

C/ Jordi Girona, 1 - 3.
Campus Nord. Mòdul B-1
08034 Barcelona
Tel. 93 401 70 99; Fax 93 401 72 62

Nº de Estudio: CAC-32

CARACTERIZACIÓN DE ZAHORRA SIDERÚRGICA MEZCLADA CON RECHAZO CALIZO PARA SU USO COMO SUELO SELECCIONADO

PETICIONARIO:

ADEC GLOBAL S.L.
C/ Garraf 27-29, Polígono Industrial Can Prunera
08759 Vallirana (Barcelona)
Tel. 93 002 72 78
At. Sr. Félix Pedroso

TRABAJO SOLICITADO

Realizar la caracterización de una zahorra siderúrgica mezclada con rechazo calizo para su uso como suelo seleccionado.

ENSAYOS REALIZADOS

Los ensayos realizados para la caracterización del material son:

- Distribución granulométrica.
- Determinación de la densidad y absorción.
- Determinación del desgaste de Los Ángeles.
- Determinación del índice de plasticidad.
- Determinación del equivalente de arena.
- Determinación de la composición mineralógica.
- Contenido de materia orgánica UNE 103204.
- Contenido de sales solubles en agua, incluido el yeso. NLT 114.
- Determinación de la composición química.
- Determinación del contenido de azufre total.
- Determinación de la expansión acelerada.
- Determinación de la compactación Proctor.
- Determinación del índice CBR.
- Determinación del impacto ambiental (Lixiviación).

MATERIAL

El material entregado consta de una muestra de zahorra siderúrgica 0/25 y una muestra de rechazo calizo de fracción 0/16 mm. Las muestras se entregan con fecha del 17 de febrero de 2014 en el laboratorio de Materiales de Construcción con un peso aproximado de 100 kg cada una.

RESULTADOS

Obtención de la zahorra mezclada

Para la caracterización del material se procede a la obtención de la zahorra siderúrgica mezclada con rechazo calizo. La proporción en peso utilizada para la mezcla final es de 85% de zahorra siderúrgica y 15% de rechazo calizo. Con el material mezclado se realizaron los ensayos de caracterización que se presentan a continuación.

1.1 Distribución granulométrica

Este ensayo se realiza bajo la norma UNE EN 933-1:98 (Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado). Los resultados de la *Tabla 1* muestran las distribuciones de la escoria siderúrgica, el rechazo calizo y la mezcla entre éstos.

Tabla 1. Distribución granulométrica de la zahorra siderúrgica

Tamiz (mm)	Material que pasa (%)		
	ZSA	RC	Mezcla
40	100	100	100
31,5	100	100	100
25	99	100	99
20	98	100	98
16	93	100	94
8	65	91	69
4	34	68	39
2	17	50	22
0,5	3	28	6
0,25	1	21	4
0,063	0	12	2

En la *Figura 1* se muestra la curva granulométrica de la zahorra siderúrgica (ZSA) y del rechazo calizo (RC). En la *Figura 2* se muestra la curva de la mezcla 85% ZSA y 15% de RC.

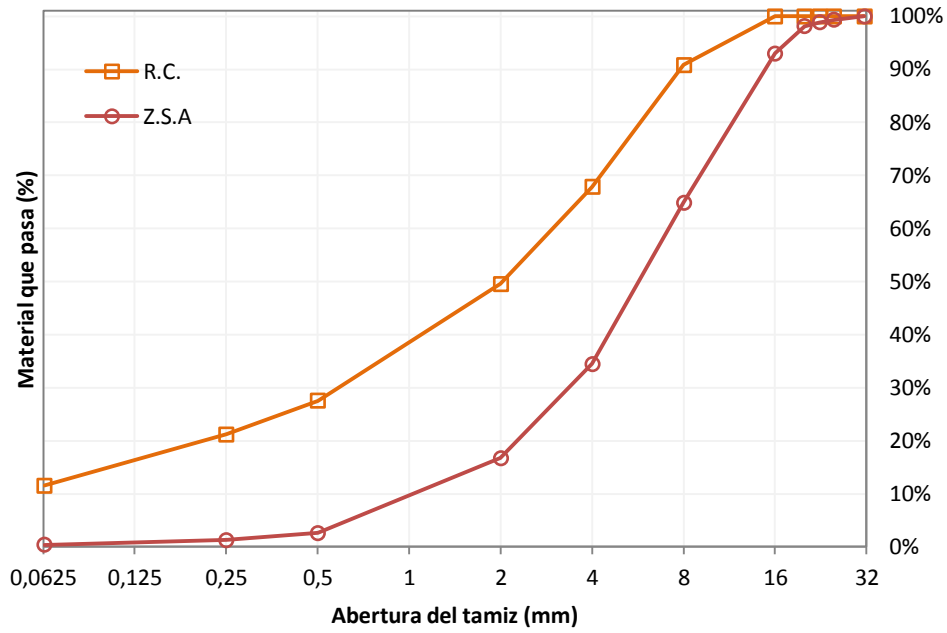


Figura 1. Curva granulométrica de la zahorra siderúrgica y el rechazo calizo.

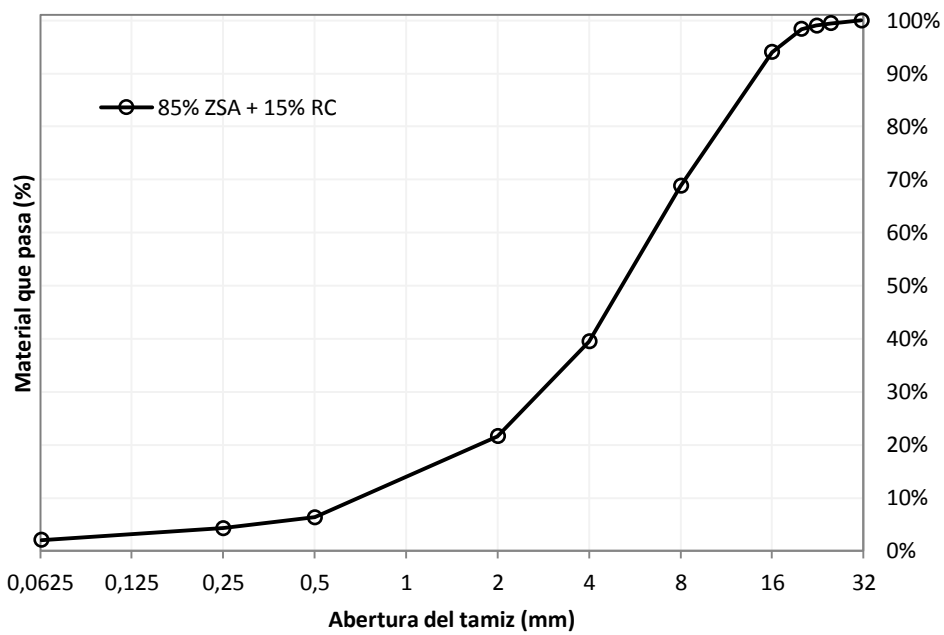


Figura 2. Curva granulométrica de la mezcla 85% ZSA y 15% RC.

1.2 Determinación de la densidad y absorción de partículas

El ensayo de densidad y absorción de la zahorra siderúrgica y el rechazo calizo se realiza según la norma UNE EN 1097-6 (ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad y la absorción de agua). En la *Tabla 2* se muestran los resultados de los dos materiales.

Tabla 2. Densidad y absorción de la zahorra siderúrgica

Propiedad	ZSA		RC	
	0,063 – 4 mm	4 – 25 mm	0,063 – 4 mm	4 – 25 mm
Densidad Aparente (g/cm ³)	3,86	3,74	2,76	2,72
Densidad Seca (g/cm ³)	3,53	3,52	2,67	2,68
Densidad S.S.S. (g/cm ³)	3,62	3,58	2,70	2,69
Absorción (%)	2,5	1,6	1,8	1,1

1.3 Determinación de la resistencia a la fragmentación (Los Ángeles)

El ensayo para determinar la resistencia a la fragmentación se realiza según la norma UNE EN 1097-2 (Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación). El resultado se muestra en la *Tabla 3*.

Tabla 3. Resistencia a la fragmentación (Los Angeles)

Mezcla 75% ZSA + 25% RC	
Tamaño de partículas	10 – 14 mm
L.A.	23

1.4 Determinación del índice de plasticidad

Para la realización de este ensayo se utilizan las normas UNE 103103 (Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande), y la norma UNE 103104 (Determinación del límite plástico de un suelo).

Mezcla 85% ZSA + 15% RC (i.P.): Material no plástico

1.5 Determinación del equivalente de arena

Este ensayo se realiza según la norma UNE EN 933-8 (Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena). El ensayo fue realizado sobre la mezcla de zahorra siderúrgica y rechazo calizo.

Equivalente de arena SE = 59 ± 1

1.6 Determinación de la composición mineralógica

La determinación de la composición mineralógica se realiza por medio de Difracción de Rayos X (DRX), con las muestras molidas a 0,063 mm. La difracción se realiza a las muestras de zahorra siderúrgica, rechazo calizo y la mezcla de zahorra siderúrgica y rechazo calizo. Los difractogramas se muestran en la *Figura 3*, *Figura 4* y *Figura 5*, respectivamente.

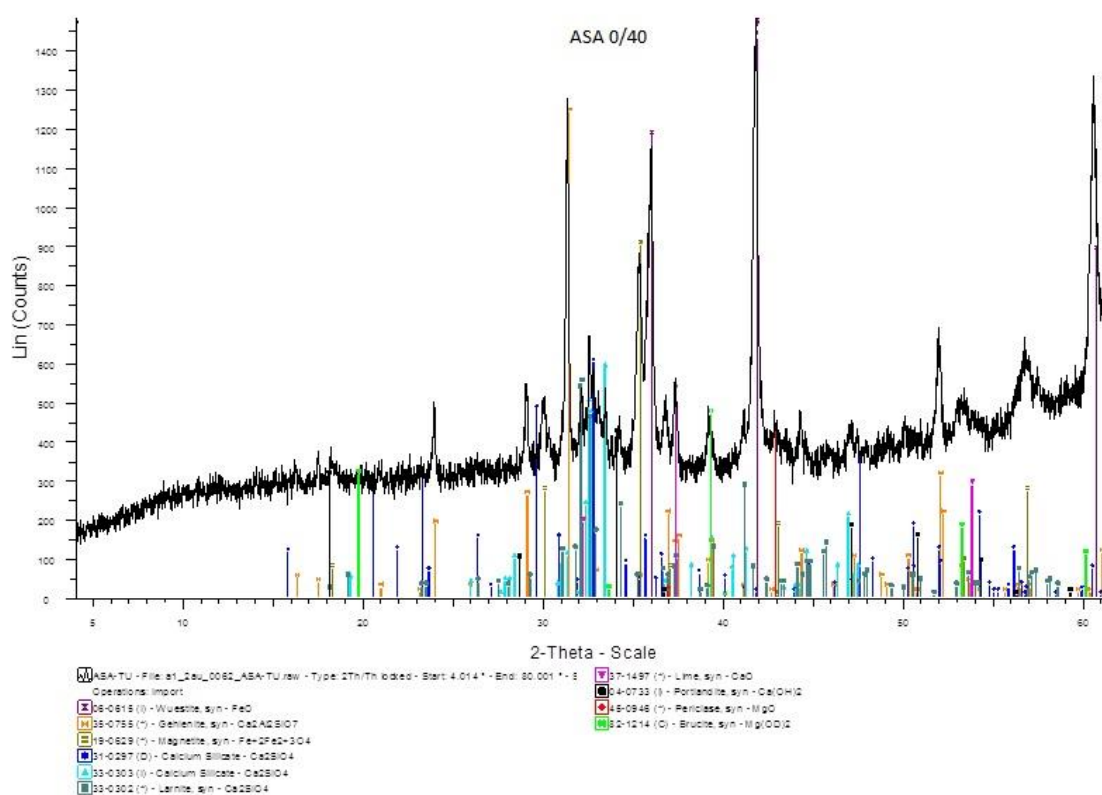


Figura 3. Difractograma de Rayos X de la escoria siderúrgica de Adec Global (ASA 0/40)

Los componentes de las escorias mineralógicamente se presentan en las siguientes formas (*Tabla 4*): Westita, Gehlenita, Magnetita, Silicatos cálcicos, Larnite, Cal, Portlandita, Periclasa y Brucita. Que está de acuerdo a la composición química de las mismas. El hierro se encuentra en forma cristalina Westita y Magnetita, el aluminio en Gehlenita, el calcio y silicio en forma de silicatos cálcicos y Larnita, y el calcio también se presenta en forma de cal y Portlandita. El magnesio, en forma de Periclasa, o bien hidratada como Brucita.

Tabla 4. Fases cristalinas presentes en la escoria siderúrgica de Adec Global

Nombre	Formulación química
Westita	FeO
Gehlenita	$Ca_2Al_2SiO_7$
Magnetita	Fe_3O_4
Silicatos de calcio	Ca_2SiO_4
Larnita	Ca_2SiO_4
Cal	CaO
Portlandita	$Ca(OH)_2$
Periclasa	MgO
Brucita	$Mg(OH)_2$

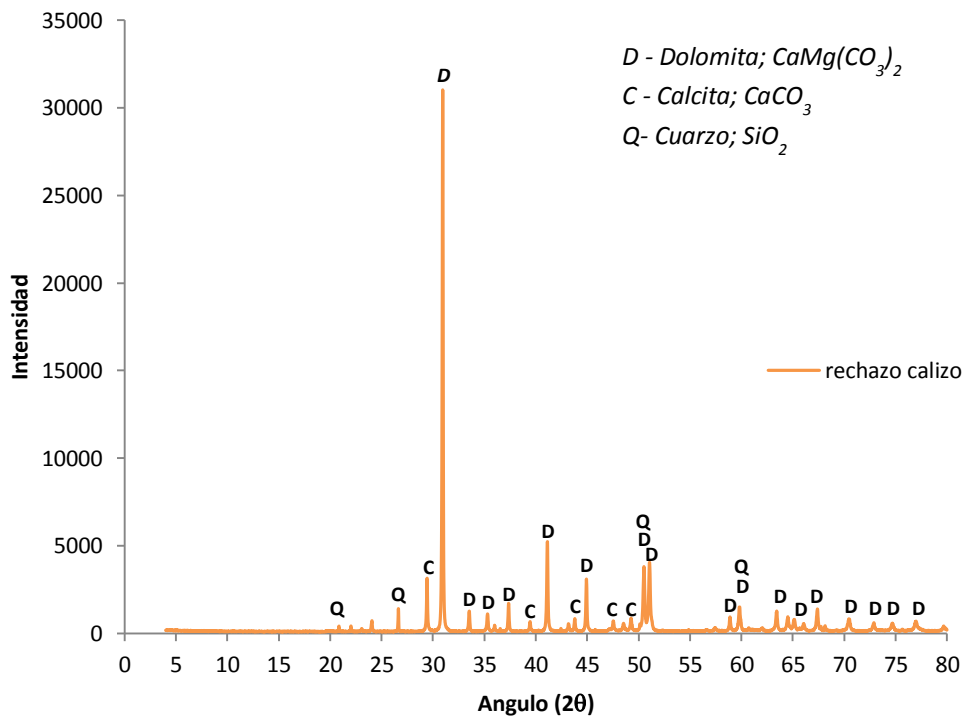


Figura 4. Difractograma de Rayos X del rechazo calizo de Adec Global.

El rechazo calizo está formado principalmente por dolomita, calcita y cuarzo.

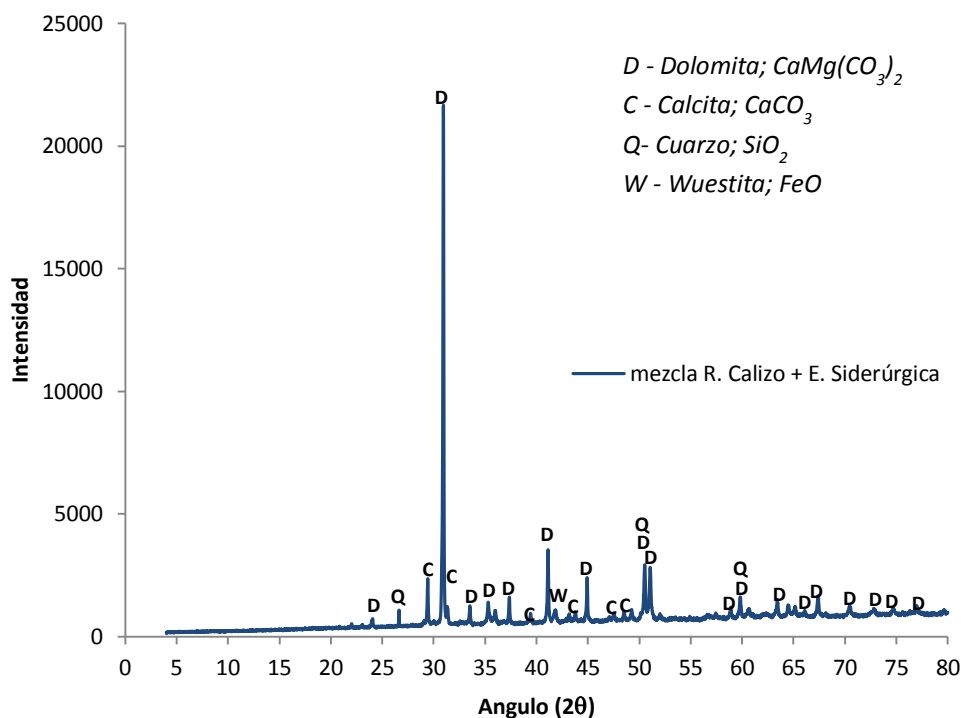


Figura 5. Difractograma de Rayos X de la mezcla entre rechazo calizo y escoria de Adec Global.

1.7 Determinación del contenido de materia orgánica

La determinación del contenido de materia orgánica se realiza según la norma UNE 103204 (determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico). La fracción utilizada es la que pasa el tamiz de 2 mm. El ensayo es realizado a las muestras de:

- zahorra siderúrgica.
- rechazo calizo.
- mezcla de escoria siderúrgica y rechazo calizo (85% ZSA + 15% RC):

Los resultados se muestran en la *Tabla 5*.

Tabla 5. Contenido de materia orgánica de las muestras ensayadas.

Material	Materia Orgánica oxidable (%)
<i>Escoria siderúrgica</i>	<i>0.35 ± 0.03</i>
<i>Rechazo Calizo</i>	<i>0.16 ± 0.06</i>
<i>Mezcla escoria siderúrgica rechazo calizo</i>	<i>0.41 ± 0.06</i>

La escoria proviene de un proceso a altas temperaturas donde la presencia de materia orgánica no es posible, sin embargo según el ensayo UNE 103204 se determina un valor de 0.35%. Cabe aclarar que el valor obtenido es debido a la oxidación de los compuestos de hierro presentes en la escoria.

Las escorias negras están formadas principalmente por calcio, hierro, aluminio y silicio. Teniendo una pérdida por calcinación nula (calcinación a 1000 °C) (*Tabla 7*).

La pérdida por calcinación nula de la escoria muestra que ésta no presenta elementos orgánicos en su composición. Corroborando que lo que se cuantifica como materia orgánica proviene de compuestos de hierro oxidables presentes en la escoria.

1.8 Determinación del contenido de sales solubles

La determinación del contenido en sales solubles se realiza según la norma NLT 114 (Determinación del contenido en sales solubles de los suelos). El ensayo se realiza con la fracción de 2 mm como lo especifica la normativa.

Tabla 6. Contenido en sales solubles la mezcla entre rechazo calizo y escoria siderúrgica.

Material	Sales solubles (%)
<i>Mezcla escoria siderúrgica rechazo calizo (1)</i>	<i>0.39</i>
<i>Mezcla escoria siderúrgica rechazo calizo (2)</i>	<i>0.35</i>
Valor medio	0.37
d.e.	0.03

El rechazo calizo está formado por dolomita, calcita y cuarzo, sin evidenciar la presencia de yeso o arcillas, como se puede observar en la Figura 4.

1.9 Determinación de la composición química

La composición química de la zahorra siderúrgica y del rechazo calizo se realiza por la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX). El equipo utilizado es un espectrofotómetro de marca Philips PW 2400.

Las muestras se secan a 100 °C, luego se trituran y tamizan por el tamiz de malla 0.063 mm. Seguidamente, se calcinan tres réplicas de cada muestra a una temperatura de 1000 °C por un periodo de tiempo de una hora, con lo cual se obtiene la pérdida por calcinación de las muestras. En la *Tabla 7* se muestran los resultados obtenidos de la zahorra siderúrgica y el rechazo calizo.

Tabla 7. Composición química (% en peso de la muestra) de la ZSA y el RC.

Óxidos (% peso)	ZSA	RC
PPC	0,00	45,17
Al ₂ O ₃	9,92	0,79
BaO	0,42	--
CaO	25,78	31,01
Cr ₂ O ₃	2,43	--
Fe ₂ O ₃	35,10	0,76
K ₂ O	0,06	0,10
MgO	3,07	19,36
MnO	5,32	0,08
Na ₂ O	0,07	0,00
Nb ₂ O ₅	0,04	--
P ₂ O ₅	0,49	0,00
SiO ₂	13,91	2,59

1.10 Determinación del contenido de azufre total

El contenido de sulfatos solubles en ácido, en agua y el contenido de azufre total se realizan según la norma UNE EN 1744-1 (Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico).

En la *Tabla 8* se muestran los resultados obtenidos. El ensayo se realiza a la muestra de escoria siderúrgica.

Tabla 8. Contenido de sulfatos solubles en agua y en ácido (expresado en % SO₃ en peso de la muestra) y azufre total (expresado en % S en peso de la muestra) de la escoria siderúrgica.

	ZSA 0/25
Sulfatos solubles en agua (% SO ₃)	0,019
Sulfatos solubles en ácido (% SO ₃)	0,062
Azufre total (% S)	0,103

1.11 Determinación de la expansión acelerada

Para la determinación de la expansión se sigue el procedimiento establecido en la norma UNE EN 1744-1 (Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: análisis química). El ensayo se realiza por duplicado. Las expansiones medias se dan para los tiempos de 24 horas y 168 horas.

En la *Tabla 9* y en la *Figura 6* se muestran los resultados obtenidos en el ensayo.

Tabla 9. Expansión acelerada de la mezcla 75% ZSA + 25% RC.

Tiempo	Expansión (%)
24 horas	0,12
168 horas	1,08

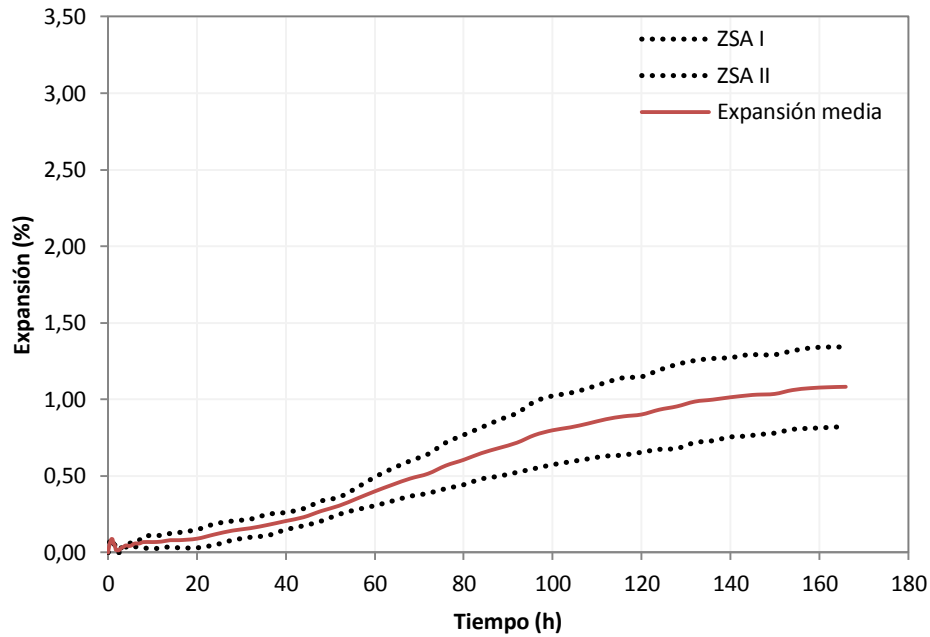


Figura 6. Curva de expansión de la escoria siderúrgica.

1.12 Determinación de la compactación proctor

El ensayo de densidad máxima y humedad óptima se realiza por medio del ensayo NLT 311 (Densidad y humedad óptima de compactación, mediante martillo vibrador, de materiales granulares con o sin productos de adición). Se utiliza el ensayo mencionado anteriormente ya que se trata de materiales granulares poco cohesivos.

En la *Tabla 10* y la *Figura 7* se muestran los resultados del ensayo para la mezcla de ZSA y RC.

Tabla 10. Densidad y humedad de compactación para la mezcla de 85% ZSA + 15% RC.

75% ZSA + 25% RC	
Densidad seca (g/cm ³)	
% H ₂ O	D.S
2,0	2,58
3,8	2,65
5,5	2,68
8,8	2,69
12,1	2,62

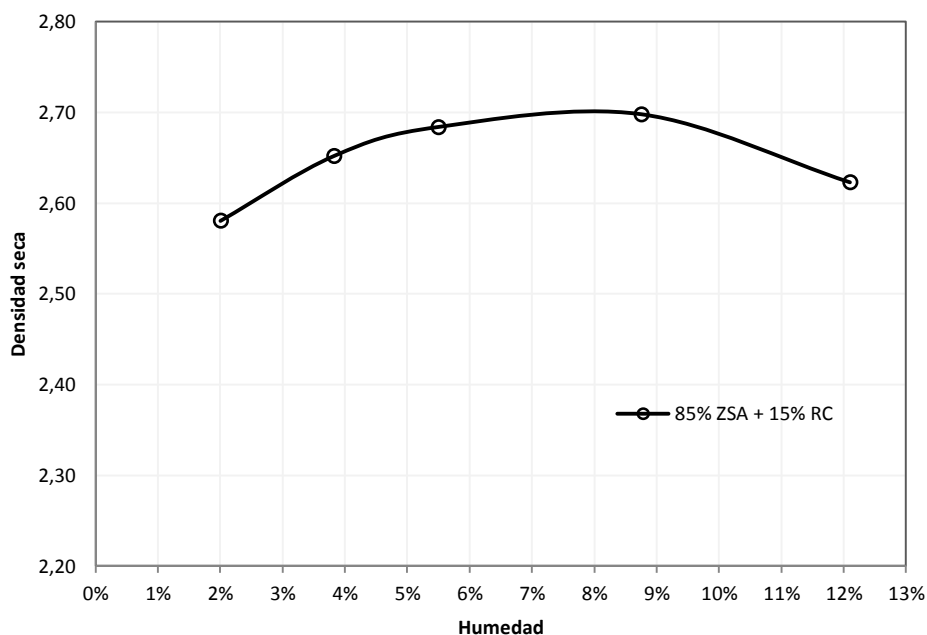


Figura 7. Comportamiento de la densidad de compactación frente a la humedad.

Humedad óptima = 7,5%
 Densidad máxima = 2,70

1.13 Determinación del índice CBR

Para la determinación del índice CBR se sigue la norma UNE 103502 (método de ensayo para determinar en laboratorio el índice CBR de un suelo). La humedad de compactación utilizada es de 7.5% con relación al peso del material.

En la Tabla 11 se muestran los datos de fabricación de las probetas y el resultado del CBR. La Figura 8 muestra las curvas de carga versus penetración del ensayo CBR.

Tabla 11. Resultados del ensayo CBR para la mezcla 75% ZSA + 25% RC.

Propiedad	Muestra					
	1		2		3	
Humedad de compactación (%)	7,5		7,5		7,5	
Densidad seca (g/cm ³)	2,69		2,68		2,70	
Sobrepeso (kg)	4,5		4,5		4,5	
Expansión (%)	0,0		0,0		0,0	
Penetración (mm)	Q (KN)	CBR	Q (KN)	CBR	Q (KN)	CBR
2.5	15	115	14	106	13	98
5.0	24	70	24	120	21	108
CBR promedio	99					

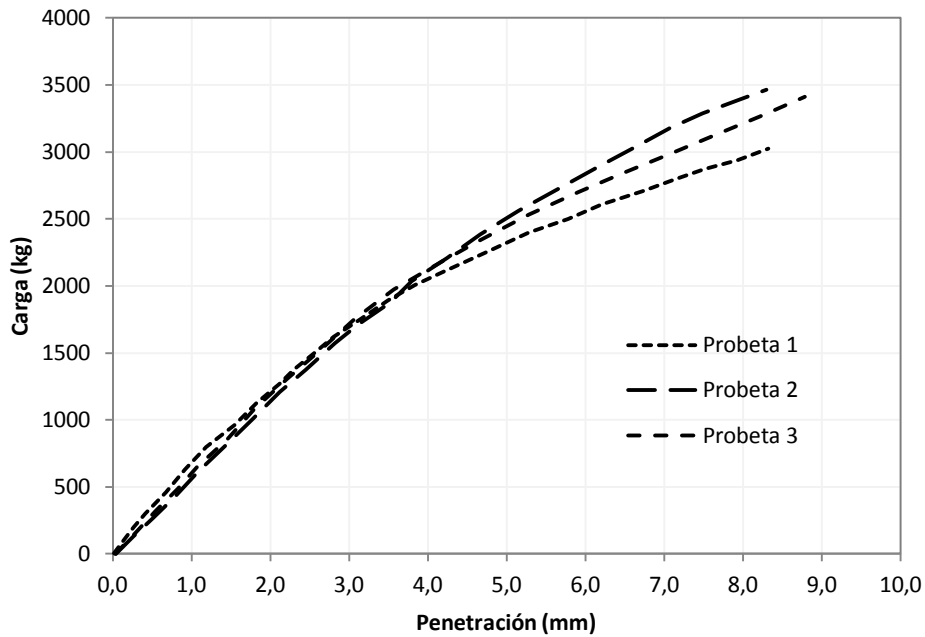


Figura 8. Curva ensayo CBR para la mezcla 85% ZSA + 15% RC.

1.14 Determinación del impacto ambiental (lixiviación)

Este ensayo se realiza según la norma UNE EN 12457-2 (Ensayo en una etapa con una proporción líquido sólido de 10 l/kg para materiales con el tamaño de partícula por debajo de 4 mm, con o sin reducción de tamaño). El ensayo se hace por triplicado y el resultado mostrado es el valor medio.

En la *Tabla 12* se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 12. Cantidad de contaminante lixiviado (mg/kg de muestra) de la zahorra siderúrgica.

Contaminante	mg/kg	
	ZSA	Decreto 32/2009*
As	--	0,50
Ba	7.25	20,00
Cd	<0,01	0,04
Cl	169,67	800,00
Cr	0,21	0,50
Cu	0,22	2,00
F	5.26	18,00
Hg	--	0,01
Mo	0,22	0,50
Ni	<0,02	0,40
Pb	0,14	0,50
Sb	<0,02	0,06
Se	<0,05	0,10
SO4	300,72	1000,00
Zn	1,08	4,00

*Decreto 32/2009, de 24 de febrero, sobre la valorización de escorias siderúrgicas.

OBSERVACIONES

A continuación se recogen las características y los valores límites que deben cumplir los materiales para ser utilizados como bases y subbases (Tabla 13). Se puede observar que los valores son cumplidos en todos los requerimientos planteados por el PG3-2008, menos el contenido de sales solubles que es superior al exigido. El valor del contenido de materia orgánica asignado al material es el proveniente del rechazo calizo, por los motivos expuestos anteriormente.

Cabe aclarar que las sales solubles determinadas en el material provienen del calcio existente en la escoria y en el rechazo calizo, no siendo éstas del tipo sulfato de calcio, o cloruro de sodio (ver Figura 3 y 4). El PG3 da una importancia al sulfato de calcio (yeso) por su vinculación en las sales solubles, sin embargo en la Tabla 8 se observa que las cantidades de sulfatos solubles en agua y en ácido de la escoria son bajas.

Igualmente el PG3 en su apartado 330.4.4.4 (suelos con otras sales solubles) plantea que la utilización puede ser la siguiente:

“Entre cero con dos y el uno por ciento (0,2 y 1%): utilización en el núcleo del terraplén, sin necesidad de tomar precauciones especiales en coronación y espaldones”.

Lo anterior permite plantear que la zahorra siderúrgica mezclada con rechazo calizo puede ser utilizada como un suelo seleccionado.

Tabla 13. Requerimientos para uso de materiales como suelos seleccionados.

Parámetros	Material ADEC GLOBAL	LÍMITE (%) ESTABLECIDO EN LA NORMATIVA (ART. 330-PG-3)
Material que pasa por el tamiz 20 mm.	98%	> 70%
Contenido de materia orgánica	0,16%	< 0,2%
Contenido de sales solubles	0,37%	< 0,2%
Tamaño máximo de partícula	30 mm	< 100 mm
Material que pasa por el tamiz 0,40 mm	5%	≤ 15%
Expansión acelerada	1,08%	<5%
CBR	99	≥ 5

Barcelona, 30 de mayo de 2014



Dra. Marilda Barra Bizinotto

Profesora de Materiales de Construcción