

INFLUENCIA DE ARIDOS FINOS EN LAS PROPIEDADES AUTOCOMPACTANTES Y MECANICAS DEL HORMIGON

INFLUENCE OF FINES ON SELF-COMPACTING AND MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE

Por / By Carlos Aguilar, Hugo Barrera

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo principal estudiar el comportamiento de la influencia de distintos tipos y cantidades de áridos finos sobre las propiedades autocompactantes y mecánicas de hormigón. Para ello se analizó el comportamiento de 6 tipos de finos en diferentes cantidades, dos de ellos con propiedades cementicias. Además, con el objeto de optimizar las dosificaciones obtenidas se varió el porcentaje de aditivo. Para caracterizar cada tipo de hormigón se realizó un completo análisis de sus materiales constituyentes y se realizaron los ensayos normalizados de hormigón fresco y densidad. Además, se efectuaron los ensayos recomendados en la literatura especializada para determinar las propiedades autocompactantes del hormigón, es decir, fluidez de cono invertido y caja L. También se midió la resistencia del hormigón a la compresión cúbica a las edades de 3, 7 y 28 días. Se concluye que las principales características de los áridos finos que influyen en las propiedades del hormigón autocompactante son la superficie específica y la forma de las partículas. Como consecuencia de esto, la cantidad de fino que se debe incorporar al hormigón depende de la magnitud de estas propiedades.

Palabras clave: Aditivo, hormigón, cemento portland puzolánico, hormigón autocompactante.

Abstract

The main objective of the investigation was to study the influence of different types and amount of fines on the self-compacting behavior and mechanical properties of this concrete type. 6 types of fines in different amounts were analyzed. Also, the amount of admixture was analyzed in order to optimizing the mix proportions. In order to characterize each concrete type, a complete analysis of concrete-making materials was carried out and normalized tests of fresh concrete, air content and fresh density were performed. Moreover, the tests recommended in the technical literature to determine the self-compacting properties were performed, i.e. slump flow test and L box. The compression concrete strength was measured in cubic specimens at 3, 7 and 28 days. It was concluded that the main characteristics of fines influencing the self-compacting concrete properties are the specific surface and shape of fines. Therefore, the quantity of fines that should be incorporated into the concrete depends on the magnitude of these properties.

Keywords: Admixture, concrete, fines, portland pozzolan cement, self-compacting concrete.

1. INTRODUCCION

Por mucho tiempo la compactación del hormigón ha sido un tema de gran preocupación en la Ingeniería, dada la importancia que tiene este proceso en el producto de hormigón terminado. Lo anterior ha llevado al desarrollo de nuevas tecnologías de vibración y técnicas de consolidación.

Por otro lado, el desarrollo de la construcción en hormigón ha sido enorme, logrando cada vez formas más complejas y sofisticadas, por lo que los métodos de vibración convencionales han sido una limitante para la confección de estructuras complejas.

En respuesta a esta necesidad, se desarrolló a fines de la década de los ochenta un nuevo tipo de hormigón, el Hormigón Autocompactante (HAC). El HAC se define como un hormigón que tiene la fluidez significativamente alta, con gran resistencia a la segregación durante su transporte y colocación, capaz de ser vaciado dentro de moldajes estrechos y áreas densamente

armadas sin aplicar vibración (Jiaxiong et al., 1999; Okamura, 1997).

Este hormigón de última generación viene a resolver y mejorar una serie de problemas en la Ingeniería como son: compactación de hormigones con una alta densidad de armadura, mejoramiento en los tiempos de hormigonado, mayor rendimiento en la mano de obra, el no requerimiento de equipo de vibración, el logro de mejores terminaciones, reducción de ruido ambiente y la mejora de condiciones de salud y seguridad para los trabajadores.

Con el propósito de utilizar los recursos de manera óptima y analizar el desempeño del HAC con diferentes materias primas nacionales, la investigación tuvo como objetivo principal analizar el comportamiento del HAC fabricado con distintos tipos y proporciones de áridos finos, así como también, estudiar el efecto de la cantidad de aditivo en las propiedades autocompactantes y mecánicas del hormigón.

Investigaciones internacionales han determinado que la

cantidad de cemento junto con el material fino afectan fuertemente las propiedades del hormigón autocompactante (Bui y Montgomery, 1999). Por lo anterior, se espera que los resultados de esta investigación provean de información nacional valiosa sobre el comportamiento que presenta el hormigón autocompactante fabricado con materias primas chilenas y con ello contribuir al desarrollo y aplicación de este material en la industria de la construcción.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para determinar la influencia del tipo y cantidad de finos en las propiedades del hormigón autocompactante, se desarrolló un programa experimental en dos fases:

- Análisis de las propiedades de los materiales finos: características físicas, morfológicas y químicas.
- Propiedades en estado fresco y endurecido del HAC fabricado con diferentes tipos de finos.

El estudio consideró un HAC de referencia fabricado con un tipo y cantidad de arena específica. Este hormigón fue modificado mediante la incorporación de finos en reemplazo de arena hasta lograr nuevamente un HAC. Por lo tanto, este hormigón posee la cantidad óptima de finos y de aditivo con los cuales se logró cumplir los requerimientos descritos en la literatura para un HAC.

Se fabricó un total de 30 hormigones diferentes. Con los resultados de hormigones de prueba y definitivos se cuantificó el efecto que tienen sobre las propiedades de hormigón fresco (trabajabilidad, segregación y exudación), los diferentes tipos y cantidades de finos analizados.

2.1 Características de los Materiales

Se utilizó un cemento Portland Puzolánico grado corriente, de producción nacional. La Tabla 1, se presenta las propiedades del cemento utilizado.

Por otra parte, se utilizaron dos tipos de áridos: gravilla y arena, de tamaño máximo 20 mm y 5 mm, respectivamente. Para caracterizar las propiedades de los áridos se realizó una serie de ensayos, los que se detallan en Tabla 2.

Por otro lado, seis tipos diferentes de finos fueron utilizados en el presente estudio. Dos de ellos con características cementicias: Fly Ash (FA) y microsílíce (SF); y el resto son inertes: finos por lavado (AS), pomacita (PO), polvo de roca (FBB) y filler silico-calcáreo (FLL). Sus propiedades físicas y morfológicas son mostradas en la Tabla 3.

Por último, se utilizó un aditivo reductor de agua de alto rango en base a policarboxilatos modificados por polímeros de forma tridimensional, lo cuales causan un efecto dispersante en las partículas de cemento.

Tabla 1. Propiedades del cemento

Características Físicas y Químicas	Cemento Portland Puzolánico Corriente
Expansión en Autoclave (%)	0.01
Pérdida por Calcinación (%)	2.9
Residuo Insoluble (%)	24.4
SO ₃	2.2
Peso Específico	2.87
Tiempo de Fraguado (Vicat)	
Inicial (hr:min)	3:50
Final (hr:min)	4:50
Finura Blaine (cm ² /g)	3910
Contenido de Puzolana (%)	28.2

Tabla 2. Propiedades de los áridos

Propiedad	Gravilla	Arena
Módulo de Finura	6.8	3.23
Tamaño Máximo Nominal (mm)	20	5
Peso específico	2.65	2.53
Densidad Aparente seca compactada (gr/cm ³)	1.58	1.50
Absorción (%)	1.8	2.25

Tabla 3. Propiedades de los finos

Material	Nomenclatura	Peso Específico	Finura Blaine cm ² /gr	Absorción	Huecos (%)	Forma
Fly Ash	FA	2.196	2442	-	-	Esférica
Microsílíce	SF	2.200	-	-	-	Esférica
Finos por lavado	AS	2.673	-	1.09	47	Angular
Pomacita	PO	2.169	1235	1.49	47	Angular
Filler Silicio Calcáreo	FLL	2.462	484	0.82	40	Angular
Filler polvo de roca	FBB	2.611	4650	-	-	Angular

2.2 Diseño y Fabricación de Hormigones

El HAC es afectado por las características y por la proporción de los materiales. A diferencia de la dosificación convencional, donde la razón Agua/Cemento (W/C ratio) es determinada por la resistencia requerida, en el HAC la razón Agua/Material cementicio debe ser determinada considerando

además el requisito de autocompactación (Okamura y Ouchi, 1999).

Teniendo en cuenta estos lineamientos, la dosificación de los hormigones se realizó mediante un procedimiento modificado al propuesto por Faury (Díaz y Subía, 2001). Las dosificaciones empleadas son mostradas en la Tabla 4.

Tabla 4. Dosificaciones utilizadas (km/m³)

Material	Finos por lavado					Filler silíceo calcáreo					
	AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	FLL1	FLL2	FLL3	FLL4	FLL5	FLL6
Cemento	459	461	464	460	464	461	472	469	470	485	478
Gravilla	616	618	623	618	623	620	634	630	631	651	641
Arena	962	967	948	938	905	1037	1046	1027	1015	1004	989
Fino	107	107	135	134	162	21	35	48	60	102	101
Agua	133	133	134	132	151	144	148	148	149	155	154
Aditivo	6.89	5.53	6.96	8.28	6.96	6.92	7.08	7.04	7.05	7.28	5.74
Densidad	2285	2293	2311	2291	2312	2290	2341	2329	2332	2405	2369

Material	Filler polvo de roca				Pomacita				
	FBB1	FBB2	FBB3	FBB4	PO1	PO2	PO3	PO4	PO5
Cemento	470	477	481	463	467	468	472	477	470
Gravilla	636	645	651	610	628	629	639	640	632
Arena	1067	1066	1069	932	1015	993	1008	991	977
Fino	29	29	52	69	47	67	67	85	84
Agua	125	142	129	185	148	149	141	153	150
Aditivo	7.05	7.15	7.21	6.95	7.01	7.02	5.67	7.15	8.47
Densidad	2334	2367	2388	2266	2312	2313	2333	2353	2321

Material	Microsilíce					Fly Ash			
	SF1	SF2	SF3	SF4	SF5	FA1	FA2	FA3	FA4
Cemento	452	472	471	471	481	465	472	467	470
Gravilla	611	638	638	633	645	628	637	630	630
Arena	1020	1065	1065	1057	1050	1032	1021	985	990
Fino	28	29	29	29	53	29	51	72	73
Agua	123	128	127	138	142	142	145	145	151
Aditivo	3.61	4.72	5.66	7.07	7.21	6.97	7.08	7.01	5.64
Densidad	2237	2335	2335	2334	2377	2302	2333	2306	2320

2.3 Procedimientos de Ensayo

El objetivo de los ensayos de hormigón fresco para este tipo de hormigones es determinar la fluidez necesaria y la cohesión suficiente para que no se produzca segregación. Para determinar esas características una serie de métodos han sido propuestos en la literatura: flujo de cono invertido, caja L, caja tipo U, embudo tipo V, etc. La investigación consideró realizar los ensayos de flujo de cono y la caja L para determinar las propiedades autocompactantes de los hormigones realizados.

a) Flujo del Cono Invertido

El ensayo del flujo del cono invertido mide la fluidez del hormigón y su cohesión, además de controlar la segregación y la exudación. Es más de carácter cualitativo que cuantitativo. Para cumplir con las características de un HAC, los resultados deben cumplir con los siguientes requisitos:

- $65 \leq \text{Diámetro Máximo} \leq 75 \text{ cm}$
- $3 \leq \text{Tiempo en alcanzar un diámetro de } 50 \text{ cm} \leq 6 \text{ seg.}$
- Los bordes y la distribución del material deben ser homogéneos. Si esto no ocurre, se está en presencia de segregación.
- La estela de agua que queda en el borde debe ser inferior a 1 cm, un valor superior indica exudación del hormigón.

b) Caja L

El objetivo de este ensayo es determinar tres parámetros del hormigón que son vitales para su calidad de autocompactación: la capacidad del hormigón de pasar entre medio de la armadura y ser capaz de llenar todos los espacios de un moldaje, su capacidad de autonivelación y su fluidez.

El procedimiento del ensayo se desarrolla de acuerdo a los siguientes pasos:

- Se llena con hormigón el elemento vertical de la caja L.
- Se abre la compuerta y se comienza a cronometrar el tiempo hasta la marca de los 40 cm.
- Se miden las alturas H0 y HX indicadas en la Figura 1.
- Para que un hormigón sea catalogado como autocompactante, los resultados del ensayo deben cumplir con los siguientes requisitos:
 - $3 \leq \text{Tiempo en recorrer } 40 \text{ cm.} \leq 6 \text{ seg.}$
 - $HX / H0 \geq 0.8$ (razón entre alturas final e inicial, ver Figura 1)
 - El flujo del hormigón debe ser continuo y se debe verificar que no hay segregación.

Por otro lado, se realizaron ensayos de compresión cúbica a los hormigones con características autocompactantes a las edades de 3, 7 y 28 días, con el objeto de verificar su comportamiento.

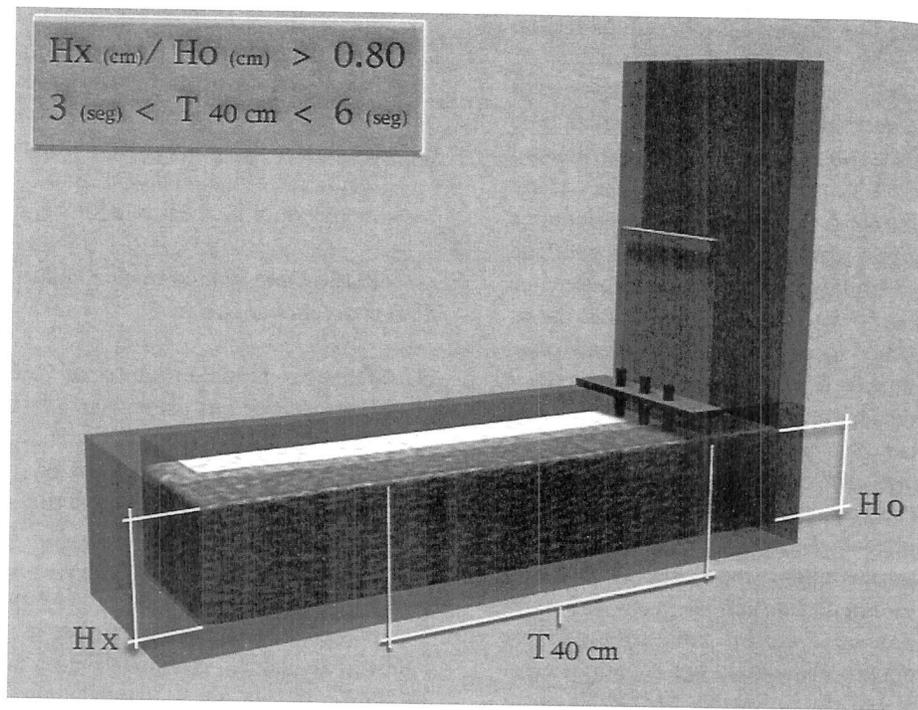


Figura 1. Esquema de ensayo caja L

3. RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados de ensayo obtenidos son resumidos en la

Tabla 5. En las siguientes secciones son presentados los diferentes efectos de los finos y aditivo en las propiedades del HAC.

Tabla 5. Propiedades de los hormigones autocompactantes

Tipo de Fino	N° Hgón.	Cantidad Finos (kg/m ³)	Dosis Aditivo (%)	Cono Invertido		Caja L		Segregación	Exudación
				Tiempo (seg)	Diámetro (cm)	Tiempo(seg)	Hx/H0 (cm)		
AS	1	107	1.5	3.3	70	2.5	0.8	NO	SI
	2	107	1.2	2.3	70.5	2.1	0.84	NO	SI
	3	134	1.8	4.3	69	3	0.8	NO	NO
	4	135	1.5	4	66	3.7	0.74	NO	NO
	5	162	1.5	5	67	3.7	0.77	NO	NO
FLL	1	21	1.5	4.3	74	1.5	0.94	SI	SI
	2	35	1.5	3.3	71	2.3	0.94	SI	SI
	3	48	1.5	5.7	74	2.7	0.96	SI	SI
	4	60	1.5	3	70	3	0.9	SI	SI
	5	101	1.2	4.3	74	4	0.88	NO	NO
	6	102	1.5	4.7	69.5	5.1	1	NO	NO
FBB	1	29	1.5	3.7	73	3.5	0.94	NO	SI
	2	29	1	4.7	69.5	3	0.83	NO	NO
	3	52	1.5	2.9	76.5	3.5	0.96	SI	NO
	4	69	1.5	<1	---	<1	---	SI	SI
PO	1	47	1.5	2.5	75.5	2.3	0.88	SI	SI
	2	67	1.5	3.9	69.5	4.3	0.88	NO	NO
	3	67	1.2	10	66	11.4	0.65	NO	NO
	4	84	1.5	7	67.5	6.9	0.91	NO	NO
	5	85	1.8	6.9	67.5	9.1	0.89	NO	NO
SF	1	28	0.8	3.1	60	3.1	---	NO	NO
	2	29	1	3	70	1.7	0.88	NO	NO
	3	29	1.2	2.2	75	1.7	0.95	SI	NO
	4	29	1.5	2	76	1.5	0.88	SI	NO
	5	53	1.5	1.7	79	1.9	0.88	SI	NO
FA	1	29	1.5	3.7	71	1.9	1	SI	SI
	2	55	1.5	3.7	71	2.5	1	NO	NO
	3	72	1.5	5.7	74	3.3	1	NO	NO
	4	73	1.2	6	74.5	5.5	1	NO	NO

3.1. Efecto de la Cantidad de Finos en las Propiedades del HAC

Entre los parámetros que afectan la trabajabilidad destaca la cantidad de finos utilizada en el hormigón. La cantidad de finos afecta la porosidad del hormigón y el área superficial total de los finos afecta tanto a las características de autocompactabilidad así como también las propiedades mecánicas del hormigón. En general, si el hormigón contiene muchos finos su fluidez disminuye. Por otro lado, si posee una pequeña cantidad de finos, no hay bastante mortero para cubrir a los áridos adecuadamente. Así, las cantidades de finos afectan la fluidez, cohesión y retención de agua, lo que podría producir segregación y exudación del hormigón, con todos los problemas asociados a ello. Por esta razón, es muy importante determinar apropiadamente la cantidad de finos a utilizar para fabricar HAC cuando la cantidad de cemento es una constante.

Del análisis de resultados se observa que los finos inertes (AS, FLL y FBB) muestran similar comportamiento respecto a la influencia de la cantidad de finos en las propiedades del HAC. Altas cantidades de material fino mejoran las características de autocompactabilidad hasta una cantidad límite, la cual depende del material fino utilizado. Más allá de este límite, la autocompactabilidad disminuye y se obtiene segregación, exudación o resultados fuera de los rangos previamente establecidos. Esta afirmación es confirmada en los resultados del fino FLL mostrados en la Figura 2.

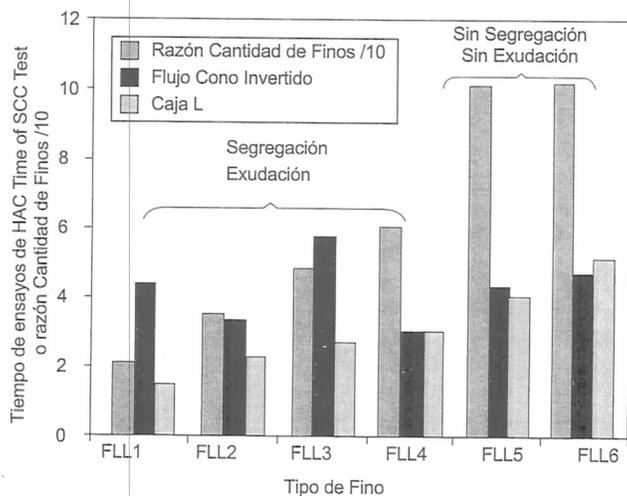


Figura 2. Resultados de hormigones autocompactantes fabricados con el fino FLL

Además, se observó que el fly ash (FA) mostró un comportamiento similar al de los finos inertes. Esto podría ser consecuencia de la esfericidad de las partículas de FA, actuando como verdaderos rodamientos dentro del hormigón en estado fresco, mejorando con ello la trabajabilidad.

Por otro lado, se observó un comportamiento completamente diferente en hormigones fabricados con microsilice. En la práctica fue imposible fabricar un HAC con este fino, lo que confirma las experiencias realizadas por Fang,

Jiaxiong y Changhui (1999). A continuación se sugiere una serie de razones que podrían explicar este comportamiento:

- Las partículas de SF son muy finas y livianas, por tanto, fáciles de ser adsorbidas por la superficie de los áridos y si la razón W/C es baja, se forman estructuras floculadas.
- Insuficiente tiempo de mezclado.
- Incompatibilidad entre la SF y el aditivo empleado.

Por lo tanto se recomienda la utilización de otro tipo de fino para fabricar HAC.

3.2 Efecto del Tipo de Fino en las Características del HAC

Los resultados muestran que es factible fabricar HAC con finos AS, FLL, FBB, PO y FA, variando las cantidades de finos y de aditivo. Por tanto, un análisis económico debe ser desarrollado para determinar qué tipo de fino emplear en la fabricación de HAC.

La principal característica de los finos que afectan el comportamiento de los HAC es la superficie específica. La Figura 3 presenta una relación entre la finura del material y la cantidad de material fino que debe ser adicionada para obtener un HAC. De esta figura se puede concluir que a medida que aumenta la finura y las partículas del árido van siendo más redondeadas, es posible obtener un HAC con una menor cantidad de finos.

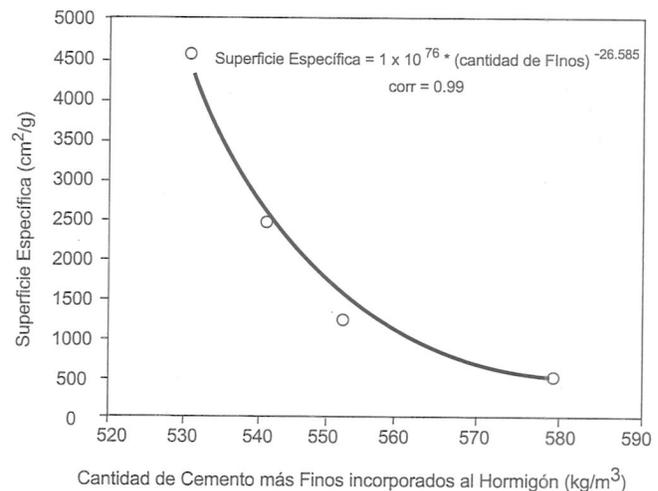


Figura 3. Relación entre superficie específica de los finos estudiados y la cantidad de material fino incorporado al hormigón (sólo resultados de hormigones HAC óptimos)

3.3 Influencia de la Cantidad de Aditivo en las Propiedades del HAC

La cantidad de aditivo tiene una importante influencia en las propiedades del HAC. Una sobre dosificación puede causar segregación, exudación y un aumento del costo del hormigón. Por otro lado, una cantidad insuficiente de aditivo producirá una baja fluidez y una pérdida de resistencia (Fang et al., 1999). Los resultados muestran que las cantidades óptimas de aditivo para ser usadas con los materiales finos estudiados están entre 1.2 - 1.8 % respecto del peso del cemento.

3.4 Resistencia a la Compresión de los HAC

La calidad del hormigón está frecuentemente relacionada con su resistencia, la cual depende del grado de compactación obtenido. La Figura 4 presenta los resultados de resistencia. Sólo los resultados de los hormigones con mejor comportamiento

respecto de las características de autocompactabilidad son mostrados (AS3, FLL5, FBB2, PO2, SF2 y FA3). Todos los hormigones presentan un desarrollo de resistencia normal, en promedio 30 MPa a los 28 días. Por tanto, es posible concluir que los hormigones poseen un adecuado grado de compactación.

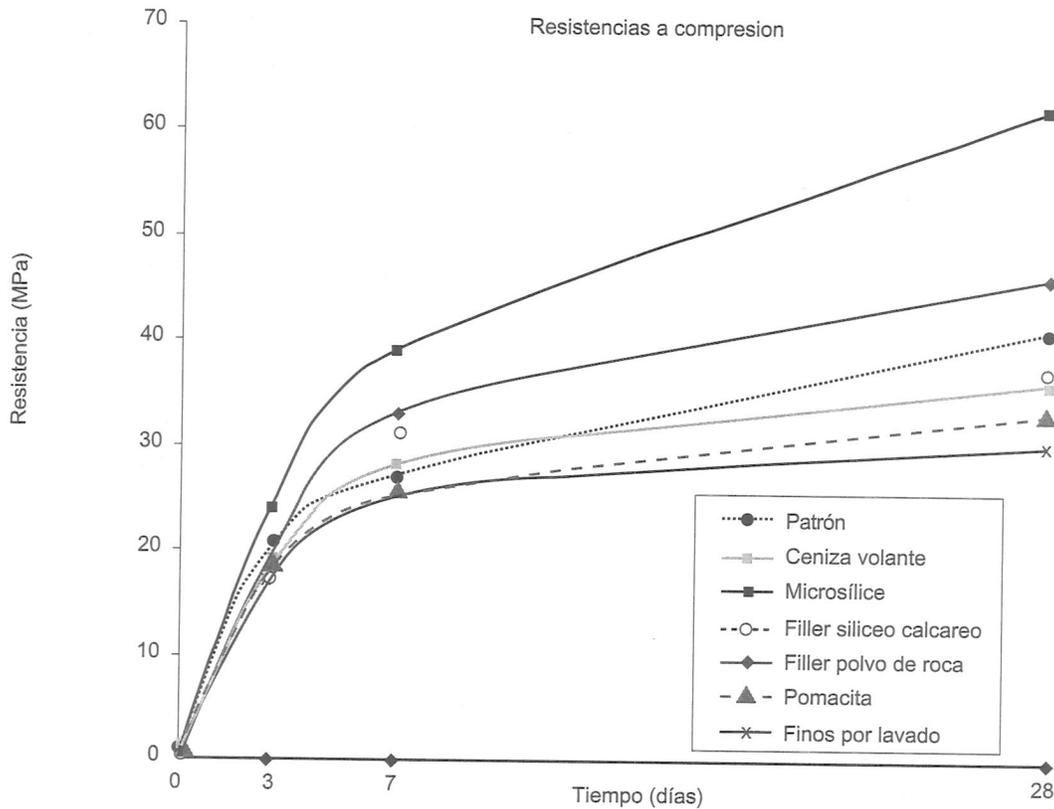


Figura 4. Desarrollo de la resistencia a la compresión de hormigones autocompactantes fabricados con diferentes finos

4. CONCLUSIONES

La adición de finos es muy importante en los hormigones autocompactantes. Los finos dan la cohesión y consistencia al hormigón para evitar la segregación y controlar la exudación.

Si no se incorpora al hormigón una cantidad suficiente de finos, se debe adicionar una mayor dosis de cemento. Lo que produce un aumento en el costo del hormigón y podría traer asociado problemas de agrietamiento por retracción térmica o hidráulica.

El comportamiento del hormigón es diferente para cada tipo y cantidad de fino utilizado, es decir, no existe un tipo así como tampoco una cantidad ideal de fino para producir un hormigón autocompactante.

La principal característica que afecta el desempeño de los hormigones autocompactantes es su superficie específica. Si bien la cantidad de finos necesaria para obtener un hormigón autocompactante es distinta para cada fino en particular, existe una relación directa entre la finura del material y la cantidad que se debe adicionar: A mayor finura menor es la cantidad de

árido requerido y viceversa.

La dosis de aditivo necesaria para obtener un hormigón autocompactante es diferente para cada tipo de fino estudiado. Se requiere una menor cantidad de aditivo para los finos que poseen mayor superficie específica.

Finalmente, cuando se utilice un material de mayor finura se recomienda aumentar el tiempo de mezclado, de tal manera de lograr que todos los componentes se mezclen de buena forma. Este efecto se comprobó en los hormigones fabricados con ceniza volante, microsilíce y filler, requiriéndose de un mayor tiempo de mezclado.

5. AGRADECIMIENTOS

Este artículo está basado en la memoria de los Ingenieros Civiles Gonzalo Díaz y Oscar Subía. Los autores agradecen su trabajo para llevar a buen término la presente investigación. Además, se agradece la donación de materiales y cooperación de las empresas Polpaico y SIKA.

6. REFERENCIAS

- BUI, V.K. y MONTGOMERY, D. (1999), Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume. First International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm.
- DE LA PEÑA, B. (2000), Propiedades y Uso del Hormigón Autocompactante. Revista de Ingeniería de Construcción. Vol. 15, N°2, pp.74-80.
- DÍAZ, G. y SUBIA, O. (2001), Determinación de la influencia de los áridos finos en las propiedades del hormigón autocompactante. Memoria de Ingeniero Civil. Universidad de Santiago de Chile.
- FANG, W., JIANXIONG, C. y CANGHUI, Y. (1999), Studies on Self-Compacting high performance concrete with high volume mineral additives. First International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm.
- JIANXIONG, C., XINCHENG, P. y YUBIN, H. (1999), A Study of Self-Compacting HPC with superfine sand and pozzolanic additives. First International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm.
- OKAMURA, H. (1997), Self-Compacting High-Performance concrete. Concrete international, July 1997, pg.50.
- OKAMURA, H. y OUCHI, M. (1999), Self-Compacting Concrete. Development, present use and future. First International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm.

Carlos Aguilar

Ingeniero Civil

Profesor Instructor

Departamento de Ingeniería en Obras Civiles

Universidad de Santiago de Chile

Candidato a Doctor

Pontificia Universidad Católica de Chile

Santiago, Chile

Civil Engineer

Lecturer in Civil Engineering

Departamento de Ingeniería en Obras Civiles

Universidad de Santiago de Chile

Ph.D. candidate

Pontificia Universidad Católica de Chile

Santiago, Chile

caguilar@lauca.usach.cl

Hugo Barrera

Ingeniero Civil

Profesor Asistente

Departamento de Ingeniería en Obras Civiles

Universidad de Santiago de Chile

Santiago, Chile

Civil Engineer

Assistant Professor

Departamento de Ingeniería en Obras Civiles

Universidad de Santiago de Chile

Santiago, Chile