

eficacia de una puzolana de origen volcánico en la resistencia del hormigón

Alvaro LOPEZ RUIZ

Doctor en Química Industrial
Jefe de Laboratorios de Cimentaciones Especiales, S. A.
Procedimientos Rodio

Con reconocimiento a las entidades «Thompson & Lichtner Co. Inc.», «Brown-Raymond-Walsh» y «Bureau of Yards & Docks, U.S. Navy», supervisores del «Laboratorio de Ensayo y Proyecto de Materiales de Construcción de la Base de Rota», en el cual el autor trabajó como «Senior testing engineer», por las facilidades dadas para la realización de este trabajo.

Introducción

Las especificaciones para el hormigón del puerto de la Base de Rota exigían la adición de puzolana finamente pulverizada, en una proporción comprendida entre el 15 y el 35 por 100 del conglomerante cemento-puzolana, con el fin de aumentar la estabilidad del hormigón frente al ataque químico del agua del mar. Esto nos dio oportunidad de estudiar la participación de una puzolana natural española de origen volcánico en la resistencia mecánica del hormigón y determinar su «eficacia» en tal sentido.

Con dicho fin se prepararon series de hormigones con y sin puzolana, con cementos de muy diversa calidad, en el Laboratorio de ensayo y proyecto de materiales de construcción de la Base de Rota. Los hormigones se amasaron en una hormigonera de tipo convencional. Los componentes se dosificaron por pesada. La puzolana se añadió a la hormigonera a continuación del cemento portland. La resistencia de los hormigones se determinó en probetas cilíndricas de 15-30 cm, moldeadas de acuerdo con la norma ASTM C31-49, que se desmoldaron a las veinticuatro horas de fabricadas y se conservaron en la cámara húmeda a 20° C, hasta el momento de la rotura.

La puzolana utilizada fue una toba traquítica, de color amarillento, finamente molida, procedente de la isla de Tenerife, cuyas características fisicoquímicas figuran en la tabla 1.

TABLA 1.—Características fisicoquímicas de una puzolana natural, finamente molida, de la isla de Tenerife (PUCATON).

Análisis químico referido a muestra desecada a 105° C		
SiO ₂	54,9 %	Humedad a 105° C=5 a 6 %.
Al ₂ O ₃	17,5 %	Límite líquido=54.
Fe ₂ O ₃	4,0 %	Límite plástico=49.
CaO	1,9 %	Índice de plasticidad=5.
MgO	1,3 %	Retenido por el tamiz ASTM núm. 325 (0,044 mm)=10 %.
Na ₂ O + K ₂ O	10,2 %	
Pérdida al fuego	10,2 %	

Los áridos empleados en la fabricación de los hormigones han sido grava caliza de machaqueo de 19 mm de tamaño máximo y arena de playa preparada. La grava fue siempre la misma; sin embargo, la arena varió en ocasiones, así como la época en que se amasaron los hormigones. Ahora bien, las parejas de hormigones que se comparan, de cemento portland solo y de cemento portland más puzolana, mientras no se diga otra cosa, se amasaron con los mismos áridos y en la misma época del año. La granulometría de la grava fue la siguiente:

Tamiz ASTM:	1"	3/4"	3/8"	Núm. 4	Núm. 8
% que pasa:	100	94	42	5	1

a Eficacia de una puzolana de origen volcánico en hormigones amasados con los cementos "Nesser" y "Deux Lions," para sustituciones del 15^o/_o al 35^o/_o

A continuación se detallan las experiencias realizadas con hormigones convencionales y puzolánicos con sustituciones del 15 por 100 al 35 por 100, amasados con los cementos portland «Nesser» (israelí) y «Deux Lions» (yugoslavo); ambos cumplían las especificaciones «Federal Specification SS-C-192a Type I».

Sus características fisicoquímicas figuran en la tabla 2.

TABLA 2.—Características fisicoquímicas de los cementos «Nesser» y «Deux Lions».

	Cemento «Nesser»	Cemento «Deux Lions»
SiO ₂	22,3	20,6
Residuo insoluble	0,25	0,20
Al ₂ O ₃	6,75	6,20
Fe ₂ O ₃	3,40	2,90
CaO total	62,5	64,5
MgO	1,4	1,5
SO ₃	1,8	2,0
Pérdida al fuego	1,3	1,4
Superficie específica cm ² /g	3.390	3.040
Expansión en el ensayo de autoclave	0,22 %	0,25 %

1. Resistencias a compresión de hormigones convencionales de cemento «Nesser» y «Deux Lions».

En las tablas 3 y 4 se dan las resistencias de los hormigones convencionales amasados con los cementos portland «Nesser» y «Deux Lions», en función de la relación agua/cemento. Asimismo se da la demanda de agua para un asiento de 15 centímetros.

TABLA 3.—Resistencias a compresión de hormigones de cemento portland «Nesser», en función de la relación agua/cemento, y demanda de agua para un asiento de 15 centímetros.

Relación agua/cemento	Agua (kg/m ³)	Resistencia a 4 días (kg/cm ²)	Resistencia a 7 días (kg/cm ²)	Resistencia a 14 días (kg/cm ²)	Resistencia a 28 días (kg/cm ²)
1,12	212	56	72	88	103
0,75	203	129	165	—	213
0,69	205	148	183	216	239
0,62	207	175	220	262	282
0,55	210	237	275	310	352

En el gráfico 1 se han representado las resistencias a compresión a 7 y 28 días, en función de la relación agua/cemento.

TABLA 4.—Resistencias a compresión de hormigones de cemento portland «Deux Lions», en función de la relación agua/cemento, y demanda de agua para un asiento de 15 centímetros.

Relación agua/cemento	Agua (kg/m ³)	Resistencia a 7 días (kg/cm ²)	Resistencia a 28 días (kg/cm ²)
1,10	215	60	85
0,75	208	155	202
0,69	209	169	225
0,62	211	203	253
0,55	214	236	290

En el gráfico 2 se han representado las resistencias a compresión obtenidas a 7 y 28 días, en función de la relación agua/cemento.

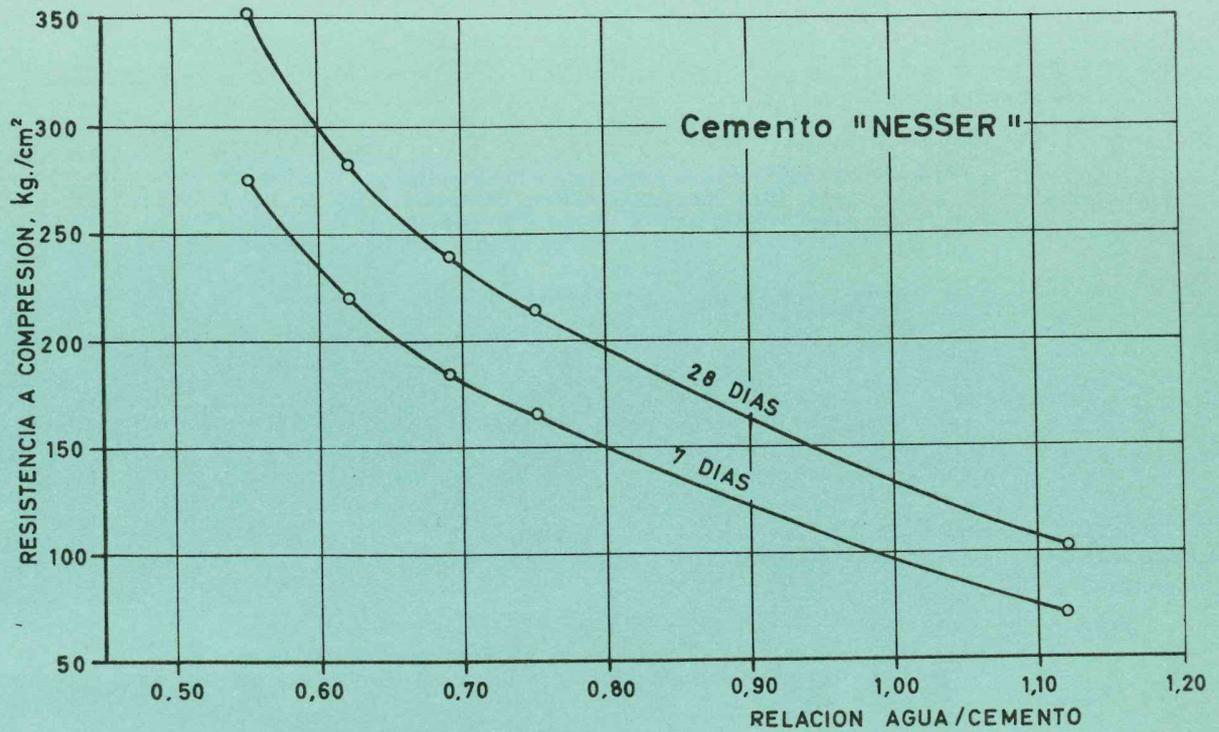
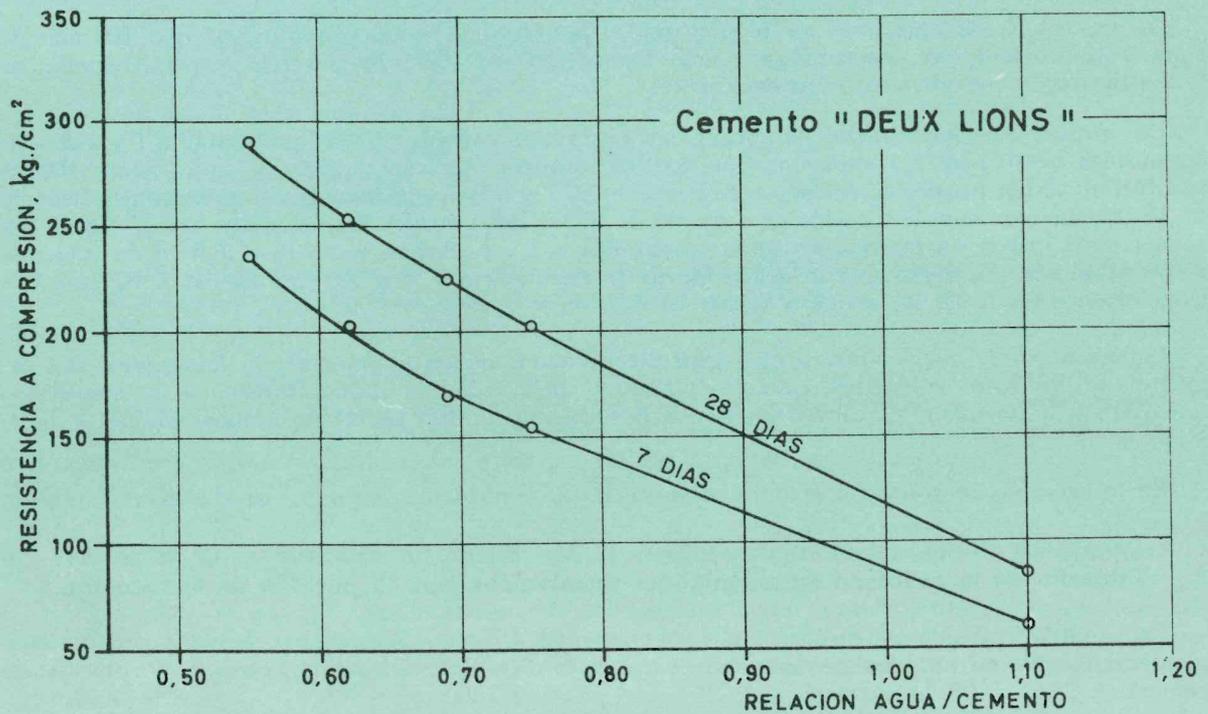


Gráfico 1

2. «Eficacia» de la puzolana en hormigones puzolánicos con 15 por 100 de sustitución.

En la tabla 5 figuran las resistencias de hormigones puzolánicos, cuyo conglomerante se compone de 85 por 100 de cemento «Deux Lions» y 15 por 100 de puzolana, en función de la relación agua/cemento. Asimismo, se da la demanda de agua para un asiento de 15 centímetros.

Gráfico 2



En el gráfico 3 se han representado las resistencias a compresión obtenidas a 7 y 28 días, en función de la relación agua/cemento.

TABLA 5.—Resistencias a compresión de hormigones puzolánicos, cuyo conglomerante se compone de 85 por 100 de cemento «Deux Lions» y 15 por 100 de puzolana. Demanda de agua para un asiento de 15 centímetros.

Relación agua/conglomerante	Agua (kg/m ³)	Resistencia a 7 días (kg/cm ²)	Resistencia a 28 días (kg/cm ²)
1,07	217	56	105
0,75	217	138	211
0,69	218	159	237
0,62	220	190	271
0,55	223	225	316

En la tabla 6 figuran las dosificaciones y características de dos hormigones de 300 kg/m³ de conglomerante, que en un caso se compone de cemento «Deux Lions» solo, y en el otro, de 85 por 100 de cemento y 15 por 100 de puzolana.

TABLA 6.—Dosificaciones y características de un hormigón de 300 kg/m³ de cemento «Deux Lions» y del correspondiente puzolánico con 15 por 100 de sustitución.

	Hormigón 100 % cemento portland	Hormigón puzolánico 85 % de portland + 15 % de puzolana
Cemento (Deux Lions)	300 kg/m ³	255 kg/m ³
Puzolana	—	45 kg/m ³
Agua	209 kg/m ³	218 kg/m ³
Arena	870 kg/m ³	850 kg/m ³
Grava	950 kg/m ³	930 kg/m ³
Relación agua/conglomerante	0,695	0,725
Asiento	15 cm	15 cm
Resistencia a compresión a 7 días	169 kg/cm ²	148 kg/cm ²
Resistencia a compresión a 28 días	224 kg/cm ²	222 kg/cm ²

De los resultados anteriores se deduce que el hormigón puzolánico requirió 4,3 por 100 más de agua, y su resistencia a compresión a 7 y 28 días fue 88 por 100 y 99 por 100, respectivamente, de la del hormigón convencional correspondiente.

Del gráfico 2 se deduce que los hormigones de cemento «Deux Lions», que darían a 7 y a 28 días las mismas resistencias a compresión que las del hormigón puzolánico anterior, con 15 por 100 de sustitución, serían los de la relación agua/cemento 0,77 y 0,70, respectivamente, que, para un asiento de 15 cm, suponen una dosificación en cemento de 273 y 298,5 kg/m³. Esto significa que 45 kg de puzolana participaron en las resistencias a compresión a 7 y a 28 días, como 18 y 43,5 kg de cemento, respectivamente. Es decir, que la «eficacia» de la puzolana a 7 y a 28 días fue 40 y 97 por 100, respectivamente, de la del cemento «Deux Lions».

La «eficacia» de la puzolana, a una edad determinada, indica el número de kilogramos del cemento portland que se emplee, que producirían a dicha edad la misma resistencia a compresión que 100 kg de puzolana, en un hormigón con dosificación de 300 kg/m³ de conglomerante, e igual asiento.

En lo sucesivo, se reservará el término «eficacia» de la puzolana para expresar el concepto anterior.

3. «Eficacia» de la puzolana en hormigones puzolánicos con 25 por 100 de sustitución.

En la tabla 7 se dan las dosificaciones y características de dos hormigones de 300 kg/m³ de conglomerante, que, en un caso, se compone de cemento «Nesser» solo, y en el otro, de 75 por 100 de cemento y 25 por 100 de puzolana.

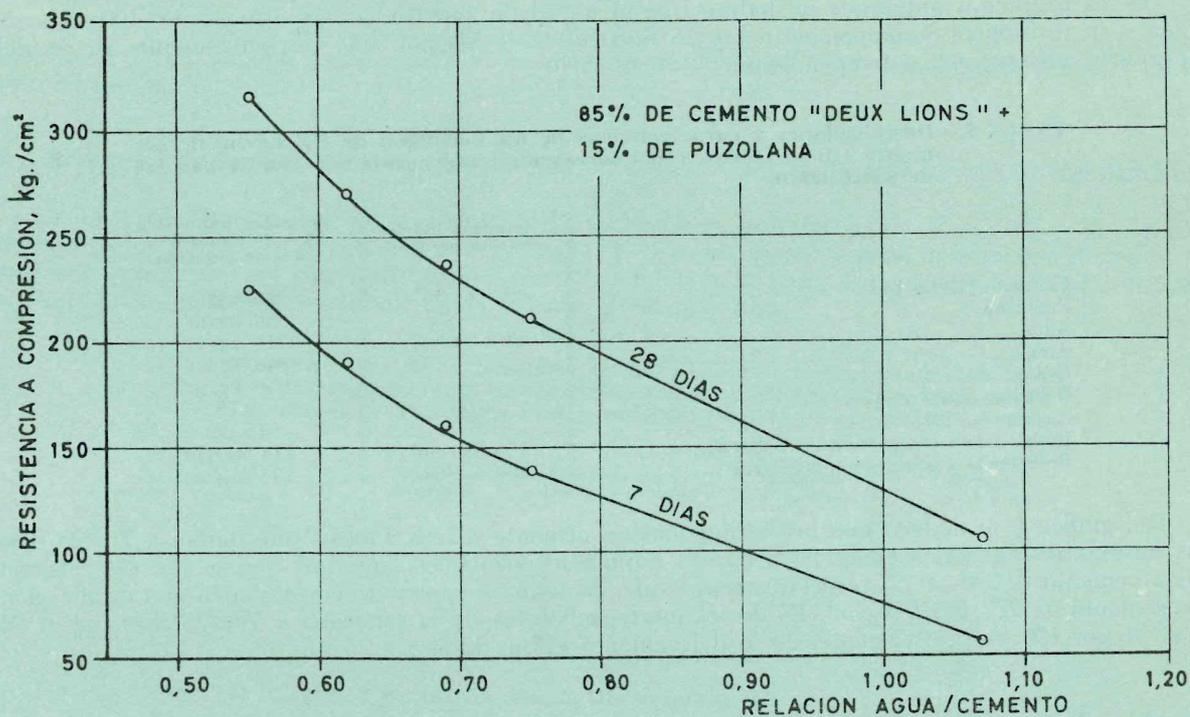


Gráfico 3

TABLA 7.—Dosificaciones y características de un hormigón de 300 kg/m³ de cemento «Nesser», y del correspondiente puzolánico con 25 por 100 de sustitución.

	Hormigón 100 % cemento portland	Hormigón puzolánico 75 % de cemento + 25 % de puzolana
Cemento (Nesser)	300 kg/m ³	225 kg/m ³
Puzolana	—	75 kg/m ³
Agua	204 kg/m ³	213 kg/m ³
Arena	910 kg/m ³	850 kg/m ³
Grava	930 kg/m ³	940 kg/m ³
Relación agua/conglomerante	0,68	0,71
Asiento	15 cm	15 cm
Resistencia a compresión a 7 días	190 kg/cm ²	—
Resistencia a compresión a 28 días	246 kg/cm ²	235 kg/cm ²

De los resultados anteriores se deduce que el hormigón puzolánico requirió 4,5 por 100 más de agua, y su resistencia a compresión a 28 días fue el 95,5 por 100 de la del hormigón convencional correspondiente.

Del gráfico 1 se deduce que el hormigón de cemento «Nesser», que daría a 28 días la misma resistencia a compresión que el hormigón puzolánico anterior, sería el de relación agua/cemento 0,70, que, para un asiento de 15 cm, supone una dosificación en cemento de 291 kg/m³. Es decir, que la «eficacia» de la puzolana a 28 días fue el 88 por 100 de la del cemento «Nesser».

4. «Eficacia» de la puzolana en hormigones puzolánicos con 30 por 100 de sustitución.

En la tabla 8 se dan las características y la dosificación de un hormigón de 286 kg/m³ de conglomerante, que se compone de 70 por 100 de cemento «Deux Lions» y 30 por 100 de puzolana. Asimismo, del gráfico 2 se han deducido las resistencias que se obtendrían con un hormigón convencional de 286 kg/m³ de cemento «Deux Lions».

De los resultados anteriores se deduce que el hormigón puzolánico requirió 4 por 100 más de agua y su resistencia a compresión a 7 y 28 días fue 72 y 93 por 100, respectivamente, de la del hormigón convencional correspondiente.

TABLA 8.—Dosificaciones y características de un hormigón de 286 kg/m³ de cemento «Deux Lions», y del correspondiente puzolánico con 30 por 100 de sustitución.

	Hormigón 100 % cemento portland	Hormigón puzolánico 70 % de cemento + 30 % de puzolana
Cemento (Deux Lions)	286 kg/m ³	200 kg/m ³
Puzolana	—	86 kg/m ³
Agua	207 kg/m ³	215 kg/m ³
Arena	—	840 kg/m ³
Grava	—	940 kg/m ³
Relación agua/conglomerante	0,73	0,75
Asiento	15 cm	15 cm
Resistencia a compresión a 7 días	158 kg/cm ²	114 kg/cm ²
Resistencia a compresión a 28 días	209 kg/cm ²	195 kg/cm ²

Del gráfico 2 se deduce que los hormigones de cemento «Deux Lions», que darían a 7 y 28 días las mismas resistencias a compresión que el hormigón puzolánico anterior, serían los de relación agua/cemento 0,925 y 0,77, respectivamente, que, para un asiento de 15 cm, suponen una dosificación en cemento de 227 y 270 kg/m³. Es decir, que la «eficacia» de la puzolana a 7 y 28 días fue el 32 y el 81 por 100, respectivamente, de la del cemento «Deux Lions».

5. «Eficacia» de la puzolana en hormigones puzolánicos con 35 por 100 de sustitución.

En la tabla 9 se dan las dosificaciones y características de dos hormigones de 300 kg/m³ de conglomerante, que, en un caso, se compone de cemento portland «Nesser*» solo, y en el otro, de 65 por 100 de cemento y 35 por 100 de puzolana.

El cemento portland «Nesser*» se diferencia del «Nesser» anteriormente citado en que llevaba ensacado mucho más tiempo cuando se empleó. Asimismo, los hormigones que se citan a continuación, se amasaron en verano, mientras que los anteriores de «Nesser», en invierno.

TABLA 9.—Dosificaciones y características de un hormigón de 300 kg/m³ de cemento «Nesser*», y del correspondiente puzolánico con 35 por 100 de sustitución.

	Hormigón 100 % cemento portland	Hormigón puzolánico 65 % de cemento + 35 % de puzolana
Cemento (Nesser*)	300 kg/m ³	195 kg/m ³
Puzolana	—	105 kg/m ³
Agua	209 kg/m ³	222 kg/m ³
Arena	890 kg/m ³	820 kg/m ³
Grava	930 kg/m ³	935 kg/m ³
Relación agua/conglomerante	0,70	0,74
Asiento	15 cm	15 cm
Resistencia a compresión a 3 días	118 kg/cm ²	55 kg/cm ²
Resistencia a compresión a 7 días	160 kg/cm ²	102 kg/cm ²
Resistencia a compresión a 28 días	220 kg/cm ²	188 kg/cm ²

De los resultados anteriores se deduce que el hormigón puzolánico requirió 6 por 100 más de agua, y su resistencia a compresión a 3, 7 y 28 días fue el 47, 64 y 85 por 100, respectivamente, de la del hormigón sin sustitución.

Para evaluar la «eficacia» de la puzolana en el hormigón puzolánico anterior de cemento «Nesser*» se ha utilizado el gráfico 1, que da la resistencia de los hormigones de «Nesser» en función de la relación agua/cemento, pero se ha considerado que los hormigones de «Nesser*» darían aproximadamente, a los 28 días, el 90 por 100 de la resistencia de aquéllos. Este factor se ha deducido de la relación de resistencias a 28 días de los hormigones de 300 kg/m³ de cemento «Nesser*»

y «Nesser» (tablas 7 y 9). Según esto, el hormigón de «Nesser*», que daría a 28 días las mismas resistencias que el hormigón puzolánico anterior, sería el de relación agua/cemento 0,77, que, para un asiento de 15 cm supone una dosificación en cemento de 268 kg/m³. Es decir, que la eficacia de la puzolana a 28 días fue el 70 por 100 de la del cemento «Nesser*».

6. Resumen de la «eficacia» de la puzolana en función del tanto por ciento de sustitución.

En la tabla 10 se resume la «eficacia» de la puzolana en hormigones de 15, 25, 30 y 35 por 100 de sustitución de cemento portland por puzolana, y el aumento relativo de la demanda de agua de amasado producida por dicha sustitución. Se indica también la marca del cemento portland utilizado, ya que su naturaleza debe influir en la eficacia de la puzolana.

TABLA 10.—«Eficacia» de la puzolana en hormigones puzolánicos de 300 kg/m³ de conglomerante de cemento «Nesser» y «Deux Lions», para sustituciones del 15 al 35 por 100 y aumento relativo de la demanda de agua.

% de sustitución de cemento portland por puzolana	Cemento empleado	Aumento de la demanda de agua	«Eficacia» a 7 días	«Eficacia» a 28 días
15 %	Deux Lions.. ...	4,3 %	40 %	97 %
25 %	Nesser	4,5 %	—	88 %
30 %	Deux Lions.. ...	—	32 %	81 %
35 %	Nesser*... ..	6,2 %	—	70 %

De los valores de la tabla anterior se deduce lo siguiente:

- la «eficacia» de la puzolana a 28 días fue, aproximadamente, 2,5 veces mayor que a 7 días;
- la «eficacia» de la puzolana a 7 días, en hormigones puzolánicos con sustituciones del 15 al 30 por 100, varió del 40 al 32 por 100, respectivamente;
- la «eficacia» de la puzolana a 28 días, en hormigones puzolánicos con sustituciones del 15 al 35 por 100, varió del 97 al 70 por 100, respectivamente;
- tanto a 7 como a 28 días, la «eficacia» de la puzolana aumentó al disminuir su dosificación en el hormigón;
- el aumento de la demanda de agua producido por sustituciones de 15 al 35 por 100 de cemento por puzolana, varió, aproximadamente, del 4 al 6,2 por 100.

b

Comparación de hormigones de 300 kg/m³ de cemento portland de calidades muy diversas, con los puzolánicos correspondientes con 35 % de sustitución

Seguidamente se detallan los resultados obtenidos con 7 hormigones de 300 kg/m³ de conglomerante, amasados con cementos de muy diversas calidades, y los correspondientes puzolánicos con 35 por 100 de sustitución.

1. Características de 7 hormigones de 300 kg/m³ de cemento portland, y de los puzolánicos correspondientes con 35 por 100 de sustitución. Relación de resistencias.

En la tabla 11 se dan las dosificaciones y características de 7 hormigones puzolánicos de 300 kg/m³ de conglomerante, compuestos de 65 por 100 de cemento y 35 por 100 de puzolana. Los cementos portland utilizados fueron de calidades muy distintas.

En la tabla 12 se dan las dosificaciones y resistencias a compresión de los hormigones sin sustitución, correspondientes a los de la tabla 11.

TABLA 11.—Dosificaciones y características de hormigones puzolánicos de 300 kg/m³ de conglomerante, con 35 por 100 de sustitución, amasados con cementos portland de calidades muy diversas.

DENOMINACION DEL CEMENTO	N*	R	A	G	O	F	C
Cemento (kg/m ³)	195	195	195	195	195	195	195
Puzolana (kg/m ³)	105	105	105	105	105	105	105
Agua (kg/m ³)	222	232	232	230	222	227	232
Arena (kg/m ³)	820	810	810	810	820	820	810
Grava (kg/m ³)	935	925	925	930	935	930	925
Relación agua/conglomerante	0,74	0,775	0,775	0,77	0,74	0,76	0,775
Asiento (cm)	15	15	15	15	15	15	15
Resistencia a compresión a 3 días (kg/cm ²).	55	50	31	42	39	25	22
Resistencia a compresión a 7 días (kg/cm ²).	102	92	72	82	—	56	51
Resistencia a compresión a 28 días (kg/cm ²).	188	159	155	144	139	110	94

TABLA 12.—Dosificaciones y características de los hormigones de 300 kg/m³ de cemento portland, correspondientes a los de la tabla 11.

DENOMINACION DEL CEMENTO	N*	R	A	G	O	F	C
Cemento (kg/m ³)	300	300	300	300	300	300	300
Agua (kg/m ³)	209	220	220	218	209	216	220
Arena (kg/m ³)	890	880	880	880	890	885	880
Grava (kg/m ³)	930	920	920	925	930	925	920
Relación agua/conglomerante	0,70	0,735	0,735	0,73	0,70	0,72	0,735
Asiento (cm)	15	15	15	15	15	15	15
Resistencia a compresión a 3 días (kg/cm ²).	118	110	67	86	82	50	44
Resistencia a compresión a 7 días (kg/cm ²).	160	140	102	111	110	70	55
Resistencia a compresión a 28 días (kg/cm ²).	220	185	163	150	140	110	90

En la tabla 13 se resumen las relaciones de resistencias a compresión (deducidas de las tablas 12 y 13), entre los hormigones puzolánicos y los correspondientes sin sustitución, así como las resistencias de stos a 28 días, para que sirvan de referencia de calidad de los cementos portland utilizados. Asimismo, se da el aumento relativo de la demanda de agua producido por la sustitución del 35 por 100 de cemento por puzolana.

TABLA 13.—Relación de resistencias a compresión entre los hormigones puzolánicos de la tabla 11 y los correspondientes sin sustitución. Aumento relativo de la demanda de agua de amasado.

Denominación del cemento	Resistencia a 28 días del hormigón de 300 kg/m ³ sin sustitución (kg/cm ²)	Aumento de la demanda de agua %	Relación de resistencia a		
			3 días %	7 días %	28 días %
N*	220	6,2	46	64	85
R	185	5,5	46	66	86
A	163	5,5	47	70	95
G	150	5,5	49	74	96
O	140	6,2	48	—	99
F	110	5,1	50	80	100
C	90	5,5	50	93	104

De los resultados anteriores, que relacionan las resistencias de hormigones puzolánicos con 35 por 100 de sustitución, con las de los hormigones convencionales correspondientes, se deduce lo siguiente:

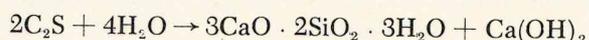
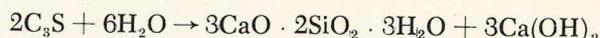
- La relación de resistencias aumenta con la edad;
- A igualdad de edad, la relación de resistencias aumenta cuando disminuye la calidad del cemento;
- La demanda relativa de agua de amasado aumentó, aproximadamente, del 5 al 6,2 por 100 en los hormigones puzolánicos.

2. Hipótesis sobre el efecto de la puzolana en los hormigones puzolánicos.

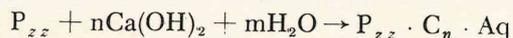
Las deducciones anteriores se pueden intentar explicar por el proceso de formación del conglomerante puzolana-cal en el hormigón puzolánico, y por la elevada «agua normal» de la puzolana.

El proceso de formación del conglomerante puzolana-cal, en el hormigón puzolánico, se puede esquematizar de la manera siguiente:

I: Hidratación de los componentes del cemento y liberación simultánea de hidróxido cálcico:



II: Reacción de la puzolana con el hidróxido cálcico liberado en el proceso anterior:



En las ecuaciones anteriores C_3S representa al silicato tricálcico y C_2S al silicato bicálcico que se hidratan con producción de hidróxido cálcico; $P_{zz} \cdot C_n \cdot Aq$ representa el resultado de la reacción de la puzolana (P_{zz}) con el hidróxido cálcico.

De las reacciones anteriores puede deducirse lo siguiente:

a) Dado que la reacción de la puzolana con la cal es lenta, y que no puede verificarse mientras no se haya primero liberado hidróxido cálcico en la hidratación del cemento, la participación de la puzolana en la resistencia ha de ir aumentando con la edad.

b) La «eficacia» de la puzolana disminuye al aumentar su dosificación en los hormigones puzolánicos, debido a que disminuye proporcionalmente la cantidad de cal con la que puede reaccionar.

Sin embargo, no parece lógico que un conglomerante de pobre calidad, como es el formado por la reacción de la puzolana con la cal pueda, ya a los 28 días, participar en algunos casos en la resistencia del hormigón como un cemento portland, por lo que creemos que en este hecho comprobado han podido influir las siguientes causas:

A) Al desaparecer el hidróxido cálcico producido en la hidratación del cemento por su reacción con la puzolana (proceso II), las reacciones de hidratación del cemento (proceso I) son más completas.

B) Es sabido que la puzolana «estabiliza» los cementos expansivos, lo que puede mejorar la adherencia de la pasta con los áridos, especialmente cuando se utilicen cementos de pobre calidad y en ambiente húmedo.

C) La puzolana, en proporciones adecuadas y según la composición granulométrica del hormigón, aumenta su compacidad e impermeabilidad y disminuye la segregación y exudación en estado fresco.

En hormigones bien dosificados, la sustitución de cemento por puzolana aumenta la demanda de agua del hormigón, debido a la elevada «agua normal» de la puzolana.

Conclusiones

Del presente trabajo, en el que se estudia la «eficacia» de una puzolana de origen volcánico de la isla de Tenerife, en hormigones puzolánicos de 300 kg/m^3 de conglomerante, para sustituciones del 15 al 35 por 100, se deducen las siguientes conclusiones:

- I. La «eficacia» de la puzolana aumenta progresivamente con la edad, alcanzando, en ocasiones, a 28 días, valores próximos al 100 por 100, es decir, que participa en la resistencia a compresión del hormigón en magnitud comparable al cemento portland.
- II. La «eficacia» de la puzolana disminuye al aumentar la sustitución de cemento por puzolana.
- III. La «eficacia» de la puzolana aumenta al disminuir la calidad del cemento portland.
- IV. La sustitución de 15 a 35 por 100 de cemento portland por puzolana, aumentó la demanda de agua del hormigón de 4 a 6,2 por 100.