

**EVALUACIÓN DEL JUGO DE FIQUE COMO ADITIVO OCLUSOR
DE AIRE Y SU INFLUENCIA EN LA DURABILIDAD Y
RESISTENCIA DEL CONCRETO**

LEYLA YAMILE JARAMILLO ZAPATA

TESIS DE MAESTRÍA

Para acceder al grado académico de

MAGISTER EN INGENIERÍA

ÁREA DE MATERIALES Y PROCESOS

Director

PhD. JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE MINAS, ESCUELA DE INGENIERÍA
DE MATERIALES
MEDELLÍN**

2009

CONTENIDO

RESUMEN	9
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN.....	13
1. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN	15
1.1 Objetivo general.....	15
1.2 Objetivos específicos	15
1.3 Justificación	15
2. SINTESIS REFERENCIAL.....	18
2.1 Generalidades.....	18
2.2 Aditivos en morteros y hormigones de cemento pórtland	19
2.3 Aditivos oclisores de aire.....	20
2.3.1 Mecanismos	20
2.3.2 Tipos de aditivo	22
2.3.3 Aire ocluido en el concreto.....	22
2.4 Durabilidad del concreto.....	28
2.5 Aditivos orgánicos	31
2.6 Características del jugo de fique	36
2.7 Uso del jugo de fique en morteros y hormigones	40
3. EXPERIMENTAL	44
3.1 MATERIALES	44
3.1.1 Cemento Portland Gris	44
3.1.2 Áridos finos y gruesos	44
3.1.3 Agua	46
3.1.4 Jugo de fique	47
3.1.5 Aireante comercial.....	48

3.1.6	Otros	49
3.2	PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES Y EQUIPOS	49
3.2.1	Ensayos de caracterización físico-química.....	49
3.2.2	Ensayos en morteros.....	54
3.2.3	Ensayos en hormigones.....	64
DS	Camera Control Unit DS-L2	76
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	85
4.1	CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA	85
4.1.1	Formación de espuma.....	86
4.2	MORTEROS DE CEMENTO PORTLAND.....	94
4.2.1	Fluidez	95
4.2.2	Resistencias mecánicas.....	99
4.2.3	Absorción capilar.....	103
4.2.4	Ataque por sulfatos.....	106
4.3	HORMIGONES DE CEMENTO PORTLAND.....	112
4.3.1	Estudio en el hormigón fresco.....	113
4.3.2	Estudio en el hormigón endurecido	115
5.	CONCLUSIONES	128
6.	REFERENCIAS.....	133

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Características del aire ocluido para la óptima resistencia al congelamiento	24
Tabla 2 Constituyentes del jugo de fique	37
Tabla 3 Sustancias presentes en el jugo de fique	39
Tabla 4 Caracterización físico-química del jugo de fique	40
Tabla 5 Composición química del cemento Portland tipo I	44
Tabla 6 Características físicas del los áridos	45
Tabla 7 Propiedades del agua utilizada en los ensayos	47
Tabla 8 Características del aditivo aireante AIRTOC-D	48
Tabla 9 Características de otros reactivos utilizados.....	49
Tabla 10 Comparación entre la norma EN480-11 y ASTM C457	72
Tabla 11 Especificaciones técnicas del microscopio utilizado para la captura de imágenes.....	75
Tabla 12 Especificaciones cámara de video utilizada para la captura de imágenes.....	76
Tabla 13 Cálculo de parámetros de la estructura de poros a partir del examen microscópico	80
Tabla 14 Modelo de cálculo para la determinación de la distribución de los huecos de aire	81
Tabla 15 Características físico-químicas del jugo de fique.....	85
Tabla 16 Condiciones establecidas para los ensayos de espumación.....	86
Tabla 17 Dosificación de muestras de mortero con jugo de fique y aditivo aireante comercial, igual relación a/c.....	96
Tabla 18 Dosificación de muestras de mortero con jugo de fique y aditivo aireante comercial, igual asentamiento	96
Tabla 19 Resultados de succión capilar para morteros con jugo de fique y aditivo comercial	104
Tabla 20 Dosificación de muestras de hormigones con jugo de fique y aditivo aireante comercial a igual relación a/c	112
Tabla 21 Valores registrados en el examen microscópico del hormigón endurecido	116
Tabla 22 Parámetros de la estructura de poros en el hormigón endurecido	117
Tabla 23 Dosificación de muestras de hormigones con jugo de fique a igual asentamiento	124
Tabla 24 Resistencias de probetas de hormigones, a igual asentamiento y relación a/c	125

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Distribución de las moléculas del surfactante en la interfase agua-aire	21
Figura 2 Disociación y orientación de cargas	21
Figura 3 Mecanismo que permite las burbujas estables en el concreto	22
Figura 4 Presiones internas generadas en pasta de cemento expuestas a heladas (a) pasta con oclusión de aire, (b) pasta con aire ocluido	23
Figura 5 Relación entre la durabilidad al congelamiento y el factor de espaciado de las burbujas de aire ocluido	24
Figura 6 Descripción esquemática de los tres métodos usados para analizar el sistema de aire en el concreto endurecido	25
Figura 7 Efectos de algunos parámetros del concreto en el volumen total de aire ocluido .	26
Figura 8 Relación entre la porosidad capilar y la resistencia promedio de varios materiales	27
Figura 9 Resistencia relacionada con el contenido de cemento para cementos con y sin inclusión de aire.....	27
Figura 10 Principales factores que afectan la durabilidad del concreto (10).....	29
Figura 11 Resistencia a la compresión desarrollada en concretos con adiciones de (a) 0.25% y (b) 0.50%	32
Figura 12 Apariencia microscópica del mortero sin adición de aditivo proteínico (30X) ..	33
Figura 13 Apariencia microscópica del mortero con adición del 0,2 % de aditivo proteínico	33
Figura 14 Efecto de algunos aireantes orgánicos en el concreto fresco, (a) asentamiento, (b) exudación	34
Figura 15 Pérdida de resistencia a la compresión ocasionada por algunos aireantes orgánicos	35
Figura 16 Factor de espaciado y superficie específica para concretos aireados con SJ-2 basado en saponinas	35
Figura 17 Cultivo de Furcraea Cabuya.....	36
Figura 18 Proceso productivo del fique, a) Hojas de fique cortadas, b) Proceso de desfibrado de la hoja, c) Bagazo residual del desfibrado, d) Jugo residual del desfibrado, e) Fibra de fique lavada, f) Fibra de fique seca	38
Figura 19 Prueba de espuma del jugo de fique	39
Figura 20 Cantidad de aire ocluido con adición de jugo de Agave	41
Figura 21 Absorción capilar con la adición de jugo de Agave	42

Figura 22 Densidades obtenidas con la adición de jugo de Agave	42
Figura 23 Resistencia a la compresión con la adición de jugo de Agave	43
Figura 24 Curva granulométrica del árido fino	45
Figura 25 Curva granulométrica del árido grueso	46
Figura 26 Equipos y montaje para el ensayo de formación de espuma, a) Elementos de laboratorio, b) Detalles del montaje experimental.....	51
Figura 27 Equipos para el ensayo de extracto seco convencional, a) Desecador, b) Estufa con regulador termostático, c) Balanza analítica.....	52
Figura 28 Medidor de pH de sensibilidad 0,01 unidades de pH.....	54
Figura 29 Equipos para ensayos de consistencia y fluidez, a) Aparato de Vicat, b) Mesa de flujo c) Amasadora mecánica	56
Figura 30 Equipos para resistencia mecánica a la flexión, a) Moldes con base para probetas de 160 mm x 40 mm x 40 mm, b) Prensa de flexión, c) Mesa compactadora	57
Figura 31 Prensa utilizada en los ensayos a compresión de morteros.....	59
Figura 32 Equipos para ensayo de absorción capilar, a) Desecador, b) Balanza (LEXUS, 600 g), c)Montaje de probetas para succión capilar, d) Balanza eléctrica	62
Figura 33 Equipos de ensayo de resistencia a sulfatos, a) Moldes de 25 mm x 25 mm x 285 mm, b) Comparador de longitud	63
Figura 34 Equipo para determinar la trabajabilidad del hormigón: a) Instrumento para enrasar, b) Cono de Abrams, c) Flexómetro, d) Varilla compactadora y e) Pala para adición de mezcla.	64
Figura 35 Esquema del procedimiento del ensayo de asentamiento con el cono de Abrams.	65
Figura 36 Aerómetro de presión Tipo B	66
Figura 37 Equipos para el ensayo de resistencia a la compresión de hormigón, a) Mezcladora mecánica, b) Mesa vibratoria y cilindros, c) Prensa hidráulica y d) Nivel y yeso para refrentado.....	69
Figura 38 Probetas para la lectura de poros en hormigón endurecido, a) Corte de probeta de 150 mm x 100 mm x 40 mm, b) Líneas de barrido en la superficie para ensayo	73
Figura 39 Cortadora de disco para obtención de probetas de lectura de poros	73
Figura 40 Aplicación de tinta y pasta de cinc para preparación de muestras de hormigón..	74
Figura 41 Microscopio y cámara usados en examen microscópico	76
Figura 42 Configuración del sistema para el análisis de la estructura de poros	77
Figura 43 Medición de la distancia recorrida a través de los huecos de aire en el examen microscópico de las probetas de concreto endurecido.....	78
Figura 44 Estimación de una cuerda l para bordes rotos de los huecos de aire, 1) Línea transversal ficticia, 2) Ninguna cuerda interceptada (l)	79

Figura 45 Medición de la profundidad de carbonatación en la sección transversal de muestras de hormigón	84
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	88
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	89
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.....	90
Figura 49 Comparación del volumen de espuma formada y estabilidad para el aditivo comercial y jugo de fique a igual concentración	91
Figura 50 Influencia de la presencia de cemento en la solución espumante a igual concentración del aditivo.....	92
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 ...	92
Figura 52 Influencia de la presencia de cemento en la solución espumante a igual concentración del aditivo.....	93
Figura 53 Interacción entre burbujas de aire y partículas de cemento (6).....	94
Figura 54 Gráficos de consistencia en morteros con jugo de fique y aireante comercial ...	98
Figura 55 Resistencias a la flexión para las mezclas de morteros a igual relación a/c	100
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	101
Figura 57 Densidad de morteros con jugo de fique y aditivo comercial	103
Figura 58 Absorción capilar en morteros con jugo de fique y aditivo comercial	105
Figura 59 Porosidad y densidad de morteros con jugo de fique y aditivo comercial.....	106
Figura 60 Comportamiento típico de morteros de cemento portland expuestos a diferentes soluciones de sulfato (42).....	107
Figura 61 Probetas después de la exposición a la solución de sulfato de sodio.....	108
Figura 62 Cambio de longitud de morteros expuesto a una solución de sulfato de sodio..	109
Figura 63 Cambio de peso de morteros expuesto a una solución de sulfato de sodio.....	110
Figura 64 Mecanismo propuesto de ataque por sulfato de sodio (44).....	111
Figura 65 Cantidad de aire ocluido y asentamiento de hormigones con jugo de fique y aireante comercial.....	114
Figura 66 Contenido total de aire en hormigones endurecidos	116
Figura 67 Relación pasta/aire en los hormigones endurecidos.....	117
Figura 68 Superficie específica de los poros en el hormigón endurecido	118
Figura 69 Factor de espaciado de los poros en el hormigón endurecido.....	119

Figura 70 Distribución del número de poros por milímetro cúbico de hormigón.....	121
Figura 71 Fotografías sistema de poros de probetas de hormigón tomadas al microscopio	122
Figura 72 Resultados de resistencia a la compresión de hormigones con jugo de fique y aireante comercial, igual relación a/c	124
Figura 73 Aumento de la resistencia de hormigones con la reducción de agua en la mezcla	125
Figura 74 Profundidad de carbonatación de mezclas de hormigón con jugo de fique y aditivo comercial	127
Figura 75 Probetas de hormigón reveladas con fenolftaleína para detección de zonas carbonatada.....	127

RESUMEN

La actividad agrícola, de la mayoría de los países suramericanos, genera en muchos casos numerosos residuos, lo que conlleva un gran impacto ambiental y una preocupación sobre el adecuado manejo de los mismos.

La posibilidad de su uso en la industria de la construcción disminuiría esos impactos, produciría valor agregado a los cultivadores y ofrecería alternativas a los productores de materiales de construcción.

Conscientes de la importancia de la utilización de los residuos industriales y agroindustriales, se ha trabajado con distintos materiales residuales de origen agrícola, buscando sus posibles aplicaciones en morteros y hormigones.

Uno de los avances tecnológicos más grandes en materiales de construcción, en los últimos años, ha sido la incorporación de los aditivos que permiten mejorar las propiedades del hormigón, bien sea en estado fresco o endurecido. Uno de ellos es el aditivo oclisor de aire que permite incorporar, durante el amasado, una cantidad de pequeñas burbujas de aire, uniformemente repartidas, que permanecen después del endurecimiento. Algunos de estos aditivos son orgánicos y pueden ser obtenidos de materia vegetal. Los aireantes funcionan como surfactantes, que reducen la tensión superficial del agua de la mezcla, cuando es agitada, permitiendo la incorporación de aire.

En este trabajo se evalúa el comportamiento un extracto orgánico de origen vegetal, procedente la *Furcraea cabuya* (fique cenizo) en el hormigón. Esta planta forma parte de la familia de las *Agavaceae*, que se explotan de forma comercial en países de América y cuyos residuos, la fibra y el licor, son susceptibles de su uso como adición en materiales de construcción.

El extracto de fique (jugo de fique) está conformado principalmente por agua, celulosa, materia orgánica y minerales, donde a su vez la materia orgánica está constituida por sacarosa, proteínas, esteroides, saponinas. Éstas últimas se comportan como surfactantes y son las responsables de la oclusión de aire en morteros y hormigones.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo, es verificar el efecto aireante del jugo de fique en morteros y hormigones de cemento Pórtland, y su influencia en la durabilidad y resistencia mecánica.

Al jugo obtenido se le realizaron ensayos de caracterización físicoquímica, entre otros: determinación del extracto seco convencional, pérdida por calcinación a 105 °C, determinación del pH y en especial se analizó su capacidad espumante y la estabilidad de la espuma formada, con el fin de relacionarlo con su acción como aireante.

En los morteros se determinó la consistencia, la absorción capilar y se evaluaron las resistencias mecánicas a flexo-tracción y compresión. En los hormigones se estudió el efecto del jugo en la consistencia y el contenido de aire ocluido en la mezcla fresca. En el hormigón endurecido se evaluaron las características del sistema los poros e igualmente las resistencias mecánicas a compresión. Por último se llevaron a cabo estudios de durabilidad, fundamentalmente al ataque por sulfatos y carbonatos.

En este trabajo se demostró que el jugo de fique se caracteriza por su alto contenido de agua, de carácter ácido (pH 4,5) y una adecuada capacidad espumante y estabilidad de la espuma. También se demostró que el aditivo aumenta la plasticidad y reduce el contenido de agua de la mezcla hasta en un 25%.

En los morteros y hormigones endurecidos, se reduce la absorción capilar y la densidad; las resistencias mecánicas se ven disminuidas por efecto de la inclusión de las burbujas de aire, pero pueden obtenerse valores por encima del 90% de la muestra control, límite establecido por las normas ASTM y NTC. Se logran resistencias adecuadas hasta con el 5% de jugo en la mezcla y se obtienen parámetros recomendados de la estructura de poros que favorecen la durabilidad del concreto. Se mejora la resistencia al ataque por sulfatos y carbonatos debido a la porosidad cerrada que se forma.

ABSTRACT

The agricultural activity, of the most of the South American countries, generates in many cases abundant wastes, what bears a great environmental impact and a concern on the appropriate handling of the same ones.

The possibility of its use in the building industry would diminish those impacts, it would produce value added to the farmers and it would offer alternative to construction materials manufacturers.

Aware of the importance on the use of the industrial and agriculture-industrial wastes, different residual materials from agricultural origin have been studied, looking for their possible applications in mortars and concretes.

One of the most important technological advances in construction materials, in the last years, becomes the incorporation of additives for improving the properties of the concrete, in fresh or in hardened state. One of them is the air-entraining agent which incorporates, during the mixing, a quantity of small air bubbles, uniformly distributed. These air bubbles remain after the hardening of concrete. Some of these additives are organic and they can be obtained from vegetable matter. Chemically, the airentraining agent works as a surfactant that reduces the surface tension of the water in the mixture, allowing the incorporation of air when stirred.

In this study, the behaviour of an organic extract from vegetable origin has been studied. The liquor used, was extracted from the *Furcraea cabuya* (fique cenizo) specie, and it was added to Portland cement mortars and concretes. This plant is part of the Agavaceae family, some of whose genera are exploited in a commercial way in countries of America and whose residuals, the fiber and the liquor, could be use as additives in building materials.

The main components of “fique liquor” are water, cellulose, organic matter and minerals. Organic matter is based on sucrose, proteins, steroids and saponins. The saponin agent is responsible for the surfactant effect and entrained air.

Therefore, the objective of this study is to verify the air entraining effect of the “fique liquor”, in mortars and Portland cement concretes, and its effect on durability and mechanical strength.

Physical and chemical characterization of the liquor was carried out: determination of the dry extract content, loss on calcination to 1050°C, determination of the pH and especially the foaming power and foam stability was studied.

For cement mortars the consistency, the capillary absorption were determined and the flexural and compressive mechanical strengths were evaluated. In concretes the effect of the liquor on the consistency and air content were studied in fresh mixtures. In hardened concretes, the characteristics of the air-void system, size-distribution of air voids and the compressive mechanical strength were studied. Finally, studies on durability were carried out: sulfate resistance and carbonation.

In this research, it has been demonstrated that the tested extract is acid (pH 4,5), it has a high content of water and adequate foaming power and stability. It was also demonstrated that this additive reduces the content of water of the mixture about 25%, guaranteeing the same workability than the control mix,

For mortars and for hardened concretes, the capillary absorption and the density are diminished; the mechanical strengths are also diminished by effect of the entrained air bubbles, but it is possible to obtain values up to 90% of the strength of control mix (ASTM and NTC recommendation). Adequate compression strengths and voids parameters can be obtained adding 5% of liquor in concrete mixes. The additive improves the resistance to sulfates and carbonation.

INTRODUCCIÓN

El interés generado en los últimos 30 años en los aditivos para la tecnología del concreto se debe principalmente al interés en la durabilidad y la presentación visual del mismo; el uso de aditivos se ha incrementado rápidamente en los últimos años en países industrializados como Australia, Japón, USA y Alemania. (1)

Se han estudiado ampliamente los aditivos ocluidores de aire ya que incrementan principalmente la resistencia del concreto a ciclos de hielo-deshielo y su trabajabilidad. Aditivos tales como sales de resinas de madera, detergentes sintéticos, sales de lignina sulfonada, sales de ácidos de petróleo, sales de materiales proteínicos, ácidos grasos y resinosos, sales orgánicas de carbohidratos sulfonados, han sido empleados o son comercialmente disponibles como ocluidores de aire. (2)

Los aditivos usados actualmente en las mezclas de hormigones y morteros son fundamentalmente sintéticos, pero se ha estudiado otro tipo de extractos orgánicos de origen vegetal como aditivo en materiales cementicios, entre ellos podemos mencionar el extracto de la planta del cactus, aditivos proteínicos de sangre animal y otros aditivos basados en saponinas, los cuales han arrojado resultados aceptables para su uso. Las resinas neutralizadas extraídas del pino, son el aditivo orgánico comercial que se ha investigado y usado más ampliamente en los últimos años.

El fique es una planta originaria de la región andina de Colombia y Venezuela que posteriormente se extendió a otros países de África, Asia y América Central, particularmente a México y Costa Rica. Esta planta se usa tradicionalmente para la extracción de fibra y algunas de sus partes con fines medicinales. Durante la extracción de fibra, los subproductos resultantes del beneficio de la planta de fique, representados en el bagazo y el jugo, han sido estudiados con el fin de darle valor agregado mediante algún uso, dentro de los cuales se ha considerado la adición en morteros y hormigones.

En el ámbito internacional se conoce poco del fique, pero a nivel nacional se han realizado algunos estudios diagnósticos e investigaciones. La gran mayoría de trabajos encontrados buscan hacer el aprovechamiento de la fibra corta, remanente en el bagazo, como refuerzo en algunos materiales, elaboración de papel, abono o como alimento para animales.

Comparativamente son pocos los trabajos encontrados para la utilización del jugo de fique, extraído del bagazo. La mayoría propenden por la utilización en fármacos y la producción

de agentes tensoactivos. Su estudio como material alternativo de construcción se limita a unas pocas investigaciones, dentro de las cuales pueden destacarse su uso como aditivo en pastas y morteros de cemento donde se caracterizó el licor de fique y se determinó un comportamiento similar al de los superplastificantes comerciales, así como también su acción como oclisor de aire hasta de un 13%, producto de la presencia de sustancias tensoactivas, tales como las saponinas. (3) (4)

Con la presente investigación se avanzó en el conocimiento del jugo de fique en cuanto a su acción como aditivo aireante en morteros y hormigones, y su influencia en la durabilidad y resistencia, propiedades que determinan su uso como alternativa en la construcción.

Se encontraron resultados positivos para la resistencia a la compresión y durabilidad para los hormigones fabricados, para los cuales el jugo podría clasificar como un aditivo aireante de acuerdo con las normas establecidas.

1. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el jugo de fique como aditivo aireante en el concreto y su relación con algunos parámetros de durabilidad y resistencia.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la estructura de poros obtenida en el concreto endurecido con diferentes condiciones de mezcla.
- Evaluar la resistencia a la compresión con respecto a las estructuras de poros obtenidas.
- Determinar los parámetros de oclusión de aire proporcionados por el jugo de fique y su influencia en la durabilidad del concreto, en cuanto al ataque por sulfatos y carbonatos.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Colombia es el mayor productor de fibra de fique en el mundo. En la actualidad se producen alrededor de 30.000 toneladas de cabuya al año (21.595 hectáreas sembradas) destinada a la industria de empaques, hilanderías y artesanías, cultivadas especialmente en los departamentos de Cauca, Nariño, Santander, Antioquia, Boyacá y Risaralda. (5)

Para el beneficio del fique, al igual que su cultivo, se utilizan métodos tradicionales y poco tecnificados. El fique es producido por comunidades que han creado dependencia laboral su producción y venta de productos derivados, pero sus conocimientos sobre procesos de

transformación, tecnificación e industrialización no se han difundido entre los cultivadores, manteniendo técnicas de cultivo, beneficio y transformación tradicionales. (5)

En la producción de las fibras vegetales procedentes de la planta de fique, se estima que sólo el 5%, del peso de la planta se recoge como fibra utilizable en la industria. Los desechos generados por el desfibrado del fique representan el 95% restante del peso de la hoja y está representado en el bagazo y el jugo. Estos subproductos no son utilizados y actualmente no se le da un uso distinto al de abono dentro del mismo cultivo y en muchos casos es arrojado, indiscriminadamente, a fuentes cercanas de agua generando problemas de contaminación.

De acuerdo a estimativos de producción de cabuya, Colombia produce 720.000 toneladas de residuos de desfibrado al año. Debido a su naturaleza química estos desechos agrícolas se convierten en un problema ambiental, a causa de su lenta biodegradación, a sus altos contenidos de saponinas y fenoles que ocasionan efectos sobre las fuentes de agua cercanos a los sitios de producción. El efecto de las saponinas desde el punto de vista biológico puede ser muy diverso; pueden tener efectos perjudiciales actuando como antinutrientes, son muy tóxicas para los peces y han sido reportadas con actividad herbicida, fungicida y bactericida.

Este subproducto contiene 73,2% de jugos o licor de fique. Adicionalmente tiene un 2,6% en peso de fibras cortas, que no se aprovechan. El solo aprovechamiento de este remanente incrementaría el valor agregado del cultivo en más del 50%, respecto al ingreso actual. (4)

El jugo de fique se ha perfilado como un potencial aditivo en mezclas de morteros y hormigones y aunque los aditivos usados actualmente son fundamentalmente sintéticos, la investigación de aditivos vegetales proporcionaría a la industria alternativas más sostenibles y poco contaminantes en su elaboración, conservando o mejorando las propiedades de los compuestos cementicios.

Se ha determinado que el jugo de fique actúa como un surfactante que al mezclarse con el agua de amasado del hormigón, disminuye su tensión superficial, y permite la formación de pequeñas burbujas de aire, estables, que permanecen durante el proceso de fabricación de la mezcla y posteriormente forman pequeños poros, no coalescentes, que disminuyen la densidad de la mezcla, y mejoran la durabilidad del hormigón a agentes físicos y químicos. Este efecto espumante del jugo es atribuido a la presencia de las saponinas.

Pero para su adecuada utilización como aditivo es necesario estudiar mejor las cavidades de aire que produce en el hormigón, así como su interrelación con la durabilidad y resistencia del mismo.

El propósito de esta investigación es buscar un uso alternativo del jugo del fique mediante el avance en el conocimiento de su acción como aditivo en morteros y hormigones y a su vez mitigando el impacto ambiental generado por el desecho de la planta y por la disminución de la producción de aditivos sintéticos. La utilización de esos residuos darían, además, valor agregado al cultivo de la plantas del género *Furcraea*, y como consecuencia incrementaría el ingreso de las familias campesinas que actualmente la cultivan.

2. SINTESIS REFERENCIAL

2.1 GENERALIDADES

El interés generado en los últimos 30 años en los aditivos para la tecnología del concreto se debe principalmente al interés en la durabilidad y la presentación visual del mismo; el uso de aditivos se ha incrementado rápidamente en los últimos años en países industrializados como Australia, Japón, USA y Alemania. (1)

Se han estudiado ampliamente los aditivos ocluidores de aire ya que incrementan principalmente la resistencia del concreto a ciclos de hielo-deshielo y su trabajabilidad. Aditivos tales como sales de resinas de madera, detergentes sintéticos, sales de lignina sulfonada, sales de ácidos de petróleo, sales de materiales proteínicos, ácidos grasos y resinosos, sales orgánicas de carbohidratos sulfonados, han sido empleados o están disponibles comercialmente como ocluidores de aire. (2)

La práctica de la inclusión de burbujas de aire en el concreto se remonta a los años 30, constituyendo uno de los principales desarrollos en la tecnología moderna del concreto. (6)

Los aditivos usados actualmente en las mezclas de hormigones y morteros son fundamentalmente sintéticos, pero se ha estudiado otro tipo de extractos orgánicos de origen vegetal como aditivo en materiales cementicios. Entre ellos podemos mencionar los siguientes:

- Con el uso del extracto de la planta de cactus originaria de Méjico se observó que se incrementa la plasticidad del mortero, disminuye la absorción de agua e incrementa la resistencia a las sales de deshielo. (7)
- La incorporación de una combinación de polímeros orgánicos naturales estabilizados como espumantes durante el amasado de materiales de matriz cementicia, permitió la reducción de la densidad del hormigón y mortero resultantes. Esto debido a una incorporación de aire que lleva sin embargo aparejada una disminución en la resistencia. (8)
- El uso de un aditivo proteínico proveniente del procesamiento industrial de sangre animal en morteros, proporcionó un efecto ocluidor de aire significativo y la modificación de las propiedades del mortero fresco y endurecido, con buenas expectativas de uso. (9)

2.2 ADITIVOS EN MORTEROS Y HORMIGONES DE CEMENTO PÓRTLAND

Los aditivos son sustancias que se emplean como ingredientes de la pasta, mortero o concreto y que incorporados durante su proceso de mezclado contribuyen al mejoramiento de una o varias de sus propiedades. Estos productos permiten modificar la reología del hormigón fresco, mejoran su manejabilidad, disminuyen la exudación y la segregación. A nivel del concreto endurecido pueden lograr incrementos en resistencia mecánica, y en su comportamiento frente a acciones físicas o químicas, es decir su durabilidad. (10)

La norma NTC 1299, establece la siguiente clasificación:

- Tipo A: plastificante, aditivo que permite disminuir la cantidad de agua necesaria para obtener una determinada consistencia.
- Tipo B: retardador, actúa sobre el fraguado.
- Tipo C: acelerante, acelera el fraguado e incrementa las resistencias a edades tempranas.
- Tipo D: plastificante-retardante, combina los dos efectos (A y B)
- Tipo E: plastificante-acelerante, combina los dos efectos (A y C)

La norma ASTM C 494, amplía la clasificación a otros productos que contribuyen también al mejoramiento de la durabilidad del hormigón, como son:

- Tipo F: superplastificante (reductor de agua de alto rango)
- Tipo G: reductor de agua de alto rango y retardante.
- Incorporadores de aire, interfieren con la red capilar y reducen la permeabilidad y el ingreso de agentes agresivos.
- Impermeabilizantes, aumentan la resistencia a la penetración de agentes agresivos.
- Anticongelantes.
- Expansivos.
- Colorantes.
- Inhibidores de corrosión.
- Fungicidas, germicidas e insecticidas.

Debe tenerse precauciones en el empleo de aditivos ya que estos modifican sus propiedades. Un aditivo debe utilizarse sólo después de haber evaluado apropiadamente sus efectos. Debe señalarse que: (2)

- Es conveniente un cambio en el tipo o fuente de cemento, de la cantidad de cemento empleado, o una modificación en la composición granulométrica del agregado o de las proporciones de la mezcla.
- Muchos aditivos afectan a más de una de las propiedades del concreto, alterando adversamente, algunas veces, propiedades deseables.

- Algunos factores, tales como el contenido de agua y el contenido de cemento de la mezcla, modifican de manera importante los efectos de algunos aditivos debido al tipo de composición granulométrica del agregado y por el tipo y duración del mezclado.

2.3 ADITIVOS OCLUSORES DE AIRE

Estos aditivos comprenden un grupo de surfactantes que actúan en la interface agua-aire en la pasta de cemento, estabilizando el aire atrapado durante la mezcla en forma de pequeñas burbujas discontinuas (1). A continuación se describen algunos aspectos importantes de la acción de éstos aditivos.

2.3.1 MECANISMOS

Se conoce que el mecanismo por el cual los ocluidores de aire ejercen su acción, se basa en la acción tensoactiva ya que los aditivos correspondientes pertenecen a los llamados anfífilos con grupos polares hidrófilos (o aerófilos) y apolares hidrófobos (o aerófilos). (11)

Los primeros, afines con el agua, permanecen dentro de la fase líquida, mientras que los segundos, repelidos por el agua se orientan y dirigen hacia la interfase líquido-gas, fuera de la disolución, reduciendo la tensión superficial del agua. Si accidentalmente, por efecto mecánico, se produce una burbuja de aire dentro de la disolución del aditivo tensoactivo, en la nueva interfase creada se fijarán las moléculas del aditivo de tal manera que sus grupos polares formen una corona alrededor de la burbuja y los restos apolares queden orientados hacia el interior de la misma (ver Figura 1). Por su menor densidad la burbuja ascenderá y al llegar a la superficie se estabilizará sin romperse, puesto que en estas condiciones la superficie del sistema (y por lo tanto la energía superficial) es menor y, en consecuencia, el sistema es más estable.

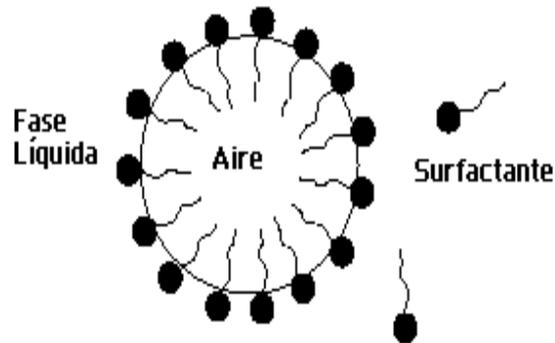


Figura 1 Distribución de las moléculas del surfactante en la interfase agua-aire (11)

En concretos y morteros estas cargas en la superficie proporciona burbujas estables para adherirse a las zonas de cargas opuestas en el cemento y las partículas de agregado (ver Figura 2). El efecto se presenta como un puente agregado-aire-cemento-aire-agregado, incrementando la cohesión de la mezcla y estabilizando el sistema de burbujas de aire (ver Figura 3).

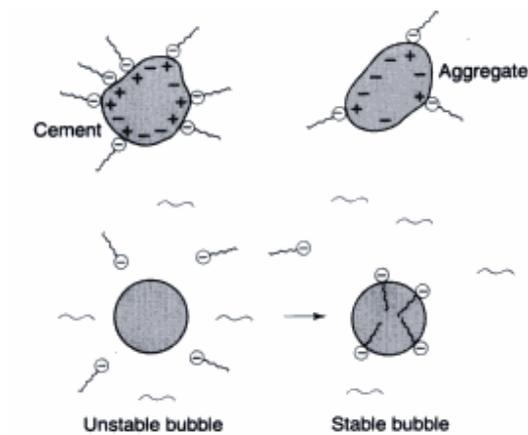


Figura 2 Disociación y orientación de cargas (1)

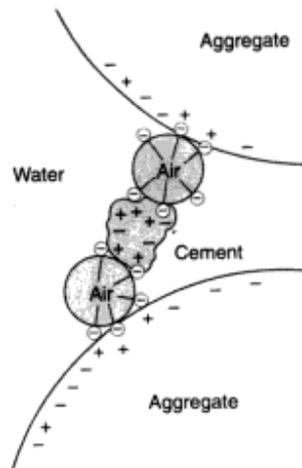


Figura 3 Mecanismo que permite las burbujas estables en el concreto (1)

2.3.2 TIPOS DE ADITIVO

Este tipo de aditivos se ha clasificado de acuerdo con el tipo de grupo polar (hidrofóbico) en las moléculas, en: agentes aniónicos, agentes catiónicos, agentes no iónicos, agentes anfóteros. Sin embargo los aditivos comerciales son en general una mezcla química compleja, los productos derivados de madera y los detergentes sintéticos son los dos tipos más frecuentes de agentes inclusores de aire.

La mayor proporción de productos comerciales están basado en un pequeño número de materias primas que se listan a continuación en un probable orden decreciente de uso: (12)

- Sales de ácidos abiético y pimérico
- Sales de ácidos grasos
- Alkil-aril sulfonatos
- Alkil sulfatos
- Fenol etoxilatos

2.3.3 AIRE OCLUIDO EN EL CONCRETO

Existen tres razones principales para ocluir intencionalmente aire en el hormigón: durabilidad, cohesión y densidad. (12)

La oclusión de aire altera las propiedades del concreto fresco. El concreto con aire ocluido es considerablemente más trabajable y cohesivo que el concreto sin aire ocluido, con iguales contenidos de cemento o relación agua/cemento; se reducen la segregación y la exudación. La reducción en la exudación a su vez, ayuda a evitar la formación de bolsas de agua debajo de las partículas de agregado grueso y de piezas ahogadas tales como el acero de refuerzo y la acumulación de lechada o material débil en la superficie de un colado. Estos efectos se originan por la presencia de diminutas burbujas de aire, dispersas uniformemente en la mezcla de pasta de cemento. Debido a su tamaño y gran número proporcionan protección adecuada con un volumen total relativamente bajo de vacíos. (6)

Es ampliamente conocido el efecto dañino de los ciclos hielo-deshielo sobre el hormigón endurecido, debido a que el agua congelada se expande, causando presiones internas que pueden romper la masa. El propósito de la oclusión de aire es que los micro poros generados actúen como alojamientos de agua, cuando ésta se ve forzada a desplazarse por el aumento del volumen al llegar al punto de congelación, reduciendo la presión.

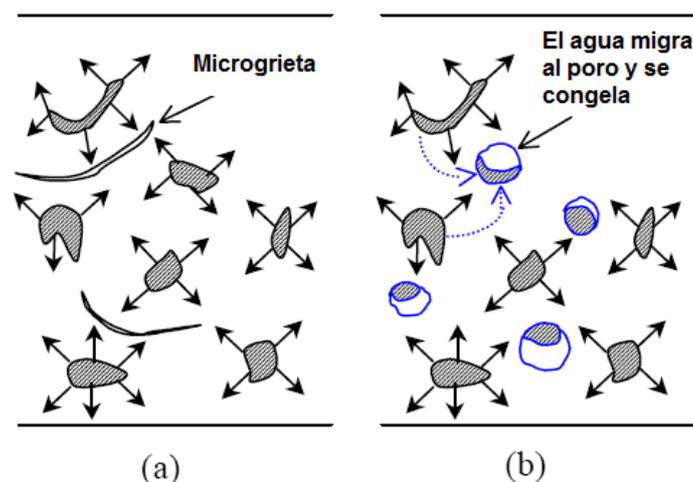


Figura 4 Presiones internas generadas en pasta de cemento expuestas a heladas (a) pasta con oclusión de aire, (b) pasta con aire ocluido (6)

Igualmente el aire ocluido protege el hormigón de las sustancias químicas usadas para deshelar y de la acción de los sulfatos; además provee al hormigón de una mayor resistencia al paso del agua, reduciendo su permeabilidad, ya que estas pequeñas burbujas actúan como válvulas de los capilares que deja el agua de exudación del hormigón, al pasar del estado plástico al estado endurecido.

El contenido de aire, el factor de espaciamiento, así como otros parámetros del sistema de cavidades de aire en el concreto endurecido, han sido ampliamente investigados en países donde el concreto es sometido a ciclos de hielo-deshielo.

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. También el tamaño de los poros formados en general son mayores de 10 μm y menores de 1250 μm . 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 (ver Tabla 1). (6) (13)

Tabla 1 Características del aire ocluido para la óptima resistencia al congelamiento (6)

Tamaño máximo del agregado mm (in)	Contenido de aire (% en volumen)				Factor de espaciado (mm)
	Sin oclusión	Recomendado (ACI)	Concreto	Pasta	
63,5 (2 1/2)	0,5	4,0	4,5	16,7	0,18
38 (1 1/2)	1,0	5,0	4,5	16,4	0,20
19 (3/4)	2,0	6,0	5,0	16,9	0,23
9,5 (3/8)	3,0	7,5	6,0	19,7	0,28
Mortero	-	-	-	23,0	0,30

Un parámetro adicional es el área superficial de las cavidades de aire cuyos valores típicos están en el rango de 16 a 25 mm^2/mm^3 de volumen de vacíos. (6)

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 espaciamiento, es el medio más apropiado para lograr durabilidad (ver Figura 5).

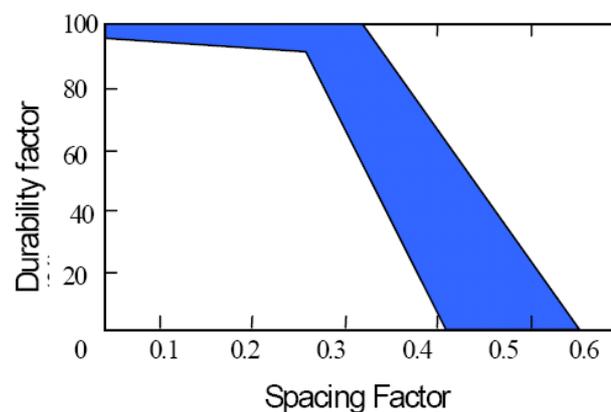


Figura 5 Relación entre la durabilidad al congelamiento y el factor de espaciado de las burbujas de aire ocluido (6)

El sistema de cavidades de aire en el concreto endurecido, puede caracterizarse microscópicamente mediante diversos métodos. El método más comúnmente empleado es el lineal transversal y los procedimientos modificados de conteo de puntos, descritos en la ASTM C 457. En la norma europea EN 480-11 se usa solo el método lineal transversal. También puede usarse análisis de imagen para el análisis. Los métodos usados se esquematizan en la Figura 6. (13)

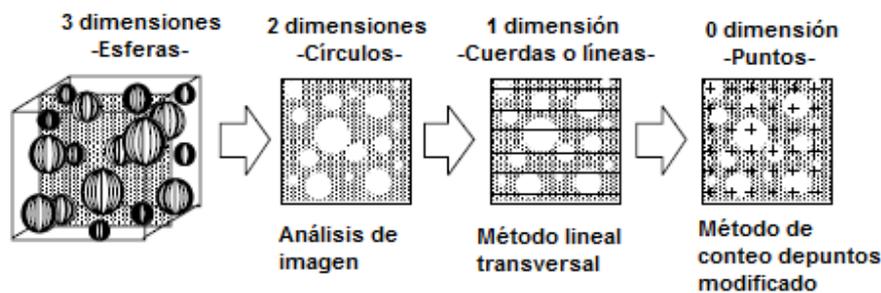


Figura 6 Descripción esquemática de los tres métodos usados para analizar el sistema de aire en el concreto endurecido (13)

Muchos factores influyen en el contenido de aire y en la distribución de tamaños de las cavidades de aire producidas en el concreto con aire ocluido, siendo los más importantes:

- La naturaleza y cantidad de aditivo inclusor de aire.
- La naturaleza y cantidad de los constituyentes de la mezcla de concreto.
- Tipo y duración del mezclado empleado.
- Consistencia.
- Tipo y grado de compactación aplicada al colar el concreto.

El contenido de cemento y el tamaño máximo del agregado grueso de una mezcla de hormigón tienen un efecto pronunciado en el contenido de aire, tanto naturalmente atrapado como intencionalmente ocluido. Para hormigones con un tamaño de agregado menor de 38,1 mm, el contenido de aire se incrementa sustancialmente. Por otra parte, cuando el contenido de cemento se incrementa, independientemente del tamaño del agregado, el contenido de aire decrece por el mayor contenido de pasta; sin embargo algunos estudios demuestran que el espaciado entre las burbujas es menor y que su superficie específica aumenta, con lo cual mejora la durabilidad del hormigón.

Las partículas finas de agregado comprendidas entre los tamices de 595 μm (No. 30) y 149 μm (No. 100) tienden a incluir más aire que otras más finas o gruesas. Por otra parte, grandes cantidades de material que pasen el tamiz de 149 μm (No. 100) traen como consecuencia una reducción en el contenido de aire. Los agregados finos de distintas fuentes pueden incluir diferentes cantidades de aire en el hormigón aunque tengan granulometrías idénticas, así, por ejemplo, un hormigón con agregado fino triturado puede requerir hasta el doble de cantidad de aditivo, que el necesario para una arena redondeada natural. Igualmente las impurezas orgánicas pueden aumentar o disminuir su contenido, dependiendo de la naturaleza que tengan.

Un aumento en la dureza del agua reduce, generalmente, la efectividad de los aditivos oclusores de aire. También la relación agua/cemento cuando es baja permite la inclusión de menos aire. Algunos de estos efectos en el volumen total de aire en el concreto se presentan en la

Figura 7.

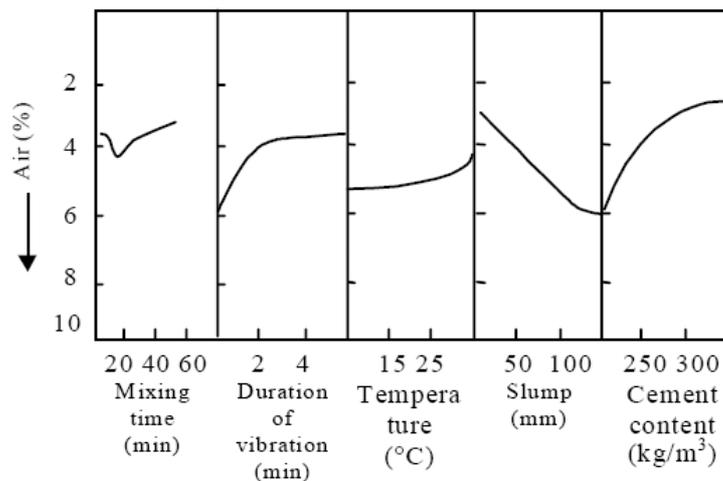


Figura 7 Efectos de algunos parámetros del concreto en el volumen total de aire ocluido (6)

La propiedad generalmente afectada es la resistencia mecánica (especialmente con aditivos oclusores de aire), bien sea la de compresión, tracción o ambas. Se afirma que la resistencia depende principalmente de la porosidad del material. Generalmente la reducción es

proporcional a la cantidad de aire ocluido, pero aumenta con mayores cantidades (ver Figura 8 y Figura 9).

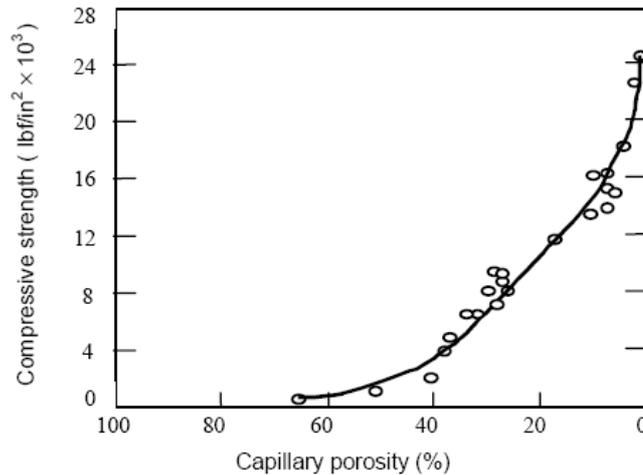


Figura 8 Relación entre la porosidad capilar y la resistencia promedio de varios materiales (6)

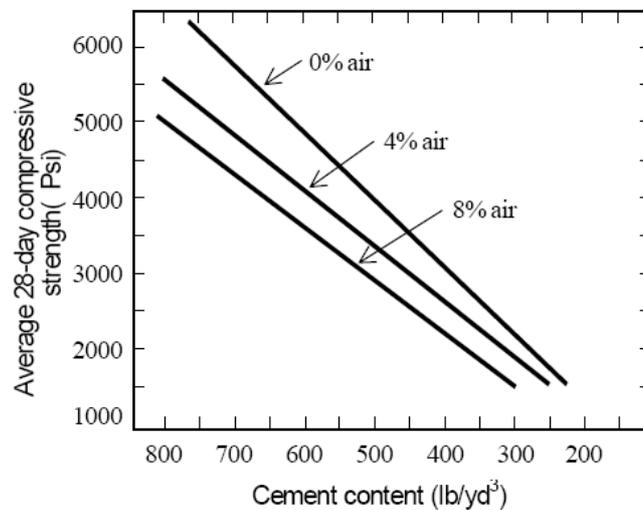


Figura 9 Resistencia relacionada con el contenido de cemento para cementos con y sin inclusión de aire (6)

Actualmente se sigue pensando que la resistencia mecánica del hormigón es la cualidad única, o cuando menos la más importante del material, suponiendo una barrera para el empleo de los aditivos. En tales casos, se considera la resistencia mecánica del hormigón

desligada del resto de propiedades del material, como si la retracción, la figuración, la fluencia, la permeabilidad, el ataque químico y la corrosión de las armaduras, por no citar otras, no fueran causas capaces de influir decisivamente sobre dicha resistencia. (14)

2.4 DURABILIDAD DEL CONCRETO

La durabilidad es la cualidad que posee el concreto de soportar las condiciones para las cuales fue diseñado, sin sufrir deterioros durante su vida útil prevista.

Numerosos son los factores de la estructura que influyen en la durabilidad tales como: bajo espesor de recubrimiento o la presencia de grietas; pero otros son factores propios del material relacionados con:

- Tipo de cemento utilizado.
- Adiciones minerales presentes.
- Características de agregados y agua utilizada.
- Relación agua-cemento.
- Condiciones de dosificación, preparación y puesta en obra.
- Condiciones de curado.

En general, los procesos que pueden conducir a una durabilidad inadecuada son múltiples y en cada caso están relacionados con las características del elemento estructural en estudio, sus procesos de producción y colocación, su medio ambiente y condiciones de servicio. En la Figura 10 se representan los principales factores que influyen en la durabilidad.

En un sólido poroso como el hormigón, el agua es la causa de muchos procesos físicos de degradación, y a su vez puede actuar como vehículo de transporte para iones agresivos, convirtiéndose en la fuente de procesos químicos de degradación. Una propiedad que determina la facilidad de que el agua u otros fluidos puedan penetrar al interior del hormigón, se denomina permeabilidad. Esta propiedad se encuentra básicamente definida por el tamaño, distribución y continuidad de los poros al interior del material. Por lo anterior, se puede afirmar que generalmente un hormigón compacto permeable es de baja durabilidad.

El movimiento del agua y por consiguiente de sustancias e iones agresivos, 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 del un fluido. La porosidad puede clasificarse como abierta y cerrada. A nivel de la microestructura del hormigón se identifican tres tipos de poros:

- Poros interlaminares o de gel: de tamaño entre 5 y 25 Å por lo que su influencia en la resistencia mecánica y la permeabilidad se pueden considerar mínimas.
- Poros de aire: corresponden a burbujas cerradas atrapadas de naturaleza esférica, su tamaño es aproximadamente de 3 mm, por lo cual afectan la resistencia mecánica en especial cuando la relación agua/cemento en la mezcla es baja. En cuanto a la durabilidad pueden según el caso comportarse benéficamente.
- Poros capilares: corresponden a espacios vacíos generalmente interconectados y abiertos hacia el exterior, por lo cual son considerados la principal vía de acceso de agentes agresivos desde el exterior. Su tamaño entre 5 µm y 18 Å, es función de la relación agua/cemento y el tiempo de hidratación de la pasta de cemento. (10)

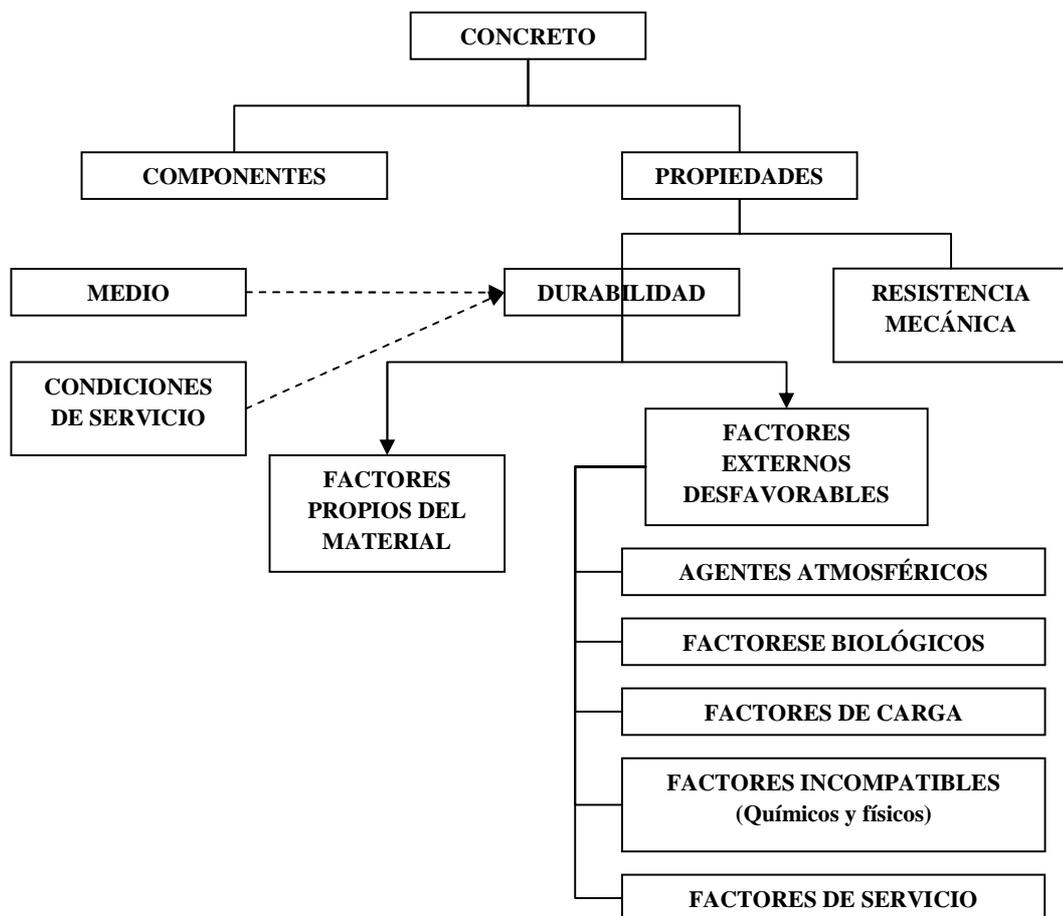


Figura 10 Principales factores que afectan la durabilidad del concreto (10)

En términos generales no debe confundirse la porosidad total con la permeabilidad, ya que es posible encontrar materiales con porosidad elevada pero baja permeabilidad.

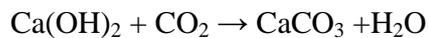
Es evidente entonces, que la permeabilidad es función directa de la porosidad capilar, la eliminación de la capilaridad continua en el hormigón incrementaría su durabilidad.

Dentro de la durabilidad del hormigón pueden destacarse las siguientes acciones físicas y químicas causantes del deterioro:

- Acciones físicas:
- Cambios térmicos o higrométricos.
 - Heladas.
 - Abrasión, erosión o cavitación.
 - Fenómenos de impacto.
 - Exposición al fuego.
 - Efecto de sobrecargas estáticas o dinámicas
- Acciones químicas:
- Carbonatación.
 - Reacción árido-álcali.
 - Ataque por sulfatos.
 - Acción de sales, ácidos, bases, aceites y grasas.
 - Acción de sales de deshielo y otros iones agresivos.
 - Acción del agua de mar.
 - Acción de aguas naturales y suelos agresivos diversos.
 - Acción de bacterias y otros microorganismos.

Dentro de las acciones químicas más comunes en el medio son:

- Carbonatación: ocurre a consecuencia de la inclusión del CO₂ 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:



- Ataque por sulfatos: se debe a la acción físico-química entre los minerales de la pasta de cemento hidratada y los iones sulfato del medio, presentes en las aguas o directamente en el terreno, y cuya consecuencia es la expansión, agrietamiento, pérdida de masa y/o desintegración.

- Ataque por cloruros: los cloruros pueden estar presentes en la mezcla fresca debido a agregados contaminados, aguas cemento y aditivos, o penetrar del exterior al hormigón endurecido como consecuencia de atmósferas o ambientes marinos, contacto directo con agua de mar, atmósferas industriales, gases de combustión de algunos productos plásticos como PVC y presencia de sales de deshielo principalmente. (10)

2.5 ADITIVOS ORGÁNICOS

Se han estudiado diversos aditivos orgánicos para concretos y hormigones con resultados positivos o al menos similares a los convencionales, en cuanto a durabilidad y resistencia. En general este tipo de aditivos resultan ser buenos plastificantes y oclisores de aire.

Con la adición de un subproducto de la producción de azúcar, la miel de remolacha, se analizan propiedades tanto en el concreto fresco como endurecido y se comparó con otro subproducto ya usado en la tecnología del concreto que es el lignosulfonato proveniente de la industria de pulpa y papel.

En cuanto a la resistencia obtenida con este subproducto, se lograron mayores valores que fueron atribuidos a la estructura densa y uniforme que se formó durante el endurecimiento, así como al contenido de aire contenido en el concreto. **(15)** En la Figura 11 se muestran los resultados obtenidos para la resistencia en concretos con diferentes porcentajes de miel de remolacha. Adicionalmente para este aditivo orgánico se presentan comportamientos similares en cuanto a la resistencia a la carbonatación y a los sulfatos con respecto al lignosulfonato.

Otro aditivo orgánico investigado es un producto proteínico proveniente del procesamiento industrial de sangre animal. En morteros, proporcionó un efecto oclisor de aire significativo y la modificación de las propiedades del mortero fresco y endurecido, con buenas expectativas de uso. (9)

En el mortero endurecido, se presenta una disminución en la resistencia a la compresión y un significativo aumento en la resistencia al congelamiento. También se destaca, mediante observación microscópica, la formación de la estructura interna de las muestras de mortero antes y después de la oclusión de aire. Las burbujas de aire formadas tienen un diámetro promedio pequeño menor de 100 μm distribuidas en el mortero (ver Figura 12 y Figura 13).

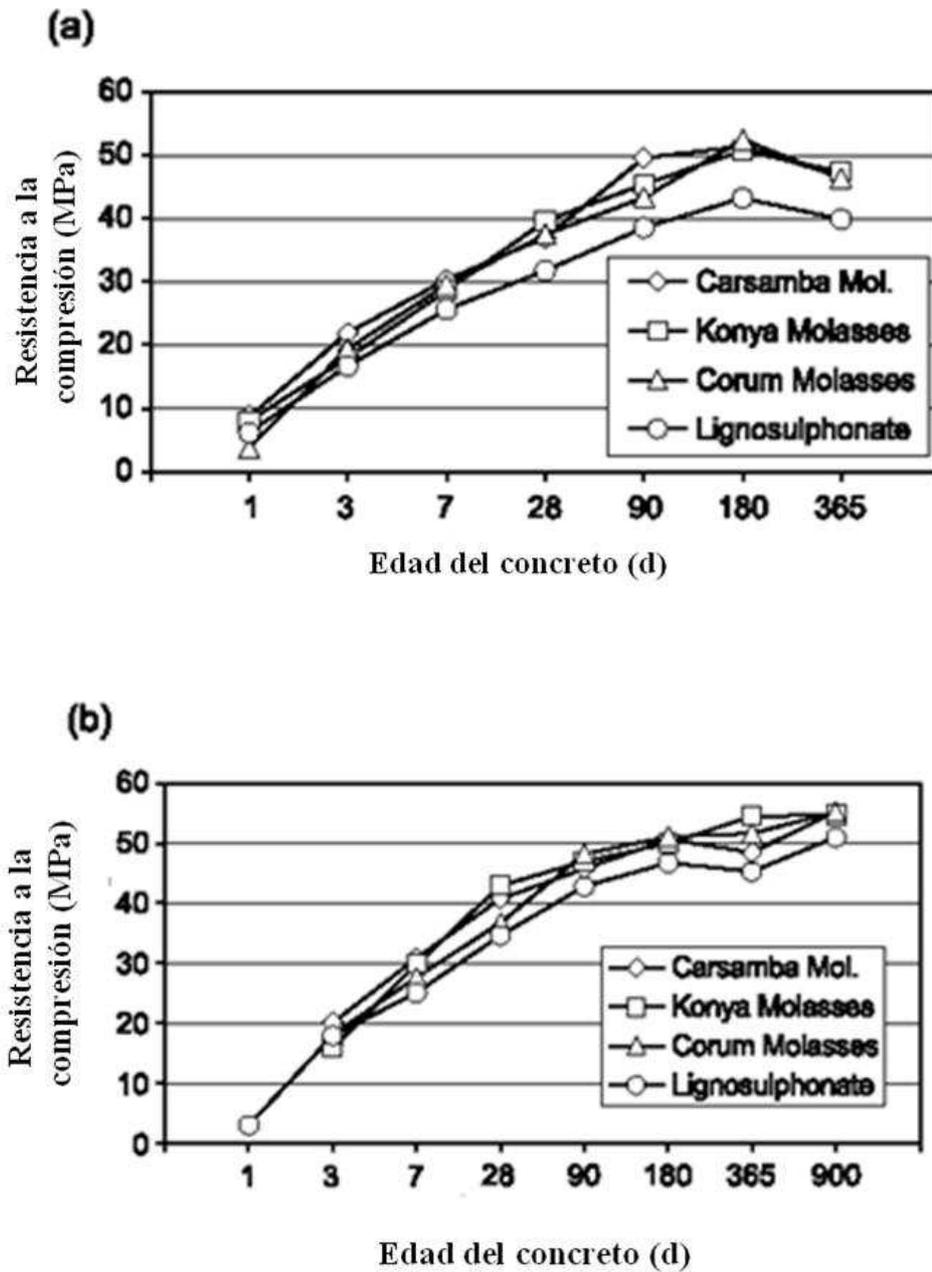


Figura 11 Resistencia a la compresión desarrollada en concretos con adiciones de (a) 0.25% y (b) 0.50% (15)



**Figura 12 Apariencia microscópica del mortero sin adición de aditivo proteínico (30X)
(9)**



**Figura 13 Apariencia microscópica del mortero con adición del 0,2 % de aditivo
proteínico (9)**

También se han investigado aditivos de origen vegetal como el obtenido de la planta de cactus. Este aditivo incrementa la plasticidad del mortero y sustancialmente la resistencia a la absorción de agua y al efecto de las sales descongelantes. (7)

En cuanto a la relación de la estructura de poros con estos aditivos orgánicos ocluidores de aire, algunos autores afirman que la cantidad de aire ocluido no debe ser un criterio único para mejorar la resistencia a factores como el hielo deshielo en el concreto; la dispersión y la influencia de la finura del poro juega un papel sumamente importante. (16)

Sólo un número limitado de materiales orgánicos son aptos para su uso como incorporadores de aire, el más usado comercialmente en el mundo es la resinas extraída del pino, principalmente del *pinus palustris*, conocida comercialmente con el nombre de Vinsol. Sus componentes activos son las sales de ácidos abiético.

Un nuevo tipo de aditivo (SJ-2) estudiado y usado comercialmente en China, fue comparado con la resina comercial Vinsol y otros aireantes como el Abietic soap (AS), en cuanto a propiedades del concreto fresco y endurecido. Este aditivo es un surfactante que tiene como componente principal las saponinas (presentes también en el jugo de fique, ver numeral 2.6). Los resultados mostraron que el aditivo era de alta calidad y la mayoría de las propiedades del concreto no son menores comparados con la resina Vinsol. En la Figura 14 y la Figura 15 se presentan los resultados obtenidos al comparar los aireantes en cuanto al asentamiento, exudación y pérdida de resistencia a la compresión. (17)

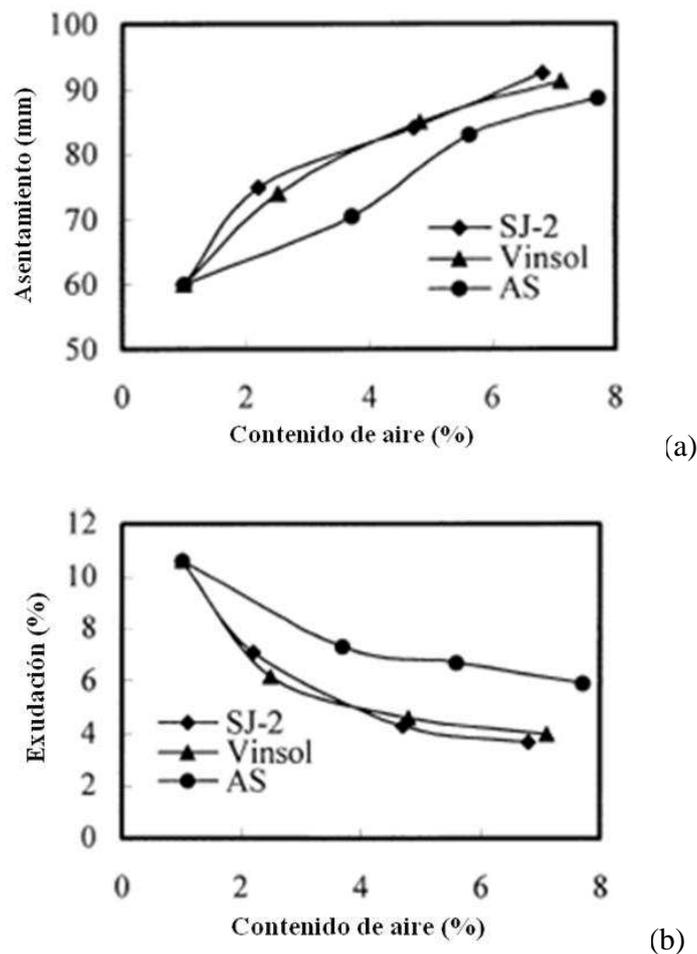


Figura 14 Efecto de algunos aireantes orgánicos en el concreto fresco, (a) asentamiento, (b) exudación (17)

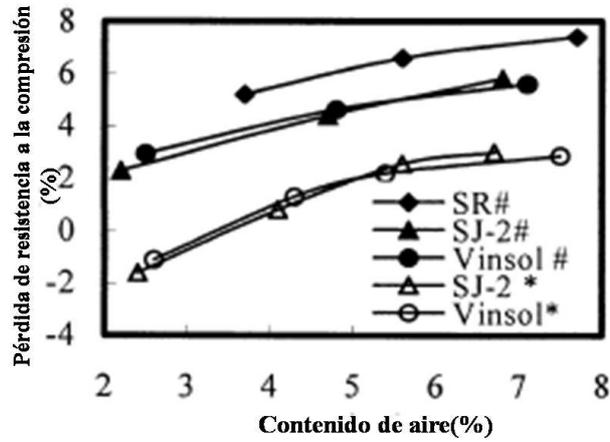


Figura 15 Pérdida de resistencia a la compresión ocasionada por algunos aireantes orgánicos (17)

Este nuevo aireante orgánico investigado, presenta gran estabilidad en las burbujas de aire incorporadas, generando un sistema de burbujas pequeño, por lo cual la superficie específica presentó valores altos; el factor de espaciado analizado en el concreto endurecido también presentó resultados apropiados (ver Figura 16)

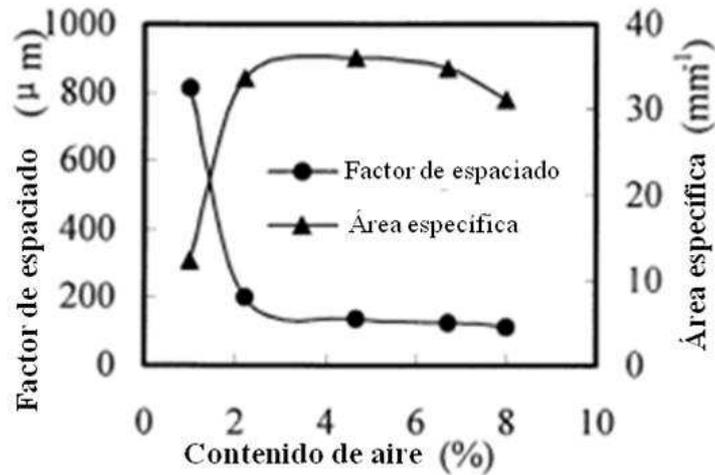


Figura 16 Factor de espaciado y superficie específica para concretos aireados con SJ-2 basado en saponinas (17)

2.6 CARACTERÍSTICAS DEL JUGO DE FIQUE

El fique es una planta conocida científicamente con el nombre de *Furcraea sp.*; este género consiste en aproximadamente 17 especies, las cuales están relacionadas con el género *Ágave*, las hojas de éstas plantas han sido usadas tradicionalmente para la extracción de fibra y algunas de sus partes con fines medicinales. En Colombia y en otras partes del mundo, el fique es utilizado para la obtención de fibras vegetales, con la que se fabrica principalmente empaques y lazos para productos agrícolas. (18)

Colombia es el mayor productor de fibra de fique en el mundo. En la actualidad se producen alrededor de 30.000 toneladas de cabuya al año destinada a la industria de empaques, hilanderías y artesanías. Los cinco principales departamentos productores: Antioquia, Boyacá, Cauca, Nariño y Santander; ofrecen el 99% de la superficie cosechada, estimada en más de 23000 hectáreas en el año 2004. (ver Figura 17) (4)



Figura 17 Cultivo de Furcraea Cabuya (4)

El cultivo de fique es complementario, esto es, se utiliza como cerca viva para división de parcelas o intercalado con otros cultivos. Específicamente en la zona visitada, Girardota (Antioquia), de donde se obtuvo el jugo para la investigación, el fique se mezcla con plantas de fríjol generando un aumento en la productividad y calidad de este último.

En el beneficio del fique, al igual que en su cultivo, se utilizan métodos tradicionales y poco tecnificados. La primera etapa es el corte, que consiste en desprender la hoja de la planta periódicamente, luego la hoja debe desfibrarse en las 48 horas siguientes al corte. Las plantaciones tecnificadas realizan el desfibrado con máquinas especialmente diseñadas

para el beneficio. Después de desfibrada la hoja, la fibra húmeda, se sumerge en un tanque de agua durante 12 a 15 horas con el propósito de eliminar los residuos de jugos y bagazos adheridos a la fibra extraída. A este proceso se le denomina fermentado. Se saca y se le realiza un enjuague, utilizando en muchos casos, los cursos de agua cercanos, ocasionando problemas de afectación del recurso hídrico por el jugo del fique; sólo en plantaciones tecnificadas se lava y el agua sobrante se dispone en pozas sépticas o tanques resumidores.

Una vez lavada, la cabuya se extiende en los secaderos elaborados generalmente de alambre o madera rústica. En cultivos tecnificados utilizan una especie de invernaderos para el secado, a fin de proteger la fibra de los cambios de clima; después se procede a sacudirla para eliminar residuos y para lograr homogenizar un poco la fibra. (4) En la Figura 18 se observa el proceso productivo del fique descrito anteriormente.

En la producción de las fibras vegetales procedentes de la planta de fique, se estima que sólo el 5%, del peso de la planta, se recoge como fibra utilizable en la industria. Los desechos generados por el desfibrado del fique corresponde al 95% restante del peso de la hoja, y está representado en el bagazo (30%) y el jugo (70%). (18)

El jugo de fique es una suspensión con características variables, dependiendo de la edad de la planta, la estación del año y la fertilidad del suelo, es de color verde ocre y corrosivo. Su densidad medida experimentalmente es de 1,02 kg/L y su pH varía entre 4 y 5; también sufre una rápida fermentación por lo cual es necesario conservarlo a bajas temperaturas menores a los 15°C. En general la composición del jugo se conoce de forma cualitativa. (18)

El jugo está conformado principalmente por agua, celulosa, materia orgánica y minerales como potasio, calcio, fósforo, úrea y nitrógeno. La Tabla 2 ilustra la composición porcentual para los componentes mencionados que corresponden a los promedios para las variedades de fiques cultivados. La materia orgánica del jugo la constituye la sacarosa, proteínas, esteroides, saponinas y sapogeninas. (19)

Tabla 2 Constituyentes del jugo de fique (19)

Componente	Cantidad (%)
Agua	85
Celulosa	6
Parte orgánica y amorfa	
- Sacarosa	
- Proteínas	
- Esteroides	
- Saponinas y sapogeninas	8
Minerales	1



Figura 18 Proceso productivo del fique, a) Hojas de fique cortadas, b) Proceso de defibrado de la hoja, c) Bagazo residual del defibrado, d) Jugo residual del defibrado, e) Fibra de fique lavada, f) Fibra de fique seca

Las saponinas son un grupo de glicósidos, combinaciones de azúcares y agliconas o sapogeninas, que forman una espuma abundante y relativamente estable cuando se agitan con agua, disminuyendo la tensión superficial por lo cual se consideran agentes tensoactivos. Existen dos clases de saponinas, las tripertenoides y las esteroidales, dado que la planta de fique se encuentra dentro de la clase *Monocotyledonae*, en la familia Agavaceae, las sapogeninas presentes en el jugo son de tipo esteroidal. (19)

La evaluación de la presencia de las saponinas se determinó en algunos estudios mediante la prueba de espuma y de hemólisis. La prueba de espuma demostró la presencia de las sapogeninas en el jugo con la formación de espuma en la muestra agitada (ver Figura 19) (18)

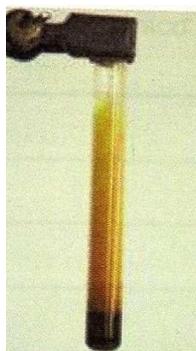


Figura 19 Prueba de espuma del jugo de fique (18)

Otras caracterizaciones realizadas por algunas investigaciones tienen que ver con algunas sustancias presentes que se describen en la Tabla 3. También algunas características físico-químicas del jugo fueron medidas a través de métodos estandarizados para el análisis de aguas (ver Tabla 4).

Tabla 3 Sustancias presentes en el jugo de fique (20)

Compuesto	Cantidad
Azúcar	131 mg x 100 ml
Nitrógeno	50,3 mg x 100 ml
Nitrógeno de úrea	107,6 mg x 100 ml
Fósforo	441 mg x 100 ml
Proteínas	3,6 mg x 100 ml
Calcio	106,2 mg x 100 ml
Potasio	57 meq x litro

Tabla 4 Caracterización físico-química del jugo de fique (18)

Parámetro	Valor
Sólidos totales (mg/L)	75.580
Sólidos disueltos (mg/L)	68.732
Sólidos suspendidos (mg/L)	6.848
Sólidos sedimentables (mL/L)	200
Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO (mg O ₂ /L)	5.635.000
Demanda Química de Oxígeno DQO (mg O ₂ /L)	6.100.000

2.7 USO DEL JUGO DE FIQUE EN MORTEROS Y HORMIGONES

En el ámbito internacional se conoce poco del fique, pero a nivel nacional se han realizado algunos estudios diagnósticos e investigaciones. Los subproductos del fique han sido estudiados para darle valor agregado mediante algún uso, dentro de los cuales se ha considerado la adición en morteros y hormigones. La gran mayoría de trabajos encontrados buscan hacer el aprovechamiento de la fibra corta, remanente en el bagazo, como refuerzo en algunos materiales, elaboración de papel, abono o como alimento para animales.

Comparativamente son pocas las investigaciones encontradas para la utilización del jugo de fique, extraído del bagazo. La mayoría propenden por la utilización en fármacos y la producción de agentes tensoactivos. Su estudio como material alternativo de construcción se limita a unas pocas investigaciones, dentro de las cuales pueden destacarse su uso como aditivo en pastas y morteros de cemento donde se caracterizó el licor de fique y se determinó un comportamiento similar al de los superplastificantes comerciales, así como también su acción como oclisor de aire hasta de un 13% producto de la presencia de sustancias tensoactivas. (21) (3)

Otra investigación importante utilizó el jugo del bagazo de fique, como aditivo en pastas y morteros de cemento Pórtland. Entre los resultados obtenidos se cuentan que este aditivo aumenta la plasticidad en los materiales cementicios frescos y disminuye la relación a/c más del 10%. Además, es posible incrementar hasta en un 50% la resistencia a compresión con respecto al mismo material sin el aditivo. Concluye que el comportamiento del aditivo de fique es similar al de los superplastificantes comerciales. (3)

En cuanto a su uso como inclusor de aire también se han llevado a cabo estudios donde se realizó una caracterización físico-química del jugo extraído de la planta del *Agave americana*, que se da de forma silvestre en España, y pertenece a la misma familia del

fique – Agavaceae-. Se probó el aditivo en pastas de cemento Pórtland y morteros. Se prepararon muestras con licor de Agave y con superplastificante comercial, a igual relación agua/cemento (Ag1 y Sp1) y a igual consistencia (Ag2 y Sp2) que el mortero testigo. En todos los morteros se adicionó un 1,1 % de aditivo respecto a la masa de cemento.

Los resultados experimentales obtenidos concluyeron que el licor de la planta Agave es una suspensión líquida, con un bajo contenido de sólidos representados fundamentalmente como materia orgánica y vegetal, y un alto contenido de agua.

En mezcla de mortero en estado fresco, la adición de licor de Agave, aumenta la consistencia hasta un 55%, con relaciones agua/cemento y disminuye el contenido de agua hasta en un 12%, conservando la consistencia constante.

Se determinó que incluye porcentajes de aire, respecto al volumen, hasta de un 13%, al parecer, producto de la presencia de sustancias tensoactivas (ver Figura 20). Aumenta considerablemente los tiempos iniciales de fraguado, hecho atribuido a la presencia de azúcar. El tiempo inicial y final de fraguado a igual relación agua/cemento, se incrementa hasta en un 200% y a igual trabajabilidad el inicial un 64% y el final un 130% aproximadamente.

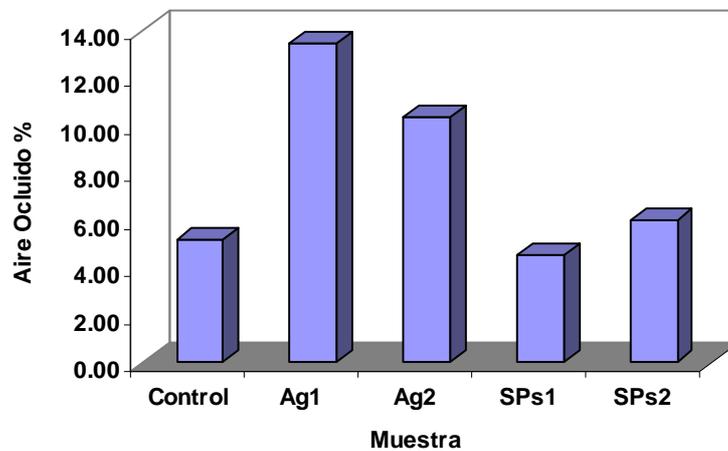


Figura 20 Cantidad de aire ocluido con adición de jugo de Agave (21)

En el mortero endurecido, el licor de la planta de Agave, incrementa la resistencia a la absorción capilar a iguales consistencias y disminuye la densidad (ver Figura 21 y Figura

22). Disminuye la resistencia a la compresión a igual relación agua/cemento y a igual consistencia y prácticamente para todas las edades (ver Figura 23). Este comportamiento es consecuencia de la inclusión de pequeñas burbujas dentro de la matriz, y del retraso en las reacciones de hidratación del cemento por efecto de la materia orgánica.

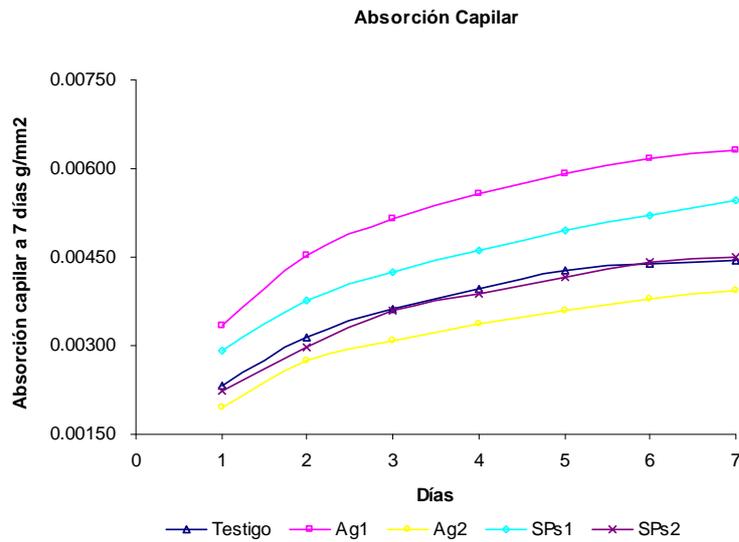


Figura 21 Absorción capilar con la adición de jugo de Agave (21)

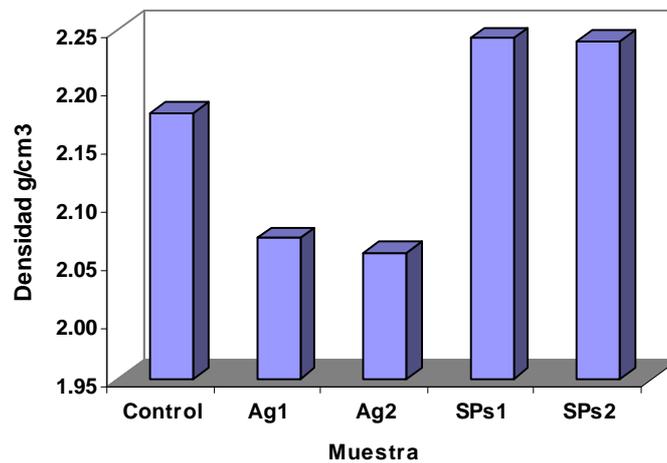


Figura 22 Densidades obtenidas con la adición de jugo de Agave (21)

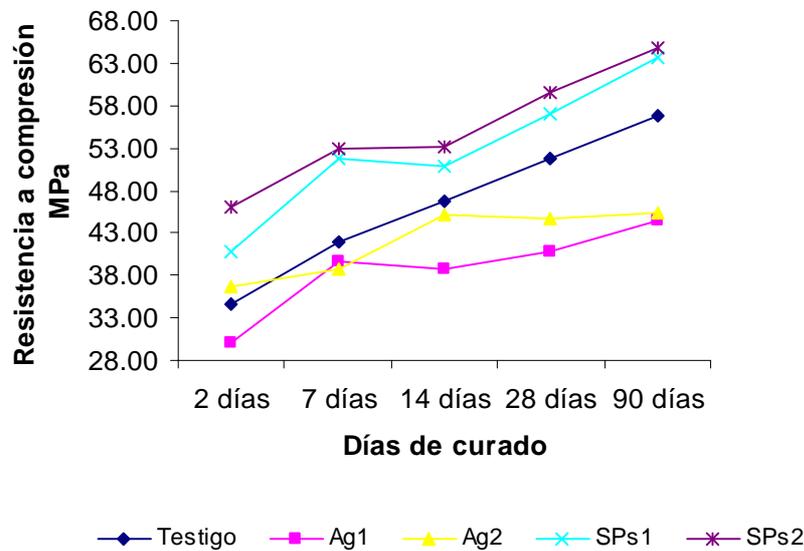


Figura 23 Resistencia a la compresión con la adición de jugo de Agave (21)

Los anteriores resultados determinaron que el licor de Agave se podría clasificar como un aditivo aireante de acuerdo con la Norma Europea. Por otra parte se afirma que las semejanzas entre *Agave* y otras plantas del género *Furcraea*, utilizadas para la obtención de fibras, puede permitir extrapolar los resultados de estas investigaciones para ser aplicadas a los residuos generados en este otro tipo de plantas. (21)

Estos estudios iniciales han vislumbrado la posibilidad de usar el jugo de fique como un nuevo aditivo en la industria de la construcción, especialmente como incorporador de aire que interfiera en la red capilar, reduzca la permeabilidad y el ingreso de agentes agresivos en concretos y morteros.

El propósito de esta investigación es buscar un uso alternativo del jugo del fique mediante el avance en el conocimiento de su acción como aditivo en morteros y hormigones y a su vez mitigando el impacto ambiental generado por el desecho de la planta y por la disminución de la producción de aditivos sintéticos. La utilización de esos residuos darían, además, valor agregado al cultivo de las plantas del género *Furcraea*, y como consecuencia incrementaría el ingreso de las familias campesinas que actualmente la cultivan.