

ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MORTEROS A BASE DE CEMENTO, PUZOLANA, Y SUPERPLASTIFICANTE PARA SU APLICACIÓN EN CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

*LIBIA SOLANGEL MEJIAS GUEVARA*¹, *IDALBERTO ÁGUILA ARBOLÁEZ*²

¹ Grupo Fort VG, C.A. Apartado Postal 1041. Caracas. Venezuela. Tel.: +58-212-6930419

² Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Central de Venezuela. Apartado Postal 1050, Caracas, Venezuela.
e-mails: solangel.mejias@gmail.com / idalbertoaguila@gmail.com

Recibido: julio 2018

Aprobado para publicación: mayo 2019

RESUMEN

Nuevos materiales y tecnologías constructivas son desarrollados cada vez con mayor frecuencia en la búsqueda de mejoras de calidad, tanto económicas como ecológicas para la construcción. En esta investigación se realiza un estudio de mezclas de morteros de cemento, al cual se añaden puzolana y superplastificante, para incrementar su resistencia. La puzolana utilizada es microsílíce, que mejora algunas propiedades del concreto, y el superplastificante es policarboxilato, el cual reduce la relación agua/cemento. Se realizaron dos (2) fases de ensayos de laboratorios; en la primera fase se determina la mejor proporción de cemento: microsílíce a partir de la resistencia a compresión de muestras con diferentes combinaciones de estos materiales. En la segunda fase se determina la cantidad de superplastificante necesaria para reducir la relación agua/cemento a valores entre 0,30 y 0,40 y con esto incrementar la resistencia a compresión prefijándose como objetivo superar los 700 kgf/cm² (70 MPa). Como resultado se obtiene que la mayor resistencia se logra cuando se adiciona un 20 % de microsílíce respecto al cemento y se añaden 11,6 litros de policarboxilato por m³ de concreto. Con esta combinación la resistencia a compresión a veintiocho (28) días es de 793 kgf/cm² (79,3 MPa). Sin embargo, para la adición de 15 % de microsílíce solo se requieren 10,2 litros de policarboxilato y se alcanza una resistencia de 743 kgf/cm² (74,3 MPa), valor satisfactorio y con ventajas económicas.

Palabras Clave: concreto de alta resistencia, puzolana, superplastificante, microsílíce, policarboxilato.

STUDY OF THE STRENGTH OF THE COMPRESSION OF MORTARS BASED OF CEMENT, PUZOLAN AND SUPERPLASTIFICANT FOR ITS APLICATION IN HIGH STRENGTH CONCRETE

ABSTRACT

New construction materials and technologies are developed with more frequently in the search for quality, economy and ecological improvements for construction. In this research makes a study of the mixtures to wich are added puzzolan and a superplasticizer, to increase the strength. The puzzolan used is silica fume, which improves some concrete properties, and the superplasticizer is polycarboxylate, which reduces the ratio water / cement. Two (2) phases of laboratory tests were carried out; in the first phase, the best ratio determined the proportion cement:silica fume from the strength to compression of samples with different combinations of these materials. In the second phase the amount of superplasticizer necessary to reduce the ratio water / cement to values between 0,30 and 0,40 was determined and with this increase the strength to compression, prefixing itself to exceed 700 kgf/cm² (70 MPa). The optimum proportion according to the strength is when a 20% silica fume is added to the cement and 11.6 liters of polycarboxylate are added per m³ of concrete. With this combination a strength to 28 days of 793 Kgf/cm² (79,3 MPa) is achieved. However, for 15% of silica fume only 10.2 liters of polycarboxylate and a strength of 743 kgf/cm² (74,3 MPa) are required, very satisfactory value and with economy.

Key words: high strength concrete, puzzolan, superplasticizer, silica fume, polycarboxylate.

INTRODUCCIÓN

El Instituto Americano del Concreto (ACI) en su reporte número 363.2R-98 (1998), define al concreto de alta resistencia como aquel que tiene una resistencia a la compresión de 400 kgf/cm² (40 MPa), o mayor. En los últimos años, las demandas de este tipo de concreto han aumentado en muchas partes del mundo, y esto ha sido posible gracias a la evolución de la tecnología de los materiales.

Las aplicaciones del concreto de alta resistencia han abarcado diversas áreas como: rascacielos, puentes, estacionamientos, estructuras costeras y sanitarias, bóvedas y otros elementos de seguridad, centros comerciales, viviendas, etc. Estas amplias aplicaciones son gracias a las características físico-químicas del material, que permiten soportar grandes cargas, con durabilidad y con ventajas desde el punto de vista de la sustentabilidad.

Esta investigación se centra en determinar la dosificación más adecuada para un concreto de alta resistencia que, en una fase posterior sería aplicada en el diseño de elementos estructurales para edificaciones de mediana altura.

Para lograr concretos de alta resistencia, se deben seleccionar cuidadosamente las proporciones en que deben mezclarse los componentes y tomar en cuenta: las características del cemento y las adiciones, la calidad de los agregados, la proporción de la pasta, la interacción pasta-agregados, el tipo de mezcla y la dosificación. Se tiene que evaluar y caracterizar tanto el cemento como las adiciones, el superplastificante y los agregados antes de determinar la proporción adecuada. El agregado influye significativamente en la resistencia y propiedades estructurales del concreto, porque ocupa más volumen que cualquier otro componente.

Uno de los recursos para elaborar este tipo de concretos es utilizar altas dosis de cemento. Sin embargo, algunos investigadores afirman que los altos contenidos de cemento superiores a 400 kg/m³, producen elevaciones significativas de la temperatura del concreto durante su hidratación por lo que se recomienda combinar el cemento con proporciones variables de puzolanas tales como: escoria, cenizas volantes o microsílíce, entre otras (Porrero, Grases, Ramos y Velazco, 2012). En este trabajo se utiliza microsílíce como puzolana para mejorar algunas propiedades del concreto entre las que se encuentran la resistencia y la permeabilidad. Por un lado, la presencia de un material muy fino actúa como relleno y contribuye a reducir la porosidad en la masa de concreto, especialmente en la zona de transición entre el

agregado y la pasta de cemento; por otro, el dióxido de silicio, presente en la puzolana, reacciona químicamente con agua y con el hidróxido de calcio, que se forma durante el fraguado del cemento, para fijarlo y transformarlo en hidrosilicato de calcio; mucho más resistente y estable químicamente. Para obtener estas propiedades son importantes las proporciones a utilizar. Usualmente el microsílíce es colocado por masa de cemento. La incorporación de microsílíce trae como consecuencia un incremento en la demanda de agua, por lo que se recomienda el uso de aditivos reductores de agua.

Cuando se adicionan otros materiales como las puzolanas, estas deben sumarse con el cemento. En este caso la relación agua/cemento (a/c) se convierte en agua/material cementante (a/mc) o (a/(c+p)). Para el ACI 211.4R-93 (1998) la relación a/(c+p) normalmente es superior 0,50, y, cuando se han usado aditivos reductores de agua, en muchas otras investigaciones, se ha logrado obtener rangos de relación a/(c+p) entre 0,20 y 0,50. Los aditivos reductores de alto rango, conocidos como superplastificantes, son los más efectivos para mezclas de concreto con alto contenido de cemento o de material cementante. Para Aitcin (2004), el aditivo ayuda a reducir los requerimientos de agua en la mezcla hasta un 30%, y con esto aumentar la resistencia a la compresión del concreto.

Büyükoztürk y Lau (2007) explican en su investigación que una característica del concreto de alta resistencia es la relación agua/material cementante que oscila entre 0,30 y 0,45 y requiere puzolanas y superplastificantes.

El reporte del ACI 234R-06 (2006) muestra un listado de nueve (9) mezclas –presentes en proyectos e investigaciones– donde las resistencias a la compresión oscilan entre 552 kgf/cm² (55,2 MPa) y 946 kgf/cm² (94,6 MPa) a los veintiocho (28) días. Para las mezclas con resistencias de 720 kgf/cm² (72 MPa) y 586 kgf/cm² (58,6 MPa) se observa una relación a/mc de 0,24 y 0,37, un porcentaje de sustitución de cemento por material puzolánico de 22,94 y 4,88%, y una cantidad de aditivo de 5,36 y 3,3 l/m³ respectivamente. Estos datos demuestran que la resistencia a compresión aumenta cuando baja la relación a/mc, la cual se produce al aumentarse la cantidad de aditivo; igualmente se aprecia que el mayor grado de sustitución de cemento por puzolanas es del 20%.

Holland (2005) realiza seis (6) mezclas de los cuales las primeras tres (3) tienen una combinación de material cementante con cemento, cenizas volantes y microsílíce entre un 27,6 y 14,87 % de sustitución de cemento por puzolanas, una relación de agua/material cementante (a/mc) más baja que las mezclas restantes que varían entre

0,23 y 0,29, y mayor cantidad de cemento que incide en la resistencia a la compresión de forma significativa. El resto de las mezclas presentan una dosificación de material cementante con cemento y microsílíce, con un porcentaje de sustitución de cemento entre 6% y 8%, y una relación de a/mc entre 0,35 y 0,39. El desarrollo de las resistencias de las seis (6) mezclas en diferentes edades, mostró un incremento en edades tempranas de forma proporcional en todas las mezclas, donde la mayor resistencia a la compresión la obtienen las mezclas con mayor sustitución de cemento con valores que superan los 500 kgf/cm² (50 MPa). A los veintiocho (28) días la mezcla con mayor cantidad de sustitución de cemento por puzolanas y menor relación a/mc supera los 1000 kgf/cm² (100 MPa) en la resistencia a la compresión, mientras que la mezcla con un porcentaje de sustitución de cemento por puzolanas con 8% y una relación a/mc de 0,39 logró 600 kgf/cm² (60MPa).

Calderón y Yépez (2014) tuvieron como objetivo la obtención de una mezcla de concreto capaz de cumplir tres requerimientos de desempeño: proporcionar una resistencia a la compresión mayor a los 900 kgf/cm² (90 MPa) en conjunto con una adecuada trabajabilidad de mezcla y, a su vez, presentar una alta resistencia a la erosión-abrasión. Tomaron en cuenta tres parámetros principales para la dosificación de las diferentes mezclas: la cantidad de cemento, las relaciones microsílíce/cemento y la relación agua/cementante. Se añadió policarboxilato en la mezcla de materiales, lo cual tuvo un impacto considerable en la demanda de agua al obtener una la relación agua/cemento de 0,23 a 0,21. Valores de resistencias a la compresión obtenidos entre 703,3 kgf/cm² y 1099.2 kgf/cm² (70,33 MPa y 109,92 MPa).

Kumar, Nasrim y Verma, (2017) exponen que una mezcla de concreto de alta resistencia se utiliza superplastificante para reducir la cantidad de agua entre un 15 y 20% sin afectar la trabajabilidad de la mezcla, y puzolanas entre dosis de 15 y 20% por masa del material cementante.

Abdur y Abul (2009) realizaron una investigación experimental donde desarrollaron mezclas con resistencias entre 539 a 1277 kgf/cm² (53,9 a 127,70 MPa) con relación de agua/material cementante entre 0,20 a 0,34 y cantidad de superplastificante entre 3,33 y 10,00 l/m³.

Yogendran, V., Langan, B. W., Haque, M. N., & Ward, M. A. (1987) estudiaron la eficacia del microsílíce para influir en la resistencia del concreto de alta resistencia a diferentes relaciones agua/material cementante y dosificaciones de microsílíce. Los resultados obtenidos en la investigación sugieren que el reemplazo óptimo del cemento por

microsílíce con resistencias de 500 a 700 kgf/cm² (50 a 70 MPa) a los veintiocho (28) días es del 15%, con un contenido de cemento de 500 kg/m³ y una relación agua/material cementante de 0,28.

Kadri, Aggouns y Kaci, (2014), investigaron sobre la resistencia a la compresión de concretos con el uso de microsílíce y superplastificante, obteniendo resistencias a la compresión de 350 kgf/cm² (35 MPa) a los dos (2 días), 500 kgf/cm² (50 MPa) a los siete (7 días), y 620 kgf/cm² (62 MPa) a los veintiocho (28) días con relaciones de agua/material cementante de 0,25; 0,30 y 0,40 y sustituciones de cemento por microsílíce hasta un 20%, afirmando que el efecto de contenido puzolánico más alto es entre 10 y 20%. Los parámetros utilizados por Aïtcin (2004) en su método de diseño de mezclas para la dosificación de concreto de alta resistencia, oscilan entre 120 a 165 l/m³ de concreto; mientras que el método del ACI 211.4R – 93 (1998) utiliza en sus tablas referenciales de cantidades de agua en la mezcla de concreto de alta resistencia entre 194 a 165 l/m³.

A partir de estos antecedentes y, tomándolos como referencias, se plantea una investigación cuyo objetivo es desarrollar un proceso tecnológico para producir concreto de alta resistencia en las condiciones de Venezuela. La primera etapa consiste en la determinación de las proporciones en que se deben combinar puzolana y superplastificante con el cemento para incrementar considerablemente su resistencia. Este artículo presenta los resultados de esta primera fase, en la que se experimentó con probetas cúbicas de mortero ensayadas a compresión. Dichos resultados sirven de base para una segunda etapa donde se trabajará con mezclas de concreto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se implementó un programa de ensayos para la producción de este mortero en los laboratorios del Instituto Venezolano de Investigaciones Tecnológicas e Industriales (INVESTI). Para el desarrollo de los ensayos se utilizaron las siguientes normas: COVENIN 1610-80. Método de ensayo para determinar el flujo de concreto por medio de la mesa de caídas. Y COVENIN 484-93 (1993). Determinación de la resistencia a la compresión de morteros de probetas cúbicas de 50,8 mm de lado.

Los experimentos se desarrollaron en dos fases: A y B. En cada una de ellas se realizaron ensayos de resistencia a compresión a diferentes edades.

Para todo el experimento se elaboró una muestra patrón –según indica la norma COVENIN 484-93 (1993), la

cual se utiliza como referencia para hacer valoraciones y comparaciones. Esta muestra fue ensayada en las edades de siete (7), veintiocho (28) y cincuenta y seis (56) días.

En la fase A: se determinó la combinación más adecuada de cemento y microsílíce, en función de la resistencia a compresión lograda. Se establecieron previamente y según experiencias anteriores tres combinaciones cemento-microsílíce: 90:10, 80:20 y 70:30, además de una muestra patrón 100% cemento. Estas probetas son ensayadas solo a siete (7) y veintiocho (28) días, siendo el valor obtenido a los 28 días el que servirá de referencia para el análisis.

En la fase B: se parte de la mejor proporción obtenida en la fase A, con el objetivo de determinar la cantidad de policarboxilato necesario para reducir la relación a/mc a valores cercanos a 0,30 y con esto elevar la resistencia a compresión a valores cercanos al doble del patrón en edades de siete (7), veintiocho (28) y cincuenta y seis (56) días. Para la elaboración de las probetas se utilizaron los siguientes materiales (figura 1):

- Agua: agua potable de la red de la zona de experimentación.
- Arena normalizada: la norma indica que las proporciones de los materiales secos del mortero normalizado, deberán ser 1 parte de cemento a 2,75 partes de arena gradada normalizada en peso. En los ensayos realizados en esta investigación se utilizó arena Ottawa para cumplir lo especificado en la norma.
- Cemento Portland Tipo I: cemento VENCEMOS, en formato de saco de 42,5 Kg.
- Microsílíce: el proveedor de este material fue la empresa nacional TECNOCONCRET, y se despachó en sacos de 22,7 Kg bajo el nombre comercial SILICA FUME.
- Policarboxilato: se obtuvo por medio de la empresa Sika Venezuela bajo la denominación comercial Sika® Viscocrete® – 1078, reductor de agua de alto rango, superplastificante.

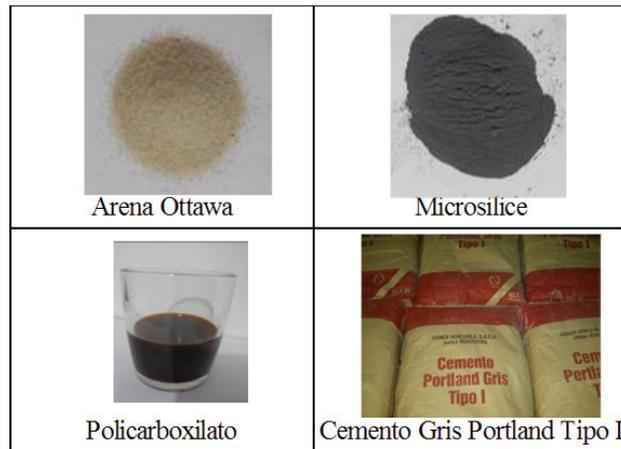


Figura 1. Materiales utilizados

Fabricación de las mezclas:

En la primera fase se realizaron tres (3) tipos de mezclas para determinar la mejor proporción de sustitución de cemento por microsílíce. Para cada mezcla se aplica la norma COVENIN 1610-80 para determinar el flujo y con este obtener la relación agua/material cementante. Para la determinación de la relación a/mc en las mezclas con adición de microsílíce se considera la suma de las cantidades en masa del cemento más el microsílíce.

En la segunda fase, se utilizó la mejor proporción de cemento-microsílíce y se agregó el policarboxilato.

La figura 2 muestra las fases más significativas del proceso de elaboración de mezclas.



Figura 2. Preparación de las mezclas

Ensayos experimentales:

Para cada mezcla elaborada se determinó el flujo por medio de la mesa de caídas.

Los diferentes tipos de probetas, según su edad para ensayar, se identificaron de acuerdo a estos criterios:

Abreviatura del mortero utilizado: en este caso se utilizaron las letras **P** para la mezcla patrón; la letra **A** para indicar mezcla para determinar la proporción óptima de sustitución de cemento por microsilíce (fase A); y la letra **B** para mostrar la determinación de la cantidad de polycarboxilato que produce la mejor dosificación de la mezcla para obtener alta resistencia a la compresión (fase B).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fase A: En esta fase, se puede apreciar en los resultados la contribución del microsilíce en el desarrollo de la resistencia del concreto, y esto toma lugar en las edades de 7 y 28 días. El ensayo del flujo demuestra la influencia de la adición de microsilíce en la demanda de agua de la mezcla, al aumentar significativamente la relación a/mc en la medida que se añade y aumenta la misma (Tabla 1).

Tabla 1. Influencia del microsilíce en el flujo.

Muestra	a/c	Flujo
Patrón	0,485	58,5
A1	0,60	52,8
A2	0,71	51,0
A3	1,06	58,7

La tabla 2 indica las cantidades de materiales de la elaboración de las seis probetas **A**, con porcentajes de microsilíce 10, 20 y 30%.

Tabla 2. Cantidades de materiales para seis probetas de cada muestra.

Muestra	Arena (g)	Cemento		Agua (ml)	Microsilíce	
		%	(g)		(%)	(g)
Patrón	1.375	100	500	242	0	0
A1	1.375	90	450	268	10	50
A2	1.375	80	400	285	20	100
A3	1.375	70	350	370	30	150

El desarrollo de la resistencia a la compresión de las diferentes mezclas es mostrado en la figura N° 3, logrando apreciar que la mezcla **P** ensayada a los 7 días, obtuvo la mayor resistencia a la compresión en comparación con el resto de las mezclas elaboradas con microsilíce. La mezcla **A2** para esa misma edad, logró un 11,8 % menos resistencia que la muestra **P**. A los 28 días se observa que la muestra **A2** tiene una resistencia a la compresión ligeramente mayor que la mezcla **P**. Las mezclas **A1**, **A2** y **A3** aumentaron la relación de a/mc, por la incorporación del microsilíce. A mayor sustitución de cemento por microsilíce, aumenta la demanda de agua requerida para mantener la fluidez constante.

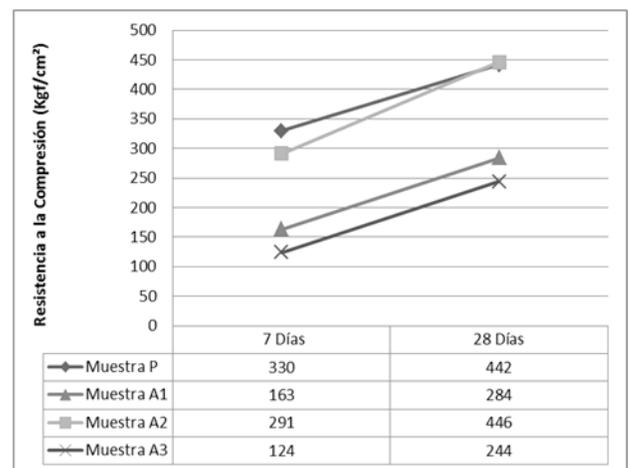


Figura 3. Desarrollo de la resistencia a la compresión

Para las mezclas a los 28 días, se observa que los porcentajes de microsilíce de 10% y 30% lograron las menores resistencias a compresión. La mezcla fabricada con 20% de sustitución de cemento por microsilíce, presenta el mejor comportamiento mecánico al desarrollar una resistencia a la compresión de 446 kgf/cm² (44,6 MPa), por ello, la proporción de material cementante 80:20 constituye una proporción idónea para mayores resistencias a la compresión.

Fase B: En la fase A del experimento se observó que la relación a/mc en la mezcla crece con el aumento del porcentaje de microsilíce. Por el contrario para aumentar la resistencia a compresión se debe procurar disminuir la relación a/mc. Esta segunda fase experimental logra un incremento importante en la resistencia a partir de una reducción significativa de la relación a/mc. En este caso, además del microsilíce se añade a la mezcla el polycarboxilato, cuya función es no solo contrarrestar la demanda adicional de agua que provoca el microsilíce sino

lograr reducir la relación a/mc final a valores cercanos a 0,30.

Según la fase A, la mejor proporción cemento:microsilíce es 80:20, la cual se consideró en la fase B, sin embargo, visto el fuerte efecto del microsilíce en la demanda de agua se puede anticipar que esta proporción demandará una importante cantidad de superplastificante para alcanzar los valores de relación a/mc prefijados. Dado el elevado costo de ambas adiciones y en busca de un material más económico se preparó adicionalmente una mezcla con una proporción cemento:(a/mc) de 85:15. Esto permitirá una valoración posterior más integral de los costos y beneficios de ambas proporciones antes de seleccionar la dosificación definitiva.

En la fase B, la tabla 3 muestra los materiales para nueve probetas por muestra de tres combinaciones diferentes de mezclas además de la muestra patrón. Se puede observar que la relación a/mc se reduce considerablemente cuando se añade superplastificante, además, no solo se contrarresta la mayor demanda de agua del microsilíce sino que se puede reducir considerablemente la relación a/mc respecto a la muestra patrón.

Tabla 3. Proporción de materiales para muestras P y B

Materiales	Patrón	Muestra B1	Muestra B2	Muestra B3
		20% ¹	20%	15%
Cemento (g)	740	740	740	740
Microsilíce (g)	0	185	185	130,6
Arena de Otawa (g)	2.035	2.035	2.035	2.035
Agua (l/m ³)	152,13	148,95	137,22	129,12
Agua/cementante	0,485	0,38	0,35	0,35
Superplastificante (g)	0	20	21,2	18
Superplastificante (litros/m ³)	0	11,1	11,6	10,2
Flujo	58,5	53	47	46

¹ Porcentaje de microsilíce

El porcentaje de sustitución de cemento por microsilíce para resistencias mayores a 60 MPa para el ACI 234R-06 (2006) están entre 15 y 20%; Holland (2005) utiliza ntajes de sustitución de cemento entre 14,87 y 27,6%; Yohendran *et al.* (1987) sugieren reemplazos de cemento por microsilíce de 15%, lo que demuestra la tendencia del 15% como porcentaje utilizado con mejores resultados en la resistencia a la compresión, coincidiendo con los resultados en la tabla 3.

La relación a/mc de la tabla 3 oscila entre 0,35 y 0,38, relativamente altas en relación a las referencias del ACI 234R – 06 (2006), donde indican que para resistencias mayores a 60 MPa están entre 0,29 y 0,24; y Calderón y Yépez (2014) con relaciones de a/mc entre 0.21 y 0.28, significativamente bajas en relación a la tabla N° 3. Los rangos de las relaciones a/mc de las investigaciones de Büyükköztürk y Lau (2007), y Kumar *et al.* (2017) son similares a la tabla N° 3. La cantidad de aglomerante de las mezclas están entre 36,96 y 38,92%, y el del agregado entre 63.04 y 61.08%; porcentajes cercanos a los recomendados por Aïtcin (2004), pero diferentes a los expuestos por el ACI 234R – 06 (2006), ambas referencias para concreto de alta resistencia.

Tabla 4. Resistencia a compresión para muestras P y B.

Edades	Patrón	Muestra B1	Muestra B2	Muestra B3
		20% ¹	20%	15%
Resistencia 7 días (kgf/cm ²)	330	477	526	530
Resistencia 28 días (kgf/cm ²)	442	688	793	743
Resistencia 56 días (kgf/cm ²)	527	748	792	771

¹ Porcentaje de microsilíce

La tabla 4 muestra los valores de resistencia a compresión y la figura N° 4 indica el crecimiento de la curva de las diferentes mezclas, ambas informaciones a edades de 7, 28 y 56 días. Se aprecia que al colocar policarboxilato se reduce la relación a/mc, y se incrementa la resistencia a compresión hasta llegar a 793 kgf/cm² (79.3 MPa) a los 28 días para la muestra **B2**. La muestra **B3** alcanza una resistencia a compresión de 743 kgf/cm² (74.3 MPa), inferior a la **B2** pero también muy aceptable, requiriéndose en este caso menos microsilíce y policarboxilato lo cual tiene ventajas desde el punto de vista económico.

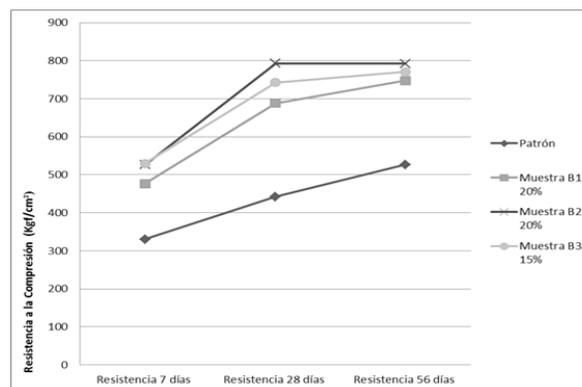


Figura 4. Resistencia a compresión para muestras con microsilíce y policarboxilato

La resistencia a la compresión de la mezcla **B3** a los 7 días es el 68,74%, y para los 28 días es el 96,36% de la resistencia a los 56 días; desarrollo de resistencia a la compresión similar a lo expuesto por Holland (2005).

Todas las probetas, exceptuando el patrón a los 7 días, cumplen con los requisitos de dosificación de Aitcin (2004) y ACI 211.4R – 93 (1998) de contenido de agua para concreto de alta y resistencia a la compresión.

CONCLUSIONES

El propósito de esta investigación era estudiar las condiciones para obtener concreto de alta resistencia combinando puzolana y superplastificante con el cemento. En ese sentido lo primero que se pudo establecer es que, en las condiciones de Venezuela y con los materiales disponibles, es posible obtener concreto de alta resistencia habiéndose logrado morteros con resistencias superiores a 700 kgf/cm² (70 Mpa).

La incorporación de microsílíce, en sustitución de cemento, resultó eficaz, tomando en cuenta que, a pesar de colocar menos cemento y requerir una cantidad mayor de agua, se logró incrementar ligeramente la resistencia a compresión a los veintiocho (28) días respecto a la muestra patrón. La combinación ideal resultó la que se sustituyó un 20 % de cemento por microsílíce.

La utilización de policarboxilato también resulta provechosa para la mezcla porque se logra contrarrestar la demanda adicional de agua del microsílíce y además continuar reduciendo la cantidad de agua hasta una relación agua/cemento de 0,35. Se puede continuar reduciendo este valor, pero a costa de un uso excesivo de policarboxilato.

Habiendo fijado una relación a/c de 0,35 como el valor a perseguir se determinó, por medio del flujo, que con la combinación de 80% cemento: 20% microsílíce se requieren 11,6 litros de superplastificante para mantener la consistencia normal. Con estas condiciones el ensayo de resistencia a compresión determinó que la resistencia obtenida es de 793 kgf/cm² (79,3 MPa).

Una combinación intermedia de 85% cemento: 15% microsílíce y relación a/c de 0,35 requiere, para lograr la consistencia normal 10,2 litros de superplastificante. Para estas proporciones el valor de resistencia a compresión asciende a 743 kgf/cm² (74,3 MPa). Esta combinación mejora a la anterior en el aspecto económico toda vez que requiere menos microsílíce y superplastificante, los cuales son productos costosos. Tomando en cuenta que la

resistencia a la compresión, aunque menor a la anterior, sigue siendo alta y adecuada para los propósitos de esta investigación, se adoptó esta como la recomendada para continuar en la siguiente fase de la investigación.

Sobre esta base corresponde –en posteriores investigaciones– estudiar mezclas de concreto donde se incorporen agregados gruesos y se puedan mantener los niveles de resistencia a compresión logrados para morteros.

AGRADECIMIENTO

Los autores de esta investigación agradecen al Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACIT), por el financiamiento de los ensayos de laboratorio realizados, a través del Proyecto de Grupo N° 2011000776 “Desarrollo de materiales y tecnologías constructivas a base de concreto para viviendas sostenibles y de bajo costo, para ser transferidas a pequeñas empresas, cooperativas o comunidades organizadas”.

REFERENCIAS

- RASHID, M. A. Y ABUL, M. (2009). Consideration in producing high strength concrete. *Journal of Civil Engineering (IEB)*, 37(1), 53-63.
- ACI 211.4R-93 (1998). *Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash*. Farmington Hills, Michigan, USA.
- ACI 363.2R - 98 (1998). *Guide to Quality control and testing of High Strength Concrete*. Farmington Hills, Michigan, USA.
- ACI 234R-06 (2006). *Guide for the use of silica fume in concrete*. Farmington Hills, Michigan, USA.
- AITCIN, P. (2004). *Modern Concrete Technology 5. High Performance Concrete*. New York, USA.
- BÜYÜKÖZTÜRK, O., Y LAU, D., (2007). *High Performance Concrete: Fundamentals and Application*. Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, USA.
- CALDERÓN, F. Y YÉPEZ, F., (2014). Diseño de hormigones de alto desempeño: alta resistencia a la compresión, trabajabilidad adecuada y alta resistencia a la erosión-abrasión para obras hidráulicas. *Avances en ciencias e ingenierías*. Volumen 6, N° 1. Ecuador.

- COVENIN 484-93 (1993). *Cemento Portland. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en probetas cúbicas de 50,8 mm de lado*. Fondonorma. Caracas, Venezuela
- COVENIN 1610-80 (1980). *Método de Ensayo para Determinar el Flujo de Concreto por medio de la Mesa de Caída*. Fondonorma. Caracas, Venezuela.
- HOLLAND, T. (2005). *Silica fume user's manual*. Silica fume association. Virginia, USA.
- KADRI, E.; AGGOUNS, S.; Y KACI, A., (2014). The compressive strength of high performance concrete and ultra-high performance concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*. DOI: 10.115/2012/361857. Egipto.
- KUMAR, A.; NASRIM, T.; Y VERMA, B. A., (2017). High performance concrete & it's application in civil engg. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*. Volumen N° 06, Special Issue N° 2, ICI TTESE-7. India.
- PORRERO, J., GRASES, J. RAMOS, C., Y VELAZCO, G. (2012). *Manual del Concreto Estructural conforme con la Norma COVENIN 1753:03*. SIDETUR. Venezuela.
- YOGENDRAN, V., LANGAN, B. W., HAQUE, M. N., & WARD, M. A. (1987). Silica fume in high-strength concrete. *Materials Journal*, 84(2), 124-129.