

Disponible en [www.hormigonyacero.com](http://www.hormigonyacero.com)

Hormigón y Acero 2019; 70(287):67-73  
<https://doi.org/10.1016/j.hya.2018.06.002>

# Empleo de la metodología de superficies de respuesta para determinar el factor $k$ de las puzolanas naturales y su influencia en la durabilidad de los hormigones

## *Use of the response surface methodology to determine the $k$ factor of natural pozzolans and their influence on the durability of concrete*

Joaquín Raúl Cuetara Ricardo<sup>a,\*</sup> y Juan José Howland Albear<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Departamento de diagnóstico y levantamiento (RESTAURA), Oficina del Historiador de la Ciudad (OHC), La Habana Vieja, Cuba*

<sup>b</sup> *Profesor e investigador titular, Grupo de investigación de materiales y tecnologías de la construcción, Centro de Estudios de Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT), Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE, Marianao, La Habana, Cuba*

Recibido el 29 de marzo de 2018; aceptado el 25 de junio de 2018

### RESUMEN

Las puzolanas de origen natural han sido muy utilizadas en la fabricación de morteros y hormigones por milenios, desde las antiguas civilizaciones griegas y romanas hasta la actualidad. En el presente trabajo se estudia el factor  $k$  de las puzolanas naturales de la región occidental de Cuba y se valora su influencia en la calidad de los hormigones. Se empleó la metodología de superficies de respuesta para localizar los valores óptimos de reemplazo. En el diseño del programa experimental se concibió la determinación de la resistencia a la compresión a los 7 y 28 días, y la porosidad efectiva a los 28 días. El estudio arrojó que, de acuerdo con la normativa cubana, el factor  $k$  de estas puzolanas es de 0,2, sin embargo, con el empleo de la metodología propuesta se logró optimizar los niveles de reemplazo y el tiempo de curado.

© 2019 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L.L. Todos los derechos reservados.

PALABRAS CLAVE: Puzolanas naturales; Factor  $k$ ; Resistencia a la compresión; Porosidad; Durabilidad

### ABSTRACT

Pozzolans of natural origin have been widely used in the manufacture of mortars and concretes for millennia, from the ancient Greeks and Romans civilizations to the present. In the present work, the  $k$  factor of the natural pozzolans of the Western region of Cuba is studied, and its influence on the quality of the concretes is evaluated. Response surface methodology was used to locate the optimal replacement values. The design of the experimental program was used to determine the compressive strength at 7 and 28 days, as well as the effective porosity at 28 days. Although the study showed that, according to Cuban regulations, the  $k$  factor of these pozzolans is 0.2, with the use of the proposed methodology it was possible to optimise the replacement levels and the curing time.

© 2019 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L.L. All rights reserved.

KEYWORDS: Natural pozzolans;  $K$  factor; Compressive strength; Porosity; Durability

\* Autor para correspondencia.  
Correo electrónico: [jrcuetara@gmail.com](mailto:jrcuetara@gmail.com) ((J.R. Cuetara Ricardo).

# 1.

## INTRODUCCIÓN

El hormigón es el material de construcción más ampliamente usado en el mundo, y después del agua es el que más se explota. Producto de su alta demanda la industria del cemento está considerada entre los subsectores industriales más contaminantes, junto a la siderúrgica, la química, la refinación de petróleo y la producción del papel.

Sin discusión, el cemento Portland ha sido uno de los materiales que más ha favorecido al desarrollo de la humanidad. Su fabricación se practica en más de 150 países, principalmente en Asia, Europa y el Medio Oriente [1]. Hoy se asocia con el nivel de desarrollo de un país, sin embargo, también ha resultado ser de forma contradictoria uno de los principales responsables de la degradación del medio ambiente pues su proceso productivo está montado sobre la base de la explotación intensiva de recursos no renovables (materias primas y combustibles fósiles) y en él se emiten significativos volúmenes de gases de efecto invernadero.

En el área de los materiales de construcción la mayoría de los trabajos de investigación van dirigidos a buscar alternativas sostenibles donde se reduzcan los impactos sobre el medio ambiente. Tener conocimiento de los coeficientes de reemplazo de los materiales cementantes suplementarios (MCS) es fundamental en la fabricación de hormigones a partir de estos materiales. Este trabajo va dirigido a brindar las herramientas suficientes para contrarrestar los efectos negativos que provoca la producción de cemento y, al unísono, obtener hormigones de similar o mejor calidad.

Los MCS presentan actividad tanto hidráulica como puzolánica y ambas son de carácter químico. Las primeras, en presencia de agua endurecen similar a lo que ocurre con el cemento Portland ordinario (CPO) y las segundas son reacciones de óxidos de sílice en presencia de hidróxidos de calcio (Portlandita) y agua para formar silicatos de cálcicos hidratados [2].

La formación de silicatos cálcicos hidratados a partir de la reacción puzolánica favorece la densificación de la microestructura del hormigón, disminuye su porosidad y aumenta su resistencia [3]. El efecto de los MCS en la estructura de poros está fuertemente relacionado con su composición y la relación agua-cemento de la mezcla [4]. Asimismo, para que la reacción puzolánica ocurra es necesario curar lo suficiente para asegurar la presencia de agua [5].

Muchas de las propiedades de los hormigones fabricados con puzolanas naturales (PN) han sido estudiadas, López y Castro [6], por ejemplo, determinaron la resistencia eléctrica a la penetración del ion cloruro de hormigones fabricados con cementos adicionados con PN. Determinaron que existen diferencias alrededor de los 2.900 Coulomb con respecto al hormigón elaborado con CPO y los resultados coincidieron con los obtenidos por Metha y Monteiro [7]. Estos concluyeron que un hormigón con CPO a la edad de 90 días o más presenta por lo general una resistencia eléctrica a la penetración del ion cloruro de 2.500 Coulomb más que un hormigón con reemplazo de MCS.

Fabricar hormigones con una parte de CPO reemplazada por PN ayuda a reducir los efectos del ataque por sulfatos. Merida y Kharchi [8] demostraron que la expansión decrece un 65,21% en comparación con el hormigón de control. Otros investigadores han evaluado cómo los MCS influyen en la conductividad eléctrica, la resistencia a la compresión y en la distribución del

tamaño de poros en pastas con aglomerante cal-puzolana [9]. En este estudio se emplearon PN no zeolitizadas, cenizas volantes y microsilice como MCS, y concluyeron que los ensayos directos de resistencia en las pastas indican mejor el potencial de contribución de los MCS a base de puzolanas que los métodos convencionales para estimar la actividad puzolánica. Las propiedades evaluadas demostraron que no siempre las puzolanas con mayor índice de reacción son las que mejores prestaciones tienen, de ahí la importancia de realizar los ensayos directamente en morteros y hormigones, sin embargo, todas influyeron en las mediciones realizadas, aunque unas más que otras.

El factor  $k$  o eficacia cementante está relacionado con la parte de material cementante en un hormigón especial que se considera equivalente al cemento Portland. La norma cubana que especifica el hormigón hidráulico [10] establece que el factor  $k$  de las puzolanas es el valor obtenido en la práctica que indica la parte de cemento Portland que se puede sustituir con una parte de MCS sin afectar la resistencia a la compresión de un hormigón curado hasta los 28 días.

El presente trabajo, apoyado en la estadística, determina el factor  $k$  de las PN de la región occidental de Cuba y también su influencia en la calidad del hormigón. Para ello se fabricarán hormigones con diferentes niveles de reemplazo y se verificará la importancia de los factores tiempo de curado y nivel de reemplazo sobre la variable de respuesta (resistencia a la compresión). Asimismo, se evaluará el desempeño por durabilidad de los hormigones fabricados a partir del ensayo de absorción capilar, y serán comparados estadísticamente con el hormigón patrón.

## 2.

### MATERIALES Y MÉTODOS

Para la fabricación de los hormigones se utilizó un CPO que responde a la denominación P-350 (tipo I) de la fábrica Cementos Curacao, del municipio Mariel, en la provincia de Artemisa. La tabla 1 muestra sus principales características y los valores se comparan con los establecidos por la norma cubana [11].

Los áridos utilizados en el estudio son de origen natural, de la cantera La Molina, ubicada en el municipio Mariel, en la provincia de Artemisa. Todos los ensayos se realizaron según establecen las normas cubanas correspondientes [12–16]. En las tablas 2 y 3 se detallan las propiedades físicas de los áridos y su distribución granulométrica.

La PN empleada es del yacimiento Las Carolinas, dispuesto en la provincia de Cienfuegos, en Cuba. La caracterización de este material la permitió el departamento de geología de la

TABLA 1  
Propiedades físicas del cemento (P-350)

Propiedades	Valores	Aceptación NC 95: 2011
Superficie específica (Blaine) (cm <sup>2</sup> /g)	3317	Mín. 2800
Finura (%)	1,7	Máx. 10
Tiempo de fraguado inicial (min)	102:00:00	Mín. 45
Tiempo de fraguado final (h)	3:02:00	Máx. 10
Peso volumétrico (kg/m <sup>3</sup> )	1168	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	3,15	
Consistencia normal (%)	24,5	

fábrica de cemento de Cienfuegos. Para facilitar su hidratación la puzolana fue molida finamente hasta que el retenido en el tamiz de 90  $\mu$ m fuera igual al 10% o menor. En la [tabla 4](#) se muestra la composición química y en la [tabla 5](#) se ordenan algunas características físicas de dicha puzolana.

## 2.1. Método experimental

El interés del estudio es determinar el factor  $k$  de la PN del yacimiento de Las Carolinas, de la región Occidental de Cuba, y medir la influencia del nivel de reemplazo y el tiempo de curado sobre la resistencia a la compresión. También se compararán los valores de porosidad efectiva de los hormigones con reemplazo, seleccionados al azar, con el patrón.

Se decidió usar un diseño factorial multinivel para el estudio de la resistencia a la compresión de los hormigones. En el factor Reemplazo Puzolana se incluyeron 5 niveles, los valores bajo y alto además de otros niveles igualmente espaciados entre ellos, y en el caso del factor Días Curado se incluyeron 2 niveles, bajo y alto. En la [tabla 6](#) se especifican los factores y la cantidad de niveles por cada uno de ellos. A cada tratamiento

TABLA 2

Propiedades físicas de los áridos fino y grueso

Propiedades	Arena	Gravilla
Peso específico corriente ( $\text{g}/\text{m}^3$ )	2,61	2,63
Peso específico saturado ( $\text{g}/\text{m}^3$ )	2,65	2,66
Peso específico aparente ( $\text{g}/\text{m}^3$ )	2,72	2,70
Por ciento de absorción (%)	1,8	1
Masa volumétrica suelta ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1.477	1.371
Masa volumétrica compactada ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1.663	1.510
Por ciento de huecos (%)	37	45
Material más fino tamiz 200 (%)	9,9	1,2

TABLA 3

Distribución granulométrica de los áridos empleados

Áridos	Tamices (mm)									
	19,1	12,7	9,52	4,76	2,38	1,19	0,59	0,295	0,149	
Fino	100	100	100	88	57	41	26	14	7	
Grueso	98,5	43	4,33	0,83	0	0	0	0	0	

TABLA 4

Composición de la puzolana natural

Contenido	Puzolana natural
Dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) (%)	56,40
Óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (%)	5,13
Óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (%)	11,71
Óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) (%)	7,17
Óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) (%)	1,93
Trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) (%)	0,0319

TABLA 5

Propiedades físicas de la puzolana natural

Puzolanidad por Frattini ( $\text{mg}/\text{g}$ )	636
Determinación de la superficie específica ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	3882,98
Determinación de la densidad ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )	2,24

se le asignó 3 bloques a ensayar, o sea, se realizó un experimento y 2 réplicas por cada tratamiento.

Se analizó el comportamiento de estos factores sobre la resistencia a la compresión basado en la metodología de superficies de respuesta. Este diseño está respaldado por un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas que son útiles para modelar y analizar problemas en los cuales una respuesta de interés es influida por varias variables, y el fin es optimizar esta respuesta [17]. La diferencia entre diseños de metodología de superficies de respuesta y diseños factoriales es la inclusión de los efectos cuadráticos. De acuerdo con Walpole et al. [18], el efecto cuadrático causa la estimación de la superficie de respuesta al exhibir una curvatura. En el presente trabajo se determinó de forma experimental los niveles de los factores que conducen a obtener una respuesta óptima con la ayuda del software estadístico StatGraphics Centurion XV [19].

Conjuntamente se midió la porosidad efectiva por el método establecido en la norma cubana [20]. Las mediciones se realizaron en el hormigón patrón y con el 10 y 20% de reemplazo de cemento Portland por PN. Para el estudio en cuestión los testigos fueron extraídos de las probetas de 15 cm de diámetro y 30 cm de alto para evitar el efecto pared que se produce en la zona próxima a la superficie. Con el fin de determinar la porosidad efectiva se analizaron 3 testigos por cada tipo de hormigón. En este caso no se diseñó un experimento, solo se tomó al azar el tipo de hormigón y se ensayó a nivel de laboratorio, determinando si existe diferencia estadísticamente significativa entre los resultados obtenidos.

## 2.2. Descripción del procedimiento

Se consideró un hormigón patrón con una resistencia característica a la compresión de 30 MPa a los 28 días, y en función del grado de control en el laboratorio, su resistencia media a compresión será de 32 MPa. Las mezclas consideradas en el estudio tienen el mismo tipo de árido y dosificados en la misma proporción a manera de obtener una curva granulométrica constante. Se utilizó una proporción de árido fino y grueso de 45/55% respectivamente. La relación agua-cemento (0,45) se consideró para un ambiente donde la agresividad es alta, según lo establece la norma cubana [10].

Para mejorar la laborabilidad del hormigón fresco se utilizó el aditivo Dynamón SRC-20 perteneciente al nuevo sistema de MAPEI. Se trata de un aditivo superfluidificante de base acrílica (segunda generación avanzada) modificado para hormigones premezclados caracterizados por una baja relación agua-cemento, altas resistencias mecánicas y largo mantenimiento de la laborabilidad. El asentamiento deseado medido por el cono de Abrams estará entre 14 y 16 cm aproximadamente. La dosis empleada varió en función del contenido de reemplazo de cemento Portland por PN. La cantidad de materiales a emplear por cada tipo de hormigón a elaborar se muestra en la [tabla 7](#).

## 3.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El ensayo de absorción de agua por capilaridad y resistencia a la compresión del hormigón se aplicó según la metodología establecida por las normas cubanas [20,21] respectivamente,

TABLA 6

Factores bajo estudio y sus niveles

Factores	Bajo (-1)	Medio-Bajo (-0,5)	Medio (0)	Medio-Alto (0,5)	Alto (1)
Reemplazo Puzolana (%)	0	10	15	20	25
Días Curado (días)	7	-	-	-	28

TABLA 7

Dosificación y cantidad de materiales

Materiales	PP	P10%	P15%	P20%	P25%
Relación a/c	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Cemento P-350 (kg) 21,10	18,99	17,94	16,88	15,83	
Puzolana natural (kg)	-	2,11	3,17	4,22	5,28
Agua (L)	9,51	9,51	9,51	9,51	9,51
Árido grueso (kg)	48,25	47,85	47,65	47,45	47,25
Árido fino (kg)	39,95	39,65	39,50	39,35	39,15
Aditivo (%-ml)	0,35-65	0,71-120	0,94-150	1,26-190	1,63-230

utilizando testigos con diámetro de 10 cm y probetas cilíndricas de 15 x 30 cm respectivamente. En la figura 1 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos antes mencionados, y en ambos casos se observa cómo el reemplazo de cemento Portland por PN influye en la reducción de la porosidad del hormigón y el incremento de la resistencia a la compresión de los mismos.

3.1. Análisis de resistencia a la compresión

Como parte de la investigación, los resultados obtenidos fueron procesados estadísticamente para conocer la influencia de cada factor y su interacción en el rendimiento (resistencia a la compresión del hormigón). El estadígrafo empleado es el análisis de varianza (ANOVA) el cual particiona la variabilidad de la resistencia a la compresión en piezas separadas para cada uno de los efectos, y de esta forma prueba la significación estadística de cada uno de los factores comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental [18].

Según Montgomery [17], el término significación estadística es empleado para evidenciar que existen diferencias o no; en otras palabras, se define como la probabilidad de tomar la decisión de rechazar la hipótesis nula cuando esta es verdadera (decisión conocida como error de tipo I). Esta decisión a menudo se toma utilizando el valor-p que no es más que la probabilidad de obtener un resultado al menos tan extremo como el que se ha conseguido. Cuanto menor sea este, más significativo será el resultado.

En el estudio en cuestión los efectos principales, el efecto de

la interacción y del término cuadrático puro tienen un valor-p menor que 0,05 lo que indica que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95%. La figura 2 representa el diagrama de Pareto y la longitud de cada barra es proporcional al valor del estadístico calculado para el efecto correspondiente. Cualquier barra más allá de la línea de ruido es estadísticamente significativa en el nivel de significación seleccionado, establecido de forma predeterminada en 5%. Por tal razón se puede afirmar que todos los efectos influyen en la resistencia a la compresión, pero el tiempo de curado es el que predomina en el resultado final.

3.2. Determinación del factor k

Los valores obtenidos de resistencia a la compresión para cada nivel de reemplazo fueron comparados con los del hormigón patrón. Se identificó que existe diferencia significativamente estadística entre ellos excepto para el hormigón con un 25% de reemplazo. La resistencia a la compresión para un reemplazo del 20% de cemento Portland por PN se incrementa en un 16% con respecto al hormigón patrón, es por ello que se puede afirmar que la eficacia cementante de esta PN es  $k = 0,2$ .

Conocido este factor es preciso revisar otros aspectos. Si energética y ecológicamente este nivel de reemplazo es significativo, hay que sumar al logro de ahorrar un 20% de cemento Portland el valor agregado que implica curar durante 28 días.

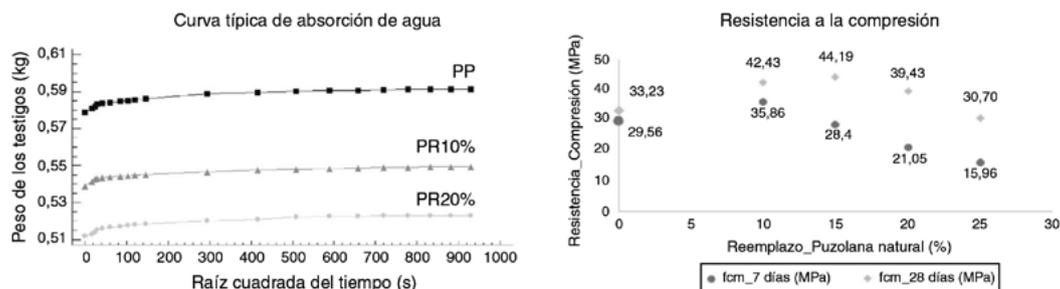


Figura 1. Curvas típicas de absorción de agua por capilaridad y resistencia a la compresión.

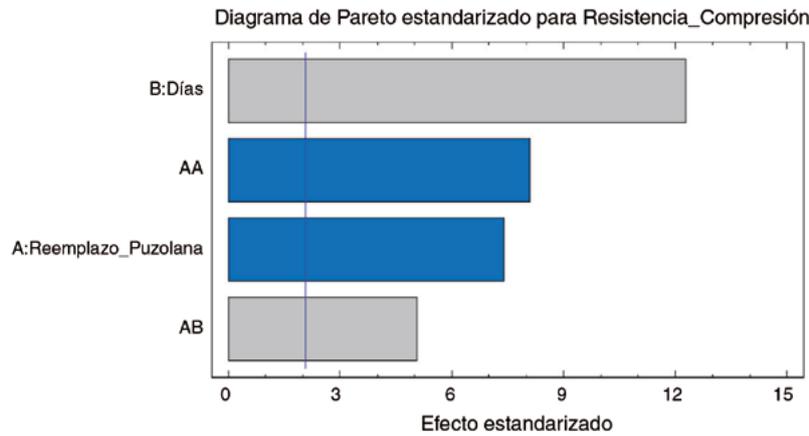


Figura 2. Evolución de la resistencia a la compresión.

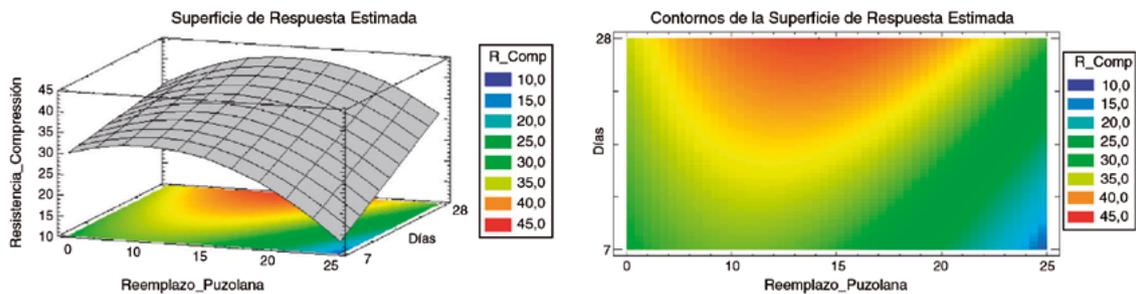


Figura 3. Superficies y contornos de respuesta estimada.

### 3.3. Estimación de los valores óptimos de reemplazo

La metodología de superficies de respuesta suministra las vías eficientes para localizar un conjunto de condiciones experimentales que facilitan una respuesta máxima o mínima. La figura 3 detalla la curvatura tipo colina que generó el software y los contornos de la misma.

En ella se percibe que con el aumento del tiempo de curado también se incrementa la resistencia a la compresión. Lógicamente, la reacción puzolánica depende de la hidratación de las partículas de cemento, por lo tanto, debe haber suficiente humedad para que este se hidrate y luego reaccione el material puzolánico con la consecuente formación de compuestos resistentes.

Para conocer los mejores puntos en un valor conocido de resistencia a la compresión se decidió optimizar la respuesta para 35 MPa. Se fijó un rango de tiempo de curado que se mantuvo entre los 7 y 15 días y entonces se procedió a mover los valores del nivel de reemplazo. En la figura 4 y la tabla 8 se detallan los puntos óptimos y las coordenadas de los mismos.

Cada par de coordenadas indica el mejor ajuste para obtener la resistencia a la compresión deseada. La intención es reducir el tiempo de curado a valores lógicos. En cada área seleccionada el nivel de reemplazo varió desde el 8,4 al 15,2%. Por otra parte, el tiempo de curado se mantuvo en la zona más próxima a los 15 días.

### 3.4. Análisis de la porosidad

La norma cubana establece la determinación de la absorción de agua por capilaridad en hormigones endurecidos mediante el método de ensayo propuesto por Göran Fa-

gerlund [22]. En nuestro país este método es muy usado para establecer los requisitos de durabilidad en el diseño de los hormigones y para comprobar la capilaridad de estos en su estado endurecido. La tabla 9 muestra los términos que fueron medidos para determinar el coeficiente de porosidad efectiva.

Los resultados fueron analizados en el mismo software empleado en el análisis de la resistencia a la compresión. Se realizó un análisis de varianza para comparar si existe diferencia estadísticamente significativa entre los resultados obtenidos para los hormigones con reemplazo del 10 y 20% con respecto al hormigón patrón.

En la figura 5 se muestra el diagrama de medias muestrales. En contraste con el hormigón patrón, los que tienen reemplazo del 10 y 20% presentan una reducción en la porosidad efectiva del 55 y 52% respectivamente.

También se realizó la prueba de múltiples rangos. Existen 2 grupos homogéneos, los hormigones con el 10 y 20% de reemplazo, por tal razón no hay diferencia estadísticamente significativa entre dichos niveles. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5% al decir que cada par de medias es significativamente diferente.

Lo cierto es que el reemplazo de cemento Portland por PN en la fabricación de hormigones influye positivamente en la resistencia a la compresión y la porosidad de los mismos. Su finura, similar a la del cemento, tiene un efecto filler que suple la falta de fino de los áridos cubanos. Asimismo, la reacción puzolánica como proceso secundario aporta compuestos resistentes que también rellenan poros.

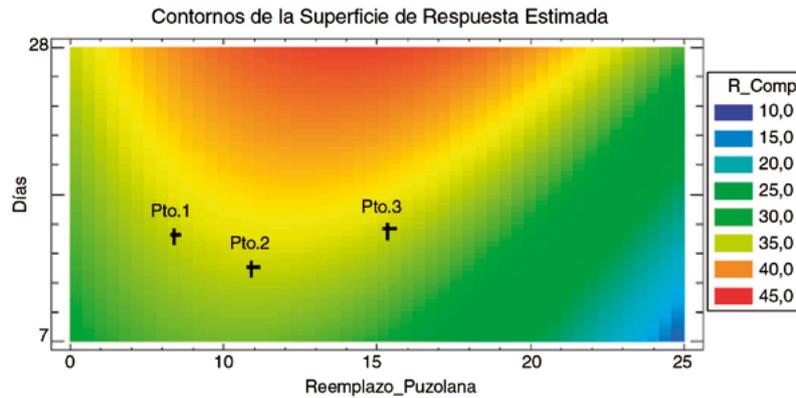


Figura 4. Puntos óptimos en los rangos de reemplazo establecidos.

TABLA 8

Rangos establecidos y valores óptimos

Factor	Nivel bajo	Nivel alto	Óptimo
<i>Pto. 1 (valor óptimo = 35 MPa)</i>			
Reemplazo Puzolana (%)	0	10	8,4
Días	7	15	14,6
<i>Pto. 2 (Valor óptimo = 35 MPa)</i>			
Reemplazo Puzolana (%)	10	15	10,7
Días	7	15	12,4
<i>Pto. 3 (Valor óptimo = 35 MPa)</i>			
Reemplazo Puzolana (%)	15	20	15,2
Días	7	15	14,7

TABLA 9

Coefficientes de porosidad efectiva

Testigos	$Q_n$ (kg)	$Q_0$ (kg)	$h^2$ (m <sup>2</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	$\xi$ (%)
PP 1	0,592612	0,570300	0,029550	0,008036	9,40
PP 2	0,588561	0,565200	0,029525	0,007992	9,90
PP 3	0,625147	0,601600	0,029500	0,007996	9,98
PR10% 1	0,499798	0,490100	0,029525	0,007996	4,11
PR10% 2	0,577258	0,567000	0,029550	0,007870	4,41
PR10% 3	0,570688	0,560000	0,029500	0,007968	4,55
PR20% 1	0,563964	0,553000	0,029550	0,007992	4,64
PR20% 2	0,500079	0,489300	0,029525	0,007996	4,57
PR20% 3	0,505078	0,493600	0,029575	0,008020	4,84

A: área de succión; h: espesor del espécimen; PP: probeta patrón; PR10%: probeta con reemplazo del 10% y PR20%: probeta con reemplazo del 20%;  $Q_0$ : peso del espécimen al inicio;  $Q_n$ : peso del espécimen en el punto crítico;  $\xi$ : porosidad efectiva.

#### 4. CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados de este estudio que determinó el factor  $k$  de la PN en cuestión y evaluó la influencia de esta sobre la calidad de los hormigones, se puede concluir que:

- El factor  $k$  de las PN de la región occidental de Cuba es de 0,2. Para este nivel de reemplazo las mejoras significarían un incremento del 16% de la resistencia a la compresión con respecto al hormigón patrón.

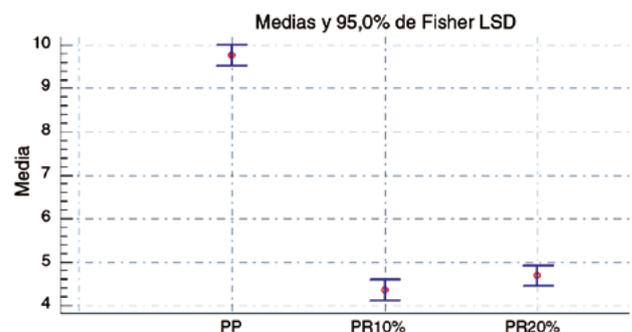


Figura 5. Diagrama de medias muestrales.

- Con el fin de obtener valores de resistencia a la compresión de 35 MPa y curar el menor tiempo posible, la metodología de superficie de respuesta identificó 3 puntos que reflejan los valores óptimos de tiempo de curado y nivel de reemplazo. En ningún caso se logró la resistencia a la compresión deseada sin curar por menos de 12 días, incluso para niveles de reemplazo bajos. De ahí la importancia que tiene curar los hormigones cuando se emplean PN en su fabricación.
- Todos los valores de porosidad efectiva son inferiores al 10%, aunque los obtenidos para los niveles de reemplazo del 10 y 20% son significativamente inferiores a los obtenidos para el hormigón patrón. Para estos niveles de reemplazo se redujo la porosidad en un 55 y 52% respectivamente.
- El estudio concuerda en la importancia que tienen los ensayos directos de resistencia en los hormigones. Con el empleo de la estadística se demostró la capacidad que tienen las PN para mejorar la calidad de los hormigones. Hay que reconocer el papel que desempeña el tiempo de curado incluso sobre el nivel de reemplazo.

#### Bibliografía

- [1] P.-C. Aitcin, Cements of yesterday and today concrete of tomorrow, *Cement and Concrete Research* 30 (2000) 11.
- [2] P.C. Hewlett, *Lea's chemistry of cement and concrete*, 4 th ed., Elsevier, China, 2004, pp. 1035.
- [3] M.S. Meddah, A. Tagnit-Hamou, Pore structure of concrete with mineral admixtures and its effect on self-desiccation shrinkage, *ACI Materials Journal* 106 (3) (2009) 11.

- [4] S. Diamond, Mercury porosimetry. An inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials, *Cement and Concrete Research* 30 (2000) 9.
- [5] P.K. Mehta, High performance, high-volume fly ash concrete for sustainable development, en: *Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*. 2004. Beijing, China.
- [6] M. López, J.T. Castro, Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros del hormigón con el tiempo, *Revista Ingeniería de Construcción* 25 (3) (2010) 13.
- [7] P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, properties and materials*, 3 th ed, McGraw-Hill, New York, 2005, pp. Xxi.
- [8] A. Merida, F. Kharchi, Pozzolan concrete durability on sulphate attack, *Procedia Engineering* 114 (2015) 6.
- [9] B. Uzal, L. Turanlı, H. Yücel, M.C. Göncüoğlu, A. C. ulfaz, Pozzolanic activity of clinoptilolite: A comparative study with silica fume, fly ash and a non-zeolitic natural pozzolan, *Cement and Concrete Research* 40 (2010) 7.
- [10] NC-120, Hormigón hidráulico. Especificaciones. 2014, Oficina Nacional de Normalización: La Habana. p. 74.
- [11] NC-95, Cemento Portland. Especificaciones. 2001, Oficina Nacional de Normalización: La Habana.
- [12] NC-186, Arena. Peso específico y absorción de agua. Método de ensayo. 2002, Oficina Nacional de Normalización: La Habana.
- [13] NC-186, Áridos. Determinación del por ciento de huecos. Método de ensayo. 2002, Oficina Nacional de Normalización: La Habana.
- [14] NC-181, Áridos. Determinación del peso volumétrico. Método de ensayo. 2002, Oficina Nacional de Normalización: La Habana.
- [15] NC-177, Áridos. Determinación del por ciento de huecos. Método de ensayo. 2002, Oficina Nacional de Normalización: La Habana.
- [16] NC-182, Áridos. Determinación del material más fino que el tamiz de 0.074 (No. 200). Método de ensayo, Oficina Nacional de Normalización: La Habana.
- [17] D.C. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*, G.E.I. S.A., México, 1991, p. 589.
- [18] R. Walpole, et al., R.H. Myers, S.L. Myers, K. YE, *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*, 9 th ed, Pearson Education, Inc, México, 2012, pp. 792.
- [19] N.W. Polhemus, *Statistical analysis using StatGraphics Plus. Volume 2: Quality control and experimental design*, Statistical Graphics Corporation, Englewood Cliffs, NJ, 1999.
- [20] NC-345, Hormigón endurecido. Determinación de la absorción de agua por capilaridad. 2011, Oficina Nacional de Normalización: La Habana.
- [21] NC-244, Hormigón endurecido. Determinación de la resistencia a la compresión en probetas cilíndricas. 2005, Oficina Nacional de Normalización: La Habana.
- [22] G. Fagerlund, *On the capillarity of concrete*, N.C. Research, Editor. 1982. p. 20.