



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstruccion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile  
Chile

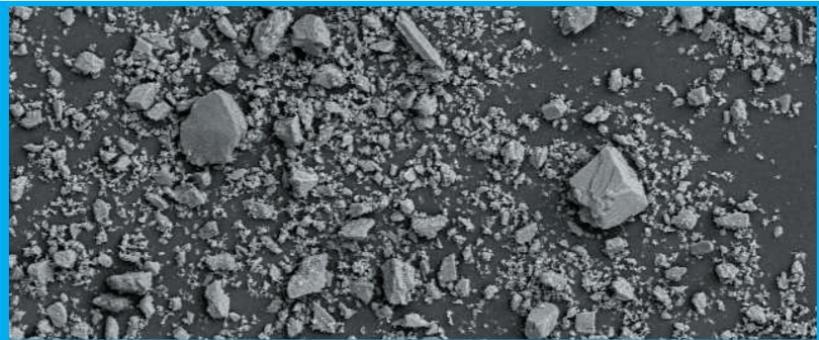
SILVA, Y.; BURGOS, D.; VALENCIA, W; DELVASTO, S; ALVAREZ, J.  
Concretos autocompactantes a partir de lodo calcáreo de la industria papelera  
Revista de la Construcción, vol. 12, núm. 2, noviembre, 2013, pp. 166-176  
Pontificia Universidad Católica de Chile  
Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127629284013>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en [redalyc.org](http://redalyc.org)

*Self-compacting Concretes  
using Calcareous Slurry from  
the Paper Industry*

# Concretos autocompactantes a partir de lodo calcáreo de la industria papelera



## Autores

**SILVA, Y.** Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería de Materiales, GMC.  
CP: 76001000, Cali, Colombia  
yimmy.silva@correounalvalle.edu.co

**BURGOS, D.** Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería de Materiales, GMC.  
Cali, Colombia  
diana.burgos@correounalvalle.edu.co

**VALENCIA, W** Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería de Materiales, GMC.  
Cali, Colombia  
william.gustavo.valencia@correounalvalle.edu.co

**DELVASTO, S** Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería de Materiales, GMC.  
Cali, Colombia

**ALVAREZ, J.** Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería de Materiales, GMC.  
Cali, Colombia

**Fecha de recepción** 1/4/2013

**Fecha de aceptación** 1/8/2013

Código interno RDLC 0118

## Resumen

En este artículo se estudiaron las propiedades en estado fresco y endurecido de un concreto autocompactante adicionado con lodo calcáreo proveniente de una industria papelera (CALC) en proporciones de 35% y 50% en peso de cemento como adición mineral. Se utilizó como referencia un concreto autocompactante adicionado con caliza comercial molida (CACC). Las propiedades evaluadas de los concretos autocompactantes incluyeron trabajabilidad, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, porosidad y absorción, y succión capilar. La trabajabilidad del concreto autocompactante en estado fresco se determinó utilizando el cono de Abrams, la caja en L y el embudo

en V. La resistencia a la compresión se evaluó a diferentes días de curado (3, 7, 28 y 90 días), los ensayos de permeación se realizaron a 28 días de curado y el módulo de elasticidad se determinó a 90 días de curado. Los resultados mostraron que a 28 días de curado los concretos autocompactantes adicionados con 35% de la caliza comercial molida (CACC-2) presentaron una resistencia a la compresión superior en un 16,4% en comparación con los concretos adicionados con 35% de lodo calcáreo (CALC-2). A su vez, estas mezclas se destacan por presentar menor porosidad y mayor resistencia a la penetración de agua.

**Palabras clave:** Lodo calcáreo; caliza comercial molida; concreto autocompactante, trabajabilidad, propiedades en estado endurecido.

## Abstract

*This paper presents a study on the fresh and hardened properties of self-compacting concretes using residual calcareous slurry from the paper industry as filler in proportions of 35% and 50% by weight of cement. The results were compared with self-compacting concretes added with limestone powder at the same proportions. The examined properties include workability, compressive strength, elastic modulus, porosity and water abortion. Workability of fresh concrete was determined by using the slump-flow test, L-box test and V-funnel test. The compressive strength was determined at different ages (3, 7, 28*

*y 90 days), the permeability tests were carried out at 28 days and the elastic modulus at 90 days. The results show that it is possible to successfully utilize calcareous slurry as mineral admixtures in producing medium strength self-compacting concrete. Although the self-compacting concrete added with 35% of limestone powder showed an improvement of 16,4% in compressive strength, compared with the self-compacting concrete added with 35% of calcareous slurry. At the same time, this concrete presented low porosity and water permeability.*

**Keywords:** *Calcareous slurry, limestone powder, self-compacting concrete, workability and hardened properties..*

## 1. Introducción

En la actualidad la industria de la construcción, el diseño y el colado del concreto en estructuras, ha ido cambiando y evolucionando al igual que los avances tecnológicos que aspiran a incrementar al máximo la libertad de diseño de las obras. El concreto autocompactante por sus características se adapta fácilmente a las exigencias modernas, esto se debe básicamente a que tiene la capacidad de fluir y consolidarse bajo su propio peso y al mismo tiempo, es lo suficientemente cohesivo para llenar todos los espacios, de casi cualquier tamaño y forma, sin segregación y sangrado. Estas características, además de ser muy útiles en la construcción de estructuras complejas y densamente armadas, permiten reducir el tiempo de colocación de la obra y disminuir los costos asociados al proceso de compactación (Kosmatka *et al.*, 2004; Persson, 2001; Sonebi, 2004).

Para lograr las características en estado fresco del concreto autocompactante es necesario el uso de superplastificantes y mayor cantidad de partículas finas, o el uso de agentes modificadores de viscosidad, que en conjunto logran una mezcla fluida y lo suficientemente cohesiva para no presentar segregación y sangrado (Kosmatka *et al.*, 2004). Las partículas finas incluyen tanto el cemento como las adiciones, ya sean reactivas o inertes. El filler de piedra caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) es la adición inerte más utilizada en la fabricación de concreto autocompactante y su función es considerada principalmente de carácter físico; sin embargo, algunos investigadores como (Bonavetti, Donza, Rahhal, & Irassar, 2000; Péra, Husson, & Guilhot, 1999) exponen que este sí interviene en los procesos químicos durante la hidratación, y aunque no reaccione químicamente con los otros componentes, las partículas de caliza funcionan como catalizadores del proceso de hidratación, actuando como centros de nucleación (Becker, n.d.). Esto fue comprobado por Péra *et al.* (1999) y Poppe *et al.* (2005) quienes en sus respectivas investigaciones demostraron que las reacciones de hidratación del cemento Portland fueron claramente influenciados por la adición de filler calizo.

En cuanto al efecto de la adición del filler calizo en las propiedades de los concretos autocompactantes, diferentes autores exponen que mejora la trabajabilidad y genera una mezcla muy cohesiva, que permite la reducción del sangrado; además, de incrementar la deformabilidad y disminuir en algunos casos los requerimientos de agua y superplastificantes de la mezcla en estado fresco. En cuanto a las propiedades mecánicas y de durabilidad se puede llegar a tener buenos resultados si se cuenta con una granulome-

tría adecuada del filler calizo que logre aumentar la compacidad y de esta forma disminuir la porosidad, lo cual se refleja en la resistencia y durabilidad del concreto (Bonavetti *et al.*, 2000; Heikal *et al.*, 2000; Jaramillo *et al.*, 2008; Trägårdh, 1999; Uysal *et al.*, 2011; Violeta 2003; Zhu *et al.*, 2005). En los últimos años los avances en la tecnología del concreto se han enfocado en gran medida a desarrollar procesos y materiales que apoyen la sostenibilidad medioambiental. Para esto, diversos investigadores han profundizado en la utilización de una gran variedad de subproductos y residuos industriales. Por ejemplo, Valdez *et al.* (2010) evaluaron los lodos de la industria del mármol y los resultados demostraron una ganancia de fluidez de los concretos autocompactantes. Además, de presentar resistencias superiores a las de los concretos autocompactantes sin adición a edades tempranas Rodríguez-Viacava *et al.*, (2012) encontraron que el uso de pequeñas cantidades de cemento sin disminuir la cantidad de finos (utilizando filler proveniente de un horno de cemento), resulta en una reducción en el costo de la producción de un concreto autocompactante en este caso de mediana resistencia (35 MPa), haciendo uso de un 30% de reemplazo de cemento por el filler. Por esta razón, en este estudio se evalúa la posibilidad de utilizar un residuo (lodo calcáreo) de una industria papelera, como ayuda reológica para la producción de concreto autocompactante y se evalúa el efecto de la incorporación de este filler en la trabajabilidad y las propiedades mecánicas de los concretos autocompactantes.

## 2. Metodología experimental

### 2.1. Materiales y métodos

Para este estudio se utilizó un cemento Portland tipo I, el cual contaba con las especificaciones de la norma Colombiana NTC 321. Como agregado fino se utilizó una arena de río y como agregado grueso una grava natural triturada con un tamaño máximo nominal de 12,7 mm; valor que se ajusta a los requerimientos de la norma EFNARC (2002). En la Tabla 1 se encuentra la granulometría tanto de la grava como de la arena utilizada, y en la Tabla 2 se presentan las características físicas de estos agregados que sirvieron de punto de partida para el diseño de los concretos autocompactantes. Además, se utilizó un aditivo superplastificante de última generación (Sika ViscoCrete 2100). Como adiciones se utilizaron caliza comercial molida de alta pureza (Omyacarb 6) y un subproducto de una industria papelera (Lodo Calcáreo). La caracterización física de los materiales incluyó la determinación del tamaño de partícula y su distribución granulométrica mediante granulometría láser; la morfología, topo-

grafía y estructura de las partículas de la caliza y del lodo calcáreo se observó por medio de la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB).

**Tabla 1.** Distribución de tamaño de partículas de los agregados

Tamaño del Tamiz (mm)	% Masa pasa acumulado	
	Grava	Arena
19	100	100
12,7	91.36	100
9,52	38.95	98.77
4,75	1.94	95.67
2,36	0,26	89.47
1,18	0	78.77
0,60	0	64.74
0,30	0	38.52
0,15	0	4.52
Fondo	0	0

**Tabla 2.** Características de los agregados

Propiedad	Arena (x10 <sup>3</sup> )	Propiedad	Grava (x10 <sup>3</sup> )
Peso Específico	2,58 kg/m <sup>3</sup>	Densidad Aparente	2,71 kg/m <sup>3</sup>
Peso Unitario Seco	2,43 kg/m <sup>3</sup>	Densidad Nominal	2,84 kg/m <sup>3</sup>
Peso específico aparente y saturado	2,49 kg/m <sup>3</sup>	Densidad saturada y superficialmente seca	2,75 kg/m <sup>3</sup>
Absorción	2,6%	Absorción	1,7%

## 2.2. Preparación de las muestras y ensayos

Para esta investigación se varió el contenido total de finos con el fin de obtener las características adecuadas de un concreto autocompactante. Para esto, se incorporaron las adiciones (tanto la caliza comercial

molida como el lodo calcáreo) a las mezclas de concreto autocompactante en proporciones de un 30% y un 50% respecto al contenido de cemento; la relación agua/cimentante varió en un rango de 0.44 a 0.49 y la dosificación óptima de superplastificante (ViscoCrete 2100) para las diferentes mezclas se obtuvo por medio de pruebas preliminares variando las proporciones del mismo. En la Tabla 3 se presentan las proporciones óptimas de superplastificante y las relaciones agua/cimentante de acuerdo al porcentaje de adición de caliza comercial molida o lodo calcáreo. Finalmente, una vez obtenidas las proporciones óptimas de la mezcla se realizaron en total 4 mezclas (Tabla 4), a las cuales se les evaluaron las propiedades en estado fresco y endurecido.

**Tabla 3.** Relaciones agua/cimentante y proporciones de aditivo óptimas

Mezcla	Relación (a/c)	Superplastificante (ViscoCrete 2100) (%)	Caliza Comercial Molida (%)	Lodo Calcáreo (%)
CACC-1	0,44	1,2	50	0
CACC-2	0,44	1,2	35	0
CALC-1	0,49	2,5	0	50
CALC-2	0,48	1,7	0	35

**Tabla 4.** Proporciones de mezcla de los CAC con adición de caliza y lodo calcáreo

Material (kg/m <sup>3</sup> )	CACC-1	CACC-2	CALC-1	CALC-2
Cemento	450	450	450	450
Grava	795	795	795	795
Arena	895	895	895	895
Agua	200	200	220,5	216
Aditivo	5,4	5,4	11,25	7,69
A/C	0,44	0,44	0,49	0,48
Caliza	225	157,5	-	-
Lodo	-	-	225	157,5

Los ensayos en estado fresco se llevaron a cabo siguiendo los ensayos y especificaciones propuestas por la asociación europea (EFNARC 2002). Estos ensayos incluyen: flujo de asentamiento para evaluar el flujo libre en ausencia de cualquier obstrucción y la resistencia a la segregación; la caja en L para evaluar el flujo a través de las barras de acero de refuerzo; y el embudo en V para estimar la viscosidad de los concretos autocompactantes por medio de la velocidad de flujo. Los ensayos mecánicos fueron realizados a diferentes días de curado (3, 7, 28 y 90 días) y los ensayos de permeabilidad se realizaron a 28 días de curado. Se utilizaron probetas cilíndricas de 152,4 mm de diámetro y 304,8 mm de altura para los ensayos de resistencia a la compresión (ASTM C39-09) y módulo de elasticidad (ACI 318), y probetas de 76,2 mm de diámetro y 50,8 mm de altura para las pruebas de absorción y porosidad (ASTM C642), y Succión Capilar (Estándar Europeo SIA162/1).

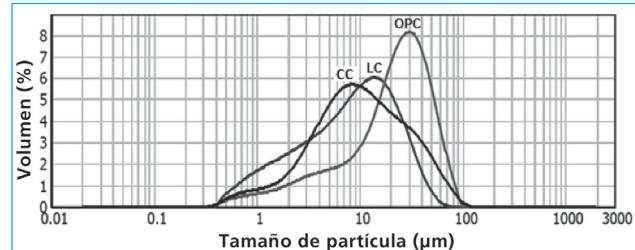
### 3. Resultados y discusiones

#### 3.1. Caracterización de las adiciones

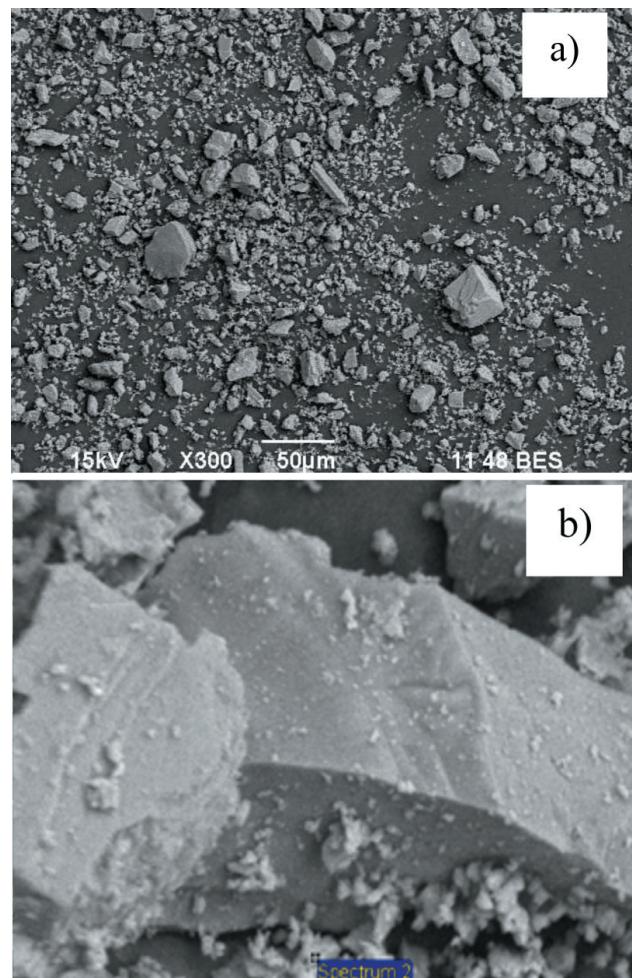
El lodo calcáreo proveniente de una industria papelera fue sometido a un proceso de molienda de 90 minutos en un molino con cuerpos moledores esféricos metálicos, alcanzando un tamaño de partícula similar al de la caliza comercial molida, lo cual facilitó la comparación del efecto que producen estos dos materiales en las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto autocompactante. No obstante la caliza comercial molida es más fina que el lodo calcáreo (11,72 y 15,89  $\mu\text{m}$ , respectivamente). Las curvas granulométricas de la Figura 1 muestran que ambos materiales (caliza comercial y lodo calcáreo) presentan mayor volumen de partículas de tamaño inferior a 10  $\mu\text{m}$  (aproximadamente el 50%) comparados con el cemento Portland tipo I. La caracterización morfológica de la caliza comercial molida y el lodo calcáreo se puede observar en las Figuras 2 y 3, respectivamente. En la Figura 2 se puede observar que la caliza molida presenta partículas de diversos tamaños, las de mayor tamaño exhiben una morfología cúbica y algo irregulares, con superficie lisa y extremos agudos, las cuales están rodeadas de partículas esponjosas de menor tamaño (Felekoglu 2007). En cuanto a la morfología del lodo calcáreo, se puede observar en la Figura 3 que este material está compuesto por partículas menos irregulares y sin extremos agudos comparado con la morfología de la caliza comercial molida. Además, estas partículas presentan una superficie porosa, por lo que se podría asumir que son menos densas que las partículas de caliza comercial molida las cuales eran más compactas y por esta razón las mezclas a las cuales se les incorporó el lodo calcáreo demandaron una mayor cantidad

de agua, comparado a las mezclas a las cuales se les incorporó la caliza comercial molida.

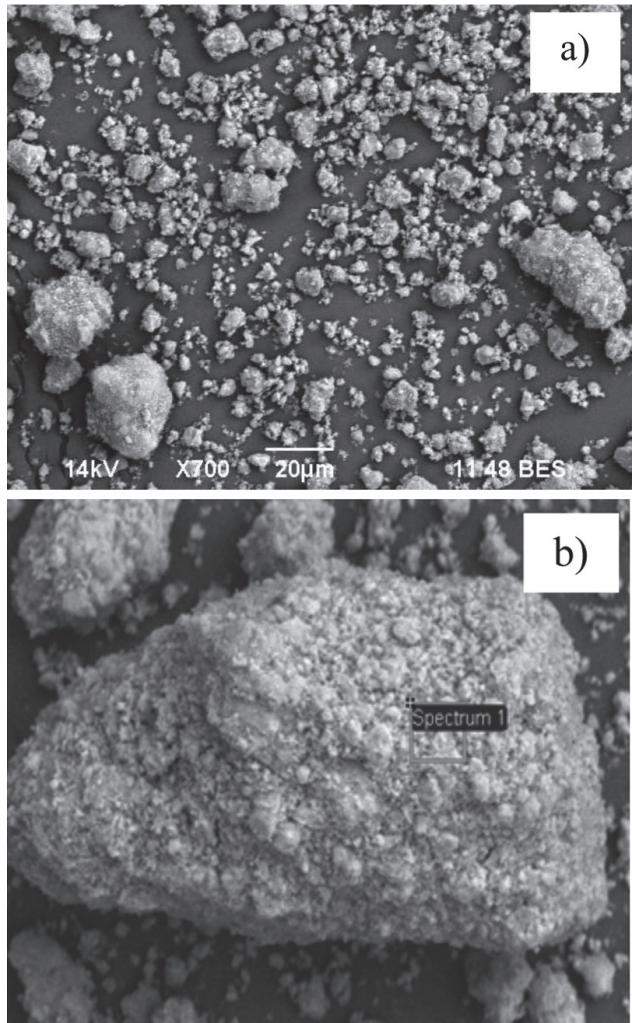
**Figura 1.** Tamaño de partícula determinado por granulometría láser (OPC: cemento Portland tipo I, CC: Caliza comercial molida y LC: lodo calcáreo)



**Figura 2.** Micrografías de la caliza comercial molida, a) 300X y b) 5000X



**Figura 3.** Micrografías del lodo calcáreo, a) 700X y b) 5000X



En la Tabla 5 se presenta la composición química de la caliza comercial molida, lodo calcáreo y cemento Portland tipo I. Se puede observar que el cemento está compuesto principalmente de óxido de calcio (CaO) y sílice (SiO<sub>2</sub>); y en menor proporción de alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxidos de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxidos de Magnesio (MgO), entre otros. El cemento tiene una densidad relativa de 3.05 g/cm<sup>3</sup> y una finura Blaine de 4253 cm<sup>2</sup>/g. La caliza comercial molida contiene principalmente 85,38% de CaCO<sub>3</sub> y 8,5% de SiO<sub>2</sub>, y el lodo calcáreo proveniente de la industria papelera está compuesto principalmente de CaCO<sub>3</sub> en un 99,3%.

**Tabla 5.** Composición química del cemento y de las adiciones

Compuesto	Cemento (%)	Caliza Comercial Molida (%)	Lodo calcáreo (%)
SiO <sub>2</sub>	21,57	8,5	0,3
CaO	58,29	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,19	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,22	-	-
MgO	1,67	-	0,04
Na <sub>2</sub> O	0,17	-	-
K <sub>2</sub> O	0,21	-	-
SO <sub>3</sub>	2,03	-	-
Producto Insoluble	7,61	-	-
Cal Libre	0,86	-	-
CaCO <sub>3</sub>	-	85,38	99,3
Otros Minerales	-	6,12	-

### 3.2. Ensayos del concreto autocompactante en estado fresco

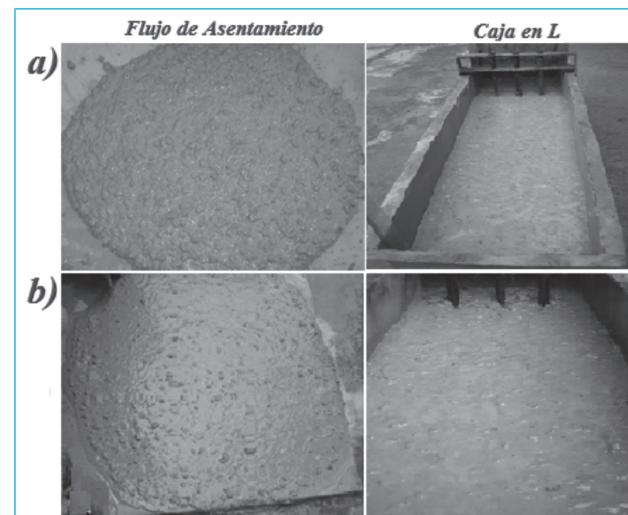
Los resultados de los ensayos de trabajabilidad en estado fresco de las mezclas de concreto adicionados tanto con caliza comercial molida como con lodo calcáreo son presentados en Tabla 6, los cuales evidencian que en general las mezclas presentaron buena trabajabilidad y cumplen los parámetros establecidos en la norma (EFNARC, 2002) para considerar un concreto como autocompactante. En general todas las mezclas de concreto realizadas lograron valores de flujo de asentamiento en un rango entre 650 - 800 mm que son los valores requeridos por dicha normativa. Nagataki *et al.* (1995) exponen que un concreto autocompactante con un flujo de asentamiento menor a 500 mm se considera que no tiene el flujo suficiente para pasar a través de estructuras fuertemente reforzadas, y un flujo de asentamiento mayor a 700 mm corre riesgo de segregación. En el caso de las mezclas de concreto estudiadas en esta investigación, estas presentaron un flujo de asentamiento superior a los 700 mm; sin embargo, no se observaron signos de segregación, por el contrario las mezclas fueron homogéneas y cohesivas (Figura 4). El otro ensayo que se utilizó para evaluar las propiedades en estado fresco de las mez-

clas de concreto fue el ensayo de caja en L, del cual se obtuvieron resultados muy satisfactorios, ya que la relación de bloqueo ( $H_2/H_1$ ) de todas las mezclas evaluadas estuvieron muy cerca de 1, valor que según los parámetros de EFNARC (2002) indica que el concreto tiene buen flujo sin presentar riesgo de bloqueo de los áridos entre las barras de refuerzo. Por último, las mezclas de concreto evaluadas por medio del ensayo del embudo en V para medir la facilidad de fluir a través de un espacio reducido, evidenciaron que todas las mezclas cumplieron con los parámetros, encontrándose en un rango entre 8 y 12 segundos, tiempos que se consideran apropiados, ya que las mezclas presentan una viscosidad adecuada para llenar espacios reducidos sin presentar susceptibilidad al bloqueo de los áridos. En términos reológicos, si se consideran los parámetros de flujo de asentamiento y tiempo de flujo como medidas indirectas de la tensión umbral y la viscosidad de la mezcla, se puede observar que las cuatro mezclas de concreto alcanzan combinaciones adecuadas en términos generales; baja tensión umbral (buena fluidez) y una moderada viscosidad (que evite la segregación), por lo que pueden ser considerados como concretos autocompactantes.

Por otra parte, al comparar los resultados de las propiedades en estado fresco de los concretos autocompactantes adicionados con caliza comercial molida (CACC) y lodo calcáreo (CALC), se encontró que los valores de flujo de asentamiento y tiempo de flujo de las mezclas CACC fueron mejores comparados con los valores de las mezclas CALC, a pesar de que estos últimos requirieron de una mayor cantidad agua y aditivo superplastificante. Esto podría ser explicado a partir del menor tamaño de partícula que presenta la caliza

comercial molida, ya que según Uysal *et al.* (2011) este factor mejora la distribución de partículas del esqueleto de materiales finos, reduciendo la fricción entre las mismas y el número de espacios vacíos dentro de dicho esqueleto, lo cual incrementa el factor de empaquetamiento y disminuye la resistencia al flujo. Por otra parte, no se observaron cambios significativos en los resultados de los diferentes ensayos al variar la proporción de las adiciones.

**Figura 4.** Inspección visual de la resistencia a la segregación de los concretos autocompactantes a) CACC-1 b) CALC-1



**Tabla 6.** Resultados de los ensayos en estado fresco de los concretos autocompactantes

Propiedad	Métodos de ensayo	Unidad	Valores recomendados EFNARC	CACC-1	CACC-2	CALC-1	CALC-2
Capacidad de relleno	Flujo de asentamiento Embudo V	mm s	650 a 800 6 a 12	750 9,5	750 10	720 11	720 11,3
Capacidad de paso	Caja en L	( $h_2/h_1$ )	0,8 a 1	1	0,99	0,96	0,99

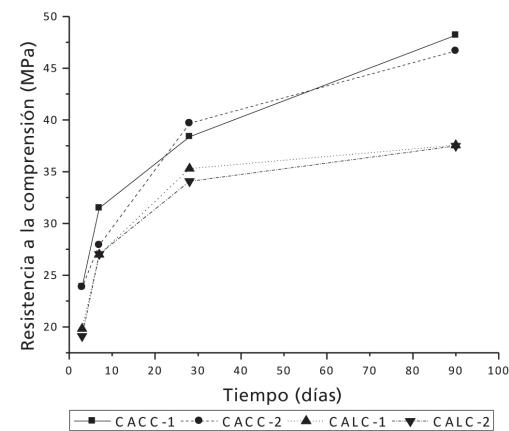
### 3.3. Ensayos mecánicos

En la Figura 5 se presentan los resultados de resistencia a la compresión de los concretos autocompactantes a diferentes días de curado, donde se puede observar que la caliza comercial molida es la adición que mejor desempeño mecánico produjo en los concretos autocompactantes. A 28 días de curado se puede observar que los concretos autocompactantes adicionados con 50% y 35% de caliza comercial molida (CACC-1 y CACC-2) presentaron resistencias a la compresión superiores a la de los concretos autocompactantes adicionados con lodo calcáreo en las mismas proporciones (CALC-1 y CALC-2), en órdenes del 8,75% y 16,4% respectivamente. Este comportamiento se mantuvo hasta el final del ensayo. Por otra parte, en la Figura 6 se presentan los resultados del módulo de elasticidad de los concretos autocompactantes adicionados tanto con caliza comercial molida (CACC) como con lodo calcáreo (CALC) a 90 días de curado, en los cuales se puede observar que los CACC presentaron módulos de elasticidad superiores que los CALC, independientemente de la proporción utilizada. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en la resistencia a la compresión, lo que confirma la correlación que existe entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, además del efecto favorable de la caliza comercial molida sobre las propiedades mecánicas del concreto autocompactante.

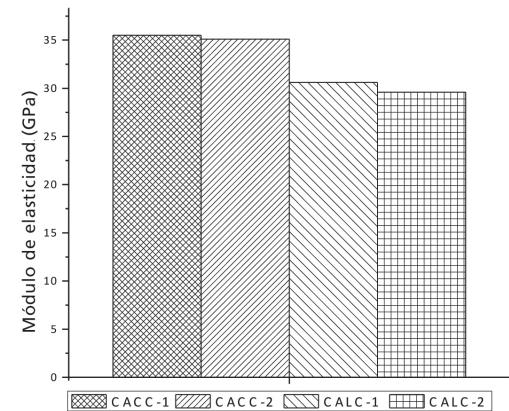
Las diferencias anteriormente expuestas podrían ser atribuidas a las características físicas de ambas adiciones, ya que al tener la caliza comercial molida menor tamaño de partícula, tiene mayor facilidad de ocupar o llenar espacios disponibles (conocido como *Efecto Filler*), mejorando la distribución de partículas del cementante, y de este modo se genera una zona de transición más densa y homogénea entre la pasta y los agregados (Uysal *et al.*, 2011; Violeta, 2003; Zhu *et al.*, 2005), lo cual mejora el desempeño mecánico de los concretos autocompactantes adicionados con caliza comercial molida (CACC) a los diferentes días de curado. Adicionalmente, la superficie de la caliza comercial molida pudo haber tenido mayor afinidad con las fases hidratadas del cemento al tener mayor superficie específica, facilitando de esta forma la nucleación de los productos iniciales de hidróxido de calcio (CH) y silicatos cárnicos hidratados (CSH), lo cual aceleraría el proceso de hidratación del cemento y consecuentemente incrementaría la resistencia a compresión del concreto. Otro factor que pudo haber influido en las propiedades mecánicas de los concretos autocompactantes es la relación agua/cementante y aditivo superplastificante, ya que fueron superiores en los concretos autocompactantes adicionados con lodo calcáreo. Según la ley de Abrams la resistencia

es proporcional a la relación agua/cementante en el concreto; por lo tanto, a medida que se reduce esta relación, mayor será la resistencia. Al utilizar los aditivos superplastificantes se tiende a reducir dicha relación obteniendo máxima resistencia para un contenido de cemento y trabajabilidad dada (De la Peña & Vernal, 2003). Sin embargo, un exceso en el contenido de superplastificante tiende a causar caídas en las resistencias del concreto. Esto fue corroborado por Mena (2004) quien concluyó que con la incorporación de 0,7% de aditivo superplastificante logró reducir el contenido de agua hasta en un 15%, lo cual generó mejoras en la resistencia y la fluidez de los concretos autocompactantes; sin embargo, por encima de esta dosificación la resistencia de los concretos disminuyó.

**Figura 5.** Resistencia a la compresión de los concretos autocompactantes adicionados con caliza comercial molida y lodo calcáreo a 3, 7, 28 y 90 días de curado.



**Figura 6.** Módulo elasticidad a 90 días de curado.



### 3.4. Estudio de permeabilidad

En la Tabla 7 se presentan los resultados de los ensayos de permeación para cada concreto autocompactante estudiado. Los resultados evidenciaron que el concreto autocompactante adicionado con 50% de lodo calcáreo (CALC-1) es el que presenta el mayor porcentaje de poros totales, seguido por CACC-2 y CALC-2, y por último el que presenta menor porosidad total es el concreto autocompactante con 50% de caliza comercial molida (CACC-1). Este comportamiento puede ser atribuido a la relación agua/cimentante y al contenido de aditivo superplastificante, ya que en el CALC-1 se utilizó la mayor proporción de agua y aditivo comparado con el resto de concretos autocompactantes, lo cual se reflejó en la porosidad y en el desempeño mecánico de estos concretos. Caso contrario se presentó en los concretos en los que se utilizaron relaciones agua/cimentante menores, esto lógicamente está asociado a los cambios microestructurales de la pasta de cemento, siendo menos porosa cuanta menor es la cantidad de agua utilizada en la dosificación.

Este comportamiento se corroboró con los resultados del ensayo de succión capilar, ya que demostraron que los concretos autocompactantes fabricados con menores relaciones de agua/cimentante y menor cantidad de superplastificante (CACC), fueron los que presentaron mayor coeficiente de resistencia a la penetración de agua ( $m$ ), menor coeficiente de absorción ( $K$ ) y menor porosidad efectiva ( $\epsilon_0$ ) comparado con el resto de concretos (CALC). Este comportamiento también podría estar relacionado con la adición utilizada, como ya se ha mencionado anteriormente, la caliza comercial molida tiene menor tamaño de partícula y mayor área superficial, lo cual mejora la distribución de partículas del cimentante y aumenta los sitios de nucleación de los productos de hidratación, generando una matriz y una zona de transición interfacial alrededor de los agregados más densa y homogénea con una estructura porosa más refinada (Assié, Escadeillas, & Waller, 2007; Bermejo, Moragues, Gálvez, &

Fernández, 2010; Valcuende, Parra, & Benlloch, 2005; W Zhu & Bartos, 2003).

### Conclusiones

Tomando en cuenta las características de los materiales y dosificación utilizadas en las mezclas de los concretos autocompactantes, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Se pudo observar que la dosificación del superplastificante y el contenido de agua dependen del tipo de adición utilizada independientemente de su finura, obteniendo mayor demanda de agua y superplastificante en las mezclas adicionadas con lodo calcáreo (CALC) para obtener las características de un concreto autocompactante. En general todas las mezclas cumplieron las características de autocompactabilidad requeridas por EFNARC (2002). No obstante, la adición de caliza comercial molida fue la adición con la que se obtuvieron los valores más cercanos a los establecidos para los ensayos de flujo de asentamiento, caja en L y embudo en V. Este comportamiento fue atribuido a las características físicas de la caliza comercial molida (tamaño de partícula y finura) que pueden mejorar considerablemente el empaquetamiento de las partículas y la deformabilidad de la pasta cementicia.

En el estado endurecido los concretos autocompactantes adicionados con caliza comercial molida (CACC) lograron mayores valores en las propiedades mecánicas y menor porosidad y absorción de agua comparado con los concretos autocompactantes adicionados con lodo calcáreo (CALC). Este comportamiento fue atribuido al mayor empaquetamiento que las partículas de la caliza comercial molida genera en el material cementicio y la afinidad de la misma con los productos de hidratación, actuando como sitios de nucleación acelerando los procesos de hidratación y produce una mayor densificación de la matriz y la zona de transición

**Tabla 7. Resultados ensayos de permeación**

Propiedades de permeación		CACC-1	CALC-1	CALC-1	CALC-2
Resultados Succión capilar	K ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}$ )	0,015	0,013	0,016	0,017
	$m$ ( $\times 10^7 \text{ s}/\text{m}^2$ )	3,840	4,010	3,810	3,630
	Porosidad efectiva $\epsilon_0$ (%)	9,0	7,8	9,9	13
Resultados Porosidad y absorción	Porosidad total (%)	12,83	14,3	18,23	14,10

interfacial en los concretos autocompactantes, lo cual se ve reflejado en el desempeño mecánico y durable de dichos concretos.

Considerando que el desempeño tanto en estado fresco como en estado endurecido de los concretos autocompactantes adicionados con lodo calcáreo fue similar al concreto de referencia (adicionado con caliza comercial molida), se pudo concluir que el lodo calcáreo proveniente de la industria papelera, es un filler adecuado en la producción de concretos autocompactantes de mediana resistencia (35 MPa a 28 días) bajo

las condiciones de esta investigación. Esto representa numerosas ventajas desde el punto de vista ambiental y económico, ya que se está aprovechando un desecho industrial, que implica ser trasladado a un vertedero autorizado con el costo que ello representa. Por otro lado, al ser incorporado este filler a la mezcla se está evitando el uso de mayores cantidades de cemento, disminuyendo la demanda del mismo, fomentando una producción de concreto autocompactante amigable con el medio ambiente, mediante el uso de materiales alternativos.

## Referencias bibliográficas

- American Concrete Institute (2008). ACI 318 Building code requirements for structural concrete and commentary.
- American Society For Testing And Materials (2006). ASTM C642 – 06 Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. West Conshohocken, PA: ASTM.
- American Society For Testing And Materials (2012). ASTM C39/C39M-12 Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. West Conshohocken, PA: ASTM.
- Assié, S., Escadeillas, G. y Waller, V. (2007). Estimates of self-compacting concrete "potential" durability. *Construction and Building Materials*, 21(10), 1909-1917. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.06.034
- Becker, E. (n.d.). *Cemento portland con filler calcáreo. Control*. Argentina. [<http://www.lomanegra.com.ar/trabajos-loma-negra.asp>]
- Bermejo, E. B., Moragues, A., Gálvez, J. y Fernández, M. (2010). Permeabilidad y estructura porosa de hormigones autocompactantes de resistencia moderada. *Materiales de Construcción*, 60(299), 37-51. [<http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/issue/view/46>]
- Bonavetti, V., Donza, H., Rahhal, V. e Irassar, E. (2000). Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement. *Cement and Concrete Research*, 30(5), 703-708. doi:10.1016/S0008-8846(00)00217-9
- De la Peña, B. y Vernal, R. (2003). Nuevos aditivos reductores de agua su aporte a la tecnología del hormigón. *XIV Jornadas Chilenas del Hormigón*. Valdivia [<http://www.seconstruye.com/jh2003/int/biblioteca.htm>]
- EFNARC (2002). *Specification and guidelines for self-compacting concrete* (Vol. 44). Farnham, Reino Unido. [<http://www.efnarc.org/publications.html>]
- Felekoglu, B. (2007). Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case). *Resources, Conservation and Recycling*, 51(4), 770-791. doi:10.1016/j.resconrec.2006.12.004
- Heikal, M., El-Didamony, H. y Morsy, M. S. (2000). Limestone-filled pozzolanic cement. *Cement and Concrete Research*, 30(11), 1827-1834. doi:10.1016/S0008-8846(00)00402-6
- Jaramillo, H. y Delvasto, S. (2008). Efecto de la adición de caliza molida y humo de sílice en la reología de un concreto autocompactante. *Tenth International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies*. (pp. 1-16). Cali.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C. y Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Director (Primera Ed.). Skokie, Illinois: Portland Cement Association.
- Nagataki, S. y Fujiwara, H. (1995). Self-Compacting Property of Highly Flowable Concrete. *On-line Journal*, 154, 301-314.
- Norma Técnica Colombiana (1982). NTC 321 Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento portland. Especificaciones químicas.
- Péra, J., Husson, S. y Guilhot, B. (1999). Influence of finely ground limestone on cement hydration. *Cement and Concrete Composites*, 21(2), 99-105. doi:10.1016/S0958-9465(98)00020-1
- Persson, B. (2001). A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete. *Cement*

and Concrete Research, 31(2), 193-198. doi:10.1016/S0008-8846(00)00497-X

Poppe, A. y De Schutter, G. (2005). Cement hydration in the presence of high filler contents. *Cement and Concrete Research*, 35(12), 2290-2299. doi:10.1016/j.cemconres.2005.03.008

Rodríguez-Viacava, I., Aguado, A. y Rodríguez de Sensale, G. (2012). Self-compacting concrete of medium characteristic strength. *Construction and Building Materials*, 30, 776-782. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.070

Sonebi, M. (2004). Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1199-1208. doi:10.1016/j.cemconres.2003.12.022

Swiss Standar - SIA 162/1 (1989). Test No. 5- Water conductivity (Norma de ensayo).

Trägårdh, J. (1999). Microstructural features and related properties of self-compacting concrete (pp. 175-186). Stockholm , SUEDE: RILEM Publications. [<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=1537785>]

Uysal, M. y Yilmaz, K. (2011). Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. *Cement and*

*Concrete Composites*, 33(7), 771-776. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.04.005

Valcuende, M., Parra, C. y Benlloch, J. (2005). Permeabilidad, porosidad y resistencia a compresión de hormigones autocompactables. *Materiales de construcción*, (280), 17-26. [<http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1376347>]

Valdez, P., Barragán, B., Girbes, I., Shuttleworth, N. y Cockburn, A. (2010). Uso de residuos de la industria del mármol como filler para la producción de hormigones autocompactantes. *Materiales de Construcción*, 61(301), 61-76. doi:10.3989/mc.2010.55109

Violeta, B. (2003). SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. *Cement and Concrete Research*, 33(9), 1279-1286. doi:10.1016/S0008-8846(03)00013-9

Zhu, W. y Bartos, P. (2003). Permeation properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(6), 921-926. doi:10.1016/S0008-8846(02)01090-6

Zhu, W. y Gibbs, J. C. (2005). Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1457-1462. doi:10.1016/j.cemconres.2004.07.001.