

# ENTREGABLE FINAL PROYECTO MACSU

## 1. ACTIVIDADES REALIZADAS

A continuación se exponen los resultados obtenidos en el proyecto MACSU. El objetivo general del proyecto es investigar y desarrollar nuevas adiciones para sustitución del clínker empleado en los cementos portland. Se ha evaluado el efecto de los residuos de combustión de biomasa como material cementante suplementario.

## 2. INTRODUCCIÓN

Las cementeras producen el 5% de las emisiones globales de dióxido de carbono, la causa principal del calentamiento global. Además, hay que tener presente que el cemento no puede reciclarse; cada nuevo edificio y carretera necesita nuevo cemento.

Uno de los componentes esenciales del cemento portland es el clínker. En la producción de una tonelada del mismo se produce aproximadamente una tonelada de CO<sub>2</sub>. Si se tiene en cuenta que la producción anual de cemento rondaba los 45 millones de toneladas en España según los datos del año 2003, nos podemos hacer una idea de la gran contaminación que esto supone.

Además del clínker, el cemento puede contener adiciones activas (con propiedades puzolanicas) o no reactivas como el filler calizo. Las adiciones activas contienen sílice y/o alúmina que reaccionan con el clínker formando silicatos y aluminatos cálcicos hidratados similares a los formados con los cementos ricos en clínker. Las adiciones no reactivas como el filler calizo tienen un efecto relleno que reduce la porosidad accesible, haciéndola más tortuosa y mejorando la durabilidad.

De los cementos empleados habitualmente, los CEM I son los más contaminantes respecto a aquellos que tienen una mayor cantidad de adiciones (CEM III, CEM V, etc.). Por ello, durante los últimos años se están desarrollando nuevos cementos con elevados contenidos de adiciones como las escorias de alto horno, cenizas volantes, etc. Prueba de ello, son los cementos tipo IIIb Y V que ya se comercializan en nuestro país.

*“Una manera de hacer Europa”*

Fondo Europeo de Desarrollo Regional

Las principales adiciones activas empleadas en la actualidad como adición al cemento provienen de residuos industriales, obteniéndose dos beneficios medioambientales por el empleo de un residuo y, por la reducción del clínker necesario. Las más utilizadas son:

- Cenizas volantes. Proviene de los residuos sólidos que se obtienen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbones pulverizados.
- Humo de sílice. Es un subproducto que se origina en la reducción de cuarzo, de elevada pureza, con carbón en hornos eléctricos de arco para la producción de silicio y ferrosilicio. Su composición es principalmente sílice.
- Escorias de alto horno. Las escorias son un subproducto de la fundición de la mena empleada para purificar los metales.

Las características puzolánicas de una adición dependen de su composición (si contienen sílice y alúmina) y de su estructura, siendo los materiales amorfos más reactivos que los cristalinos.

Aparte de las ventajas medioambientales que supone el empleo de adiciones en sustitución del clínker, en la mayoría de los casos se ha demostrado que mejoran las propiedades relacionadas con la durabilidad como la resistencia a la penetración de cloruros, sulfatos, etc.

El proyecto desarrollado, pretende evaluar nuevos materiales naturales o procedentes de desechos industriales, para poder ser empleados como adición activa en cementos. Más concretamente, durante este año 2017, se ha estudiado el efecto de los residuos de combustión de biomasa como material cementante suplementario.

### 3. OBJETIVOS

El objetivo general del proyecto es investigar y desarrollar nuevas adiciones para  
*“Una manera de hacer Europa”*

Fondo Europeo de Desarrollo Regional

sustitución del clínker empleado en los cementos portland. Se ha evaluado el efecto de los residuos de combustión de biomasa como material cementante suplementario.

#### Los objetivos técnicos específicos del proyecto son:

- Obtener nuevos tipo de adición activa a través del empleo materiales naturales y/o subproductos industriales.
- Desarrollar una metodología de tratamiento para los residuos en los casos en los que sea necesario.
- Definir su viabilidad industrial.
- Conocer las propiedades de los hormigones fabricados con los materiales investigados.

## 4. ACTIVIDADES PROGRAMADAS

El proyecto se ha planteado con una duración de 12 meses, con las actividades que se pueden observar en el cronograma:

	2017											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>PAQUETE DE TRABAJO 1. Selección y estudio de la potencialidad de los materiales como adición</b>												
Tarea 1.1 Selección de materiales susceptibles de poder ser empleados como adición activa.												
Tarea 1.2 Estudio de la potencialidad de los materiales seleccionados como adición activa.												
Entregable 1.1												
<b>PAQUETE DE TRABAJO 2. Evaluación del comportamiento en hormigones</b>												
Tarea 2.1 Caracterización de materias primas,												
Tarea 2.2 Fabricación y evaluación de los hormigones,												
Tarea 2.3 Conclusiones												
Entregable 2.1												
Entregable 2.2												

Las tareas planificadas inicialmente fueron:

#### Tarea 1.1. Selección de materiales susceptibles de poder ser empleados como adición activa.

En esta tarea se realizara una búsqueda de materiales naturales y subproductos/residuos industriales que se consideren pueden tener una composición química y estructura cristalina adecuada para se empleados como aportación al cemento.

#### Tarea 1.2. Estudio de la potencialidad de los materiales seleccionados como "Una manera de hacer Europa"

Fondo Europeo de Desarrollo Regional

### **adición activa.**

Se realizarán pruebas para medir la reactividad de todos los materiales seleccionados. Para ello, de cada una de las muestras recogidas se realizarán los siguientes ensayos:

- Análisis químico de la composición. Contenido en SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y CaO.
- Fabricación de morteros con diversos porcentajes de sustitución de cemento tipo I por el material, para rotura a 7, 28 y 90 días.
- Ensayos de principio y fin de fraguado.
- Ensayos de absorción de agua por capilaridad.

### **Tarea 2.1. Caracterización de materias primas.**

En esta tarea se caracterizarán todas las materias primas empleadas en esta actividad.

### **Tarea 2.2. Fabricación y evaluación de los hormigones.**

Con las adiciones establecidas en el paquete de trabajo 1, se realizarán hormigones para evaluar su comportamiento mecánico y durabilidad:

Las nuevas dosificaciones de hormigón se caracterizarán mediante el siguiente plan de ensayos:

- Resistencia a compresión a 28 y 180 días.
- Resistencia a tracción indirecta a 28 y 180 días.
- Absorción de agua.
- Penetración de agua bajo presión.
- Ensayo de carbonatación acelerada
- Penetración ion-cloruro.

### **Tarea 2.3 Conclusiones.**

Se analizarán todos los resultados obtenidos, y se establecerán las conclusiones finales de la investigación realizada.

## **5. ACTIVIDADES REALIZADAS**

### **5.1 (PT1) Selección de materiales susceptibles de poder ser empleados como adición activa,**

## Tarea 1.1. Selección de materiales susceptibles de poder ser empleados como adición activa.

En primer lugar, se ha realizado una búsqueda de materiales naturales y subproductos/residuos industriales que se consideren pueden tener una composición química y estructura cristalina adecuada para ser empleados como aportación al cemento.

De esta búsqueda, se determino que hay disponible un residuo que puede tener propiedades puzolanicas, y que además, cada vez hay mayores cantidades disponibles. Este residuo procede de la combustión de biomasa.

Para ello, en primer lugar se reviso la composición química de estos materiales. En la siguiente tabla se muestra la composición química de diferentes cenizas procedentes de la combustión de diferentes tipos de biomasa (C.B. Cheah, M. Ramli 2011) :

Chemical composition of wood ash from several species of timber (Vassilev et al., 2010).

Biomass group, sub-group and variety	SiO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
<i>Wood and woody biomass</i>										
Alder-fir sawdust	37.49	26.41	6.1	2.02	12.23	4.04	8.09	0.83	1.81	0.98
Balsam bark	26.06	45.76	10.7	4.87	1.91	2.33	2.65	2.86	2.65	0.21
Beech bark	12.4	68.2	2.6	2.3	0.12	11.5	1.1	0.8	0.9	0.1
Birch bark	4.38	69.06	8.99	4.13	0.55	5.92	2.24	2.75	1.85	0.13
Christmas trees	39.91	9.75	8.06	2.46	15.12	2.59	9.54	11.66	0.54	0.37
Elm bark	4.48	83.46	5.47	1.62	0.12	2.49	0.37	1	0.87	0.12
Eucalyptus bark	10.04	57.74	9.29	2.35	3.1	10.91	1.12	3.47	1.86	0.12
Fir mill residue	19.26	15.1	8.89	3.65	5.02	5.83	8.36	3.72	29.82	0.35
Forest residue	20.65	47.55	10.23	5.05	2.99	7.2	1.42	2.91	1.6	0.4
Hemlock bark	2.34	59.62	5.12	11.12	2.34	14.57	1.45	2.11	1.22	0.11
Land clearing wood	65.82	5.79	2.19	0.66	14.85	1.81	1.81	0.36	2.7	0.55
Maple bark	8.95	67.36	7.03	0.79	3.98	6.59	1.43	1.99	1.76	0.12
Oak sawdust	29.93	15.56	31.99	1.9	4.27	5.92	4.2	3.84	2	0.39
Oak wood	48.95	17.48	9.49	1.8	9.49	1.1	8.49	2.6	0.5	0.1
Olive wood	10.24	41.47	25.16	10.75	2.02	3.03	0.88	2.65	3.67	0.13
Pine bark	9.2	56.83	7.78	5.02	7.2	6.19	2.79	2.83	1.97	0.19
Pine chips	68.18	7.89	4.51	1.56	7.04	2.43	5.45	1.19	1.2	0.55
Pine pruning	7.76	44.1	22.32	5.73	2.75	11.33	1.25	4.18	0.42	0.17
Pine sawdust	9.71	48.88	14.38	6.08	2.34	13.8	2.1	2.22	0.35	0.14
Poplar	3.87	57.33	18.73	0.85	0.68	13.11	1.16	3.77	0.22	0.28
Poplar bark	1.86	77.31	8.93	2.48	0.62	2.36	0.74	0.74	4.84	0.12
Sawdust	26.17	44.11	10.83	2.27	4.53	5.34	1.82	2.05	2.48	0.4
Spruce bark	6.13	72.39	7.22	2.69	0.68	4.97	1.9	1.88	2.02	0.12
Spruce wood	49.3	17.2	9.6	1.9	9.4	1.1	8.3	2.6	0.5	0.1
Tamarack bark	7.77	53.5	5.64	5	8.94	9.04	3.83	2.77	3.4	0.11
Willow	6.1	46.09	23.4	13.01	1.96	4.03	0.74	3	1.61	0.06
Wood	23.15	37.35	11.59	2.9	5.75	7.26	3.27	4.95	2.57	1.2
Wood residue	53.15	11.66	4.85	1.37	12.64	3.06	6.24	1.99	4.47	0.57
Mean	22.22	43.03	10.75	3.48	5.09	6.07	3.44	2.78	2.85	0.29

De los resultados obtenidos en esta investigación, se puede observar que contienen 3 componentes deseables para su empleo como adición activa en el hormigón, estos son; alúmina, sílice y oxido de calcio. Por ello, se decide investigar las propiedades de esta adición para su uso como material cementante suplementario.

El objetivo inicial de utilizar biomasa en hormigón es evaluar si puede ser empleado como adición activa. Otra opción posible, es que el material no tenga propiedades puzolanicas pero por el contrario si pueda ser empleado de forma similar a un filler calizo para mejorar la durabilidad del hormigón (adición inactiva).

En el estudio, se ha trabajado con dos tipos de residuos de biomasa, uno procedente

del fondo de las calderas, y el otro de las cenizas volantes presentes en los humos de combustión.

En España la producción de energía a partir de la quema de biomasa presenta una actividad creciente. En esta investigación se estudia la viabilidad técnica que presentan ciertos residuos (cenizas volantes y cenizas de fondo) procedentes de dicha combustión, para ser empleados en materiales de construcción, evaluando la composición química y sus propiedades puzolánicas.

Se conoce como biomasa energética al conjunto de materia orgánica, de origen vegetal o animal, incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural o artificial. Los residuos de biomasa se clasifican en función de su procedencia: 1) residuos forestales; 2) residuos agrícolas (podas de cultivos leñosos, cultivos de cereales e incluso herbáceos); 3) residuos de industrias forestales (tratamiento de madera, corcho o papel, etc.); 4) residuos biodegradables de industrias agroalimentarias y agroalimentarias y también los procedentes de la actividad urbana; 5) cultivos energéticos y biocarburantes.

La energía procedente de la biomasa, para su aplicación en usos térmicos y eléctricos, es la que más perspectivas de crecimiento tiene en el Plan de Fomento de las Energías Renovables. En España, el consumo de biomasa ha ido ascendiendo en los últimos años, siendo en 2008 de 4798 Gwh, un 9.2% superior al del año anterior, según datos del MITYC. Por Comunidades Autónomas son Andalucía, Galicia y Castilla-León las que registran un mayor consumo.

En la combustión de biomasa se generan dos tipos de residuos, cenizas de fondo (CF) formadas por el material total o parcialmente quemado y cenizas volantes (CV), partículas arrastradas por la corriente de gases al exterior de la cámara de combustión. Considerando la capacidad de consumo actual de las plantas, el volumen de residuos generados sería de 120.000 t/año, cifra que irá al alza en los próximos años. Estas importantes cantidades de residuo garantizarían una disponibilidad suficiente para su valorización, siendo principalmente empleados como fertilizantes debido a su alto contenido en potasio. No obstante, muchas toneladas de residuos no encuentran una salida comercial por lo que, dada su elevada disponibilidad, resulta interesante plantearse un estudio de viabilidad de valorización de este tipo de residuos en la construcción.

## **Tarea 1.2. Estudio de la potencialidad de los materiales seleccionados como**

*“Una manera de hacer Europa”*

Fondo Europeo de Desarrollo Regional

### adición activa.

Para el estudio, se han recogido muestras de diferentes calderas de instalaciones de biomasa en la Región de Murcia y regiones limítrofes.

De cada una de las muestras se identificó si procedían del fondo de caldera o de la recogida de los humos de combustión (cenizas volantes). Las muestras recogidas se muestran en la siguiente tabla:

MUESTRA	COMPOSICIÓN	TIPO CENIZA
<b>Ceniza I</b>	Hueso aceituna	Fondo caldera
<b>Ceniza II</b>	Hueso aceituna	Fondo caldera
<b>Ceniza III</b>	Astilla	Volante
<b>Ceniza IV</b>	Cáscara almendra	Fondo caldera
<b>Ceniza V</b>	Hueso aceituna	Volante
<b>Ceniza VI</b>	Cáscara almendra	Volante
<b>Ceniza VII</b>	Cáscara almendra	Fondo caldera
<b>Ceniza VIII</b>	Pellet	Fondo caldera
<b>Ceniza IX</b>	Cáscara almendra	Fondo caldera
<b>Ceniza X</b>	Hueso aceituna	Fondo caldera

### Composiciones cenizas

Se realizó una caracterización química de todas las cenizas. Los resultados que se han obtenido expresados en porcentaje se muestran a continuación:

Elementos	Ceniza 1	Ceniza 2	Ceniza 3	Ceniza 4	Ceniza 5	Ceniza 6	Ceniza 7	Ceniza 8	Ceniza 9	Ceniza 10
Na <sub>2</sub> O	0,136197	0,2496	1,81337	0,3748	2,5860	18,3629	1,1511	0,17915	1,0235	0,9766
MgO	1,488057	7,7936	0,43123	6,1476	4,1220	0,7931	5,2617	2,52598	3,5874	5,5461
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,294978	1,0106	0,10239	1,1049	1,7373	0,2930	2,3519	0,60777	4,2834	1,4202
SiO <sub>2</sub>	1,301726	3,4198	0,3598	5,9600	6,3477	0,9663	9,4678	1,89793	13,3474	6,9043
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,249073	2,6348	0,81582	12,5609	2,6900	1,1181	1,8801	1,98764	1,8840	6,4174
SO <sub>3</sub>	0,508764	0,8789	17,5215	2,2471	2,1727	1,0332	2,4342	2,33123	11,7609	1,0205
Cl	0,152406	0,0546	2,17133	0,4929	0,7909	5,6734	0,3236	1,08336	0,8932	0,3557
K <sub>2</sub> O	24,44209	14,2371	55,4536	50,1934	35,7057	25,4632	8,9743	14,6437	9,2895	31,6276
CaO	13,2766	61,3265	4,28732	14,8440	35,3720	28,0564	56,9896	16,8652	44,3692	37,7843
TiO <sub>2</sub>	0,043109	0,1508	0,0959	0,1554	0,1854	0,0984	2,4113	0,08309	0,7229	0,1943
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10297	0,0316	0,03434	0,0312	0,0662	0,1259	0,1956	0,1073	0,0897	0,0919
MnO	0,075563	0,5843	0,10996	0,1822	0,1414	0,1924	0,7822	0,10077	0,1732	0,1271
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,634552	2,8807	0,2251	1,3185	3,5204	13,8096	2,7725	0,86733	3,1379	2,7488
NiO	0,070016	0,0093	0,0425	0,0179	0,0466	0,0456	0,1174	0,01907	0,0380	0,0258
CuO	0,071773	0,0761	0,14126	0,1072	0,1768	0,2374	0,1168	0,05351	0,0564	0,1569
ZnO	0,095731	0,0791	0,70989	0,1130	0,0946	0,1095	0,1188	0,04174	0,4738	0,0933
Rb <sub>2</sub> O	0,086281	0,0630	0,10861	0,0410	0,0629	0,0817	0,0537	0,10504	0,0641	0,0276
SrO	0,159255	0,1944	0,13474	0,1486	0,2875	0,3514	0,3810	0,19001	0,6276	0,4145

De los resultados obtenidos, se observa que el contenido de cloruros y sulfatos de las muestras, está por encima de los límites marcados por las normas. El contenido de  $K_2O$  es también muy alto.

Por último, en todos los casos los contenidos de  $MgO$  son importantes y podrían sugerir riesgo de generar productos expansivos en presencia de cemento.

El contenido de  $Cr_2O_3$  es bajo, por lo que en principio no se presenta ningún problema medioambiental por la presencia de cromo.

Con los resultados de composición, **se puede concluir** que tanto las cenizas de fondo como las volantes podrían emplearse en hormigón, pero en ciertos casos, su contenido variable en sulfatos, cloruros,  $MgO$  y  $K$  llevará a tener que plantear un estudio de posible eliminación por deslavado y a analizar el posible riesgo de expansiones, según el tipo de aplicación. En el caso de cloruros, sería suficiente con no emplearlo en hormigones con armaduras. Otra opción, es reducir el contenido de cenizas de biomasa a una cantidad tal, que el contenido total con el resto de componentes, cumpla con las limitaciones de la normativa.

### **Pruebas en morteros normalizados**

Otro de los factores a estudiar, es si la estructura de las cenizas de biomasa es más o menos cristalina para saber si pueden ser más o menos reactivas, en base a su composición.

Se han realizado diversas pruebas con morteros normalizados con cenizas de biomasa. En todas se ha empleado arena normalizada según UNE EN 196-1 y un cemento CEM I 52.5 R.

Se han realizado dos morteros de referencia, uno con un 100% de cemento, y otro con un 10% de filler calizo. El filler calizo es una adición que no reacciona químicamente con el cemento, pero igualmente tiene un efecto positivo sobre el material, dado su efecto relleno y como centro de nucleación. Con un 10% de filler calizo, nos sirve para saber si las muestras reaccionan químicamente, obteniéndose morteros con resistencias superiores.

Para caracterizar los morteros, se han realizado ensayos de flexión y compresión sobre morteros de  $4*4*16$  cm a la edad de 7, 28 y 90 días.

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas:

REFERENCIA				REFERENCIA FILLER CALIZO			
-	-			FILLER CALIZO (10%)	45 gr.		
AGUA	225 gr.			AGUA	225 gr.		
ARENA	1350 gr.			ARENA	1350 gr.		
CEM I	450 gr.			CEM I	405 gr.		
	RESULTADOS (Mpa)				RESULTADOS (Mpa)		
	FLEXIÓN	COMPRESIÓN			FLEXIÓN	COMPRESIÓN	
7 DIAS	6,2	43,1	44,1	7 DIAS	6,2	35,6	36,3
28 DIAS	8,1	50,4	52,8	28 DIAS	7,8	46,3	46,3
90 DIAS	8,9	57,9	59,7	90 DIAS	8,9	51,6	49,6

MUESTRA 1 (10%)				MUESTRA 2 (10%)			
CENIZA BIOMASA (10%)	45			CENIZA BIOMASA (10%)	45		
AGUA	225			AGUA	225		
ARENA	1350			ARENA	1350		
CEM I	405			CEM I	405		
	RESULTADOS (MPA)				RESULTADOS (MPA)		
	FLEXIÓN	COMPRESIÓN			FLEXIÓN	COMPRESIÓN	
7 DIAS	6,6	36,1	37,5	7 DIAS	5,7	29,1	29,4
28 DIAS	7,9	46,8	48,4	28 DIAS	6,8	35,0	33,3
90 DIAS	8,6	53,1	52,7	90 DIAS	7,3	38,0	39,3

MUESTRA 3 (10%)				MUESTRA 4 (10%)			
CENIZA BIOMASA (10%)	45			CENIZA BIOMASA (10%)	45		
AGUA	225			AGUA	225		
ARENA	1350			ARENA	1350		
CEM I	405			CEM I	405		
	RESULTADOS (MPA)				RESULTADOS (MPA)		
	FLEXIÓN	COMPRESIÓN			FLEXIÓN	COMPRESIÓN	
7 DIAS	4,6	24,0	22,5	7 DIAS	4,9	22,6	22,7
28 DIAS	5,7	27,4	28,7	28 DIAS	6,0	28,8	28,7
90 DIAS	6,0	30,9	29,4	90 DIAS	6,8	35,4	35,2

MUESTRA 5 (10%)				MUESTRA 6 (10%)			
CENIZA BIOMASA (10%)	45			CENIZA BIOMASA (10%)	45		
AGUA	225			AGUA	225		
ARENA	1350			ARENA	1350		
CEM I	405			CEM I	405		
	RESULTADOS (MPA)				RESULTADOS (MPA)		
	FLEXIÓN	COMPRESIÓN			FLEXIÓN	COMPRESIÓN	
7 DIAS	4,9	19,3	19,8	7 DIAS	5,8	21,5	22,6
28 DIAS	6,2	25,0	25,4	28 DIAS	6,0	27,9	28,2
90 DIAS	6,7	31,9	30,4	90 DIAS	6,7	34,9	36,7

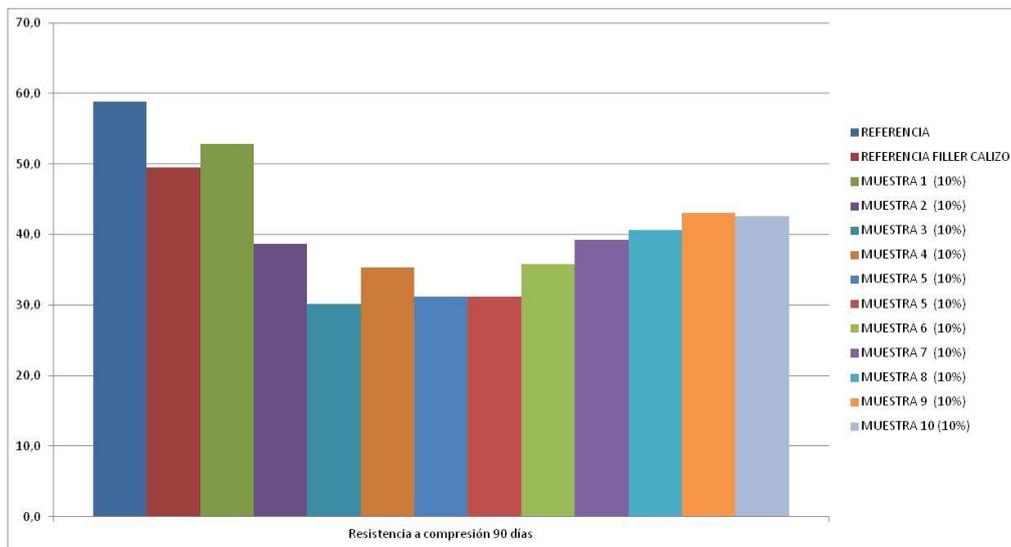
  

MUESTRA 7 (10%)				MUESTRA 8 (10%)			
CENIZA BIOMASA (10%)	45			CENIZA BIOMASA (10%)	45		
AGUA	225			AGUA	225		
ARENA	1350			ARENA	1350		
CEM I	405			CEM I	405		
	RESULTADOS (MPA)				RESULTADOS (MPA)		
	FLEXIÓN	COMPRESIÓN			FLEXIÓN	COMPRESIÓN	
7 DIAS	5,5	25,5	25,0	7 DIAS	6,0	24,3	27,9
28 DIAS	6,6	31,7	31,9	28 DIAS	6,1	30,2	34,0
90 DIAS	7,3	39,4	39,2	90 DIAS	6,9	38,5	42,7

MUESTRA 9 (10%)				MUESTRA 10 (10%)			
CENIZA BIOMASA (10%)	45			CENIZA BIOMASA (10%)	45		
AGUA	225			AGUA	225		
ARENA	1350			ARENA	1350		
CEM I	405			CEM I	405		
	RESULTADOS (MPA)				RESULTADOS (MPA)		
	FLEXIÓN	COMPRESIÓN			FLEXIÓN	COMPRESIÓN	
7 DIAS	5,7	27,6	27,7	7 DIAS	6,3	26,4	28,1
28 DIAS	7,4	34,6	35,2	28 DIAS	7,0	33,3	33,7
90 DIAS	7,7	43,3	43,0	90 DIAS	7,5	42,7	42,5

A continuación se presentan en una grafica los resultados de resistencia a compresión a 90 días:



Sólo se han obtenido resultados similares al filler calizo con una de las cenizas empleadas (cenizas de fondo). El resto de cenizas producen pérdidas de resistencia mayores que el empleo de filler calizo. Esta diferencia se puede deber a que las cenizas pueden contener otras impurezas que mejoran o empeoran los resultados. En el caso de la presencia de tierra que acompaña a la biomasa se pueden formar compuestos amorfos que mejoran el comportamiento de la ceniza de biomasa.

Aunque no se ha determinado si las cenizas son amorfas o cristalinas, todos los resultados indican que las cenizas empleadas no tienen propiedades puzolánicas similares a las obtenidas en otro tipo de adiciones como las cenizas volante, humo de sílice, etc.

Las propiedades mecánicas de los morteros con cenizas volantes de biomasa presentan mayores pérdidas de resistencia cuando se emplean cenizas de fondo (dosificándolas en peso).

## Conclusiones parciales PT1

En base a las pruebas realizadas en el plan de trabajo 1, se puede concluir que:

- Se han obtenido resultados similares al filler calizo con una de las cenizas empleadas (cenizas de fondo). El resto de cenizas producen pérdidas de resistencia mayores que el empleo de filler calizo. Esta diferencia se puede deber a que las cenizas pueden contener otras impurezas que mejoran o empeoran los resultados. En el caso de la presencia de tierra que acompaña a la biomasa se pueden formar compuestos amorfos que mejoran el

comportamiento de la ceniza de biomasa.

- Aunque no se ha determinado si las cenizas son amorfas o cristalinas, todos los resultados indican que las cenizas empleadas no tienen propiedades puzolanicas similares a las obtenidas en otro tipo de adiciones como las cenizas volante, humo de sílice, etc.

## 5.2 (PT2) Selección de materiales susceptibles de poder ser empleados como adición activa,

### Tarea 2.1. Caracterización de materias primas.

En el proyecto se ha empleado como cemento, un cemento tipo I. Sus características se exponen a continuación.

Contenido de clínker	96%
Componentes minoritarios	<4%
Resistencia a 28 días	> 52.5 Mpa
Inicio de fraguado	> 45 minutos

Como áridos para la fabricación de hormigones, se emplearon 3 fracciones granulométricas de áridos de origen calizo; 0/4, 5/12 y 12/20 mm. A continuación se

presentan los resultados de caracterización realizados:

Propiedad	0/4 mm	5/12 mm	12/20 mm
Absorción de agua (%)	1	1	1
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2.70	2.71	2.71
Resistencia a la fragmentación	-	28	28
Contenido de finos (<0.063 mm)	15	1	1

## Tarea 2.2. Fabricación y evaluación de los hormigones.

El objetivo de esta tarea es evaluar el comportamiento mecánico y la durabilidad de hormigones realizados empleando como componentes las cenizas de biomasa. Se han fabricado varios hormigones industriales en la empresa Los Serranos realizados con un cemento tipo I. Se decidió hacerlo en una planta industrial para estudiar el comportamiento de hormigones reales fabricados con los nuevos materiales investigados.

En concreto, se han realizado 7 dosificaciones de hormigón con 3 tipos de ceniza (muestras I, IX y la X), empleando un 5% y un 10% en sustitución del cemento.

En la siguiente tabla se recogen las dosificaciones realizadas en kg por m<sup>3</sup>:

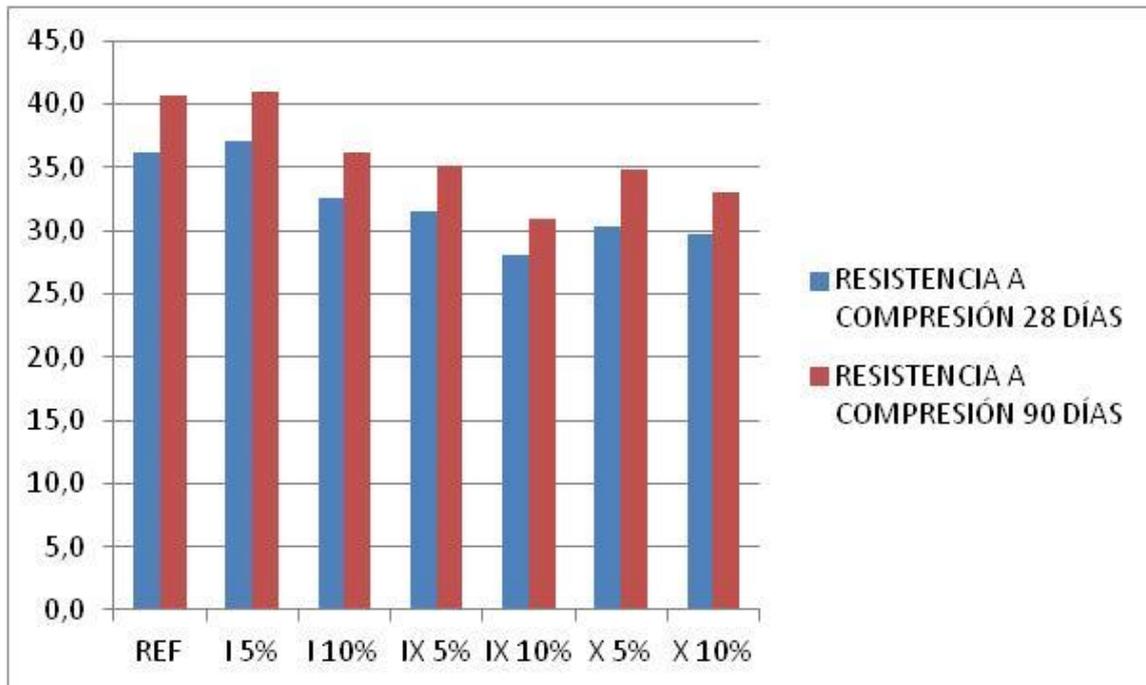
COMPONENTES	REF	I 5%	I 10%	IX 5%	IX 10%	X 5%	X 10%
CEMENTO I	275,0	261,3	247,5	261,3	247,5	261,3	247,5
CENIZA I		13,8	27,5				
CENIZA IX				13,8	27,5		
CENIZA X						13,8	27,5
AGUA	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0
ÁRIDO 0-4	1254,0	1254,0	1254,0	1254,0	1254,0	1254,0	1254,0
ÁRIDO 5-12	350,0	350,0	350,0	350,0	350,0	350,0	350,0
ÁRIDO 12-20	470,0	470,0	470,0	470,0	470,0	470,0	470,0
ADITIVO	1,5	1,5	1,8	1,6	1,8	1,5	1,9

Las nuevas dosificaciones de hormigón se han caracterizado mediante el siguiente plan de ensayos:

- Resistencia a compresión a 28 y 90 días.
- Absorción de agua.
- Penetración de agua bajo presión.
- Ensayo de carbonatación acelerada.
- Penetración ion-cloruro.

En los siguientes apartados se muestran los resultados obtenidos:

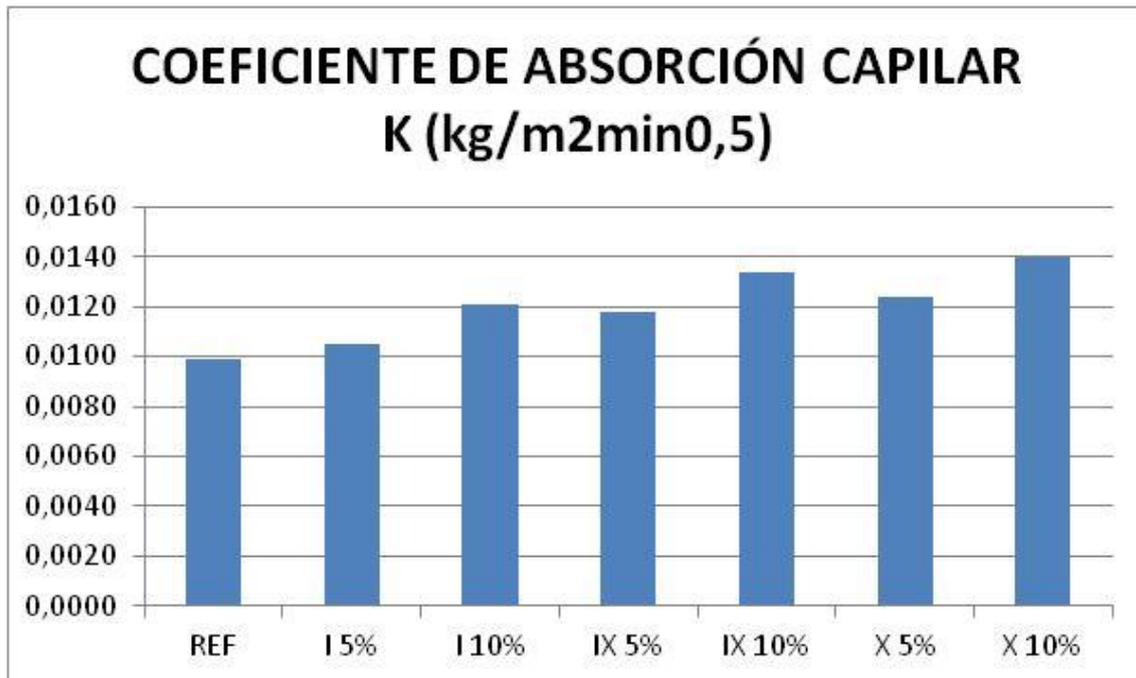
**Resistencia a compresión a 28 y 90 días.**



Los resultados de resistencia a 28 y 90 días muestran que la incorporación de la ceniza de biomasa I (de fondo de caldera) en una sustitución de un 5% por cemento, no produce una pérdida de resistencia significativa. Una sustitución de un 10% supone una pérdida de resistencia importante en todos los casos.

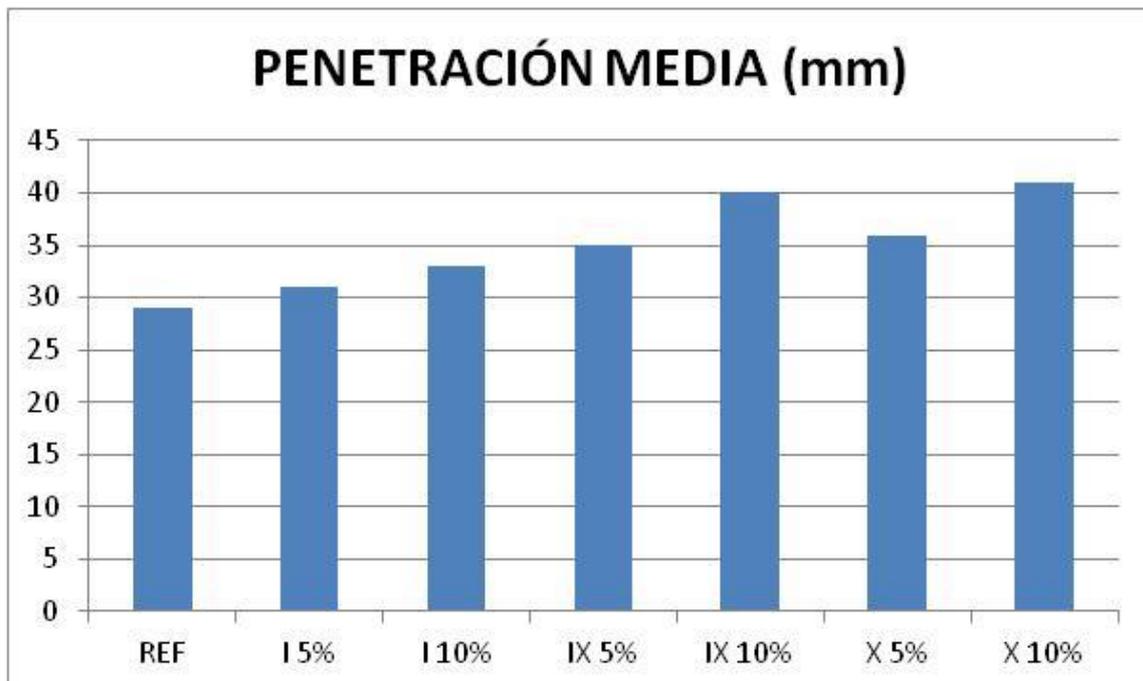
Estos resultados confirman los obtenidos en el PT1. Las cenizas empleadas, en líneas generales no presentan unas propiedades puzolánicas. No obstante, se abre la posibilidad del uso de estos residuos como material cementante suplementario para su aplicación en cementos de menor categoría resistencia y para aplicaciones donde no se requieran resistencias elevadas.

### Absorción de agua.



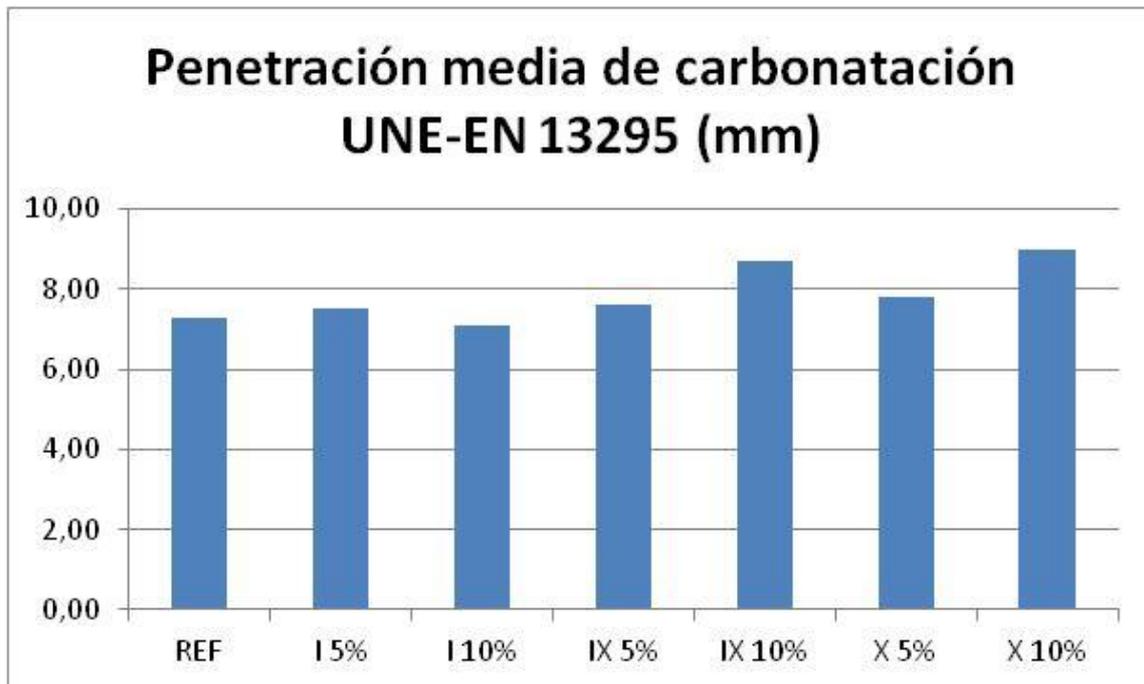
La incorporación de cenizas en un 10% y 5%, supone un aumento de la absorción de agua por capilaridad.

#### Penetración de agua bajo presión.



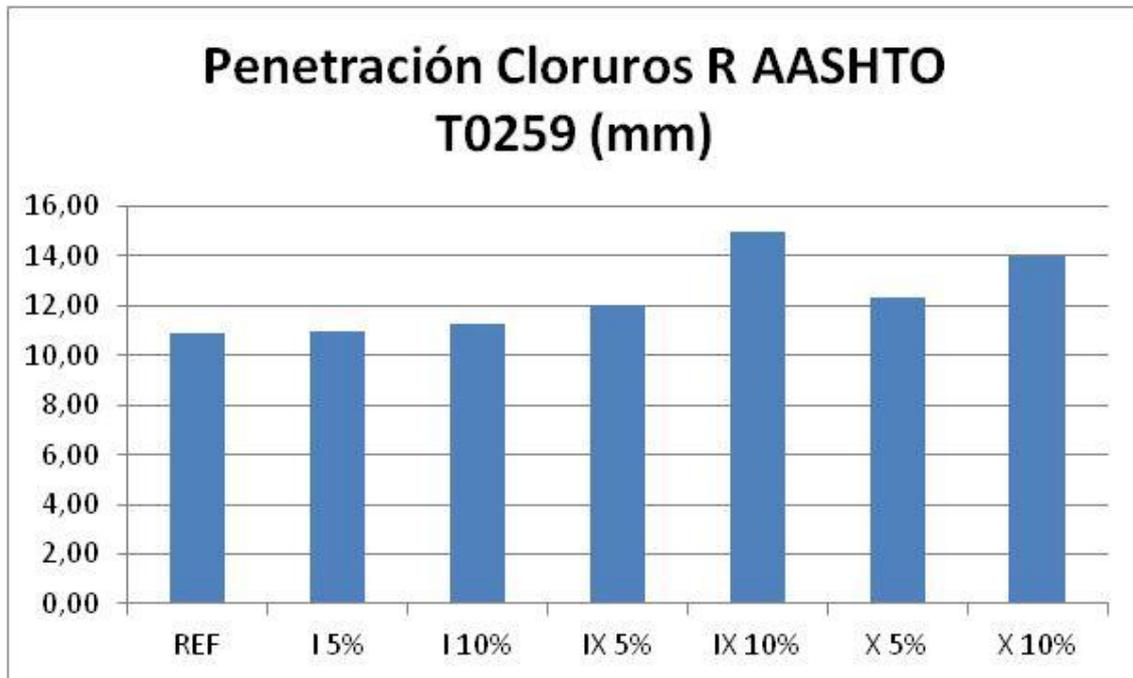
La incorporación de cenizas en un 10% y 5%, supone un aumento de la penetración de agua a presión.

### Ensayo de carbonatación acelerada



En el caso de la carbonatación, sólo se aprecia un aumento significativo de la profundidad de carbonatación, cuando se emplean las cenizas IX y X con 10% de sustitución.

### Penetración ion-cloruro.



Los resultados obtenidos muestran que la ceniza I, no presenta un aumento en la profundidad de penetración de cloruros.

Además de la empresa Los Serranos que ha colaborado para la realización de las dosificaciones de hormigón en su planta industrial, también ha colaborado en las pruebas realizadas industriales y en las pruebas de laboratorio, la empresa SMART PROYECT ENGINEERS S.L.P aportando su conocimiento, asesoramiento y colaborando en las pruebas realizadas durante todo el proyecto.

### Tarea 2.3 CONCLUSIONES DEL PROYECTO.

En base a los resultados obtenidos en la campaña experimental realizada durante todo el proyecto, se puede concluir que:

- Con los resultados de composición, se puede concluir que tanto las cenizas de fondo como las volantes podrían emplearse en hormigón, pero en ciertos casos, su contenido variable en sulfatos, cloruros, MgO y K llevará a tener que plantear un estudio de posible eliminación por deslavado y a analizar el posible riesgo de expansiones, según el tipo de aplicación. En el caso de cloruros, es necesario controlar el contenido de este compuesto, o directamente, no emplearlo en hormigones con armaduras. El contenido de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  es bajo, por lo que en principio no se presenta ningún problema medioambiental por la presencia de cromo.
- Con las cenizas de biomasa, se han obtenido resultados similares al filler calizo con una de las cenizas empleadas (cenizas de fondo). El resto de cenizas producen pérdidas de resistencia mayores que el empleo de filler calizo. Esta diferencia se puede deber a que las cenizas pueden contener otras impurezas que mejoran o empeoran los resultados. En el caso de la presencia de tierra que acompaña a la biomasa se pueden formar compuestos amorfos que mejoran el comportamiento de la ceniza de biomasa.
- Los resultados de resistencia a 28 y 90 días en hormigones muestran que la incorporación de la ceniza de biomasa I (de fondo de caldera) en una sustitución de un 5% por cemento, no produce una pérdida de resistencia significativa. Una sustitución de un 10% supone una pérdida de resistencia importante en todos los casos. Las cenizas empleadas, en líneas generales no presentan propiedades puzolánicas. No obstante, se abre la posibilidad del uso de estos residuos como material cementante suplementario para su aplicación en cementos de menor categoría resistente, y para aplicaciones donde no se requieran resistencias elevadas.
- Los ensayos realizados para determinar la durabilidad del hormigón (absorción de agua, penetración de agua bajo presión, carbonatación y cloruros), han mostrado que el empleo de la ceniza de biomasa como material sustitutivo de un cemento CEM I 52.5 R, supone en líneas generales, un aumento de la absorción de agua, y penetración de agua bajo presión debido a que se genera

una red capilar más gruesa respecto al hormigón de referencia. Los resultados de carbonatación no han mostrado diferencias significativas, y en el caso de cloruros los resultados son contradictorios, dado que dependen de la ceniza empleada.

- Aunque no se ha determinado si las cenizas son amorfas o cristalinas, todos los resultados indican que las cenizas empleadas no tienen propiedades puzolánicas similares a las obtenidas en otro tipo de adiciones como la ceniza volante de central térmica, humo de sílice, etc. Las cenizas estudiadas tienen un comportamiento más parecido a una adición no activa como el filler calizo, pero que también tiene ventajas para ser empleado como material cementante suplementario. De hecho, el filler calizo se emplea en la fabricación de cementos como material suplementario.
- Los resultados obtenidos son prometedores. Con alguna de las cenizas empleadas, se han obtenido resultados similares a los obtenidos con filler calizo, lo que abre la puerta al empleo de este tipo de materiales como material cementante suplementario, si bien es necesario controlar bien la procedencia, composición, y comportamiento de la ceniza para cada caso concreto. También parece recomendable su uso en hormigones de resistencias bajas o moderadas, y que no requieran de unas exigencias elevadas de durabilidad.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Ammenberg, J., Baas, L., Eklund, M., Feiz, R., Helgstrand, A., Marshall, R., 2014. Improving the CO<sub>2</sub> performance of cement, part III: the relevance of industrial symbiosis and how to measure its impact. *J. Clean.*
- [2]. Anjos, M.A.S., Camoes, A., Jesus, C., 2014. Eco-ef ~ ficient self-compacting concrete with reduced Portland cement content and high volume of fly ash and metakaolin. *Key Eng. Mater.* 634, 172e181.
- [3]. Barbosa, R., Lapa, N., Dias, D., Mendes, B., 2013. Concretes containing biomass ashes: mechanical, chemical, and ecotoxic performances. *Constr. Build. Mater.* 48, 457e463.
- [4]. Celik, K., Meral, C., Petek Gursel, A., Mehta, P.K., Horvath, A., Monteiro, P.J.M., 2015. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of selfconsolidating concrete mixtures made with blended Portland cements containing fly ash and limestone powder. *Cem. Concr. Compos.* 56, 59e72.
- [5]. Cheah, C.B., Ramli, M., 2011. The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: an overview. *Resour. Conserv. Recycl.* 55, 669e685.
- [6]. Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y., Jullien, A., Ventura, A., 2010. LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: an application to mineral additions in concrete. *Resour. Conserv. Recycl.* 54, 1231e1240.
- [7]. Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., 2009. Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. *Constr. Build. Mater.* 23, 3352e3358.
- [8]. Cordeiro, G.C., Toledo Filho, R.D., Tavares, L.M., Fairbairn, E.D.M.R., 2009. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. *Cem. Concr. Res.* 39, 110e115.
- [9]. Crosthwaite, D., 2000. The global construction market: a cross-sectional analysis. *Constr. Manag. Econ.* 18, 619e627.
- [10]. Crouch, L., Hewitt, R., Byard, B., 2007. High Volume Fly Ash Concrete. *World Coal Ash (WOCA)*, North Kentucky, USA.
- [11]. Damtoft, J.S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D., Gartner, E.M., 2008. Sustainable development and climate change initiatives. *Cem. Concr. Res.* 38, 115e127.
- [12]. De Schepper, M., Van den Heede, P., Van Driessche, I., De Belie, N., 2014. Life cycle assessment of completely recyclable concrete. *Materials (Basel)* 7, 6010e6027.
- [13]. Díaz-Balteiro, L., Romero, C., 2004. In search of a natural systems sustainability index. *Ecol. Econ.* 49, 401e405.
- [14]. Dosho, Y., 2007. Development of a sustainable concrete waste recycling system: application of recycled aggregate concrete produced by aggregate replacing method. *J. Adv. Concr. Technol.* 5, 27e42.
- [15]. EPA Science Advisory Board, 2000. *Toward Integrated Environmental Decisionmaking*. Washington, DC, United States. EPA-SAB-EC-00-011. Rajamma, R., Ball, R.J., Tarelho, L.A.C., Allen, G.C., Labrincha, J.A., Ferreira,

- V.M., 2009. Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. *J. Hazard. Mater.* 172, 1049e1060.
- [16]. Sata, V., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., 2007. Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete. *Constr. Build. Mater.* 21, 1589e1598.
- [17]. Wang, S., Miller, A., Llamazos, E., Fonseca, F., Baxter, L., 2008. Biomass fly ash in concrete: mixture proportioning and mechanical properties. *Fuel* 87, 365e371.
- [18]. Calle, M. S., “Energía de la Biomasa. Energías renovables”, <http://waste.ideal.es/biomasa.htm> (2010)
- [19]. Romero, V., V congreso Nacional de Firmes de carretera, 2000.
- [20]. Fernández, M.J., Carrasco, J.E., *Fuel* 84 (2005) 1893-1900.
- [21]. Hidalgo, A., Alonso, M.C., García Calvo, J.L., Fernández Luco, L., *Tecnoambiente*, 185, (2008) 11-13 [5] Rajamma, R., Ball, R.J., Tarelho, L. A.C., Allen, G., Labrincha, J.A., Ferreira, V., *J. of Hazardous Mat* 172 (2009)1049-1060.
- [22]. Calvo, A. Hidalgo, M.C. Alonso, M.P. Luxán1, L. J.L. García. “CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS PROCEDENTES DE LOS PROCESOS DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA. VIABILIDAD DE USO COMO MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN”. XI CONGRESO NACIONAL DE MATERIALES
- [23]. Demirbas A. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Prog Energ Combust* 2005;31:171–92.
- [24]. Filipponi P, Poletti A, Pomi R, Sirini P. Physical and mechanical properties of cement-based products containing incineration bottom ash. *Waste Manage* 2003;23:145–56.
- [25]. Ahmaruzzaman M. A review on the utilization of fly ash. *Prog Energ Combust* 2010;36(3):327–63.
- [26]. James AK, Thring RW, Helle S, Ghuman HS. Ash management review. Applications of biomass bottom ash. *Energies* 2012;5:3856–73.
- [27]. Van Loo S, Koppejan J. *The Handbook of biomass combustion and co-firing*. Earthscan, in association with the International Institute for Environment and Development. USA, 2008.
- [28]. Rajamma R et al. Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. *J Hazard Mater* 2009;172:1049–60.
- [29]. Olmeda J, Sánchez de Rojas MI, Frías M, Donatello S, Cheeseman CR. Effect of petroleum (pet) coke addition on the density and thermal conductivity of cement pastes and mortars. *Fuel* 2013;107:138–46.
- [30]. Maschio S, Tonello G, Piani L, Furlani E. Fly and bottom ashes from biomass combustion as cement replacing components in mortars production: rheological behaviour of the pastes and materials compression strength. *Chemosphere* 2011;85:666–71.
- [31]. Qiao XC, Tyrer M, Poon CS, Cheeseman CR. Novel cementitious materials produced from incinerator bottom ash. *Resour Conserv Recy* 2008;52:496–510.

- [32]. Li XG, Lv Y, Ma BG, Chen QB, Yin XB, Jian SW. Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash in blended cement. *J Clean Prod* 2012;32:96–100.
- [33]. Watcharapong W, Pailyn T, Kedsarin P, Arnon C. Compressive strength, flexural strength and thermal conductivity of autoclaved concrete block made using bottom ash as cement replacement materials. *Mater Des* 2012;36:655–62.
- [34]. Genazzini C, Giaccio G, Ronco A, Zerbino R. Cement-based materials as containment systems for ash from hospital waste incineration. *Waste Manage* 2005;25:649–54.
- [35]. Elahi A, Khan QUZ, Barbhuiya SA, Basheer PAM, Russell MI. Hydration characteristics of cement paste containing supplementary cementitious materials. *Arab J Sci Eng* 2012;37:535.
- [36]. Vassilev VS, Baxter D, Andersen KL, Vassileva KG. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges. *Fuel* 2013;105:19–39.
- [37]. Nogales R, Delgado G, Quirantes M, Romero M, Romero E, Molina-Alcaide E. Fertilizer characterization of olive waste ashes. In: *Recycling of biomass ashes book*. Springer book 5:57–68. Berlín: Springer-Verlag; 2011.