

## Método de diseño de mezclas para concreto de alta resistencia con el uso de policarboxilato y microsílíce

### *Method of design of mixtures for concrete of high strength using polycarboxilate and silica fume*

**MSc. Arq. Libia Solangel Mejias Guevara**

<https://orcid.org/0009-0001-4502-0887>

Correo-e: [solangel.mejias@gmail.com](mailto:solangel.mejias@gmail.com)

**Dr. Ing. Idalberto Águila Arboláez**

<https://orcid.org/0000-0002-6621-9852>

Correo-e: [idalbertoaguila@gmail.com](mailto:idalbertoaguila@gmail.com)

Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción  
FAU-UCV

DOI: <https://doi.org/10.37883/TyC.2026.38.1.02>

Recibido: agosto 05 /2025 | Aprobado: agosto 23 / 2025 |

Aceptado: septiembre, 24/ 2025

#### Resumen

Como parte de una investigación sobre concreto de alta resistencia en el contexto venezolano, se presenta este artículo que propone un método de diseño de mezclas para este tipo de concreto. Se parte de la sustitución de cemento por puzolanas y aditivos superplastificantes, microsílíce y policarboxilato respectivamente, con el fin de obtener concretos de alta resistencia. Se comienza con un análisis de diferentes métodos de diseño de mezclas de concreto convencional, así como de algunos procedimientos para la obtención de concretos de alta resistencia. De ese análisis se detectan limitaciones para lograr diseños de concretos de alta resistencia en las condiciones de Venezuela y se propone un método, relativamente sencillo y confiable, que permita su empleo generalizado. Se trata de una secuencia de pasos similares a otros métodos utilizados en concretos tradicionales, pero incorpora un procedimiento gráfico novedoso para determinar el contenido de agua y el porcentaje de superplastificante en función del asentamiento. El método está sustentado por ensayos de laboratorio que validan su funcionamiento. Se desarrolla un ejemplo para verificar su aplicabilidad, con lo cual se concluye que el mismo resuelve los requerimientos del diseño de mezclas para un concreto de alta resistencia.

#### Descriptores

Concreto de alta resistencia; diseño de mezclas; superplastificante; microsílíce; policarboxilato.

#### Abstract

*As part of a research project on high strength concrete, this article proposes a mix design method for this type of concrete in the Venezuelan context. The starting point is the replacement of cement with pozzolans and superplasticizing additives; silica fume and polycarboxylate respectively, to obtain high-strength concretes. It begins with an analysis of different conventional concrete mix design methods, as well as some procedures for obtaining high-strength concrete. This analysis reveals limitations in achieving high-strength concrete designs under Venezuelan conditions, and a relatively simple and reliable method is proposed to allow for its widespread use. This is a sequence of steps like other methods used in traditional concrete, but it incorporates a novel graphical procedure to determine the water content and the percentage of superplasticizer based on the slump. The method is supported by laboratory tests that validate its operation. An example is developed to verify its applicability, leading to the conclusion that it meets the requirements of mix design for high-strength concrete.*

#### Descriptors

High strength concrete, dosage, superplasticizer, silica fume, polycarboxylate.

El Comité del ACI 363.2R-98 del año 1998, en la “Guía para el Control de Calidad y Ensayos de Concreto de Alta Resistencia”, define al concreto de alta resistencia como aquel que tiene una resistencia a la compresión mayor a 420 kgf/cm<sup>2</sup> (41,19 MPa), y que no incluye concretos hechos con materiales o técnicas específicas, como: concreto de polímero impregnado, concreto epóxico, o concreto hecho con agregado artificial.

La producción, uso e investigación del concreto de alta resistencia ha crecido considerablemente en el mundo. Su utilización ha permitido la construcción de edificaciones y otras estructuras que con concreto tradicional resultarían imposibles. Es usual que, de manera empírica, a partir de la experiencia y realizando pruebas de laboratorio, se lleguen a establecer las proporciones en que se deben combinar los diferentes materiales para la obtención de la mezcla de concreto deseada. Sin embargo, sobre todo cuando no se cuenta con suficiente experiencia o pruebas previas, ofrece mayor confianza y es más riguroso, utilizar algún método de dosificación conocido, que conduzca a lograr el concreto previsto. En la actualidad no existe un método de diseño de mezclas, adecuado a las condiciones de Venezuela y que se pueda utilizar, de manera generalizada, para la elaboración de concretos de alta resistencia. Sin embargo, en el ámbito internacional, existen diferentes procedimientos desarrollados por algunos investigadores que han permitido definir los pasos necesarios para obtener estos concretos. También existen diversos métodos mucho más generalizados pero enfocados en la obtención de concretos tradicionales. Tras un análisis de métodos como los de Bolomey (Gorchakov, 1984 en biblió 1981); Porrero et al. (2012), ACI 211.4R (1998), Aitcin (2004) y O’Reilly (2007), se detecta que todos presentan limitaciones para ser utilizados de forma generalizada para concreto de alta resistencia en las condiciones de Venezuela. En esta investigación, basándonos en las experiencias previas, se propone un método relativamente sencillo, en el que se

combinan procedimientos gráficos y matemáticos con un mínimo de ensayos de laboratorio, para obtener un diseño de mezcla suficientemente preciso y reproducible.

### Métodos de dosificación estudiados

En este punto se aporta lo más resaltante sobre los métodos estudiados en la propuesta de dosificación del concreto de alta resistencia.

#### Método de Bolomey (Gorchakov, 1984).

Bolomey plantea una ecuación general para la determinación de la resistencia del concreto, considerando la calidad del agregado como influencia en la resistencia final del concreto que es  $R_{cr} = B_1 \times R_c (c/a \pm 0,5)$ . Para concretos con mayores resistencias preparados con una relación  $c/a > 2,5$  se emplea la siguiente ecuación:

$R_{cr} = B_1 \times R_c (c/a + 0,5)$ , donde:

$R_{cr}$  —————> Resistencia del concreto

$R_c$  —————> Resistencia del cemento

$B_1$  —————> Característica del agregado

$c/a$  —————> Relación cemento/agua

La dependencia entre la resistencia del concreto y el valor de la relación cemento/agua expresada con la expresión pasada es una curva, por lo que, para fines prácticos esta curva es sustituida por dos rectas, es decir, dos ecuaciones, una para concreto tradicional con relaciones de cemento/agua  $(c/a) = 1,4-2,5$ ; y la otra para concreto de alta resistencia con  $c/a = > 2,5$  (Gorchakov, 1984). En esta ecuación,  $B_1$  como coeficiente de las características de los agregados, tiene agregados de alta calidad  $B_1 = 0,43$  y agregados ordinarios  $B_1 = 0,40$ .

Este método de diseño de mezcla no es para concreto de alta resistencia porque no considera el uso de puzolanas, aditivos y contenido de aire. Se destaca en este método la ecuación de la resistencia del cemento a utilizar para determinar la relación de  $a/c$ , y el factor del agregado para concretos de alta resistencia, pudiendo ser este un punto de partida significativo para garantizar la resistencia a compresión del material.

### **Método de Porrero et al. (2012)**

Es un método para concreto tradicional y utiliza tablas, ábacos y gráficos con valores producto de investigaciones durante muchos años. Además, en los procedimientos no considera el cálculo de la dosis de supeplastificante. Para calcular los agregados de la mezcla, se determina la proporción de los agregados por un procedimiento gráfico o de forma analítica de acuerdo con las necesidades de la mezcla que se requiera, siendo un proceso minucioso porque da importancia a las limitaciones granulométricas que el mismo autor recomienda.

### **Método ACI 211.4R- 93 (1998)**

Este es un método lineal, y es el resultado de investigaciones y fundamentos de trabajos experimentales de Abrams, Richard Talbot, Goldbeck y Gray (Giraldo, 2004) y de empresas constructoras que han ejecutado proyectos utilizando materiales de alta calidad, dentro de Estados Unidos. Gracias a estos resultados, se elaboraron tablas referenciales con datos que son utilizados para la toma de decisiones para el desarrollo de mezclas de concreto de alta resistencia.

Las condiciones de las experiencias de los ensayos de empresas con este método son diferentes a la realidad venezolana. Además, el método no tiene la flexibilidad de manejar valores de asentamiento, contenido de agua y porcentaje de superplastificante al mismo tiempo.

### **Método de Aitcin (2004)**

El método de Aitcin (2004) está diseñado para concreto de alta resistencia, y recomienda realizar ensayos de laboratorio previos para conocer la mejor sustitución de cemento por alguna adición, relación a/mc y dosis de superplastificante. De no conocer estos valores, el método presenta los parámetros necesarios para su determinación, obtenidos a partir de su experiencia práctica y de ensayos de laboratorio.

Los parámetros de este método son representados a través de una serie de ábacos que no pueden ser aplicados directamente al contexto venezolano, porque las condiciones expe-

rimentales y la calidad de los materiales son diferentes. Los ábacos de este método no relacionan más de dos variables referidos a trabajabilidad, economía y resistencia del material.

### **Método de O'Reilly (2007)**

El procedimiento propuesto por Vitervo O'Reilly es para concreto tradicional, y da preponderancia a la forma de las partículas del agregado grueso, tanto para calcular la resistencia del concreto en función de la relación agua/cemento (Ley de Abrams), como para obtener la proporción en que se deben mezclar los agregados finos y gruesos. El método consiste en tomar fotos de partículas de agregados para realizar un estudio físico-matemático de su forma y obtener a partir de allí el valor de la característica A de los agregados en una cantera específica. El valor obtenido para una cantera se utiliza para futuras producciones siempre que no cambien las materias primas o los equipos de esta.

Los trabajos experimentales de O'Reilly proponen que, cuando no se conoce la característica A, se siga un procedimiento experimental, el cual consiste en determinar la combinación de agregados que posea un menor porcentaje de vacío al ser mezclados y compactados. Propone fijar cinco combinaciones diferentes de agregados fino:grueso con los siguientes valores: 35:65, 40:60, 45:55, 50:50, y 55:45. Mediante pruebas de laboratorio y expresiones matemáticas se obtiene, para cada agregado por separado y para los agregados resultantes de cada una de las cinco combinaciones anteriores, el Peso Específico Corriente y el Peso Unitario Compacto. Con estos valores se determina el Porcentaje de Vacío de cada combinación y se selecciona la que tenga el porcentaje de vacío menor.

### **Estudios experimentales previos a la aplicación del método propuesto**

En este punto se muestran las definiciones sobre la proporción cemento:microsílice y los límites del contenido de agua y porcentaje de

superplastificante que son datos de base para el desarrollo del método propuesto.

**1. Definición de la proporción cemento: microsílíce.** En una investigación previa estos autores determinaron, mediante ensayos de laboratorio, que la mejor proporción cemento: microsílíce es 80:20, logrando una resistencia a la compresión a los 28 días de 793 kgf/cm<sup>2</sup>. La relación a/mc utilizada fue de 0,35 y se requirieron 11,6 L/m<sup>3</sup> de policarboxilato para lograr la consistencia adecuada. Sin embargo, también se logró un buen resultado para la combinación 85:15, que con una relación a/mc igual (0,35) y menos policarboxilato (10,2 L/m<sup>3</sup>) se logró una resistencia a compresión de 743 kgf/cm<sup>2</sup>. El concreto, en este caso tiene un poco menos resistencia, pero resulta más económico con la reducción del microsílíce y del policarboxilato (Mejías y Águila, 2018).

Es importante destacar en este punto, que la resistencia del cemento (mezcla patrón) utilizada en la investigación de Mejías y Águila (2018) es de 442 kgf/cm<sup>2</sup> a los 28 días, lo que influye significativamente en los resultados de la resistencia a compresión del material cementante obtenida.

**2. Definición de los límites del contenido de agua y porcentaje de superplastificante.** Para determinar los rangos de los parámetros del contenido de agua y porcentaje de superplastificante, se realizaron 28 ensayos de laboratorio. En estos ensayos también se determinaron otras características de las mezclas como el asentamiento y la resistencia a la compresión, que son claves para el diseño y la elaboración de concreto de alta resistencia.

Las normas aplicadas para realizar las mezclas de concreto son la norma COVENIN 339:2003 y COVENIN 354:2001, y posteriormente el ensayo para la elaboración, curado y ensayo a compresión de probetas cilíndricas de concreto según la norma COVENIN 338:2002. A continuación, se especifican los materiales utilizados:

- Agua: agua potable de la red de la zona de experimentación.
- Agregados: el agregado grueso fue donado por la Fábrica Nacional de Cementos.

S.A.C.A. (FNC). El agregado fino proviene del establecimiento comercial CAMPI Ferretería, C.A.

- Cemento Portland Tipo I: Corporación Socialista del Cemento, S.A. (CSC), 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.

En el cuadro 1, se muestra un listado de 29 mezclas donde se definen los límites de contenido de agua y porcentaje de policarboxilato, que luego son utilizados en el gráfico para la determinación del contenido de agua y porcentaje de superplastificante en función del asentamiento del método propuesto en esta investigación. Para lograr tal definición de límites de estas variables, se inician los ensayos con la referencia de los límites utilizados por el método de Aitcin (2004) con rangos de 120 L a 165 L de contenido de agua, relación a/mc entre 0,24 y 0,35, y porcentajes de aditivo entre 1% a 4% logrando asentamientos iguales a cero, lo cual indica que son mezclas demasiado secas para ser utilizadas en condiciones como las que tenemos.

De la mezcla N<sup>o</sup>21 a la N<sup>o</sup>29 se utiliza un rango similar a las utilizadas por el ACI 211.4R-93 (1998), obteniendo resultados de asentamientos entre 2 y 3 cm.

Entre las mezclas N<sup>o</sup>25 a la N<sup>o</sup>28, se realizaron ajustes en el contenido de agua con rangos de 150 L a 190 L, relación a/mc de 0,39 y porcentajes de policarboxilato entre 1% y 2%, logrando asentamientos adecuados para la interpolación en la gráfica de determinación del contenido de agua y porcentaje de superplastificante en función del asentamiento para la mezcla a diseñar.

Atendiendo a los resultados obtenidos y contrastándolos con los antecedentes, se adop-

tan como límites para el gráfico de determinación del asentamiento del método propuesto en esta investigación 150 L a 190 L de contenido de agua y 1% a 2% de policarboxilato.

### Propuesta de Método de diseño de mezclas para concreto de alta resistencia

El alcance de este método se limita a la elaboración de concretos de alta resistencia a partir de la combinación de cemento Portland tipo

I, agua, dos agregados (grueso y fino), adición puzolánica (microsilíce) y aditivo superplastificante (policarboxilato). Se desarrolla con el fin de lograr un nivel de resistencia a compresión determinado y garantizando el valor del asentamiento deseado. A continuación, se indica la información necesaria de cada material para la aplicación del método:

- Cemento: Marca (resistencia a compresión), Peso específico.
- Agregado grueso: granulometría, tamaño máximo, peso específico, peso unitario

**Cuadro 1.** Desarrollo de dosificaciones con diferentes relaciones de a/mc

Nº de Mezclas	Agua (L)	Cemento (kg)	Microsilíce (kg)	Agregado Fino (kg)	Agregado Grueso (Kg)	Agua (L)	Superplastificante (L/m <sup>3</sup> )	a/mc	Asentamiento (cm)
1	120	425	75	826,44	1.010,10	95,34	---	0,24	0
2	120	425	75	804,45	983,22	96,46	18,52 (4%)	0,24	0
3	165	584,37	103,13	697,75	852,40	144,17	---	0,24	0
4	165	584,51	103,13	667,51	980,85	145,78	25,46 (4%)	0,24	0
5	120	291,43	51,43	889,50	1.087,17	93,46	---	0,35	0
6	120	291,43	51,43	874,44	1.068,75	108,95	12,69 (4%)	0,35	0
7	165	400,72	70,71	784,48	958,80	141,11	---	0,35	0
8	165	400,72	70,71	763,74	933,47	142,21	17,46 (4%)	0,35	0
9	120	291,43	51,43	873,09	1.083,53	131,67	3,18 (1%)	0,35	0
10	140	340	60	826,47	1.025,67	151,05	3,70 (1%)	0,35	0
11	142	290	51,67	873,33	1.103,33	131,67	3,18 (1%)	0,24	0
12	165	400,72	70,71	738,95	948,90	174,85	17,45 (4%)	0,35	0
13	165	400,72	70,71	758,58	949,91	195,34	---	0,35	0
14	175	425	75	809,86	851,94	195,89	---	0,35	0
15	140	340	60	864,31	893,32	188,90	21,6 (5%)	0,35	0
16	140	297,50	52,50	940,39	981,41	206,21	12,96 (4%)	0,40	9
17	130	290,79	51,32	909,74	949,42	194,05	---	0,38	0,5
18	140	313,16	55,26	885,99	924,63	202,38	---	0,38	0,3
19	140	295,50	52,50	893,83	932,82	202,92	6,82 (2%)	0,38	2,5
20	140	313,16	55,26	777,30	1.002,77	190,45	13,65 (4%)	0,38	0,6
21	185	413,81	73,03	686,96	886,25	229,59	9,02 (2%)	0,38	18
22	185	413,81	73,03	677,05	873,17	228,73	19,03 (4%)	0,38	19,5
23	157,60	352,53	62,21	742,56	957,67	205,56	11,52(3%)	0,38	1,5
24	157,60	352,53	62,21	751,20	968,78	206,13	3,84(1%)	0,38	2
26	150	326,92	57,70	772,51	962,54	197,38	3,85 (1%)	0,39	3
27	150	326,92	57,70	768,50	957,55	197,13	7,12 (2%)	0,39	13
28	190	414,10	73,08	686,29	857,54	232,14	4,87 (1%)	0,39	21,5
29	190	414,10	73,08	681,24	851,21	231,84	9,74 (2%)	0,39	23

compacto, porcentaje de absorción y porcentaje de humedad.

- Agregado fino: granulometría, peso específico, peso unitario compacto, porcentaje absorción y porcentaje de humedad.
- Puzolana: Peso específico.
- Superplastificante: Peso específico.

### Pasos para la aplicación del método

**Paso 1. Determinación de la proporción cemento:puzolana y la resistencia a compresión del material cementante.** Cuando no hay posibilidades de realizar ensayos de laboratorio para determinar la mejor proporción. Se puede elegir una entre 80:20 y 85:15 que la experiencia práctica, tanto en ésta como en las de otros autores, demuestra que son las que normalmente aportan los mejores resultados.

**Paso 2. Cálculo de la relación agua/material cementante.** La ecuación de Bolomey relaciona la resistencia a compresión del concreto con la relación agua/cemento empleada. Para concretos de alta resistencia esta ecuación adopta la forma  $R_{cr} = B_1 \times R_{mc} (c/a + 0,5)$ . La resistencia del cemento corresponde a su marca y es un dato que aporta el fabricante o se obtiene mediante ensayos de laboratorio. En este caso, como el cemento se combina con adiciones puzolánicas, en lugar de cemento se debe hablar de material cementante (mc), y se determina la resistencia del material combinado mediante ensayos de laboratorio. Luego de esta consideración y trabajando en la ecuación de Bolomey se obtiene:

$$a/mc = \frac{1}{(R_{cr}/(B_1 \times R_{mc})) - 0,5}$$

**Paso 3. Determinación de la proporción entre agregados grueso y fino.** Se utiliza el procedimiento gráfico recomendado por Porrero et al. (2012) para hallar la relación arena/agregado total ( $\beta$ ). Para tal fin se requieren las granulometrías expresadas en porcentaje que pasa por cada tamiz de ambos agregados, y las especificaciones de los límites granulométricos recomendados por el mismo autor.

Se toma la proporción resultante del análisis granulométrico y se crean dos nuevas com-

binaciones, una hacia la izquierda y otra hacia la derecha, modificando la proporción base en cinco puntos porcentuales hacia ambos lados. Es decir, si la proporción por granulometría es 60:40 se agregan 65:35 y 55:45. De esta forma se prevén posibles desplazamientos de la proporción ideal según la granulometría en ambas direcciones producto del efecto de la forma. Con las tres proporciones definidas se hacen igual número de mezclas de agregados y se les determina el peso unitario compactado ( $PUC_m$ ) siguiendo el mismo procedimiento normalizado que se emplea para determinar el peso unitario compactado del agregado fino y del agregado grueso.

A partir de los Pesos Específicos de los agregados se calcula el Peso Específico Combinado de cada mezcla por medio de la siguiente ecuación:

$$PEC_m = \frac{(PE_a \times \%F) + (PEC_g \times \%G)}{100}$$

Donde:

$PEC_m$  → peso específico combinado de la mezcla de agregados

$PE_a$  → peso específico de la arena

$\%A$  → porcentaje de la arena en la mezcla

$PE_g$  → peso específico de la grava

$\%G$  → porcentaje de la grava en la mezcla

Teniendo el peso específico y el peso unitario compactado de cada mezcla, se determinan los tres porcentajes de vacío y se elige la proporción que tenga el porcentaje de vacío menor como definitiva. A continuación, la expresión para este cálculo:

$$\% \text{ Vacío}_m = \frac{PEC_m - PUC_m \times 100}{PEC_m}$$

**Paso 4. Definición del contenido de aire.** Al elaborar una mezcla de concreto siempre queda cierta cantidad de aire atrapado que forma parte del volumen total de la misma. Normalmen-

te el volumen de aire atrapado oscila entre 0 y 3% respecto al total de la mezcla; y Aitcin (2004) recomienda asumir el valor medio, 1,5%. De no tener otro criterio se recomienda tomar 1,5%.

**Paso 5. Determinación de la cantidad de agua y el porcentaje de superplastificante.** Se determina la cantidad de agua y el porcentaje de superplastificante, respecto al cemento, necesarios para lograr la consistencia deseada en la mezcla. Para relacionar estas tres variables se idea un procedimiento gráfico como el que se muestra en el ejemplo del gráfico 1. Como primer paso se deben elaborar 4 mezclas intermedias empleando los valores extremos de contenido de agua y porcentaje de superplastificante explicados anteriormente y determinando el resto de los materiales de la forma descrita en el resto de los pasos. A cada una de estas mezclas se les determina el asentamiento.

En cada esquina del gráfico se coloca un valor de asentamiento, distribuido de la siguiente manera: a la esquina **A** le corresponden 1% de

superplastificante y 190 litros de agua, a la **B** 2% y 190 L, a la **C** 1% y 150 L y a la **D** 2% y 150 L, respectivamente.

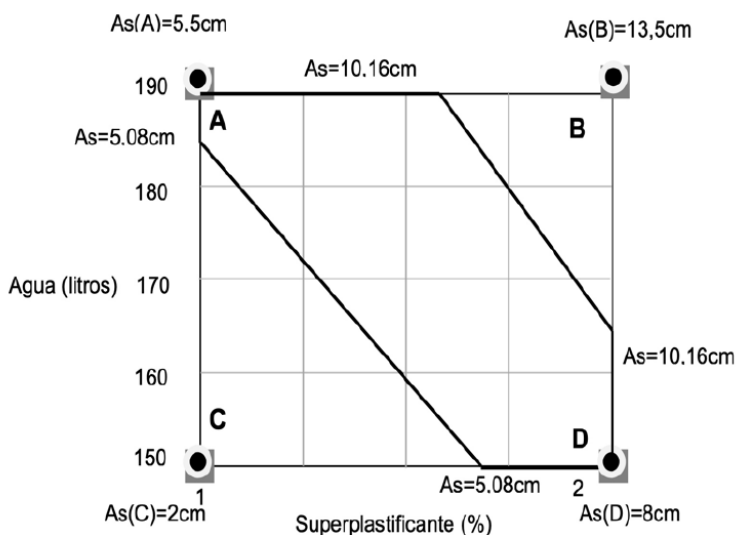
Los valores correspondientes a cada esquina forman cuatro escalas diferentes de asentamientos siguiendo las líneas que conforman el rectángulo de la figura: escalas As(A) – As(B), As(A) – As(C), As(B) – As(D) y As(C) – As(D). En las escalas se ubican los asentamientos límites preestablecidos de 5,08 y 10,16 cm, utilizando el método de interpolación. Se unen con una línea recta los dos puntos cuyo asentamiento es de 5,08 cm y de la misma forma los que corresponden el asentamiento de 10,16 cm. Los límites del asentamiento pueden modificarse de acuerdo con el diseño de la mezcla.

El área que se forma dentro de esas dos rectas y los lados del rectángulo debe resaltarse. Ella contiene los puntos cuya combinación de contenido de agua y de superplastificante garantizan que el asentamiento se mantenga dentro del rango deseado. Se selecciona una combinación dentro del rango, si no hay algún condicionante adicional se recomienda tomar un punto de la zona central del área.

**Paso 6. Cálculo de material cementante y dosis de superplastificante, cemento y puzolana.** Teniendo la cantidad de agua definitiva se fija la cantidad de material cementante a partir de la relación a/mc. La dosis de superplastificante se calcula respecto al contenido de material cementante. Las cantidades de cemento y puzolanas se obtienen dividiendo el material cementante en dos partes según la proporción cemento:puzolana definida en el paso 1.

**Paso 7. Cálculo de las cantidades de agregados grueso y fino.** Al igual que se hizo con las muestras de prueba, pero ahora utilizando los materiales definitivos, se calculan los contenidos de agregados grueso y fino en volumen absoluto de agregados mediante la expresión.

**Gráfico 1.** Ejemplo para la determinación del contenido de agua y contenido de superplastificante



Fuente: Elaboración propia.

$$\begin{matrix} \text{Volumen} & \text{Volumen} & \text{Volumen} & \text{Volumen} & \text{Volumen aire} & \text{Volumen} \\ \text{absoluto +} & \text{absoluto +} & \text{absoluto +} & \text{absoluto +} & \text{atrapado} & \text{mezcla} \\ \text{agua} & \text{cementante} & \text{agregados} & \text{aditivos} & = & \text{(1000 litros)} \end{matrix}$$

Luego se utiliza la proporción de agregados obtenida en el paso 3 y el nuevo volumen absoluto de agregados y se calculan los volúmenes absolutos de agregado grueso y agregado fino. Finalmente se calculan los contenidos en masa de cada uno de los agregados utilizando sus pesos específicos utilizando la expresión de la relación  $\beta$ :

$$\begin{aligned} A &= \beta (A + G) \\ G &= (1-\beta) (A+G) \\ (A/YA) + (G/YG) &= V(A+G) \end{aligned}$$

Donde:

A	→	Masa de la arena
G	→	Masa de la grava
$\beta$	→	Relación arena:agregado total
V	→	Volumen
YA	→	Peso Específico de la arena.
YG	→	Peso Específico de la grava.

**Paso 8. Correcciones por humedad de los agregados.** Los agregados pueden estar en cualquier condición de humedad, por lo que, para mantener las proporciones reales del diseño, lo anterior debe ser tomado en consideración en cuanto al peso de los agregados y a la cantidad de agua de mezcla a utilizar. A continuación, ecuaciones para el cálculo de la corrección por humedad de los agregados:

$$\begin{aligned} G_{ss} &= G_w \times (100+Ab) / (100 + w) \\ A_{ss} &= A_w \times (100+Ab) / (100 + w) \end{aligned}$$

Donde:

$G_{ss}$	→	Peso de la Grava Saturado con Superficie Seca
$A_{ss}$	→	Peso de la Arena Saturado con Superficie Seca
$A_w$	→	Peso de la arena en cualquier condición de humedad
$G_w$	→	Peso de la grava en cualquier condición de humedad
$Ab$	→	Absorción del agregado
$w$	→	Humedad del agregado
$a_m = a_d + A_{ss} - A_w + G_{ss} - G_w$		

Donde:

$a_m$	→	Cantidad de agua a usar en la mezcla
-------	---	--------------------------------------

$a_d$  → Dosis de agua calculada en diseño de mezcla

### Aplicación del método para una mezcla real

Se valida el método con el diseño de una mezcla real a partir de los materiales siguientes:

Peso específico del cemento: 3,15

Marca: Cemento Portland tipo I, de la Corporación Socialista de Cemento, S.A.

Peso específico del microsílíce: 2,20

Peso específico del policarboxilato: 1,08

Caracterización de los agregados:

- Agregado Fino: Peso Específico (2,58), Porcentaje de Absorción (2,25%), Porcentaje de Humedad (0) y Módulo de Finura (2,73). El agregado fino, fue adquirido en Campi Ferrertería, C.A., ubicado en el Municipio Sucre del Estado Bolivariano de Miranda.
- Agregado Grueso: Peso Específico (2,61), Porcentaje de Absorción (3,33%) y Porcentaje de Humedad (0). El agregado grueso fue donado por la empresa Fábrica Nacional de Cementos S.A.C.A (FNC), y el material proviene de la cantera Solichata, Parroquia San Francisco de Yare, Municipio Simón Bolívar, Estado Bolivariano de Miranda. Este agregado fue tamizado para garantizar un tamaño máximo de  $\frac{3}{4}$ ", y lavado para evitar impurezas durante la elaboración de las mezclas en el laboratorio.

Los ensayos de laboratorios realizados para la validación del método fueron realizados en el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME), de la Facultad de Ingeniería (FI), de la Universidad Central de Venezuela (UCV).

### Procedimiento para el diseño de la mezcla

**1. Determinación de la proporción cemento:** puzolana y la resistencia a compresión del material cementante. Se utiliza la relación cemento:puzolana 85:15 y se determina la resistencia

a la compresión del material cementante según norma COVENIN 484-93 (cuadro 2).

Con los materiales del cuadro 2, a los 28 días, los resultados de los ensayos de la resistencia a la compresión de la mezcla cemento es de 247 kgf/cm<sup>2</sup>, y el material cementante es de 272 kgf/cm<sup>2</sup>. Con estos valores de resistencia del cemento, no se puede lograr concretos de alta resistencia. En estos momentos en Venezuela es muy complicado conseguir un cemento de mayor calidad. Sin embargo, el método se puede validar demostrando en qué medida se incrementa la resistencia con la reducción de la relación a/mc, y sobre todo verificando que la resistencia arrojada con la aplicación del método se corresponde con la obtenida en el ensayo.

**2. Cálculo de la relación agua/material cementante (a/mc).** Asumimos como resistencia requerida  $R_{cr}$  de 335 kgf/cm<sup>2</sup>, que es un 35% superior a la del cemento empleado y tomando la resistencia del material cementante aplicamos la ecuación de Bolomey:

$$a/mc = \frac{1}{(R_{cr}/(B_1 \times R_{mc})) - 0,5}$$

$$a/mc = \frac{1}{(335 \text{ kgf/cm}^2 / (0,40 \times 272 \text{ kgf/cm}^2)) - 0,5}$$

$$a/mc = 1 / (3,08 - 0,5)$$

$$a/mc = 0,39$$

**3. Determinación de la proporción entre agregados grueso y fino.** Se realizaron ensayos de laboratorio para determinar la granulome-

tría de los agregados, se utilizó la norma COVENIN 0255-1998, cuyos resultados son reflejados en el cuadro 3. Se utilizó un agregado grueso con tamaño máximo de 3/4" y tamaño máximo nominal de 1/2".

Como se puede observar en el gráfico 2, la línea que representa el cedazo de 1/2" no cumple con los límites granulométricos establecidos. El valor de  $\beta$  debe estar entre 43,5% y 48%, y se toma  $\beta=45\%$ . A partir de este dato, las combinaciones de agregados a calcular su porcentaje de vacío son las siguientes: 40:60, 45:55 y 50:50.

A partir de los Pesos Específicos de los agregados se calcula el Peso Específico Combinado de cada mezcla por medio de la siguiente ecuación:

$$PEC_m = \frac{(PE_a \times \%A) + (PE_g \times \%G)}{100}$$

$$PEC_m (40:60) = \frac{(2,58 \times 40) + (2,61 \times 60)}{100} = 2,59$$

$$PEC_m (45:55) = \frac{(2,58 \times 45) + (2,61 \times 55)}{100} = 2,60$$

$$PEC_m (50:50) = \frac{(2,58 \times 50) + (2,61 \times 50)}{100} = 2,60$$

#### **Cálculo del Peso Unitario Combinado Compactado (PUCC) de acuerdo con las combinaciones de los agregados:**

PUCC = Peso Unitario Combinado Compactado sin envase (g)/volumen del envase (L)

$$PUCC (40:60) = 5.027,40 \text{ g} / 2.817,35 \text{ L} = 1,78 \text{ g/ L}$$

$$PUCC (45:55) = 5.138,40 \text{ g} / 2.817,35 \text{ L} = 1,82 \text{ g/ L}$$

$$PUCC (50:50) = 5.101,40 \text{ g} / 2.817,35 \text{ L} = 1,81 \text{ g/ L}$$

**Cuadro 2.** Contenido de materiales para la determinación de la resistencia a compresión de nueve cubos de concreto por muestra (cemento y material cementante)

Materiales	Cemento	Material Cementante
Cemento (g)	740	629
Microsílice (g)	0	111
Arena Gradada (g)	2.035	2.035
Agua (L/m <sup>3</sup> )	35,9	50,32
Agua/material cementante	0,485	0,68
Flujo (cm)	17	21,2

**Cuadro 3.** Granulometría de los agregados

Tamiz	% Pasa Agregado grueso	% Pasa Agregado fino	Límites granulométricos
3/4"	100		100-90
1/2"	74,84		85-65
3/8"	41,00		75-65
1/4"	7,53	96,85	65-45
#4	2,82	91,94	60-38
#8		81,32	45-20
#16		68,85	35-15
#30		51,75	25-10
#50		24,91	16-5
#100		8,69	8-1

Teniendo el Peso Específico y el Peso Unitario Combinado de cada mezcla, se determinan los tres porcentajes de vacíos, y se elige la proporción que tenga el porcentaje de vacío menor.

$$\% \text{ Vacío}_m = \frac{\text{PEC}_m - \text{PUC}_m \times 100}{\text{PEC}_m}$$

Se elige la proporción que tenga el porcentaje de vacío menor y esa será la definitiva.

$\beta$  45:55

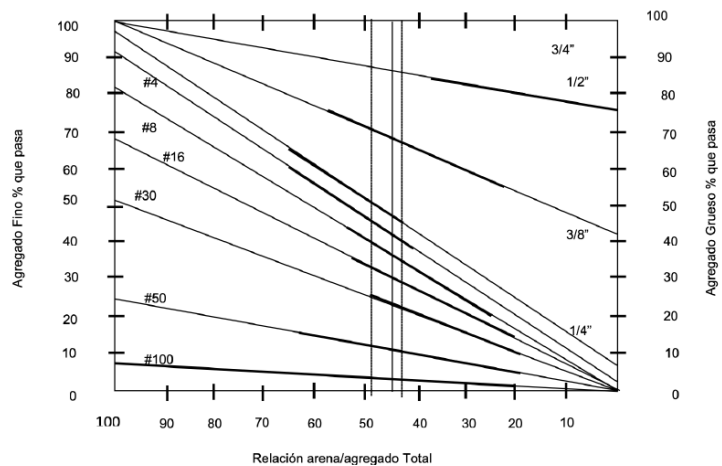
$$\% \text{ Vacío}_m = \frac{2,59 - 1,82 \times 100}{2,59} = 29,72$$

$\beta$  40:60

$$\% \text{ Vacío}_m = \frac{2,60 - 1,78 \times 100}{2,60} = 31,54$$

$\beta$  50:50

$$\% \text{ Vacío}_m = \frac{2,60 - 1,81 \times 100}{2,60} = 31,54$$

**Gráfico 2.** Determinación de  $\beta$  por el procedimiento gráfico de Porrero et al. (2012)

Fuente: elaboración propia.

La proporción **45:55** es la que tiene menor porcentaje de vacíos con un 29,72%.

**4. Definición del contenido de aire.** Se utiliza el 3% como el valor de contenido de aire más alto recomendado, tomando en cuenta las condiciones de elaboración de las mezclas de forma manual para las muestras de cilindros.

**5. Determinación de la cantidad de agua y el porcentaje de superplastificante.** Primeramente, se diseñaron las cuatro muestras intermedias, a partir de los límites de contenido de agua y porcentaje de superplastificante establecidos y siguiendo el procedimiento previsto en el método. A cada mezcla se le midió el asentamiento y los resultados se muestran en el cuadro 4.

Con los límites de contenido de agua y porcentaje de superplastificante, así como los asentamientos para las mezclas intermedias,

**Cuadro 4.** Dosificaciones y asentamiento de cuatro mezclas representadas en el gráfico 3

Dosificación de mezclas de concreto								
Agua del diseño (L)	Cemento (kg) (85%)	Mmicrosílíce (kg) (15%)	Agregado Fino (kg)	Agregado Grueso (kg)	Agua de la mezcla (L)	Superplastificante (L/m <sup>3</sup> )	a/mc	Asentamiento (cm)
150	326,92	57,70	772,51	962,54	197,38	3,85 (1%)	0,39	3
150	326,92	57,70	768,50	957,55	197,13	7,12 (2%)	0,39	13
190	414,10	73,08	687,35	856,44	232,16	4,87 (1%)	0,39	21,5
190	414,10	73,08	682,28	850,10	231,85	9,74 (2%)	0,39	23

se elabora el gráfico para la determinación del contenido de agua y el porcentaje de superplastificante (gráfico 3).

El área demarcada en el gráfico 3 representa todas las combinaciones de contenido de agua y porcentaje de superplastificante que se pueden utilizar sin sobrepasar los límites de asentamiento requeridos en la mezcla. Se pudo escoger cualquier combinación que estuviera dentro del área. En este caso se decidió tomar una combinación de 160 L de agua y 1,25% de superplastificante para lograr una mezcla fluida, fácil de trabajar, pero sin salirse del área permitida. Interpolando en el gráfico se obtiene que el asentamiento teórico de la mezcla, para la combinación fijada es de 9,7 cm.

**6. Cálculo del material cementante y la dosis de superplastificante, cemento y puzolana.**

Para el cálculo del material cementante, se aplica la ecuación  $\alpha = a/mc$ , y se despeja mc:

$$\text{Material cementante} = a/\alpha$$

$$\text{Material cementante} = 160 \text{ kg} / 0,39 = 410,26 \text{ kg}$$

Para el cálculo del microsílíce se utiliza el porcentaje indicado del 15% de sustitución del cemento por microsílíce:

$$\text{Microsílíce} = 410,26 \text{ kg} \times 0,15 = 61,54 \text{ kg}$$

$$\text{Cemento} = 410,26 \text{ kg} - 61,54 \text{ kg} = 348,72 \text{ kg}$$

$$\text{Policarboxilato} = 410,26 \text{ kg} \times 0,0125 = 5,13 \text{ kg}$$

**7. Cálculo del contenido de agregado grueso y fino.** De acuerdo con el paso número 3, la proporción de los agregados es 45:55. Antes de calcular el volumen y la masa de los agregados se debe calcular el volumen parcial del resto de los materiales, calculados en peso durante los pasos anteriores. El volumen se calcula con la fórmula:

$$\text{Volumen Absoluto} = \text{masa} / \text{peso específico}$$

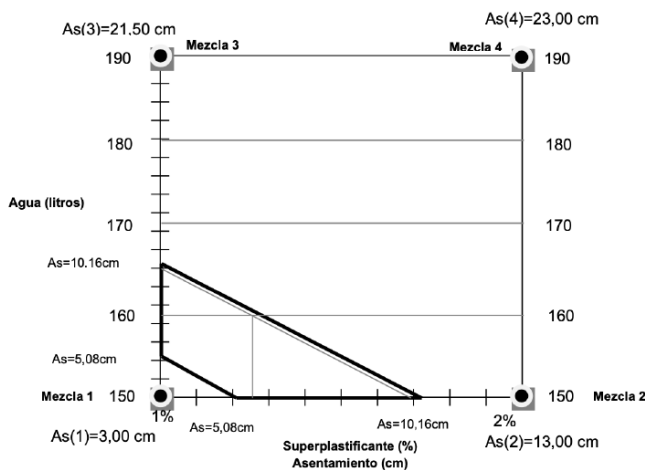
Los volúmenes de los materiales obtenidos por esta vía se muestran en el cuadro 5.

El volumen de los agregados es la diferencia entre 1000 L y el volumen parcial:

$$\text{Volumen de los agregados} = 1000 \text{ L} - 333,42 \text{ L}$$

$$\text{Volumen de los agregados} = 666,58 \text{ L}$$

**Gráfico 3.** Gráfica para determinación del contenido de agua y porcentaje de superplastificante en función del asentamiento



Fuente: Elaboración propia.

**Cuadro 5.** Cantidades parciales de materiales en masa y volumen

Materiales	Masa (kg)	Volumen Absoluto (L)
Cemento (85%)	348,72	110,70
Microsílíce (15%)	61,54	27,97
Agua 160 L	160	160
Policarboxilato (1,25%)	5,13	4,75
Contenido de Aire Atrapado 3 %	0	30,00
Volumen Parcial		333,42

Para el cálculo del contenido de agregados se utiliza la siguiente ecuación:

$$A = \beta (A + G) \\ (A + G) = A / \beta$$

Se sustituye (A+G) en la siguiente ecuación:

$$G = (1 - \beta) (A + G) \\ G = (1 - \beta) A / \beta \\ G = A / \beta - \beta A / \beta \\ G = \frac{A - \beta A}{\beta}$$

Se sustituye G en la siguiente ecuación:

$$(A/YA) + (G/YG) = V(A+G) \\ \frac{A}{YA} + \frac{\frac{A - \beta A}{\beta}}{YG} = 666,58 \text{ kg} \\ \frac{A}{YA} + \frac{A - \beta A}{\beta \times YG} = 666,58 \text{ kg} \\ \frac{A}{2,58} + \frac{A - 0,45 A}{0,45 \times 2,61} = 666,58 \text{ kg} \\ A \left( \frac{1}{2,58} + \frac{1 - 0,45}{0,45 \times 2,61} \right) = 666,58 \text{ kg} \\ A (0,39 + 0,47) = 666,58 \text{ kg} \\ A (0,86) = 666,58 \text{ kg} \\ A = 666,58 \text{ kg} / 0,86 \\ A = 775,09 \text{ kg}$$

Luego se calcula el contenido del agregado grueso con la sustitución del contenido del agregado fino obtenido, en la siguiente ecuación:

$$(A/YA) + (G/YG) = V(A+G) \\ (775,09 \text{ kg} / 2,58) + (G / 2,61) = 666,58 \text{ kg} \\ 33,42 + G / 2,61 = 666,58 \\ G = (666,58 \text{ kg} - 300,42 \text{ kg}) \times 2,61 \\ G = 955,67 \text{ kg}$$

El cálculo de los volúmenes de los agregados se realiza aplicando la siguiente ecuación. Los resultados obtenidos se expresan en el cuadro 6.

$$V = \text{masa del agregado} / \text{Peso Específico del agregado}$$

Volumen agregado fino = 775,09 kg / L/2,58 = 300,42 L

Volumen agregado grueso = 955,67 kg / L/2,61 = 366,16 L

#### 8. Correcciones por humedad de los agregados:

$$G_{sss} = G_w \times (100 + A_b) / (100 + w)$$

$$G_{sss} = 955,67 \text{ kg} \times (100 + 0\%) / (100 + 2,25\%) = 934,64 \text{ kg}$$

$$A_{sss} = A_w \times (100 + A_b) / (100 + w)$$

$$A_{sss} = 775,09 \text{ kg} \times (100 + 0\%) / (100 + 3,33\%) = 750,11 \text{ kg}$$

$$aM = aD + A_{sss} - A_w + G_{sss} - G_w$$

$$aM = 160 + 775,09 \text{ kg} - 750,11 \text{ kg} + 955,67 \text{ kg} - 934,64 \text{ kg} = 206,01 \text{ kg}$$

**Cuadro 6.** Dosificación de materiales

Materiales	Masa (kg)	Volumen Absoluto (L)
Cemento (85%)	348,72	110,70
Microsílíce (15%)	61,54	27,97
Agua 160 L	160	160
Polycarboxilato (1%)	5,13	4,75
Contenido de Aire Atrapado 3 %	0	30,00
Agregado Fino	775,09	300,42
Agregado Grueso	955,67	366,16
Volumen Total		1.000

**Cuadro 7.** Dosificación final

Materiales	Masa (kg)	Volumen Absoluto (L)
Cemento (58%)	348,72	110,70
Microsílíce (15%)	61,54	27,97
Agua 160 L	206,01	206,01
Polycarboxilato (1,25%)	5,13	4,75
Agregado Fino	750,11	290,74
Agregado Grueso	934,64	358,10

Finalmente se elaboró una mezcla de comprobación, con esa dosificación, a la cual se le midió el asentamiento en estado fresco y la resistencia a compresión a los 28 días. El asentamiento se obtuvo en el laboratorio, por medio del ensayo del cono de Abrams, arrojando un valor de 9,5 cm. Comparándolo con el valor teórico predeterminado en la aplicación del método: 9,7 cm, se aprecia que ambos son casi idénticos, quedando evidenciado que el procedimiento gráfico del paso 5 funciona.

Una muestra de dos cilindros con la dosificación obtenida a los 28 días presentó una resistencia a la compresión de 359 kgf/cm<sup>2</sup>. La resistencia teórica definida en el ejemplo fue de 335 kgf/cm<sup>2</sup>, existiendo una diferencia entre ambas de apenas 24 kgf/cm<sup>2</sup>. En los criterios de aceptación y rechazo sugerido por la norma COVENIN 1753:2003 se establece que ningún ensayo individual (promedio de al menos dos cilindros normalizados) estará por debajo de  $F_{cr}$  en más de 35 kgf/cm<sup>2</sup> cuando  $F_{cr} \leq 350$  kgf/cm<sup>2</sup>, o de 0,1  $F_{cr}$  cuando  $F_{cr} > 350$  kgf/cm<sup>2</sup>. Aunque en este caso no es exactamente la misma situación, podría tomarse este criterio como referencia y establecer que para aceptar el resultado obtenido como válido debería existir una diferencia no mayor que 35,9 kgf/cm<sup>2</sup> entre la resistencia teórica del método y el valor real de la mezcla. Nuevamente, con una diferencia de 24 kgf/cm<sup>2</sup> se satisface el criterio de selección, con lo cual queda ratificada la validez del método propuesto.

Claramente, para certificar de manera definitiva el método y poder utilizarlo de manera generalizada se necesita de un mayor número de ensayos, los cuales al final podrían generar la necesidad de ajustes en determinados aspectos, sin embargo, hasta esta fase, la investigación queda suficientemente validada tanto desde el punto de vista teórico como práctico.

## Conclusiones

Diseñar una mezcla de concreto requiere de un procedimiento bastante riguroso que permita determinar el contenido que en la misma debe haber de cada material.

Existen diversos métodos, nacionales y extranjeros, desarrollados para tal fin. Tanto el método de Porrero, que es el más utilizado en Venezuela, como el resto de los métodos y procedimientos aquí estudiados, muestran limitaciones diferentes que dificultan su aplicación en el diseño de mezclas de concreto de alta resistencia, en las condiciones de Venezuela.

El método presentado resuelve las limitaciones mencionadas por los métodos para concreto tradicional al considerar en sus procedimientos el uso de puzolanas como sustituto del cemento, aditivos y contenido de aire. Y para el caso de los métodos para concreto de alta resistencia estudiados, la propuesta soluciona las limitaciones con el uso de una herramienta gráfica donde se determina el contenido de agua y porcentaje de superplastificante en función del asentamiento, dando al diseñador de mezcla una flexibilidad para la toma de decisiones con factores de trabajabilidad, economía y resistencia del material. Se ofrece en esta investigación la forma de obtener la cantidad de cada uno de los materiales de la mezcla, así como la combinación más adecuada del contenido de agua y de superplastificante que garantiza la consistencia requerida de la mezcla.

El ejemplo real de aplicación del método corrobora su validez, demostrando que tanto la consistencia de la mezcla en estado fresco como la resistencia a compresión a los 28 días, obtenidos experimentalmente, coinciden con los valores teóricos considerados en la aplicación del método.

Finalmente, durante esta prueba no se pudo lograr un concreto de alta resistencia propiamente dicho, debido a no contar con un cemento con la calidad necesaria. Sin embargo, se pudo demostrar que con la utilización combinada de adiciones puzolánicas y superplastificantes, y en proporción con la reducción de la relación agua/material cementante, se puede

incrementar considerablemente la resistencia a compresión del concreto. Este incremento notable es la clave para la obtención de concretos de alta resistencia, por lo que con el cemento adecuado se puede afirmar que a partir de estos materiales es posible obtener concreto de alta resistencia y que el método propuesto es adecuado para el diseño de la mezcla.

## Referencias bibliográficas

- ACI 363.2R-98-*Guía para el control de calidad y ensayos de concreto de alta resistencia*. Informe del Comité 363 del American Concrete Institute-ACI, publicado en 1998: <https://file.yizimg.com/395203/2012101711414749.pdf>
- ACI 211.4R-93 (1998). *Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash*. American Concrete Institute. Farmington Hills, Michigan, USA.
- Aïtcin, Pierre-Claude (2004). *Modern Concrete Technology 5. High performance concrete*. Université de Sherbrooke. E & FN SPON. Quebec, Canada.
- COVENIN 1753:2003. (2003). *Proyecto y construcción de obras de concreto estructural*. Fondonorma. Caracas, Venezuela
- Giraldo, Orlando (2004). *Diseño de mezclas de hormigón. Métodos empíricos y analíticos*. Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.
- Gorchakov, G. (1981). *Materiales de la construcción*. Editorial MIR Moscú. Rusia.
- Mejias, L. y Águila, I. (2018). Estudio de la resistencia a la compresión de morteros a base de cemento, puzolana, y superplastificante para su aplicación en concreto de alta resistencia, en: *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, vol. 33, n° 3 y 4, pp. 7-14, 2018. Caracas, Venezuela.
- O'Reilly, V. (2007). *Métodos para dosificar concretos de elevados desempeños*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. México.
- Porrero, J.; Grases, J.; Ramos, P. (2012). *Manual de concreto estructural conforme a la norma COVENIN 1753:03*. Siderúrgica del Turbio, S.A. Venezuela.