

EMPAQUETAMIENTO DE MEZCLAS TERNARIAS

G. Marchetti Facultad de Ingeniería, CIFICEN (UNCPBA-CICPBA-CONICET), B7400JWI
Olavarría, Buenos Aires, Argentina.
Tel +54 2284 451055 ext 206; Fax +54 2284 450628,
gmarchetti@fio.unicen.edu.ar

Resumen

La incorporación de materiales cementíceos suplementarios (MCS) más finos que el cemento puede incrementar la densidad de empaquetamiento y reducir la cantidad de vacíos a ser llenados con agua. Esto permite más cantidad de agua libre para formar una capa que cubra las partículas, lubricando la pasta y mejorando la fluidez. El objetivo de este trabajo es evaluar los efectos de la incorporación de metacaolín (MC) y filler calcáreo (FC) en la densidad de empaquetamiento, el water film thickness (WFT) y fluidez de mezclas ternarias a diferentes relaciones a/mc. Los resultados mostraron que la incorporación de FC y MC incrementa la densidad de empaquetamiento del cemento portland normal (CPN) y que la fluidez se encuentra gobernada principalmente por el WFT.

Palabras Clave: Materiales cementíceos suplementarios, empaquetamiento, water film thickness.

Abstract

In previous studies it has been postulated that, the addition of supplementary cementitious materials (SCM's) finer than cement can increase the packing density and reduce the amount of voids to be filled with water. This allows more free water that coats the particles to lubricate the cement paste and improve the flowability. This study aims to evaluate the effects of metakaolin (MK) and limestone filler (LF) on the packing density, flowability, setting time and compressive strength on triple blends at different w/cm ratios and investigated the WFT effects on flowability. The results showed that the incorporation of MK and LF increases the packing density and that the flowability is mainly governed by the WFT.

Keywords: Supplementary cementitious materials, packing, water film thickness.

Introducción

En los últimos años, ha habido un creciente interés en el desarrollo de cementos mezcla, en los cuales el clínker es parcialmente reemplazado por materiales cementíceos suplementarios (MCS) ya que ofrecen grandes beneficios: en primer lugar, se reduce el consumo de clínker y como consecuencia se reducen las emisiones de CO₂, contribuyendo al desarrollo sostenible. En segundo lugar, los MCS son en general desechos o subproductos de otras industrias y generalmente son más económicos que el clínker, lo que representa una reducción de los costos. Por último, el uso de MCS mejora el rendimiento tanto del cemento como del hormigón, por lo que representa un beneficio tecnológico [1,2].

Si bien la reducción de la relación agua/material cementíceo (a/mc) incrementa la resistencia y la durabilidad del hormigón, existe un límite inferior para la misma; ya que se requiere un exceso de agua (agua en exceso de la necesaria para llenar los vacíos) para lubricar las partículas y que no se vea afectada la trabajabilidad. Varios investigadores [3-5] han estudiado cuanto puede reducirse la relación a/mc y qué factores determinan ese límite inferior. Kwan et al. [6] encontraron que la densidad de empaquetamiento juega un papel importante en la reología de una pasta de cemento, porque una mayor densidad de empaquetamiento daría lugar a una baja relación a/mc para llenar los vacíos.

Ferraris et al. [7] midieron las propiedades reológicas de pastas de cemento con diferentes MCS. Concluyeron que la fluidez de la pasta de cemento depende de varios parámetros que deben considerarse simultáneamente. Por ejemplo, la incorporación de MCS relativamente finos llena los vacíos entre las partículas más gruesas, lo cual mejora la densidad de empaquetamiento, disminuye la relación de vacíos y aumenta el contenido de exceso de agua; en consecuencia, tiene efectos beneficiosos sobre la fluidez. Sin embargo, debido a la reducción en el tamaño medio de partícula, la superficie específica de los materiales cementíceos aumenta causando efectos adversos sobre la fluidez. Por lo tanto, el comportamiento reológico dependerá de cuál de los dos efectos es predominante. Estos efectos opuestos pueden evaluarse a través de un parámetro llamado

“water film thickness” (WFT) que representa el espesor de la película de agua que recubre las partículas en una pasta.

En los últimos años, la combinación de filler calcáreo (FC) y metacaolín (MC) para producir cementos mezcla ha sido estudiada por varios autores [8-10]. El uso de cemento ternarios (CPN-FC-MC) tiene un beneficio real para el rendimiento mecánico y de durabilidad del hormigón, debido principalmente al refinamiento de la estructura de poros que confieren las dos distribuciones de tamaños de partículas diferentes al cemento e intensificadas por los productos de la reacción de MC [9].

En este trabajo, se realizaron mezclas ternarias CPN, FC y MC con el fin de medir la densidad de empaquetamiento para distintos porcentajes de reemplazo. Además, se evaluó como influye la densidad de empaquetamiento y el WFT sobre la fluidez de las pastas para distintas relaciones a/mc.

Materiales

Los materiales utilizados fueron: cemento portland normal (CPN), filler calcáreo (FC) y metacaolín (MC). La composición química y mineralógica, la densidad y la superficie específica de los mismos se presenta en la Tabla 1.

La distribución granulométrica fue medida con un analizador láser (Mastersizer 2000E) equipado con módulo para sólidos secos, y se representa en la Figura 1. Los tamaños medios (d₅₀) del CPN, FC y MC son 19.7, 7.3 y 1.5 μm, respectivamente. Para dispersar los granos de los materiales cementíceos y reducir la aglomeración en las pastas, se utilizó un aditivo superplastificante (SP) de tercera generación de base policarboxilato con una densidad de 1.03.

Programa experimental

El programa experimental constó de dos partes. La primera parte consistió en el cálculo y la medición de la densidad de empaquetamiento de los materiales cementíceos y el cálculo del WFT de las pastas para distintas relaciones a/mc. El cálculo de las densidades de empaquetamiento de las mezclas ternarias se realizó con el modelo de

	CPN	FC	MC
Composición química [%]			
SiO ₂	22.01	8.70	57.48
Al ₂ O ₃	4.21	0.81	41.55
Fe ₂ O ₃	4.94	0.49	0.50
CaO	65.41	49.08	0.01
MgO	0.71	0.50	0.00
SO ₃	0.33	0.19	0.00
K ₂ O	0.16	0.25	-
Na ₂ O	0.92	0.18	-
PxC	1.74	39.20	0.40
Composición mineralógica [%]			
C ₃ S	63.6		
C ₂ S	15.1		
C ₃ A	2.8		
C ₄ AF	15		
Calcita (CaCO ₃)	-	89.1	-
Silicato de aluminio (Al ₂ O ₃ .2SiO ₂)	-	-	90.4
Cuarzo (SiO ₂)		8.7	8.6
Densidad	3.13	2.68	2.71
Superficie específica Blaine [m ² /kg]	354	513	755

Tabla 1: Propiedades de los materiales cementíceos.

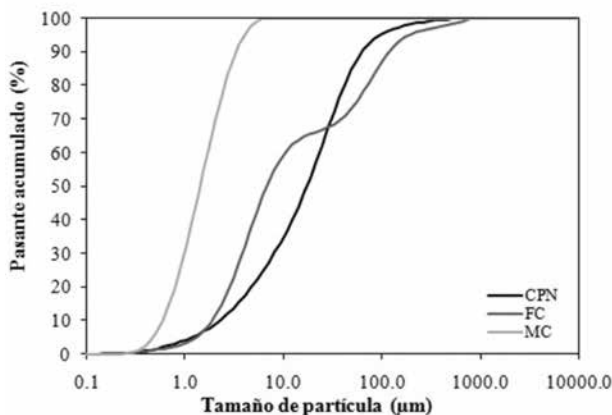


Figura 1. Distribución granulométrica de los materiales cementíceos.

empaquetamiento compresible (MEC) [3] y para la medición de las mismas se utilizó el método de empaquetamiento húmedo [8]. A partir de los

valores calculados se determinó que las máximas densidades de empaquetamiento se producían con un reemplazo de 10% de MC y reemplazos de hasta 30% de FC, por lo que las mezclas ternarias se realizaron con un contenido de 10% de MC y un contenido variable de FC de 0 a 30% en incrementos de 10% en volumen.

La segunda parte consistió en la medición de la fluidez de las pastas por medio del ensayo de “minicono” de Kantro y el tiempo de fluidez a través del ensayo del cono de Marsh, para relaciones a/mc variables de 0.5 a 1.0 en incrementos de 0.1, en volumen. Se utilizó un dosis de 1.5% de SP en peso de materiales cementíceos, para aislar los fenómenos físicos de la interacción química.

Las densidades de los materiales cementíceos son diferentes y la densidad de empaquetamiento es gobernada por relaciones volumétricas más que por relaciones en peso; es por esto que tanto los

contenidos de materiales cementíceos como las relaciones a/mc están dadas en volumen [11,12].

Las proporciones de las pastas se presentan en la Tabla 2. A cada pasta se le asignó un código de

identificación T-X-Y-Z donde T denota ternaria, X es el contenido de FC, Y es el contenido de MC y Z la relación a/mc.

Para asegurar una mezcla homogénea de los

Mezcla	Dosificación (kg/m ³)					Densidad de empaqueta-miento ($\Phi_{\text{máx}}$)	Relación de vacíos mínima (u)	WFT (μm)
	CPN	FC	MC	Agua	SP			
T-0-0-0.5	2086.7	0.0	0.0	302.0	31.3	0.636	0.572	-0.065
T-0-0-0.6	1956.3	0.0	0.0	345.7	29.3			0.025
T-0-0-0.7	1841.2	0.0	0.0	384.1	27.6			0.115
T-0-0-0.8	1738.9	0.0	0.0	418.4	26.1			0.205
T-0-0-0.9	1647.4	0.0	0.0	449.0	24.7			0.296
T-0-0-1.0	1565.0	0.0	0.0	476.5	23.5			0.386
T-10-0-0.5	1878.0	0.0	180.7	302.5	30.9	0.657	0.522	-0.018
T-10-0-0.6	1760.6	0.0	169.4	346.1	29.0			0.065
T-10-0-0.7	1657.1	0.0	159.4	384.5	27.2			0.148
T-10-0-0.8	1565.0	0.0	150.6	418.7	25.7			0.231
T-10-0-0.9	1482.6	0.0	142.6	449.3	24.4			0.314
T-10-0-1.0	1408.5	0.0	135.5	476.8	23.2			0.398
T-10-10-0.5	1669.3	178.7	180.7	302.9	30.4	0.661	0.502	-0.001
T-10-10-0.6	1565.0	167.5	169.4	346.5	28.5			0.071
T-10-10-0.7	1472.9	157.6	159.4	384.9	26.9			0.152
T-10-10-0.8	1391.1	148.9	150.6	419.1	25.4			0.234
T-10-10-0.9	1317.9	141.1	142.6	449.7	24.0			0.315
T-10-10-1.0	1252.0	134.0	135.5	477.2	22.8			0.397
T-10-20-0.5	1460.7	357.3	180.7	303.4	30.0	0.668	0.495	0.004
T-10-20-0.6	1369.4	335.0	169.4	346.9	28.1			0.082
T-10-20-0.7	1288.8	315.3	159.4	385.3	26.5			0.162
T-10-20-0.8	1217.2	297.8	150.6	419.5	25.0			0.241
T-10-20-0.9	1153.2	282.1	142.6	450.0	23.7			0.321
T-10-20-1.0	1095.5	268.0	135.5	477.5	22.5			0.401
T-10-30-0.5	1252.0	536.0	180.7	303.8	29.5	0.671	0.490	0.008
T-10-30-0.6	1173.8	502.5	169.4	347.3	27.7			0.086
T-10-30-0.7	1104.7	472.9	159.4	385.7	26.1			0.164
T-10-30-0.8	1043.3	446.7	150.6	419.8	24.6			0.242
T-10-30-0.9	988.4	423.2	142.6	450.4	23.3			0.320
T-10-30-1.0	939.0	402.0	135.5	477.9	22.1			0.398

Tabla 2: Proporciones, densidad de empaquetamiento, relación de vacíos y WFT de las mezclas.

materiales cementíceos con el agua, se utilizó el procedimiento de mezcla descrito por Wong & Kwan, [8] el cual previene la aglomeración de los materiales cuando los materiales son muy finos y/o el contenido de agua es muy bajo.

Densidad de empaquetamiento y WFT

Los detalles matemáticos para determinar la densidad de empaquetamiento ya han sido descritos en trabajos anteriores [10,13] por lo que en este trabajo solo se da una breve descripción del modelo y método utilizados.

El MEC es un modelo semi-empírico que predice la densidad de empaquetamiento de una mezcla multicomponente a partir de la distribución granulométrica y la densidad de empaquetamiento de las fracciones monogranulares. El grado de compactación de la mezcla es tomado en cuenta a través de un índice K en la formulación. El valor de K adoptado fue debido a que se ha probado que lleva a una buena correlación [14,15].

El método de empaquetamiento húmedo, implica medir la densidad de empaquetamiento de una pasta de cemento como la máxima concentración de sólidos de los materiales cementíceos al ser mezclados con agua a distintas relaciones a/mc. Para altas relaciones a/mc, los materiales cementíceos están dispersos como una suspensión con baja concentración de sólidos; mientras que a bajas relaciones a/mc el agua es insuficiente para llenar los vacíos causando una gran cantidad de aire atrapado y la concentración de sólidos también es baja. Entre estos dos extremos existe un valor de a/mc óptimo para el cual se alcanza la máxima concentración de sólidos ($\Phi_{\text{máx}}$). Este máximo valor es considerado la densidad de empaquetamiento de los materiales cementíceos.

A partir de la densidad de empaquetamiento, es posible calcular el WFT de la pasta como la relación entre el exceso de agua y la superficie específica de los materiales cementíceos, para las pastas a distintas relaciones a/mc. Cuando el WFT es positivo tiene el significado físico de ser el espesor medio de la capa de agua que rodea las partículas. Un WFT negativo indica que el agua incorporada es insuficiente para llenar los vacíos lo que conduce a la presencia de aire en los mismos [16,17].

Fluidez

El ensayo del “mini-cono” de Kanro [18] determina el escurrimiento de la pasta. Para esto se colocó el cono en el centro de una placa de acero nivelada, se vertió lentamente la pasta dentro hasta que se llenó, luego se levantó suavemente el cono y, finalmente, se determinó el escurrimiento como el diámetro medio del círculo de pasta formado menos el diámetro inferior del cono (38 mm).

Mediante el ensayo del cono de Marsh se obtiene la velocidad de flujo de la pasta. La misma se determina como el volumen de pasta colectado dividido el tiempo que tarda en escurrir. Para pastas secas, que toman mucho tiempo en fluir, el ensayo se detiene luego de 200 s. y la fluidez se obtiene como el volumen colectado dividido 200 s. La versión del cono adoptada en este trabajo es conforme a la BS EN 445:1997.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Densidad de empaquetamiento y WFT

En la Figura 2, se muestra la densidad de empaquetamiento y la relación mínima de vacíos, medidos y calculados. Se observa que los valores medidos tienen una buena correlación con los valores calculados con el MEC.

Los resultados experimentales de densidad de empaquetamiento y la relación de vacíos mínima son presentados en la Tabla 2. Se puede ver que la densidad de empaquetamiento de la

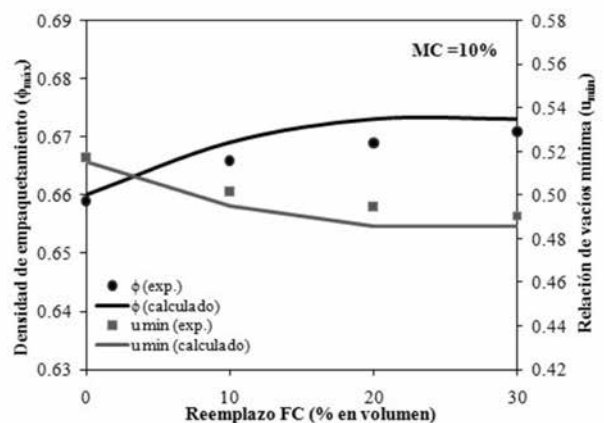


Figura 2. Densidad de empaquetamiento y mínima relación de vacíos.

pasta T-0-0 es de 0.636 y la mínima relación de vacíos 0.572. Para la pasta T-10-0, la densidad de empaquetamiento se incrementa a 0.657 y la relación de vacíos se reduce a 0.522. Por otro lado, comparando la densidad de empaquetamiento de las pastas con igual contenido de MC (T-10-10, T-10-20, T-10-30), puede verse que la incorporación de FC incrementa la densidad de empaquetamiento alcanzando un valor máximo de 0.671 para la pasta T-10-30. Esta mejora de la densidad de empaquetamiento en las pastas ternarias podría deberse a que las partículas de FC llenan los vacíos entre las partículas de CPN; mientras que las partículas de MC llenarían los vacíos entre las partículas de FC. Este llenado sucesivo de los vacíos por partículas cada vez más finas, es la mejor manera de optimizar la densidad de empaquetamiento [14].

Puede notarse que el máximo incremento de la densidad de empaquetamiento respecto a la pasta T-0-0 fue 5.5%, y la correspondiente máxima reducción de la relación de vacíos de 14.4%. Esta reducción (relativamente más grande que el aumento de la densidad de empaquetamiento) de la relación de vacíos, permitiría disminuir significativamente la cantidad de agua necesaria para llenar los vacíos e incrementar la cantidad de exceso de agua disponible para formar la capa de agua alrededor de las partículas.

Los valores de WFT para cada una de las pastas son presentados en la última columna de la Tabla 2 y graficados en función de la relación a/mc en la Figura 3. Comparando el WFT de la pasta T-0-0 con el de las otras pastas, puede verse que la incorporación de MC y/o FC, siempre incrementa el WFT. Para una relación a/mc de 0.5 los valores de WFT para las pastas T-0-0, T-10-0 y T-10-10 son negativos ya que la cantidad de agua no resulta suficiente para llenar los vacíos entre las partículas sólidas quedando aire atrapado en la pasta. Para las pastas T-10-20 y T-10-30, los valores de WFT son positivos, indicando que la mayor cantidad de FC llena los vacíos y consecuentemente incrementa la cantidad de exceso de agua.

Además, se observa que el incremento en el WFT debido a la incorporación de las adiciones empleadas, disminuye con el aumento de la relación a/mc. Por ejemplo, para una relación

a/mc de 0.5, la incorporación de 10% de MC y 30% de FC aumenta el WFT de $-0.065 \mu\text{m}$ a $0.008 \mu\text{m}$ (incremento de $0.073 \mu\text{m}$); mientras que para una relación a/mc 1.0 el mismo reemplazo incrementa el WFT de $0.386 \mu\text{m}$ a $0.398 \mu\text{m}$ (aumenta $0.012 \mu\text{m}$). Para relaciones a/mc bajas, cuando el incremento en la cantidad de exceso de agua (debido al aumento de la densidad de empaquetamiento) es proporcionalmente mayor que el incremento de la superficie específica, el WFT incrementa. Para relaciones a/mc altas, cuando el incremento en la densidad de empaquetamiento es proporcionalmente menor que el incremento de la superficie específica, el WFT disminuye [1].

Los efectos del MC y FC en la densidad de empaquetamiento y la superficie específica no son dependientes de la relación a/mc, pero los efectos en el WFT si dependen de la relación a/mc. Por lo tanto, el efecto neto de la incorporación de MC y FC en las propiedades de la pasta de cemento debería ser evaluado junto con el contenido de agua.

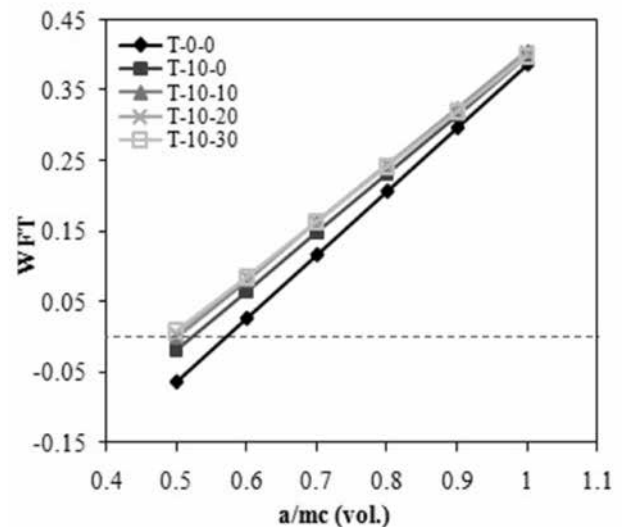


Figura 3. Variación del WFT con la relación a/mc.

Fluidez

En la Figura 4 se muestra el escurrimiento de las pastas ternarias en función de la relación a/mc y del WFT. Como se esperaba, el escurrimiento incrementa con la relación a/mc (Fig. 4a) y con la incorporación de MC y FC. Se puede ver que la

incorporación de MC y FC tiene un mayor efecto sobre el escurrimiento a bajas relaciones a/mc más que a altas relaciones a/mc. Comparando las pastas T-10-30 con T-0-0 se ve que el escurrimiento aumenta de 0 a 107 mm para una relación a/mc de 0.5 pero presenta un pequeño incremento cuando la relación a/mc es de 1.0 (179.5 a 182 mm). Para la relación a/mc 0.5 los valores de escurrimiento de las pastas T-0-0, T-10-0 y T-10-10 son nulos ya que la cantidad de exceso de agua no es suficiente para lubricar las partículas.

Las curvas de escurrimiento-WFT son muy cercanas unas con otras y por lo tanto pueden representarse con una única curva obtenida por análisis de regresión con un R^2 de 0.954 (Fig. 4b). Este alto valor de R^2 muestra que la incorporación de MC y FC ejercen su efecto principalmente a través del WFT. Por lo tanto, resulta evidente que la relación a/mc no es el factor más representativo para evaluar la fluidez de las pastas de cemento.

La velocidad de flujo de las pastas de cemento es presentada en función de la relación a/mc y WFT en la Figura 5. Como ocurre con el escurrimiento, la velocidad de flujo se incrementa con la relación a/mc (Fig. 5a) y con la incorporación de MC y FC.

En la Fig. 5b, se ve que la velocidad de flujo es nula cuando el WFT es negativo o muy pequeño y luego se incrementa con el WFT. Al igual que en el caso del escurrimiento, se pudo graficar una única curva mediante análisis de regresión con un R^2 de 0.939 (Fig. 5b). Por lo tanto, se confirma que el WFT es también un factor fundamental en la velocidad de flujo.

Además se pudo ver que el escurrimiento se incrementa con el WFT a una tasa decreciente mientras que la velocidad de flujo incrementa a una tasa creciente. Esto indica que, aunque la fluidez siempre se incremente con el WFT, el efecto es diferente según si la misma se evalúa como escurrimiento o velocidad de flujo.

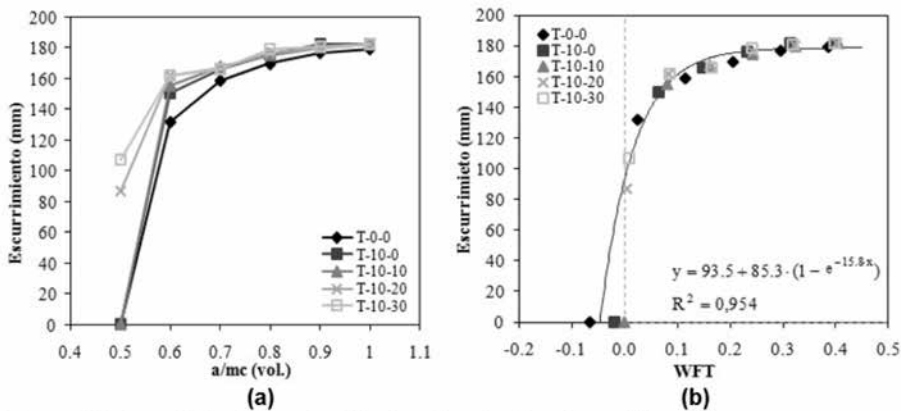


Figura 4. Ecurrimiento en función de: (a) relación a/mc y (b) WFT.

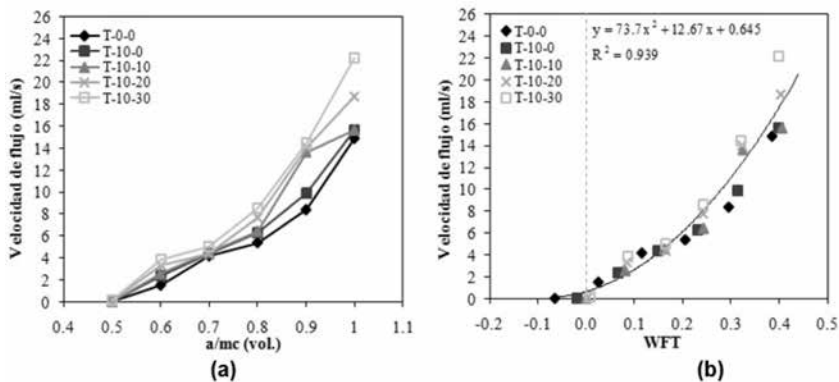


Figura 5. Velocidad de flujo en función de (a) relación a/mc y (b) WFT.

Conclusiones

Se midió y se calculó la densidad de empaquetamiento de cada una de las pastas ternarias CPN+MC+FC; también se calculó el WFT y se midió la fluidez de las mismas a distintas relaciones a/mc con el “mini-cono” de Kantro y el cono de Marsh. A partir de los resultados analizados se puede concluir que:

La incorporación de 10% de MC y hasta un 30% de FC incrementa la densidad de empaquetamiento del CPN. Se encontró una buena correlación entre los valores medidos y los calculados con el MEC.

Para los reemplazos utilizados, la incorporación de MC y/o FC al CPN siempre incrementa el WFT. Para bajas relaciones a/mc el incremento es mayor que para relaciones a/mc altas, ya que en el primer caso el aumento proporcional de la cantidad de exceso de agua resulta mayor que el aumento de la superficie específica.

La incorporación de MC y/o FC mejora la fluidez (escurrimiento velocidad de flujo) de la pasta control (T-0-0).

El WFT presenta una gran correlación tanto con el escurrimiento como con la velocidad de flujo mostrando que la incorporación de MC y FC ejercen su efecto principalmente a través del WFT, por lo que es el parámetro que gobierna la fluidez de las pastas analizadas.

Referencias

1. Kwan AKH, Li Y (2013) Effects of fly ash microsphere on rheology, adhesiveness and strength of mortar. *Construction and Building Materials* 42:137-145.
2. Fennis SAAM, Walraven JC (2012) Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design. *HERON* 57 (2):73-102.
3. De Larrard F (1999) *Concrete Mixture Proportioning: A scientific approach*. E & FN SPON, London.
4. Aïtcin PC (1998) *High Performance Concrete*. E & FN Spon, Londres.
5. Walraven J (2009) High performance concrete: a Material with a large potential. *Journal of Advanced Concrete Technology* 7 (2):145-156.
6. Kwan AKH, Wong HHC (2008) Packing density of cementitious materials: part 2 - packing and flow of OPC + PFA + CSF. *Materials and Structures* 41:773-784.
7. Ferraris CF, Obla KH, Hill R (2001) The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. *Cement and Concrete Research* 31 (2):245-255.
8. Wong HHC, Kwan AKH (2008) Packing density of cementitious materials: Part 1 - Measurement using a wet packing method. *Materials and Structures* 41:689-701.
9. Fung WWS, Kwan AKH, Wong HHC (2009) Wet packing of crushed rock fine aggregate. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 42 (5):631-643.
10. Wong HHC, Kwan AKH (2008) Packing density of cementitious materials: Measurement and modelling. *Magazine of Concrete Research* 60 (3):165-175.
11. Kwan AKH, Wong HHC (2008) Effects of packing density, excess water and solid surface area on flowability of cement paste. *Advances in Cement Research* 20 (1):1-11.
12. Chen JJ, Fung WWS, Kwan AKH (2012) Effects of CSF on strength, rheology and cohesiveness of cement paste. *Construction and Building Materials* 35:979-987.
13. Marchetti G, Rahhal VF, Irassar EF (2017) Influence of packing density and water film thickness on early-age properties of cement pastes with limestone filler and metakaolin. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 50 (2):111.
14. Albert K. H. Kwan JJC (2012) Roles of Packing Density and Water Film Thickness in Rheology and Strength of Cement Paste. *Journal of Advanced Concrete Technology*.
15. Kwan AKH, Fung WWS (2009) Packing density measurement and modelling of fine aggregate and mortar. *Cement and Concrete Composites* 31 (6):349-357.
16. Fung WWS, Kwan AKH (2010) Role of water film thickness in rheology of CSF mortar. *Cement and Concrete Composites* 32 (4):255-264.
17. Kwan AKH, Li LG (2012) Combined effects of water film thickness and paste film thickness on rheology of mortar. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 45 (9):1359-1374.
18. Kantro DL (1980) Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste - A Miniature Slump Test. *Cement, Concrete and Aggregates* 2 (2):95-102.