

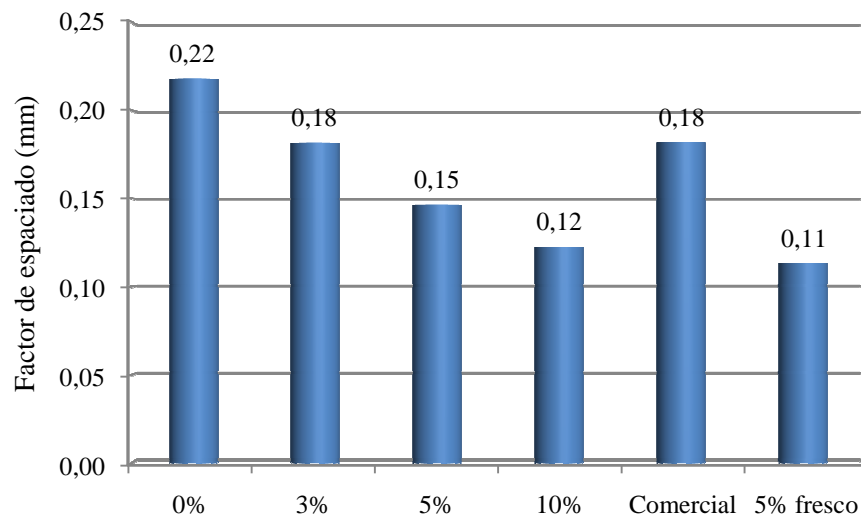
muestras la cantidad de poros mayores de  $100\ \mu\text{m}$  es menor, proporcionando una menor longitud registrada en poros. También debido a que la muestra sin aire ocluido, con la alta relación a/c usada, presenta una mayor cantidad de poros capilares que son registrados en el conteo de puntos, aumentando la superficie específica.

El factor de espaciado es el parámetro calculado que representa la distancia máxima entre cualquier punto de la pasta de cemento y el borde de un hueco de aire; se expresa en mm.

El factor de espaciado depende del valor de la relación pasta/aire  $R$  y de la superficie específica  $\alpha$ .

Para el cálculo de este parámetro se supone que todos los huecos de aire presentes tienen una dimensión y una distribución uniformes de tal forma que la estructura que ha servido de modelo tiene el mismo volumen total y la superficie que la estructura real.

En la Tabla 22 y en la Figura 69 se presentan los resultados para este parámetro.



**Figura 69** Factor de espaciado de los poros en el hormigón endurecido

Se observa que:

- El factor de espaciado disminuye con la cantidad de aditivo adicionado en la mezcla y a medida que aumenta el contenido de aire ocluido.

- Los resultados para este parámetro que se ajustan a los valores recomendados son los hormigones con 3% de jugo y aditivo comercial.
- El menor factor de espaciado se obtuvo para el hormigón con 5% de jugo fresco, lo cual podría representar mejores condiciones de durabilidad, factores de espaciado menores a 0,23 mm han sido considerados para condiciones de exposición severa a agentes de deterioro (13)

- **Distribución del tamaño de poros**

El uso de aditivos ocluidores de aire para obtener un volumen de burbujas de aire que son lo suficientemente pequeñas y dispersas para alcanzar un nivel adecuado de espaciado, es el medio más apropiado para lograr durabilidad. El tamaño de los poros formados en general son mayores de 10  $\mu\text{m}$  y menores de 1250  $\mu\text{m}$ . (6).

Los resultados del cálculo de la distribución, usando el procedimiento descrito en el capítulo experimental, se encuentran relacionados en el anexo A y graficados en la Figura 70.

En esta figura podemos observar que:

- La mayor cantidad de poros para las mezclas con aditivos son de tamaños entre 20 y 80  $\mu\text{m}$ .
- Cuando se aumentó el contenido de jugo en la mezcla, la frecuencia de poros también aumentó y parámetros de la estructura como el factor de espaciado disminuye.
- La distribución de poros para el 5%, 10% y 5% fresco presentan la mayor cantidad de poros en el rango de 30 a 60  $\mu\text{m}$ . Las frecuencias de poros de mayor tamaño se presentan también en esta mismas mezclas lo que puede indicar la coalescencia de los poros más pequeños para formar otros de mayor tamaño (En la Figura 71, pueden notarse el fenómeno mencionado).
- El hormigón con 3% de jugo presenta una buena distribución, con alta frecuencia de poros de menor tamaño hasta de 60  $\mu\text{m}$  y poca presencia de poros de gran tamaño.
- La muestra control es la que tiene menor cantidad de poros por milímetro cúbico de hormigón. La mayoría de éstos están ubicados en el rango de diámetro entre las 30 y 100  $\mu\text{m}$ .
- Con el 5% de jugo fresco se presenta la mayor frecuencia de poros pequeños, lo cual también se refleja en otros parámetros como la superficie específica mayor y el

factor de espaciado menor con respecto a la mezcla con la misma cantidad de jugo en la mezcla.

- El 5% de jugo fresco proporcionó unos parámetros de poros similares a la mezcla con el 10%, pero la distribución de poros mostró una mayor frecuencia de poros pequeños lo cual puede influenciar positivamente las resistencias mecánicas.

En la Figura 71 puede observarse como a medida que aumenta la cantidad de aditivo, aumenta la cantidad de poros. Para mezclas como el 5% y con aditivo comercial, se observan muchos poros de forma redonda, mientras que en mezclas como la del 10% se ven poros grandes y amorfos.

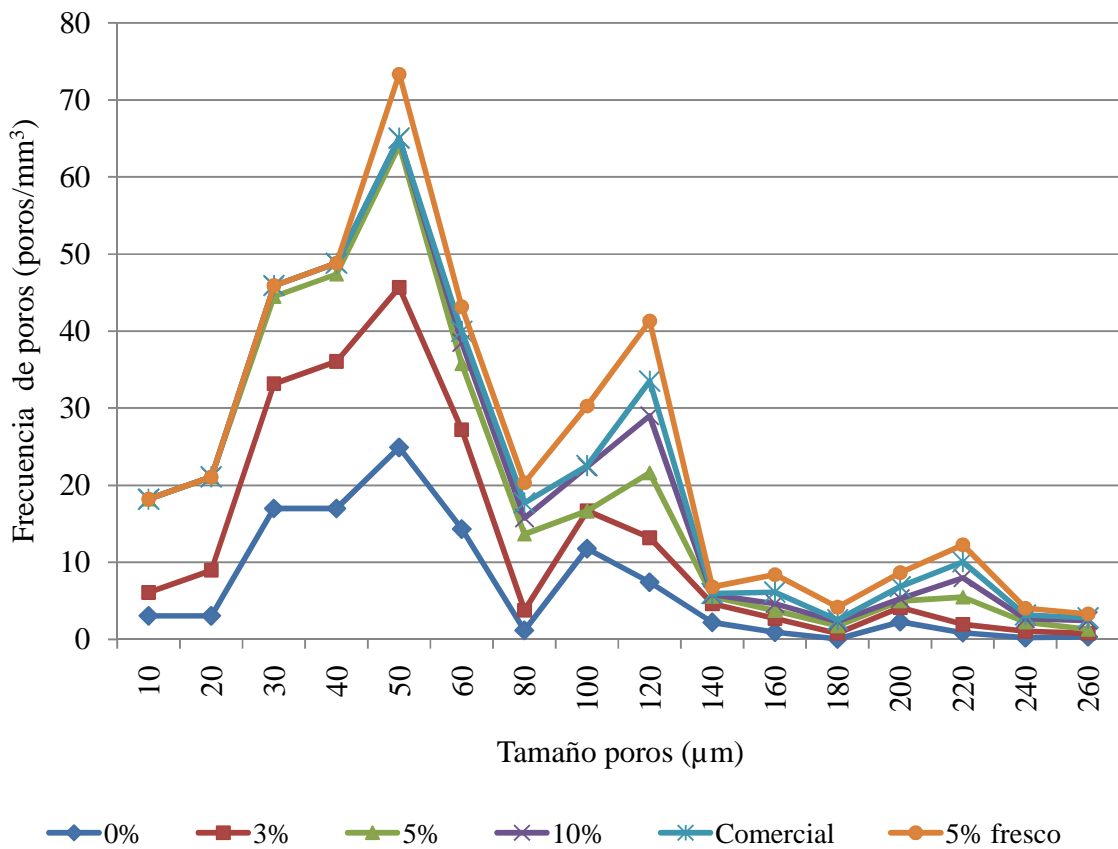
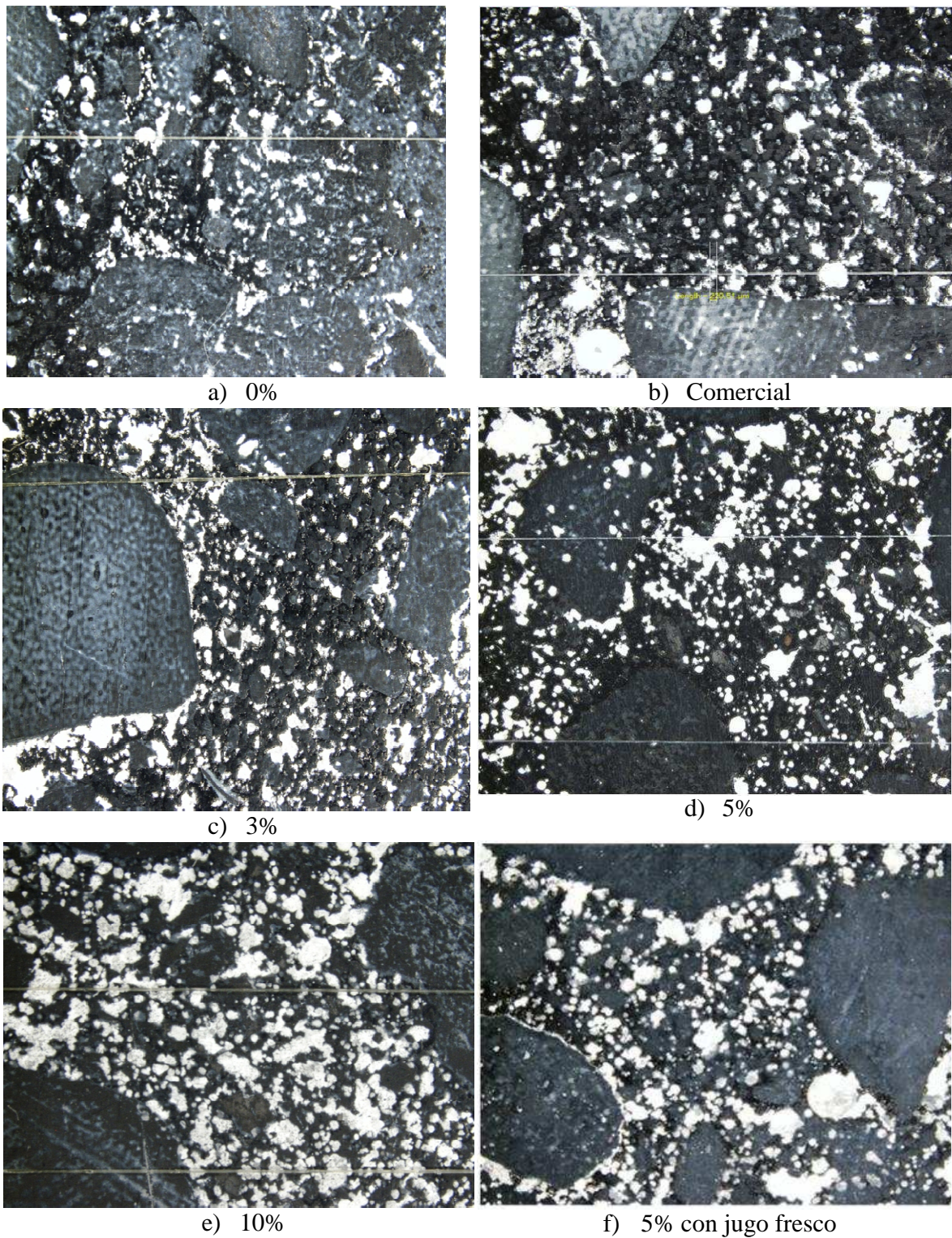


Figura 70 Distribución del número de poros por milímetro cúbico de hormigón



**Figura 71 Fotografías sistema de poros de probetas de hormigón tomadas al microscopio**

#### **4.3.2.1 Resistencia mecánica a la compresión**

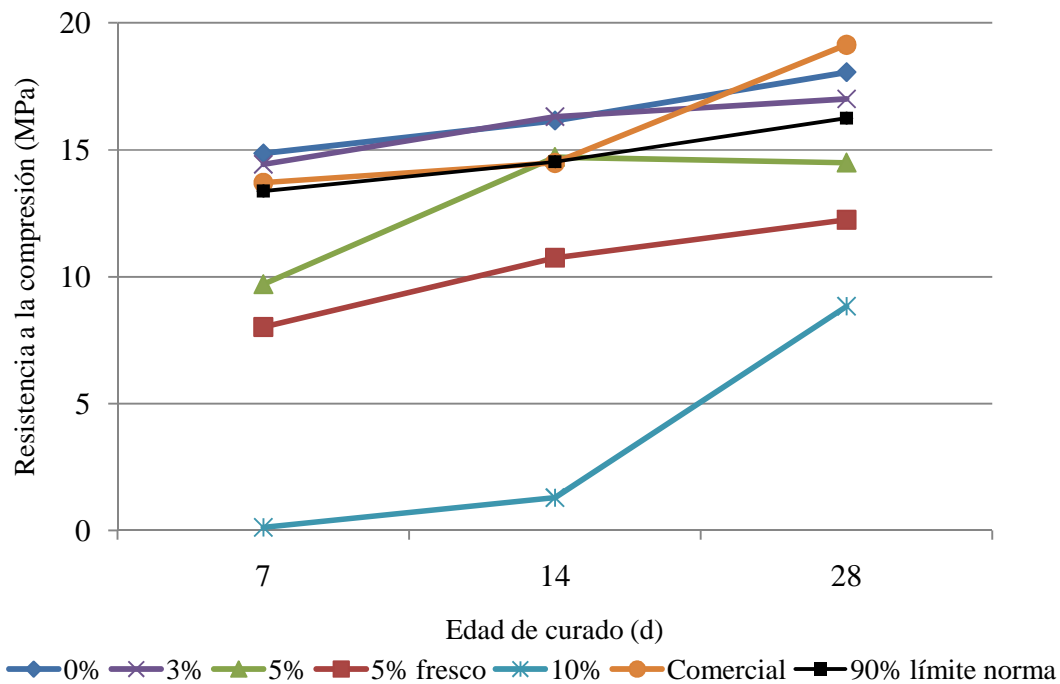
Siempre se considera que la oclusión de aire en el hormigón, conduce a una considerable reducción de la resistencia a la compresión. Sin embargo, por medio de cambios en la dosificación del hormigón y como resultado, o causa de la presencia de burbujas de aire, hormigones conteniendo del 3 al 6% de aire con un contenido constante de cemento dentro del intervalo de 200 a 400 kg/m<sup>3</sup> tienen solamente una débil, si la hay, pérdida de resistencia. (12)

Generalmente la reducción es proporcional a la cantidad de aire ocluido, pero aumenta con mayores cantidades. Por lo tanto, aunque debe proporcionarse protección adecuada, deben evitarse las cantidades excesivas de aire. (2)

Las resistencias mecánicas de los morteros con aditivos aireantes disminuyen por la presencia de burbujas y por la disminución de densidad. La norma europea considera, para el caso de la resistencia a la compresión, que ésta disminución no debe ser menor que el 75% de la resistencia de la muestra control (45) y de acuerdo con la norma ASTM 260 (NTC 3502) no debe ser menor que el 90% (21).

En la Figura 72 se presentan los resultados obtenidos para las mezclas de hormigón elaboradas. Se observa que:

- Para todas las edades, el hormigón con el 3% de jugo, presenta resistencias similares a las obtenidas para la muestra control, inclusive superiores al hormigón con aditivo comercial.
- Con el 10% de jugo no se obtienen resistencias aceptables, esto puede deberse a la alta porosidad, coalescencia de poros y distribución de los mismos.
- El hormigón con 5% de jugo fresco, a pesar de obtener bajas resistencias, presentó una cantidad de aire similar al 10%, sin embargo debido a la mejor y más uniforme distribución de los poros obtiene mayores resistencias.
- La hormigón con el 5% de jugo tiene una resistencia aproximadamente del 15% mayor que la mezcla con 5% de jugo fresco.
- Los valores de la resistencia para las mezclas con el 3% de jugo, supera los límites de la norma, lo que indica la posibilidad de usar el jugo como aditivo aireante.



**Figura 72 Resultados de resistencia a la compresión de hormigones con jugo de fique y aireante comercial, igual relación a/c**

Debido a la importancia de la reducción de agua, para contrarrestar el efecto de la disminución de la resistencia con la oclusión de aire, se realizaron unas mezclas adicionales con el 3, 5 y 10% para determinar la posibilidad de obtener buenas resistencias con el jugo de fique.

Se usaron las dosificaciones descritas en la Tabla 20, a igual relación agua/cemento. Las dosificaciones de los hormigones a igual trabajabilidad se describen en la siguiente tabla.

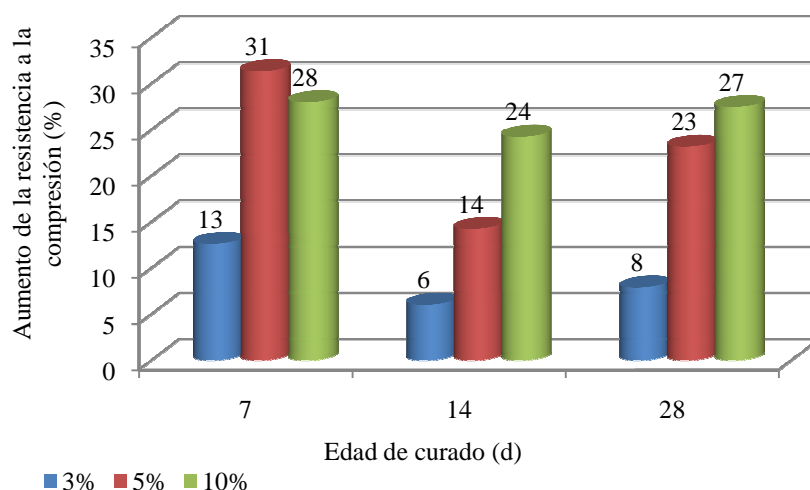
**Tabla 23 Dosificación de muestras de hormigones con jugo de fique a igual asentamiento**

Mezclas	Aditivo			Árido grueso 19,00 mm (kg)	Árido fino (kg)	Cemento tipo I (kg)	Agua (kg)	a/c	Asentamiento (cm)
	Tipo	%	(kg)						
0%	Sin aditivo	0	0	1092	663	343	206	0,6	5,0
3%	Jugo de fique	3	10,29	1092	663	343	206	0,59	5,0
5%	Jugo de fique	5	17,15	1092	663	343	206	0,54	5,0
10%	Jugo de fique	10	34,3	1092	663	343	206	0,53	5,0

En la Tabla 24 y la Figura 73 se detallan tanto las resistencias a la compresión como el aumento en las mismas al reducirse el agua de amasado en los hormigones con jugo de fique. También se detallan los valores límites de resistencia establecidos por norma.

**Tabla 24 Resistencias de probetas de hormigones, a igual asentamiento y relación a/c**

Mezclas	Resistencias (MPa)					
	Igual asentamiento			Igual relación a/c		
	7d	14d	28d	7d	14d	28d
0%	20,60	24,70	26,30	20,60	24,60	26,30
3%	21,40	24,90	27,90	18,70	23,40	25,70
5%	24,90	26,70	31,10	17,10	22,90	23,90
10%	19,30	23,10	26,60	13,90	17,50	19,30
<b>Límite norma 90%</b>	<b>18,54</b>	<b>22,23</b>	<b>23,67</b>	<b>18,54</b>	<b>22,14</b>	<b>23,67</b>



**Figura 73 Aumento de la resistencia de hormigones con la reducción de agua en la mezcla**

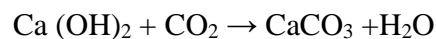
Puede observarse que:

- Los menores aumentos en la resistencia se dan con el 3% de jugo y los mayores con el 10% (excepto a los 7 días de curado).

- Pueden lograrse aumentos en la resistencia a la compresión hasta del 28%, que favorecen el uso del jugo como aditivo dentro de los límites normativos.
- Con el 3% de aditivo los mayores aumentos en la resistencia se dan a tempranas edades.

#### **4.3.2.2 Carbonatación**

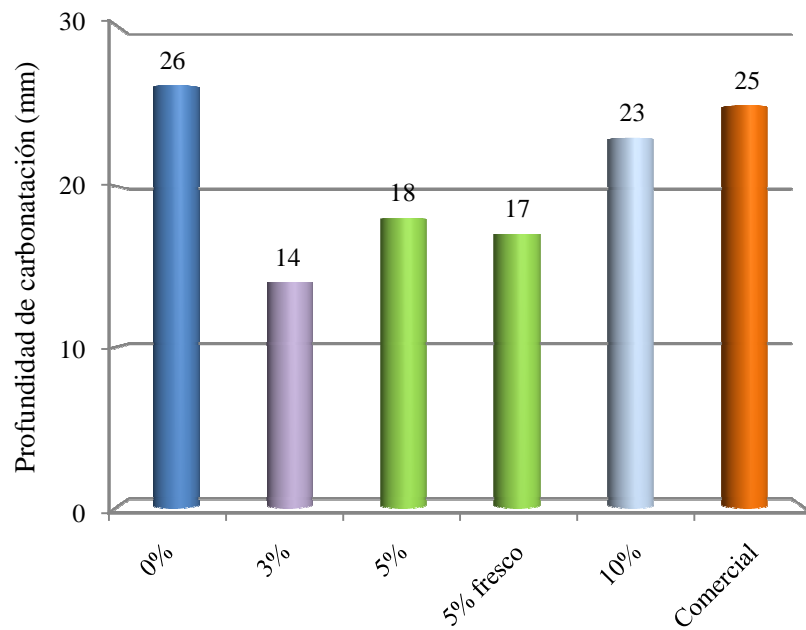
La carbonatación es una acción química que ocurre a consecuencia de la inclusión del CO<sub>2</sub> atmosférico, tanto en medios urbanos como industriales y se ve acelerada en ambientes con humedad relativa moderada, es decir entre el 50 y el 65 %. Generalmente se produce al utilizar relación agua/cemento alta y curado insuficiente. Su reacción envuelve la transformación de la portlandita (CH) en carbonato de calcio: (10)



Se expusieron probetas de hormigón con aditivo comercial y jugo de fique a carbonatación, bajo los procedimientos descritos en el capítulo experimental.

Los resultados se presentan en la Figura 74 y Figura 75, en las cuales puede observarse que:

- Las mayores profundidades de carbonatación la presentan la muestra sin aireantes, con 10% de jugo y aditivo comercial, indicando posiblemente mayores permeabilidades del hormigón que permiten mayor acceso al CO<sub>2</sub>.
- Los hormigones con mayor resistencia a la carbonatación son los que contienen 3% y 5% de jugo, con profundidades de carbonatación entre 14 y 18 mm.
- La menor profundidad de carbonatación se registra en la muestra con 3% de jugo de fique, la cual comparada con la muestra control, impide la carbonatación aproximadamente en un 46%.
- Si tenemos en cuenta que hormigones con una adecuada distribución y tamaño de poros, favorecen la durabilidad, al adicionar 5% de jugo en estado fresco, aunque se obtiene un porcentaje de aire similar a la muestra con 10% de jugo (ver Figura 66), la distribución de poros al parecer es mejor ya que la profundidad de carbonatación disminuye en un 26%.
- El aditivo comercial no proporciona una protección apropiada a la carbonatación, proporcionando profundidades de carbonatación similares a la muestra sin aire ocluido.



**Figura 74 Profundidad de carbonatación de mezclas de hormigón con jugo de fique y aditivo comercial**



**Figura 75 Probetas de hormigón reveladas con fenolftaleína para detección de zonas carbonatada**