

Influencia de la naturaleza y granulometría de los áridos en el comportamiento reológico de morteros de cementos activados alcalinamente

Gismera S.⁽¹⁾, Alonso M.M.⁽¹⁾ y Puertas F.⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC), Madrid, España.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.6002>

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es profundizar en el conocimiento del comportamiento reológico de morteros de cementos activados alcalinamente (*Alkali-Activated Materials*, AAMs), determinando el efecto del diámetro máximo del árido y su naturaleza (silíceo, calizo y árido reciclado). Morteros de OPC se utilizan de referencia. Se realizaron ensayos de fluidez y de *Stress Growth Test*; también se determinaron los parámetros reológicos por el ensayo de curva de flujo. Los morteros de AAMs son más sensible que los de OPC a la variación del diámetro máximo de los áridos; aunque no se han observado diferentes comportamientos asociados a la naturaleza del mismo. Se ha demostrado que todos los morteros se ajustan al modelo reológico de Bingham, independientemente del diámetro máximo de los áridos y de la naturaleza de los mismos.

PALABRAS CLAVE: comportamiento reológico, diámetro máximo de árido, morteros, geopolímeros, áridos reciclados.

1.- INTRODUCCIÓN

Son muchos los estudios realizados sobre los factores que afectan a la reología y trabajabilidad de los morteros de cemento portland (OPC), entre ellos destacan: el contenido de agua, la relación árido/ligante, el tamaño, la forma y naturaleza del árido, la adición de aditivos, etc. Banfill [1] observó que al aumentar el contenido de agua, manteniendo constantes las proporciones de los otros constituyentes, disminuía el esfuerzo umbral de cizalla y la viscosidad. Por otra parte, la disminución del tamaño máximo del árido requiere aumentar el contenido de agua en la mezcla, y además, el aumento de la finura del árido, generalmente, conduce a incrementos en esfuerzo umbral de cizalla y en la viscosidad [2-4]. Los morteros con árido triturado presentan un mayor esfuerzo umbral de cizalla y una mayor viscosidad plástica que los morteros con áridos con morfologías redondeadas [4]. La reutilización de árido procedente de residuos de construcción supone un paso más para la eco-eficiencia y su influencia en el comportamiento mecánico y

reológico en morteros ha sido estudiado por diferentes autores [5-7], demostrando que tiene un efecto negativo en las resistencias mecánicas aunque se sigue manteniendo un comportamiento reológico ajustado a Bingham.

Por el contrario, es muy escasa la investigación relativa al comportamiento reológico de morteros de cementos activados alcalinamente (*Alkali-Activated Materials*, AAMs) o geopolímeros. En trabajos previos se ha determinado que la naturaleza y la concentración del activador alcalino modifican el comportamiento reológico de pastas y morteros de escorias activadas alcalinamente (*Alkali-Activated Slag*, AAS) y cenizas volantes activadas alcalinamente (*Alkali-Activated Fly Ash*, AAFA) [8-10]. Recientemente, se ha demostrado que la trabajabilidad de los morteros AAMs es más sensible a los cambios en la relación líquido/sólido que los morteros de OPC [11].

El objetivo de este trabajo es profundizar en el conocimiento del comportamiento reológico de morteros de cementos activados alcalinamente (*Alkali-Activated Materials*, AAMs), determinando el efecto del diámetro máximo del árido y su naturaleza (silíceo, calizo y árido reciclado).

2.- EXPERIMENTAL

2.1.- Materiales

En la Tabla 1 se muestra la composición química de los materiales utilizados en este estudio. La escoria vítrea de alto horno (BFS) tiene un elevado contenido en fase vítrea (99% en peso), mientras que el contenido en fase vítrea de la ceniza volante (FA) constituye el 87,75 % de la muestra. La composición mineralógica cuantitativa de los áridos determinada por DRX a través del análisis por Rietveld, muestra que el árido silíceo contiene un 98,3% de cuarzo y 1,7% de microclina. El árido calizo presenta un 100% de dolomita mientras que el árido reciclado está compuesto por 79,9% de dolomita, 16,1% de calcita, 2,7% de cuarzo y 1,3% de moscovita.

Tabla 1. Composición química (wt%) de la escoria (BFS), ceniza volante (FA), cemento (OPC), árido silíceo (S), árido calizo (C) y árido reciclado (R).

wt%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	P.F.
OPC	21,69	5,88	2,55	0,03	1,56	59,01	4,15	0,79	1,24	0,13	0,12	2,75
BFS	38,73	11,23	1,09	0,27	8,57	38,56	1,02	0,56	0,47	0,40	0,06	-1,00
FA	44,65	24,50	6,85	0,09	1,88	3,88	1,73	0,75	3,10	1,04	0,49	10,72
S	96,80	1,51	0,43	-	-	0,10	-	-	0,55	-	-	0,61
C	0,49	-	0,09	0,01	22,50	30,93	0,02	-	-	-	-	45,96
R	6,10	1,70	0,70	-	16,70	31,10	0,70	-	0,30	0,09	-	42,60

La superficie específica Blaine y la distribución de tamaños de partícula del 10, 50 y 90% (en volumen) de los conglomerantes se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Distribución de tamaño de partícula y finura Blaine del cemento (OPC), escoria (BFS) y ceniza volante (FA).

	<i>d10(10% de la muestra con tamaño inferior, μm)</i>	<i>d50(50% de la muestra con tamaño inferior, μm)</i>	<i>d90(90% de la muestra con tamaño inferior, μm)</i>	<i>Blaine (m^2/Kg)</i>
OPC	1,71	10,91	33,62	420
BFS	1,60	10,42	29,81	346
FA	1,53	8,38	35,34	422

Se prepararon morteros con diferente diámetro máximo de árido (Dmax 2 mm, Dmax 1 mm y Dmax 0,5 mm) partiendo del árido silíceo de referencia. Para estudiar el efecto de la naturaleza del árido en el comportamiento reológico de morteros AAMs se prepararon morteros con áridos de diferente naturaleza (silíceo, calizo y árido reciclado) pero con la misma granulometría (Dmax 2 mm). La distribución del tamaño de partícula de los áridos mediante tamizado diferencial se muestra en la Tabla 3. De acuerdo a la norma europea EN 1097-6: 2001/A1:2006 se determinaron los valores de humedad, adsorción de agua y densidad de los áridos empleados en la preparación de los morteros obteniéndose los valores que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 3. Distribución del tamaño de partícula del árido silíceo (S), calizo (C) y reciclado (R).

Tamiz (mm)	Masa retenida (%)				
	S		C		
	<i>Dmax 2mm</i>	<i>Dmax 1mm</i>	<i>Dmax 0.5mm</i>	<i>Dmax 2mm</i>	<i>Dmax 2mm</i>
1	33,47	-	-	33,47	33,47
0,5	32,64	49,14	-	32,64	32,64
0,212	13,17	19,79	38,86	13,17	13,17
0,125	15,48	23,27	45,68	15,48	15,48
0,063	4,27	6,40	12,66	4,27	4,27
0,045	0,97	1,40	2,80	0,97	0,97

2.2.- Preparación de los morteros

Se elaboraron morteros con una relación árido/ligante 2:1 según la norma EN-196-1. Los morteros de cemento Portland (OPC) se prepararon con agua desionizada, mientras que los morteros de AAMs se prepararon a partir de la activación alcalina de la escoria vítrea de horno alto y de la ceniza volante. La disolución empleada para la activación de los morteros de escorias (AASWG) fue una disolución de silicato sódico hidratado (waterglass) con un contenido del 4 %wt Na_2O y una relación $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de 1,5. Para la activación de las cenizas volantes (AAFA10M) se utilizó una disolución de NaOH de concentración 10 M. Las características químicas y físicas de las disoluciones utilizadas se corresponden con

las observadas en trabajos previos [11], siendo las densidades de las disoluciones activadoras de las escorias y de las cenizas 1,27 y 1,35 g/cm³, respectivamente.

Tabla 4. Humedad, absorción de agua y densidad de las fracciones de áridos utilizados.

<i>Árido</i>	<i>Fracción granulométrica ensayada (mm)</i>	<i>Humedad (%)</i>	<i>Absorción de agua (%)</i>	<i>Densidad (g/ml)</i>
S	2/0,045	0,07	0,08	2,64
	1/0,045	0,07	0,08	2,63
	0,5/0,045	0,07	0,09	2,59
C	2/0,045	0,02	0,13	2,87
R	2/0,045	0,05	4,81	2,71

2.3.- Ensayos realizados

2.3.1.- Determinación de la relación líquido/sólido de los morteros

A través de la norma EN 1015-3 [12] se determina la relación líquido/sólido (L/S) necesaria para que cada uno de los morteros ensayados presenten una consistencia plástica (diámetro de la torta entre 140-200 mm) conforme a la norma EN-1015-6 [13].

2.3.2.- Stress Growth Test (SGT)

Se ha utilizado un reómetro de morteros VISKOMAT NT con un rotor de aspas. El test consiste en someter a los morteros a una velocidad de giro de 1,5 rpm (0,025 rev/s) para determinar el esfuerzo umbral de cizalla estático ($\tau_{\text{estático}}$) del material, es decir, la energía mínima que hay que aplicar para que el material empiece a fluir [11].

2.3.3.- Determinación de los parámetros reológicos: esfuerzo umbral de cizalla dinámico y la viscosidad plástica.

Los mismos morteros ensayados mediante SGT se sometieron cuatro minutos después al ensayo de curva de flujo (FCT) en mismo reómetro Viskomat NT. El test consiste en aplicar a una precizalla de 30 rpm (0,5 rev/s) mantenido durante 25 segundos, seguido de una bajada de velocidad en escalones con un descenso de 4,5 rpm por escalón durante 10 segundos [11]. En cada escalón se toma un valor medio del torque frente a velocidad de giro y se ajusta al modelo reológico correspondiente, determinándose los valores que pueden relacionarse con el esfuerzo umbral de cizalla dinámico ($\tau_{\text{dinámico}}$) y la viscosidad plástica.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.- Efecto del diámetro máximo de los áridos en la demanda de líquido y el comportamiento reológico de los morteros de OPC y AAMs

En la Tabla 5 se muestran los valores del diámetro de la torta o *slump* obtenidos para los morteros de OPC, AASWG y AAFA10M con los diferentes diámetros máximos de árido y la relación L/S necesaria para que todos los morteros presenten consistencia plástica (150 ± 10 mm). El análisis de dicha tabla muestra que cuánto menor es el diámetro máximo del árido utilizado, mayor es la cantidad de líquido que se necesita para obtener una consistencia plástica y por tanto, mayor es la relación L/S. Este efecto también fue observado por Celik y Marar [14] y se atribuye al aumento de la superficie específica del árido. Los morteros de OPC demandan la menor relación L/S, independientemente de diámetro máximo de partícula utilizado, comparado con los morteros de AAMs. Además, al disminuir el diámetro máximo de partícula del árido de 2 mm a 0,5 mm el incremento de la relación L/S es de 10,3 % mientras que para los morteros de AASWG y de AAFA10M este incremento es de 13,8 y 15,5 %, respectivamente. Estos resultados parecen mostrar que los morteros de AAMs son más sensibles a la variación del tamaño del árido que los morteros de OPC. Alonso et al. [11] concluyeron que la trabajabilidad de los morteros de AAS y AAFA es más sensible que los morteros OPC a los cambios en la relación L/S y la cantidad de árido. Los morteros AAFA10M demandan más líquido para alcanzar la consistencia plástica debido a la alta superficie específica de la ceniza volante (ver Tabla 2) y a la elevada viscosidad de la disolución activadora empleada, siendo esta $11 \cdot 10^3$ Pa.s. [15].

En la Fig. 1 a) b) y c) se han representado los valores de torque obtenidos en el ensayo de curva de flujo (FCT) para los morteros con árido silíceo con diferente diámetro máximo de árido. El análisis de los resultados obtenidos permite confirmar que el comportamiento reológico de todos los morteros ensayados (tanto los de los OPC como los de AAMs) se ajustan al modelo de Bingham (Ec. 1), independientemente del diámetro máximo de partícula del árido.

$$T = g + hN \quad T = \text{Torque (N.mm)} \quad (\text{Ec. 1})$$

$g =$ variable asociada con esfuerzo umbral de cizalla dinámico ($\tau_{\text{dinámico}}$) (N.mm)
 $h =$ variable asociada con la viscosidad plastic (N.mm.min)

Tabla 5. Valores de la relación L/S y *slump* para los morteros 2:1 de OPC, AASWG y AAFA10M con árido silíceo de diferente diámetro máximo de árido.

<i>D</i> _{max} (mm)	OPC		AASWG		AAFA10M	
	L/S	<i>Slump</i> (mm)	L/S	<i>Slump</i> (mm)	L/S	<i>Slump</i> (mm)
2	0,52	150	0,56	151	0,60	151
1	0,53	152	0,57	155	0,62	149
0,5	0,58	150	0,65	157	0,71	151

En la Tabla 6 se muestran los valores del esfuerzo umbral de cizalla estático ($\tau_{\text{estático}}$), esfuerzo umbral de cizalla dinámico ($\tau_{\text{dinámico}}$) y la viscosidad plástica (h) obtenidos tras los ensayos realizados sobre los morteros con diferente tamaño de partícula del árido silíceo. En primer lugar hay que señalar que los morteros de OPC siempre presentan un mayor valor de $\tau_{\text{estático}}$ y $\tau_{\text{dinámico}}$ que los morteros activados alcalinamente; es decir, los morteros AAMs exhiben menor resistencia a fluir que los morteros OPC. Estos resultados ya habían sido observados por los autores en estudios previos [11]. Además, al disminuir el diámetro máximo del árido, en todos los casos, aumenta tanto el valor de $\tau_{\text{estático}}$ como el valor de $\tau_{\text{dinámico}}$ (Tabla 6). Esto es debido a que, al disminuir el tamaño de los áridos, aumenta el área superficial y aumentan las fricciones entre las partículas [1, 3, 4].

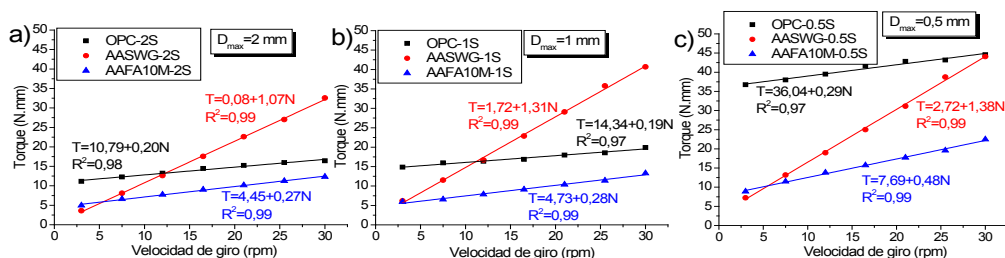


Figura 1. Ensayo de curva de flujo de los morteros de OPC, AASWG y AAFA10M con el ajuste lineal correspondiente ($T = \tau_{\text{dinámico}} + hN$) a) Morteros con D_{max} 2mm b) Morteros con D_{max} 1mm c) Morteros con D_{max} 0.5mm

Tabla 6. Valores de $\tau_{\text{estático}}$, $\tau_{\text{dinámico}}$ y h para los morteros de OPC, AASWG y AAFA10M con árido silíceo de diferente diámetro y naturaleza (Sombreado azul)

Morteros	Árido silíceo			Árido calizo	Árido reciclado	
	2 mm	1 mm	0.5 mm	2 mm	2 mm	
OPC	$\tau_{\text{estático}}$ (N.mm)	13,30	13,55	37,42	15,83	24,93
	$\tau_{\text{dinámico}}$ (N.mm)	10,79	14,34	36,04	12,26	12,39
	h (N.mm.min)	0,20	0,19	0,29	0,20	0,18
AASWG	$\tau_{\text{estático}}$ (N.mm)	3,15	5,57	17,01	6,93	8,40
	$\tau_{\text{dinámico}}$ (N.mm)	0,08	1,72	2,72	0,20	0,89
	h (N.mm.min)	1,07	1,31	1,38	2,29	1,73
AAFA10M	$\tau_{\text{estático}}$ (N.mm)	5,65	6,42	11,47	11,81	14,08
	$\tau_{\text{dinámico}}$ (N.mm)	4,45	4,73	7,69	10,53	10,51
	h (N.mm.min)	0,27	0,28	0,48	0,52	0,32

El análisis de los resultados mostrados en la Tabla 6 indica que los menores valores de $\tau_{\text{estático}}$ y $\tau_{\text{dinámico}}$ se observan en los morteros AASWG, lo cual podría ser debido al efecto fluidificante del waterglass. Sin embargo, también se observa que al disminuir el diámetro máximo de los áridos de D_{max} 2 mm a 0,5 mm, los valores de $\tau_{\text{estático}}$ y $\tau_{\text{dinámico}}$ de estos morteros de AASWG experimentan los mayores porcentajes de incremento; indicando que

son estos morteros los más susceptibles a la modificación de su fluidez, cuando cambia la diámetro máximo de los áridos.

Por el contrario la viscosidad plástica (h) de todos los morteros analizados no se ve especialmente afectada con las variaciones del diámetro de las partículas de árido. Independientemente del tamaño máximo de partícula de árido, los morteros de OPC presenta siempre el menor valor de h , mientras que los morteros AASWG presentan los mayores valor de h , lo que puede deberse a la formación de aglomerados.

3.2.- Efecto de la naturaleza del árido en la reología de morteros de OPC y AAMs

En la Tabla 7 se muestran los valores de L/S obtenidos en cada mortero para alcanzar una consistencia plástica. Los resultados muestran que independientemente si el árido es silíceo o calizo no se observa un cambio importante en la demanda de líquido. Por el contrario cuando se utiliza árido reciclado de hormigón, la relación L/S necesaria para que los morteros presenten consistencia plástica es mucho más elevada, debido a la gran absorción de agua del árido reciclado.

Tabla 7. Valores de la relación L/S y *slump* para los morteros de OPC, AASWG y AAFA10M variando la naturaleza del árido: silíceo (S), calizo (C) y reciclado (R).

Árido	OPC		AASWG		AAFA10M	
	L/S	Slump (mm)	L/S	Slump (mm)	L/S	Slump (mm)
S	0,52	150	0,56	151	0,60	151
C	0,52	148	0,57	155	0,60	148
R	0,75	155	0,76	155	0,81	147

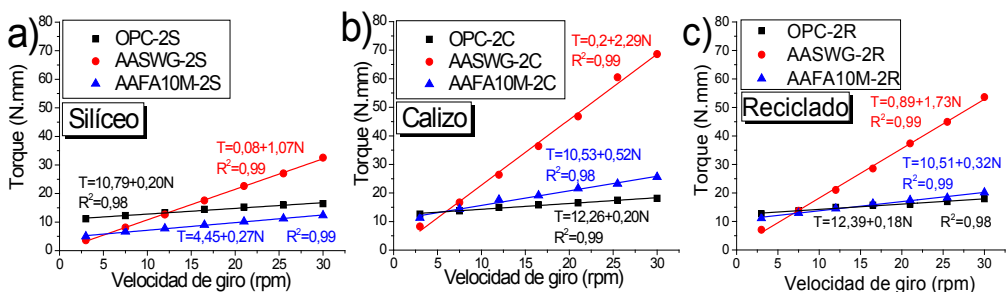


Figura 2. Ensayo de curva de flujo de los morteros de OPC, AASWG y AAFA10M con el ajuste lineal correspondiente ($T = \tau_{dinámico} + hN$) a) Morteros con árido silíceo b) Morteros con árido calizo c) Morteros con árido reciclado.

En la Fig. 2 a) b) y c) se han representado los valores de torque obtenidos en el ensayo de curva de flujo (FCT) para los morteros con árido silíceo, árido calizo y árido reciclado, respectivamente. El comportamiento reológico de todos los morteros ensayados se ajusta al modelo de Bingham independientemente de la naturaleza del árido.

La Tabla 6 (sombreado azul) muestra los valores del esfuerzo umbral de cizalla estático ($\tau_{\text{estático}}$), esfuerzo umbral de cizalla dinámico ($\tau_{\text{dinámico}}$) y la viscosidad plástica (h) para los morteros con diferente naturaleza del árido, pero con el mismo diámetro máximo de 2 mm. Los morteros con árido calizo presentan los valores $\tau_{\text{estático}}$ y $\tau_{\text{dinámico}}$, así como la viscosidad plástica mayores que los obtenidos en los morteros con árido silíceo. Esto puede estar asociado a la forma y textura de las partículas de los áridos; en términos generales las partículas de árido calizo son más angulares que las de árido silíceo. En este sentido, Hafid et al. [16], quienes concluyeron que cuánto más esféricas eran las partículas, mayor era su empaquetamiento y menor el esfuerzo umbral de cizalla y viscosidad plástica inducidos. Este efecto se observan tanto en los morteros de OPC como en los de AAMs.

Los morteros con árido reciclado presentan los valores más elevados de $\tau_{\text{estático}}$ de todos los morteros analizados. Esto se manifiesta en todos los morteros de OPC y AAMS, indicando que la presencia de este árido afecta negativamente a la fluidez de los mismos.

4.- CONCLUSIONES

A partir el estudio realizado se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- a) En relación con el diámetro máximo del árido:
 - a. En los morteros de OPC y AAMs, cuánto menor es el diámetro máximo del árido utilizado, mayor es la cantidad de líquido que se necesita para obtener una consistencia plástica y por tanto, mayor es la relación L/S. Los morteros de OPC demandan una menor relación L/S, independientemente de diámetro máximo de partícula utilizado, comparado con los morteros de AAMs; siendo estos más sensibles a la variación del diámetro máximo del árido que los morteros de OPC.
 - b. Los morteros de OPC siempre presentan valores mayores de $\tau_{\text{estático}}$ y $\tau_{\text{dinámico}}$ que los morteros activados alcalinamente; lo que significa que los morteros AAMs exhiben menor resistencia a fluir que los morteros OPC.
 - c. Los morteros de AASWG tienen los menores valores de $\tau_{\text{estático}}$ y $\tau_{\text{dinámico}}$, lo cual podría ser debido al efecto fluidificante del waterglass. Sin embargo, también se observa que al disminuir el diámetro máximo de los áridos de $D_{\text{max}} 2 \text{ mm}$ a $0,5 \text{ mm}$, los valores de $\tau_{\text{estático}}$ y $\tau_{\text{dinámico}}$ de estos morteros de AASWG experimentan los mayores porcentajes de incremento, indicando que son los más susceptibles a la modificación de su fluidez, cuando cambia la granulometría de los áridos.
- b) En relación con la naturaleza de los áridos:
 - a. En los morteros de OPC y AAMs, independientemente si el árido es silíceo o calizo no se observa un cambio importante en la demanda de líquido. Por el contrario cuando se utiliza árido reciclado de hormigón, la relación L/S necesaria para que los morteros presenten consistencia plástica es mucho más elevada, debido a la gran absorción de agua del árido reciclado.

- b. Los morteros con árido calizo presentan los valores $\tau_{\text{estático}}$ y $\tau_{\text{dinámico}}$, así como la viscosidad plástica mayores que los obtenidos en los morteros con árido silíceo. Este efecto se observan tanto en los morteros de OPC como en los de AAMs. Los morteros con árido reciclado presentan los valores más elevados de $\tau_{\text{estático}}$. Esto se manifiesta en todos los morteros de OPC y AAMS, indicando que la presencia de este árido afecta negativamente a la fluidez de los mismos.

Finalmente, indicar que todos los morteros analizados se ajustan al modelo reológico de Bingham, diámetro máximo de partícula de los áridos y de la naturaleza de los mismos.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por el Ministerio de Economía (MINECO) bajo el Proyecto del plan Nacional BIA2013-47876-C2-1-P. Los autores desean agradecer a A. Gil, F. Morales y P. Rivilla por su ayuda con realización de las pruebas.

REFERENCIAS

- [1] Banfill, P.F.G., 'Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials', *Construct. Build. Mater.* **8** (1994) 43–50.
- [2] Jamkar, S. S. and Rao, C. B. K., 'Index of aggregate particle shape and texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning', *Cement and Concrete Research.* **34** (11) (2004) 2021-2027.
- [3] Bager, D. H., Mette, R., and Rune, M. J., 'Rheology of self-compacting mortars - Influence of particle grading', *Nordic Concrete Research.* **26** (2004).
- [4] Westerholm, M., Lagerblad, B., and Forssberg, E., 'Rheological properties of micromortars containing fines from manufactured aggregates', *Materials and Structures* **40** (2007) 615–625.
- [5] Lopes Lima, P., Dias Toledo, R., and Gomes, O., 'Influence of Recycled Aggregate on the Rheological Behavior of Cement Mortar', *Key Engineering Materials.* **600** (2014) 297-307.
- [6] Corinaldesi, V., and Moriconi, G., 'Behaviour of cementitious mortars containing different kindsof recycled aggregate', *Construction and Building Materials.* **23** (2009) 289–294.
- [7] Alonso, M.M., Palacios, M., Puertas, F., de la Torre, A.G., and Aranda, M.A.G., 'Effect of polycarboxylate admixture structure on cement paste rheology' *Mater. Construcc.* **57** (225) (2007) 65-81.

Influencia de la naturaleza y granulometría de los áridos en el comportamiento reológico...

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

- [8] Puertas, F., Varga, C., and Alonso, M.M., 'Rheology of alkali-activated slag pastes. Effect of the nature and concentration of the activating solution', *Cement and Concrete Composites*. **53** (2014) 279-288.
- [9] Palacios, M., 'Empleo de aditivos orgánicos en la mejora de las propiedades de cementos y morteros de escoria activada alcalinamente' PhD Tesis UAM Madrid (2006)
- [10] Kashani, A., San Nicolas, R., Qiao, G.G., Van Deventer, J.S.J., and Provis, J.L. 'Modelling the yield stress of ternary cement–slag–fly ash pastes based on particle size distribution Powder', *Technology* **266** (2014) 203–209.
- [11] Alonso, M.M., Gismera, S., Blanco, M.T., Lanzón M., and Puertas, F. 'Alkali-activated mortars: Workability and rheological behaviour' *Construction and Building Materials* **145** (2017) 576–587.
- [12] EN-1015-3: 2000., 'Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table) '
- [13] EN 1015-6:1999/A1:2007, 'Methods of test for mortar for masonry - Part6: Determination of bulk density of fresh mortar'.
- [14] Celik T, Marar K 'Effects of crushed stone dust on some properties of concrete' *Cement and Concrete Research* **26** (7) (1996) 1121–1130
- [15] Varga C., 'Cementos activados alcalinamente. comportamiento reológico y durable en medio ácido', PhD Tesis UNED-Madrid (2015).
- [16] Hafid, H., Ovarlez, G., Toussaint, F., Jezequel, P.H., 'Roussel, N. Effect of particle morphological parameters on sand grains packing properties and rheology of model mortars', *Cement and Concrete Research* **80** (2016) 44–51.