

## **Selección de parámetros de funcionamiento óptimos teniendo en cuenta el análisis de ciclo de vida mediante análisis multicriterio**

Autor: Francisco Javier Ríos Dávila; Centro Tecnológico Gaiker-IK4

Otros autores: Clara Delgado (IK4-AZTERLAN), Erika Garitaonandia (IK4-AZTERLAN); Jose Luis Rodríguez (ONDARLAN); Iñaki García (ESTANDA) Antonio Martínez Puche (ACCIONA)

### **Resumen**

Los residuos de arenas de fundición (SFS – Spent Foundry Sands) constituyen uno de los residuos que se generan en mayor volumen a nivel europeo. Aunque una parte de los mismos se regeneran y reutilizan en las propias plantas de fundición, la mayor parte acaba siendo depositada en vertederos.

El proyecto LIFE Eco-Sandfill: Spend foundry sand valorisation in construction sector through the validation of high-performance applications (Project number: LIFE15 ENV/ES/000612) pretende demostrar la viabilidad ambiental y económica de la reutilización de este tipo de residuo en el propio sector de la fundición, así como en aplicaciones del sector de la construcción tras someterlas a un nuevo proceso de regeneración basado en la atrición de las SFS en un lecho fluidizado.

Tras la identificación de los requerimientos físicos, químicos, mecánicos y ambientales que debían cumplir las SFS regeneradas en función de la aplicación en la que se pretendían reutilizar, se procedió a ensayar distintas condiciones de operación en el regenerador con el fin de determinar las condiciones que permitiesen conseguir en cada caso la arena con las mejores propiedades. De esta manera, los parámetros de operación ensayados fueron, las revoluciones de la cámara de atrición, el tiempo de retención y la carga de cada lote. Asimismo, para cada tipo de arena y condición de operación se realizó la caracterización física, química, mecánica y ambiental de las SFS regeneradas con el fin de compararlas con los requerimientos antedichos.

Paralelamente, mediante la aplicación de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se determinaron los impactos ambientales generados durante el proceso de regeneración para cada una de las condiciones de operación ensayadas.

Finalmente, la realización de un análisis multivariable permitió determinar las condiciones óptimas de operación del regenerador teniendo en cuenta los resultados de la caracterización físico-química de las arenas tratadas y los impactos ambientales originados para cada una de las condiciones operativas ensayadas.

## Introducción

La fabricación de productos metálicos mediante procesos de fundición conlleva, de manera inevitable, la generación de residuos de arenas de fundición (SFS – Spent Foundry Sands). Estas arenas se utilizan en la fabricación de los moldes en los que posteriormente se verterá el metal fundido, y en la fabricación de los machos que permiten imprimir en dichos moldes las formas de los productos que se desea fabricar.

Dichas arenas son aditivadas, entre otros, con determinados productos conglomerantes con los que se consigue dotar de la consistencia necesaria a las mismas para que los moldes y machos no se desmoronen. De esta manera, en función del tipo de conglomerante añadido se distinguen los dos principales tipos de arenas de fundición: las arenas verdes y las arenas químicas. En el caso de las arenas verdes el agente conglomerante es la bentonita, mientras que las arenas químicas son aditivadas con alguna resina, principalmente, de tipo fenólico. Además, se añaden otra serie de aditivos que permiten mejorar la procesabilidad de las piezas y particularmente, su separación una vez que éstas se han enfriado y solidificado.

Aunque una parte importante de las SFS se recuperan para ser reutilizadas en la propia fundición tras un proceso de limpieza y regeneración, lo cierto es que el volumen anual de este residuo que es depositado en vertedero sigue siendo muy elevado. Las SFS suponen el 65% del total de residuos gestionados en el sector y aunque no se dispone de una estadística fiable sobre la cantidad total generada en Europa, se estima que dicha cantidad podría estar entre los 4,5 y los 9 millones de toneladas anuales.

Actualmente, sólo una fracción entre el 25 y el 30% de estos residuos estarían siendo valorizados en una serie limitada de aplicaciones, principalmente en la industria cementera, en suelos agrícolas y en la cobertura de vertederos, siendo el restante 70-75% depositado en vertedero.

Por tanto, parece necesario identificar y promover alternativas que permitan valorizar este tipo de residuos de manera que la cantidad enviada a vertedero se reduzca significativamente.

En este contexto, el uso de este tipo de arenas en el sector de la construcción se muestra como una alternativa viable y con la capacidad suficiente para absorber una parte importante de todo el volumen de residuos de arenas de fundición.

Pero para ello, será necesario someter a dicho residuo a un tratamiento de acondicionamiento que permita conseguir las propiedades físico-químicas e incluso ambientales que son requeridas para este tipo de aplicaciones, y garantizando que, finalmente, el impacto ambiental no se incrementa respecto a la situación original.

El proyecto financiado por la Unión Europea LIFE ECO-SANDFILL, está investigando el uso de este residuo como agregado fino en aplicaciones de construcción, y más concretamente en aplicaciones geotécnicas (terraplenes) y en morteros fluidos y materiales de baja resistencia controlada. Asimismo, se está evaluando el potencial para su reutilización como material de alta calidad en la propia fundición.

## Materiales y métodos

### Propiedades de las arenas para construcción

En el sector de la construcción se emplea una gran cantidad de materiales cuyas propiedades físico-químicas pueden ser muy variables dependiendo de la aplicación en la que se quiera hacer uso de ellos. De esta manera, los límites para cada uno de los

parámetros de caracterización de estos materiales están definidos en una serie de especificaciones técnicas que son de obligado cumplimiento.

Para cada una de las aplicaciones en el sector de la construcción en las que se pretende hacer uso de las SFS regeneradas, dichas especificaciones técnicas a cumplir han sido las siguientes:

- **Terraplenes:** Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3): los materiales a utilizar en terraplenes y los requisitos físicos, químicos y mecánicos de los mismos están definidos en la *Parte 3. EXPLANACIONES – Capítulo III. Rellenos – Artículo 330. Terraplenes.*

Tabla 1: Clasificación de los materiales para terraplenes según PG-3, de acuerdo con los parámetros requeridos para el suelo analizados de acuerdo con las normas indicadas (todos en % en peso)

PG-3 Parameter	SELECTED	ADEQUATE	TOLERABLE	MARGINAL*	INADEQUATE
<b>Organic Matter Content (UNE 103204)</b>	OMC <0.2%	OMC <1%	OMC <2%	OMC <5%	when not suitable for previous catgs.
<b>Gypsum content (NLT 115)</b>	See SS	See SS	GC <5%	-	when not suitable for previous catgs
<b>Soluble salts (NLT 114)</b>	SS <0.2% (gypsum, incl.)	SS <0.2% (gypsum, incl.)	SS <1% (other than gypsum)	-	when not suitable for previous catgs
<b>Grain size</b>	Dmax≤100 mm # 0.40 ≤15%; if not: • # 2 <80% • # 0.40 <75% • # 0.080 <25%	Dmax≤100 mm # 2 <80% # 0.080 <35%	-	-	when not suitable for previous catgs
<b>Liquid Limit (UNE 103103)</b>	LL<30 (if not # 0.40 ≤15%)	LL <40	LL <65	-	when not suitable for previous catgs
<b>Plasticity Index (UNE 103104)</b>	PI<10 (if not # 0.40 ≤15%)	if LL>30 PI>4	if LL>40 PI>0.73*(LL – 20)	if LL>90 PI<0.73*(LL – 20)	when not suitable for previous catgs
<b>Collapse (p=0.2 MPa) (NLT 254)</b>	-	-	<1%	-	when not suitable for previous catgs
<b>Free Swelling Index (UNE 103601)</b>	-	-	<3%	<5%	when not suitable for previous catgs

\* Properties required when not suitable for SELECTED, ADEQUATE or TOLERABLE

Tabla 2: uso de suelos en función de la zona de terraplén, de acuerdo con el artículo 330 de la PG-3.

PG-3 soils per zone of embankment	SELECTED	ADEQUATE	TOLERABLE	MARGINAL	INADEQUATE
<b>CORONATION</b>	If CBR $\geq 5$	If CBR $\geq 5$	If bearing capacity requirements fulfilled & OMC $<1\%$ & reasoned justification report approved by Worksite Manager	Unsuitable: Collapsible & expandable soils not to be used in coronation	NOT TO BE USED
<b>FOUNDATION</b>	If CBR $\geq 3$	If CBR $\geq 3$	If CBR $\geq 3$	Inadvisable: Special reasoned justification report approved by Worksite Manager	NOT TO BE USED
<b>CORE</b>	If CBR $\geq 3$ Inadvisable if CBR $<3$ : reasoned justification report approved by Worksite Manager	If CBR $\geq 3$ Inadvisable if CBR $<3$ : reasoned justification report approved by Worksite Manager	If CBR $\geq 3$ & GC $<2\%$ Inadvisable if CBR $<3$ : reasoned justification report approved by Worksite Manager	Inadvisable: Special reasoned justification report approved by Worksite Manager	NOT TO BE USED
<b>SHOULDER</b>	When material satisfies defined conditions on impermeability, resistance, stabilisation weight and protection against erosion			Unsuitable: Collapsible & expandable soils not to be used in shoulder	NOT TO BE USED

\* CBR: California Bearing Ratio, soil resistance index calculated according to standard test in UNE 103502

- Áridos finos en morteros fluidos; se han seleccionado dos normas de referencia:
  - Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08): norma de referencia para garantizar la calidad de los morteros y los materiales de baja resistencia controlada (CLSM - Controlled Low Strength Materials).
  - Norma UNE-EN 13139:2002: Áridos para morteros. Esta norma define los requisitos mínimos para un control del sistema de producción industrial, la declaración de conformidad de los requisitos esenciales y marcado CE.

Tabla 3: requisitos de los áridos finos para ser utilizados en morteros y CLSM, de acuerdo con las normas EHE-08 y UNE-EN 13139:2002.

Parameter	EHE-08 Critical values	UNE 13139:2002 Threshold values				Testing standard	Frequency of testing	Observations
Size limits (d/D)		0/1, 0/2, 0/4, 0/8, 2/4, 2/8				UNE EN 933-1		Aggregate particle size shall conform to one of the preferential d/D sizes according to table in UNE 13139:2002
Fine Content	6%	<b>Cat.1*</b>	Cat.2*	Cat.3*	Cat.4*	UNE EN 933-1	high	It conditions strength resistance through water demand and the pollutants content
		3%	5%	8%	30%			
Sand equivalent (SE <sub>s</sub> )	<70%	** (if fines>3%)				UNE EN 933-8	low	Related to fines content and quality
Methylene Blue	≤0.6*f/100	** (if fines>3%)				UNE EN 933-9		Related to fines quality: clay presence
Water absorption	5%	-				UNE-1097-6	low	It lowers the strength resistance
Chloride content (Cl <sup>-</sup> water soluble)	<0.05% in RC	<0.15% (regular mortar)*** <0.06% (if metal embedded)				UNE 1744-1	high	It causes metal corrosion
Sulphate content (SO <sub>3</sub> acid soluble)	0.8%	AS <sub>0.2</sub> : ≤ 0.2% AS <sub>0.8</sub> : ≤0.8% AS <sub>dec</sub> : >0.8%				UNE 1744-1	high	Reacts with cement and affects durability
Total sulphur	<1%	<1% in natural aggregates				UNE 1744-1	low	Reacts with cement and affects durability
Ferrous sulphide (as S)	<0.1%	<0.1%				UNE 1744-1	low	Reacts with cement and affects durability
Organic Matter Content	<ul style="list-style-type: none"> <li>Colour produced by OMC lighter than the reference</li> <li>#0.063 retained particles floating on a SG=2 liquid ≤0.5%</li> </ul>	% OMC so that mortar prepared with those aggregates fulfils: a) setting time growth <120 min b) strength resistance 28d reduction <20%				UNE 1744-1	LOI periodically tested (suggestion: LOI-OMC correlation)	OMC affects the setting time and lowers the strength resistance.
LOI		≤3% for artificial aggregates				UNE 1744-1	very high	It can be correlated with OMC
Soluble substances		≤1% for artificial aggregates				UNE 1744-1	low	Durability issues
Aggregate-alkali reactivity	No potential reactivity of aggregate to the alkalis from the concrete constituents					Petrographic examination to identify alkali-silica reactive and alkali-carbonate reactive constituents. If positive: UNE 146508 EX UNE 146507-2 EX	Once, at the beginning	Durability issues
Freeze-thaw resistance		(determination on >4mm fraction)					Initial & end characterisation	Durability issues
Release of heavy metals		-					Only if in doubt	Unless otherwise specified, only for CE marking purposes
Emission of polyaromatic carbons		-					Only if in doubt	Unless otherwise specified, only for CE marking purposes
Emission of other dangerous substances		-					Only if in doubt	Unless otherwise specified, only for CE marking purposes

\* The aggregate category is selected as a function of mortar use:

- Category 1: mortar for floorings, sprayed and repair mortar; pastes
- Category 2: mortar for rendering and plasters
- Category 3: mortar for masonry [all aggregates, exc. crushed rock (ground sand)]
- Category 4: mortar for masonry (ground sand)

\*\* SE&MB thresholds in EN13139 to be set based on local/specific characteristics: clays % should be determined (MB) and kept low to avoid swelling issues

\*\*\* chloride limit values in EN13139 only for indicative purposes

### Propiedades de las arenas para fundición

Las propiedades que deberían cumplir las SFS regeneradas para poder ser reutilizadas en el mismo sector de la fundición se han determinado a partir de las propiedades a cumplir por la arena virgen utilizada en dicho sector.

En el sector de la fundición se han identificado dos aplicaciones principales de las SFS regeneradas:

- En la fabricación de moldes de arena, utilizándolas como arena de contacto (sería la arena que entraría en contacto con el metal fundido) y reemplazaría a las arenas vírgenes que son las empleadas actualmente.

Tabla 4: Arena para la fabricación de moldes en fundición: parámetros y valores de referencia requeridos

Parameter	GREEN SAND CASTING <sup>(1)</sup>	CHEMICAL SAND CASTING <sup>(2)</sup>
<b>Grain size</b>	AFA = 50-55 (55: upper limit)	AFA = 48-51 (51: upper limit)
<b>Fine content</b>	1-2% (2%: upper limit)	1-2% (2%: upper limit)
<b>Moisture</b>	1.8-2% (2%: upper limit)	0.0-0.1% (0.1%: upper limit)
<b>LOI</b>	1.5-2% (2%: upper limit)	1-2% (2%: upper limit)
<b>Bentonite (blue methylene)</b>	8-10% (10%: upper limit)	N.A.
<b>pH</b>	N.A.	6-8
<b>Acid demand</b>	N.A.	3-6

- En la fabricación de los núcleos, es decir, la arena que forma parte de los moldes de fundición pero que no entra en contacto con el metal fundido. En este caso, debería ser equivalente al 100% a la empleada en la actualidad.

Tabla 5: Arena utilizada en el núcleo de los moldes en fundición: parámetros y valores de referencia requeridos

Parameter	GREEN & CHEMICAL SAND CASTING <sup>(1)</sup>
<b>Grain size</b>	AFA = 48-51 (51: upper limit)
<b>Fine content</b>	0.3-0.4% (0.4%: upper limit)
<b>Moisture</b>	0.0-0.1% (0.1%: upper limit)
<b>LOI</b>	0.1-0.15% (0.15%: upper limit)
<b>pH</b>	6-8
<b>Acid demand</b>	1-3

### Selección de los parámetros críticos

Debido al gran número de ensayos que sería necesario llevar a cabo para proceder a realizar la caracterización de las SFS regeneradas y determinar su idoneidad en las diferentes aplicaciones contempladas, se llevó a cabo una selección de un número limitado de parámetros críticos que permitiesen determinar el uso de las SFS regeneradas en base a los valores obtenidos. Los valores de estos parámetros permitirían establecer unas reglas de corte para cada una de las aplicaciones.

Desde el punto de vista de las aplicaciones previstas en el sector de la construcción los parámetros críticos seleccionados fueron el contenido en materia orgánica, cuya medida indirecta sería el LOI, el % de cloruros y sulfatos (yesos en los terraplenes) y la reactividad con alcalinos en el mortero.

En cambio, desde el punto de vista de las aplicaciones previstas en el sector de la fundición los parámetros críticos seleccionados fueron AFA, % de finos y LOI. Además, el



% de bentonita y la humedad se tendrían en cuenta en el caso de las SFS regeneradas a partir de arenas procedentes de moldeo en verde.

### Proceso de regeneración de las SFS

La nueva tecnología de regeneración de SFS instalada y utilizada en el proyecto se basa en la eliminación de las sustancias añadidas a las arenas utilizadas en la fabricación de los moldes de fundición y que se quedan adheridas a los granos de arena. Dicha eliminación se consigue mediante la atricción de los mismos hasta conseguir que queden libres de sustancias adheridas a su superficie.

En la Figura 1 se muestra el ciclo de funcionamiento del equipo de regeneración de ONDARLAN usado en el proyecto.

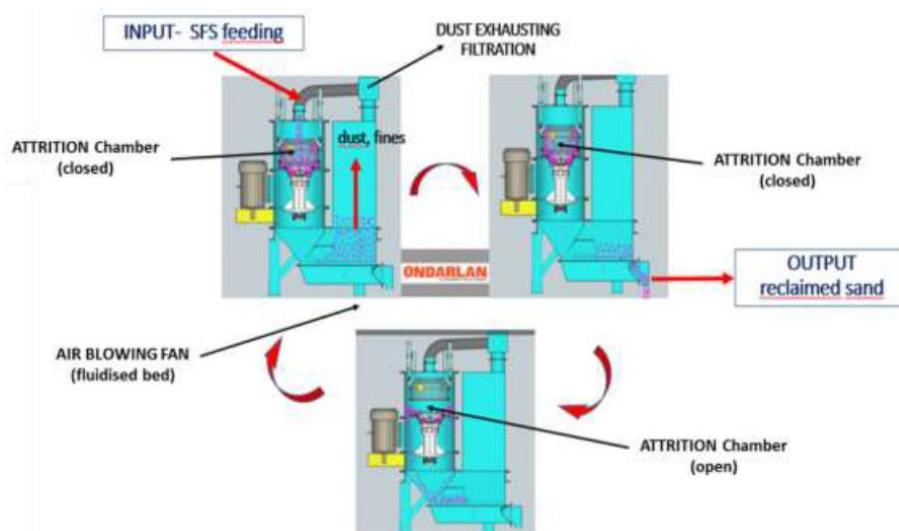


Figura 1: ciclo operativo del regenerador de SFS utilizado



Figura 2: Componentes del regenerador de ONDARLAN: (1) cámara de atrición, (2) lecho fluidizado, (3) ciclón, (4) equipo de eliminación de partículas

Como se muestra en la Figura 2, el regenerador consta de una cámara de atrición en la que se lleva a cabo, mecánicamente, la atrición de las partículas de SFS. Debajo de esta cámara se dispone de un lecho fluidizado en el que se vierten las SFS tratadas una vez que dicho proceso ha finalizado. El objetivo de este lecho fluidizado no es otro que el de conseguir movilizar las partículas de la mezcla tratada en la cámara de atrición como una corriente de aire con partículas que, al hacerla pasar a través de un ciclón, consigue separar las partículas finas, constituidas principalmente por los restos de resina o bentonita adheridas a los granos de las SFS, de los granos ya limpios de las arenas regeneradas. Adicionalmente, los finos de la mezcla son filtrados y decantados mediante el uso de un equipo filtrante evitando así la emisión de partículas a la atmósfera.

Los parámetros clave que controlan el funcionamiento de este equipo de regeneración son:

- La cantidad de SFS que se alimenta en cada ciclo a la cámara de atrición
- El tiempo de residencia dentro de la cámara de atrición
- La velocidad de rotación de la cámara de atrición

#### Metodología de análisis de ciclo de vida

Como ya se ha mencionado anteriormente, la demostración de la viabilidad del proceso de regeneración de las SFS y su uso en aplicaciones de construcción y fundición pasa por la demostración de la viabilidad ambiental del mismo. Es decir, el uso de las SFS regeneradas mediante el proceso descrito, no debe generar un impacto ambiental mayor que el producido actualmente, que combina los producidos por el depósito en vertedero de las SFS y por el consumo de arena virgen.



De esta manera, la evaluación de los impactos ambientales en el ciclo de vida de las aplicaciones de construcción y fundición que usan las SFS regeneradas se lleva a cabo aplicando la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV).

El ACV se ha llevado a cabo de acuerdo de acuerdo con la norma ISO 14040:2006(es) Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia.

### Análisis multicriterio

El análisis multicriterio es una herramienta que se emplea habitualmente en la toma de decisiones complejas en las que se deben tener en cuenta varios criterios que pueden tener repercusión sobre el resultado final de la decisión a adoptar.

En el caso que nos ocupa, nos encontramos con un problema en el que:

- queremos definir las condiciones de operación del proceso de regeneración de las SFS que
  - permitan conseguir una arena regenerada con unas propiedades óptimas para las aplicaciones en las que se quieren emplear y
  - al mismo tiempo, minimicen los impactos ambientales generados en esta etapa del ciclo de vida, y por tanto en todo él.

La metodología de análisis multicriterio empleada ha sido el proceso analítico jerárquico (AHP - Analytic Hierarchy Process) (Saaty, 2008). Esta metodología estructura el análisis del problema dividiendo el mismo en subproblemas más sencillos de comprender y evaluar, de tal manera que se establecen una serie de jerarquías que facilitan el análisis global y se facilita la obtención de una solución óptima de una manera más racional y sencilla.

## **Resultados**

### Evaluación de los parámetros críticos

Tras la instalación y puesta en marcha del equipo de regeneración se procedió al tratamiento de SFS de moldeo en verde y de SFS de moldeo químico bajo diferentes condiciones de operación. Tras cada proceso de regeneración se tomaron muestras de las arenas regeneradas obtenidas para proceder con la caracterización de los parámetros críticos.

En total se ensayaron 9 condiciones de operación diferentes con las SFS procedentes del moldeo químico y 6 condiciones de operación con las del moldeo verde, en las que se mantuvo constante la cantidad de SFS alimentada en cada una de ellas y se variaron el tiempo de residencia y la velocidad de giro de la cámara de atrición.

Por otro lado, tras comprobar que en todos los casos los parámetros críticos el % de cloruros y sulfatos (yesos en los terraplenes), la reactividad con alcalinos en el mortero, el % de bentonita y la humedad se mantenían dentro de los valores requeridos, el análisis se ciñó a evaluar el grado de cumplimiento del resto de parámetros críticos, AFA, LOI y % finos. Los resultados obtenidos para condición de operación se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Caracterización de las SFS regeneradas para cada condición operativa del regenerador

SFS	Reclaiming conditions		LOI, %	AFA	Fines, %
CHEMICAL SANDS	2000	60	1,12	46,96	1
	2000	90	1,11	46,18	0,53
	2000	120	0,85	47,5	1,07
	2235	60	0,99	46,22	0,57
	2235	90	1,02	47,35	1,23
	2235	120	0,93	46,72	0,8
	2500	60	1,065	48,05	1,67
	2500	90	1,01	48,09	1,61
	2500	120	0,685	46,27	0,41
GREEN SANDS	2500	120	0,89	51,69	4,57
	2500	240	0,96	50,76	3,51
	2500	300	0,69	51,98	4,54
	2700	120	0,9	49,67	3,76
	2700	240	0,72	52,48	4,22
	2700	300	0,61	61,74	11,47

### Evaluación de los impactos ambientales

Por otro lado, se evaluaron los impactos ambientales generados en el proceso de regeneración para cada condición operativa ensayada.

Los ACV realizados tuvieron en cuenta únicamente los consumos materiales y energéticos del proceso regenerativo así como la generación de residuos y las emisiones a la atmósfera.

La unidad de referencia que se tuvo en cuenta fue un lote de SFS regenerado, lo que en el caso de las SFS procedentes del moldeo químico supuso introducir en la cámara de atrición una cantidad de 60 kg de SFS, mientras que en el caso de las SFS procedentes del moldeo en verde la cantidad fue de 45 kg.

En cuanto a la selección de los impactos ambientales a analizar, tras una revisión bibliográfica en la que, entre otros, incluyó la revisión de las declaraciones ambientales de producto más relevantes para las aplicaciones del proyecto y de la huella ambiental de producto de la Comisión Europea, se seleccionaron los impactos mostrados en la Tabla 7.

Tabla 7: Categorías de impacto ambiental analizadas en el ACV

IMPACT CATEGORY	UNIT	METHOD
Global Warming Potential (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	CML-IA baseline
Ozone depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	
Acidification potential (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	
Eutrophication potential (EP)	kg PO <sub>4</sub> eq	
Photochemical Ozone Creation Potential (POCP)	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	
Abiotic Depletion Potential elements (ADP)	Kg Sb eq	
Abiotic Depletion Potential fossil (ADP)	MJ	

El proceso de regeneración y la evaluación de los impactos ambientales se realizaron haciendo uso de la herramienta de ACV GaBi (versión 7) y de la base de datos Ecoinvent 3.2.

Asimismo, los datos de inventario utilizados para el ACV de cada condición de operación ensayada fueron los medidos durante dichos ensayos.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 8 y la Tabla 9.

Tabla 8: Impactos ambientales evaluados para cada condición de operación de las SFS procedentes del moldeo químico

Reclaiming conditions CHEMICAL SANDS		Abiotic Depletion (ADP elements) [kg Sb-Equiv.]	Abiotic Depletion (ADP fossil) [MJ]	Acidification Potential (AP) [kg SO <sub>2</sub> -Equiv.]	Eutrophication Potential (EP) [kg Phosphate-Equiv.]	Global Warming Potential (GWP 100 years) [kg CO <sub>2</sub> -Equiv.]	Ozone Layer Depletion Potential (ODP, steady state) [kg R11-Equiv.]	Photochem. Ozone Creation Potential (POCP) [kg Ethene-Equiv.]
2000	60	1,43E-07	4,82E+00	1,28E-03	1,19E-04	4,44E-01	3,03E-10	9,07E-05
2000	90	2,16E-07	7,27E+00	1,94E-03	1,81E-04	6,69E-01	4,54E-10	1,38E-04
2000	120	2,83E-07	9,52E+00	2,51E-03	2,30E-04	8,78E-01	6,05E-10	1,76E-04
2235	60	1,42E-07	4,77E+00	1,26E-03	1,16E-04	4,40E-01	3,03E-10	8,87E-05
2235	90	2,16E-07	7,29E+00	1,95E-03	1,82E-04	6,70E-01	4,54E-10	1,39E-04
2235	120	2,88E-07	9,69E+00	2,58E-03	2,41E-04	8,91E-01	6,05E-10	1,84E-04
2500	60	1,42E-07	4,79E+00	1,27E-03	1,17E-04	4,41E-01	3,03E-10	8,94E-05
2500	90	2,19E-07	7,38E+00	1,99E-03	1,88E-04	6,77E-01	4,54E-10	1,43E-04
2500	120	2,85E-07	9,58E+00	2,53E-03	2,34E-04	8,83E-01	6,05E-10	1,79E-04

Tabla 9: Impactos ambientales evaluados para cada condición de operación de las SFS procedentes del moldeo en verde

Reclaiming conditions GREEN SANDS		Abiotic Depletion (ADP elements) [kg Sb-Equiv.]	Abiotic Depletion (ADP fossil) [MJ]	Acidification Potential (AP) [kg SO <sub>2</sub> -Equiv.]	Eutrophication Potential (EP) [kg Phosphate-Equiv.]	Global Warming Potential (GWP 100 years) [kg CO <sub>2</sub> -Equiv.]	Ozone Layer Depletion Potential (ODP, steady state) [kg R11-Equiv.]	Photochem. Ozone Creation Potential (POCP) [kg Ethene-Equiv.]
2500	120	2,99E-07	1,01E+01	2,79E-03	2,69E-04	9,25E-01	6,06E-10	2,03E-04
2500	240	5,74E-07	1,93E+01	5,15E-03	4,80E-04	1,78E+00	1,21E-09	3,66E-04
2500	300	7,23E-07	2,44E+01	6,52E-03	6,11E-04	2,24E+00	1,51E-09	4,66E-04
2700	120	3,05E-07	1,03E+01	2,88E-03	2,81E-04	9,40E-01	6,06E-10	2,12E-04
2700	240	6,05E-07	2,05E+01	5,68E-03	5,52E-04	1,87E+00	1,21E-09	4,17E-04
2700	300	7,49E-07	2,54E+01	6,98E-03	6,74E-04	2,32E+00	1,51E-09	5,10E-04

Como se puede comprobar en los resultados obtenidos, tanto para el caso de las SFS regeneradas del moldeo químico como para las del moldeo en verde, cuando más agresivas son las condiciones de operación (mayor velocidad de giro y mayor tiempo de residencia) mayores son los impactos. Esto se debe a que el impacto ambiental es debido, por un lado, al consumo energético requerido para hacer funcionar el equipo y,

por otro lado, a la mayor generación de residuos debido a que se consigue un mayor desprendimiento de la capa residual adherida a los granos de arena de las SFS.

### Análisis multicriterio

La aplicación de la metodología AHP requiere la priorización de los criterios de evaluación a tener en cuenta. De esta manera, se han priorizado los criterios técnicos a los ambientales, ya que la viabilidad del proceso de regeneración de ONDARLAN utilizado en el proyecto pasaba por el hecho de que se obtuviese la mayor cantidad de SFS regenerada con los requisitos técnicos necesarios para su uso en las aplicaciones objeto de estudio. Así, los parámetros AFA, LOI y % finos se priorizaron por encima de todos los parámetros ambientales. En cuanto a la priorización de estos tres parámetros técnicos se decidió situar en primer lugar AFA, seguido de LOI y con % finos en tercer lugar.

Respecto a la priorización de los criterios ambientales se decidió que prevalecieran los impactos ambientales con un ámbito de influencia más global frente aquellos con un ámbito más local y, dado que el proyecto pretende promover soluciones para el fomento de la economía circular, se decidió priorizar aquellos impactos ambientales que repercuten sobre el agotamiento de recursos.

Por tanto, la priorización final de los criterios resultó ser la mostrada en la Tabla 10.

Tabla 10: Priorización de criterios de evaluación

Criteria	Prioritization
AFA	1
LOI, %	2
Fines, %	3
Global Warming Potential	4
Abiotic Depletion	4
Ozone Layer Depletion Potential	5
Photochem. Ozone Creation Potential	5
Abiotic Depletion	6
Acidification Potential	6
Eutrophication Potential	6

Teniendo esto en cuenta, los resultados alcanzados en el caso de la regeneración de las SFS procedentes del moldeo químico son los mostrados en la Figura 3.

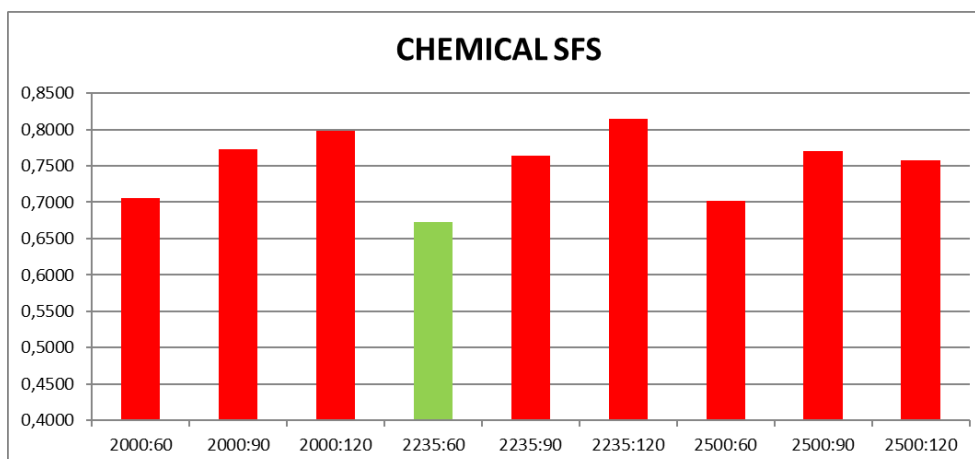


Figura 3: Condiciones de operación óptimas para el tratamiento de las SFS regeneradas químicas

Por otro lado, los resultados alcanzados en el caso de la regeneración de las SFS procedentes del moldeo en verde son los mostrados en la Figura 4.

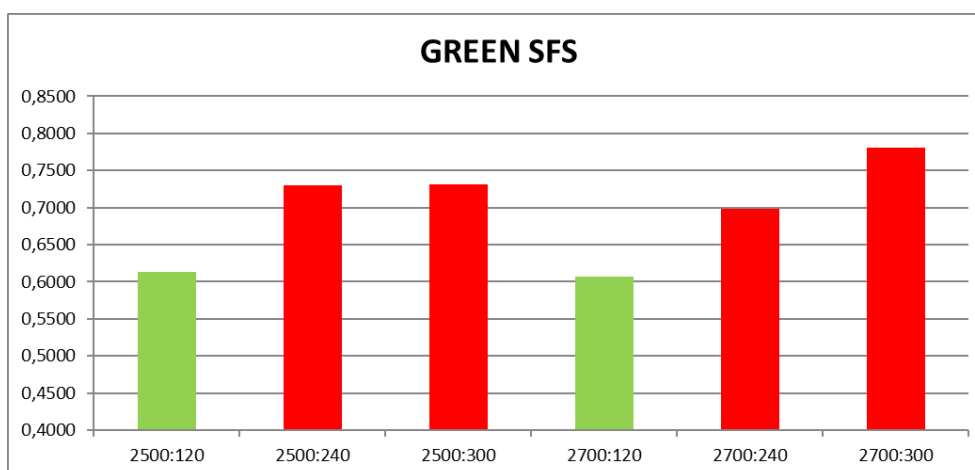


Figura 4: Condiciones de operación óptimas para el tratamiento de las SFS regeneradas verdes

Finalmente, mediante un último análisis se evaluó la influencia que podía tener la priorización de los criterios técnicos (AFA, LOI y % finos) sobre la selección de las condiciones de operación. En la Figura 5 se muestra el resultado de cada combinación de prioridades.



Figura 5: Resultados del AHP en función del orden de priorización de los criterios técnicos

## Conclusiones

El principal objetivo del proyecto europeo LIFE ECO-SANDFILL es la demostración de la viabilidad técnica, ambiental y económica del uso de residuos de arenas regeneradas mediante un novedoso proceso de atrición y la aplicación de las mismas en el sector de la construcción y de la fundición.

Para garantizar la consecución de este objetivo, y más concretamente, para garantizar la viabilidad ambiental, es necesario que cada una de las etapas del ciclo de vida de las nuevas aplicaciones se desarrollen en las mejores condiciones minimizando la generación de impactos ambientales al mismo tiempo que el producto reúne las propiedades técnicas necesarias para su uso previsto.

En el caso analizado, el proceso de regeneración de las SFS procedentes tanto del moldeo químico como del moldeo en verde resulta de gran importancia ya que es el primer paso para conseguir obtener un producto idóneo.

El uso de la metodología del proceso analítico jerárquico (AHP) ha demostrado ser de gran utilidad para la resolución de problemas como el analizado, en el que se deben tener en cuenta varios criterios de análisis que no tienen por qué tener relación entre sí pero que pueden y deben ser priorizados.

De esta manera, se ha podido determinar que las condiciones óptimas de funcionamiento del regenerador para el tratamiento de las SFS químicas son una masa por lote de 60 kg,



con un tiempo de residencia de 60 segundos y a 2235 rpm. Por su parte, en el caso de las SFS verdes son una masa por lote de 45 kg, con un tiempo de residencia de 120 segundos y a 2500 o 2700 rpm.

Además, el ulterior análisis para comprobar la robustez de la solución en función de la priorización de los criterios técnicos demostró que las condiciones de operación óptimas eran las mismas en todos los casos.

## **Agradecimiento**

El proyecto LIFE ECO-SANDFILL está cofinanciado por el programa LIFE de la Unión Europea (Nº Contrato LIFE15 ENV/ES/000612)

## **Referencias**

Saaty, T.L. (2008) 'Decision making with the analytic hierarchy process', Int. J. Services Sciences, Vol. 1, No. 1, pp.83–98