

# Influence of the addition of pozzolan on the porosity and compressive strength of concrete

Torre Carrillo Ana<sup>1</sup> , Mosquera Leiva Luis<sup>1</sup> , Espinoza Haro Pedro<sup>1</sup> , Ramirez Curi Sorin<sup>1</sup> , Uceda Ricardo<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> National University of Engineering, Perú, Lima,  
anatorre@uni.edu.pe, lmosquera@uni.edu.pe, pesp67@gmail.com, sorin.ramirez.c@uni.pe  
ricardo.ucedac@uni.edu.pe

*Abstract-The interaction of concrete with pozzolan is characterized by the chemical reactions between the cement compounds and silica from pozzolan, these reactions generate a change inside the concrete matrix. The objective of the study was to evaluate the influence of pozzolan in the porosity and resistance to compression of concrete. In the experimental phase 48 samples were made with a relation w/c of 0.45 with additions of 0, 10, 15, 20% of pozzolan; compression essays (ASTM C39) and the quantity of empty spaces (ASTM C642) essays were carried out. The results were compared to the control samples, finding that in all the cases the resistance to compression determined at 28 days increased in 15, 20 and 13% with respect to the control samples. Additionally, it was determined that the higher values of resistance to compression were obtained with 15% of pozzolan. Regarding the porosity, it was observed that the pozzolan effect is notorious at 56 days, where the values of porosity decreased in all the cases for the pozzolan content of 10, 15 and 20% respectively. From the results obtained it can be concluded that the pozzolan reactions affect the porosity, decreasing it up to 10% after 56 days, and the best effects were found with 15% of pozzolan. Likewise, through the use of categorical linear regression models it was demonstrated that the porosity significantly and directly influences the resistance to compression obtaining a correlation coefficient  $R=0.892$*

**Keywords:** pozzolan, concrete, porosity, compression, hidrattation.

**Digital Object Identifier (DOI):**

<http://dx.doi.org/xxxxxx/LACCEI2023.1.1.1>

ISBN: xxxx ISSN: xxxx

# Influencia de la adición de puzolana, en la porosidad y resistencia a la compresión del concreto

Torre Carrillo Ana <sup>1</sup> , Mosquera Leiva, Luis <sup>1</sup> , Espinoza Haro, Pedro <sup>1</sup> , Ramirez Curi, Sorin <sup>1</sup> , Uceda Ricardo <sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Nacional de ingeniería Lima ,Perú  
anatorre@uni.edu.pe, lmosquera@uni.edu.pe, pesp67@gmail.com, sorin.ramirez.c@uni.pe  
ricardo.ucedac@uni.edu.pe

**Resumen-** La interacción del concreto con la puzolana se caracteriza por las reacciones químicas entre los compuestos del cemento y la sílice que aporta la puzolana, ocasionando un cambio dentro de la matriz del concreto. El objetivo de este estudio fue evaluar la influencia de la puzolana en las propiedades de porosidad y resistencia a la compresión del concreto. En la fase experimental se fabricaron 48 muestras con una relación a/c de 0.45 con adiciones de 0, 10, 15, 20% de puzolana; se realizaron los ensayos de compresión (ASTM C39) y cantidad de vacíos (ASTM C642). Los resultados obtenidos fueron comparados con las muestras de control, obteniéndose que en todos los casos la resistencia a la compresión determinada a 28 días se incrementó en 15, 20 y 13% con respecto a las muestras de control, además, se concluyó que los mayores valores de resistencia a la compresión se obtuvieron con 15% de puzolana. Con respecto de los vacíos se aprecia que el efecto de la puzolana es notorio a los 56 días; donde disminuyen los valores de porosidad en todos los casos para los contenidos de puzolana de 10, 15 y 20 %; de los resultados obtenidos se puede concluir que las reacciones puzolánicas que afectan la porosidad reduciéndola hasta 10% se dan a los 56 días; y que los mejores efectos se encontraron con 15% de puzolana. Asimismo, mediante el uso de métodos de regresión lineal categórica se demostró que la variable porosidad incide de manera significativa y directa en la resistencia a la compresión obteniéndose un coeficiente de correlación  $R = 0.892$ .

**Palabras claves:** Puzolanas, concreto, porosidad, compresión, hidratación.

## Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/xxxxxx/LACCEI2023.1.1.1>

ISBN: xxxx ISSN: xxxx

## 1. INTRODUCCIÓN

El concreto es el principal material empleado en la construcción y suele ser especificado principalmente por su resistencia a la compresión. El cemento es utilizado como el material aglomerante, no obstante, existen diversas adiciones que pueden incorporarse como parte del aglomerante, entre ellas, tenemos a las puzolanas naturales; las que mediante reacciones químicas de hidratación del óxido de silicio forman silicatos de calcio hidratado (CSH), que confieren mayor resistencia y durabilidad al concreto.

En la referencia [6], investigaron el comportamiento de las puzolanas y su impacto en la porosidad e interconectividad de los poros, buscando una mejor comprensión del rol de las puzolanas naturales en el hormigón. Mediante los ensayos de resistencia a la compresión (ASTM C39) con diferentes contenidos de puzolana en reemplazo del cemento (0, 14 y 33%) a las edades de 28 y 56 días. Los resultados evidenciaron que las resistencias a la compresión son menores a mayor contenido de puzolana a los 28 días, pero presentan un ligero aumento a la edad de 84 días. Concluyeron que el mayor contenido de puzolanas naturales presentes en la mezcla permitió disminuir la interconectividad de poros de una manera más eficiente a mayores edades [7].

Además, se estudiaron los efectos de una mezcla de puzolana de arcilla calcinada con piedra caliza (LCCP) en el comportamiento de hidratación, mecánica y durabilidad del cemento. Para esto se hicieron modelos tomando como base el reemplazo de cemento usando 0, 10, 15, 20, 30, 50% de LCCP. El valor de energía total liberada por gramo aumentó con la adición de LCCP, esto se puede deber a la hidratación de aluminatos de esta mezcla puzolánica liberada durante la hidratación temprana. Se encontró que esta mezcla obtuvo efectos beneficiosos sobre la hidratación temprana del cemento. Además, se observó el aumento de la resistencia a la compresión para todas las mezclas con contenido de LCCP en comparación con el diseño de Cemento Portland ordinario, por último, tanto la porosidad permeable del agua como la tasa de absorción se redujo al aumentar el nivel de reemplazo del cemento con LCCP. Además, cuanto mayor sea el nivel de reemplazo, menor será la resistencia a la carbonatación.

Sin embargo, con un reemplazo del 15 %, se encontró que la resistencia a la carbonatación de la mezcla LCCP era similar a la de Cemento Portland Ordinario (OPC) [8].

En la referencia [11], se evaluaron la eficacia de la puzolana, incluida la sílice, humo y nano-sílice individualmente en la resistencia, durabilidad y propiedades microestructurales del concreto incluyendo áridos reciclados. Los contenidos de humo de sílice fueron 0%, 5%, 10%, 15% y 20%, y los contenidos de nano-sílice fueron 0%, 1%, 2%, 3% y 4% de los materiales cementosos. La resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción, la resistencia a la flexión, la permeabilidad al agua y la permeabilidad al cloruro se midieron a 7, 28 y 90 días.

Se concluyó que la resistencia a la compresión del hormigón con áridos reciclados puede incrementarse hasta igual o más que el hormigón ordinario por incorporación de cenizas volantes (CV) o Nano sílice (NS). El uso de CV y NS mejora la microestructura del hormigón con áridos reciclados debido a la reacción puzolánica y el efecto de relleno de vacíos de estos materiales fortalecieron la ITZ (zonas de interacción) y condujeron a producir la pasta de cemento más densa en hormigón con áridos reciclados. Las propiedades microestructurales en ITZ mejoran significativamente con un aumento en el contenido de CV. También, los resultados demostraron que el humo de sílice mostró una mejor eficiencia en comparación con el nano-sílice en términos de mejora de ITZ y disminución de porosidad. Finalmente se concluyó que se puede producir hormigón convencional con propiedades mecánicas y de durabilidad moderadas con árido reciclado 100% fino y grueso e incorporación de 15% de humo de sílice o 3% nano-sílice como reemplazo parcial de OPC. Por lo tanto, es adecuado para la producción de estructuras concreto.

En la actualidad, se vienen usando productos de origen puzolánico que presentan las mismas reacciones para la formación de CSH. Tal es el caso de Ghafoori que realizó una investigación sobre las propiedades de transporte en concretos autocompactantes (SCC) con Microsílice (MS) y nanosílice (NS) en diferentes dosificaciones con el principal objetivo de prevenir la susceptibilidad a la segregación. Diseñaron un total de diez mezclas con una relación constante de agua a materiales cementicios de 0,45. Dado que la dosis típica de MS en el hormigón es de hasta el 7,5 %, se eligieron la misma dosis (hasta el 7,5 % con un aumento del 1,5 %) para el estudio con NS. Nano-sílice o microsíllice reemplazó una porción del cemento combinado y las cenizas volantes en un porcentaje de 1.5 a 7.5 por peso [3].

En su mayoría, los problemas de durabilidad en el concreto ante el ambiente están relacionados con la porosidad y la permeabilidad, dichas propiedades están relacionadas con el transporte de agentes corrosivos (cloruros, sulfatos y ácidos) que ocasionan la corrosión en los aceros de refuerzo [6]. Además, son pocas las investigaciones que se han encargado de definir modelos matemáticos para poder predecir la resistencia, porosidad ; en base al contenido de puzolanas y la relación agua cemento.

El objetivo del presente estudio es determinar la influencia de la puzolana sobre las propiedades de la porosidad y resistencia a la compresión en el concreto, mediante el uso de

modelos matemáticos que validen y establezcan correlaciones entre ellas.

## 2. MATERIALES Y METODOS

Para el programa experimental se utilizaron agregados de la cantera Jicamarca que cumplieron con la norma ASTM C33, cemento Portland tipo I, el cual cumple con la norma ASTM C-615; la puzolana natural utilizada fue procedente de UNACEM; se diseñaron mezclas de concreto de  $a/c=0.45$ ; con reemplazo parcial del cemento por la puzolana en cantidades de 10,15 y 20%; para el diseño de las mezclas, se utilizó el método del ACI 211; se fabricaron 48 muestras cilíndricas para determinar la resistencia a la compresión y porosidad a edades de 28 y 56 días; el procedimiento de curado se realizó según ASTM C31; el método del ensayo de resistencia a compresión bajo el estándar ASTM C39 y para determinar la porosidad se aplicó ASTM C642.

### 2.1. Materiales

Los agregados naturales utilizados para el diseño del concreto fueron procedentes de la cantera Jicamarca. En la TABLA 1, se presenta un resumen de los principales parámetros físicos de los agregados utilizados.

TABLA 1  
PARÁMETROS FÍSICOS DE LOS AGREGADOS

Propiedad	Unidad.	Agregado fino	Agregado grueso
Peso Unitario Suelto	kg/m <sup>3</sup>	1692	1456
Peso unitario compactado	kg/m <sup>3</sup>	1815	1663
Peso específico de masa	g/cm <sup>3</sup>	2.68	2.69
Peso específico de masa superficialmente seco	g/cm <sup>3</sup>	2.70	2.72
Peso específico aparente	g/cm <sup>3</sup>	2.74	2.77
Porcentaje de absorción	%	0.83	1.18
Módulo de fineza		2.82	6.74

En la TABLA 2 se presenta la composición química de la puzolana natural .

TABLA 2.  
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA PUZOLANA NATURAL DE UNACEM

Análisis Químico	Valores (%)
Dióxido de Sílice (SiO <sub>2</sub> )	51.15
Óxido de Aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	8.03
Óxido de Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	21.94
Óxido de Calcio (CaO)	1.18
Óxido de Magnesio (MgO)	0.32
Trióxido de Azufre (SO <sub>3</sub> )	5.43
Óxido de Potasio (K <sub>2</sub> O)	1.09
Óxido de Sodio (Na <sub>2</sub> O)	1.15

Del análisis químico se observa que la suma de los porcentajes del dióxido de sílice (SiO<sub>2</sub>), óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y óxido férrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) es 81.12%, dicho valor es

mayor al requerimiento mínimo establecido en la ASTM C618 (2005): 70%.

Además, según ASTM C618, el índice de actividad resistente debe ser mayor a 75%, para su uso como material suplementario; en el caso de estudio se obtuvo el valor de 89.

## 2.2. Diseño de Mezcla

Para el diseño de mezcla se aplicó el método del ACI 211; cemento portland tipo I, agregados descritos en la TABLA 1; puzolana natural en la TABLA 2; aditivo plastificante Sikament: la relación de agua/ material cementante fue de 0.45, en la TABLA 3 se presentan las dosificaciones utilizadas, nótese en que todos los diseños se usaron 360 kg de material cementante.

TABLA 3.

PROPORCIONES DE LAS MEZCLAS CON DIVERSOS CONTENIDOS DE PUZOLANA

ID.	a/c	Cemento (kg)	Adición (kg)	Agua (kg)	Arena (kg)	Piedra (kg)
DI	0.45	360	0	162	978.7	906.8
DII	0.45	324	36	162	976.2	904.5
DIII	0.45	306	54	162	974.9	903.3
DIV	0.45	288	72	162	973.7	902.2

## 2.3. Métodos de Ensayos

### 2.3.1. Ensayo de Resistencia a la compresión (ASTM C39)

Los especímenes utilizados fueron cilindros de concreto de 100x200 mm, curados en medio húmedo según ASTM C31; durante 28 y 56 días.

### 2.3.2. Ensayo de cantidad de vacíos (ASTM C642)

Después de cumplir 28 días de curado, los especímenes de concreto fueron secados hasta peso constante. Después se sumergieron en agua a 21°C, durante 48 horas, registrándose la masa saturada por inmersión.

Asimismo, se colocaron los especímenes en un recipiente con agua y se sometieron a ebullición durante cuatro horas; se dejó enfriar a temperatura ambiente; registrándose como masa saturada después de ebullición [14]. Con esta información se determinó la cantidad de vacíos, los mismos que se presentan en la TABLA 6 y TABLA 7.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Resistencia a la compresión (ASTM C39)

Los resultados de los ensayos de compresión realizados en muestras cilíndricas y evaluados a los 28 días se presentan en la TABLA 4.

TABLA 4.  
RESISTENCIA A COMPRESIÓN 28 DIAS CURADO

Id.	a/c	% Puz	Muestra	(kg/cm <sup>2</sup> )
D-I	0.45	0	M-1	582
	0.45	0	M-2	550
	0.45	0	M-3	578
	0.45	0	M-4	539
D-II	0.45	10	M-5	619
	0.45	10	M-6	636
	0.45	10	M-7	634
	0.45	10	M-8	629
D-III	0.45	15	M-9	643

D-IV	0.45	15	M-10	638
	0.45	15	M-11	658
	0.45	15	M-12	663
	0.45	20	M-13	616
	0.45	20	M-14	634
	0.45	20	M-15	625
	0.45	20	M-16	630

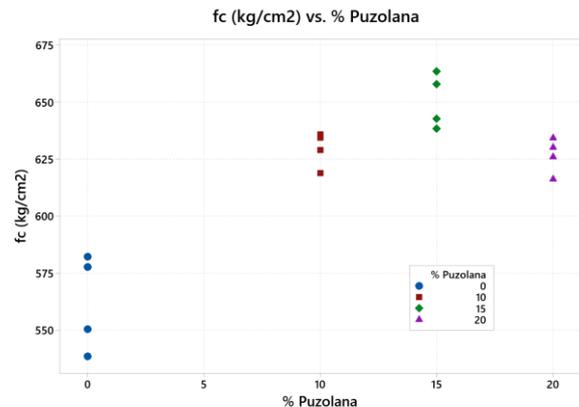


Figura 1. Resistencia a la compresión a 28 días Vs contenido de puzolana

### 3.1.1. Prueba de valores atípicos para la resistencia a la compresión

En la TABLA 5 se presenta el resumen los parámetros estadísticos de Grubbs más importantes, observándose que para los diferentes contenidos de puzolana del 0 al 20%: el valor P es mayor al nivel de significancia de 0.05, verificándose de esta manera, que no existen valores atípicos en los resultados de resistencia a la compresión presentados en la TABLA 4.

TABLA 5.  
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE GRUBBS PARA EL ENSAYO DE COMPRESIÓN

% Puz	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
0	4	562	21.1	539	582	1.12	1.000
10	4	629	7.70	619	636	1.38	0.312
15	4	650	11.94	638	663	1.08	1.000
20	4	626	7.72	616.	634	1.35	0.410

Notándose además que los mayores valores de resistencia a la compresión se obtuvieron con contenidos de puzolana del 15%, para una relación a/c de 0.45. Las resistencias promedio obtenidas fueron de 562, 629, 650 y 626 kg/cm<sup>2</sup>; para concretos con: 0, 10, 15 y 20 %; de puzolana respectivamente. En las mezclas con 10% de puzolana se alcanzaron incrementos en la resistencia a la compresión del 14.65% y con adición de 15% de puzolana se incrementó hasta 20.59%, con respecto al concreto de control.

Asimismo, se observa que para el concreto con 20 % de adición de puzolana, los efectos en la resistencia a la compresión disminuyeron en 3.69% con respecto a la mezcla con 15% de adición.

Con respecto del diseño de control en todos los casos las resistencias a la compresión de las mezclas con adición de puzolana se incrementaron.

### 3.1.2. Pruebas de normalidad y coeficiente de correlación de Pearson

Para determinar el grado de correlación entre la resistencia a la compresión y la cantidad de puzolana se aplicó la técnica de correlación del coeficiente de Pearson, considerando que es paramétrico y requiere de normalidad univariante.

Utilizando los valores de resistencia a compresión presentados en la TABLA 4 ; se realizó la gráfica presentada en la figura 1, verificándose que la tendencia es de distribución normal, mediante la prueba de Ryan-Joiner.

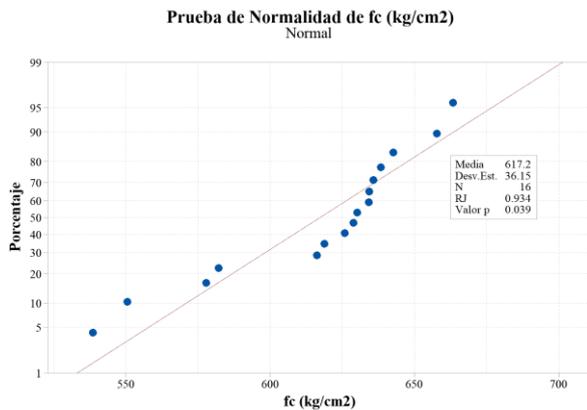


Figura 2. Prueba de normalidad de Ryan-Joiner para los datos de compresión a los 28 días

En la Figura 2, se puede observar el coeficiente RJ de la prueba de normalidad obtenido es de 0.934. (valor cercano a 1), confirmando que los datos evaluados de resistencia a la compresión presentan una distribución normal; consecuentemente se empleó el paramétrico del coeficiente de Pearson; haciendo uso del MiniTab, se obtuvo que el coeficiente de Pearson fue de 0.782, es decir, que la resistencia a la compresión y el contenido de puzolana presentan altas correlación positiva.

Diversos estudios previos consultados por los autores encontraron resultados similares; fundamentando que la resistencia a la compresión aumentaba debido al incremento de la actividad puzolánica ocasionando, por lo tanto, la formación de más hidratos puzolánicos [2].

### 3.2. – Ensayo de Vacíos (ASTM C642)

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se presentan los resultados del porcentaje de vacíos determinados a la edad de 28 días; no se observa cambio significativo de los resultados para cada diseño analizado. Algo similar obtuvieron López y Castro sugieren también que el aporte de las puzolanas a los 28 días aún no es del todo perceptible [6].

La TABLA 7, se presentan los resultados del porcentaje de vacíos a la edad de 56 días. Al realizar una comparación entre las TABLA 6 y TABLA 7 podemos observar la disminución en la porosidad del concreto evaluado a 56 días en comparación con las muestras evaluadas a 28 días; y que los menores contenidos de vacíos se evidencian en el concreto con adición de puzolana de 15%. Esta disminución se debe al aumento de los productos de hidratación formados a los 56 días los cuales proceden a llenar los poros [9].

La TABLA 7, se puede observar también que para contenidos de puzolana mayores a 15% el efecto de reducción de permeabilidad es mínimo.

Este comportamiento del concreto, en el cual a partir de 15% de puzolana la disminución en la porosidad es mínimo, fue observado también por otros investigadores; quienes postulan que para un porcentaje mayor al óptimo de puzolana han aparecido microfisuras que a su vez hacen que la matriz sea menos compacta, incluso la estructura del hormigón se muestra alterada, mostrando una mezcla de plaquetas grandes y pequeños grupos. Estas plaquetas grandes se podrían deberse a la existencia de óxido de silicio sin reaccionar [13].

TABLA 6  
RESULTADOS DE % VACÍOS, CURADO 28 DÍAS

ID	a/c	% puz	Edad (días)	Muestra	Contenido de vacíos (%)
DI	0.45	0	28	M-1	10.43
	0.45	0		M-2	10.75
	0.45	0		M-3	10.66
	0.45	0		M-4	10.33
DII	0.45	10	28	M-5	10.77
	0.45	10		M-6	10.49
	0.45	10		M-7	10.85
DIII	0.45	15	28	M-8	10.16
	0.45	15		M-9	10.81
	0.45	15		M-10	10.46
	0.45	15		M-11	10.67
DIV	0.45	20	28	M-12	10.27
	0.45	20		M-13	10.13
	0.45	20		M-14	10.45
	0.45	20		M-15	10.32
	0.45	20		M-16	10.23

TABLA 7  
RESULTADOS DE % VACÍOS, CURADO A 56 DÍAS

Id.	a/c	% puz	Edad (días)	Muestra	Contenido de vacíos (%)
DI	0.45	0	56	M-1	10.38
	0.45	0		M-2	10.17
	0.45	0		M-3	10.27
	0.45	0		M-4	10.42
DII	0.45	10	56	M-5	9.16
	0.45	10		M-6	9.41
	0.45	10		M-7	9.35
DIII	0.45	10	56	M-8	9.09
	0.45	15		M-9	9.33
	0.45	15		M-10	9.29
	0.45	15		M-11	9.06
DIV	0.45	15	56	M-12	8.79
	0.45	20		M-13	9.08
	0.45	20		M-14	8.97
	0.45	20		M-15	9.22
	0.45	20		M-16	9.15

### 3.2.1. Prueba de valores atípicos para la porosidad

Para el análisis de valores atípicos mediante la prueba de Grubbs para la porosidad a edades de 28 y 56 días se obtuvieron los parámetros indicados en la TABLA 8.

TABLA 8  
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE GRUBBS PARA EL ENSAYO DE VACÍOS A LOS 28 DÍAS DE CURADO

%puz	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
------	---	-------	-----------	------	------	---	---

0	4	10.543	0.196	10.33	10.75	1.09	1.000
10	4	10.567	0.312	10.16	10.85	1.30	0.522
15	4	10.553	0.237	10.27	10.81	1.19	0.821
20	4	10.282	0.136	10.13	10.45	1.23	0.715

TABLA 9  
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE GRUBBS PARA EL ENSAYO DE VACÍOS A LOS 56 DÍAS DE CURADO

%puz	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
0	4	10.310	0.113	10.17	10.42	1.24	0.692
10	4	9.2525	0.1520	9.090	9.410	1.07	1.000
15	4	9.117	0.249	8.79	9.33	1.32	0.488
20	4	9.1050	0.1066	8.970	9.22	1.27	0.623

En la TABLA 8 y TABLA 9 se presenta el resumen los parámetros estadísticos más importantes del análisis de valores atípicos de la porosidad a edades de 28 y 56 días respectivamente. En base a estos parámetros se valida que para los diferentes contenidos de puzolana considerados: el valor p es mayor al nivel de significancia de 0.05, concluyendo que no se detectaron valores atípicos en los resultados de vacíos a edades de 28 y 56 días.

### 3.2.2. Pruebas de normalidad y coeficiente de correlación de Pearson

Mediante la prueba de Ryan-Joiner, se verifica, el comportamiento normal del conjunto de valores de vacíos considerados que se presentan en la TABLA 10; los coeficientes RJ para ambas edades son cercanos a 1, por lo que se confirma que los datos siguen una distribución normal y se puede emplear el paramétrico de Pearson.

TABLA 10  
PRUEBA DE NORMALIDAD RYAN-JOINER PARA POROSIDAD A 28 Y 56 DÍAS CURADO

	28 days	56 days
Media	10.49	9.446
Desv.Est.	0.2386	0.5391
N	16	16
RJ	0.978	0.907
Valor p	>0.100	<0.010

Haciendo uso del Minitab se obtuvo que los coeficientes de Pearson para los valores del porcentaje de vacíos fueron de -0.332 y -0.887 para 28 y 56 días respectivamente; consecuentemente los valores de porosidad para ambas edades tienen una correlación negativa (proporcionalidad inversa); y que la mejor correlación se obtuvo a edades de 56 días.

La Figura 3 es la representación de los valores correspondientes al porcentaje de vacíos máximos y mínimos, así como los promedios para cada diseño a diferentes edades de curado.

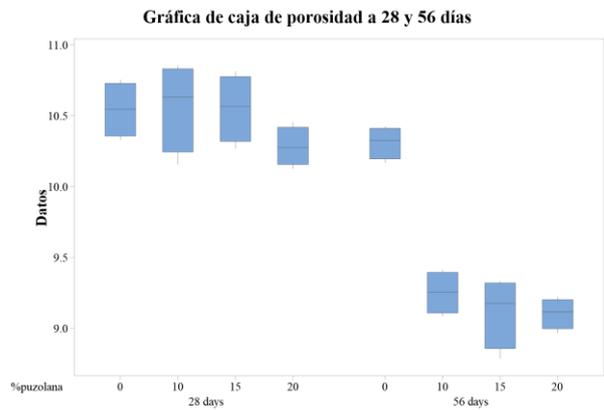


Figura 3. Gráfica de caja de porosidad a 28 y 56 días de curado

La disminución de la porosidad con el incremento de la edad puede ocasionarse debido al incremento de reacciones puzolánicas a lo largo del tiempo lo que generan una microestructura mejorada, cerrando las conexiones de los poros [2]. Además, las partículas de materiales silíceos como la puzolana pueden reaccionar pudiendo llenar el espacio intergranular entre las partículas de cemento y, por lo tanto, reducir el tamaño y la conectividad del sistema de poros [3], [4].

### 3.3. Relación de la porosidad con la compresión

En la Figura 4 se puede observar que los valores de resistencia a la compresión evaluados a los 28 días de curado; para los diversos diseños de mezcla se asocian a valores de porosidad en rangos entre el 10 al 11%.

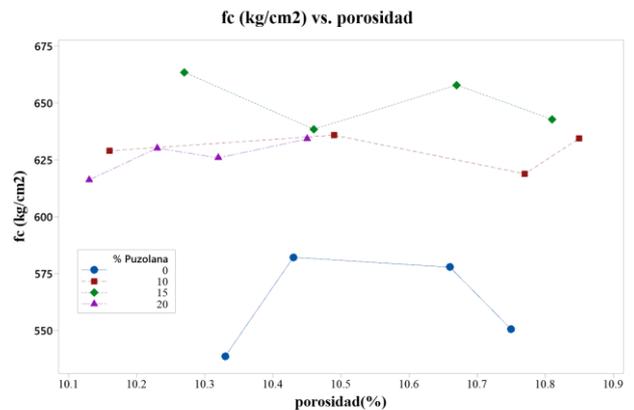


Figura 4. Resistencia a la compresión vs. Contenido de vacíos a 28 días de curado

TABLA 11  
COEFICIENTES DE REGRESIÓN VS CONTENIDO DE PUZOLANA

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	560	184	3.04	0.011	
porosidad	0.2	17.5	0.01	0.992	1.35
% Puzolana					
10	67.21	9.82	6.84	0.000	1.50
15	88.32	9.81	9.00	0.000	1.50
20	64.3	10.8	5.95	0.000	1.82

TABLA 12.  
ECUACIONES DE REGRESIÓN DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y POROSIDAD

% Puzolana	f'c(kg/cm <sup>2</sup> )	Porosidad (%)
0	560 + 0.2 porosidad	5 f'c -2800
10	628 + 0.2 porosidad	5 f'c -3140
15	649 + 0.2 porosidad	5 f'c -3245
20	625 + 0.2 porosidad	5 f'c -3125

TABLA 13  
RESUMEN DEL MODELO

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
13.8750	89.20%	85.27%	77.64%

Mediante los análisis de regresión lineal en base al porcentaje de puzolana se obtuvo un coeficiente de determinación (R) de 0.8920, lo que nos indica que el modelo lineal tiene una fuerte relación positiva y ajuste de los datos obtenidos.

TABLA 14.  
COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES DE REGRESIÓN Y VALORES EXPERIMENTALES

Muestra	% Puz	Porosidad	fc (kg/cm <sup>2</sup> )	Regresión	Error (kg/cm <sup>2</sup> )
M-1	0	10.43	582.11	562.2	19.9
M-2	0	10.75	550.47	562.3	11.8
M-3	0	10.66	577.77	562.3	15.5
M-4	0	10.33	538.61	562.2	23.6
M-5	10	10.77	618.8	629.5	10.7
M-6	10	10.49	635.78	629.4	6.3
M-7	10	10.85	634.37	629.5	4.9
M-8	10	10.16	628.87	629.4	0.5
M-9	15	10.81	642.7	650.6	7.9
M-10	15	10.46	638.37	650.5	12.2
M-11	15	10.67	657.77	650.6	7.2
M-12	15	10.27	663.42	650.5	12.9
M-13	20	10.13	616.14	626.5	10.4
M-14	20	10.45	634.13	626.6	7.6
M-15	20	10.32	625.79	626.5	0.8
M-16	20	10.23	630.1	626.5	3.6

Los resultados de porosidad presentan dispersiones entre 10 al 11% de vacíos; los diseños de mezclas evaluados fueron en todos los casos para la relación a/c constante de 0.45, notándose que la adición de puzolanas en distintas proporciones y para un mismo valor de a/c ocasionan que la porosidad y la resistencia a la compresión presenten una relación directa.

Además, la Tabla 14 presenta el comparativo entre los valores predictivos y los de laboratorio, obteniéndose errores mínimos entre el rango de 0 a 23.6 kg/cm<sup>2</sup>, siendo un modelo lineal muy aproximado.

#### 4. CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados se puede concluir lo siguiente:

- 1) La adición de 15% de puzolana en el concreto de relación a/c=0.45 produjo los mejores efectos tanto en resistencia a la compresión como en la reducción de porosidad.
- 2) La porosidad del concreto con adición de 15% de puzolana medidos a la edad de 56 días disminuyó comparativamente con la medida a 28 días. Por lo que se afirma que después de 28 días de curado, continúan las

reacciones puzolánicas que afectaron a los valores de porosidad.

- 3) La puzolana utilizada tiene un índice de actividad resistente de 89%; por lo que su uso como material suplementario aporta en la resistencia mecánica y disminuye la porosidad.
- 4) Se establecieron correlaciones entre la resistencia a la compresión y porosidad a la edad de 28 días de curado del concreto que permitieron proponer expresiones para su estimación a partir de los datos de compresión y contenidos de puzolana.

#### ACKNOWLEDGMENT

Los autores le brindan su agradecimiento al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) por su constante apoyo y difusión de la investigación, al Laboratorio de Ensayo de Materiales (LEM-UNI) por las facilidades del uso de las instalaciones y equipos para la realización de los ensayos, al Grupo de Investigación e innovación de Materiales de Construcción de la FIC-UNI, por sus valiosos aportes.

#### REFERENCIAS

- [1] Chen, X., Wu, S. & Zhou, J. Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar, *Construction and Building Materials*, Volume 40, 2013, Pages 869-874, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.072>.
- [2] Amir Hossein Yadak Yaraghi, Amir Mohammad Ramezani-pour, Ali Akbar Ramezani-pour, Farnaz Bahman-Zadeh, Arash Zolfagharnasab, Evaluation of test procedures for durability and permeability assessment of concretes containing calcined clay, *Journal of Building Engineering*, Volume 58, 2022, 105016, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105016>.
- [3] Nader Ghafouri, Borhan Moradi, Meysam Najimi, Ariful Hasnat, Transport properties of nano-silica contained self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 301, 2021, 124060, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124060>.
- [4] Kamran Amini, Payam Vosoughi, Halil Ceylan, Peter Taylor, Effect of mixture proportions on concrete performance, *Construction and Building Materials*, Volume 212, 2019, Pages 77-84, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.294>.
- [5] Víctor Revilla-Cuesta, Flora Faleschini, Mariano A. Zanini, Marta Skaf, Vanesa Ortega-López, Porosity-based models for estimating the mechanical properties of self-compacting concrete with coarse and fine recycled concrete aggregate, *Journal of Building Engineering*, Volume 44, 2021, 103425, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103425>.
- [6] López, M. & Castro, J. (2010). Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros del hormigón con el tiempo. *Revista ingeniería de construcción*, 25(3), 419-431. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732010000300006>
- [7] Medeiros-Junior, R. A., Munhoz, G. S., Medeiros, M. H. F. (2019), "Correlaciones entre absorción de agua, Resistividad eléctrica y resistencia a la compresión de concreto con diferentes contenidos de puzolana", *Revista ALCONPAT*, 9 (2), pp. 152 – 166, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>
- [8] Shah V, Parashar A, Mishra G et al (2018). *Influence of cement replacement by limestone calcined clay pozzolan on the engineering properties of mortar and concrete*. *Advances in Cement Research*, <https://doi.org/10.1680/jadcr.18.00073>.
- [9] P.Dinakar, M. Kartik Reddy, Mudit Sharma Behaviour of self compacting concrete using Portland pozzolana cement with different levels of fly ash (2013) <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.015>.

- [10] P. Dinakar, M. Kartik Reddy, Mudit Sharma Effects of pozzolan additives on the mechanical and microstructural properties of concrete containing 100% recycled aggregate.
- [11] A.S.E. Belaidi, L. Azzouz, E. Kadri, S. Kenai, (2012) <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.109>
- [12] Walid Deboucha, Mohamed Nadjib Oudjit, Abderrazak Bouzid, Larbi Belagraa . Effect of Incorporating Blast Furnace Slag and Natural Pozzolana on Compressive Strength and Capillary Water Absorption of Concrete(2015) <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.145>.
- [13] Jung S.-H., Saraswathy V., Karthick S., Kathirvel P., Kwon S.-J. Microstructure Characteristics of Fly Ash Concrete with Rice Husk Ash and Lime Stone Powder (2018) International Journal of Concrete Structures and Materials DOI: 10.1186/s40069-018-0257-4
- [14] ASTM C 39/C 39M: The American Society for Testing Materials, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Especímenes, West Conshohocken (PA), VSA (2001).
- [15] ASTM C642, Standard test method for density, absorption , and voids in hardened Concrete 1, Am. Stand. Test. Mater. (2008)