] US Army Corps of Engineers, «Painting: new construction and maintenance», *Surface preparation*, pp. 4-15, 1995.
- [27] A. D. Little, «Industrial Health and Safety Criteria for Abrasive Blast Cleaning Operations - NIOSH Publication No. 75-122 - 75-122.pdf». .
- [28] A. Grbes, «A Life Cycle Assessment of Silica Sand: Comparing the Beneficiation Processes». MDPI, Diciembre-2015.
- [29] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, «006. Chorreado con arena de piezas y estructuras metálicas: exposición a sílice cristalina». Gobierno de España.
- [30] NIOSH (The National Institute for Occupational Safety and Health), «Industrial Health and Safety Criteria for Abrasive Blast Cleaning Operations (publicación n° 75-122)». U.S. Department of health education and welfare. Public Health Service, 1974.
- [31] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, «Síntesis de la evidencia científica relativa al riesgo de sufrir cáncer de pulmón por la exposición laboral a sílice cristalina». Gobierno de España, feb-2014.
- [32] B. 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, sep. 2006.
- [33] Sibelco Abrasives, «Sandblasting and silicosis». <http://www.eurogrit.nl>.
- [34] USGS, «2014 Minerals Yearbook. Silica [Advance Release]». U.S. Department of the Interior- U.S. Geological Survey, oct-2016.
- [35] Occupational Safety and Health Administration (OSHA), «Occupational Exposure to Respirable Crystalline Silica», mar-2016.
- [36] J. D. Hansink, «An introduction to abrasives for protective coating removal operations», *Journal of Protective Coatings & Linings*, vol. 17, 1984.
- [37] H. Wadell, «Sphericity and Roundness of Rock Particles», *J. Geol.*, vol. 41, n.º 3, pp. 310-331, Abril 1933.
- [38] H. Heywood, «Calculation of the Specific Surface of a Powder», *Proc. Inst. Mech. Eng.*, vol. 125, n.º 1, pp. 383-459, jun. 1933.
- [39] A. A. Khan y M. M. Haque, «Performance of different abrasive materials during abrasive water jet machining of glass», vol. 191, pp. 404-407, ago. 2007.
- [40] 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.
- [41] K. A. Al-Sallal, «Comparison between polystyrene and fiberglass roof insulation in warm and cold climates», *Renew. Energy*, vol. 28, n.º 4, pp. 603-611, Abril 2003.
- [42] NORSOK STANDARD, «M-501: Surface preparation and protective coating». 1999.
- [43] ISO, «ISO 11124 (todas las partes): 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». .
- [44] ISO, «ISO 11126 (todas las partes): 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». .
- [45] G. A. J. León, R. V. Rodríguez, y R. R. Sarmiento, «Sustitución de la arena en procesos de chorreado en seco para la limpieza de superficies metálicas», *Ship Sci. Technol.*, vol. 2, n.º 4, pp. 37-48, 2008.
- [46] ISO, «ISO 11126-1:1993: 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.» 1993.
- [47] K. Murari, R. Siddique, y K. K. Jain, «Use of waste copper slag, a sustainable material», *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 17, n.º 1, pp. 13-26, ene. 2015.
- [48] ISO, «ISO 11126-6:1993: 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.» 1993.
- [49] K. Kambham, S. Sangameswaran, S. R. Datar, y B. Kura, «Copper slag: optimization of productivity and consumption for cleaner production in dry abrasive blasting», *J. Clean. Prod.*, vol. 15, n.º 5, pp. 465-473, 2007.
- [50] B. Gorai, R. K. Jana, y Premchand, «Characteristics and utilisation of copper slag—a review», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 39, n.º 4, pp. 299-313, nov. 2003.
- [51] ISO, «ISO 11126-3:1993: 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 3: Escoria del refinado de cobre.» 1993.
- [52] B. M. Das, A. J. Tarquin, y A. D. Jones, «Geotechnical properties of a copper slag - Google Académico», *Transportation Research Record*, 1983.
- [53] W. Wu, W. Zhang, y G. Ma, «Mechanical properties of copper slag reinforced concrete under dynamic compression», *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, n.º 6, pp. 910-917, jun. 2010.
- [54] W. A. Moura, J. P. Gonçalves, y M. B. L. Lima, «Copper slag waste as a supplementary cementing material to concrete», *J. Mater. Sci.*, vol. 42, n.º 7, p. 2226, abr. 2007.
- [55] D. E. Ramírez y M. F. Vergara, «Evaluación de la resistencia mecánica del concreto modificado con residuo de granalla de silicato.pdf». 2013.
- [56] ISO, «ISO 11126-4:1993: 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 4: Escoria de horno de carbón.» 1993.
- [57] Retsch, «General Catalogue». <http://www.retsch.es>.
- [58] FRITTSCH, «Jaw Crushers and Disk Mills - Classic Line». <http://www.frittsch.es>.
- [59] ISO, «ISO 8503-1: Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos afines. Características de rugosidad de los sustratos 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». 2012.
- [60] ISO, «ISO 8503-2: Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos afines. Características de rugosidad de los sustratos de acero chorreados. Parte 2: Método para caracterizar un perfil de superficie de acero decapado por proyección de agentes abrasivos. Utilización de muestras ISO de comparación táctil-visual». 2012.
- [61] ISO, «ISO 11127 (todas las partes): 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». .
- [62] ISO, «ISO 11127-3:2011: 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. Parte 3: Determinación de la densidad aparente.» 2011.
- [63] ISO, «ISO 11127-4:2011: 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. Parte 4: Evaluación de la dureza mediante un ensayo sobre placa de vidrio.» 2011.
- [64] ISO, «ISO 11127-5:2011: 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. Parte 5: Determinación de la humedad.» 2011.
- [65] G. Starrett, «Electrical conductivity/salinity fact sheet. The clean water team guidance compendium for watershed monitoring and assessment. California State Water Resources Control Board». <https://www.waterboards.ca.gov>, 2002.
- [66] ISO, «ISO 11127-6:2011: 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. Parte 6: Determinación de los contaminantes solubles en agua por conductimetría.» 2011.
- [67] J. Jiménez Osorio, «Contaminación por sales solubles». Gaditana de chorro y limpieza, S.L., 2017.
- [68] ISO, «ISO 11127-7:2011: 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. Parte 7: Determinación de cloruros solubles en agua.» 2011.
- [69] OSHA, «Abrasive Blasting Hazards in Shipyard Employment». 2006.
- [70] F. Ortiz *et al.*, «Robots for hull ship cleaning», en *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2007, pp. 2077-2082.
- [71] F. J. Ortiz, A. Iborra, F. Marín, B. Álvarez, y J. M. Fernández, *GOYA: A Teleoperated System for blasting applied to ships maintenance*. .
- [72] P. J. Navarro, J. Suardíaz, C. Fernández, P. M. Alcocer, y R. Borraz, «TELEOPERATED SERVICE ROBOT FOR HIGH QUALITY SHIPS' MAINTENANCE», *IFAC Proc. Vol.*, vol. 40, n.º 3, pp. 197-202, Enero 2007.
- [73] PYMAR, «Informe de actividad del sector de la construcción naval», 2014.
- [74] E. M. E. C. CESA, «SEA Europe Annual Report 2011 - 2012».
- [75] Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, «Construcción naval. Boletín informativo trimestral. Cuarto trimestre, año 2016.» Enero-2017.
- [76] K. Katsikaris, E. Voutsas, K. Magoulas, G. Andronikos, y S. Stamataki, «Recycling ferrous-nickel slag in blast cleaning», *Waste Manag. Res.*, vol. 20, n.º 3, pp. 269-278, jun. 2002.
- [77] D. D. Ross, «Cleaning of Rusty Steel for Painting», *Br. Corros. J.*, vol. 6, n.º 6, pp. 237-240, nov. 1971.
- [78] Cleanblast inc, «1200 Barrel Oil Storage Tank». .
- [79] L. E. Boing, «Decontamination Technologies». International Atomic Energy Agency, oct-2006.
- [80] Nuclear Energy Agency Organisation for the Economic Co-operation and development, «Decontamination Techniques Used in Decommissioning Activities». The NEA Task Group on Decontamination.
- [81] S. J. Bossart y D. M. Blair, *Decontamination Technologies for Facility Reuse*. NTIS Reports, 2003.
- [82] V. Kumar, R. Goel, R. Chawla, M. Silambarasan, y R. K. Sharma, «Chemical, biological, radiological, and nuclear decontamination: Recent trends and future perspective», *J. Pharm. Bioallied Sci.*, vol. 2, n.º 3, p. 220, ene. 2010.
- [83] Radioactive Waste Management Committee, «The NEA co-operative programme on decommissioning decontamination and demolition of concrete structures». Nuclear Energy Agency.

- [84] M. Á. Iglesias-Campos, J. L. Prada Pérez, y S. García Fortes, «Microblasting cleaning for façade repair and maintenance: Selecting technical parameters for treatment efficiency», *Constr. Build. Mater.*, vol. 94, pp. 605-612, sep. 2015.
- [85] P. Sanmartín, F. Cappitelli, y R. Mitchell, «Current methods of graffiti removal: A review», *Constr. Build. Mater.*, vol. 71, pp. 363-374, nov. 2014.
- [86] L. Barnard, «Graffiti Abatement and Management», *Law and Order*, vol. 54, pp. 115-117, may 2006.
- [87] M. Carvalhão y A. Dionísio, «Evaluation of mechanical soft-abrasive blasting and chemical cleaning methods on alkyd-paint graffiti made on calcareous stones», *J. Cult. Herit.*, vol. 16, n.º 4, pp. 579-590, jul. 2015.
- [88] M. J. Whitford, *Getting Rid of Graffiti: A Practical Guide to Graffiti Removal and Anti-graffiti Protection*. Taylor & Francis, 1992.
- [89] D. G. Manning, *Removing Concrete from Bridges*. Transportation Research Board, 1991.
- [90] Atlantic Copper, «Declaración Ambiental Año 2015».
- [91] Atlantic Copper, «Datos de evolución en 2015.»