

EFECTO DE PUZOLANAS NATURALES SOBRE LA REOLOLOGÍA DE PASTAS DE CEMENTO PORTLAND

Viviana F. Rahhal¹, César Pedrajas², Fabián Irassar¹ y Rafael Talero²

RESUMEN

En este trabajo se analizó la influencia de tres puzolanas naturales españolas de distinto carácter químico, incorporadas a dos cementos portland de composición mineralógica diferente (alto C₃A y bajo C₃S y viceversa), con distintos porcentajes de reemplazo. Todas las determinaciones se realizaron a una temperatura de 25°C y en el momento correspondiente al período latente de su hidratación. Los resultados mostraron una mayor tensión de corte en cemento de bajo C₃A y alto C₃S; sin embargo una mayor recuperación de dicha tensión en el cemento de alto C₃A y bajo C₃S. En las mezclas, la tensión de corte aumentó con el aumento de la proporción de alúmina reactiva, para un determinado porcentaje de reemplazo, con ambos cementos. En el momento de detención del rotor, el aumento de la tensión fue mayor para las mezclas con el cemento de alto C₃A. Con el aumento del porcentaje de reemplazo, la tensión de corte aumentó con las puzolanas A y C; mientras que, con la puzolana O disminuyó debido posiblemente a su baja adsorción.

Palabras clave: reología, pastas de cemento, puzolanas naturales.

ABSTRACT

In this paper the influence of three spanish natural pozzolans of different chemical character were analyzed on two portland cements with very different mineralogical composition (with opposite C₃A and C₃S content) and with different replacement percentages. All determinations were made at 25°C and just at the dormant periods of their hydration. The results showed that the cement with low C₃A and high C₃S, had higher shear stress than the cement with high C₃A and low C₃S; but its recovery was lower. In the pastes with natural pozzolans, the shear stress increased when the proportion of reactive alumina was higher for a particular replacement percentage. At the time the rotor stopped, the shear stress increase was more significant in the case of cement mixtures with high C₃A. Finally as the shear stress increased, with higher percentage replacement for the pozzolans A and C; while for the pozzolan O it decreased, possibly due to its low adsorption.

Keywords: reology, cement pastes, natural pozzolans.

RESUMO

Neste trabalho foi analisada a influência de três pozolanas naturais espanholas de diferente carácter químico, agregada a dois cimentos portland de diferente composição mineralógica (alto - baixo C₃A e C₃S e vice-versa) com diferentes porcentagens de substituição. Todas as determinações foram realizadas a uma temperatura de 25°C e a um tempo correspondente ao período de latência de hidratação. Os resultados mostraram o aumento da tensão de cisalhamento no cimento de alto C₃A e baixo C₃S, mas maior recuperação da tensão no cimento de baixo C₃A e alto C₃S. Nas misturas com as pozolanas naturais, a tensão de cisalhamento aumentou com o aumento da proporção de alumina reactiva para uma percentagem de substituição particular, com qualquer cimento. No momento de paragem do rotor, a tensão de cisalhamento aumentou mais no caso das misturas com cimento de alto C₃A. Com aumento da substituição, a tensão de cisalhamento aumentou nas misturas com as pozolanas A e C; mas com a pozolana O diminuiu, possivelmente devido à sua baixa adsorção.

Palavras-chave: reologia, pastas de cimento, pozolanas naturais.

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería Civil Facultad de Ingeniería UNCPBA. Av. del Valle 5737 (B7400JWI) Olavarría - Argentina.

E-mail: lem@fio.unicen.edu.ar

⁽²⁾ Instituto Eduardo Torroja. CSIC Serrano Galvache 6 (28033) Madrid – España.

E-mail: cpedrajas@ietcc.csic.es, rtalero@ietcc.csic.es

INTRODUCCIÓN

Desde el momento en cual el cemento se pone en contacto con el agua, comienzan las reacciones de hidratación cuyo seguimiento se puede hacer a través de la curva de liberación de calor en función del tiempo. En dicha curva de liberación de calor se distingue el período latente o durmiente, que es el tiempo previo al comienzo del fraguado y endurecimiento de las pastas, morteros o concretos. Después de iniciado el fraguado, es aconsejable mantener las mezclas en reposo para que se completen sus fraguados y comiencen a desarrollarse sus capacidades resistentes (Mindess, S. Young, J.F. 1981). Algunos estudios analizan dicho período a través de la velocidad de contracción química (Sant, G. et al; 2008). Los ensayos de calorimetría se utilizan para analizar el tipo de cementos, su composición, finura, temperatura de hidratación, la influencia de las adiciones minerales activas que se incorporan, su porcentaje, finura, reactividad, carácter químico (Rahhal, V. 2002).

La incorporación de adiciones minerales afecta en mayor o menor medida (en función de tipo de adición, del tipo de cemento y del nivel de reemplazo), la extensión del período latente y también las propiedades físicas de la pasta resultante. Dentro de estas propiedades se encuentra la fluidez de la pasta, muy importante para las operaciones antes mencionadas. Dicha fluidez puede ser evaluada, entre otros, a través del ensayo de reometría (Criado Sanz, M. et al; 2006), en el que se obtiene la resistencia al corte de las pastas en función de las velocidades rotacionales que se le imprimen a las mismas. Dicha resistencia al corte además, será en función del tipo de cemento, del tipo de adición mineral y del porcentaje de reemplazo; como también de la temperatura, de la relación agua cemento, y de los ciclos de aceleración/desaceleración que se le impriman en el ensayo. La diferente forma de los ciclos (rampas de aceleración/desaceleración intercaladas con mesetas a velocidad constante), da origen a diferentes respuestas de las pastas al ser sometidas al ensayo de reometría (Rahhal, V. et al; 2010).

Con el objetivo de cubrir los aspectos económicos, ecológicos y principalmente tecnológicos, se le incorporan puzolanas naturales a los cementos portland, cuya presencia produce influencias tanto en el estado fresco, como en el estado endurecido de las pastas, morteros o concretos que las contengan. Dichas influencias provienen tanto de la morfología de sus partículas, como de su constitución química. En general contienen una fase vítreo reactiva constituida principalmente por alúmina y sílice reactiva, que da origen a su carácter químico, que las hace aptas para desempeñarse mejor o peor frente a diferentes medios agresivos (Talero Morales, R., 1986). Las puzolanas de carácter alumínico se desempeñan mejor frente al ataque de los cloruros; mientras que las de carácter silílico se desempeñan mejor frente al ataque e los sulfatos.

Este trabajo se desarrolló con el objetivo de conocer la influencia de tres puzolanas naturales españolas (de diferentes caracteres químicos: silílico-férreo-alumínica, silílico-alumínica y alumínico-silíctica) sobre el comportamiento reológico de pastas elaboradas con cementos portland, de diferente composición mineralógica (con elevado C₃A y bajo C₃S y con bajo C₃A y elevado C₃S), dentro del período latente de la hidratación.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

Los materiales empleados han sido dos cementos portland de muy diferente composición mineralógica, cuya composición, densidad y superficie específica (Norma EN 196-2, 2006), se presentan en la Tabla 1; tres puzolanas naturales de diferente carácter químico: *silílico-férreo- alumínica* (*O*, de Olot), *silílico-alumínica* (*A*, de Almagro) y *alumínico-silíctica* (*C*, de Canarias), cuyas principales características se presentan en la Tabla 2; y como agua de mezclado en todos los casos, se utilizó agua destilada.

Tabla 1: Características de los cementos.

Materiales	Cementos portland	
	CP1	CP2
Parámetros		
C ₃ S, %	51	79
C ₂ S, %	16	2
C ₃ A, %	14	0
C ₄ AF, %	5	10
Álcalis eq., %	1.5	0.4
Densidad	3.08	3.21
SEB, m ² /kg	319	301

Tabla 2: Características de las adiciones.

Materiales	Adiciones minerales		
	O	A	C
SiO ₂ (reactiva), %	40.7	37.7	38.8
Al ₂ O ₃ (reactiva), %	5.5	8.0	11.5
Fe ₂ O ₃ , %	13.82	12.05	3.12
Álcalis eq., %	4.46	1.53	9.04
Densidad	3.08	2.41	2.68
SEB, m ² /kg	404	403	402
Adsorción a 1 día, %	1.08	7.81	8.87

La diferencia en la composición mineralógica de los cementos portland, en parte se refleja en sus distintas densidades; en cuanto a sus finuras son comparables. La diferencia en el carácter químico de las puzolanas naturales se aprecia claramente por sus contenidos relativos de sílice reactiva y alúmina reactiva; además se incluye la adsorción de humedad de las puzolanas teniendo la O la menor adsorción, este parámetro cobra importancia en la demanda de agua para la pasta de consistencia normal (Tabla 3).

Los reemplazos que se utilizaron fueron 20 y 40%, en peso, y la relación agua material cementante (a/mc) fue de 0.5. Sobre las muestras se determinaron: la demanda de agua para obtener una pasta de consistencia normal y los tiempos de fraguado inicial y final (Norma EN 196-3, 2005), la puzolanicidad por vía química por medio del ensayo de Frattini (Norma EN 196-5, 2011), desde los primeros 20 minutos de la hidratación y hasta 1 día, este ensayo además permite conocer el grado de reactividad de las adiciones.

Para la determinación de la resistencia al corte en el período latente, previamente se realizó el ensayo de calorimetría de las pastas a 25°C y con una relación a/mc de 0.5, dicho momento se obtuvo como el correspondiente al primer mínimo de la curva de velocidad de liberación de calor en función del tiempo (Rahhal, V., Talero, R., 2009). Adicionalmente, a la edad del primer mínimo se determinaron los compuestos presentes por difractometría de rayos X de las pastas en las mismas condiciones y los valores de pH del agua sobrenadante de las pastas preparadas con una relación a/mc de 5 (la del ensayo de Frattini) y a 25°C. La medida de calorimetría de conducción se realizó utilizando un calorímetro de conducción J.A.F. Wexham Development; la difracción de rayos X de las pastas se llevó a cabo con un equipo Phillips X'Pert PW-3710, con ánodo de cobre y monocromador de grafito, operando a 40kV y 20mA; para la determinación de los valores de pH se empleó un pH-metro Hanna HI 207. Finalmente, la realización de los ensayos reológicos se llevó a cabo mediante el empleo de un viscosímetro rotacional Haake, compuesto por un viscosímetro RotoVisco 1, un rotor Z38 DIN 53018 perfilado, un vaso Z43DIN 53018 perfilado, una unidad de control de temperatura para sistemas de cilindros coaxiales y un termostato de circulación DC 30-B3 (Alonso, M.M. et al; 2013).

Tabla 3: Demanda de agua y tiempos de fraguado.

Reemplazos del CP1 con	0%	20% O	40% O	20% A	40% A	20% C	40% C
Demanda de agua (a/mc)	0.31	0.32	0.32	0.345	0.35	0.34	0.37
Inicio fraguado (minutos)	3:20	3:10	2:50	2:35	2:40	3:00	2:45
Final fraguado (minutos)	5:10	4:30	4:45	4:20	5:15	4:20	3:50
Reemplazos del CP2 con	0%	20% O	40% O	20% A	40% A	20% C	40% C
Demanda de agua (a/mc)	0.28	0.28	0.27	0.29	0.30	0.325	0.36
Inicio fraguado (minutos)	4:30	4:00	3:45	5:05	1:25	4:55	4:35
Final fraguado (minutos)	6:15	6:30	6:25	6:40	4:45	6:50	6:35

Tabla 4: Valor de tensión de corte en los puntos singulares del CP1 y su familia.

CP1 con reemplazo de:	pH	Tiempo (min.)	Tensión de corte (Pa)						
			A ₁	B ₁	C ₁	C ₂	A ₂	B ₂	C ₃
0%	12.38	120	91.91	54.07	11.48	12.30	47.20	46.15	11.35
20 % O	12.56	85	80.26	43.53	8.23	8.55	39.22	37.72	8.61
40 % O	12.05	90	72.72	37.78	6.58	7.42	38.42	36.98	8.54
20 % A	12.28	120	100.3	54.15	14.88	16.97	42.30	40.87	13.36
40 % A	12.02	115	105.7	62.27	20.79	21.51	50.28	47.71	19.73
20 % C	12.26	105	122.1	65.24	17.75	20.13	52.45	50.37	15.91
40 % C	12.01	125	165.6	78.27	26.69	33.75	59.11	58.37	22.93

Tabla 5: Valor de tensión de corte en los puntos singulares del CP2 y su familia.

CP2 con reemplazo de:	pH	Tiempo (min.)	Tensión de corte (Pa)						
			A ₁	B ₁	C ₁	C ₂	A ₂	B ₂	C ₃
0%	12.35	100	162.5	75.78	13.44	12.04	46.15	42.87	12.83
20 % O	12.34	135	117.9	64.01	10.93	11.08	40.05	37.68	10.49
40 % O	12.34	185	91.96	50.92	9.38	9.45	34.85	34.74	8.78
20 % A	12.29	135	132.0	76.30	17.88	18.54	45.53	40.01	15.81
40 % A	12.28	165	141.5	87.58	29.41	30.29	51.16	46.48	20.79
20 % C	12.33	145	259.6	132.0	31.49	32.38	73.40	66.13	29.39
40 % C	12.31	220	348.8	184.4	59.37	61.97	95.67	87.80	46.45

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Demanda de agua: En la Tabla 3 se presentan las características de las muestras en cuanto a la demanda de agua para lograr la pasta de consistencia normal y los tiempos de fraguado inicial y final.

Respecto a la demanda de agua, el CP1 presentó mayor demanda de agua que el CP2, debido, fundamentalmente, a la capacidad del CP1 para formar compuestos que requieran mayor cantidad de agua de constitución. Luego, los tiempos de fraguado, del CP1 fueron más breves que los del CP2, esto está relacionado con el elevado contenido de C₃A del CP1 que contribuye con la resistencia a la penetración a temprana edad.

Las muestras con la puzolana O, presentaron una demanda de agua que prácticamente se mantuvo constante con el aumento del porcentaje de reemplazo, para ambos cementos; esto pudo deberse en parte a la baja adsorción y en parte a la mayor proporción de sílice reactiva que de alúmina reactiva (Tabla 2), puesto que los compuestos hidratados derivados de la sílice requieren menor cantidad de agua de constitución que los derivados de la alúmina. En cuanto a los tiempos de fraguado, el inicio se adelantó para ambos cementos, evidenciando un efecto de estimulación de la hidratación ejercido por las partículas de la puzolana sobre las partículas de los cementos; en cambio para el final mostraron diferencias según fuera el cemento portland con el que se mezclaron: con el CP1 se adelantaron y con el CP2 se retrasaron; fruto de la composición mineralógica de cada cemento (Rahhal, V., Talero, R., 2010).

Con la puzolana A, las demandas de agua se incrementaron y más con el incremento del porcentaje de reemplazo, para ambos cementos, pero sobre todo para el CP1, esto pudo deberse, en parte, a la elevada adsorción que presentó, y también, en parte, a la mayor proporción de alúmina reactiva que de sílice reactiva de esta adición (comparada con la puzolana O), puesto que la fase alumínica para su hidratación requiere de mayor cantidad de agua para formar sus compuestos de hidratación (Tabla 2). Así, mientras que los tiempos de fraguado aumentaron con el incremento del

porcentaje de reemplazo en las muestras con el CP1, principalmente por su mayor demanda de agua; en las muestras con el CP2 disminuyeron, debido posiblemente a la formación de productos de reacción provenientes de la alúmina reactiva de origen puzolánico (Rahhal, V., Talero, R., 2010).

Con la puzolana C, las demandas de agua se incrementaron y más con el incremento del porcentaje de reemplazo, para ambos cementos, más que con la puzolana A. Lo anterior pudo deberse, en parte, a la elevada adsorción que presentó, y también, a la mayor proporción de alúmina reactiva que de sílice reactiva de esta adición (comparar con las puzolanas O y A), por las mismas razones antes expuestas (Tabla 2). Primando la resistencia ofrecida por los productos de reacción provenientes de la alúmina reactiva de origen puzolánico, los tiempos de fraguado disminuyeron con el incremento del porcentaje de reemplazo para ambos cementos; resultando en el caso de las pastas con el CP1, menores que el propio CP1, y en las pastas con el CP2 apenas superiores al propio CP2.

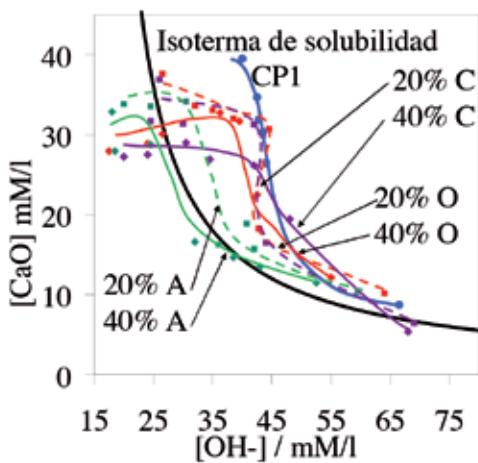


Fig. 1: Ensayo de Frattini del CP1 puro y con 20 y 40% de reemplazo de las puzolanas naturales O, A y C.

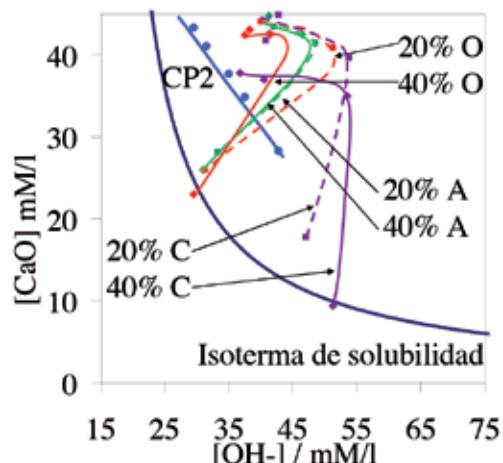
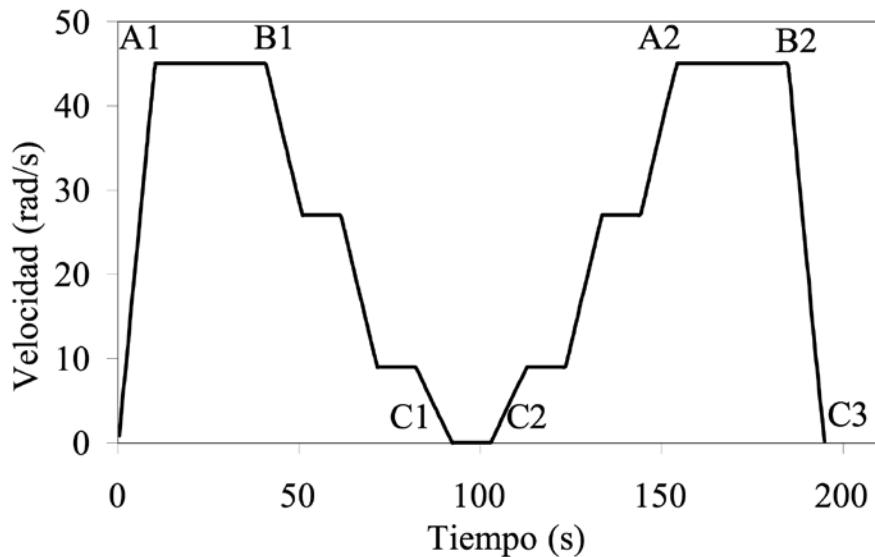


Fig. 2: Ensayo de Frattini del CP2 puro y con 20 y 40% de reemplazo de las puzolanas naturales O, A y C.

Puzolanicidad: En las Figuras 1 y 2 se muestran los resultados del ensayo de Frattini desde los 20 minutos hasta el primer día de hidratación del CP1 y del CP2 solos y con las tres puzolanas naturales O, A y C, respectivamente. En el caso de las muestras con el CP1 desde los 20 minutos se puede apreciar claramente el efecto de *dilución* con respecto a la $[\text{OH}^-]$. En parte, debida a la disminución de los constituyentes del cemento portland que liberan hidróxido de calcio al medio; sin embargo, con el avance de las reacciones de hidratación dicho efecto comienza a solaparse con el de estimulación llegando a la edad de 1 día a valores comparables a los del patrón. Con el CP2, en cambio, el efecto que se manifiesta desde los 20 minutos es el de estimulación resultando la $[\text{OH}^-]$ de las muestras con las puzolanas naturales O, A y C superior a la del patrón; sin embargo, con este cemento portland se manifiesta claramente la reactividad de las puzolanas naturales para fijar hidróxido de calcio por medio de la reacción puzolánica a la edad de 1 día, cuando todas las mezclas se acercan a la isoterma de solubilidad con la “intención” de cruzar la misma hacia la zona de subsaturación (puzolanicidad positiva); hecho este último que llega a concretarse con las muestras con 40 % de reemplazo por las puzolanas A y C.

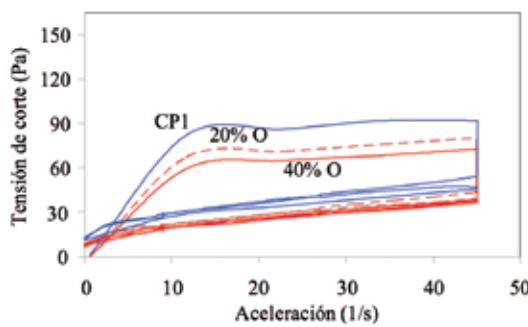
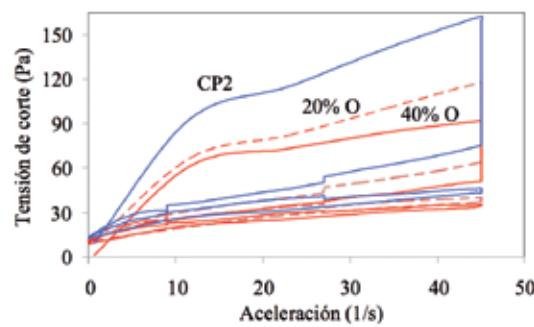
Reología: Para los ensayos de reología, las muestras se hidrataron y se mantuvieron en un baño termostatizado a 25°C hasta el momento del ensayo, que se realizó en coincidencia con el período latente de su hidratación, el cual se indica en las Tablas 4 y 5 para cada uno de los cementos CP1 y CP2 y sus respectivas muestras con las puzolanas naturales.

El diseño de la secuencia de batido, (Fig. 3), fue producto de un estudio previo (Rahhal, V. et al; 2010), en el que se privilegió la mayor diferencia entre las ramas de aceleración y desaceleración. En las Figuras 4, 6 y 8 se representan las tensiones de corte de las muestras del CP1 con las puzolanas O, A y C, respectivamente; y en las Figuras 5, 7 y 9 las de las muestras con el CP2 y la misma secuencia de puzolanas.

**Fig. 3:** Secuencia de batido.

De cada una de las Figuras 4 a 9, se obtuvieron los puntos señalados en la Figura 3, (A_1 , B_1 , C_1 , C_2 , A_2 , B_2 y C_3), cuyos valores se presentan en las Tablas 4 y 5, para el CP1 y el CP2 y sus familias, respectivamente.

En el caso del CP1, y después de 120 minutos de hidratación, la pasta presenta una tensión inicial (punto A_1) de 91.91 Pa, que se produce luego de alcanzar una velocidad de 45 rad/s en los primeros 10 segundos de batido; dicho valor puede ser debido la formación de ettringita dado el elevado contenido de C_3A del cemento, como se aprecia en el difractograma de la Fig. 10 (a la edad del primer mínimo de la curva calorimétrica). Despues de permanecer la velocidad de batido constante hasta el punto B_1 se presenta una disminución de la tensión de corte (comportamiento tixotrópico) de casi 38 Pa. Al retirar completamente la carga, punto C_1 , se observa que la muestra queda con una tensión remanente (11.48 Pa). Luego de permanecer en reposo durante 10 segundos, recobra parte de la tensión (punto C_2), llegando a 12.30 Pa.

**Fig. 4:** Tensión de corte del CP1 y de las muestras con O.**Fig. 5:** Tensión de corte del CP2 y de las muestras con O.

Continuando, en el punto A_2 , la tensión se reduce aproximadamente a la mitad, respecto del punto A_1 ; y en el punto B_2 , con el mismo estímulo que en el punto B_1 , la tensión se reduce alrededor del 15 %, esto significa que las uniones que llegaron a romperse, en su gran mayoría se han vuelto a formar. Por último en el punto C_3 , al final del ensayo,

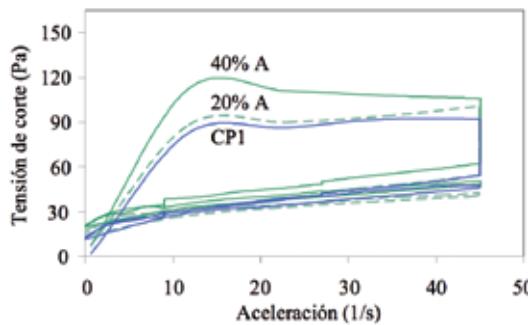


Fig. 6: Tensión de corte del CP1 y de las muestras con A.

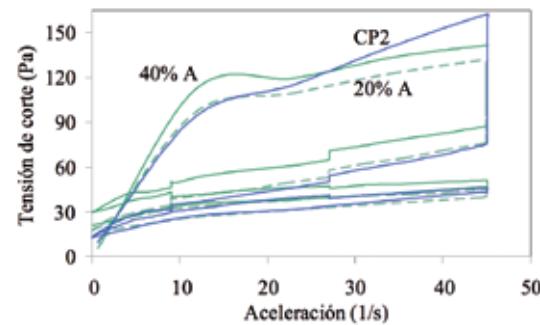


Fig. 7: Tensión de corte del CP2 y de las muestras con A.

nuevamente se presenta una tensión remanente, como en el caso del punto C₁, arrojando valores muy similares lo cual demuestra el alto grado de recuperación de la pasta del CP1 (Talero, R. et al; 2013).

En el caso del CP2, y después de 100 minutos de hidratación, cuando se inicia el ensayo de reología, la tensión inicial en el punto A₁ es de 162.5 Pa, la misma se produce luego de alcanzar una velocidad de 45 rad/s en los primeros 10 segundos de batido. Vale hacer notar que en este caso la tensión de corte fue muy superior a la del CP1 debido a su muy diferente composición mineralógica, y en consecuencia a la naturaleza de los productos de reacción formados en los primeros momentos (hidróxido de calcio y silicato de calcio hidratado), dado el elevado contenido de C₃S del cemento (Tabla 1 y el difractograma correspondiente a la Fig. 11 a la edad del primer mínimo de la curva calorimétrica). Después de permanecer la velocidad de batido constante hasta el punto B₁ se presenta una disminución de la tensión de corte (comportamiento tixotrópico) de casi 87 Pa (Talero, R. et al, 2013).

Comparativamente se observa que, la disminución de la tensión, tanto para el CP1 como para el CP2, oscila alrededor de la mitad, de sus valores correspondientes a los puntos A₁. Al retirar completamente la carga, punto C₁, se observa que la muestra queda con una tensión remanente (13.44 Pa), con una clara tendencia a la disminución de la misma con el paso del tiempo, llegando a 12.04 Pa en el punto C₂, al contrario de lo ocurrido para el caso del CP1. Acelerando nuevamente, en el punto A₂, la tensión se reduce aproximadamente a un cuarto respecto del punto A₁; y en el punto B₂, con el mismo estímulo que en el punto B₁, la tensión se reduce alrededor del 45 %, esto significa que las uniones que llegaron a romperse, en su gran mayoría no se han vuelto a formar. Por último en el punto C₃, al final del ensayo, nuevamente se presenta una tensión remanente, como en el caso del punto C₁, arrojando valores algo menores, lo cual infiere cierta imposibilidad de recuperación de las pastas con el CP2.

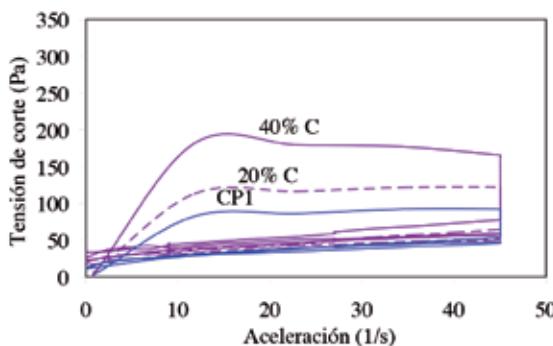


Fig. 8: Tensión de corte del CP1 y de las muestras con C.

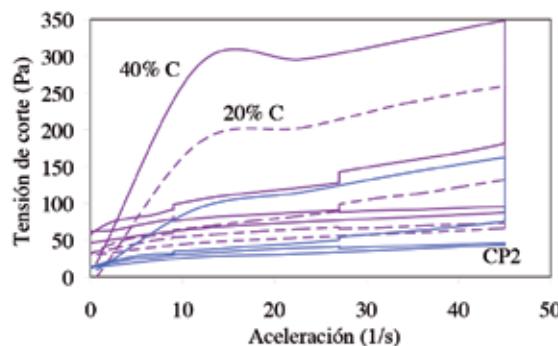


Fig. 9: Tensión de corte del CP2 y de las muestras con C.

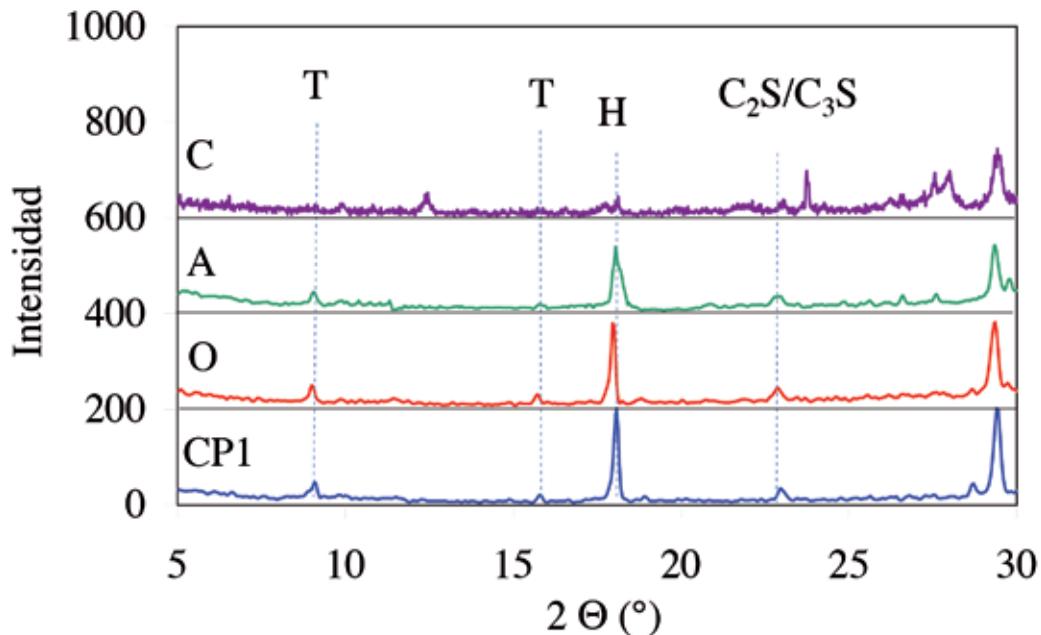


Fig. 10: Diffractometría del CP1 puro y de las mezclas con 40% de las puzolanas naturales O, A y C, a la edad del primer mínimo. T: ettringita, H: hidróxido de calcio.

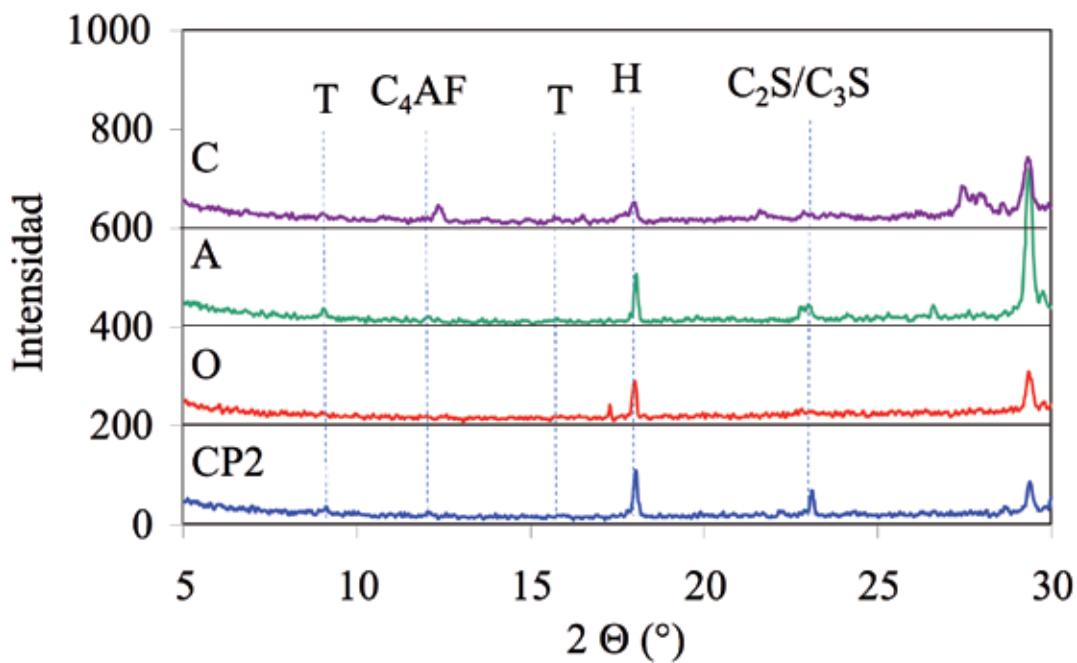


Fig. 11: Diffractometría del CP2 puro y de las mezclas con 40% de las puzolanas naturales O, A y C, a la edad del primer mínimo. T: ettringita, H: hidróxido de calcio.

Cuando la puzolana natural O, de carácter químico silílico-férreo-alumínico, fue incorporada a los cementos portland CP1 y CP2 (Tablas 4 y 5), la tensión de corte en todos los puntos singulares (A₁, B₁, C₁, C₂, A₂, B₂ y C₃) fue menor que las de sus respectivos patrones, CP1 y CP2, y además disminuyó, cuando se incrementó el porcentaje de reemplazo. La menor tensión producida por la incorporación y su disminución por el aumento del contenido de adición, pudo deberse en principio al efecto de dilución dado que en cada muestra se disminuyó el contenido de cemento (material más reactivo) en reemplazo de la puzolana O de menor reactividad que el cemento; este hecho tiene como consecuencia que mayor cantidad de agua estará disponible en cada sistema, hecho que contribuye a la fluidez de cada pasta (relación agua cemento efectiva 0.625 y 0.833 para 20 y 40 % de reemplazo, respectivamente). Adicionalmente debió sumarse el mayor contenido de álcalis equivalente que poseía la puzolana O, respecto de cada uno de los cementos puros (Tablas 1 y 2), lo cual también debió contribuir a incrementar la fluidez de las pastas. Una mención aparte, merecen los momentos de detención del rotor en las mezclas con el CP1, cuando se produce un aumento de la tensión, siguiendo la misma tendencia que el propio CP1 y su capacidad para recuperar tensión.

Cuando las puzolanas A y C, de carácter químico silílico-alumínico y alumínico silílico, fueron incorporadas a los cementos portland CP1 y CP2 (Tablas 4 y 5), la tensión de corte aumentó, cuando se incrementó el porcentaje de reemplazo de las adiciones con los dos cementos, incluso llegó a ser mayor (en la mayoría de los puntos singulares), que la de sus respectivos patrones, CP1 y CP2. La mayor tensión producida por la incorporación y su incremento por el aumento del contenido de ambas adiciones, pudo deberse en parte a la elevada adsorción que presentaron a la edad de 1 día (Tabla 2), lo cual debió provocar un autosecado de las muestras impidiendo su capacidad de fluir, a pesar del aumento de la relación agua cemento efectiva; y en parte a la reactividad de las mismas, revelada por la formación a tan temprana edad de ettringita y/o silicato de calcio hidratado (véanse los difractogramas correspondientes). En estos casos, los álcalis equivalentes que poseían las puzolanas no debieron pasar a la fase líquida, pues las tensiones de corte lejos de disminuir, aumentaron; lo cual quedó demostrado por la disminución de los valores de pH con el aumento del porcentaje de reemplazo de cada adición (Tablas 4 y 5).

Una mención aparte, merecen los momentos de detención del rotor en las mezclas tanto con el CP1 como con el CP2, cuando ocurre un aumento de la tensión con el incremento del porcentaje de reemplazo. Más aún tanto en las mezclas con el CP1 como en las mezclas con el CP2 entre los puntos C₁ y C₂ se produce una recuperación, siguiendo la misma tendencia que el propio CP1 y revirtiendo en parte lo que le ocurre al CP2 puro.

Comparando las muestras con 20 % de reemplazo tanto con el CP1 como con el CP2, resulta que la tensión de corte en todos los puntos singulares se eleva a medida que el carácter químico de las puzolanas se va haciendo más alumínico, tanto en los momentos de marcha como en los momentos de detención del rotor.

CONCLUSIONES

Del trabajo desarrollado se pueden extraer las siguientes consideraciones:

Con respecto a la composición mineralógica de los cementos y en consecuencia a la naturaleza y evolución de los productos de hidratación, se observa que la tensión de corte a edades tan tempranas como es el período latente de la hidratación, en general aumenta con el contenido de C₃S del cemento. Sin embargo, al momento de recuperar las pastas su tensión de corte, la de cemento con elevado contenido de C₃A es la que mejor lo hace.

Con respecto a las mezclas con las puzolanas naturales, se presentan los siguientes comportamientos:

- La tensión de corte aumenta con el aumento de la proporción de alúmina reactiva para un determinado porcentaje de reemplazo con cualquiera de los dos cementos.
- La tensión de corte en el momento de detención del rotor aumenta en las mezclas con ambos cementos. Sin embargo dicho aumento es más importante en el caso de las mezclas cemento con elevado contenido de C₃A.
- La tensión de corte disminuyó con el aumento del porcentaje de reemplazo con la puzolana O; mientras que con las puzolanas A y C aumentó, debido posiblemente a la elevada adsorción de humedad que presentaron a la edad de un día.

En general, en mayor o menor medida, la resistencia al corte de las pastas de cementos con adiciones se traslada al concreto, aumentando o disminuyendo su trabajabilidad. En consecuencia las operaciones de mezclado, colocación y compactación de los concretos, se verán afectadas por la incorporación de adiciones puzolánicas según el tipo de cemento que se utilice.

REFERENCIAS

- Alonso, M.M., Palacios, M., Puertas, F. (2013), "Compatibility between polycarboxylate-based admixtures and blended-cement pastes", *Cement & Concrete Composite* 35, pp.151-132.
- Criado Sanz, M., Palomo Sánchez, A., Fernández Jiménez, A. (2006), "Nuevos materiales cementantes basados en cenizas volantes. Influencia de los aditivos en las propiedades reológicas", *Monografía 413*, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid.
- Mindess, S., Young, J.F. (1981), "Concrete", Capítulos 3 y 4, Prentice Hall Inc.
- Norma EN 196-2, (2006), "Métodos de ensayo de cementos. Parte 2: Análisis químico de cementos".
- Norma EN 196-3, (2005), "Métodos de ensayo de cementos, Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen".
- Norma EN 196-5, (2011), "Métodos de ensayo de cementos. Parte 5: Ensayo de puzolanicidad para los cementos puzolánicos".
- Rahhal, V. (2002), "Caracterización de las adiciones puzolánicas por calorimetría de conducción", *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Madrid.
- Rahhal, V., Pedrajas, C., Irassar, E., Talero R. (2010), "Determinación de parámetros característicos en reología de pastas de cemento", *XVIII Reunión Técnica AATH*, Mar del Plata, Argentina, pp. 421-428.
- Rahhal, V., Talero, R. (2010), "Fast physics-chemical and calorimetric characterization of natural pozzolans and other aspects", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 99, pp. 479-486.
- Sant, G., Feraris, C.F., Weiss, J. (2008), "Rheological properties of cement pastes: A discussion of structure formation and mechanical property development", *Cement and Concrete Research* 38, pp. 1286-1296.
- Talero Morales, R. (1986), "Contribución al Estudio Analítico y Físico-Químico del Sistema: Cementos Puzolánicos-Yeso-Agua (a $20 \pm 2^\circ\text{C}$)", *Tesis Doctoral*, Universidad Complutense de Madrid.
- Talero, R., Pedradas, C., Rahhal, V., (2013), "Performance of fresh Pórtland cement pastes. Determination of some specific rheological parameters", *Rheology – New Concepts, Applications and Methods*, In Tech, Rajkumar Durauraj, (ISBN 980-953-307-924-5).