

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este capítulo recopila los resultados obtenidos en los ensayos realizados en la tesis que tienen que ver con la caracterización físico química del jugo de fique y el aditivo comercial estudiado y de su influencia en algunas propiedades de morteros y hormigones, especialmente en cuanto a su durabilidad y resistencia.

4.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA

En el numeral 3.1.4 se describieron las características del jugo de fique que se conocen de investigaciones recientes y para la misma procedencia regional del jugo usado en los ensayos.

Para el desarrollo de la investigación se caracterizó principalmente, del jugo, su capacidad espumante y la estabilidad de la espuma, con el fin de relacionarlo con su acción como aireante.

También se midieron características de importancia que era necesario tener en cuenta en algunos cálculos de las mezclas de mortero y hormigón. Estas características son el extracto seco convencional que nos permite definir el contenido de agua presente en el aditivo líquido, la pérdida por calcinación que indica fundamentalmente el porcentaje de materia orgánica que tiene un aditivo con respecto a su masa total y el pH que nos indica su carácter ácido o básico para su interacción en la mezcla.

Se usaron los procedimientos descritos en el numeral 3.2.1 para medir las características mencionadas y los resultados promedio obtenidos se resumen a continuación en la Tabla 15.

Tabla 15 Características físico-químicas del jugo de fique

Característica	Valor
Extracto seco convencional	8,23%
Pérdidas por calcinación	92,90%
pH (muestra diluida)	4,61
pH (muestra pura)	4,54

Si se compara el jugo de fique con el aditivo comercial usado puede notarse que es un líquido de carácter ácido mientras que el AIRTOC-D por ser una resina neutralizada es de carácter básico. También, las altas pérdidas por calcinación resultante, muestra del jugo de fique su alto contenido de materia orgánica al provenir de una planta y el extracto seco obtenido revela la gran cantidad de agua que contiene, tal como se menciona en investigaciones anteriores.

4.1.1 FORMACIÓN DE ESPUMA

Como se mencionó en el numeral 2.6 el jugo de fique contiene un grupo de glicósidos que son los responsables de la formación de espuma abundante y relativamente estable cuando se agitan con agua, disminuyendo la tensión superficial por lo cual se consideran agentes tensoactivos. Estos componentes son las saponinas y sapogeninas. (19)

Por hidrólisis de las sapogeninas se obtienen carbohidratos y una aglicona, llamada genéricamente sapogenina. Esta hidrólisis se presenta por la acción de las bacterias presentes en el jugo, lo cual aumenta el contenido de sapogeninas y disminuye el de saponinas que actúan como tensoactivo. Por ello la fermentación del jugo debe ser evitada. (19)

Debido a esta disminución del carácter tensoactivo del aditivo, se realizaron ensayos con el jugo para determinar su actividad espumante a diferentes edades del jugo desde su obtención en el proceso de fabricación de la cabuya. También se realizaron ensayos con diferentes concentraciones del jugo en la solución, para diferentes proporciones aditivo/agua. La descripción de las condiciones de los ensayos de espumación realizados se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16 Condiciones establecidas para los ensayos de espumación

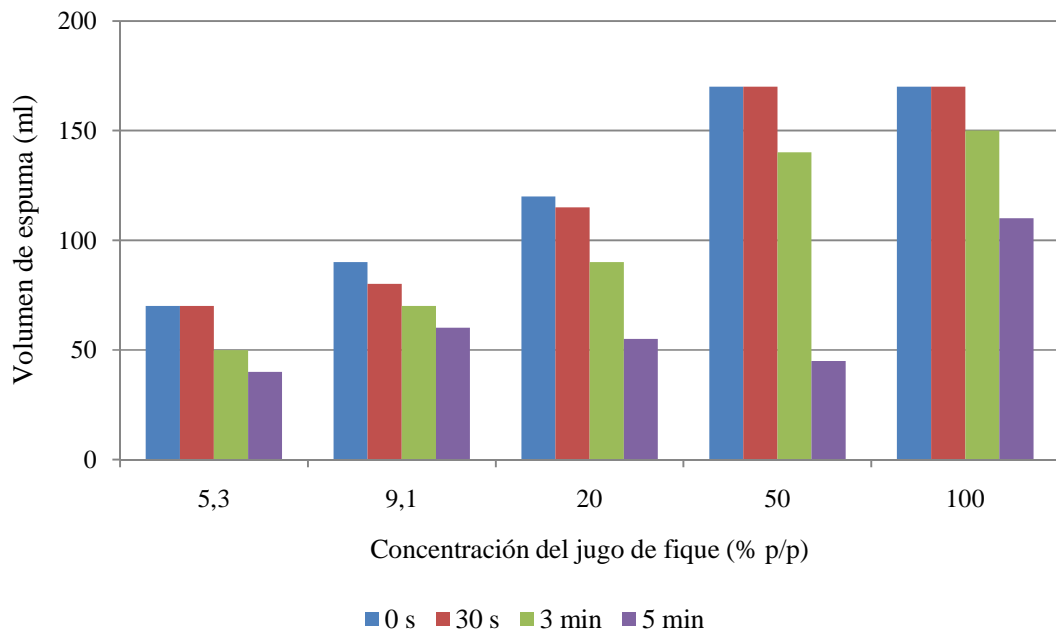
Ensayo	Concentración aditivo (%p/p)	Aditivo			Cemento (g)
		Tipo	Cantidad (g)	Edad (d)	
1	50	Comercial	500	0	0
2	100	Comercial	600	0	0
3	5,3	Jugo de fique	31,8	0	0
4	9,1	Jugo de fique	54,6	0	0
5	20	Jugo de fique	120	0	0

Ensayo	Concentración aditivo (%p/p)	Aditivo			Cemento (g)
		Tipo	Cantidad (g)	Edad (d)	
6	50	Jugo de fique	500	0	0
7	100	Jugo de fique	600	1	0
8	20	Jugo de fique	120	1	0
9	20	Jugo de fique	120	1	60
10	20	Jugo de fique	120	9	0
11	20	Jugo de fique	120	9	60

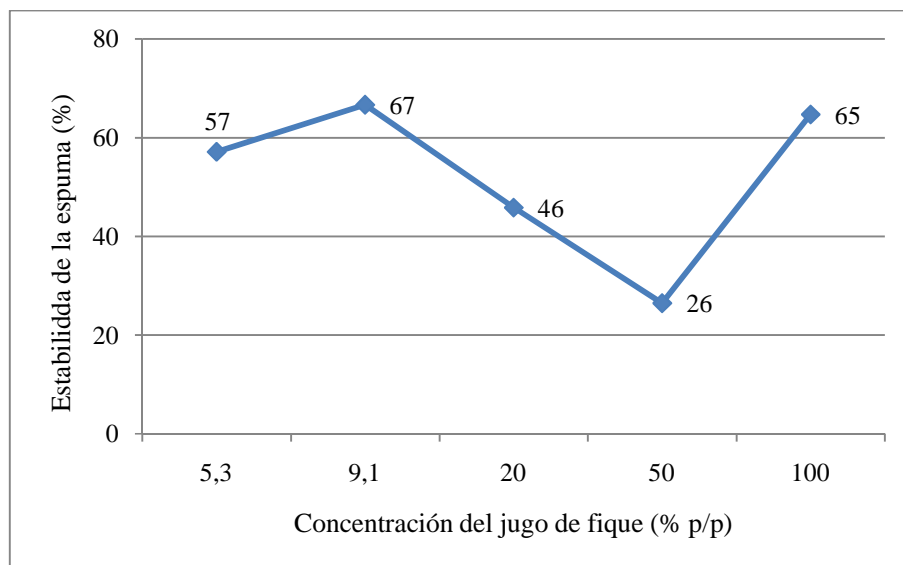
La capacidad espumante que tenga el jugo, así como su estabilidad determina la estructura de poros que se formará en los morteros y hormigones endurecidos. Por esta razón, se buscó determinar el volumen de espuma formada para diferentes concentraciones del jugo de fique en proporciones similares con respecto al agua de mezcla que se propuso para los ensayos en hormigones. El procedimiento del ensayo se describe en el capítulo experimental, en el numeral 3.2.1. La estabilidad se definió como el volumen de espuma formada luego de 5 min en reposo, dividido por el volumen inicial de espuma formada (17).

Los resultados se observan en la Figura 46 y Figura 47, de las cuales puede inferirse que:

- El volumen de espuma formado en la solución aumenta cuando la concentración del jugo se hace mayor. Con una concentración del 20% del jugo el volumen de espuma aumenta hasta en un 70% y con concentraciones superiores al 50% se genera gran volumen de espuma de más del 100% con respecto a la más baja concentración en la solución.
- Las mayores estabilidades de la espuma se dan cuando la concentración del jugo está en 9,1% y el 100%, con notables diferencias en las características de la espuma. Con el jugo sin dilución (100%) las burbujas formadas son de mayor tamaño y tienden en el tiempo a combinarse y formar otras más grandes hasta su degradación (ver Figura 47, c) y d)). Con el 9,1% de concentración las burbujas formadas en la espuma son pequeñas y uniformes.
- A partir del 9% de concentración del jugo se empieza a disminuir la estabilidad de la espuma, pero el volumen inicial va en aumento.



a)



b)

Figura 46 Resultados para la formación y estabilidad de la espuma para varias concentraciones de jugo de fique en la solución, a) Volumen de espuma formada en ml, b) Estabilidad de la espuma formada

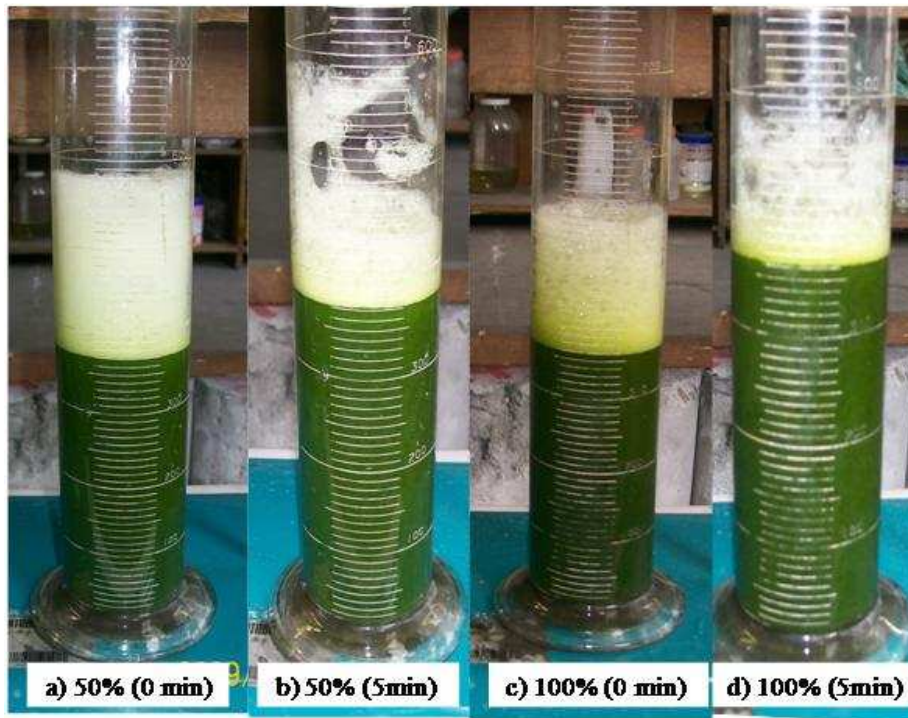


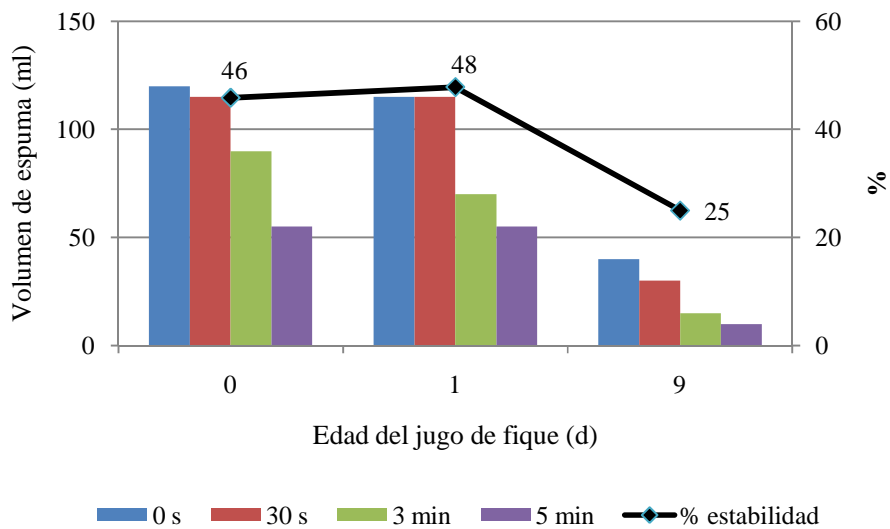
Figura 47 Formación de espuma y estabilidad para varias concentraciones de jugo de fique en la solución, a)Ensayo 6 en 0 min b)Ensayo 6 en 5 min, c)Ensayo 7 en 0 min, d) Ensayo 7 en 5 min

Las moléculas de surfactante en la solución ayudan a incorporar burbujas de aire y estabilizarlas en el concreto fresco. La capacidad espumante de un surfactante depende especialmente de su efectividad para reducir la tensión superficial de la solución, sus características de difusión, propiedades elásticas impartidas a las interfases. Los surfactantes en la fase líquida, además de lograr la adsorción en la fase sólida, son responsables del comportamiento de la espuma. Para dosis altas de aireante existe un fenómeno llamado formación de micela que influye en el límite de reducción de la tensión superficial. Una micela es la agregación de moléculas de surfactante que aumenta por encima de cierta concentración de surfactante (critical micelle concentration, cmc). Las micelas no contribuyen con la reducción de la tensión superficial, lo cual explica en parte las máximas cantidades de la dosis de los aditivos, a partir de la cual no hay incrementos en el aire ocluido. (11)

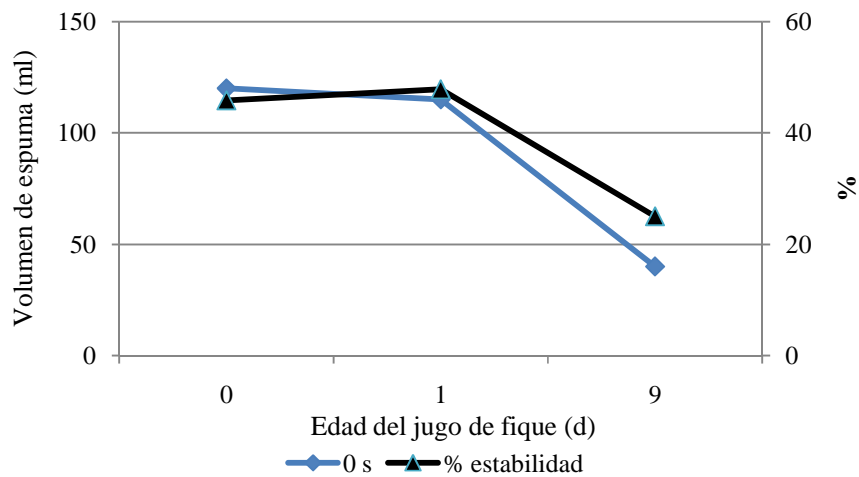
Otro factor importante que afecta la capacidad espumante del jugo de fique es la edad, que corresponde al tiempo después del cual es extraído de la planta para ser usado como aditivo aireante. Los resultados que se encontraron con respecto a éste factor se presentan en la Figura 48.

Puede notarse que el jugo con mayor edad va perdiendo estabilidad en la espuma, así como la formación inicial de la misma, lo cual podría influenciar la cantidad de aire ocluido si se aplicara en mezclas de morteros u hormigones. Esta disminución en la estabilidad puede deberse al inicio de la fermentación que va deteriorando las propiedades surfactantes del aditivo.

El uso del jugo a la edad de 9 días, disminuye en un 82% el volumen de espuma formada y la estabilidad de la misma en un 45%.



a)



b)

Figura 48 Resultados para la formación y estabilidad de la espuma para varias edades del jugo al 20% de concentración, a) Volumen de espuma formada en ml, b) Estabilidad de la espuma formada

Se estudió también las características de la espuma obtenida con un aditivo comercial, cuyos resultados comparativos se presentan en la Figura 49. Puede notarse que con el aditivo comercial la espuma no es estable, mientras que con el jugo de fique la estabilidad supera el 30%. También se aprecia que el volumen de espuma formada con el jugo supera casi en un 60% al aditivo comercial ensayado.

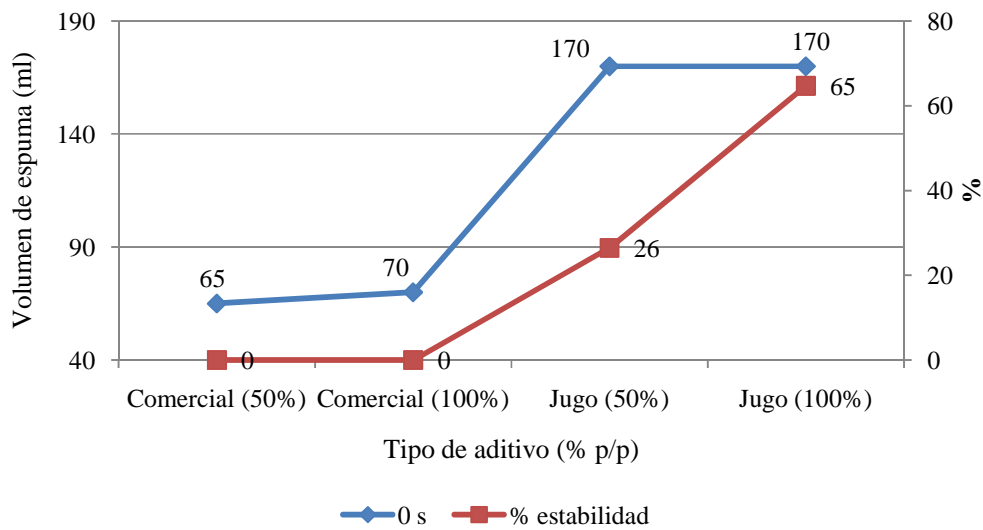


Figura 49 Comparación del volumen de espuma formada y estabilidad para el aditivo comercial y jugo de fique a igual concentración

Dentro de los ensayos de espumación se incluyó el análisis de la influencia de la presencia de cemento en la solución, en el volumen de espuma formada por el jugo y su estabilidad. Se tuvo en cuenta también la edad del jugo para la cual se explicó anteriormente el efecto ocasionado. Los resultados se presentan en la Figura 50 y Figura 51 en las cuales se observa que:

- Con la presencia de cemento en la solución se incrementa el volumen de espuma formada y la estabilidad para diferentes edades del jugo de fique.
- El cemento en la solución incrementa un 20% aproximadamente el volumen de espuma formada y entre un 40 y 60% la estabilidad de la misma.
- El cemento proporciona la formación de burbujas de menor tamaño que cuando se encuentra el jugo de fique solo.

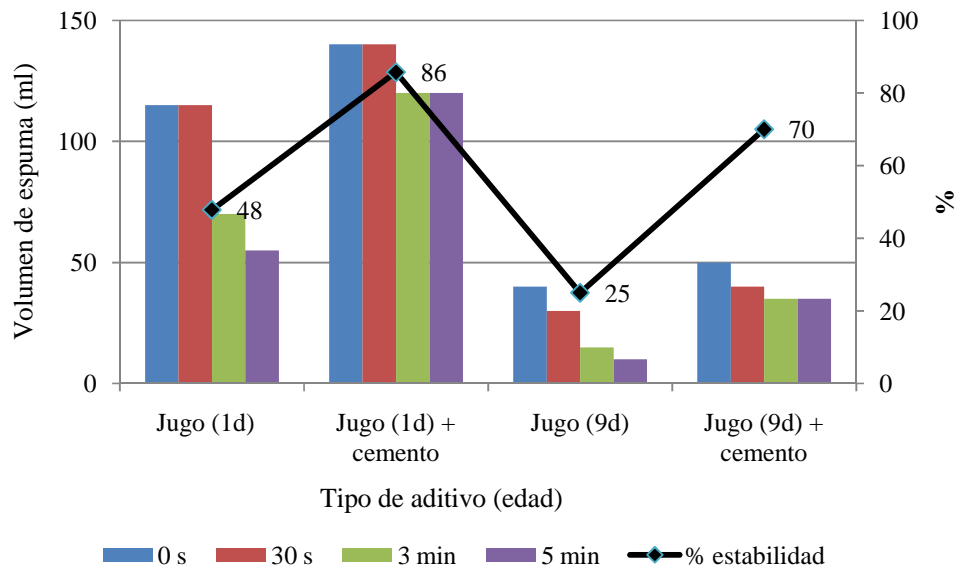


Figura 50 Influencia de la presencia de cemento en la solución espumante a igual concentración del aditivo

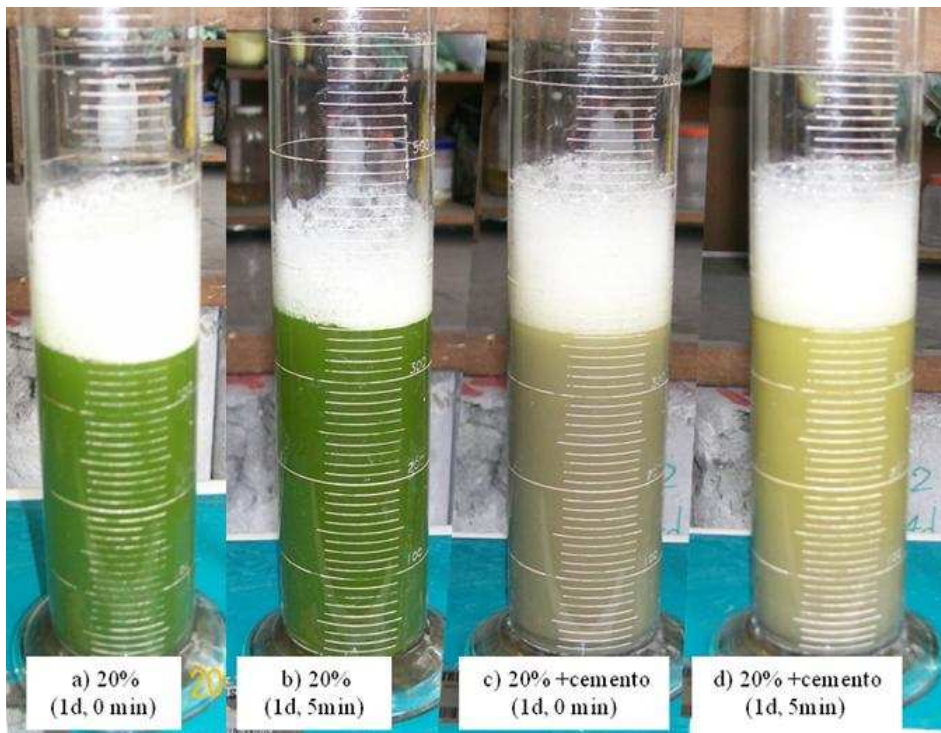


Figura 51 Ensayos de espumación con cemento adicionado para el 20% de concentración del jugo, a)Ensayo 8, 0 min, b)Ensayo 8, 5 min, c)Ensayo 9, 0 min, d) Ensayo 9, 5 min

En la Figura 52 se presenta el comportamiento de la espuma formada al usar un jugo de fique de 9 días de edad al 20% y con la presencia de cemento en la solución. Adicionalmente a los 5 minutos establecidos por la norma para la medición de espuma, se esperó 10 minutos más para investigar que ocurría con la espuma la cual en otros ensayos desaparecía. Se encontró que el cemento en solución continuaba ayudando con la estabilidad, manteniéndose así el volumen de espuma formada, a pesar que la mayor cantidad de partículas ya se han precipitado al fondo de la probeta tal como se puede apreciar.

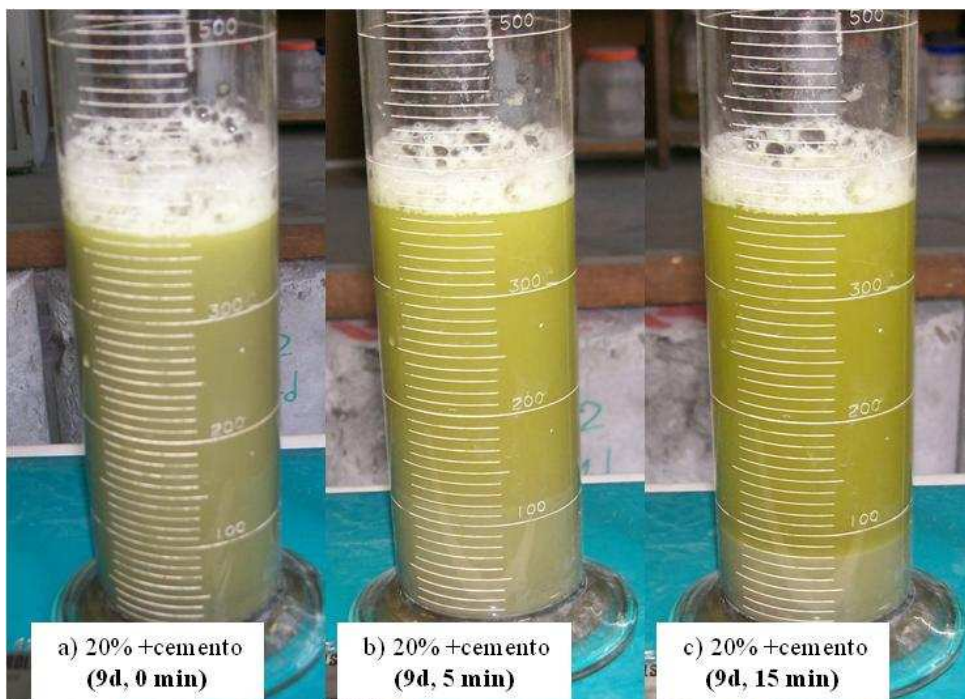


Figura 52 Influencia de la presencia de cemento en la solución espumante a igual concentración del aditivo

En los morteros y hormigones, las propiedades reológicas de la pasta de cemento afecta directamente el sistema de aire ocluido. Adicional a que el surfactante es adsorbido en las partículas de cemento y superficie del agregado, existen también interacciones en la interfase sólido-líquido-aire. La masa de partículas de cemento ayuda a dispersar las burbujas de aire en la mezcla y reduce su tendencia a flotar hacia la superficie (11). La interacción estudiada por algunos investigadores, entre las burbujas de aire y las partículas de cemento se presenta en la Figura 53.

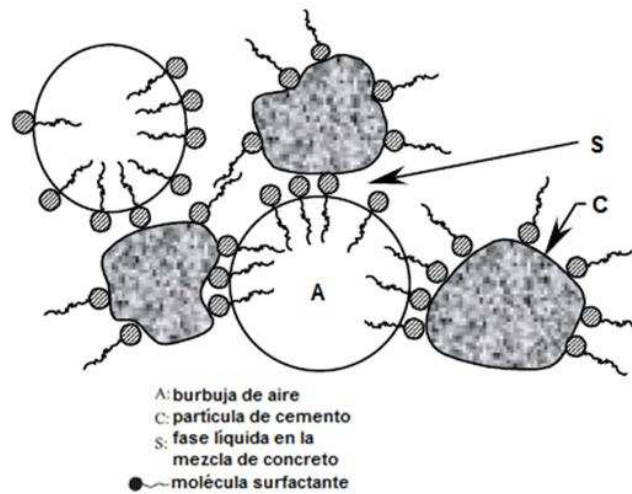


Figura 53 Interacción entre burbujas de aire y partículas de cemento (6)

La concentración del jugo en el agua de amasado, su edad e interacción con las partículas de cemento, juegan un papel importante en la formación de espuma y su estabilidad. Lo anterior se verá reflejado en el sistema de poros que posteriormente pueda formar en morteros y hormigones. La estabilidad de la espuma disminuye con la edad del jugo y con concentraciones mayores del 9%(p/p) en la solución y aumenta con la presencia de cemento.

4.2 MORTEROS DE CEMENTO PORTLAND

Los morteros y hormigones de cemento, en estado fresco, se consideran suspensiones de distintos materiales en forma de partículas que presentan características muy diversas en cuanto a propiedades tales como densidad, tamaño de partícula y composición química. Este conjunto de partículas se encuentra disperso en una disolución de hidróxido de calcio junto con otros componentes, generando un sistema dinámico debido a que, al mezclar el cemento y el agua, se producen una serie de reacciones químicas (principalmente hidratación de silicatos y aluminatos cálcicos), que son responsables del endurecimiento de la pasta de cemento (1). La inclusión de aditivos modifica las cualidades de dicha mezcla.

Algunas modificaciones de importancia investigadas recientemente en morteros, por otros autores, con respecto a aditivos orgánicos provenientes de plantas agaváceas se resaltan a continuación: (4)

- En los tiempos de fraguado e hidratación de la pasta, estos aditivos retrasan los tiempos iniciales y finales de fraguado debido a la presencia de azúcares y producen una disminución considerable de CH. Esta producción es menor con el jugo de fique, indicando que puede tener un mayor efecto retardante que otras plantas agaváceas.
- Aumentan la plasticidad de la mezcla con relaciones a/c constantes.
- Disminuye el contenido de agua hasta en un 12%, conservando la misma consistencia.
- Incrementan la resistencia a la absorción capilar a igual consistencia.
- Reduce la densidad con respecto a la muestra control debido a la inclusión de aire.
- Disminuye la resistencia a la compresión a igual relación a/c y a igual consistencia en todas las edades.

Los ensayos en morteros para la presente investigación se encaminaron a analizar la influencia del jugo de fique en la resistencia y la durabilidad en cuanto al ataque por sulfatos. El análisis se realizó comparativamente entre morteros con contenido de aditivo comercial o jugo de fique y un mortero de referencia sin aditivo (mortero control). Se consideraron porcentajes de jugo de fique de 0,5, 1 y 3% ya que con mayores cantidades pudo corroborarse lo mencionado en el párrafo anterior sobre el alto efecto retardante del fraguado del jugo que limitaba el conformado de la mezcla. El aditivo comercial se usó de acuerdo con las recomendaciones técnicas del fabricante.

A continuación se describen los resultados de los ensayos realizados en morteros. El procedimiento realizado de acuerdo con las normas técnicas se describió en el numeral 3.2.2.

4.2.1 FLUIDEZ

Al igual que en el hormigón, la manejabilidad es una medida de la facilidad de colocación de la mezcla; en este caso las unidades de mampostería o revestimientos. La manejabilidad está relacionada con la consistencia, la cual se refiere al estado de fluidez del mortero, es decir, que tan seca o fluida es la mezcla, cuando se encuentra en estado plástico. (4)

Se realizaron dos tipos de ensayos, unos con mezclas a igual relación a/c para determinar y confirmar la influencia del jugo de fique en la consistencia de los morteros, y otras mezclas a igual consistencia para identificar la posibilidad de reducción de agua.

Se determinó la consistencia de la muestra control con una relación a/c de 0,485, se midieron las consistencias de las mezclas con adición de jugo de fique y aireante comercial sin variar la relación a/c. Para ello se consideró un contenido de agua promedio para el licor de fique del 85%, teniendo en cuenta los ensayos realizados por otros autores y en la presente investigación (4) (19). Por otra parte, y teniendo el dato de la consistencia de la muestra control, se hicieron tanteos sobre muestras con distintos porcentajes de aditivo, con distintas cantidades de agua, para obtener aproximadamente ese mismo valor de consistencia (160 ± 10 mm). Los procedimientos establecidos técnicamente para la realización de estos ensayos se describieron en el numeral 3.2.2 del capítulo experimental.

Las dosificaciones para los ensayos mencionados se presentan en la Tabla 17 y la Tabla 18.

Tabla 17 Dosificación de muestras de mortero con jugo de fique y aditivo aireante comercial, igual relación a/c

Mezclas		Cemento (g)	Arena (g)	Aditivo (g)	Agua (g)			a/c	Fluidez (%)
Tipo aditivo	%				Amasado	Aditivo	Total		
Sin aditivo	0	1350	3712,5	0,0	654,8	0	654,8	0,485	88
Comercial	0,5	1350	3712,5	6,8	654,8	5,8	654,8	0,485	101
Jugo de fique	0,5	1350	3712,5	6,8	649,0	5,8	654,8	0,485	92
Jugo de fique	1	1350	3712,5	13,5	643,3	11,5	654,8	0,485	95
Jugo de fique	3	1350	3712,5	40,5	620,4	34,4	654,8	0,485	108

Tabla 18 Dosificación de muestras de mortero con jugo de fique y aditivo aireante comercial, igual asentamiento

Mezclas		Cemento (g)	Arena (g)	Aditivo (g)	Agua (g)			a/c	Fluidez (%)
Tipo aditivo	%				Amasado	Aditivo	Total		
Sin aditivo	0	500	1375	0	242,5	0	242,5	0,485	166
Comercial	0,5	500	1375	2,5	242,5	0	242,5	0,485	204
Jugo de fique	0,5	500	1375	2,5	230,0	2,12	232,1	0,464	176
Jugo de fique	1	500	1375	5,0	220,0	4,25	224,5	0,449	176
Jugo de fique	3	500	1375	15,0	176,0	12,75	188,7	0,377	157

Para la Figura 54 se pueden hacer las siguientes observaciones:

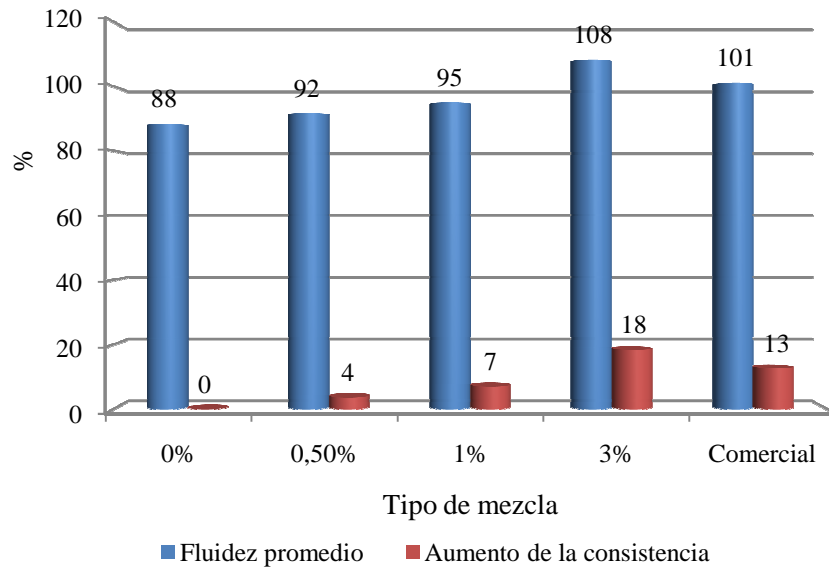
- Con una relación a/c constante de 0,485, tanto el mortero con licor de fique como el aditivo comercial aumentan la consistencia de la muestra con respecto a la muestra control. Con el jugo de fique se logra un aumento de la consistencia hasta del 18 % con 3% de aditivo en la mezcla y con el aireante comercial se aumenta un 13% aproximadamente.
- Para conseguir la misma consistencia de la muestra control, puede notarse como la adición de jugo de fique reduce la cantidad de agua de amasado entre un 5 y un 27% a medida que se aumenta el porcentaje de jugo en la mezcla de mortero.
- Las diferencias entre las relaciones a/c obtenidas entre la muestra control y el máximo porcentaje de jugo adicionado en la mezcla es importante, va de 0,49 a 0,38 para lograr consistencias similares.

Los resultados obtenidos de la reducción de agua proporcionada por el jugo de fique, concuerda con lo encontrado por otros autores que concluyen que se puede lograr una disminución del contenido de agua hasta entre el 5 y el 15%, conservando la misma consistencia. (4) (12)

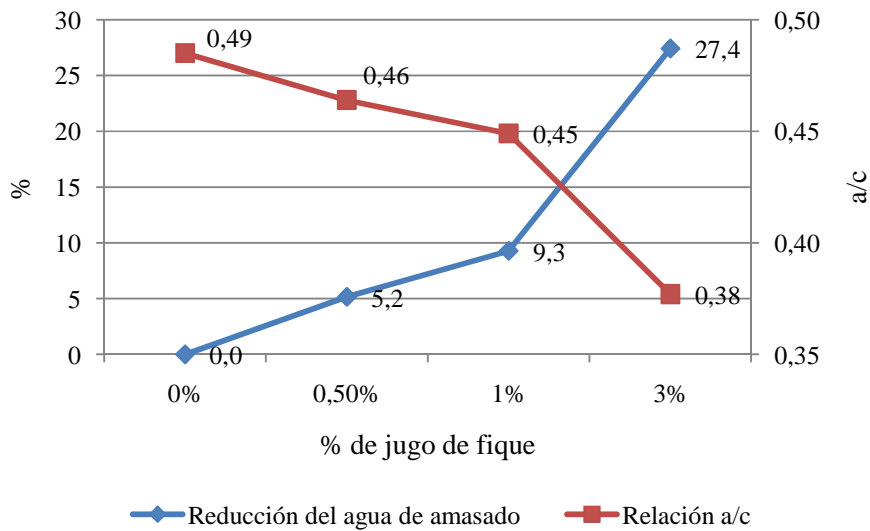
En algunas investigaciones se ha explicado el efecto de aditivos orgánicos que contienen azúcares. El azúcar actúa principalmente como retardante pero también tiene un efecto reductor de agua en el concreto ya que muestra incrementos en la trabajabilidad atribuidos al azúcar que actúa como un agente activo en la superficie. Se han reportado disminuciones del 4 al 5% del agua para dosis de azúcar del 0,03 y 0,06% respectivamente. (15)

Para el jugo de fique, se conocen concentraciones de azúcares mayores a las mencionadas en estos estudios (ver Tabla 3), lo cual podría explicar las altas reducciones de agua, unido con el efecto lubricante que proporcionan las burbujas de aire formadas por el aditivo.

Esta reducción de agua beneficia el uso del jugo de fique como aireante, ya que la disminución de la resistencia debido a la porosidad, puede verse compensada por la disminución de la relación agua/cemento.



a) Valor y aumento de la fluidez. Relación a/c 0,485



b) Reducción del agua de amasado y efecto en la relación a/c

Figura 54 Gráficos de consistencia en morteros con jugo de fique y aireante comercial

4.2.2 RESISTENCIAS MECÁNICAS

Las resistencias mecánicas de los morteros con aditivos aireantes disminuyen por la presencia de burbujas y por la disminución de la densidad.

Se estudió el comportamiento a flexión y compresión, de los morteros fabricados con jugo de fique y aireante comercial. Para las mezclas ensayadas a flexión se usó una relación a/c constante cuya dosificación se describió en la Tabla 17; para las ensayadas a compresión, se usaron dosificaciones de mezclas tanto a igual relación a/c (Tabla 17) como a igual consistencia (Tabla 18).

Los resultados se describen a continuación para las mezclas ensayadas a diferentes edades de curado (7, 14 y 28 días).

4.2.2.1 Resistencia a la flexión

De acuerdo con algunos autores, la resistencia a la flexión no es afectada adversamente o al menos existe una disminución baja con respecto a mezclas sin aire ocluido. (12)

En la Figura 55 se muestran los resultados obtenidos para los ensayos de flexión en probetas de mortero. Las observaciones son las siguientes:

- La resistencia a la flexión con jugo de fique y aireante comercial con relación a/c constante es menor que la muestra control en todas las edades. Para los 28 días de curado, la disminución para las muestras con 0,5 y 1% de jugo y aditivo comercial son muy similares, de aproximadamente el 20%.
- La mayor disminución de la resistencia a la flexión la presentan los morteros con 3% de jugo de fique, de aproximadamente el 40% a los 28 días.
- El aditivo comercial, dosificado de acuerdo con el proveedor al 0,5%, tuvo un comportamiento prácticamente igual a los morteros con jugo de fique a la misma dosificación.
- Los resultados de las resistencias a la flexión son consistentes con la disminución de la densidad tal como se muestra en la Figura 57. Presentan un comportamiento directamente proporcional.

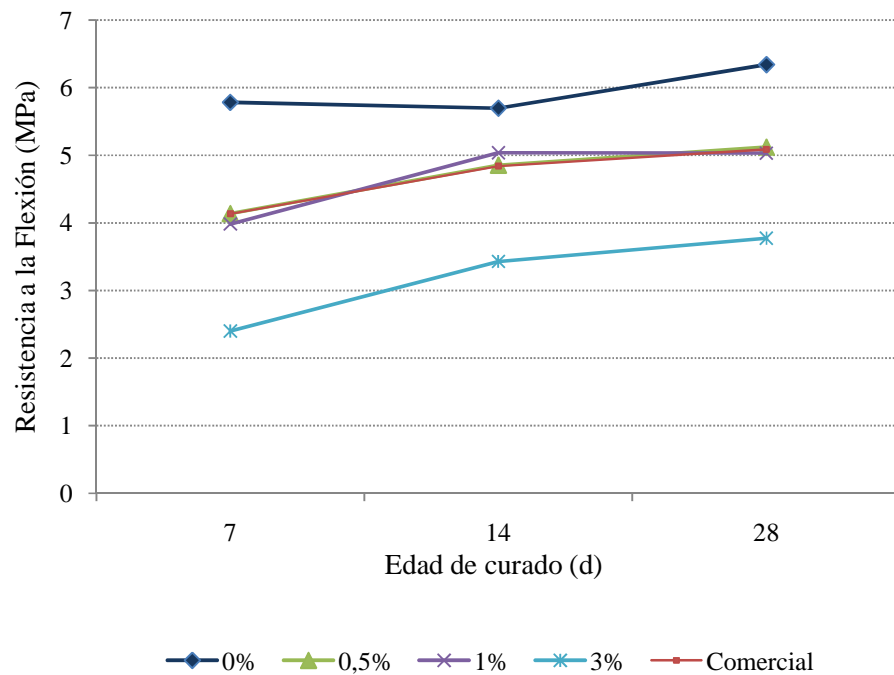


Figura 55 Resistencias a la flexión para las mezclas de morteros a igual relación a/c

4.2.2.1 Resistencia a la compresión

El jugo de fique logra disminuir el agua como se describió anteriormente, pudiendo incrementar las resistencias. Esto se quiso verificar realizando los ensayos de compresión con igual relación a/c y comparándolos con mezclas a igual asentamiento.

Esta disminución puede incrementar las resistencias tardías hasta 25%, o más, con el mismo contenido de cemento en la mezcla. Generalmente se logran incrementos en la resistencia a la flexión de concreto con un reductor de agua, pero no son proporcionalmente tan grandes como los obtenidos en la resistencia a la compresión. (2)

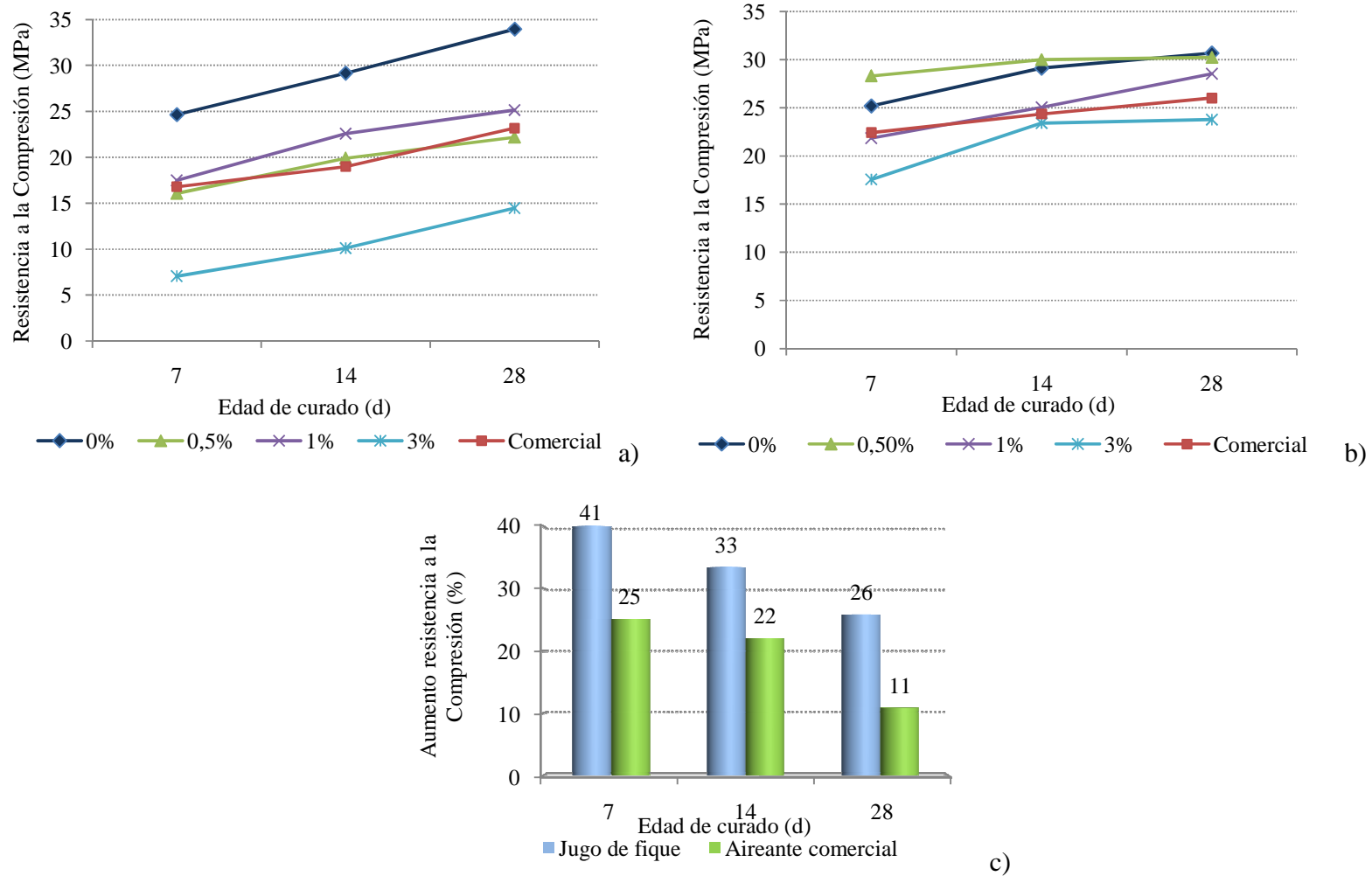


Figura 56 Resistencias a la compresión para las mezclas de morteros, a) a igual relación a/c, b) a igual consistencia, c) Aumento de la resistencia con la reducción de agua

En la Figura 56 se graficaron los resultados para resistencia a la compresión obtenidos tanto con relación a/c constante (Figura 56 a) como a igual consistencia (Figura 56 b) y el cambio obtenido cuando se reduce el agua (Figura 56 c). Las observaciones son las siguientes:

- Se presenta una tendencia similar de las disminuciones en la resistencia a la flexión.
- La resistencia a la compresión con jugo de fique y aireante comercial con relación a/c constante (Figura 56 a) es menor que la muestra control en todas las edades. Para los 28 días de curado, la disminución para las muestras con 0,5 y 1% de jugo y aditivo comercial son similares, entre el 30 y 35%. La mayor disminución la presentan los morteros con 3% de jugo de fique, de aproximadamente el 57% a la misma edad.
- Las resistencias a la compresión cuando los morteros se fabricaron a igual consistencia, evidencian en general una menor disminución en la misma con respecto a la muestra control en todas las edades, en especial a los 28 días de curado. La muestra que presenta un inusual aumento es la de 0,5% de jugo de fique que presenta resistencias superiores a la muestra control a los 7 días de curado y casi iguales hasta los 28 días (Figura 56 b).
- La muestra con 1% de jugo de fique y aditivo comercial, muestran a igual consistencia resistencias a la compresión similares con una diferencia del 9% a los 28 días donde la resistencia de las probetas con jugo se hace mayor (Figura 56 b).
- Las resistencias a la compresión con el 3% de jugo de fique a igual consistencia continúan siendo las más bajas con respecto a la muestra control, con una disminución a los 28 días de curado del 22% (Figura 56 b).
- En general puede observarse que al reducirse el agua con el jugo de fique adicionado, se aumentan las resistencias a la compresión en todas las edades. A los 7 días se obtienen los mayores aumentos con un promedio del 41% para todas las mezclas (Figura 56 c), a los 14 días del 33% y a los 28 días del 26%. Estos aumentos en las resistencias fueron mayores que los alcanzados con el aireante comercial.

Las resistencias mecánicas obtenidas están de acuerdo con los resultados de la densidad, es decir, para las menores densidades se obtuvieron las menores resistencias mecánicas debido al mayor contenido de poros.

En la Figura 57 puede observarse que la mayor disminución de la densidad con respecto a la muestra control, se presentó con el 3% de jugo de fique, de aproximadamente un 16%. Las muestras que presentaron densidades similares (0,5%; 1% y comercial), obtuvieron resultados similares en las resistencias mecánicas.

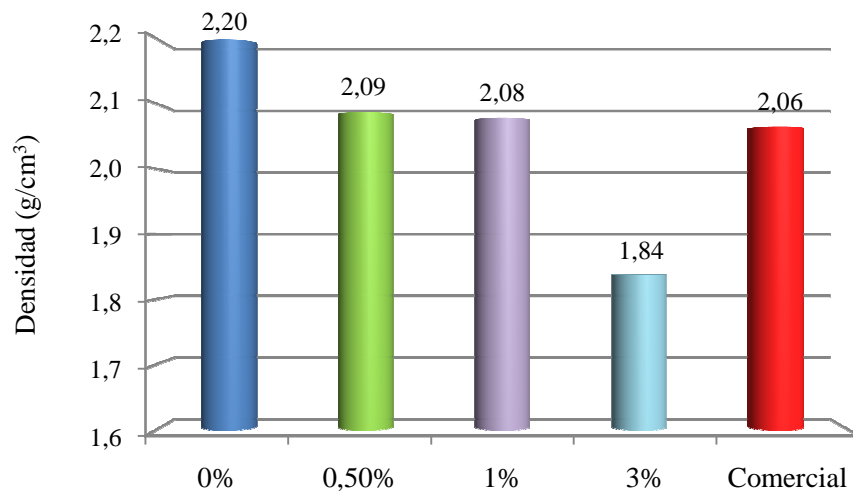


Figura 57 Densidad de morteros con jugo de fique y aditivo comercial

4.2.3 ABSORCIÓN CAPILAR

El objetivo de los aditivos ocluidores de aire es mejorar la durabilidad de las obras construidas en hormigón. Las burbujas de aire microscópicas incorporadas uniformemente, hacen que la matriz de cemento no pueda llenarse con agua bajo condiciones atmosféricas y permiten crear espacio suficiente para la presión expansiva que se genera al congelarse el agua en los poros capilares. El aire ocluido interrumpe la succión capilar (absorción de agua), disminuyendo la permeabilidad del hormigón, mejorando su resistencia a agentes químicos exteriores como los sulfatos, carbonatos, cloruros, etc. (30)

El movimiento del agua al interior del hormigón, no sólo es función de la porosidad del material, sino que depende también del diámetro de los poros, su distribución y continuidad. La porosidad total representa el contenido total de poros existentes, los cuales no necesariamente deben estar interconectados entre si y por tanto no siempre permiten el paso de un fluido. La porosidad puede clasificarse como abierta y cerrada. (10)

Para determinar la absorción capilar, la porosidad total y la densidad se usaron probetas con 7 días de curado con las dosificaciones que se describieron en la Tabla 17, a igual relación a/c, usando el procedimiento descrito en el numeral 3.2.2.4.

Para los ensayos de absorción capilar y ataque por sulfatos, se elaboraron adicionalmente probetas de morteros con el 5% de jugo de fique. Esta cantidad adicionada no se realizó

para las pruebas de resistencias mecánicas ya que se dificultó el fallado de las probetas a edades tempranas como los 7 días debido a los retrasos en el fraguado y los altos contenidos de aire obtenidos que ocasionan un difícil manejo de las probetas para ese tipo de pruebas. Esta acción del jugo de fique como retardador del fraguado ya se conocía de investigaciones previas.

El resumen de los resultados puede observarse en la Tabla 19 y en la Figura 58 y Figura 59.

Tabla 19 Resultados de succión capilar para morteros con jugo de fique y aditivo comercial

Mezclas		Coeficiente de absorción (Kg/m ² .s ^{1/2})	Porosidad total (%)	Densidad (g/cm ³)
Tipo aditivo	%			
Sin aditivo	0	0,0275	9,02	2,37
Comercial	0,5	0,0222	8,37	2,27
Jugo de fique	0,5	0,0234	9,35	2,31
Jugo de fique	1	0,0324	9,93	2,14
Jugo de fique	3	0,0387	12,18	1,81
Jugo de fique	5	0,0437	12,89	1,78

Se observa que:

- La absorción de agua aumenta cuando se incrementa el porcentaje de jugo de fique adicionado en la mezcla debido a los poros que se forman. La cantidad de poros son mayores con la adición del 5% de jugo, y la menor porosidad se obtiene adicionando 0,5% de aditivo (ver Figura 58).
- Los morteros sin aditivos absorben más cantidad de agua que los que fueron adicionados con 0.5% de ambos aditivos. Esto podría explicarse por la mayor cantidad de poros de aire que se forma dejando menor espacio para la formación de poros capilares y disminuyendo la absorción (Figura 58).
- Las mayores absorciones de agua se dan para las muestras con 3 y 5% de jugo de fique, las cuales a su vez muestran un gran aumento de la porosidad con respecto a la muestra patrón del 35 y el 43% respectivamente. Esto indica que los poros formados por el aditivo podrían empezar a generar una porosidad abierta que facilita el movimiento del agua al interior (ver Figura 58).
- La menor porosidad la presentan los morteros con aditivo comercial, sin embargo, muestra una menor absorción de agua que la muestra patrón y que la mezcla con el 0,5% de jugo. Esto podría indicar que el tipo de porosidad formada por el aditivo

comercial es cerrada y hace que la permeabilidad sea menor, disminuyendo a su vez la absorción capilar.

- A partir del 1% de jugo adicionado en la mezcla el coeficiente de absorción aumenta en un 18%, pero la cantidad y distribución de los poros al parecer cambia notablemente a partir del 3% de jugo donde aumenta la absorción, la porosidad y la densidad. Con estos porcentajes se obtiene mayor cantidad de poros pero intercomunicados que permiten la absorción capilar del agua (ver Tabla 19).
- La densidad disminuye con la adición de mayores porcentajes de jugo de fique a medida que aumenta la porosidad total (representada por poros capilares y poros de aire ocluido).

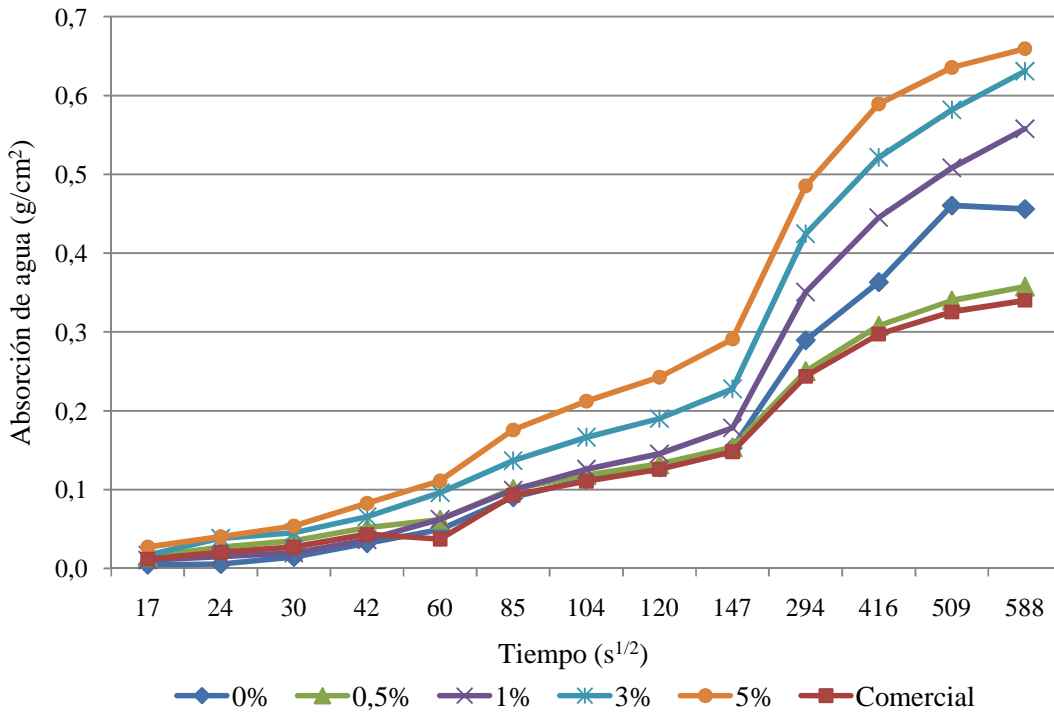


Figura 58 Absorción capilar en morteros con jugo de fique y aditivo comercial

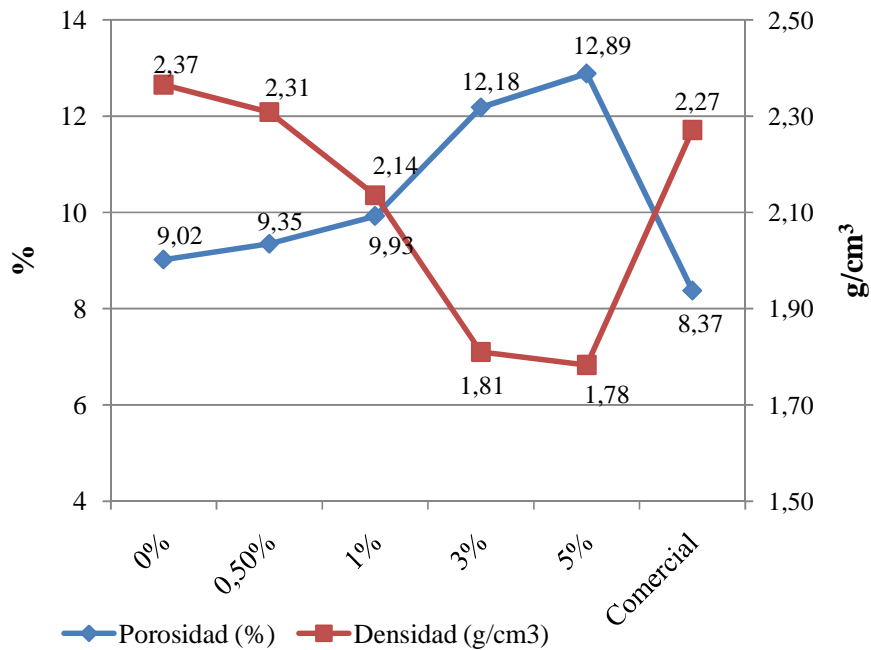


Figura 59 Porosidad y densidad de morteros con jugo de fique y aditivo comercial

4.2.4 ATAQUE POR SULFATOS

El ataque por sulfatos al hormigón se presenta por:

- La reacción química del hidróxido de calcio con el sulfato, que produce sulfato de calcio (CaSO_4).
- La combinación del yeso presente en el cemento, con el aluminato de calcio hidratado, forman sulfoaluminato de calcio ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) (etringita).

Estas dos reacciones producen compuestos expansivos que generan un aumento en el volumen del sólido de las estructuras, ablandamiento y rupturas del hormigón por introducir en él tensiones internas (10).

Algunos estudios han sugerido el comportamiento de morteros en sulfato de sodio, donde la expansión se presenta en dos etapas (Figura 60). En la primera etapa ocurre una pequeña expansión, seguida por la segunda etapa donde se da un rápido incremento de la expansión. Estudios microestructurales sugieren que esta segunda etapa corresponde a la aparición de

grietas en la capa inalterada del mortero, donde a partir de este punto, la expansión continua de manera casi constante hasta el completo deterioro de la muestra. (42)

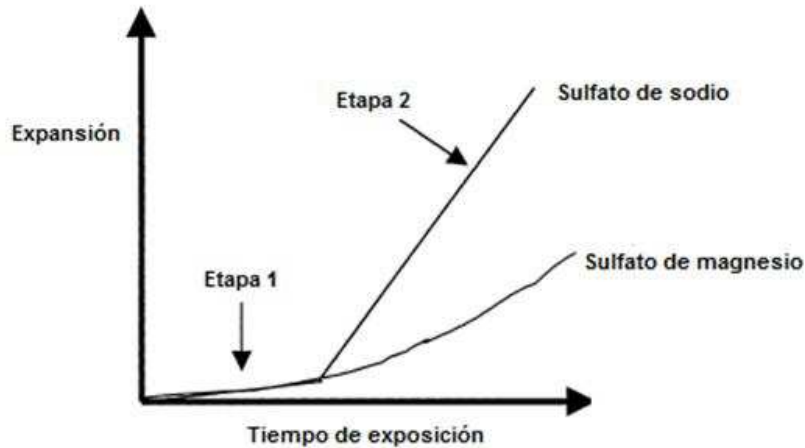


Figura 60 Comportamiento típico de morteros de cemento portland expuestos a diferentes soluciones de sulfato (42)

Los resultados obtenidos para las probetas sometidas a sulfato de sodio en la presente investigación siguen claramente este patrón de comportamiento.

En la Figura 62 se presenta el cambio de longitud de los morteros elaborados, en presencia del sulfato de sodio. Puede observarse que:

- Se presentan en general expansiones altas para los morteros con jugo de fique hasta del 3%.
- Para todas las muestras la expansión empieza a ser significativa a partir de los 28 días de exposición a los sulfatos y la diferencia entre ellas se observa principalmente a partir de los 56 días. Se nota claramente el inicio de la etapa 2 descrita anteriormente para ataque con sulfato de sodio.
- Puede observarse que con el 3% de adición de jugo de fique existe un mayor ataque de sulfatos evidenciada en el porcentaje de expansión, seguidas por las muestras con el 1% y el 0% respectivamente.
- Con la adición de 0,5% de jugo, se presentan menores expansiones que cuando la mezcla no posee adición y observando los resultados para la absorción de agua, puede notarse resultados similares para las muestras de 0,5% y la control, lo que podría indicar la formación de microporos que disminuyen la permeabilidad por la eliminación de la capilaridad continua. Por lo tanto se mejora la durabilidad (10).

- Las probetas ocluidas con porcentajes de 0,5% de jugo de fique y de aditivo comercial se encuentran en rangos inferiores, presentan las menores expansiones en el tiempo de exposición con respecto a las demás muestras.
- La muestra con la mayor adición de jugo de fique de 5% en la mezcla, se esperaría que tuviera expansiones mayores a las de las demás, pero por el contrario, presenta una expansión similar a las muestras sin aditivo. Esto podría deberse a que algunos de los procesos relacionados con los sulfatos pueden dañar al hormigón incluso sin expansión y puede sufrir ablandamiento de la matriz de la pasta o un aumento de su porosidad global (43). Lo anterior también puede notarse en el aspecto de las probetas al final de la exposición, ya que presentaron un significativo deterioro (ver Figura 61)

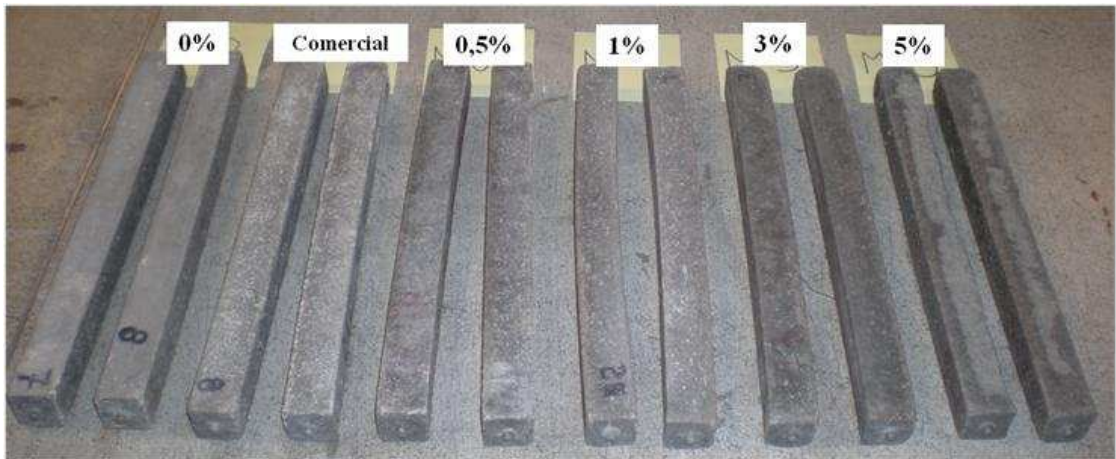


Figura 61 Probetas después de la exposición a la solución de sulfato de sodio

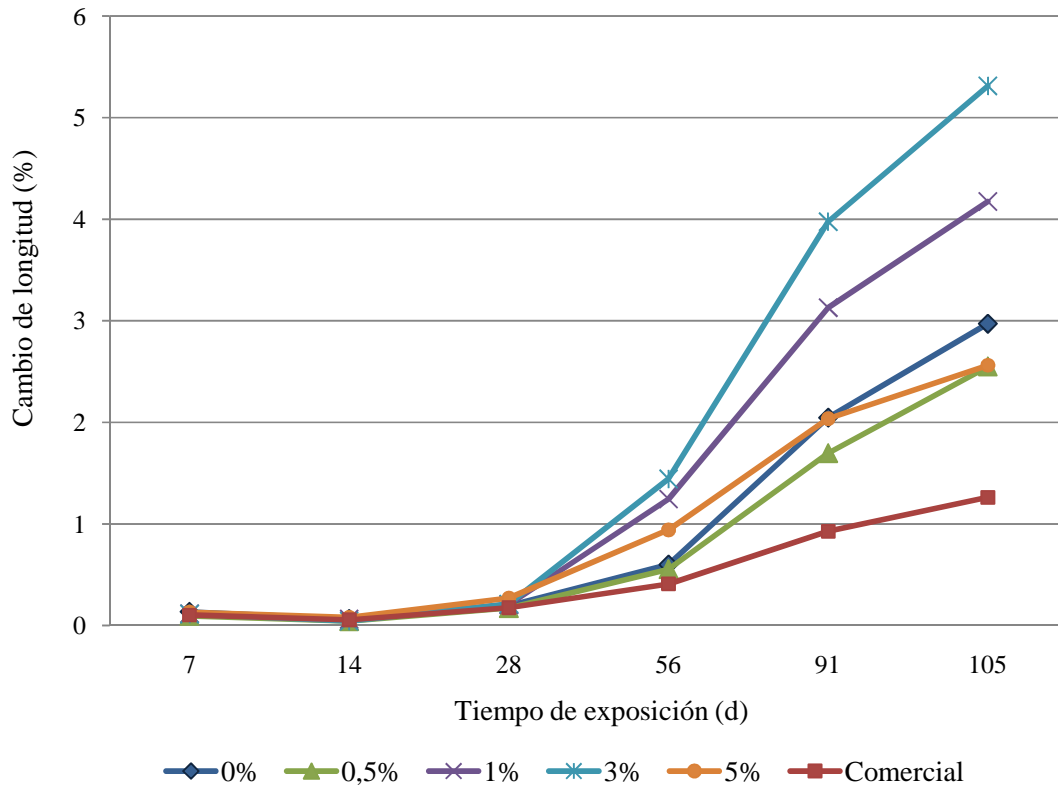


Figura 62 Cambio de longitud de morteros expuesto a una solución de sulfato de sodio

En las probetas, se observaron deformaciones, principalmente de la muestras sin aditivo y con el 1% de jugo. En las de 5% de aditivo presentaron poros de gran tamaño en la superficie y posiblemente en el interior, desde el inicio de la inmersión, que pudieron ocasionar el rápido deterioro de esta mezcla al ser atacadas

En cuanto al cambio de peso de las probetas cuyos resultados se presentan en la Figura 63, puede notarse que:

- Existen mayores cambios de peso con mayor tiempo de exposición, esto debido a la formación de los nuevos compuestos expansivos.
- Ocurren menores cambios de peso en las muestras con 0,5 y 1% de jugo de fique con respecto a la muestra control tanto a 51 como a 96 días de exposición.
- Los mayores cambios de peso de hasta el 2,4% los presentan las muestras con el 5% de aditivo, posiblemente a la gran cantidad de poros susceptibles de ser ocupados por la solución de sulfatos.

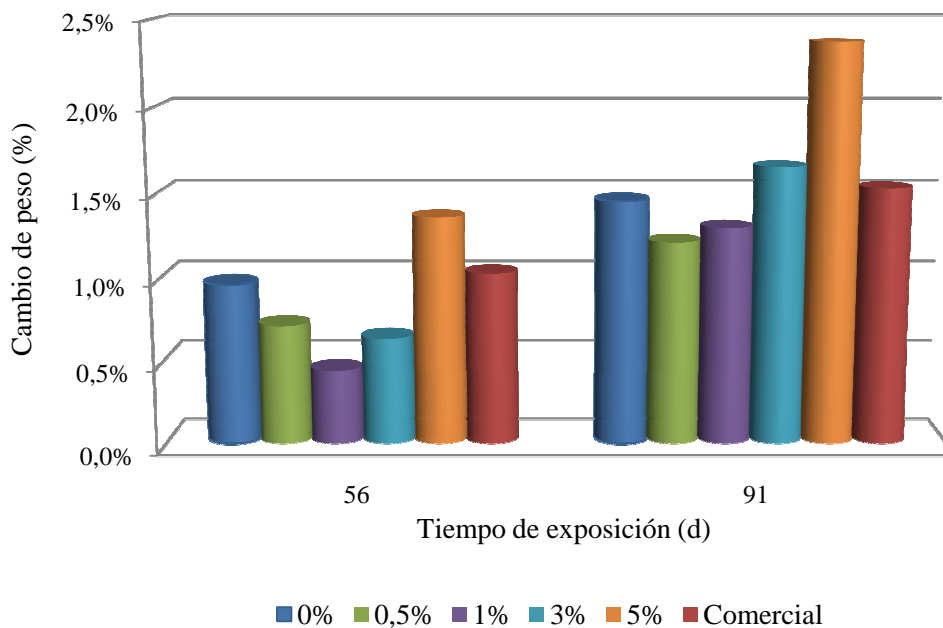


Figura 63 Cambio de peso de morteros expuesto a una solución de sulfato de sodio

Las investigaciones indican que la desintegración de morteros con aire ocluido se retrasa en comparación con otros sin aire ocluido. Los huecos de aire proveen sitios de nucleación para los compuestos formados en el ataque, lo cual disminuye los esfuerzos en la pasta. También, ayudan a contrarrestar el crecimiento de grietas debido a su forma esférica. De acuerdo con los mecanismos de ataque propuestos en morteros sometidos a una solución de sulfato de sodio, tal como se describe en la Figura 64, puede decirse que las grietas observadas en el paso 4 son reducidas cuando existe aire ocluido contrarrestando mejor las fuerzas expansivas en el mortero. (44)

Con lo anterior podría inferirse que de acuerdo con el comportamiento de las muestras del 1 y 3% existe una menor durabilidad a los sulfatos debido a la porosidad abierta, la distribución y forma no tan esférica de los huecos de aire formados con esa cantidad de aditivo. Para el aditivo comercial y el 0,5% de jugo, se presenta la mayor durabilidad ya que posiblemente la estructura de poros formada sea la adecuada para disminuir las grietas durante el ataque, teniendo consecuentemente una menor expansión.

Usando el 5% de jugo se genera una alta porosidad global que disminuye su resistencia a los sulfatos y acelera su deterioro en el tiempo, presentando zonas agrietadas.

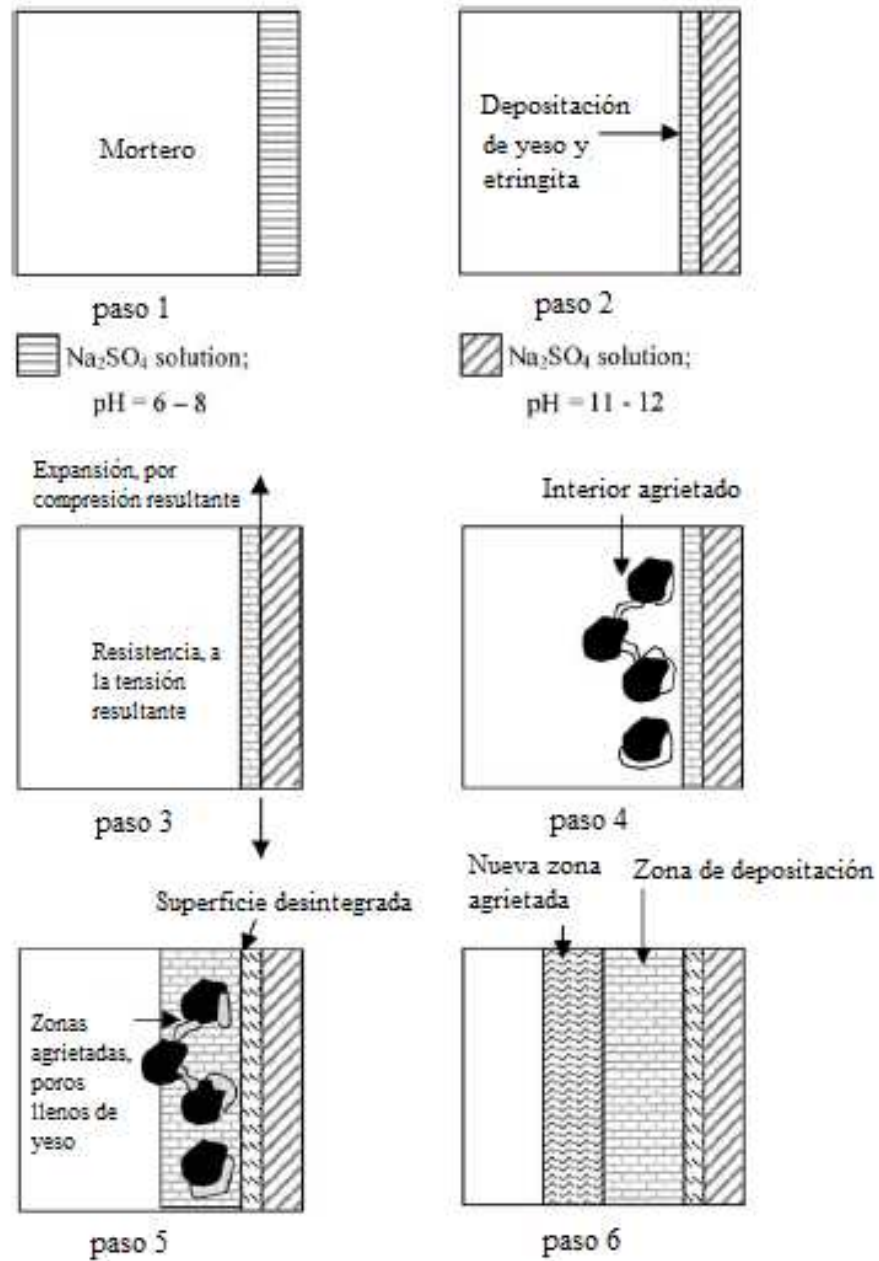


Figura 64 Mecanismo propuesto de ataque por sulfato de sodio (44)

4.3 HORMIGONES DE CEMENTO PORTLAND

Para el hormigón también se encuentran resultados de investigaciones recientes sobre la influencia de aditivos orgánicos provenientes de plantas *Agaváceas*, como el jugo de fique, que deben ser resaltados: (4)

- Al igual que en los morteros, la adición de pequeños porcentajes de éstos aditivos aumenta considerablemente el asentamiento en hormigones con la misma relación a/c, o disminuye el agua de amasado para obtener el mismo asentamiento.
- Se disminuye la exudación en el hormigón fresco, al parecer por la retención que hace del agua de amasado.
- La cantidad de aire ocluido se ve afectada por: el tipo de cemento, el tamaño de árido grueso, y los tiempos de amasado. Para el cemento tipo III se obtienen mejores resistencias usando jugo de fique que cuando se usa tipo I, debido posiblemente a que el tipo III por su composición química y superficie específica, ocluye menor cantidad de aire que el tipo I.
- En general con estos aditivos se disminuyen las resistencias a la compresión pero se encuentran aceptables al compararlas con la muestra control, de acuerdo con las normas para aireantes.

Para el estudio en hormigones se usaron varios porcentajes de aditivo (3, 5 y 10%), también se usó aditivo fresco para analizar la influencia de la edad del jugo en la formación de la estructura de poros y otras propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido. Se analizaron muestras con aireante comercial en las proporciones técnicas recomendadas por el fabricante. Las características de las mezclas analizadas se presentan en la Tabla 20, se uso la misma relación a/c de 0,6 para todos los ensayos de acuerdo con el diseño de mezclas.

Tabla 20 Dosificación de muestras de hormigones con jugo de fique y aditivo aireante comercial a igual relación a/c

Mezclas	Aditivo			Árido grueso 19,00 mm (kg)	Árido fino (kg)	Cemento tipo I (kg)	Agua (kg)	a/c
	Tipo	%	(kg)					
0%	Sin aditivo	0	0,00	98,89	60,02	31,10	18,56	0,60
Comercial	Comercial	0,5	0,16	98,89	60,02	31,10	18,56	0,60
3%	Jugo de fique	3	0,93	98,89	60,02	31,10	18,56	0,60
5%	Jugo de fique	5	1,55	98,89	60,02	31,10	18,56	0,60
5% fresco	Jugo de fique fresco	5	1,55	98,89	60,02	31,10	18,56	0,60
10%	Jugo de fique	10	3,11	98,89	60,02	31,10	18,56	0,60

4.3.1 ESTUDIO EN EL HORMIGÓN FRESCO

4.3.1.1 Trabajabilidad.

La consistencia es un parámetro que permite determinar la trabajabilidad, transporte y colocación del hormigón en obra. Se mide por la diferencia entre la altura del cono de Abrams, y la del cono del hormigón que se forma al retirarlo. Esta medida se llama asentamiento de la mezcla. El procedimiento se estableció en el numeral 3.2.3.1.

La presencia de aire ocluido produce un incremento en la trabajabilidad del hormigón. Esto está en una aparente contradicción con el efecto de espesamiento; y es debido a que el incremento del volumen de la pasta altera la relación en volumen pasta/árido y a la “lubricación” entre las partículas de árido grueso y fino por las microscópicas burbujas de aire. Un contenido de aire del 5% en volumen producirá un incremento en el asentamiento que podría ser de 1,2cm a 5,0cm. Igualmente que para mantener la trabajabilidad original se puede reducir en un 5% a un 15% la relación a/c dependiendo de los contenidos de cemento y pasta (12).

Para los hormigones elaborados se corroboró este efecto del aire ocluido en el asentamiento; los resultados se presentan en la Figura 65. Se observa que:

- A medida que se aumenta el contenido de aire ocluido se incrementa el asentamiento de los hormigones con jugo de fique entre 7 y 16 centímetros.
- Las mezclas con aditivo comercial no presentaron grandes aumentos en el asentamiento con respecto a la muestra control.
- Con el uso del jugo de fique en estado fresco, el asentamiento no varía mucho con respecto a la muestra con el mismo porcentaje de jugo a otra edad.
- La relación entre el contenido de aire y el asentamiento son directamente proporcionales.

4.3.1.1 Contenido de aire ocluido.

Para determinar la cantidad de aire ocluido en los hormigones, se usó el método de presión, que fija el porcentaje de volumen de aire ocluido, en hormigones frescos con o sin aditivos, mediante la inyección de aire a presión a una masa de hormigón determinada. El procedimiento del ensayo se describió en el numeral 3.2.3.1.

Como se describió en el numeral 2.3.3, se ha determinado que el volumen de aire requerido para dar óptima resistencia a los efectos del congelamiento esta alrededor de 9% en volumen para morteros, y de 4-8% en volumen para concretos. Para hormigones con el tamaño de agregado usado (19 mm) se recomienda un contenido de aire entre 5 y 6%, y si oclusión de aire 2% (ver Tabla 1).

Como puede observarse en la Figura 65, el hormigón sin aire ocluido sobrepasa ligeramente esta recomendación. La mezcla que cumple con esta condición que puede proporcionar durabilidad en el hormigón, es la de 3% de jugo de fique. La mezcla con el 5% presentó un 7,4% de contenido de aire, que de acuerdo con otros autores es usado hasta un 8% de aire cuando el hormigón se expone a condiciones severas (13).

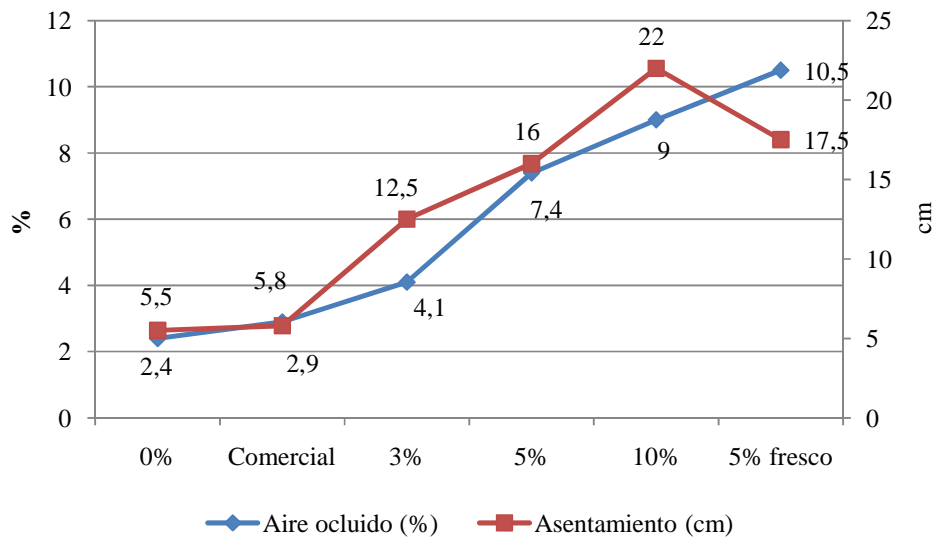


Figura 65 Cantidad de aire ocluido y asentamiento de hormigones con jugo de fique y aireante comercial

Aunque las muestras con el 5% de jugo tuvieron un asentamiento similar, pero el contenido de aire con el jugo fresco aumento aproximadamente en un 14%.

4.3.2 ESTUDIO EN EL HORMIGÓN ENDURECIDO

4.3.2.1 Estructura de poros.

El aire ocluido debido a los aditivos, que se forma en el proceso de amasado de la mezcla, debe conservarse durante el endurecimiento y deben conservar sus características en cuanto a tamaño y morfología.

Se evaluó la estructura de poros en hormigones con jugo de fique y aireante comercial, preparados con las dosificaciones descritas en la Tabla 20. La estructura de poros se determinó para dos probetas de hormigón de 10 cm x 10 cm x 2 cm cada una de acuerdo con la norma, bajo el procedimiento descrito en el numeral 3.2.3.4 del capítulo experimental. Las probetas preparadas de hormigón se analizaron en el microscopio con la ayuda de un aplicativo de procesamiento digital de imágenes para facilitar la medición de los huecos de aire.

Los resultados de los parámetros de la estructura de poros y la distribución de los mismos que se describe a continuación.

- **Parámetros de la estructura de poros**

El parámetro crítico para el sistema de aire ocluido, es el factor de espaciado, definido como la máxima distancia promedio de cualquier punto de la pasta hasta un poro. Se ha determinado un factor de espaciado aceptable para asegurar la durabilidad de concretos ordinarios de 0,2 a 0,25 mm. Para hormigones con agregados de 19 mm se recomienda un valor de 0,23 mm. Un parámetro adicional es el área superficial de las cavidades de aire cuyos valores típicos están en el rango de 16 a 25 mm²/mm³ de volumen de vacíos. (6)

La obtención de estos parámetros se describió en el capítulo experimental, donde se presentaron las ecuaciones de cálculo a partir de las mediciones obtenidas en el examen microscópico de las probetas de hormigón (ver Tabla 13). Los parámetros analizados a continuación son:

- El contenido total de aire (A , %).
- Superficie específica (α , mm⁻¹).
- Relación pasta aire es la relación (R).
- Factor de espaciado (L , mm).

Estos se obtuvieron a partir de las longitudes medidas en el examen microscópico y su análisis; éstos se detallan en la Tabla 21.

Tabla 21 Valores registrados en el examen microscópico del hormigón endurecido

Mezcla	Longitud total (T_{tot} , mm)	Longitud en huecos de aire (T_a , mm)	Número total cuerdas (N)	Superficie específica (a , mm^{-1})
0%	1200	66,14	328	19,84
3%	1200	101,29	388,50	15,95
5%	1200	137,75	473	13,74
10%	1200	178,22	548	12,30
Comercial	1200	113,32	392	13,84
5% jugo fresco	1200	171,40	612	14,28

El contenido total de aire (A) es la proporción de la longitud total recorrida que corresponde a los huecos de aire. Los resultados de contenido de aire ocluido para cada dosificación de aditivo se observan en la Figura 66.

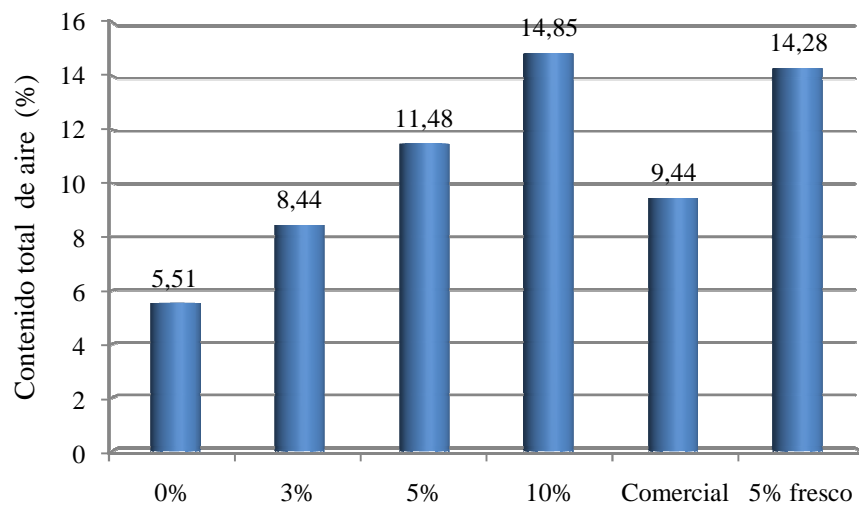


Figura 66 Contenido total de aire en hormigones endurecidos

El contenido total de aire aumenta a medida que aumenta el porcentaje de aditivo en la mezcla. El aditivo comercial apenas supera en un 40% aproximadamente del porcentaje de

aire de la muestra control, mientras que los hormigones con aditivo del licor del fique, tienen porcentajes significativamente superiores a la muestra control, hasta del 63%.

La relación pasta aire es la relación R entre el volumen de la pasta P determinado según las proporciones de la mezcla (Tabla 20), y el contenido de aire calculado. En la Tabla 22 y la Figura 67 se observan los resultados obtenidos para éste parámetro.

Tabla 22 Parámetros de la estructura de poros en el hormigón endurecido

Mezcla	Superficie específica (α , mm^{-1})	Contenido total de aire (A, %)	Contenido de pasta (P, %)	Relación pasta/aire (R)	Factor de espaciado (L, mm)
0%	19,84	5,51	23,81	4,32	0,22
3%	15,95	8,44	23,40	2,92	0,18
5%	13,74	11,48	23,09	2,01	0,15
10%	12,30	14,85	22,38	1,51	0,12
Comercial	13,84	9,44	23,74	2,51	0,18
5% jugo fresco	14,28	14,28	23,09	1,62	0,11

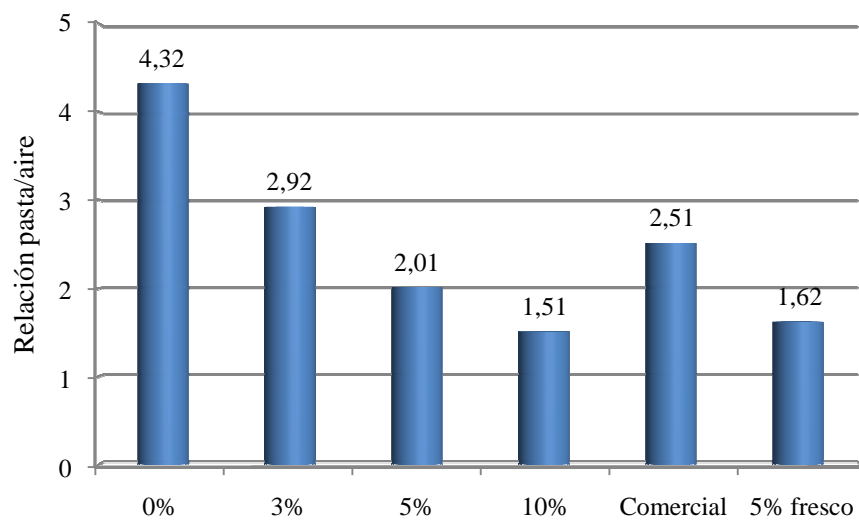


Figura 67 Relación pasta/aire en los hormigones endurecidos

Se observa que el hormigón control indica el mayor porcentaje de pasta con respecto a las mezclas con aditivos aireantes. Los hormigones con jugo de fique presentan menores proporciones consecuencia de las cantidades de aire ocluido.

La superficie específica de los huecos de aire es un parámetro obtenido por cálculo que representa la relación entre la superficie total de huecos de aire y su volumen; se expresa en mm^{-1} . Los resultados pueden observarse en la Tabla 22 y la Figura 68.

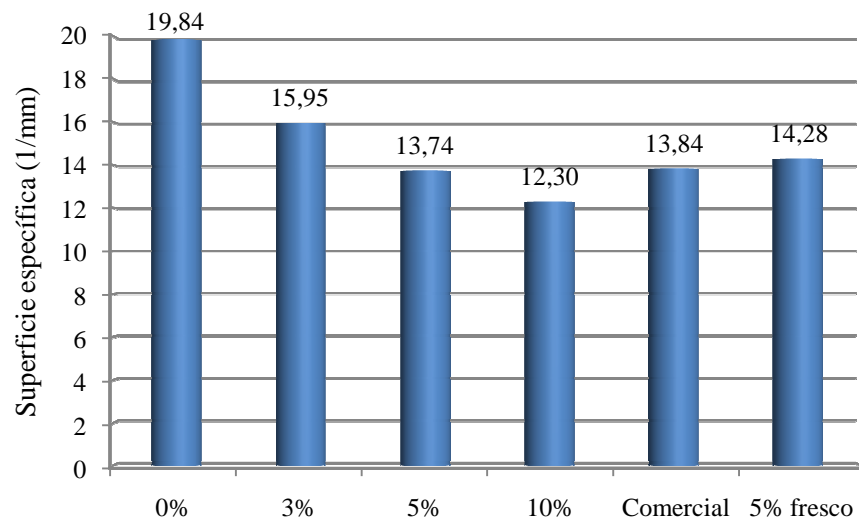


Figura 68 Superficie específica de los poros en el hormigón endurecido

Se observa que:

- La superficie específica disminuye con la adición de jugo de fique, lo cual puede significar el aumento en el tamaño de poros, a medida que el contenido de aire también va en aumento.
- La mezcla con 5% de jugo fresco presenta una mayor superficie específica que la adicionada con el 10% de jugo, lo cual refleja la formación de una estructura con poros más pequeños teniendo contenidos de aire similares (aproximadamente el 14% para las dos mezclas).
- El aditivo comercial proporcionó también una superficie específica mayor a las mezclas con aditivo.
- La mayor superficie específica la presentó la muestra control, a pesar del menor porcentaje de aire. Esto podría explicarse porque comparado con las demás