

ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO EN HORMIGONES DE ALTO DESEMPEÑO QUE EMPLEAN NANOSÍLICE

Luis González Solá¹, Omar Molina Bas², Genock Portela Gauthier³, Encarnación Reyes⁴

¹Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez, PO Box 9000
Mayagüez PR 00681-9000
luis.gonzalez@upr.edu

²Departamento de Ingeniería General, Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez, PO Box 9000 Mayagüez PR
00681-9000
omar.molina1@upr.edu

³E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid,
genock.portela@upr.edu

⁴Calle del Profesor Aranguren, Ciudad Universitaria, Madrid, España
encarnacion.reyes@upm.es

RESUMEN

Este estudio analiza la relación costo-beneficio en mezclas de hormigón con nanosílice, humo de sílice y cenizas volantes como adiciones minerales. La resistencia a compresión de cada diseño de mezcla fue medida experimentalmente desde los 7 hasta los 180 días. La prueba acelerada de permeabilidad de cloruros (Rapid chloride permeability test, RCPT, en inglés) se utiliza para estimar permeabilidad del hormigón, dicho parámetro está altamente correlacionado con su durabilidad. Adicionalmente se hicieron estimados del costo de materiales para cada diseño de mezcla. Con los datos experimentales y financieros se desarrollaron ecuaciones capaces de estimar el comportamiento en compresión, la permeabilidad y el costo de dichas mezclas utilizando como variables la dosificación de adiciones minerales. Las ecuaciones que describen la resistencia a compresión y el costo son utilizadas para definir un parámetro que relaciona calidad y precio. Dicho parámetro consiste en dividir la resistencia a compresión entre el costo para cada mezcla. Siendo el diseño de mezcla con mayor unidades de resistencia a compresión por cada dólar invertido considerado el de mejor relación costo-beneficio. Con el uso de las ecuaciones modelo se puede estimar la relación costo-beneficio para todas las posibles combinaciones de adiciones minerales dentro de los límites de dosificaciones experimentales. Este análisis puede estimar de forma rápida cuales son las combinaciones de adiciones minerales que presentan la mejor relación costo-beneficio.

Palabras claves: nanosílice, cemento, hormigón, costos, durabilidad

COST-BENEFIT ANALYSIS OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE WITH NANOSILICA

ABSTRACT

This study analyzes the cost-benefit relationship of concrete mixture designs with nanosilica particles, silica fume and fly ash as mineral admixtures. Each mixture was tested for compressive strength from an age of 7 days up to 180 days. The rapid chloride permeability test (RCPT) was performed to estimate permeability, which is highly correlated with the concrete's durability. Material's cost estimates were performed for each mixture design. Model equations were developed from the experimental and financial data capable of estimating compressive strength, permeability and material's cost using only the mineral admixture dosage as variables. The model equations that describe compressive strength behavior and mixture cost were combined to define a cost-benefit parameter. This parameter is obtained by dividing compressive strength into the mixture cost. The mixture design with the highest number of compressive strength units per dollar invested in materials is considered the most cost-effective. With the use of the model equations, the cost-benefit parameter of all possible mineral admixture combinations within the experimental range can be calculated. This analysis allows for a rapid assessment of which mineral admixture combinations provide the highest cost-benefit relationship.

Keywords: nanosilica, cement, concrete, costs, durability

Nota Editorial: Recibido: septiembre 2019; Aceptado: febrero 2020

1. INTRODUCCIÓN

La resistencia a compresión es el parámetro del hormigón más utilizado en ingeniería civil [1] y una baja permeabilidad está altamente correlacionada con un incremento en su durabilidad [2-4]. Un diseño de mezcla óptimo busca maximizar resistencia a compresión, minimizar permeabilidad y reducir costos. Cumplir con estos objetivos de forma simultánea presenta un reto de gran complejidad. Un incremento en resistencia a compresión y reducción en permeabilidad ha sido observado en diseños de mezclas que contienen partículas de nanosílice (NS), pero actualmente no se ha establecido uniformemente una dosificación de nanosílice óptima [5-11].

Actualmente, el costo de NS es relativamente alto al compararlo con otras adiciones minerales como humo de sílice (HS) o cenizas volantes (CV). El alto costo de NS afecta negativamente su relación costo-beneficio. Dichas condiciones demuestran la necesidad de establecer un método eficiente de estimar la relación costo-beneficio de mezclas de hormigón adiciones minerales. Este estudio analiza el desempeño económico, mecánico, y la durabilidad de diseños de mezclas de hormigón con NS, HS y CV mediante análisis de resistencia a compresión, RCPT y estimados de costos.

Se llevó a cabo un estudio del mercado para obtener el costo de materiales y así estimar el costo de cada diseño de mezcla experimental. Una vez recopilados todos los datos experimentales, los mismos se utilizan para general ecuaciones modelo que predicen el costo, resistencia a compresión y permeabilidad del hormigón. Las ecuaciones modelo son utilizadas para cumplir con tres objetivos. El primero es determinar la dosificación óptima de NS entre los rangos experimentales utilizados, dichos son desde 0% hasta 3% del material cementicio. Segundo, se establece la relación costo-beneficio entre resistencia a compresión y costos. Tercero, el estimado de permeabilidad se utiliza como un dato adicional al estimar la efectividad de cada diseño de mezcla. Finalmente se determina de forma cuantitativa cuál es el diseño de mezcla con la más alta relación costo-beneficio y alta durabilidad.

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Todos los diseños de mezcla utilizan cemento Portland tipo I (ASTM C150) manufacturado por Essroc San Juan, en Dorado, Puerto Rico. Tabla 1 muestra las propiedades físicas y composición mineralógica del cemento.

Tabla 1: Propiedades físicas y composición mineralógica del cemento Portland

ASTM C 114 (% Masa)						ASTM C150 (% Masa)		
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₃ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	C ₃ S	C ₃ A	Álcalis Totales
21,0	5,3	3,1	65,5	1,2	2,8	59,1	8,8	0,42
Finura, Blaine (m ² /kg) = 431 (ASTM C204)								

La piedra y arena utilizada cumple con los requisitos del código ASTM C33 con un tamaño máximo utilizado de 9,5 mm. Dichos materiales fueron secados al horno previo a mezclar. La gradación combinada para todos los diseños se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2: Gradación

Tamiz	9,5-mm	4,75-mm	2,36-mm	1,18-mm	600-μm	300-μm	150-μm	75-μm
%Pasando	100,00	64,92	29,67	26,24	17,01	7,51	2,20	0,67

El contenido de óxido de silicio y las propiedades físicas de las adiciones minerales se presenta en la Tabla 3. Las partículas de NS utilizadas son opalescentes, inodoras y amorfas en estado coloidal. Humo de sílice son partículas no condensadas y las cenizas volantes son clasificadas como clase F. La adición química utilizada es un reductor de agua de alto rango basado en policarboxilato que cumple con los requisitos del código ASTM C494 como Tipo A y F, y el ASTM C1017 tipo I.

Tabla 3: Propiedades de las adiciones minerales

SiO ₂ (% Masa)		Tamaño medio (nm)	ASE (m ² /kg)
Nanosílice	99,9	25	109000
Humo de sílice	91,3	200	25000
Cenizas volantes	45,97	25000	320

La dosificación de adiciones minerales, definidas como porcentaje del material cementicio fueron las

siguientes: i) partículas de nanosílice, NS% = [0 a 3]; ii) humo de sílice, HS% = [0 a 20] y, iii) cenizas volantes, CV% = [0 a 20]. La dosificación combinada de HS y CV nunca excede 20% del material cementicio. Tabla 4 presenta la dosificación de adiciones minerales para cada diseño de mezcla. Los diseños y el procedimiento de mezcla fueron ejecutados en conformidad con el ASTM C192 y estudios previos [12].

Tabla 4: Dosificación de diseños de adiciones minerales para cada diseño de mezcla

Mezcla	1*	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NS%	0	1,5	3	0	1,5	3	0	1,5	3	1,5	1,5	1,5
HS%	0	0	0	20	20	20	0	0	0	5	10	15
CV%	0	0	0	0	0	0	20	20	20	10	10	5

***Mezcla # 1 es la mezcla de control**

Las muestras cilíndricas de hormigón utilizadas para los ensayos de resistencia a compresión poseen un diámetro de 50 mm y una altura de 100 mm. 24 horas luego de mezclado las muestras son sumergidas en una solución saturada de cal común según indica el código ASTM C192. Los ensayos se llevaron a cabo a los 7, 28, 90 y 180 días. Se fallaron 4 muestras para cada diseño de mezcla en cada fecha en conformidad con el código ASTM C39.

Para los ensayos de la prueba rápida de permeabilidad de cloruros (RCPT), se utilizaron cilindros de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura. Las muestras se almacenaron sumergidas en agua (ASTM C192). Por 21 antes del ensayo, las muestras se colocan en un tanque de curado acelerado en agua con una temperatura de 38°C. Utilizando una sierra, los cilindros son rebanados para producir dos muestras de 100 mm de diámetro y 50 mm de altura. Con cada rebanada se ejecuta un ensayo. La preparación de las muestras y los ensayos fueron llevados a cabo según el código ASTM C1202 a los 28, 90, y 180 días luego de mezclado. En el ensayo RCPT una corriente eléctrica pasa a través de la muestra de hormigón por un tiempo total de 6 horas. Luego de este tiempo se observa la carga total. Dicha carga, medida en culombios, esta correlacionada con la permeabilidad del hormigón. Los resultados del RCPT son clasificados por el ASTM según se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5: Clasificación de resultados del análisis de permeabilidad

Carga total (culombios)	Categoría de permeabilidad
>4,000	Alta
2,000-4,000	Moderada
1,000-2,000	Baja
100-1,000	Muy Baja
<100	Despreciable

Un estudio del mercado se llevó a cabo para determinar los costos de los diseños de mezcla. Los costos considerados, en unidades de dólares/1000kg se presentan en la Tabla 6. El costo de las cenizas volantes utilizado considera dicho material como uno secundario de otros procesos industriales en los Estados Unidos. El costo de materiales no refleja los costos de transporte de los mismos. Luego de que la información de todos los ensayos fue compilada se generan las ecuaciones modelo para resistencia a compresión, permeabilidad y costo de mezcla.

Tabla 6: Costo de materiales

Material	Cemento	Nanosílice	Humo de sílice	Cenizas Volantes
Costo (\$/1000kg)	\$165,00	\$9650,00	\$1212,20	\$55,10

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 7 muestra el resultado promedio de 4 muestras para resistencia compresión obtenidos a los 7, 28, 90 y 180 días. Los resultados de RCPT son el promedio de 2 muestras para cada diseño de mezcla a los 28, 90 y 180 días. Los costos son presentados en unidades de dólares metro cubico de hormigón.

Tabla 7: Resultados de ensayos y costo unitario de los diseños de mezcla

Resistencia a Compresión (MPa)					Carga total (culombios)			Costo
Promedio de resultado de 4 ensayos					Promedio de resultado de 2 ensayos			
	T=7	T=28	T=90	T=180	T=28	T=90	T=180	(\$/m3)
M1*	53	70	77	77	1717	1175	981	129
M2	57	75	81	89	1390	872	550	275
M3	66	79	96	97	946	794	281	422
M4	67	85	100	107	100	119	95	211
M5	68	84	103	108	97	83	63	338
M6	70	85	100	106	103	66	64	466
M7	43	59	81	90	634	331	215	81
M8	44	64	83	86	568	415	418	231
M9	54	69	82	86	561	267	334	355
M10	61	74	90	97	260	244	198	262
M11	62	80	92	97	153	171	174	284
M12	61	79	91	101	107	107	96	314

*Mezcla # 1 es la mezcla de control

Ecuaciones del modelo predictivo

Las variables consideradas para las ecuaciones del modelo predictivo son el porcentaje de material cementicio sustituido por adiciones minerales y el tiempo. El porcentaje de partículas de NS, el HS, las CV y el tiempo serán representadas por las variables A, B, C y T respectivamente. El proceso de generar las ecuaciones modelo es iterativo. Para cada iteración se elimina un término que demuestre tener un valor-p mayor al factor de significancia $\alpha=0,05$. Un valor-p igual o menor a 0,05 (5%) indica que existe una probabilidad mayor a un 95% de que el término esta tiene un efecto estadísticamente significativo en la variable de respuesta. La eliminación de cualquier término de la ecuación con un valor-p menor a 0,05 resultaría en una reducción en la capacidad predictiva del modelo. En cada iteración se monitorean otros parámetros como el R^2 del modelo, y el valor-p de la falta-de-ajuste ("lack-of-fit" en inglés) para verificar que la precisión del modelo está incrementando con cada iteración. Al finalizar el proceso todos los términos de la ecuación tienen un valor-p igual o menor a 0,05. Los resultados de las ecuaciones predictivas se comparan con los resultados obtenidos experimentalmente para observar si existen irregularidades. A continuación, se presentan las ecuaciones para el modelo de resistencia a compresión (Ecuación 1), permeabilidad (Ecuación 2) y costos (Ecuación 3).

$$\begin{aligned} \text{Modelo de Resistencia a Compresión (MPa)} = & \\ 45,3 + 3,63A + 0,71B - 0,55C + 1,17T - 0,015T^2 + 8,4 \times 10^{-5}T^3 - 2 \times 10^{-7}T^4 - 0,15AB + 0,02AT + & \\ 0,004BT + 0,007CT - 0,001ABT - 0,002ACT + 0,006BC^2 - 0,004B^2C & \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Modelo de Permeabilidad (Carga total RCPT, Culombios)} = & \\ 1894,5 - 205,8A - 110,8B - 60,4C - 8,8T - 0,02T^2 + 0,98B^2 - 9,8AB + 10,2AC + 0,48BT + 0,17CT - & \\ 1,12 \times 10^{-3}BT^2 & \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{Modelo de costos de materiales (dólares/1000kg)} = 138,63 + 91,2A + 3,22B - 2,54C \quad (3)$$

Para todas las ecuaciones: A = NS%, B = HS%, C = CV% y T = tiempo (días)

En la Tabla 8 se presenta el error estándar, los valores de R^2 , y el valor-p para la falta-de-ajuste. Para todos los modelos la precisión predictiva es mayor de 93% y el error por falta-de-ajuste no demostró ser estadísticamente significativo.

Tabla 8: Propiedades de los modelos predictivos

Modelo	E.S.	R^2	R^2 Ajust.	R^2 Predictivo	FDA Valor-P
Resistencia a compresión (MPa)	4,24	94,19%	93,72%	93,18%	0,969
Permeabilidad (culombios)	92,22	95,79%	95,02%	93,86%	0,179
Costos(dólar/1000kg)	8,45	99,58%	99,42%	98,71%	-

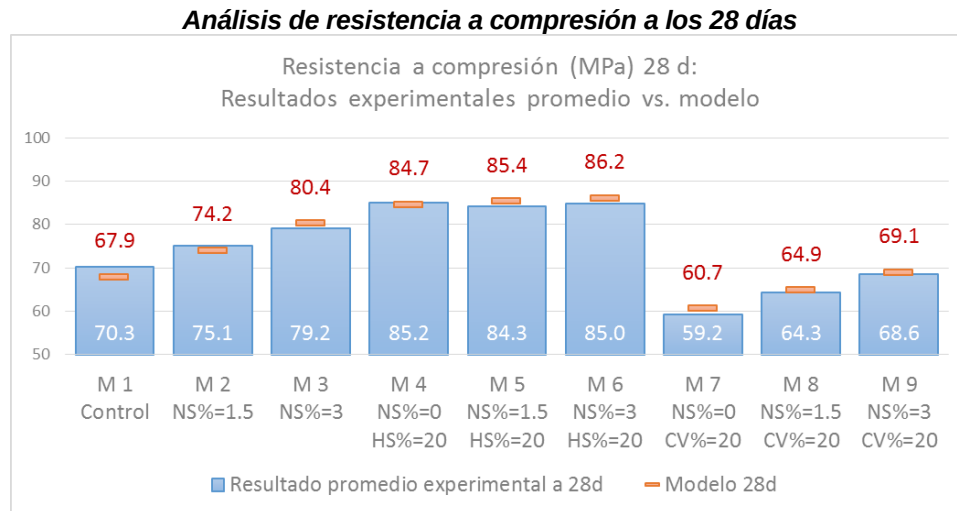


Figura 1: Resultados experimentales y modelados de resistencia a compresión 28 días (MPa)

En la Figura 1 se observan los resultados de los diseños de mezclas más relevantes a los 28 días. Las columnas, en color azul, representan los resultados promedio de 4 ensayos para cada diseño de mezcla. En rojo se muestra el resultado calculado con las ecuaciones modelo. Los resultados de los diseños de mezcla 1, 2 y 3 muestran como aumenta la resistencia a compresión a medida que la dosificación de NS incrementa desde 0% hasta 3%. Dentro de dicho rango de dosificación se encontró un aumento lineal en resistencia con el valor máximo para la mezcla 3. Comparando las mezclas 3 y 4, la primera tiene una dosificación de 3% NS y la número 4 contiene únicamente 20% de HS. Los resultados demostraron que, en todo momento, desde los 7 hasta los 180 días, la mezcla 3 (3% NS) obtuvo una resistencia a compresión menor a la mezcla 4 (20% HS). Las mezclas 4, 5 y 6 combinan HS con NS. Los resultados mostraron que, para dichas mezclas, que todas contienen 20% HS, el añadir NS no presentó beneficios en resistencia a compresión, su valor se mantuvo relativamente constante. Las mezclas 7, 8 y 9 muestran el comportamiento al combinar CV con NS. Los resultados demuestran que la resistencia a compresión en mezclas que contienen 20% de CV aumenta mientras la dosificación de NS incrementa de 0% a 3% a los 28 días. Sin embargo, se puede observar en la Tabla 7 que dicho incremento es de menor intensidad a los 90 días. Para los 180 días, el diseño de mezcla con mayor resistencia a compresión de este grupo es el número 7 que no contiene NS, únicamente 20% de CV.

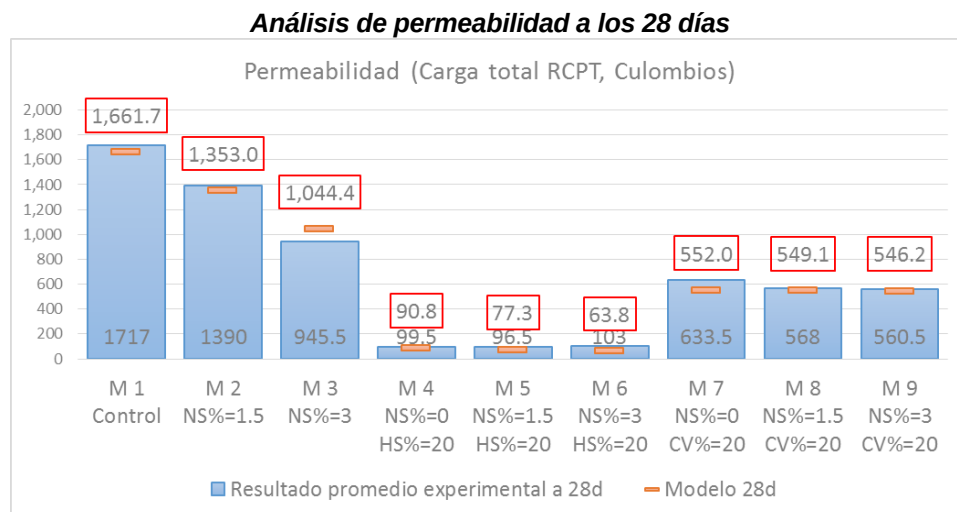


Figura 2: Resultados experimentales y modelados del análisis de permeabilidad (RCPT) a 28 días

El uso de NS (mezclas 1 a 3) demostró reducir la permeabilidad (ver Figura 2). Dicha reducción fue linealmente proporcional con la dosificación de NS y su valor mínimo se observó para la mezcla 3. El comparar los diseños de mezcla 3 y 4 permite observar el mejor desempeño que brinda utilizar 20% de HS versus 3% de NS. Mientras que la mezcla 3 (3% NS) reduce la permeabilidad a aproximadamente 1,000 culombios (rango de permeabilidad:

muy bajo), la mezcla 4 (20% HS) reduce la permeabilidad a aproximadamente 100 culombios (rango de permeabilidad: despreciable). Similar a lo ocurrido en resistencia a compresión, se observó poca diferencia entre los resultados de las mezclas 4, 5 y 6. Esto demuestra que el añadir NS a mezclas que ya contienen 20% de HS no presenta beneficios en reducción de permeabilidad. El diseño de mezcla 7 (20% CV) mostró más baja permeabilidad a los 28 días que el diseño de mezcla 3 (3% NS). Los resultados de las mezclas 7, 8 y 9 muestran que añadir NS a mezclas con 20% de CV puede reducir la permeabilidad, sin embargo, la mejoría observada fue menor a 80 culombios.

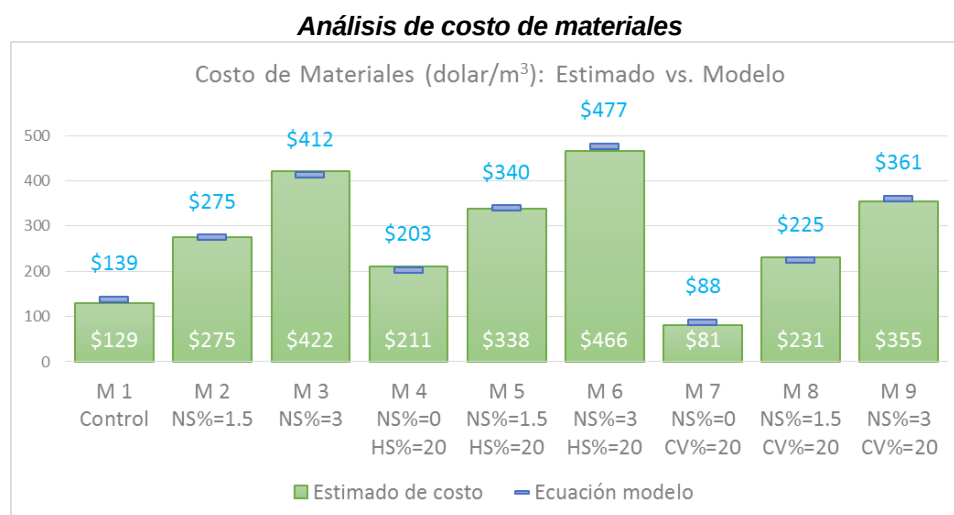


Figura 3: Estimado detallado y modelo de costo de materiales

El cambio en el costo de materiales para los diseños de mezcla muestra la mayor tasa de crecimiento al aumentar la dosificación de NS (Figura 3). Tomando como ejemplo el caso de las mezclas 1 a la 3, el costo se triplica entre la mezcla de control y la mezcla 3 con 3% de NS como material cementicio. Comparando las mezclas 3 y 4 vemos que el diseño que contiene 3% de NS cuesta aproximadamente el doble de lo que cuesta el diseño con 20% de HS. El costo considerado de CV es menor al del cemento portland por lo tanto la mezcla 7 (20% CV) es la única que presenta un costo más bajo al de la mezcla de control, y por lo tanto la más económica del grupo.

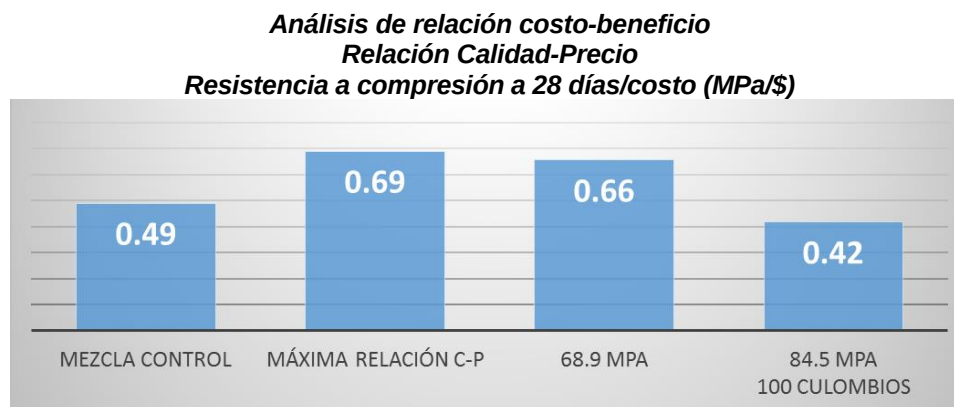


Figura 4: Análisis relación costo-beneficio

Tabla 9: Propiedades de diseños de mezcla en el análisis costo-beneficio

	Mezcla Control	Máxima Relación C-P	68,9 MPa	84,5 MPa 100 Culombios
Adiciones minerales	-	CV%=20	HS%=3, CV%=17	HS%=19,8
Compresión (MPa)	67,9	60,7	68,9	84,5
Costo (\$/m ³)	\$138,63	\$87,83	\$105,11	\$202,39
Permeabilidad(culombios)	1,662	552	433	100

La relación calidad precio se define por el término calculado al dividir la resistencia a compresión entre su costo

en dólares. Este término permite conocer cuántas unidades de resistencia a compresión se pueden atribuir a cada dólar invertido en materiales para la mezcla de hormigón. Como un dato adicional de análisis se compara los resultados de permeabilidad en el análisis RCPT para cada mezcla. En este análisis los parámetros se calculan utilizando las ecuaciones 1, 2 y 3. Estas ecuaciones son programadas en un algoritmo que verifica todas las posibles combinaciones de adiciones minerales (dentro de los rangos utilizados experimentalmente) y regresa el resultado que presente la más alta relación calidad precio. Como referencia se presenta en la Figura 4 y tabla 9 los datos de la mezcla de control. La máxima relación calidad precio a los 28 días fue para un diseño de mezcla con 20% de CV como material cementicio. Esta mezcla presenta 0,2 unidades adicionales de compresión por cada dólar invertido, dicho valor corresponde a un aumento de 41%. Adicionalmente se reduce la permeabilidad aproximadamente dos tercios. La mejoría en la relación calidad precio se debe a su bajo costo, pero esta mezcla también presenta una resistencia a compresión menor al control a los 28 días. El proceso de seleccionar un diseño de mezcla se repite con la restricción de que solo se consideren resultados con resistencia a compresión mayor a 68,9 MPa (10,000 lb./pulg²). Este segundo análisis permite determinar si con el uso de las adiciones minerales se puede obtener un diseño de mezcla con resistencia a compresión similar a la mezcla de control, pero con mejor relación calidad precio. El resultado de este análisis, (tercera columna Figura 4) demostró que con el uso de 3% HS y 17% CV se obtiene una resistencia a compresión similar al control que a su vez es \$33,52 más económica por metro cúbico y presenta una reducción de aproximadamente 75% en permeabilidad. Como ejercicio final se analiza cual es la mezcla más costo-efectiva con una resistencia a compresión cercana al máximo obtenido experimentalmente a los 28 días y adicionalmente la permeabilidad debe ser despreciable (100 culombios o menos). En la última columna de la Figura 4 se pueden ver los resultados de dicho análisis. Los modelos indican que con el uso de 19,8% de HS se puede obtener un diseño de mezcla con resistencia a compresión cercana al máximo obtenido experimentalmente y con permeabilidad despreciable.

Costo, Compresión y Permeabilidad
Resultados en relación a la mezcla de control

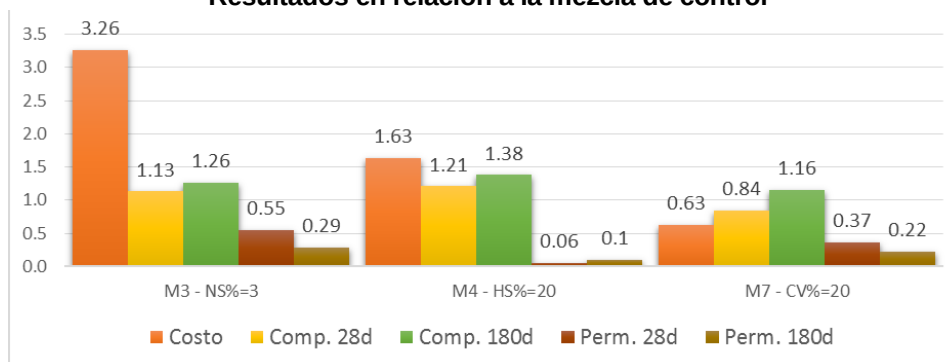


Figura 5: Resultados en relación a la mezcla de control

En la Figura 5 se presentan los resultados experimentales en relación a la mezcla de control. El primer diseño de mezcla que se presenta es la mezcla 3 que posee la dosificación máxima de NS = 3% considerada en este estudio. Adicionalmente se presentan los resultados experimentales que más se asemejan a los resultados obtenidos con los modelos en el análisis de la relación costo-beneficio (Mezclas 4 y 7). La mezcla 3 (3% NS) tiene un costo 3 veces mayor a la mezcla de control, la resistencia a compresión aumenta 13% a los 28 días y 26% a los 180 días. La permeabilidad se reduce un 45% a los 28 días y 71% a los 180 días a compararse con la mezcla de control. El diseño de mezcla 4 (20% HS) tiene un costo 63% más alto que el control y su resistencia a compresión aumenta 21% a los 28 días y 38% a los 180 días. La reducción en permeabilidad para es más de 90% al compararse con la mezcla de control. En todos los parámetros considerados en la Figura 5, la mezcla 4 (20% HS) fue superior a la mezcla 3 (3% NS). Finalmente, la mezcla 7 (20% CV) es 37% más económica que el control. Su resistencia a compresión es la menor de las tres mezclas consideradas, pero a los 28 días es solo 10% menor que la mezcla 3 (3% NS). En términos de permeabilidad, la mezcla 7 demostró mejor desempeño que la mezcla 3.

4. CONCLUSIONES

Comparando la mezcla que contiene la dosis máxima de NS (mezcla 3) con la mezcla que presentó el mejor desempeño (mezcla 4) se puede concluir que la resistencia a compresión es 7% menor para la mezcla 3 a los 28 días (80,4 vs 84,7 MPa). Permeabilidad es 9,5 veces más alta para la mezcla de (946 vs. 99,5 culombios). El costo de la mezcla 3 es el doble de la mezcla 4 (422 vs. 211 dólar/m³). Una dosificación de 3% de partículas de nanosílice aumenta la resistencia a compresión, reduce la permeabilidad y triplica el costo en comparación con

la mezcla de control. El uso de 20% de HS resultó en un mayor aumento en resistencia a compresión y menor permeabilidad que las partículas de nanosílice y su costo es solo 60% mayor a la mezcla de control. Si solamente se utiliza una adición mineral, HS presenta un mejor desempeño. Adicionalmente no se encontró mejoría en resistencia a compresión o permeabilidad al combinar NS con mezclas que contienen 20% de HS o CV. El uso de las ecuaciones modelo permite confirmar que los diseños de mezcla más costo-efectivos no incluyen NS como adición mineral.

5. RECONOCIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura de la Universidad de Puerto Rico Recinto Universitario de Mayagüez. Se destacan por su contribución el Dr. Luis Zapata Orduz (Universidad Industrial de Santander), Dr. Luis Montejó, Dra. AidcerVidot, Dr. Luis Suarez (UPRM), Dra. Amparo Moragués Terrades (UPM) y el Ing. Rubén Segarra (Essroc San Juan). Este trabajo ha sido realizado bajo la concesión NRC-HQ-12-G-38-0018 de la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos de América (US Nuclear Regulatory Commission). Las declaraciones, conclusiones y recomendaciones son aquellas de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista de la Comisión Reguladora Nuclear (US-NRC).

6. REFERENCIAS

- [1] Mamlouk, M. S. and Zaniewski, J. P. *Materials for Civil and Construction Engineers*, Third Edition, Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, USA. ISBN 0138009562, 1999.
- [2] Molina, O. *Influencia de las Cenizas Volantes como Sustituto Parcial del Cemento Portland en la Durabilidad del Hormigón*. Madrid, España: Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, 2008
- [3] Guzmán, D. *Estudio de la Influencia de las Adiciones Minerales como Sustituto Parcial del Cemento Portland en las Propiedades Mecánicas y de Durabilidad del Hormigón*. University of Puerto Rico Mayagüez Campus, Mayagüez, Puerto Rico, 2012.
- [4] Abyaneh, M.R.Z., Mousavi, S.M., Mehran, A., Hoseini, S.M.S., Irandoost, F.M. "Effects of Nano-Silica on Permeability of Concrete and Steel Bars Reinforcement Corrosion", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 7, no. 2, pp. 464-467, 2013.
- [5] Jonbi, Pane, I., Hariandja, B., Imran, I. "The Use of Nanosilica for Improving of Concrete Compressive Strength and Durability", *Applied Mechanics and Materials*, vol. 204-208, pp 4059-4062, 2012.
- [6] Yang, H. "Strength and Shrinkage Property of Nano Silica Powder Concrete" 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, (EMEIT-2012), 2012.
- [7] Sai, A.S., Swami, B.L.P., Saikiran, B., Sastri M.V.S.S. "Comparative studies on high strength concrete mixes using micro silica and nanosilica" *International Journal of Engineering and Technical Research*, vol.1, no.7, September 2013.
- [8] Hussain, S.T. "Study of strength properties of concrete by using micro silica and nano silica" *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol.1, no. 10, October 2014.
- [9] Sridhar, C. K. and Vanakudre, S. B. "Strength Efficiency Factor for Nano Silica at Different Age", *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 3, no. 6, August 2014.
- [10] Arshdeep, S. et al. "Compressivestrength of concrete withflyash, nanosilica and recycledaggregate" *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 4, no. 7, July, 2015.
- [11] Zapata, L., Suarez, O.M., Portela, "G. Rheological performance and compressive strength of superplasticized cementitious mixtures with micro/nano SiO₂ additions", *Construction and Building Materials*, vol. 41, pp. 708-716, 2013a.
- [12] Zapata, L. "Rheological and Mechanical Characterization of Portland Cement Mixes Containing Micro and Nano Amorphous Silica Particles", University of Puerto Rico Mayagüez Campus, Mayagüez, Puerto Rico, 2013b.