

# **CINAREM' 17**

IX Conferencia Internacional de Aprovechamiento de Recursos Minerales.

## **EMPLEO DE ZEOLITAS MICRONIZADAS EN HORMIGONES. RELACION ENTRE EL TAMAÑO DE PARTÍCULAS Y LAS PRESTACIONES.**

**Autor: Carlos Alberto Hernández Toirac.**

**Centro de Investigación y Desarrollo de la Construcción (CIDC).**

### **RESUMEN.**

El empleo de materiales alternativos como adiciones puzolánicas en los hormigones es cada día más usual en el mundo, no solo por razones económicas, sino por los efectos beneficiosos que aporta a las prestaciones del hormigón. El crecimiento infraestructural del sector turístico hoy en el país está marcado por elevadas exigencias constructivas, específicamente en los parámetros de resistencias mecánicas y durabilidad de sus hormigones, siendo palpable en el mercado interno la escasez de materiales alternativos competitivos que puedan ser utilizados como adiciones activas sustituyendo parcialmente al Cemento Portland.

Se evalúan a escala de laboratorio hormigones con adiciones de tobas zeolitizadas pertenecientes al yacimiento de Tasajeras micronizadas ( $90\% < 90\mu$ ) en molinos de bolas y puzolana artificial micronizada perteneciente a la compañía francesa ALCIMEX ( $< 50\mu$ ) sustituyendo al cemento Portland P-35 en valores de 5, 10, 15, 20 y 25 por ciento. Utilizando una dosificación sin ningún tipo de adición como patrón de comparación se determinó el porcentaje óptimo de sustitución, valor para el cual no existen afectaciones en cuanto a los parámetros de resistencia a compresión a los 28 días de curado.

Los resultados obtenidos arrojan como porcentaje óptimo de sustitución un 10 por ciento para ambos casos, demostrando así el gran potencial de estas adiciones como material puzolánico. Se demuestra la influencia del tamaño de partícula y del contenido de sílice amorfa de estos materiales en las prestaciones de sus hormigones, obteniendo un mayor desempeño en cuanto a resistencias mecánicas la puzolana artificial perteneciente a la compañía francesa ALCIMEX.

## **1. INTRODUCCIÓN:**

En las últimas décadas se han realizado diversos estudios e investigaciones acerca de la utilización de minerales zeolita como adiciones activas en hormigones, los que han demostrado su elevada actividad puzolánica y el aumento de dicha actividad con la disminución del tamaño de partícula (micronización del material). Bajo ese concepto las tobas zeolitizadas micronizadas se han logrado emplear de forma similar a la microsílice y el fly ash, estas últimas con un valor de mercado superior a los 800USD/t.

Hoy los planes constructivos de los próximos 10 años en la capital son fundamentalmente en las áreas de la bahía de La Habana y su litoral, incluyendo torres, propias de un crecimiento vertical, todo esto con el confort y la calidad que impone el desarrollo de un turismo competitivo. Para esto resulta imprescindible el empleo de hormigones de alto desempeño que garanticen los requisitos de diseño estructural y la durabilidad en el ambiente tropical marino.

Como respuesta a esta problemática este proyecto tiene la finalidad de evaluar el comportamiento técnico del empleo de tobas zeolitas micronizadas del yacimiento de Tasajeras y puzolana artificial ALCIMEX como adiciones activas al hormigón.

### **OBJETIVO GENERAL:**

Evaluar el comportamiento de las tobas zeolitizadas micronizadas del yacimiento de Tasajeras y las puzolanas artificiales micronizadas de la compañía francesa ALCIMEX como adiciones puzolánicas a hormigones.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

1. Determinar el porcentaje óptimo de sustitución de la toba zeolitizada micronizada de Tasajeras ( $90\% < 90\mu$ ) y de la puzolana de la compañía francesa ALCIMEX ( $< 50\mu$ ) por cemento Portland P-35.
2. Evaluar el desempeño por durabilidad de los hormigones con estas adiciones.

## **2. DESARROLLO:**

### **2.1 Caracterización de los materiales. Métodos.**

Las puzolanas son materiales de naturaleza silícea ó silico-aluminoso, que no tienen por si mismos propiedades aglomerantes pero que finamente dividido en presencia de humedad pueden reaccionar con la cal (portlandita) para formar por vía topoquímica silicatos estables y prácticamente insolubles de características semejantes a los formados durante la hidratación del cemento Portland específicamente la tobermorita, (Rabilero, Las Puzolanas. Cinética de las reacciones 1988, Rabilero, Mineralogía de las puzolanas 2005)

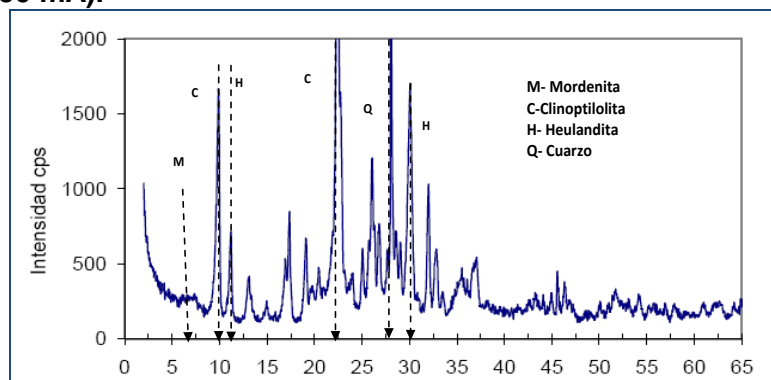
Muestras estudiadas:

- Toba zeolitizada del Yacimiento de Tasajeras micronizada en molino de bolas (90% < 90 $\mu$ ) en los laboratorios del Centro de Investigación y Desarrollo de la Construcción (CIDC).
- Puzolana artificial micronizada perteneciente a la compañía francesa ALCIMEX (< 50 $\mu$ ).

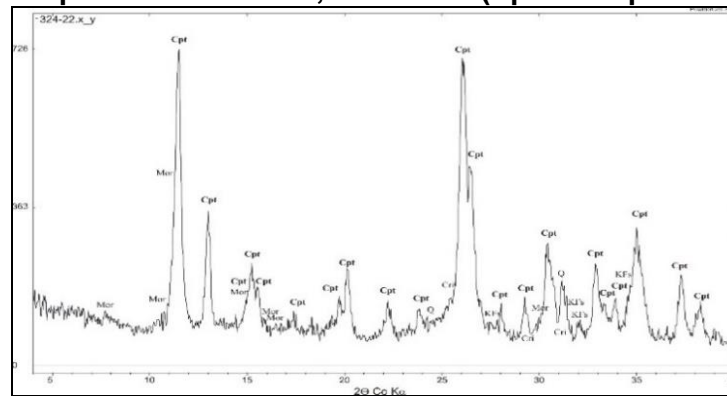
#### **2.1.1 Caracterización mineralógica de las zeolitas.**

Los resultados de la caracterización mineralógica de las muestras se aprecian en las difracciones de rayos X que aparecen en la figura 1 y 2.

**Figura 1. Difracción rayos X, zeolita Tasajeras. (Equipo PW 1710 marca Philips, tubo de cobre de 40 KV y 50 mA).**



**Figura 2. Difracción de puzolana francesa, ALCIMEX. (Aportado por el suministrador).**



### **2.1.2 Caracterización química de las muestras.**

**Tabla I. Resultados de la caracterización química.**

Oxido %	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	PPI*	SO <sub>3</sub>
Tasajeras	64,39	11,76	3,64	1,96	1,07	0,4	14,57	<0,1
Alcímex	74.52	3.05	6,64	1.59	1,23	9.40	0.08	

\*Pérdida por ignición. En el caso del resultado que ofrece este ensayo en la muestra de la zeolita de tasajeras micronizada resulta de gran importancia aclarar que aunque según lo establecido en la tabla 1 de la NC 528: 2007 "Cemento Hidráulico. Pozzolanas. Especificaciones" el % máx. de pérdida por ignición para las adiciones minerales clase N no debe superar el 10%, se especifica que cuando dicha adición tenga en su composición mineralógica contenidos de zeolita se excluyen de este requisito. Por tanto el valor no incumple lo normado.

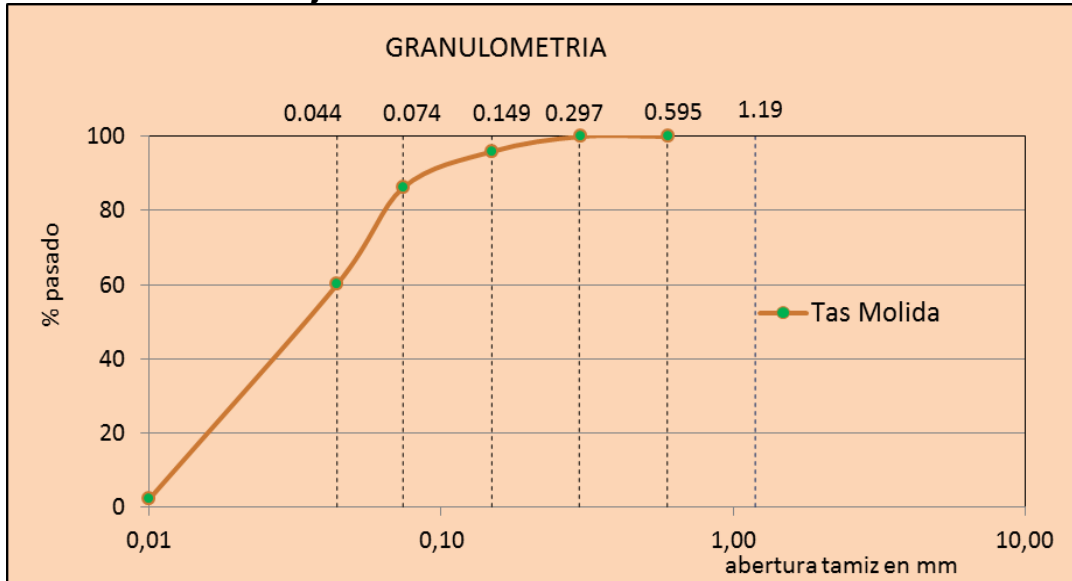
La caracterización química de las zeolitas estudiadas, Tasajeras y ALCIMEX (SM1 M050) cumplen con los valores establecidos en la NC 528: 2007 "Cemento Hidráulico. Pozzolanas. Especificaciones" para puzolanas clase N:

- La cantidad de Dióxido de Silicio + Oxido de Aluminio + Óxido de Hierro > 70 % del total de la composición oxílica.

### **2.1.3 Caracterización granulométrica de las muestras.**

La granulometría de las tobas zeolitizadas de Tasajeras se ejecutó de acuerdo a la norma NC 527: 2007 "Cemento hidráulico. Métodos de ensayos. Evaluación de las puzolanas", las muestras de ALCIMEX fueron realizadas por el método Láser y aportados por el suministrador. En la figura 3 y 4 aparecen los gráficos respectivos.

**Figura 3. Resultados de la granulometría de las muestras de tobas zeolitizadas micronizadas de Tasajeras.**



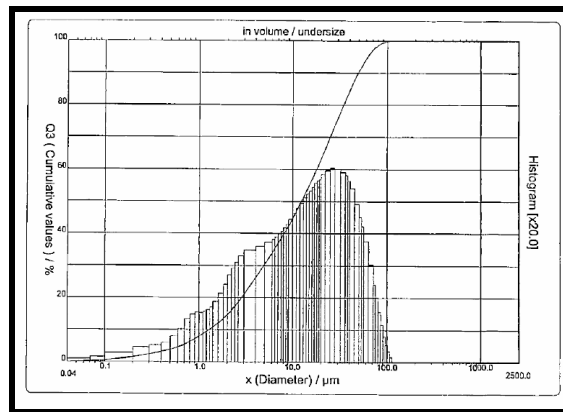
Las tobas zeolitizadas de Tasajeras fueron traídas del yacimiento con la granulometría del producto comercial ZOAD, perteneciente a este mismo yacimiento, o sea de (0-0,8mm). Para su micronización se utilizaron los molinos de bolas pertenecientes al laboratorio LACEMAT del CIDC, de la firma KHD, con una geometría elipsoidal, forma de trabajo discontinua y volumen interior de 50 litros aproximadamente. El volumen de los cuerpos molidores fue de un 30% con respecto al volumen interior del molino y la cantidad obtenida en cada corrida fue de 6kg en 60 minutos aproximadamente:

**Tabla II. Distribución del tamaño de bolas, moliendo zeolita Tasajeras.**

Molino KHD  de 50 lt	Distribución de Bolas			
	40-45 mm	25-30 mm	20-25 mm	15-20 mm
	25%	20%	25%	30%

Como resultado de esta molienda las tobas zeolitizadas micronizadas de tasajeras presentaron una aceptable distribución de su tamaño de partículas, pasando alrededor del 60% de sus partículas el tamiz de 44µm.

**Figura 4. Resultado de granulometría laser de muestras ALCIMEX.**



**Muestra**

**ALCIM  
EX**

<b>d 10 %</b>	<b>1.27 µm</b>
<b>d 50 %</b>	<b>12.36 µm</b>
<b>d 90 %</b>	<b>48.83 µm</b>

Como se observa las puzolanas artificiales francesas ALCIMEX presentan alrededor del 90% de sus partículas con un diámetro promedio por debajo de las 50µm.

#### **2.1.4 Caracterización del Cemento Portland P-35, Curazao S.A. Mariel.**

El cemento a utilizar para la investigación es el procedente de la fábrica Cemento Curazao S.A. del Mariel, a continuación se muestran sus principales características físicas y químicas.

**Tabla III. Características físico-mecánicas del Cemento Portland (P-35) fábrica Cementos Curazao S.A. Mariel.**

Índice	Propiedad		UM	Valor Obtenido	Método de Ensayo
Físicos	Superficie Específica		Cm <sup>2</sup> /g	3317	NC 196-6
	Peso específico		g/cm <sup>3</sup>	3,1	NC 523-2007
	Densidad polvo seco		g/cm <sup>3</sup>	1.15	NC 523-2007
	Consistencia normal		%	24.9	NC 524-2007
	Finura		%	1.2	
	Tiempo de fraguado inicial		Min	95	NC 524
	Tiempo de fraguado final		h	3	
Mecánicos	Resistencia a compresión	3 días	MPa	24,3	NC 506
		7 días		28,8	
		28 días		35,4	

**Tabla IV. Características químicas del Cemento Portland (P-35) Cementos Curazao S.A. Mariel.**

Ensayos	UM	Resultados	Especificación NC 95:2011
Trióxido de azufre, SO <sub>3</sub>	%	3,30	3,5 máx.

Óxido de magnesio, MgO	%	1,55	5,0 máx.
Pérdida por ignición	%	3,86	4,0 máx.
Residuo insoluble	%	1,82	4,0 máx.

### **2.1.5 Caracterización Aditivo químico SIKA Plast 9100CU.**

Este aditivo, perteneciente a la firma SIKA, fue producido especialmente para las condiciones tropicales de Cuba. Se trata de una aditivo superfluidificante de base acrílica para hormigones de alta calidad, impermeables y de alta durabilidad y resistencias mecánicas, con pérdidas de la laborabilidad altamente reducidas.

**Tabla V. Ensayos de caracterización aditivo químico SIKAPlast 9100Cu.**

Ensayos	UM	N-200
Contenido de sólidos	%	43.41
Densidad	kg/dm <sup>3</sup>	1.13
Determinación pH	--	5.0 - 6.0
Viscosidad Ford	Seg.	60

### **2.1.6 Caracterización de los áridos.**

Los áridos utilizados para esta investigación pertenecen a la Cantera La Molina, ubicada a 12,3 km al sureste del Mariel y a 14 km al noroeste de Guanajay. Sus áridos son provenientes de rocas calizas de color gris oscuro y con un elevado porcentaje de absorción.

**Tabla VI. Caracterización de los áridos de la cantera La Molina utilizados en las dosificaciones.**

	Gravilla Molina	NC 251	Granito Molina	NC 251	Arena Molina	NC 251
25,4	100	100				
19,1	99	90-100				
12,7	50	20-55	100	100		
9,52	12	0-15	94	85-100	100	100
4,76	0	0-5	21	15-35	93	90-100
2,38	0		1	0-10	67	70-100
1,19	0		0	0-5	38	45-80
0,59	0		0		20	25-60
0,297	0		0		10	10-30
0,149	0		0		4	2-10
0,075	0		0		0	0
Mat. + fino T200	1.0	≤1	1.5	≤1	1.9	≤3
Eq. Arena	-		-		75	
Cont. Arcilla	0	≤0,25	0	≤0,25	0	≤1
PEC	2.60	-	2.63	-	2.61	-
PES	2.64	-	2.66	-	2.65	-

PEA	2.71	-	2.70	-	2.72	-
% Absorc.	1.0		1.2		1.8	
PUS	1371	-	1340	-	1477	-
PUC	1510	-	1568	-	1663	-
Triturab. (Sec./Sat.)	14.47/8.31	<15/<25	-	-	-	-
Los Ángeles	24	Max: 40%	-	-	-	-

Los resultados obtenidos en los ensayos a los áridos, específicamente a la arena, presentan problemas en cuanto a los parámetros de granulometría establecidos en la NC: 251 2013 "Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos". Además el granito no cumple con el porcentaje de absorción establecido en la misma norma mencionada anteriormente, presentando una valor superior.

## **2.2 Dosificaciones.**

### **2.2.1 Dosificación patrón.**

Aunque este proyecto investigativo tiene un alcance nacional, las primeras aspiraciones de puesta en obra de sus resultados están enfocadas a las construcciones del sector turístico de nuestra capital. Para lograrlo se ha trazado como objetivo introducir las zeolitas micronizadas procedentes del yacimiento de Tasajeras y ALCIMEX en la dosificación utilizada actualmente en dichas obras.

La dosificación patrón a utilizar será entonces una de las utilizadas por la UCM (Unión de Construcciones Militares) en las obras en ejecución en estos momentos en la capital, específicamente los hoteles "Packard" y "Prado y Malecón" ubicados ambos en zonas de agresividad muy alta a los iones cloruros.

Entonces como punto de partida se establecen las siguientes dosificaciones para determinar el **porcentaje óptimo de sustitución**:

1. Dosificación patrón solo con Cemento Portland.
2. Dosificaciones utilizando gravilla, granito y arena La Molina con sustituciones de 5, 10, 15, 20 y 25% de Cemento Portland (P-35) por tobas zeolitizadas micronizadas de Tasajeras.
3. Dosificaciones utilizando gravilla, granito y arena La Molina con sustituciones de 5, 10, 15, 20 y 25% de Cemento Portland (P-35) por puzolana artificial micronizada de ALCIMEX.

**Tabla VII. Dosificaciones utilizando las tobas zeolitizadas micronizada de Tasajeras.**

<b>Materiales</b>	<b>UM</b>	<b>Patrón</b>	<b>5%</b>	<b>10%</b>	<b>15%</b>	<b>20%</b>	<b>25%</b>
<b>Cemento Portland</b>	Kg	450	427	405	382.5	360	337.5
<b>Tasajeras micronizada</b>	Kg	-	17.5	35	52.5	70	87.5
<b>Gravilla La Molina</b>	Kg	580	580	580	580	580	580
<b>Granito La Molina</b>	Kg	320	320	320	320	320	320
<b>Arena La Molina</b>	Kg	880	880	880	880	880	880
<b>Agua (efectiva)</b>	litros	175	175	175	175	175	175



<b>Aditivo SIKA Plast</b>	litros	3.5 lts.	Ajust.	Ajust.	ajustar	ajustar	ajustar
<b>9100Cu.</b>							
<b>A/C</b>	-	0.39	0.39	0.40	0.40	0.41	0.41

Esta dosificación tendrá las siguientes características:

- Resistencia característica especificada  $f_{ck}$  de 35 MPa.
- Zona de exposición: agresividad Muy Alta.
- El tamaño máximo de árido es de 19.1 mm
- La mezcla fresca tendrá un asentamiento por el cono no menor de 20 cm y la relación agua-cemento estará alrededor de  $a/c \approx 0,40$ .

Para introducir en las dosificaciones las cantidades de tobas y zeolitas a sustituir directamente por Cemento Portland se tuvo como parámetro invariable el volumen total del diseño, o sea un metro cúbico. Por tanto se halló primero la cantidad de kg de cemento a retirar, luego se calculó que volumen representa dicha cantidad y finalmente con este volumen se obtuvo el peso de zeolita a incorporar. La densidad utilizada para estos cálculos fue el peso específico de cada muestra.

Entonces la ecuación para calcular la cantidad de zeolita a sustituir en kg quedaría de la siguiente forma:

$$P_z = \frac{P_c}{\gamma_c} \times \gamma_z$$

Donde:

$P_c$  : Peso de cemento en kg sustituido de la dosificación;

$\gamma_c$  : Peso específico del Cemento Portland P-35 (3.1 kg/dm<sup>3</sup>);

: Peso de la zeolita en Kg a sustituir de la dosificación.

$\gamma_z$  : Peso específico de la zeolita. (Alcimex: 2.30 kg/dm<sup>3</sup>, Tasajeras micronizada: 2.43 kg/dm<sup>3</sup>).

**Tabla VIII. Dosificaciones utilizando puzolana artificial micronizada de ALCIMEX.**

<b>Materiales</b>	<b>UM</b>	<b>Patrón</b>	<b>5%</b>	<b>10%</b>	<b>15%</b>	<b>20%</b>	<b>25%</b>
<b>Cemento Portland</b>	Kg	450	427	405	382.5	360	337.5
<b>Puzolana ALCIMEX</b>	Kg	-	16.4	32.9	50.1	65.7	82.1
<b>Gravilla La Molina</b>	Kg	580	580	580	580	580	580
<b>Granito La Molina</b>	Kg	320	320	320	320	320	320
<b>Arena La Molina</b>	Kg	880	880	880	880	880	880

<b>Agua efectiva</b>	litros	175	175	175	175	175	175
<b>Aditivo Sika Plast 9100Cu</b>	litros	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
<b>A/C</b>	-	<b>0.39</b>	<b>0.39</b>	<b>0.40</b>	<b>0.40</b>	<b>0.41</b>	<b>0.41</b>

### **3. Evaluación de las propiedades de los hormigones. Análisis de los resultados.**

Las amasadas fueron de 55 litros y de cada una de ellas se elaboraron 3 series de 3 probetas cilíndricas (150x300mm) para ensayar a resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días y dos probetas más para los ensayos de durabilidad, o sea un total de 11 probetas por amasada.

Se realizaron los siguientes ensayos a las mezclas de hormigón en estado fresco:

- Asentamiento
- Peso volumétrico

Se realizaron los siguientes ensayos a las mezclas de hormigón en estado endurecido:

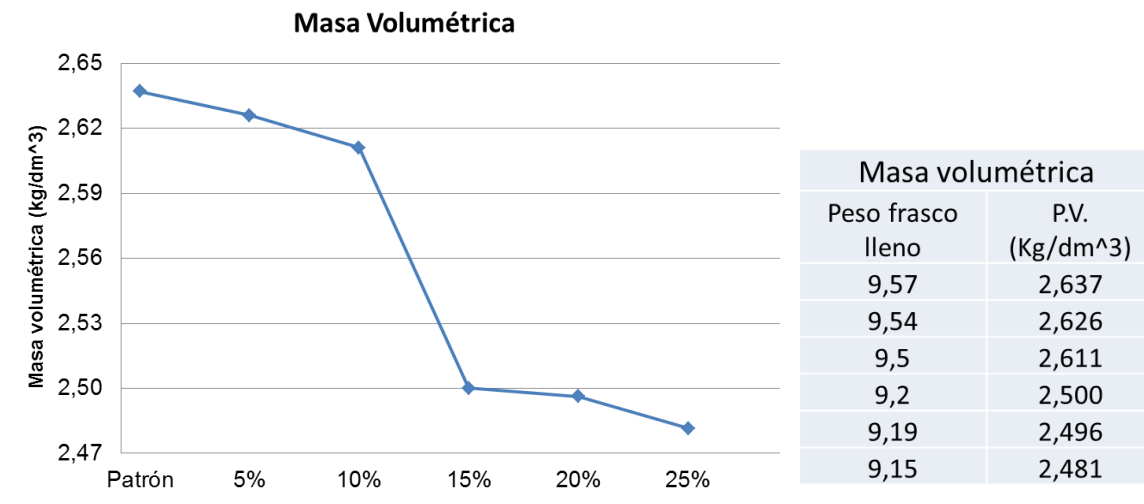
- Resistencia a la compresión.
- Porosidad efectiva.
- Absorción por capilaridad.

#### **3.1 Propiedades en estado fresco.**

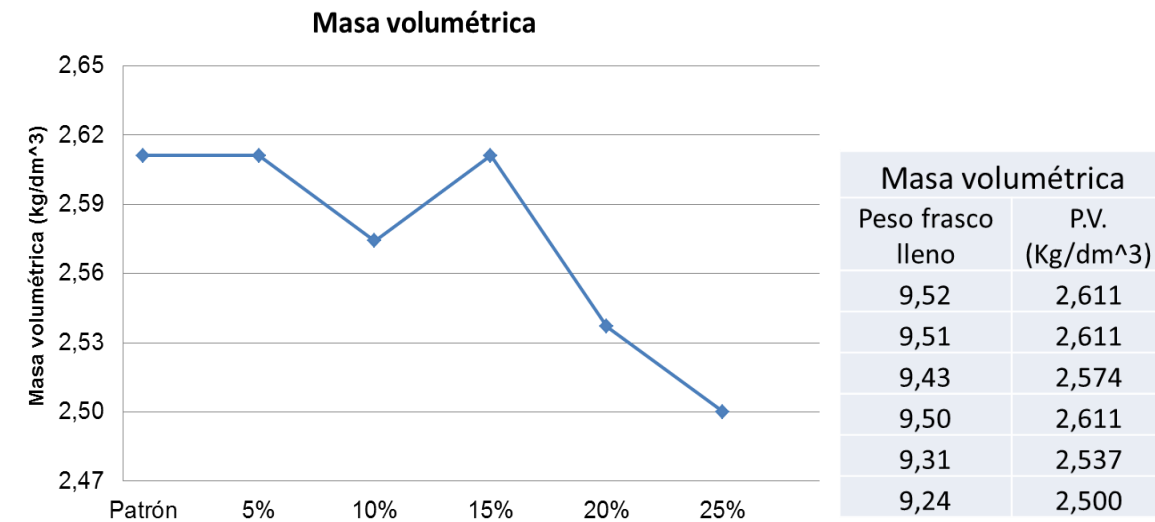
##### **3.1.1 Masa Volumétrica.**

Con el aumento del porcentaje de sustitución de las tobas zeolitizadas y de la puzolana artificial por cemento Portland trajo consigo una ligera disminución de la masa volumétrica del hormigón debido a que los primeros tienen menor densidad respecto al segundo ( $2,43\text{kg/cm}^3$  y  $2,30\text{kg/cm}^3$  Vs.  $3,10\text{kg/cm}^3$  respectivamente). Aunque en la adición de las tobas del yacimiento de Tasajeras hay un ligero aumento en la sustitución del 15%, este no es significativo debido a que es de solamente  $0,037\text{ kg/dm}^3$  y a que se utilizó una pesa de 100kg de capacidad. A pesar de esto se puede afirmar que en la mayoría de los casos el aumento de la adición es directamente proporcional a la disminución del peso volumétrico de sus hormigones.

**Figura 5. Masa volumétrica puzolana artificial ALCIMEX.**



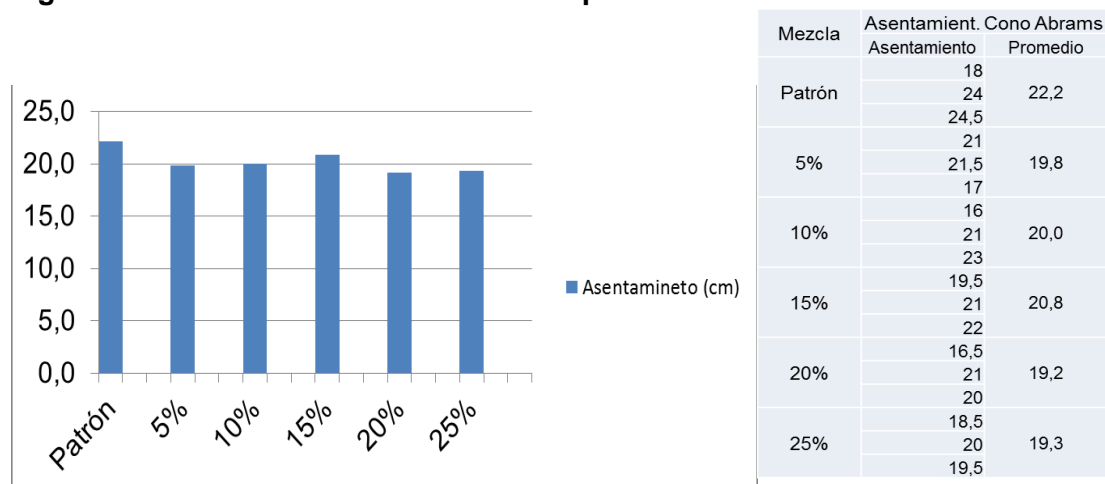
**Figura 6. Masa volumétrica toba zeolitizada Tasajeras.**



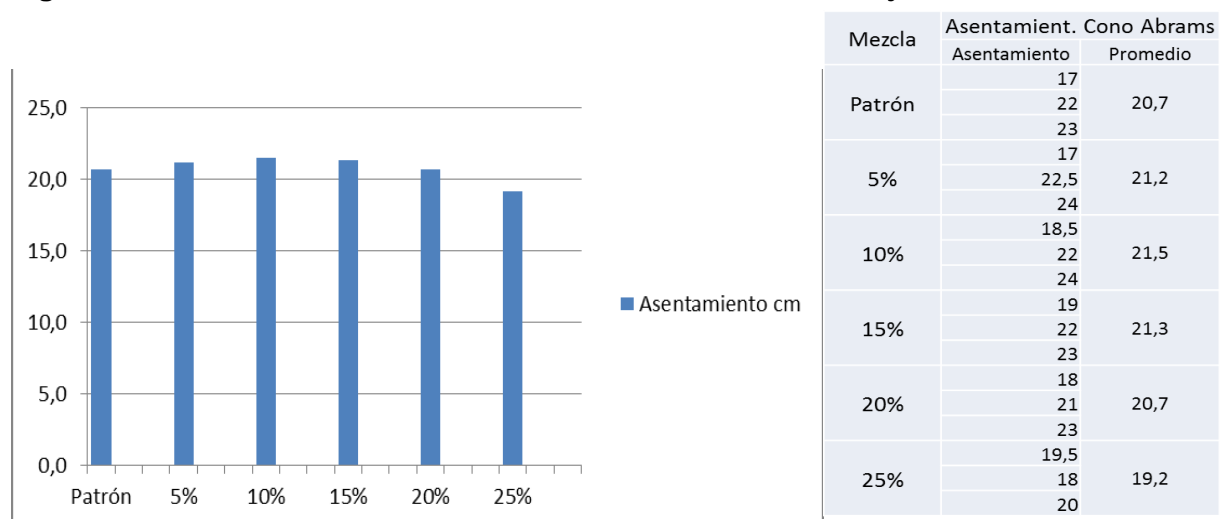
### **3.1.2 Asentamiento por el cono de Abrams.**

Los valores de asentamiento obtenidos están en el rango de lo diseñado (19 - 24 cm) por lo que la valoración cualitativa de las mezclas es de “fluidas” y “muy fluidas”, aspecto que expone su alto grado de laboralidad.

**Figura 7. Asentamiento cono de Abrams puzolana artificial ALCIMEX.**

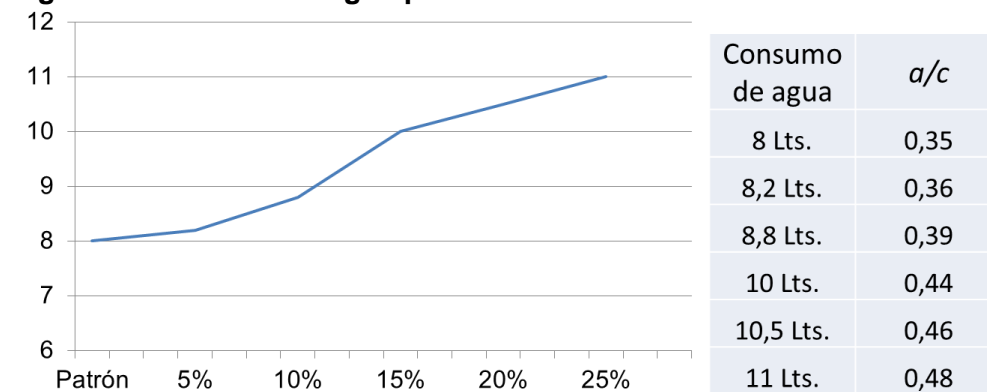


**Figura 8. Asentamiento Cono de Abrams Toba zeolitizada Tasajeras.**

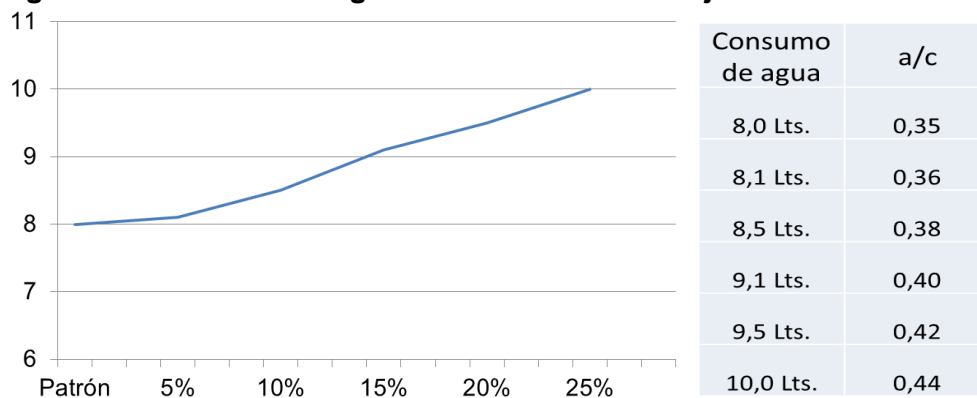


### **3.1.3 Consumo de agua.**

**Figura 9. Consumo de agua puzolana artificial ALCIMEX.**



**Figura 10. Consumo de agua toba zeolitizada Tasajeras.**

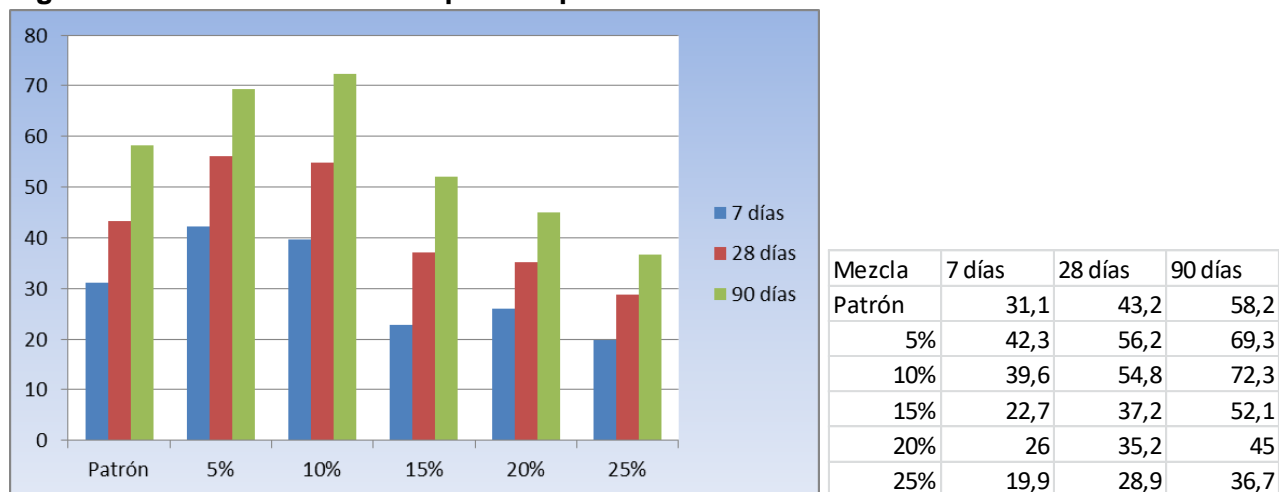


### **3.2. Ensayos al hormigón en estado endurecido.**

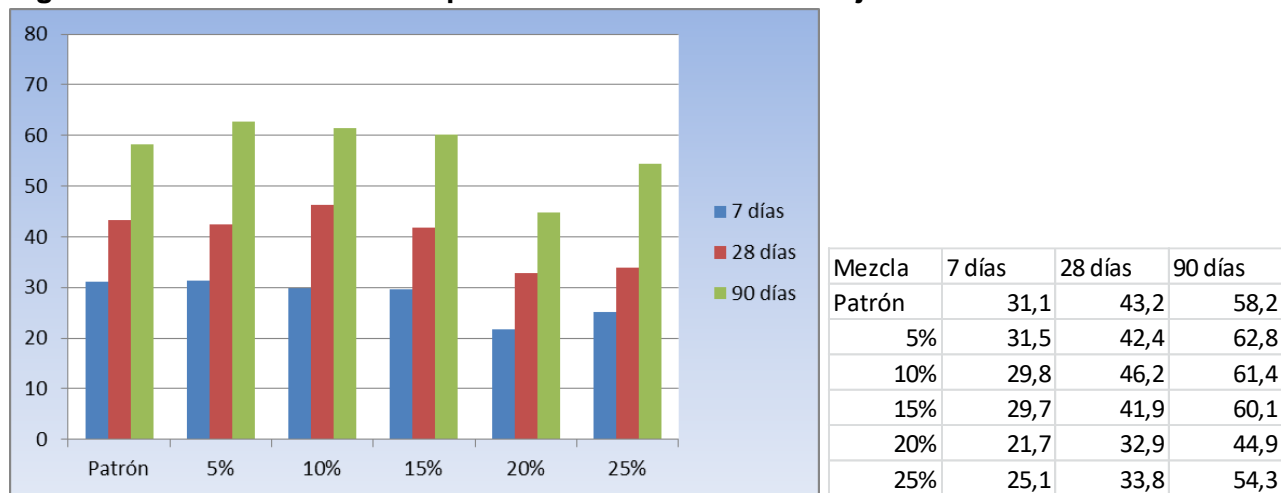
#### **3.2.1 Resistencia a la compresión.**

Todas las probetas fueron curadas en tanques a una temperatura aproximada de 25 °C y humedad relativa superior al 85%. Una vez cumplidos sus tiempos de curado de 7, 28 y 90 días fueron sacadas y oreadas por 1 hora aproximadamente. Fueron pesadas y medidos sus diámetros tres veces en dos direcciones.

**Figura 11. Resistencia a la compresión puzolana artificial ALCIMEX.**



**Figura 12. Resistencia a la compresión toba zeolitizada Tasajeras.**



La resistencia característica a la compresión ( $f_{ck}$ ) para la dosificación patrón es de 35 MPa, la real obtenida superó los 40 MPa. Aunque los materiales utilizados como adición puzolánica presentan una reacción tardía debido a que deben esperar que se forme suficiente portlandita para potenciar su reacción, se puede observar como a los 7 días de curado para un 5 y 10 por ciento de sustitución se superan los valores de la mezcla patrón, ratificando esto la elevada actividad puzolánica de estos materiales.

En las dosificaciones ensayadas a los 28 días donde se sustituye un 10 por ciento de las adiciones por cemento Portland se obtiene alrededor de 13 MPa por encima de la muestra patrón para el caso de la puzolana artificial ALCIMEX con un valor de desviación estándar de 2,15 MPa y 3,8 MPa para el caso de las tobas zeolitizadas del yacimiento de Tasajeras con una desviación estándar de 1,91 MPa. A partir de un 15 por ciento de sustitución los valores de resistencia resultan severamente afectados por lo que fueron despreciados. Resulta importante aclarar que aunque para este último material mencionado el 15 % de sustitución está próximo a lo logrado por la patrón (41,9 y 43,2 MPa respectivamente) sus valores de desviación estándar (1,85 y 2,11 MPa) nos hacen desechar probabilísticamente este resultado.

Entonces se puede definir como dosificación óptima en ambos casos a la que se le puede sustituir el 10 % del volumen del cemento Portland por cada una de estas adiciones.

### **3.2.2 Ensayos de durabilidad.**

Cuba es una isla larga y estrecha, con un clima húmedo tropical y además está sometida a muy intensos niveles de agresividad, especialmente debido a los iones cloruros y sulfatos por acción del aerosol marino en su costa norte durante todo el año. A esto se suma que más el 80% de los áridos utilizados en Cuba son calizos, triturados, con bajo contenido de finos (en especial las arenas) y que en general presentan valores de absorción elevados, que pueden llegar a ser superiores al 1% en peso, (Howland, Martín, "Estudio de la absorción capilar y la sorptividad de hormigones con áridos calizos

cubanos", 2013), tal como es el caso de los utilizados para la investigación. Por tanto es necesario obtener valores de porosidad efectiva inferiores a un 10% y de velocidad de absorción capilar (sorptividad) no mayor a  $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$ .

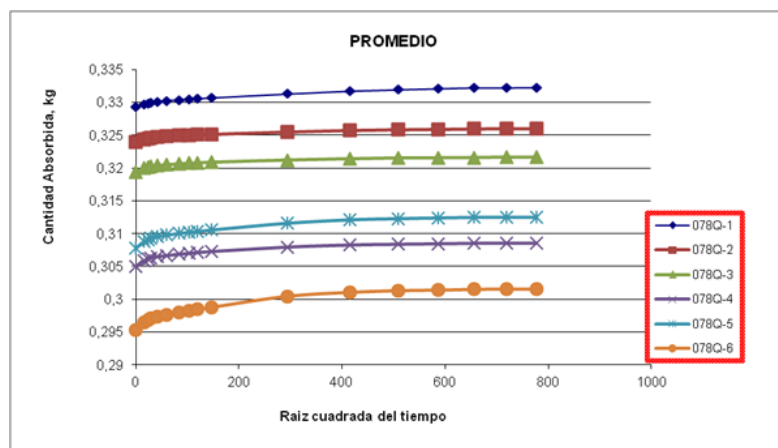
### 3.2.2.1 Ensayo de porosidad efectiva.

Para la realización de este ensayo se tomó de cada mezcla una probeta cilíndrica de 150x300mm a la cual se le extrajeron a los 28 días de curado tres testigos de 2,5cm de altura y 7 cm de diámetro cada una.

**Tabla IX.** Resultados del Coeficiente de Absorción Capilar (K), Resistencia a la Penetración del agua (m) y la Porosidad Efectiva ( $\epsilon_e$ ) para los hormigones con puzolana artificial ALCIMEX.

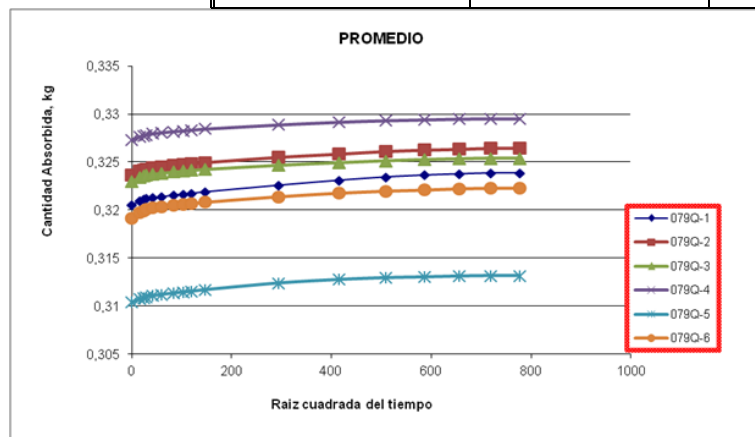
Identificación	K ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ )	m ( $\text{s/m}^2$ )	$\epsilon_e$ (%)
078Q-1 Patrón	$0.214 \times 10^{-2}$	$1.05 \times 10^8$	2.20
078Q-2 5%	$0.179 \times 10^{-2}$	$7.57 \times 10^7$	1.56
078Q-3 10%	$0.210 \times 10^{-2}$	$5.78 \times 10^7$	1.60
078Q-4 15%	$0.325 \times 10^{-2}$	$6.90 \times 10^7$	2.71
078Q-5 20%	$0.396 \times 10^{-2}$	$7.68 \times 10^7$	3.49
078Q-6 25%	$0.498 \times 10^{-2}$	$8.90 \times 10^7$	4.67

Analizando los valores de porosidad efectiva según la norma NC: 345:2011 de las muestras Hormigón Endurecido — Determinación de la Absorción de Agua por Capilaridad, si la muestra tiene un valor de porosidad efectiva menor del 10%, como en este caso, indica que es un buen hormigón y poco permeable. Los resultados de porosidad efectiva de la zeolita artificial de ALCIMEX cumplieron con este parámetro, destacándose la superioridad de las mezclas con un 5 y 10 % de sustitución con respecto a la mezcla patrón.



**Tabla X.** Resultados del Coeficiente de Absorción Capilar (K), Resistencia a la Penetración del agua (m) y la Porosidad Efectiva ( $\epsilon_e$ ) para los hormigones con tobas zeolitizadas Tasajeras.

Identificación	K (kg/m <sup>2</sup> .S <sup>1/2</sup> )	m (s/m <sup>2</sup> )	ε <sub>e</sub> (%)
079Q-1 <b>Patrón</b>	0.201 x10 <sup>-2</sup>	1.65 x10 <sup>8</sup>	2.51
079Q-2 <b>5%</b>	0.188 x10 <sup>-2</sup>	1.22 x10 <sup>8</sup>	2.04
079Q-3 <b>10%</b>	0.190 x10 <sup>-2</sup>	8.50 x10 <sup>7</sup>	1.75
079Q-4 <b>15%</b>	0.170 x10 <sup>-2</sup>	9.59 x10 <sup>7</sup>	1.62
079Q-5 <b>20%</b>	0.196 x10 <sup>-2</sup>	1.14 x10 <sup>8</sup>	2.06
079Q-6 <b>25%</b>	0.249 x10 <sup>-2</sup>	8.53 x10 <sup>8</sup>	2.34



Analizando los valores de porosidad efectiva según la norma NC: 345:2011 de las muestras Hormigón Endurecido — Determinación de la Absorción de Agua por Capilaridad, si la muestra tiene un valor de porosidad efectiva menor del 10%, como en este caso, indica que es un buen hormigón y poco permeable. Estos resultados demuestran la superioridad de las mezclas con adiciones de tobas zeolitizadas del yacimiento de Tasajeras con respecto a la mezcla patrón, pues todas obtuvieron mejores valores, poniendo de manifiesto el efecto de las adiciones activas que aumentan la compacidad de los hormigones como consecuencia de la deposición de la tobermorita formada en la reacción puzolánica en los poros interconectados de la matriz cementicia, fenómeno denominado refinamiento de poros (*Larbi 1989, Gayoso y Rosell Lam, Non-conventional aggregates and mineral admixture in high performance concrete. 2005*).

### **3.1.3 Ensayo de velocidad de absorción (sorptividad).**

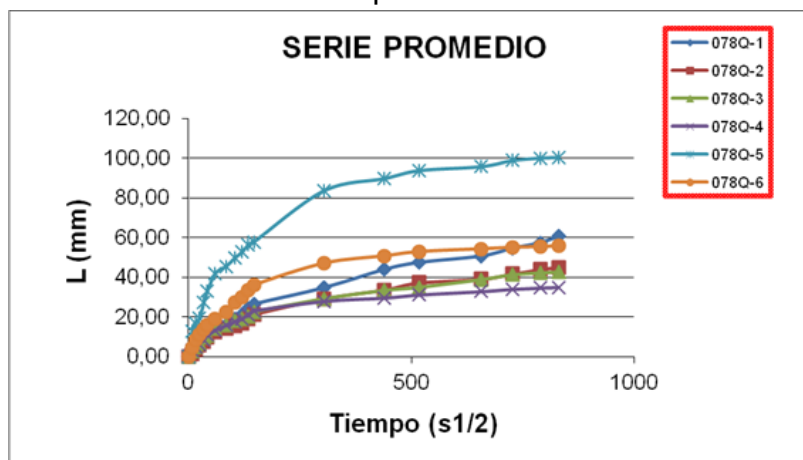
Para la realización de este ensayo se tomó de cada mezcla una probeta cilíndrica de 150x300mm a la cual se le extrajeron a los 28 días de curado dos testigos de 5cm de altura y 10 cm de diámetro cada una.

**Tabla XI.** Valores promedios obtenidos de la Velocidad de Absorción Inicial y Secundaria y los coeficientes de correlación con los ajustes a las líneas rectas correspondientes de los hormigones con **puzolana artificial ALCIMEX.**



Ident. de la serie	Vel. de Absorción Inicial (mm/s <sup>1/2</sup> )	Coeficiente de Correlación (r)	Vel. de Absorción Secundaria (mm/s <sup>1/2</sup> )	Coeficiente de Correlación (r)
078Q-1 Patrón	$1.5 \times 10^{-1}$	0.98	$4.3 \times 10^{-2}$	0.98
078Q-2 5%	$1.3 \times 10^{-1}$	0.98	$2.9 \times 10^{-2}$	0.98
078Q-3 10%	$1.3 \times 10^{-1}$	0.96	$2.7 \times 10^{-2}$	0.96
078Q-4 15%	$1.4 \times 10^{-1}$	0.91	$1.4 \times 10^{-2}$	0.91
078Q-5 20%	$3.2 \times 10^{-2}$	0.92	$3.3 \times 10^{-3}$	0.92
078Q-6 25%	$2.1 \times 10^{-1}$	0.91	$1.7 \times 10^{-2}$	0.91

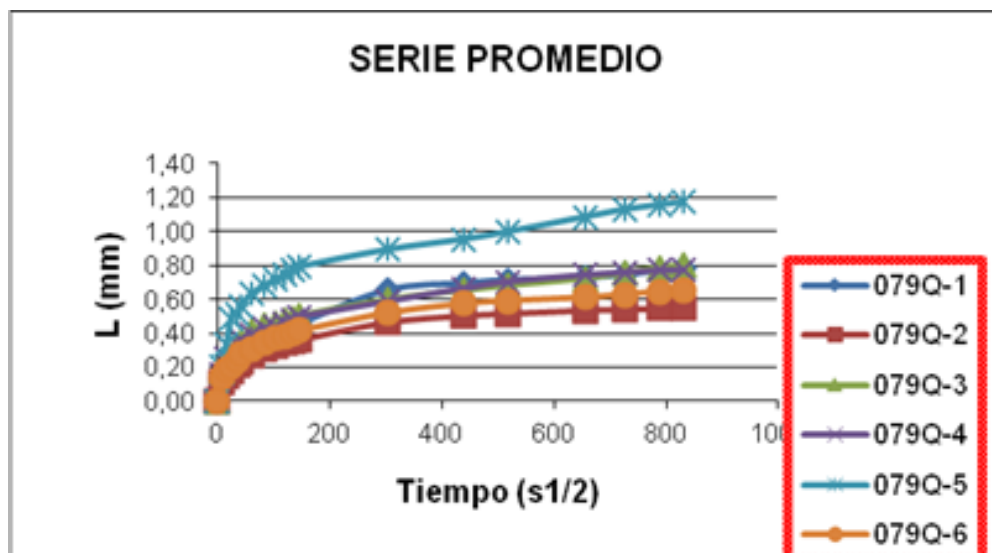
Todos los valores obtenidos, excepto los de velocidad de absorción secundaria para la mezcla con un 20% de adición de tobas zeolitizadas de Tasajeras ( $3,3 \times 10^{-3}$  mm/s<sup>1/2</sup>), incumplen valores normados de Sorptividad. Todos están por encima de  $4,3 \times 10^{-2}$  mm/s<sup>1/2</sup>, mientras que el parámetro límite máximo establecido para las estructuras de hormigón con un espesor de recubrimiento del acero de 30 mm, en ambiente muy agresivo, es de  $5 \times 10^{-2}$  mm/s<sup>1/2</sup>. Otro aspecto incumplido parcialmente en este ensayo está relacionado con que la determinación tanto de la velocidad inicial como la secundaria tiene que garantizar un ajuste del coeficiente de correlación mayor al 98%, aquí ocurre para las mezclas con adiciones superiores al 10%.



**Tabla XII.** Valores promedios obtenidos de la Velocidad de Absorción Inicial y Secundaria y los coeficientes de correlación con los ajustes a las líneas rectas correspondientes de los hormigones con tobas zeolitizadas de Tasajeras.

Identificación de la serie	Velocidad de Absorción Inicial (mm/s <sup>1/2</sup> )	Coeficiente de Correlación (r)	Velocidad de Absorción Secundaria (mm/s <sup>1/2</sup> )	Coeficiente de Correlación (r)
079Q-1	$2.0 \times 10^{-3}$	0.94	$2.1 \times 10^{-4}$	0.99
079Q-2	$1.7 \times 10^{-3}$	0.96	$1.6 \times 10^{-4}$	0.97
079Q-3	$2.2 \times 10^{-3}$	0.94	$3.8 \times 10^{-4}$	1.00

079Q-4	$1.9 \times 10^{-3}$	0.92	$3.7 \times 10^{-4}$	0.98
079Q-5	$3.5 \times 10^{-3}$	0.92	$5.6 \times 10^{-4}$	1.00
079Q-6	$1.8 \times 10^{-3}$	0.97	$2.4 \times 10^{-4}$	0.98



Sin embargo para las mezclas que utilizaron adiciones de tobas zeolitizadas del yacimiento de Tasajeras si cumplieron en su totalidad con lo normado para este ensayo, todos los valores son inferiores a  $5 \times 10^{-2} \text{ mm/s}^{1/2}$ , aunque en la determinación de la velocidad de absorción inicial existen problemas en cuanto a los valores de ajuste del coeficiente de correlación, están por debajo del 98%.

#### **4. CONCLUSIONES.**

- 4.1 Es posible sustituir, tanto con puzolanas artificiales francesas ALCIMEX como con tobas zeolitizadas de Tasajeras, un 10% de cemento Portland P-35 por estas sin que se produzcan afectaciones en cuanto a los parámetros de resistencia a compresión a la edad de 28 días, quedando definidas como porcentajes óptimos de sustitución.
- 4.2 Se obtienen hormigones de elevadas resistencias mecánicas con la adición de puzolanas artificiales francesas ALCIMEX. Lográndose a los 28 días 55MPa aproximadamente de resistencia a la compresión. Con la adición de tobas zeolitizadas de Tasajeras se logran a igual edad 46MPa aproximadamente, evidenciando estos resultados el superior desempeño de la puzolana ALCIMEX por su menor tamaño de partículas y el contenido de sílice amorfa.
- 4.3 Las caracterizaciones químicas de las adiciones puzolánicas utilizadas cumplieron con los parámetros establecidos en la NC TS 527: 2007:
  - ✓ La cantidad de Dióxido de Silicio + Óxido de Aluminio + Óxido Férrico > 70 % del total de la composición oxídica.
- 4.4 Los hormigones con el porcentaje óptimo de sustitución de tobas zeolitizadas del yacimiento de Tasajeras por cemento Portland P-35 cumplieron con los parámetros de porosidad efectiva y sorptividad, teniendo en ambos casos mejor desempeño que la mezcla patrón.
- 4.5 Los hormigones que utilizaron como adición las puzolanas artificiales micronizadas francesas ALCIMEX aunque cumplieron con los valores de porosidad efectiva, incumplieron con los valores establecidos para ensayo de velocidad de absorción (sorptividad).

#### **5. RECOMENDACIONES.**

- Analizar y estudiar los resultados obtenidos en el ensayo de sorptividad efectuado a la puzolana artificial ALCIMEX.
- Emplear las puzolanas artificiales micronizadas ALCIMEX y las tobas zeolitizadas micronizadas de Tasajeras como adiciones activas a los hormigones en sustitución de la micro o nano-sílice, el meta caolín, etc. en las obras futuras a ejecutar en el país.

## 6. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.

- ACI 211-1R-00. «Standard Practice for Selecting Proportions for Normal Heavyweight, and Mass Concrete.» 2007.
- Gayoso, R., y M.B. Rosell Lam. «Non-conventional aggregates and mineral admixture in high performance concrete.» *ACI Proceeding Seventh International Symposium on utilization of high-strength/high-performance concrete*. 2005.
- Gayoso, R., y M.B. Rosell. «Zeolita utilizada como aditivo mineral activo para hormigones.» *V Conferencia Internacional de zeolita*. Habana, 2003.
- Larbi, J.A. «Study of morphological change of concrete microstructure with silica fume admixture.» *Abstract PhD Degree*. 1989.
- «NC 345:2011 Hormigón endurecido —Determinación de la Absorción de agua por capilaridad.» 2011.
- «NC 967:2013 Hormigón hidráulico — Determinación de la Velocidad de absorción de agua (sorptividad).» 2013.
- ONN. NC 527 2007 Método de ensayo. Evaluación de puzolanas. . 2007.
- ONN, Cuba. NC 528 2007 Puzolanas Especificaciones Cemento hidráulico . 2007.
- Perraki, T., E. Kontori, S. Tsivilis, y G. Kakali. «The effect of zeolite on the properties and hydration of blended cements.» *Cement & Concrete Composites* , 2010: 128–133.
- Poon, U., L. Lama, S.C. Koua, y Z.S. Linb. «A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes.» *Construction and Building Materials* 13 (1999).
- Rabilero, A. *Las Puzolanas. Cinética de las reacciones*. Stgo de Cuba: Editorial Oriente., 1988. *Mineralogía de las puzolanas*. La Habana, 2005.
- Rosell Lam, M.B. «Zeolita Natural Cubana del Tipo Clinoptilolita-Heulandita como Material Cementicio Suplementario en Hormigones.» *Tesis en opción de grado a doctor en ciencias técnicas*. Diciembre 2010.
- Rosell, M. B., R. A. Gayoso, y B. Calvo. «La zeolita como adición en hormigones de altas prestaciones.» *Proceedings IV Jornada Iberoamericana de Materiales de Construcción*. Honduras.: Red XII-C Rocas y Minerales Industriales, CYTED, 2005, s.f.
- Rosell, M. *Influencias del tamaño de partícula de zeolita en su actividad puzolánica*. *Memorias VII Conferencia Científica de la Construcción*. La Habana, 2007.
- Tellez, E. «Activación de materiales, una tecnología para el incremento de su eficiencia, calidad y contribución a la preservación al medio ambiente.» *Convención Internacional de la Ingeniería en Cuba. II Jornada de geociencias e ingeniería química*. 2010.
- Villar Cociña, E. «Modelos cineticos para la caracterización de materiales puzolánicos y mezclas de moldeo para fundición de hierro.» *Tesis Doctoral*. 2005.
- Howland J.J., Martín A. R. «Estudio de la absorción capilar y la sorptividad de hormigones con áridos calizos cubanos.» 2013.