

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Departamento de Ingeniería de la Construcción y de
Proyectos de Ingeniería Civil



Uso del licor de plantas agavaceas como aditivo en morteros y hormigones

Tesis Doctoral presentada por:

D. Juan Carlos Ochoa Botero

Dirigida por:

Pr.Dr.D. Jordi Payá Bernabeu

Pra.Dra.D^a. María Victoria Borrachero Rosado

Valencia (España), 2009

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

**Departamento de Ingeniería de la Construcción y de
Proyectos de Ingeniería Civil**

Tesis Doctoral

***Uso del licor de plantas agavaceas como aditivo en
morteros y hormigones***

Presentada por: D. Juan Carlos Ochoa Botero

Para la obtención del

Grado de Doctor por la Universidad Politécnica de Valencia

Dirigida por: Pr.Dr.D. Jordi Payá Bernabeu

Pra.Dra.D^a. María Victoria Borrachero Rosado

Tribunal Calificador:

Presidente Dr.

Secretario: Dr.

Vocales: Dr.

Dr.

Dr.

Calificación:

Valencia (España), 2009

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Colombia y a la Fundación Carolina de España por proporcionar los recursos necesarios para llevar a cabo este proyecto.

A mis directores, Jordi Payá Bernabeu y María Victoria Borrachero Rosado, por su entusiasmo y dedicación en la realización del trabajo.

A todos los integrantes del Grupo de Investigación en Química de los Materiales de Construcción, por su presencia y acompañamiento.

A todos los que amo y me aman por permitir, sin condiciones, mi ausencia.

RESUMEN

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 añadido 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 agro-industriales, como aporte a un mundo sostenible, 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 inclusor de aire que es aquel 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. Químicamente, los aireantes funcionan como surfactantes, que reducen la tensión superficial del agua de la mezcla, cuando es agitada, permitiendo la incorporación de aire. La carga de recubrimiento de las burbujas permite la mutua repulsión, evitando la coalescencia en forma de grandes burbujas.

En este trabajo se ha estudiado el comportamiento de dos extractos orgánicos de origen vegetal, procedentes del *Agave americana* y de la *Furcraea cabuya* (fique cenizo), en materiales conglomerantes como el cemento Pórtland y el yeso. Estas plantas forman parte de la familia de las Agavaceae, algunos de cuyos géneros 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. Estas plantas se caracterizan por sus hojas gruesas, lanceoladas, de color verde o azulado y algunas bordeadas de espinas. Pueden llegar a medir más de 1,75 m de largo y 30 cm de ancho; en Europa, esta familia de plantas, se da de forma silvestre y no se conoce actualmente su producción industrial.

Por tanto, el objetivo de este trabajo es verificar el efecto aireante de los extractos de las plantas *Agave americana* y *Furcraea cabuya* (fique cenizo), en morteros y hormigones de cemento Pórtland y de yeso, y su consecuencia sobre el resto de propiedades de los conglomerantes. Al

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

extracto obtenido se le realizaron ensayos de caracterización físico-química, entre otros: determinación del extracto seco convencional, pérdida por calcinación a 105 °C, contenido de halogenuros y reductores (azúcares), conductividad, determinación del pH y análisis termogravimétrico.

En las pastas de cemento se determinó la viscosidad, para distintas relaciones agua/cemento y distintos porcentajes de aditivo; mediante análisis termogravimétrico se ha determinado la producción de hidróxido de calcio en la hidratación del cemento a distintas edades; se estudió también la incidencia de los aditivos en los tiempos de fraguado. Algunos de estos ensayos también se aplicaron en pastas de yeso.

En los morteros se determinó la consistencia, el contenido de aire ocluido y la absorción capilar a 7 y 90 días de curado y se evaluaron las resistencias mecánicas a flexo-tracción y compresión. En los hormigones se estudió el efecto de los extractos en la consistencia y la exudación en la mezcla fresca. En el hormigón endurecido se estudió las características de los poros e igualmente las resistencias mecánicas a compresión. Por último se llevaron a cabo algunos estudios de durabilidad, fundamentalmente al ataque por sulfatos y a ciclos hielo-deshielo.

En este trabajo se ha demostrado que los extractos en estudio se caracterizan por su alto contenido de agua, bajo contenido de halogenuros y alto contenido de reductores; son de carácter ácido (pH 4,5) y su densidad es de 1,06 g/ml. También se demostró que estos aditivos reducen el contenido de agua de la mezcla y con ello garantizan la misma trabajabilidad que la mezcla control, y disminuyen la exudación en el hormigón fresco, pero en contraste, aumentan los tiempos de fraguado, por su aporte orgánico. En los morteros y hormigones endurecidos, reducen la absorción capilar y la densidad; las resistencias mecánicas se ven disminuidas por efecto de la inclusión de las burbujas de aire, pero casi nunca por debajo del 75% de la muestra control. Se mejora considerablemente la resistencia a la retracción-hinchamiento por acciones de los sulfatos o de ciclos hielo-deshielo.

RESUMEN

SUMMARY

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 residues, for contributing to a sustainable world, 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 air-entraining agent works as a surfactant that reduces the surface tension of the water in the mixture, allowing the incorporation of air when stirred. The electrical charge of the bubbles allows the mutual repulsion, avoiding the coalescence in form of bigger bubbles.

In this study, the behaviour of two organic extracts from vegetable origin has been studied. These extracts were prepared from the *Agave americana* and the *Furcraea cabuya* (fique cenizo) species, and were added to binding materials like Portland cement and gypsum (plaster). These plants are 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. These plants are characterized by their thick leaves, lanceolated, green or blued coloured and some of them with maginal teeth. Leaves could be more than 1,75 m long and 30 cm wide; in Europe, this family of plants, can be find in wild way and it is not known its industrial production at the moment.

Therefore, the objective of this study is to verify the air entraining effect of the extracts from *Agave americana* and *Furcraea cabuya* plants, in mortars and Portland cement concretes and plasters, and their effect on the rest of properties of the binders. Physical and chemical characterization of both

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

extracts were carried out: determination of the dry extract content, loss on calcination to 1050°C, halide content and chemical reducers (sugars), conductivity, determination of the pH and thermogravimetric analysis.

For cement pastes the viscosity was determined, for different water/cement ratios and different percentages of additives; by means of thermogravimetric analysis, the production of calcium hydroxide from the cement hydration has been determined at different curing ages; it was also studied the influence of these additives in the setting times. Some of these tests were also applied on plaster pastes.

For cement mortars the consistency was determined, the content of occluded air and the capillary absorption to 7 and 90 days curing times and the flexural and compressive mechanical strengths were evaluated. In concretes the effect of the extracts on the consistency and the bleeding were studied in fresh mixtures. In hardened concretes, the characteristics of the pores and the compressive mechanical strength were studied. Lastly, selected studies on durability were carried out: the sulphate attack and icing-thawing cycles.

In this research, it has been demonstrated that the tested extracts are characterized by their high content of water, low halide content and high content of reducers; they are acids (pH 4,5) and their density is 1,06 g/ml. It was also demonstrated that these additives reduce the content of water of the mixture, guaranteeing the same workability than the control mix, and they diminish the bleeding in the fresh concrete, but in contrast, they increase the setting times due to its organic compounds content. For mortars and for hardened concretes, the capillary absorption and the density are diminished; the mechanical strengths are also diminished by effect of the occluded air bubbles, but hardly ever below 75% of the strength of control mix. The additives improve considerably the resistance to the shrinkage-swelling due to the action of sulphates or icing-thawing cycles.

RESUMEN

RESUM

L'activitat agrícola de la majoria de països sud-americans genera, en molts casos, nombrosos residus, la qual cosa comporta un gran impacte ambiental i una preocupació sobre la manera adequada de manejar-los. La possibilitat d'usar-los en la indústria de la construcció disminuiria aquests impactes, produiria valor afegit per als conreadors i oferiria alternatives als productors de materials de construcció.

Amb plena consciència de la importància de la utilització dels residus industrials i agroindustrials com a aportació a un món sostenible, en aquest estudi s'ha treballat amb diversos materials residuals d'origen agrícola, i se n'ha cercat les possibles aplicacions en morters i formigons.

Un dels avanços tecnològics més grans en materials de construcció en els últims anys ha sigut la incorporació d'additius que permeten millorar les propietats del formigó, ja siga en estat fresc o endurit. Un d'aquests és l'additiu inclusor d'aire, que permet incorporar al formigó, durant el pastament, una quantitat de petites bombolles d'aire, uniformement repartides, que hi romanen després de l'enduriment. Alguns d'aquests additius són orgànics i es poden obtenir a partir de matèria vegetal. Químicament, els airejadors funcionen com a tensioactius: redueixen la tensió superficial de l'aigua de la barreja quan aquesta és agitada, amb la qual cosa hi permeten la incorporació d'aire. La càrrega de recobriment de les bombolles en permet la mútua repulsió, i així se n'evita la coalescència en forma de grans bombolles.

En aquest treball s'ha estudiat el comportament de dos extractes orgànics d'origen vegetal, procedents de *l'Agave americana* i de la *Furcraea cabuya* (coneguda a Sud-amèrica com *fique cenizo*), en materials conglomerants com són el ciment pòrtland i l'algeps. Aquestes plantes formen part de la família de les *Agavaceae*, alguns dels gèneres de les quals s'exploten de forma comercial en països d'Amèrica i els residus de les quals, la fibra i el licor, es poden fer servir com a additiu en materials de construcció. Aquestes plantes es caracteritzen per tenir unes fulles gruixudes, lanceolades, de color verd o blavós, algunes de les quals estan vorejades d'espines. Poden arribar a mesurar més d'1,75 m de llargària i 30 cm d'amplària; a Europa, aquesta família de plantes es dona de forma silvestre i no se'n coneix actualment la producció industrial.

Per tant, l'objectiu d'aquest treball és verificar l'efecte airejador dels extractes de les plantes *Agave americana* i *Furcraea cabuya* en morters i formigons de ciment pòrtland i d'algeps, i també les conseqüències que té

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

aquest sobre la resta de propietats dels conglomerants. Amb l'extracte obtingut s'han portat a terme assajos de caracterització fisicoquímica, entre els quals els següents: determinació de l'extracte sec convencional, pèrdua per calcinació a 1050°C, contingut d'halogenurs i reductors (sucres), conductivitat, determinació del pH i anàlisi termogravimètrica.

Quant a les pastes de ciment, se n'ha determinat la viscositat per a diverses relacions aigua/ciment i diversos percentatges d'additiu; mitjançant l'anàlisi termogravimètrica s'ha determinat la producció d'hidròxid de calci en la hidratació del ciment a diverses edats; s'ha estudiat també la incidència dels additius en el temps d'enduriment. Alguns d'aquests assajos també s'han aplicat en pastes d'algeps.

Dels morters, se n'ha determinat la consistència, el contingut d'aire que hi ha quedat atrapat i l'absorció capil·lar després de 7 i 90 dies de curació, i se n'ha avaluat les resistències mecàniques a flexotracció i compressió. En els formigons, s'hi ha estudiat l'efecte dels extractes en la consistència i l'exsudació en la barreja fresca. En el formigó endurit s'hi han estudiat les característiques dels porus i també les resistències mecàniques a compressió. Finalment s'han dut a terme alguns estudis de durabilitat, fonamentalment a l'atac per sulfats i a cicles de glaçada-desglaç.

En aquest treball s'ha demostrat que els extractes en estudi es caracteritzen per un contingut d'aigua elevat, un contingut d'halogenurs baix i un alt contingut de reductors; són de caràcter àcid (pH 4,5) i tenen una densitat d'1,06 g/ml. També s'hi ha demostrat que aquests additius redueixen el contingut d'aigua de la barreja, i d'aquesta manera hi garanteixen la mateixa treballabilitat que la barreja de control i fan minvar l'exsudació en el formigó fresc, però en contrast n'augmenten els temps d'enduriment, a causa de l'aportació orgànica que suposen. En els morters i formigons endurits, hi redueixen l'absorció capil·lar i la densitat; les resistències mecàniques hi resten disminuïdes per efecte de la inclusió de les bombolles d'aire, però quasi mai per sota del 75% de la mostra de control. Es millora considerablement la resistència a la retracció-inflament per acció de sulfats o de cicles de glaçada-desglaç.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Generalidades sobre la <i>Furcraea cabuya</i> (Fique cenizo)	1
1.1.1	Caracterización de la planta de fique	1
1.1.2	Producción	4
1.1.3	El problema ambiental	9
1.1.4	Aportes del subsector del fique al desarrollo sostenible	11
1.1.4.1	Efectos económicos	12
1.1.4.2	Efectos ambientales	13
1.2	Los aditivos en morteros y hormigones	13
1.2.1	Efectos de los aditivos en los morteros y hormigones de cemento Pórtland.	15
1.2.2	Aditivos oclusores de aire	15
1.2.3	Aditivos retardantes.	22
1.3	Investigaciones previas	23
1.3.1	Sinopsis general	23
1.3.2	Aditivos orgánicos	27
2	OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	31
3	EXPERIMENTAL	33
3.1	Materiales	33
3.1.1	Cemento Pórtland gris	33
3.1.2	Áridos finos.	33
3.1.3	Áridos gruesos	34
3.1.4	Agua	36
3.1.5	Extracto de <i>Furcraea cabuya</i> (Fique)	36
3.1.6	Extracto de <i>Agave americana</i>	36
3.1.7	Aditivo Superplastificante	41
3.1.8	Aditivo Aireante	42
3.1.9	Yeso	42
3.2	Procedimientos experimentales y equipos	43
3.2.1	Ensayos de caracterización Físico – Química	43
3.2.1.1	Determinación del extracto seco convencional	43
3.2.1.2	Pérdida por calcinación a $1050 \pm 25^\circ \text{C}$	44
3.2.1.3	Residuo insoluble en agua desionizada	46
3.2.1.4	Contenido de reductores (azúcares)	47
3.2.1.5	Contenido de halogenuros totales	50
3.2.1.6	Conductividad	52

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

3.2.1.7	Peso específico	54
3.2.1.8	Determinación del pH	54
3.2.1.9	Termogravimetría y Análisis Térmico Diferencial	55
3.2.1.10	Microscopía electrónica de barrido	56
3.2.1.11	Espectroscopía Infrarroja	57
3.2.2	Ensayos en pastas de cemento	58
3.2.2.1	Consistencia normal y tiempos de fraguado	58
3.2.2.2	Viscosidad	61
3.2.3	Ensayos en pastas de yeso	63
3.2.3.1	Determinación de la relación agua/yeso (a/y). Método de la mesa de sacudidas	63
3.2.3.2	Tiempos de fraguado para pastas de yeso. Método del aparato de Vicat	65
3.2.3.3	Resistencia mecánica a flexotracción	67
3.2.3.4	Resistencia mecánica a compresión	68
3.2.4	Ensayos en morteros de cemento Pórtland	70
3.2.4.1	Tiempo de fraguado	70
3.2.4.2	Absorción capilar	72
3.2.4.3	Índice de consistencia por medio de la mesa de sacudidas	73
3.2.4.4	Contenido de aire ocluido. Método de presión	75
3.2.4.5	Resistencias mecánicas en morteros	77
3.2.5	Ensayos en hormigones	79
3.2.5.1	Trabajabilidad. Método del cono de Abrams	79
3.2.5.2	Contenido de aire ocluido. Método de Presión	81
3.2.5.3	Agua de exudación	83
3.2.5.4	Estructura de poros	85
3.2.5.4.1	Procedimiento por barrido	85
3.2.5.4.2	Procedimiento mediante análisis de imágenes	93
3.2.5.5	Resistencia a compresión del hormigón	104
3.2.5.6	Módulo de elasticidad en compresión del hormigón.	106
3.2.6	Ensayos de durabilidad	108
3.2.6.1	Ataque por sulfatos	108
3.2.6.2	Resistencia al hielo-deshielo	109
4	Resultados y Discusión	111
4.1	Caracterización Físico – Química	112

TABLA DE CONTENIDO

4.1.1	Determinación del extracto seco convencional _____	112
4.1.2	Determinación de la pérdida por calcinación a 1050 ± 25°C. _____	116
4.1.3	Determinación del pH _____	118
4.1.4	Análisis Termogravimétrico y Análisis Térmico Diferencial. _____	121
4.1.5	Determinación del contenido de halogenuros totales _____	128
4.1.6	Conductividad _____	129
4.1.7	Determinación del contenido de reductores (azúcares) _____	131
4.1.8	Determinación del Peso Específico _____	133
4.1.9	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). _____	134
4.1.10	Análisis Infrarrojo. _____	138
4.1.11	Conclusiones de la caracterización físico-química _____	139
4.2	Pastas de cemento Pórtland gris _____	140
4.2.1	Influencia del aditivo en la consistencia de la pasta _____	140
4.2.1.1	Estudio de consistencia por Aguja de Vicat _____	140
4.2.1.2	Estudio de viscosidad en pastas _____	142
4.2.1.2.1	Influencia de la relación a/c en pastas con el mismo porcentaje de aditivo _____	148
4.2.1.2.2	Influencia del porcentaje de aditivo en pastas con la misma relación a/c. _____	155
4.2.1.3	Conclusiones al estudio de consistencia y viscosidad. _____	160
4.2.2	Influencia del aditivo en los tiempos de fraguado _____	161
4.2.2.1	Estudio del tiempo fraguado por Aguja de Vicat _____	161
4.2.2.2	Estudio, por Análisis Termogravimétrico, de la influencia de los aditivos en las reacciones de hidratación del cemento. _____	163
4.2.2.2.1	Estudio en pastas con aditivo de la planta <i>Agave americana</i> _____	166
4.2.2.2.2	Estudio en pastas con aditivo de la planta <i>Furcraea cabuya</i> (fique cenizo) _____	177
4.2.2.3	Conclusiones sobre el estudio en tiempos de fraguado e hidratación de la pasta _____	183
4.3	Pastas de Yeso _____	185
4.3.1	Influencia del aditivo en la relación agua/yeso y en la consistencia de la pasta _____	187
4.3.2	Influencia del aditivo en los tiempos de fraguado del yeso _____	190
4.3.3	Influencia del aditivo en las resistencias mecánicas a flexo-tracción y compresión de las pastas de yeso _____	201
4.3.4	Conclusiones sobre pastas de yeso _____	206
4.4	Morteros de cemento Pórtland _____	207

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

4.4.1	Influencia del aditivo en la consistencia	207
4.4.2	Conclusiones sobre la influencia del aditivo en la consistencia	211
4.4.3	Influencia del aditivo en los tiempos de fraguado del mortero	211
4.4.4	Conclusiones sobre la influencia del aditivo en los tiempos de fraguado	214
4.4.5	Influencia del aditivo en la absorción capilar	214
4.4.5.1	Absorción capilar a los 7 días de curado	215
4.4.5.2	Absorción capilar a los 90 días de curado	217
4.4.6	Conclusiones de la influencia del aditivo en la absorción capilar	220
4.4.7	Influencia del aditivo en el contenido de aire ocluido	220
4.4.8	Conclusiones de la influencia del aditivo en el contenido de aire ocluido	223
4.4.9	Influencia del aditivo en las resistencias mecánicas	223
4.4.9.1	Resistencia mecánica a flexo-tracción	224
4.4.9.2	Resistencia mecánica a compresión	227
4.4.10	Conclusiones de la influencia del aditivo en las resistencias mecánicas de los morteros	231
4.5	Hormigones de cemento Pórtland	232
4.5.1	Estudio en el hormigón fresco	233
4.5.1.1	Influencia del aditivo en la trabajabilidad del hormigón	233
4.5.1.2	Influencia de los aditivos en la relación a/c y en la trabajabilidad	234
4.5.1.3	Influencia del aditivo en el porcentaje de aire ocluido del hormigón	239
4.5.1.4	Influencia del aditivo en el agua de exudación	242
4.5.1.5	Influencia del aditivo en función del tiempo de amasado	247
4.5.1.6	Conclusiones del estudio en hormigón fresco	249
4.5.2	Estudio en el hormigón endurecido	250
4.5.2.1	Influencia del aditivo en la estructura de poros del hormigón endurecido	250
4.5.2.2	Influencia de licor de <i>Agave americana</i> en la estructura de poros	251
4.5.2.3	Influencia de licor de la <i>Furcraea Cabuya</i> (fique cenizo), en la estructura de poros	259
4.5.2.4	Influencia del aditivo en las resistencias mecánicas	265
4.5.2.4.1	Resistencia a compresión	265
4.5.2.4.2	<i>Agave americana</i>	265
4.5.2.4.3	<i>Furcraea cabuya</i> (fique cenizo). Variación del porcentaje de aditivo para hormigones con igual asentamiento	268

TABLA DE CONTENIDO

4.5.2.4.4	<i>Furcraea cabuya</i> (fique cenizo). Efecto de la relación a/c sobre la resistencia de los hormigones _____	269
4.5.2.4.5	<i>Furcraea cabuya</i> (fique cenizo). Influencia del tipo de cemento sobre la resistencia a compresión. _____	274
4.5.2.4.6	<i>Furcraea cabuya</i> (fique cenizo). Influencia del tiempo de amasado _____	276
4.5.2.4.7	Módulo de elasticidad _____	277
4.5.3	Conclusiones del estudio en hormigones endurecidos _____	280
4.6	Estudios de durabilidad _____	281
4.6.1	Influencia del aditivo en morteros expuestos a una solución de sulfatos _____	282
4.6.1.1	Estudio de la masa en morteros con aditivo _____	286
4.6.1.2	Estudio del cambio de longitud de los morteros con aditivo _____	289
4.6.2	Influencia del aditivo en la resistencia al efecto hielo-deshielo _____	291
4.6.3	Conclusiones de los estudios de durabilidad _____	294
5	CONCLUSIONES _____	295
6	ANEXOS _____	301
7	REFERENCIAS _____	303

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1	Mapa físico de Colombia y departamentos productores de fique (tomada de Internet www.mapa-colombia.com)	5
Ilustración 2	a) Producción de fique en toneladas por año en Colombia b) rendimiento de fique obtenido por departamento en el año agrícola 2002. (Gráficas del autor).	6
Ilustración 3	Gráfico del proceso productivo del fique.	7
Ilustración 4	a) Sembrado de fique combinado con frijol; b) Hojas de fique cortadas; c) Desfibrado de la hoja de fique; d) Bagazo residual del proceso de desfibrado; e) Fibra de fique recién desfibrada; e) Fibra de fique lavada y seca (Fotografías del autor)	8
Ilustración 5	Distribución de las moléculas del surfactante en la interfase agua-aire	16
Ilustración 6	Interacción entre las burbujas de aire y las partículas de cemento	16
Ilustración 7	Relación entre la durabilidad al congelamiento y el factor de espaciado de las burbujas de aire ocluido	19
Ilustración 8	Gráfico de los efectos de algunos parámetros del hormigón en el volumen total de aire ocluido	20
Ilustración 9	Relación entre la porosidad capilar y la resistencia promedio de varios materiales	21
Ilustración 10	Resistencia relacionada con el contenido de cemento para cementos con y sin inclusión de aire	21
Ilustración 11	Gráficos de la resistencia a la compresión desarrollada en hormigones con adiciones de (a) 0,25% y (b) 0,50%	28
Ilustración 12	Apariencia microscópica del mortero sin adición de aditivo proteínico (30X)	29
Ilustración 13	Apariencia microscópica del mortero con adición del 0,2 % de aditivo proteínico	29
Ilustración 14	Curva granulométrica del árido fino	34
Ilustración 15	Curva granulométrica árido grueso de 19,0 mm	35
Ilustración 16	Curva granulométrica árido grueso de 9,51 mm	35
Ilustración 17	Secciones de la hoja de <i>Agave americana</i>	38

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

Ilustración 18. Fotografía de equipos para el ensayo de extracto seco convencional. a) desecador, b) estufa con ventilación forzada con regulador termostático $105 \pm 3^{\circ}$ C, c) balanza analítica. _____	44
Ilustración 19. Fotografía de equipo para ensayo de pérdida por calcinación a $1050 \pm 25^{\circ}$ C. a) cápsulas de platino, b) horno mufla _____	45
Ilustración 20. Fotografía del equipo para la determinación del residuo insoluble en agua destilada. a) desecador, cápsulas de porcelana y embudo de placa filtrante de vidrio poroso, b) bomba de vacío _____	47
Ilustración 21. Diagrama del procedimiento para el ensayo de contenido de reductores (azúcares) _____	49
Ilustración 22. Fotografía del equipo utilizado para el ensayo de contenido de reductores (azúcares). a) balanza analítica, b) equipo de filtrado _____	50
Ilustración 23. Diagrama para la preparación de la muestra y procedimiento para el ensayo de contenido halogenuros totales _____	52
Ilustración 24. Fotografía del equipo para el ensayo de conductividad eléctrica _____	53
Ilustración 25. Fotografía del pH-metro de sensibilidad 0,01 unidades de pH _____	55
Ilustración 26. Fotografía del equipo utilizados en el ensayo de termogravimetría y análisis térmico diferencial. a) crisoles de aluminio y alúmina; b) termobalanza TGA 850 Metter - Toledo _____	56
Ilustración 27. Fotografía del Microscopio Electrónico de Barrido SEM _____	57
Ilustración 28. Fotografía del Espectrómetro Mattson Genesis II F.T.I.R _____	58
Ilustración 29. Fotografía del equipo utilizado para la los ensayos de consistencia normal y tiempos de fraguado en pastas de cemento. a) aparato de Vicat, b) Sonda para determinar el agua de consistencia normal en pastas de cemento, c) aguja para determinar el tiempo inicial de fraguado en pastas y morteros de cemento, d) aguja para determinar el tiempo final de fraguado en pastas de cemento. _____	61
Ilustración 30. Fotografía del equipo utilizado para el ensayo de viscosidad. a) Viscosímetro Bohlin Visco 88 BV, b) _____	

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

	mezclador de laboratorio Hidolph Type RZR1, con hélice con doble pala helicoidal, c) detalle de la hélice _____	63
Ilustración 31.	Fotografía de equipo para la determinación del relación agua/yeso. a) amasadora mezcladora según norma EN 196-1: 1994, b) mesa de sacudidas y molde cónico según norma EN 459-2:2001 _____	65
Ilustración 32.	Fotografía de los aparatos utilizados en los ensayos mecánicos a flexotracción en probetas de yeso. a) amasadora mezcladora según norma EN 196-1: 1994, b) moldes con base, c) desecador, d) prensa a flexión. _____	68
Ilustración 33.	Fotografía de prensa utilizada en los ensayos a compresión de yesos _____	69
Ilustración 34.	Fotografía del equipo utilizado para el ensayo en morteros del índice de consistencia en mesa de sacudidas. a) Amasadora para morteros; b) Mesa de sacudidas _____	75
Ilustración 35.	Fotografía de Aerómetro para el ensayo de aire ocluido en morteros _____	77
Ilustración 36.	Fotografías del equipo utilizado en los ensayos de resistencia mecánica de morteros. a) Moldes para probetas de mortero; b) Compactadora de probetas de mortero; c) Prensa para ensayos de resistencia a flexotracción; d) Prensa para ensayos de resistencia a compresión _____	78
Ilustración 37.	Fotografía del equipo para determinar la trabajabilidad del hormigón _____	79
Ilustración 38.	Esquema del procedimiento del ensayo de asentamiento con el cono de Abrams. _____	80
Ilustración 39.	Fotografía del aerómetro de presión Tipo B _____	81
Ilustración 40.	Fotografía del ensayo de exudación en hormigones _____	85
Ilustración 41.	Fabricación de una probeta de 150mm x 100mm x 40 mm a partir de una muestra de 150 mm (dimensiones aproximadas) _____	86
Ilustración 42.	Distribución de líneas de barrido en la superficie para ensayo _____	87
Ilustración 43.	Estimación durante el examen microscópico de la longitud de una cuerda l para bordes rotos de lo huecos de aire. 1) Línea transversal ficticia; 2) ninguna cuerda interceptada l _____	89

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

Ilustración 44. Diagrama de flujo del procedimiento para el análisis de poros mediante microscopía asistida por computador _____	95
Ilustración 45. Aplicación de tinta para preparación de muestras de hormigón a) tinta usada para la tinción; b) homogenización de tinta en el rodillo; c) aplicación de tinta a la muestra de hormigón _____	96
Ilustración 46. Aplicación de pasta de blanco de cinc para preparación de muestras de hormigón a) preparación de pasta de blanco de cinc; b) aplicación de capa de blanco de cinc a la muestra; c) muestra refrigerada y cubierta con pasta de blanco de cinc _____	97
Ilustración 47. Microscopio y cámara usados en la captura de imágenes ____	99
Ilustración 48. Diagrama esquemático del análisis de imágenes de microscopía óptica cuantitativa asistido por computador ____	100
Ilustración 49. Proceso de segmentación de la imagen a) imagen a procesar; b) detección de blanco de los poros _____	101
Ilustración 50. Corrección de la imagen binaria a Definición del contorno de poros; b) llenado de los poros; c) evitar poros fuera del campo visual _____	103
Ilustración 51. Fotografías del equipo utilizado en la elaboración de probetas para resistencia a compresión en hormigones. a) molde cilíndrico para hormigones; b) molde cúbico para cilindros; c) amasadora; d) mesa de vibrado _____	106
Ilustración 52. Fotografía de prensa para medir la resistencia a compresión de los hormigones _____	106
Ilustración 53. Fotografías de los captadores extensométricos utilizados para medir el módulo de elasticidad en hormigones _____	107
Ilustración 54. Fotografía del equipo utilizado en el ensayo de expansión retracción de morteros expuesto a una solución de sulfatos. a) Moldes para probetas; b) aparato para la medida de expansión retracción _____	109
Ilustración 55. Gráfico de las secciones de la hoja de la planta de <i>Agave americana</i> _____	113
Ilustración 56. Gráfico del extracto seco convencional de los distintos aditivos _____	116
Ilustración 57. Gráfico de pérdida por calcinación de los diferentes aditivos _____	118

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 58. Gráficos de pH a) para el licor del <i>Agave americana</i> en estado puro b) para el licor de <i>Agave americana</i> diluido en agua desionizada _____	119
Ilustración 59. Gráfico de pH para los diferentes aditivos _____	121
Ilustración 60. Gráfico del Análisis Termogravimétrico del licor de <i>Agave americana</i> _____	122
Ilustración 61. Gráficos del Análisis Térmico a) curvas de análisis termogravimétrico TG, b) curva derivadas de análisis termogravimétrico (DTG) y c) curvas de análisis térmico diferencial (SDTA) para licor de <i>Agave americana</i> seco con piel, sin piel y liofilizado con piel, y para el extracto de fique____	124
Ilustración 62. Micrografía y espectro del residuo calcinado del licor de la hoja de a) <i>Agave americana</i> ; b) Fique cenizo. _____	126
Ilustración 63. Gráfico de contenido de halogenuros totales _____	129
Ilustración 64. Gráfico de conductividad del licor de <i>Agave americana</i> , fique, Sikament FF y agua potable _____	131
Ilustración 65. Fotografía del precipitado producto de la disolución neutra de sustancia reductoras con el líquido de Fehling. ____	132
Ilustración 66. Micrografías y espectros de fluorescencia para el extracto de <i>Agave americana</i> _____	136
Ilustración 67. Micrografías de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectros de fluorescencia para el extracto de <i>Furcraea cabuya</i> – fique cenizo _____	137
Ilustración 68. Espectro infrarrojo del extracto de licor de <i>Agave americana</i> seco y liofilizado _____	139
Ilustración 69. Consistencia normal en pastas de cemento Pórtland y aditivo de licor de <i>Agave americana</i> , fique y superplastificante _____	142
Ilustración 70. Gráfico de la curva de flujo típica obtenida en la que se observa la histéresis al realizar el ensayo con el ciclo completo, ascendente y descendente (fuente 96) _____	147
Ilustración 71. Interacciones entre cemento – aire, agua y moléculas del aditivo aireante. _____	148
Ilustración 72 Evolución del esfuerzo de cizalla con la velocidad de corte para pastas de cemento gris a) influencia de la relación a/c en las muestras control b) influencia de la relación a/c con un 5% de aditivo. Marcadores-datos experimentales, líneas-ajuste con al ecuación de Herschel Bulkley _____	151

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

Ilustración 73. Evolución del esfuerzo de cizalla con la velocidad de corte para pastas de cemento gris a) influencia del porcentaje de aditivo en la relación 0,32 b) influencia del porcentaje de aditivo en la relación a/c 0,40 c) influencia del porcentaje de aditivo en la relación 0,45. Marcadores-datos experimentales, líneas-ajuste con al ecuación de Herschel Bulkley _____	152
Ilustración 74 Variación del esfuerzo con la velocidad de cizalla para las pastas de cemento gris I-52,5R. Influencia de la relación a/c. Ajustes lineales; marcadores-datos experimentales, líneas-ajustes _____	154
Ilustración 75 Evolución del esfuerzo de cizalla con la velocidad de corte para pastas de cemento gris. Influencia del porcentaje de aditivo con una relación a/c de 0,40. Marcadores-datos experimentales, líneas-ajuste con al ecuación de Herschel Bulkley _____	156
Ilustración 76 Evolución del esfuerzo de cizalla con la velocidad de corte para pastas de cemento gris. Influencia del porcentaje de aditivo con una relación a/c de 0,50. Marcadores-datos experimentales, líneas-ajuste con al ecuación de Herschel Bulkley _____	157
Ilustración 77 Variación del esfuerzo con la velocidad de cizalla para las pastas de cemento gris I-52,5R. Influencia del porcentaje de aditivo. Ajustes lineales; marcadores-datos experimentales, líneas-ajustes _____	159
Ilustración 78. Tiempos de fraguado en pastas de cemento Pórtland y aditivo de licor de <i>Agave americana</i> y fique. Aguja de Vicat ____	162
Ilustración 79 Curva DTG para pasta de cemento control, 0% de aditivo, a 28 días de curado _____	165
Ilustración 80. Gráficos de curvas DTG para pastas de cemento Pórtland con distintos porcentajes de aditivo. Relaciones a/c 0,32 y 0,50 _____	170
Ilustración 81. Gráfico de la cantidad de cal producida en las pastas de cemento relación a/c 0,32 _____	172
Ilustración 82 Gráfico de la cantidad de cal producida en las pastas de cemento relación a/c 0,50 _____	172
Ilustración 83 Gráfico de los porcentajes de agua combinada de los hidratos (P_H) para pastas a/c 0,32 a diferentes edades de curado _____	175

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 84	Gráfico de los porcentajes de agua combinada de los hidratos (P_H) para pastas a/c 0,50 a diferentes edades de curado	177
Ilustración 85.	Gráfico de la curva DTG para pastas de cemento Pórtland a distintas edades de curado y un 5% de extracto de fique	178
Ilustración 86.	Gráfico de la curva DTG para pastas de cemento Pórtland con distintos porcentajes de aditivo de fique a 1 día de curado.	179
Ilustración 87.	Gráfico del porcentaje de $Ca(OH)_2$ en pastas de cemento Pórtland con relación a/c 0,40. <i>Furcraea cabuya</i> (fique cenizo)	180
Ilustración 88.	Gráfico del porcentaje de $Ca(OH)_2$ en pastas de cemento Pórtland con relación a/c 0,40. <i>Agave americana</i> .	181
Ilustración 89.	Gráfico de los porcentajes de agua combina de los hidratos (P_H) para pastas a/c 0,40 con licor de fique a diferentes edades de curado	183
Ilustración 90.	Gráficas de la relación entre CH aditivo/CH control, a) fique; b) <i>Agave americana</i>	185
Ilustración 91.	Influencia del aditivo en la relación a/y y en la consistencia de la pasta de yeso	189
Ilustración 92.	Gráficos a) tiempos de fraguado inicial y final a igual consistencia; b) tiempos de fraguado inicial y final a igual relación a/y; c) comparación entre tiempos de fraguado inicial a igual consistencia e igual relación a/y; d) comparación entre tiempos de fraguado finales a igual consistencia e igual relación a/y.	193
Ilustración 93.	Gráficos a) porcentaje de dihidrato formado a igual relación a/y; b) porcentaje de dihidrato formado a igual consistencia c) evolución de la formación del dihidrato con un 3% de aditivo; d) evolución de la formación del dihidrato con un 5% de aditivo	200
Ilustración 94.	Gráficos de yesos: a) resistencia a flexo-tracción a igual consistencia vs., densidad de la probeta seca; b) resistencia a compresión a igual consistencia vs., densidad de la probeta seca	203
Ilustración 95.	Gráficos de la resistencia mecánica a flexo-tracción y compresión en pastas de yeso a igual relación a/y: a)	

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

	resistencia a flexo-tracción a igual relación a/y; b) resistencia a compresión a igual relación a/y _____	204
Ilustración 96.	Gráficos de comparación entre las resistencias mecánicas: a) comparación entre resistencia a flexo-tracción a igual consistencia e igual relación a/y; b) comparación entre resistencia a compresión a igual consistencia e igual relación a/y _____	205
Ilustración 97.	Gráficos de consistencia en morteros con aditivo de <i>Agave americana</i> y superplastificante _____	209
Ilustración 98.	Gráfico de consistencia en morteros con 1%, 3% y 5% de aditivo de <i>Agave americana</i> y aireante Micro-Air 100 _____	211
Ilustración 99.	Gráficos de tiempos de fraguado en mortero a) tiempos de fraguado a igual relación a/c; b) tiempos de fraguado a igual consistencia _____	214
Ilustración 100.	Gráficos de la absorción capilar en morteros a los 7 días de curado a) a/c constante; b) igual consistencia _____	217
Ilustración 101.	Gráficos de la absorción capilar en morteros a los 90 días de curado a) a/c constante; b) igual consistencia _____	218
Ilustración 102.	Gráficos comparativos de la absorción capilar a 7 y 90 días de curado a) igual a/c; b) igual consistencia _____	219
Ilustración 103.	Gráficos comparativos del aire ocluido en estado fresco por el método de presión y la densidad de las probetas a) igual a/c; b) igual consistencia _____	222
Ilustración 104.	Gráfico comparativo de resistencia a flexo-tracción de probetas de mortero a) igual a/c; b) igual consistencia; c) distintos porcentajes de aditivo e igual consistencia _____	227
Ilustración 105.	Gráficos comparativos de resistencia a compresión de probetas de mortero a) igual a/c; b) igual consistencia; c) distintos porcentajes de aditivo e igual consistencia _____	230
Ilustración 106.	Gráfico comparativo de la resistencia a compresión, a igual consistencia, entre el 75 % del mortero control y el mortero con un 1% y un 3% de licor de <i>Agave americana</i> _____	232
Ilustración 107.	Gráfico del efecto del licor de <i>Agave americana</i> en la trabajabilidad del hormigón. Disminución del agua de amasado y efecto en la relación a/c _____	235
Ilustración 108.	Gráficos comparativos del asentamiento y la relación a/c del hormigón fresco con diferentes cantidades de licor de <i>Furcraea cabuya</i> _____	239

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 109. Gráficos de la cantidad de aire ocluido en el hormigón fresco con diferentes tipos de árido, distintos tipos de cemento y aditivo de fique _____	241
Ilustración 110. Gráfico comparativo entre asentamiento y aire ocluido en el hormigón fresco. Cemento tipo I y árido grueso de 19,0mm _____	242
Ilustración 111. Gráfico de la exudación en hormigones con aditivo del licor del <i>Agave americana</i> y la relación a/c _____	244
Ilustración 112. Gráficos de aire ocluido vs. Exudación. Aditivo de fique _____	246
Ilustración 113. Gráficos de la influencia del tiempo de amasado en el hormigón _____	249
Ilustración 114. Fotografías de microscopía óptica para el ensayo de estructura de poros en hormigón _____	251
Ilustración 115. Gráfico de la distribución del número de poros por milímetro cúbico de hormigón. _____	253
Ilustración 116. Gráfico del contenido total de aire en hormigones endurecidos (calculado a partir de la ecuación 17) _____	254
Ilustración 117. Gráfico de la superficie específica de los poros en el hormigón endurecido. Aditivo de <i>Agave americana</i> _____	256
Ilustración 118. Gráfico de la relación pasta/aire en los hormigones endurecidos. Aditivo de <i>Agave americana</i> _____	257
Ilustración 119. Gráfico del espaciado de los poros en el hormigón en estado endurecido. Aditivo <i>Agave americana</i> _____	259
Ilustración 120. Fotografías de microscopía óptica para el ensayo de estructura de poros para el aditivo <i>Furcraea Cabuya</i> _____	260
Ilustración 121. Comparación de poros con diámetro equivalente similar y diferencias en la redondez _____	261
Ilustración 122. Distribución de tamaño de poros en el hormigón con <i>Furcraea Cabuya</i> _____	262
Ilustración 123. Gráficas de la norma ASTM C-457 para estimar el factor de espaciado _____	263
Ilustración 124 Gráfico de la relación pasta/aire en los hormigones con <i>Furcraea cabuya</i> endurecidos _____	264
Ilustración 125 Gráfico del espaciado de los poros en el hormigón en estado endurecido con <i>Furcraea cabuya</i> _____	264
Ilustración 126. Gráficos de resistencia compresión en hormigones con <i>Agave americana</i> . _____	267

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

Ilustración 127	Gráfico de la resistencia a compresión en hormigones con licor de fique. Igual asentamiento. _____	269
Ilustración 128.	Gráfico de la resistencia a compresión en hormigones con licor de fique. Igual relación a/c, cemento tipo I y árido grueso 19,0 mm. _____	271
Ilustración 129.	Gráfico de las relaciones de resistencia a compresión en hormigones con licor de fique. Relación a/c 0,45, cemento tipo I y árido grueso 19,0 mm. _____	272
Ilustración 130.	Gráfico de las relaciones de resistencia a compresión en hormigones con licor de fique. Relación a/c 0,70, cemento tipo I y árido grueso 19,0 mm. _____	273
Ilustración 131.	Gráfico de las relaciones de resistencia a compresión en hormigones con licor de fique. Tipos de cemento _____	275
Ilustración 132.	Gráfico de la resistencia a compresión en hormigones con licor de fique. Distintos tiempo de amasado. _____	276
Ilustración 133.	Gráficos del módulo de elasticidad en hormigones con aditivo de licor de <i>Furcraea cabuya</i> . a) Módulo de elasticidad real vs. Resistencia a compresión; b) Módulo de elasticidad teórico vs. Resistencia a compresión. _____	279
Ilustración 134.	Gráfico de la variación de la masa en probetas curadas al aire con distintos porcentajes de aditivo de <i>Agave</i> . _____	287
Ilustración 135.	Gráfico de la variación de la masa sometida a un ataque por sulfato de sodio y con distintos porcentajes de aditivo de <i>Agave</i> _____	288
Ilustración 136.	Fotografía de probetas sometidas a un ataque por sulfato de sodio _____	289
Ilustración 137.	Gráfico de la variación de la longitud en probetas curadas al aire con distintos porcentajes de aditivo. _____	290
Ilustración 138.	Gráfico de la variación de la longitud de probetas con distintos porcentajes de aditivo, sometidas a un ataque por sulfato de sodio. _____	291
Ilustración 139.	Gráfico del cambio de longitud por efecto del hielo deshielo para varios porcentajes de aditivo del licor de la <i>Furcraea cabuya</i> _____	294

ÍNDICE DE CUADROS

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación Taxonómica de la <i>Furcraea cabuya</i> ⁽¹⁾ _____	1
Cuadro 2. Características de la especie <i>Furcraea cabuya</i> _____	3
Cuadro 3. Composición de la hoja de fique y porcentaje de cada componente _____	4
Cuadro 4. Cuadro comparativo de la concentración letal media entre varios plaguicidas y el jugo de fique _____	10
Cuadro 5. Clasificación de los aditivos por su función en los hormigones () _____	14
Cuadro 6. Composición química de los cementos _____	33
Cuadro 7. Análisis químico del agua de amasado red Universidad Politécnica de Valencia _____	36
Cuadro 8. Análisis químico del agua de amasado red de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín _____	36
Cuadro 9. Clasificación Taxonómica del <i>Agave americana</i> _____	37
Cuadro 10. Características de las hojas de <i>Agave americana</i> utilizadas en los ensayos _____	40
Cuadro 11. Peso del licor del <i>Agave americana</i> extraído de las hojas _____	41
Cuadro 12. Características físicas del Sikament FF _____	42
Cuadro 13. Características físicas del Micro-Air 100 _____	42
Cuadro 14. Características físicas del yeso tipo YG _____	43
Cuadro 15. Tabla modelo para la determinación de la distribución de los huecos de aire _____	92
Cuadro 16. Especificaciones técnicas del microscopio utilizado para la captura de imágenes _____	98
Cuadro 17. Especificaciones cámara de video utilizada para la captura de imágenes _____	98
Cuadro 18. Extracto seco convencional para los diferentes aditivos _____	115
Cuadro 19. Pérdida por calcinación de los aditivos _____	117
Cuadro 20. Determinación de pH _____	120
Cuadro 21. Resultados del Análisis Termogravimétrico del extracto seco de <i>Agave americana</i> seco con piel _____	126

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

Cuadro 22. Resultados del Análisis Termogravimétrico del extracto liofilizado de <i>Agave americana</i> liofilizado con piel _____	127
Cuadro 23. Resultados del Análisis Termogravimétrico del extracto seco de <i>Agave americana</i> seco sin piel _____	127
Cuadro 24. Resultados del Análisis Termogravimétrico del extracto seco del Fique _____	128
Cuadro 25. Determinación de la conductividad _____	130
Cuadro 26. Valores de los porcentajes de glucosa y almidón que producen efectos retardantes de fraguado en el cemento Pórtland de acuerdo a Cabrera y Nwaubani ⁽⁸²⁾ _____	132
Cuadro 27. Determinación del peso específico <i>Agave americana</i> _____	133
Cuadro 28. Dosificación de las pastas para el ensayo de consistencia normal en la pastas de cemento Pórtland y licor de <i>Agave americana</i> . Penetración de la aguja de Vicat _____	141
Cuadro 29 Condiciones establecidas para las pastas de cemento gris I-52,5R ensayadas por viscosimetría. Relación a/c 0,32 _____	149
Cuadro 30 Condiciones establecidas para las pastas de cemento gris I-52,5R ensayadas por viscosimetría. Relación a/c 0,40 _____	149
Cuadro 31 Condiciones establecidas para las pastas de cemento gris I-52,5R ensayadas por viscosimetría. Relación a/c 0,45 _____	150
Cuadro 32 Parámetros de ajuste de la ecuación Herschel Bulkley para pastas de cemento gris I-52,5R adicionadas con 5% de licor de <i>Agave americana</i> . Influencia de la relación a/c _____	153
Cuadro 33 Parámetros de los ajustes lineales de las curva de flujo para las pastas de cemento gris I-52,5R. Influencia de la relación a/c. _____	155
Cuadro 34 Condiciones establecidas para las pastas de cemento gris I-52,5R ensayadas por viscosimetría. Distintos porcentajes de aditivo y relación a/c constante 0,4 _____	155
Cuadro 35. Condiciones establecidas para las pastas de cemento gris I-52,5R ensayadas por viscosimetría. Distintos porcentajes de aditivo y relación a/c 0,5 _____	157
Cuadro 36 Parámetros de ajuste de la ecuación Herschel Bulkley para pastas de cemento gris I-52,5R adicionadas con 5% de licor de <i>Agave americana</i> . Influencia de la relación a/c _____	158
Cuadro 37 Parámetros de los ajustes lineales de las curva de flujo para las pastas de cemento gris I-52,5R. Influencia del porcentaje de aditivo. _____	160

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 38. Dosificación de las pastas para el ensayo de tiempos de fraguado en las pastas de cemento Pórtland y licor de <i>Agave americana</i> , y de fique _____	162
Cuadro 39. Dosificación de las pastas para Análisis Térmico. <i>Agave americana</i> _____	166
Cuadro 40 Cantidad de cal presente en las pastas con cemento relación a/c 0,32 y 0,5. Influencia del porcentaje de aditivo. _____	171
Cuadro 41 Porcentajes de agua combinada de los hidratos (P_H) en las pastas a/c 0,32 a diferentes edades de curado _____	174
Cuadro 42 Porcentajes de agua combinada de los hidratos (pH) en las pastas a/c 0,50 a diferentes edades de curado _____	176
Cuadro 43. Dosificación de las pastas para Análisis Térmico. <i>Furcraea cabuya</i> (fique cenizo) _____	178
Cuadro 44 Cantidad de cal presente en las pastas con cemento relación a/c 0,40. Influencia del porcentaje del aditivo del licor de la <i>Furcraea cabuya</i> (fique cenizo) _____	180
Cuadro 45. Cantidad de cal presente en las pastas con cemento relación a/c 0,40. Influencia del porcentaje del aditivo del licor del <i>Agave americana</i> _____	181
Cuadro 46. Porcentajes de agua combinada de los hidratos P_H en las pastas a/c 0,40 a diferentes edades de curado. <i>Furcraea cabuya</i> (fique cenizo) _____	182
Cuadro 47. Efecto del aditivo en la relación a/y. Consistencia constante 165 ± 5 mm _____	188
Cuadro 48. Efecto del aditivo en la consistencia del yeso. Relación a/y constante 0,48 _____	188
Cuadro 49. Resultados de la hidratación del yeso a igual relación a/y (0,48) _____	197
Cuadro 50. Resultados de la hidratación del yeso a igual consistencia de la muestra control _____	198
Cuadro 51. Dosificación de materiales para ensayos de resistencia mecánicas en yeso _____	201
Cuadro 52. Dosificación de muestras de mortero con licor de <i>Agave americana</i> y aditivo superplastificante _____	208
Cuadro 53. Dosificación de muestras de mortero con licor de <i>Agave americana</i> y aditivo aireante para ensayo de consistencia _____	210
Cuadro 54 Tiempos de fraguado en morteros _____	213

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

Cuadro 55. Dosificación de muestras de mortero para resistencias mecánicas. Relación a/c constante e igual consistencia _____	224
Cuadro 56. Dosificación de muestras de mortero para resistencias mecánicas. Distintos porcentajes de aditivo e igual consistencia _____	224
Cuadro 57. Dosificación de hormigones para estudios con licor de <i>Agave americana</i> _____	235
Cuadro 58. Dosificación de hormigones con cemento tipo I, árido grueso de tamaño máximo 19,0 mm y aditivo de fique. Relación a/c constante _____	237
Cuadro 59. Dosificación de hormigones con cemento tipo I, árido grueso de tamaño máximo 9,5 mm y aditivo de fique. Relación a/c constante _____	237
Cuadro 60. Dosificación de hormigones con cemento tipo III, árido grueso de tamaño máximo 19,0 mm y aditivo de fique. Relación a/c constante _____	238
Cuadro 61. Dosificación de hormigones con cemento tipo III, árido grueso de tamaño máximo 19,0 mm y aditivo de fique. Trabajabilidad constante _____	238
Cuadro 62. Porcentaje de aire ocluido en hormigones con licor de <i>Furcraea cabuya</i> . _____	240
Cuadro 63. Porcentaje de agua de exudación en hormigones con aditivo de fique. _____	245
Cuadro 64. Peso de 1 metro cúbico de hormigón para distintas muestras de hormigón y porcentaje de pasta _____	254
Cuadro 65. Superficie específica de huecos de aire en el hormigón endurecido. Aditivo de <i>Agave americana</i> _____	256
Cuadro 66. Relación pasta/aire en el hormigón endurecido. Aditivo de <i>Agave americana</i> _____	257
Cuadro 67. Factor de espaciado de los poros en el hormigón en estado endurecido. Aditivo de <i>Agave americana</i> _____	258
Cuadro 68. Peso de 1 metro cúbico de hormigón para distintas muestras de hormigón con <i>Furcraea cabuya</i> _____	262
Cuadro 69. Resistencia a compresión de hormigones con <i>Agave americana</i> . Igual asentamiento _____	266
Cuadro 70. Resistencia a compresión de hormigones con Fique. Igual asentamiento _____	268

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 71. Resistencia a compresión de hormigones con Fique. Igual relación a/c, cemento tipo I y árido grueso de 19,0 mm _____	270
Cuadro 72. Resistencia a compresión de hormigones con Fique. Relación a/c 0,45, cemento tipo I y árido grueso de 19,0 mm _	272
Cuadro 73. Resistencia a compresión de hormigones con Fique. Relación a/c 0,7, cemento tipo I y árido grueso de 19,0 mm __	273
Cuadro 74. Resistencia a compresión de hormigones con Fique. Igual relación a/c, cemento tipo III y árido grueso de 19,0 mm ____	274
Cuadro 75. Resistencia a compresión con distintos tiempos de amasado _	276
Cuadro 76. Valores de resistencia a compresión, módulo de elasticidad real y módulo de elasticidad teórico de hormigones con aditivo de licor de <i>Furcraea cabuya</i> _____	278
Cuadro 77. Volumen molecular de los compuestos de hormigón _____	285
Cuadro 78. Dosificación de materiales para estudio de ataque por sulfatos _____	286
Cuadro 79. Mezclas elaboradas con aditivo de <i>Fucraea Cabuya</i> para determinar el comportamiento al hielo-deshielo _____	293
Cuadro 80 Determinación de la distribución de huecos de aire para el hormigón control _____	301
Cuadro 81 Determinación de la distribución de huecos de aire para el hormigón con 1% de aditivo de <i>Agave americana</i> _____	301
Cuadro 82 Determinación de la distribución de huecos de aire para el hormigón con 3% de aditivo de <i>Agave americana</i> _____	302
Cuadro 83 Determinación de la distribución de huecos de aire para el hormigón con 0,26% de aditivo Micro air 100 _____	302

1. INTRODUCCIÓN

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades sobre la *Furcraea cabuya* (Fique cenizo)

1.1.1 Caracterización de la planta de fique

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 (¹).

Son plantas grandes de tallo erguido, densamente pobladas de hojas en forma radial. Su altura varía entre dos y siete metros. Sus hojas son largas, angostas, carnosas, puntiagudas, acanaladas, dentado espinosas en algunas variedades, y de color verde. El ancho de las hojas maduras varía entre 10 y 20 cms y el largo entre 1 y 2 m. Sólo florece una vez y su flor es de color blanco verdoso; de ésta luego saldrán pequeños bulbillos que son sus semillas. Pueden encontrarse plantas con más de cincuenta (50) años de edad, pero su período típico de vida varía entre 10 y 20 años (¹).

Cuadro 1. Clasificación Taxonómica de la *Furcraea cabuya*⁽¹⁾

Clasificación Taxonómica	
REINO	Vegetal
PHYLUM	Tracheophyta
DIVISIÓN	Spermatophyta
CLASE	Angiospermae
SUBCLASE	Monocotiledonea
ORDEN	Liliflorae
FAMILIA	Agavaceae
GÉNERO	Furcraea

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

El género *Furcraea* comprende 20 especies diferentes, algunas de las cuales se utiliza para extracción de fibra. El nombre vulgar es: fique, cabuya, penca, fique perulero, maguey, cabui, cabuya blanca, chuchao, cocuiza, etc. Son semejantes a muchas especies de *Agave*, pero al contrario de la terminación de las hojas de éstas en una gran espina, sus hojas terminan en una pequeña punta coriácea o en una débil espina; además, las flores de *Agave*, son amarillas y en racimos erectos.

Tradicionalmente algunas partes de las plantas de fique se han utilizado, por los campesinos colombianos, como medicinas y bebidas embriagantes: las hojas machacadas se utilizan como cataplasmas para madurar la infección, las raíces se usan como depurativo, el jugo fermentado como alcohol o tapetusa de fique (bebida embriagante de fabricación casera muy utilizada en el campo colombiano), para el control de piojos de equinos y para blanquear la ropa el tallo floral, llamado escapo o maguey, lo utilizan para la construcción de casa de bahareque, escaleras, o para asentar navajas o cuchillos.⁽¹⁾

El jugo de fique es una suspensión con características variables, dependiendo de la edad, la estación del año y la fertilidad del suelo. Es de color verde ocre, tiene un olor fuerte característico, y es muy corrosivo. Su densidad media a escala experimental es de 1,02 kg/l y su pH varía entre 4 y 5.

Sus constituyentes se conocen en forma cualitativa, éstos son básicamente agua, celulosa, materia orgánica y minerales, que porcentualmente presentan los siguientes valores: 85% humedad; 6% celulosa (D-glucosa); 8% parte orgánica y amorfa: sacarosa, proteínas, nitrógeno, fósforo, calcio, potasio, saponinas y sapogeninas; y un 1% minerales ⁽²⁾

1. INTRODUCCIÓN

Cuadro 2. Características de la especie *Furcraea cabuya*

<i>Furcraea cabuya</i>	
Nombre vulgar	<i>Ceniza, Cabuya hembra, Cabuya sin espinas, negra o lisa, Fique Cenizo.</i>
Origen y distribución	<i>Crece de manera espontánea en Colombia, Costa Rica y Panamá.</i>
Aspecto general	<p><i>Plantas xerófitas de 2 a 7 m de altura, con tronco grueso de menos de un metro de alto, hojas de 50 a 100 dispuestas en rosetas en la parte terminal del tronco, verdes, ampliamente cóncavas, cuyas márgenes se vuelven hacia fuera, de 150 a 300 cm. de largo y 15 a 20 cm. de ancho, angostándose hacia la base, lisas por el haz y ligeramente ásperas por el envés, carece de espinas.</i></p> <p><i>Esta especie se cultiva entre los 1.500 y 2.000 m.s.n.mⁱ, se reproduce por hijuelos y bulbillos, cada planta produce alrededor de 1 kilo de cabuya por año.</i></p> <p><i>Es susceptible al mal rosado, macana y al gusano pasador.</i></p>
	

Fuente: (2)

ⁱ Metros sobre el nivel del mar

Cuadro 3. Composición de la hoja de fique y porcentaje de cada componente

Componente	% en la hoja	% útil	Usos
Fibra	5	4	En la industria textil. Empaques
Jugo	70	40	Extracción de esteroides
Estopa	8	3	Pulpa de papel
Bagazo	17	10	Material de construcción, abonos

Fuente: (3)

1.1.2 Producción

Colombia es el mayor productor de fibra de fique en el mundo. En el año agrícola 2002, se produjeron alrededor de 19.837 toneladas de cabuya destinadas 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 17.344 hectáreas. El rendimiento anual es de 0,87 toneladas por hectárea cultivada ⁽⁴⁾. (Ilustración 2)

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 frijol generando un aumento en la productividad y calidad de este último.

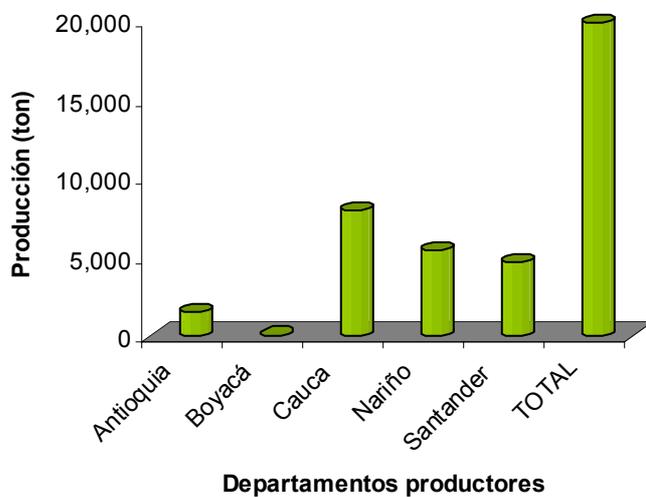
Para el beneficio del fique, al igual que su cultivo, se utilizan métodos tradicionales y poco tecnificados. La primera etapa es el corte, que consiste en desprender de la planta periódicamente, 2 a 3 cortes anuales, aquellas hojas que han dejado de “apuntar al cielo” (ángulo mayor de 45°).

Después de cortada la hoja debe desfibrarse en las 48 horas siguientes al corte. Las plantaciones tecnificadas realizan el desfibrado con máquinas especialmente diseñadas para el beneficio que tienen un rendimiento entre 80kg y 120kg de cabuya por día. Algunos productores de fibra en Colombia siguen utilizando técnicas de los aborígenes, tales como el “carrizo”. Se ha intentado el desfibrado a través de aplicación de productos químicos, lo que ha resultado costoso o ha disminuido la calidad de la fibra.

1. INTRODUCCIÓN



Ilustración 1 Mapa físico de Colombia y departamentos productores de fique (tomada de Internet www.mapa-colombia.com)



a)

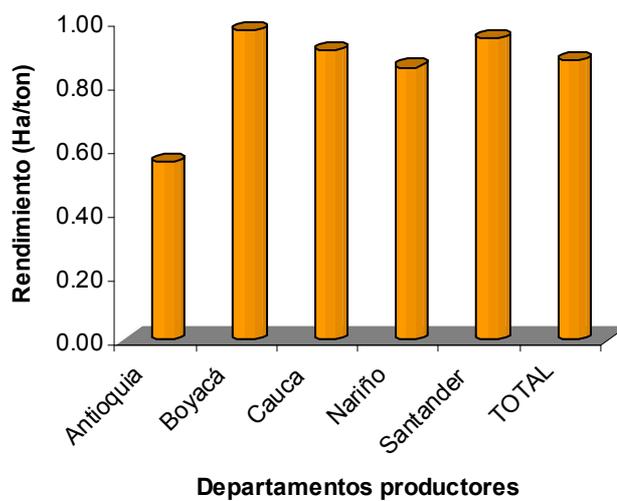


Ilustración 2. a) Producción de fide en toneladas por año en Colombia b) rendimiento de fide obtenido por departamento en el año agrícola 2002. (Gráficas del autor).

Fuente: (4)

1. INTRODUCCIÓN

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 de la penca; sólo en plantaciones tecnificadas se lava y el agua sobrante se dispone en pozas sépticas o tanques resumidotes (4).

En la Ilustración 3 se esquematiza el proceso de cultivo, beneficio, manufactura e industria del fique en Colombia.

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 que le quedan y para lograr homogenizar un poco la fibra. (Ilustración 4)

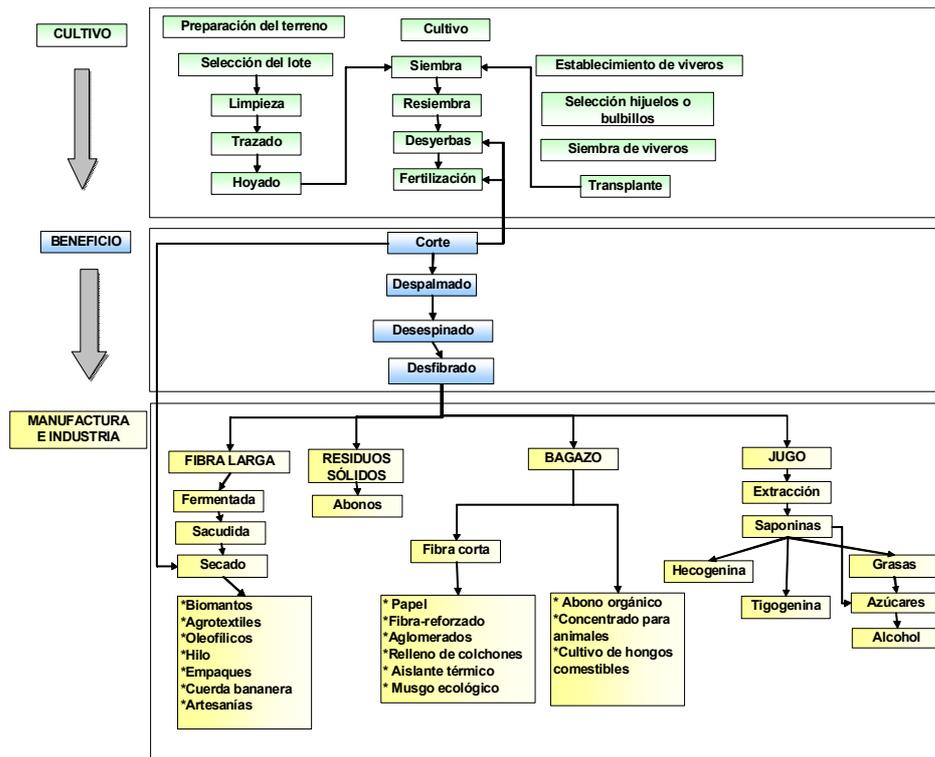


Ilustración 3. Gráfico del proceso productivo del fique.

Fuente: (5)



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Ilustración 4. a) Sembrado de fique combinado con frijol; b) Hojas de fique cortadas; c) Desfibrado de la hoja de fique; d) Bagazo residual del proceso de desfibrado; e) Fibra de fique recién desfibrada; e) Fibra de fique lavada y seca (Fotografías del autor)

1. INTRODUCCIÓN

1.1.3 El problema ambiental

Según los estudios de Martínez y Caicedo ⁽⁶⁾, los desechos generados por el desfibrado del fique representan, aproximadamente, el 96% del peso de la hoja, y es en su mayoría bagazo y jugo. 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 cercanas a los sitios de producción. De acuerdo a estimativos de producción de cabuya, Colombia produce 720.000 toneladas de residuos de desfibrado al año.

En las principales regiones productoras de fique del país es muy común que el lavado de la cabuya del fique, después del desfibrado, se efectúe en las quebradas produciendo graves consecuencias para la biodiversidad de las diferentes regiones. Ello se debe a las propiedades fisicoquímicas de los jugos, por cuanto éstos contienen un alto contenido de azúcares, principalmente sacarosa, glucosa y fructosa, proteínas saponogénicas, esteroides y minerales que como lo demuestra un estudio realizado por la universidad el Bosque son extremadamente tóxicos para los peces y los organismos acuáticos.

En el bioensayo con peces se obtuvo que, la Concentración Letal Media, CL_{50} (96 horas) de los jugos del fique es de 1 mg/l (miligramo por litro) o de 1 ppm (parte por millón) en alevines de trucha arco iris de una pulgada, es decir, que 1 ppm es la concentración necesaria para matar la mitad de la población de peces estudiada; igualmente se halló que 3 ppm es la concentración crítica, muriendo el total de peces expuestos para cada especie.

Como se observa en el Cuadro 4, el jugo del fique es dos veces más tóxico que el mancozeb (fungicida) y hasta ocho y once veces más tóxico que el propanil (herbicida). El jugo del fique sólo es superado en toxicidad por un insecticida como el clorpirifos cuya CL_{50} (96 horas) en peces es de una cantidad muy pequeña de 0,007 mg/l para causar la muerte de la mitad de la población estudiada, en este caso la especie trucha arco iris.

Por otra parte, en monitoreos realizados por el proyecto “Agua Limpia”, ejecutado por la Cooperativa Ecofibras Ltda ⁽⁷⁾, en la zona de carga hídrica del río Mogoticos, fuente abastecedora del acueducto de San Gil (Santander) se estimó la DQOⁱⁱ en 1083 mg/l. El valor de la DQO del estiércol fresco de cerdo es de 10.000 a 20.000 mg/l.

ⁱⁱ **DQO:** La Demanda Química de Oxígeno es un parámetro analítico de contaminación que mide el material orgánico contenido en una muestra líquida mediante oxidación química. La determinación de la DQO es una medida de la cantidad de oxígeno consumido por la

Cuadro 4. Cuadro comparativo de la concentración letal media entre varios plaguicidas y el jugo de fique

Plaguicidas* y el jugo de fique	CL ₅₀ (96 horas) expresada en mg/l para la especie trucha arco iris
Insecticida (Clorpirifos)	0,007- 0,051
Jugo del fique	1,0
Fungicida (Mancozeb)**	2,2
Herbicida (Propanil)***	8-11

* Corresponden a los plaguicidas (por tipo de producto) más usados en Colombia.

** La Concentración Letal Media se estimó a las 48 horas en la especie trucha arco iris.

*** La Concentración Letal Media se estimó a las 48 horas en la especie carpa.

Fuente: (7)

En el municipio de Mogotes (Santander) el proceso de lavado de la cabuya de fique se hace sumergiendo en la fuente 4 kg de fibra por un período de 30 minutos. Cuando se coloca el fique inicialmente en la corriente, suelta un tinte verde con espuma y un fuerte olor a celulosa. Según algunos estudios realizados en el Departamento de Santander ⁽⁸⁾ existe una fluctuación de los indicadores DBO₅ⁱⁱⁱ y el DQO. Para aguas arriba la DBO₅ es de 17,8 mg/l, la cual se incrementa por el lavado del fique a 180 mg/l. Aguas arriba la DQO es de 171,3 mg/l, la cual se incrementa a 537,3 mg/l por el lavado de fique.

Los valores de la DQO son significativamente más altos que los de la DBO₅ indicando la presencia de compuestos no biodegradables, los cuales persistirán corrientes abajo, causando efectos posiblemente perjudiciales, por la composición de saponinas y ácidos orgánicos. La relación DQO/DBO indica la biodegradabilidad del vertido; dicha relación debe ser superior a 1, ya que la DQO involucra tanto el contenido de materia orgánica como de materia inorgánica, mientras que la DBO solamente involucra el contenido de materia orgánica. Cuando la concentración de DQO es bastante mayor, indica que el contenido del vertido es mayoritariamente inorgánico, como es el caso de los jugos del fique que arroja aguas abajo en el río Mogoticos un coeficiente de 2,98. También los

porción de materia orgánica existente en la muestra y oxidable por un agente químico oxidante fuerte.

ⁱⁱⁱ **DBO₅**: La Demanda Bioquímica de Oxígeno es una medida de la capacidad contaminante de un agua residual que indica la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable, bajo condiciones aeróbicas, en un período de cinco días y a 20 °C.

1. INTRODUCCIÓN

valores bajos de pH (de 7,3 se pasa a 5,25) pueden afectar el balance de la vida acuática.

1.1.4 Aportes del subsector del fique al desarrollo sostenible

Del fique dependen económicamente en el país 70000 familias, ubicadas en general en zonas marginales y conformando el grupo social más deprimido de Colombia. Sin embargo, su cultivo es uno de los mayores generadores de empleo en el país, pero los productores viven muy por debajo de la línea de pobreza⁽⁹⁾.

Según Ecofibras ⁽¹⁰⁾ en el municipio de Mogotes (Santander) en el año 2002, se detectó que los productores de fique son comunidades pobres con necesidades extremas en alimentos y medios de producción. Esta afirmación es dada por agricultores de la parte alta de Pitigauo: “sólo contamos con el agua y la tierra para cultivar. Esperamos evitar lavar en las quebradas, es más fácil lavar cerca de la vivienda, ahorramos tiempo y energía y tenemos agua disponible para otras cosas, para lavar la ropa, para el baño y para usarlo de pronto en cultivos de hortalizas en el verano. Hay desnutrición en los niños, y enfermedades por el consumo de aguas sin tratar o contaminadas”.

La mayor parte de la actividad fiquera en el país se desarrolla en sitios donde la tierra no es muy buena y cuya marginalidad económica es notoria, por lo que el empleo generado ayuda a la economía regional y produce la utilización adecuada de áreas marginales para la explotación agroindustrial.

Este subsector productivo tiene como característica que aglutina al núcleo familiar. Los hermanos, hijos, sobrinos, se apoyan y ayudan en algunas actividades especialmente económicas. Los grupos están conformados en su mayoría por los vecinos que casi en su mayoría suelen ser familiares. Se consolidan los compadrazgos, y se realizan actividades económicas y sociales bajo un propósito: lavar el fique y mejorar su proceso.

El trabajo de cargar el fique, desde el cultivo a la quebrada, lavarlo, recogerlo y llevarlo a secar, requiere de mano de obra familiar. Señoras y niños deben cumplir con esta tarea, algunos tienen que recorrer más de 2km., hasta llegar a su parcela y el secador. Cuando los productores instalan los beneficiaderos comunitarios se facilitan todas las operaciones de lavado, aprovechando que los tendedores están cerca de la casa y cerca de la vía de transporte al mercado, existiendo un ahorro de tiempo y de jornales. En promedio muchos agricultores ahorran hasta 5 jornales en

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

la actividad de lavado de la fibra, comparando el beneficiadero comunitario con el lavado de la fibra en los cuerpos de agua.

Según cálculos del Observatorio de Agrocadenas⁽¹¹⁾ el empleo generado por este cultivo es en su gran mayoría para las actividades agrícolas, participando en el 2001 dentro del sector agroproductivo con el 0,6%, alrededor de 9719 empleos.

Por tonelada de cabuya procesada se emplean 70 jornales; así, en los últimos 28 años se han perdido 1988 jornales/año, esto sin contar las rucas y telares artesanales que se han ido cerrando. Sin embargo, en la actualidad se estima que existen más de 10.000 talleres artesanales familiares ⁽¹¹⁾

1.1.4.1 Efectos económicos

Se pueden fundamentar en los siguiente puntos:

- El rendimiento nacional de fibra seca^{iv} se calcula en 2kg/planta-año y de 2 toneladas por hectárea, lo que aproximadamente para el año 2003 representó 21.600 toneladas métricas y un valor de la producción de 24.000 millones de pesos (9'000.000 de dólares) aproximadamente ⁽¹¹⁾.
- Los residuos del proceso de extracción constituyen el 96% del peso de la hoja, lo que sumó 518.400 toneladas a la cosecha nacional de 2003, porcentaje aún sin valoración económica.
- Los productos industriales del jugo del fique tienen el potencial de ser competitivos. Frente a la perspectiva de un tratado de libre comercio con diferentes regiones del mundo estos productos industrializados ofrecen el potencial de entrar al comercio internacional, como productos diferenciados. La competencia se considera que va a ser menor, dado que la franja tropical no es muy amplia.
- El precio internacional de los productos derivados del jugo de fique hecogenina y tigogenina es muy alto. Un gramo de hecogenina cuesta en el mercado internacional entre US\$6 y US\$124,

^{iv} Valor promedio de las regiones, considerando excelentes rendimientos (6 kg/planta-año en municipios de Nariño) y pésimos (299 g/planta-año en municipios de Boyacá).

1. INTRODUCCIÓN

dependiendo del grado de pureza. La tigogenina, utilizada para restauración celular del cerebro y del riñón puede costar por gramo hasta US\$200. La demanda insatisfecha de hecogenina a nivel internacional es de 5000 t/año.

1.1.4.2 Efectos ambientales

Según algunos estudios se ha comprobado que la cabuya es una planta protectora del suelo y rehabilitadora de las tierras. La cabuya tiene un sistema radical corto, pero muy rico en nitrógeno, de tal manera que el suelo atravesado por estas raíces se enriquece en dicho elemento, a medida que se acumulan las raíces muertas. En tierras semidesérticas se ha demostrado que la formación de tierra agrícola es más rápida y acentuada con la cabuya que con cualquier otro grupo vegetal ⁽¹²⁾.

Un cerco experimental de cabuya ha logrado formar tierra agrícola en 10 años, mientras que cualquier otro tipo de plantas hubiera necesitado, bajo las mismas condiciones ambientales, no menos de dos siglos.

De los resultados obtenidos en los ensayos realizados en la Estación Experimental Forestal y de Conservación, Quinta Equinoccial del Ecuador, se concluyó que las tierras volcánicas, arenosas y sueltas del semidesierto ecuatoriano se transformaron en tierras agrícolas ricas en materia orgánica en pocos años, solamente cubriéndolas con plantaciones de cabuya. Los experimentos con cultivos hechos por esta tierra, en cajones y macetas, han demostrado que es magnífica para la papa, el maíz, la quinua, calabaza, tomate, pepino, cebolla, zanahoria, rábano, remolacha, col, acelga y lechuga ⁽¹³⁾.

Según el Consejo de la Cadena Nacional del Fique, el fique se puede usar como cultivo agroecológico, protector de suelos, almacenador de agua y el bagazo se puede usar como fertilizante.

1.2 Los aditivos en morteros y hormigones

Según el Comité ACI-212 (American Concrete Institute), un aditivo se define como un material distinto del agua, agregados y cemento hidráulico, que se usa como ingrediente en hormigones y/o morteros y se añade a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado ⁽¹⁴⁾.

Por su parte la Norma Española UNE-EN 934-2 considera que un aditivo para hormigón es un producto incorporado en el momento del amasado del hormigón en una cantidad no mayor del 5% en masa, con relación al

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

contenido del cemento, con objeto de modificar las propiedades de la mezcla en estado fresco y/o endurecido ⁽¹⁵⁾.

Existen diferentes tipos de aditivos, los cuales se pueden clasificar, atendiendo a su efecto en el hormigón en masa o endurecido y a su solubilidad en agua o a la interacción físico – química que experimentan en el sistema del cemento Pórtland hidratado. El Cuadro 5 describe la clasificación que, por su efecto y/o función en el hormigón, establece la Norma Europea.

Cuadro 5. Clasificación de los aditivos por su función en los hormigones ⁽¹⁵⁾

TIPO DE ADITIVO	FUNCIÓN EN EL HORMIGÓN
Aditivo reductor de agua/plastificante	Aditivo que, sin modificar la consistencia, permite reducir el contenido en agua, aumenta el asiento (cono)/escurrimiento, o que produce ambos efectos a la vez.
Aditivo reductor de agua de alta actividad/superplastificante	Aditivo que, sin modificar la consistencia, permite reducir el contenido en agua de un determinado hormigón, o que, sin modificar el contenido en agua, aumenta considerablemente el asiento (cono)/escurrimiento, o que produce ambos efectos a la vez.
Aditivo retenedor de agua	Aditivo que reduce la pérdida de agua, disminuyendo la exudación.
Aditivo ocluser de aire	Aditivo que permite incorporar durante el amasado una cantidad controlada de pequeñas burbujas de aire, uniformemente repartidas, que permanece después del endurecimiento.
Aditivo acelerador de fraguado	Aditivo que disminuye el tiempo del principio de transición de la mezcla para pasar del estado plástico al estado rígido.
Aditivo acelerador de endurecimiento	Aditivo que aumenta la velocidad de desarrollo de las resistencias iniciales del hormigón, con o sin modificación del tiempo de fraguado.
Aditivo retardador de fraguado	Aditivo que aumenta el tiempo del principio de transición de la mezcla para pasar del estado plástico al estado rígido.

1. INTRODUCCIÓN

TIPO DE ADITIVO	FUNCIÓN EN EL HORMIGÓN
Aditivo hidrófugo	Aditivo que reduce la absorción capilar del hormigón endurecido
Aditivo retardador de fraguado/reductor de agua/plastificante	Aditivo que combina los efectos de un aditivo reductor de agua/plastificante (función principal) y los de un aditivo retardador de fraguado (función secundaria).
Aditivo retardador de fraguado/reductor de agua de alta actividad/superplastificante	Aditivo que combina los efectos de un aditivo reductor de agua de alta actividad/superplastificante (función principal) y los de un aditivo retardador de fraguado (función secundaria).
Aditivo acelerador de fraguado/reductor de agua/plastificante	Aditivo que combina los efectos de un aditivo reductor de agua/plastificante (función principal) y los de un aditivo acelerador de fraguado (función secundaria).

1.2.1 Efectos de los aditivos en los morteros y hormigones de cemento Pórtland.

Para efectos de esta investigación sólo se describirán los efectos de los aditivos oclusores de aire y los retardantes de fraguado, considerando su pertinencia con la caracterización, finalmente demostrada por el autos, del jugo de la planta.

1.2.2 Aditivos oclusores de aire

El ingrediente activo de estos aditivos es el alquilbenceno sulfonado o el óxido de polietileno. Sin embargo, algunos materiales como sales de resinas de la madera, algunos detergentes sintéticos, sales de lignina sulfonada, sales de materiales proteicos, ácidos grasos y resinosos y sus sales, o sales orgánicas de hidrocarburos sulfonados, son también capaces de funcionar como aditivos oclusores de aire ⁽¹⁶⁾.

El mecanismo por el cual los oclusores de aire ejercen su acción, se basa en la acción tensoactiva ya que los aditivos correspondientes pertenecen a los llamados dífilos con grupos polares hidrófilos (o aerófilos) y apolares hidrófobos (o aerófilos) ⁽¹⁶⁾.

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 (Ilustración 5.). 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.

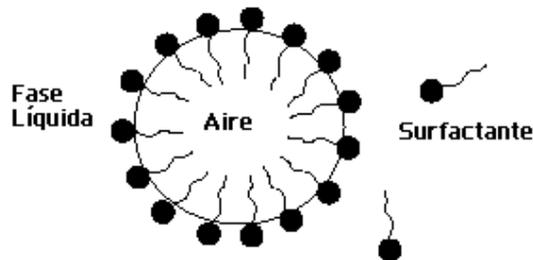


Ilustración 5. Distribución de las moléculas del surfactante en la interfase agua-aire

Fuente: (17)

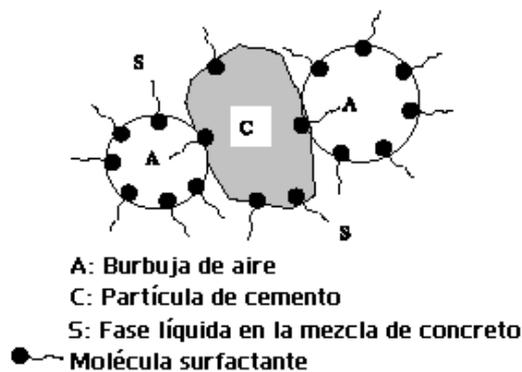


Ilustración 6. Interacción entre las burbujas de aire y las partículas de cemento

Fuente: (17)

1. INTRODUCCIÓN

La masa de las partículas de cemento ayuda a dispersar las burbujas de aire en la mezcla y disminuye su tendencia a flotar a la superficie (Ilustración 6.).

Este tipo de aditivos se ha clasificado de acuerdo con el tipo de grupo polar (hidrófilo) 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, siendo los productos derivados de madera y los detergentes sintéticos, los dos tipos más frecuentes de agentes oclusores de aire.

Como requisitos específicos para los aditivos oclusores de aire (a igual consistencia), la Norma Europea considera que: el contenido en aire en hormigón fresco (aire ocluido) sea mayor de 2,5% en volumen por encima del correspondiente al hormigón testigo; que el contenido de aire total esté entre un 4% y 6% del volumen; que el factor de espaciamiento de los huecos de aire en el hormigón para ensayo sea menor de 0,2mm; y que la resistencia a compresión a 28 días sea mayor o igual al 75% que la del hormigón testigo. ⁽¹⁵⁾

La oclusión de aire altera las propiedades del hormigón fresco. El hormigón con aire ocluido es considerablemente más trabajable y cohesivo que el hormigón 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.

Los ciclos hielo-deshielo producen un efecto dañino 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 microporos 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. 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

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

los capilares que deja el agua de exudación del hormigón, al pasar del estado plástico al estado endurecido (¹⁴).

La pasta de cemento en el hormigón está protegida normalmente contra los efectos de congelación y deshielo, si el factor de espacio es de 0,2mm o menos, como lo determina la norma ASTM C 457.

El factor de espaciamiento determina la distancia promedio que el agua viaja para alcanzar un espacio libre. Se ha demostrado que la resistencia a la congelación y deshielo depende de la permeabilidad, el grado de saturación de la pasta, la cantidad de agua susceptible de congelamiento, la tasa de congelamiento, y la distancia máxima promedio de cualquier punto de la pasta a una superficie libre donde se forme el hielo. El uso de aditivos oclusores de aire para obtener un volumen de burbujas de aire (normalmente de 4-8%) que son lo suficientemente pequeñas y dispersas para alcanzar un nivel adecuado de espaciamiento, es el medio más apropiado para lograr durabilidad (Ilustración 7).

Los requisitos adicionales son que la superficie específica de las cavidades de aire sea mayor de $23,6 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ de volumen de vacíos, y que el número de cavidades por cada 25mm transversales sea significativamente mayor, que el valor numérico del porcentaje de aire en el concreto.

El contenido de aire, el factor de espaciamiento, así como otros parámetros del sistema de cavidades de aire en el concreto endurecido, pueden determinarse 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.

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

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

1. INTRODUCCIÓN

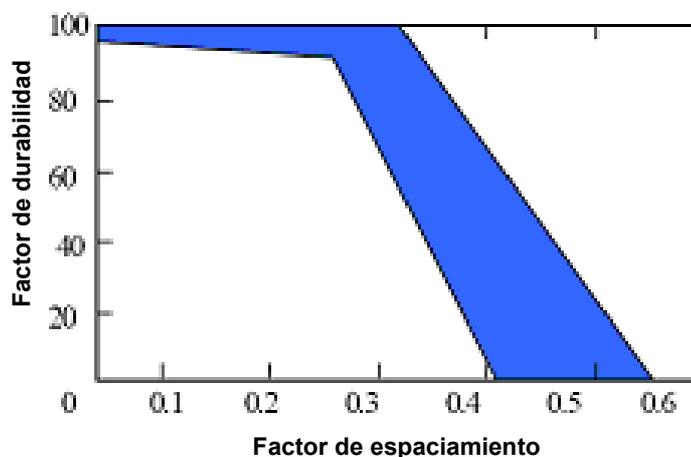


Ilustración 7. Relación entre la durabilidad al congelamiento y el factor de espaciamiento de las burbujas de aire ocluido

Fuente: (18)

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 para el naturalmente atrapado, como en el intencionalmente ocluido. Para hormigones con un tamaño de agregado menor de 38,1mm, 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 espaciamiento entre las burbujas es menor y que su superficie específica aumenta, con lo cual se mejora la durabilidad del hormigón ⁽¹⁶⁾.

Las partículas finas de agregado comprendidas entre los tamices de 595 μ m (No. 30) y 149 μ m (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 μ m (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 ⁽¹⁶⁾.

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 hormigón se presentan en la Ilustración 8.

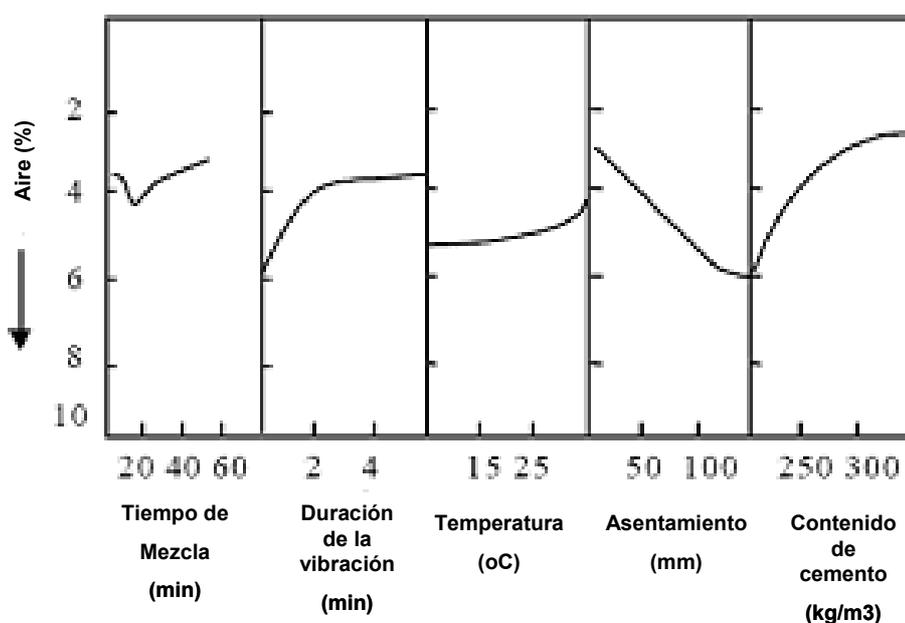


Ilustración 8. Gráfico de los efectos de algunos parámetros del hormigón en el volumen total de aire ocluido

Fuente: (18)

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 (Ilustración 9, Ilustración 10).

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 fisuración, la fluencia, la permeabilidad, el ataque químico y la corrosión de las armaduras, por no

1. INTRODUCCIÓN

citar otras, no fueran causas capaces de influir decisivamente sobre dicha resistencia.

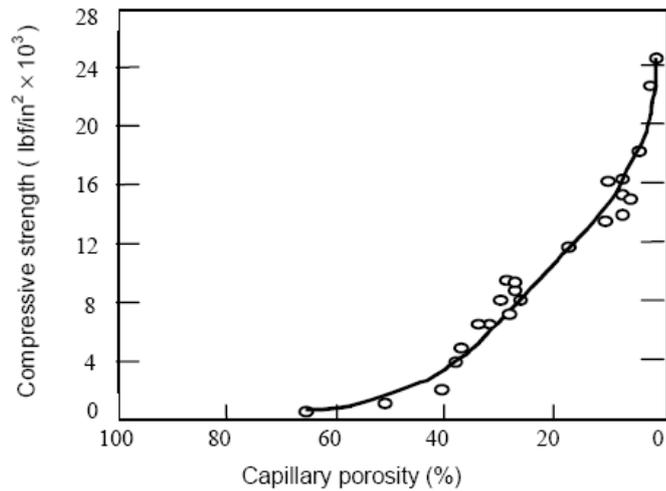


Ilustración 9. Relación entre la porosidad capilar y la resistencia promedio de varios materiales

Fuente: (18)

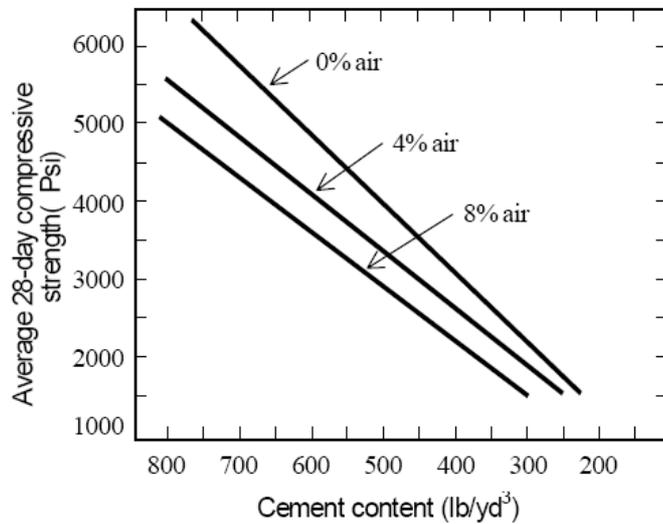


Ilustración 10. Resistencia relacionada con el contenido de cemento para cementos con y sin inclusión de aire

Fuente: (18)

1.2.3 Aditivos retardantes.

Los aditivos retardantes se emplean principalmente para reducir el efecto acelerante del clima cálido sobre el fraguado del hormigón, o simplemente para retrasar el fraguado inicial, cuando las condiciones de colocación y compactación son dispendiosas, como en el caso de elementos muy esbeltos o bombeos a grandes distancias. La composición química de estos aditivos es a base de ácidos hidrocarboxílicos, ligninas, boratos, azúcares y ácidos tartáricos. Algunos de estos aditivos tienen también capacidades reductoras y ocluseras de aire.

Los mecanismos para retardar el fraguado son de dos tipos: disminuyendo la solubilidad de los componentes anhidros o precipitándose sobre los granos de cemento, con lo cual forman una cubierta impermeable, causando en ambos casos un retardo de fraguado ⁽¹⁹⁾.

En general, los aditivos retardantes, no afectan el requerimiento de agua, la consistencia o la velocidad de pérdida del asentamiento. Sin embargo permiten un mayor tiempo de utilización del hormigón en estado plástico ⁽¹⁹⁾.

En cuanto al calor de hidratación, lo que hacen estos aditivos, es retrasar el tiempo al cual se produce el calor generado por la hidratación del cemento, pero no lo reduce, ya que las que se retardan son las fases de hidratación C₂S y C₃S del cemento y no evitan completamente la reacción del C₃A ⁽¹⁹⁾.

Según la Norma Europea para que un aditivo sea considerado retardante requiere que el principio de fraguado, en mezclas a igual consistencia, se retrase un tiempo mayor o igual a la muestra testigo más de 90 minutos y que el final del fraguado para el mortero de ensayo sea menor o igual al mortero testigo más 360 minutos ⁽¹⁵⁾.

En cuanto a la resistencia a compresión, los hormigones con igual contenido en cemento, aire e igual asentamiento, generalmente presentan una resistencia a la compresión al menos igual a la del hormigón de referencia, sin aditivos, a edades de 18 a 48 horas. A los 28 días de edad, la resistencia a la compresión puede aumentar entre un 15% y un 25%. A edades posteriores, el porcentaje de aumento de resistencia es comúnmente menor. La Norma Europea considera que la resistencia a compresión a 7 días del hormigón para ensayo debe ser mayor o igual a un 80% que la del hormigón testigo y a los 28 días mayor o igual a un 90%. ⁽¹⁵⁾

1. INTRODUCCIÓN

1.3 Investigaciones previas

1.3.1 Sinopsis general

Son escasas las investigaciones que sobre jugos de plantas, como adiciones en hormigones y morteros, se conocen. Al parecer los investigadores han preferido estudiar la fibra corta, subproducto del procesamiento industrial de la plantas, para ser utilizada como refuerzo en hormigones.

La gran mayoría de trabajos encontrados buscan el aprovechamiento de la fibra corta, remanente en el bagazo. Algunos de ellos tienen como objeto:

- 1) Aprovechamiento ecológico del bagazo del fique como sustrato en la producción y comercialización, de dos especies de orellanas comestibles: *pleurotus ostreatus* y *pleurotus djamour*, en el oriente antioqueño.
- 2) Producción de cordelería para la industria bananera.
- 3) Análisis económico y ventajas comparativas en el procesamiento y aplicación del abono proveniente de los jugos y el bagazo de fique.
- 4) Tintes naturales para fique.
- 5) Utilización de biomantos en el control de erosión.
- 6) Elaboración de geotextiles.
- 7) Elaboración de agrotextiles.
- 8) Desarrollo de materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras de fique.
- 9) Desarrollo de materiales plásticos reforzados con tejidos de fibra de fique.
- 10) Modificación de fibras de fique.
- 11) Comportamiento de la interfase fibra – matriz en materiales compuestos.
- 12) Implementación de la técnica de aspersion en el desarrollo de plásticos reforzados con fibras de fique.
- 13) Comportamiento ambiental de materiales compuestos reforzados con fibras de fique.

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

- 14) Desarrollo de elementos funcionales en plásticos reforzados con fibras de fique.
- 15) Proyecto de producción de materiales de construcción fibroreforzados.
- 16) Bagazo de fique ensilado para alimentación de rumiantes.
- 17) Proyecto de elaboración de papel artesanal.
- 18) Proyecto de producción de pulpa celulosa.
- 19) Estudio de los mecanismos de adherencia en la interfase del material compuesto hormigón – fibra natural de fique y de la optimización de su comportamiento a la tenacidad en servicio. El Doctor Silvio Delvasto, de la Universidad del Valle (Colombia), quien estudió en su tesis doctoral (Universidad Politécnica de Valencia), la interfase entre el hormigón y la fibra de fique, también hizo algunas aproximaciones a la caracterización y uso, en hormigones fibro-reforzados, del licor de esta planta. Como conclusión general, manifiesta que el aditivo de fique se comporta como un agente ocluidor de aire que, en consecuencia, reduce la resistencia a la compresión del hormigón, aunque la trabajabilidad, y la resistencia a agentes agresivos externos y a ciclos de congelamiento y deshielo se ven favorecidas. Deja propuesta una futura investigación sobre la introducción en su composición de un agente químico que actúe sobre sus propiedades tensoactivas como desespumante o aireante, para lograr un aditivo superplastificante que sea apropiado para la producción de hormigones fique reforzados. ⁽²⁰⁾

Comparativamente son pocos los trabajos encontrados para la utilización del jugo de fique, extraído del bagazo. La mayoría se utilizan en la fabricación de fármacos y sólo unos pocos de los encontrados se utilizan como material de construcción. Se reseñan los siguientes:

- 1) **Producción de sapogeninas. Universidad Nacional de Colombia 1990.** El objetivo es utilizar los jugos de fique como materia prima en la obtención de intermediarios claves para la síntesis de fármacos esteroidales. A partir de las sapogeninas se puede obtener corticoides y saponinas esteroides, de uso como antiinflamatorios y para la producción de hormonas esferoidales.
- 2) **Aprovechamiento múltiple del jugo de fique.** Producción de agentes tensoactivos y medicinales. Jorge Ignacio Zapata. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, 1998. En el jugo de fique se encuentran las saponinas, que son compuestos denominados glicósidos y presentan una

1. INTRODUCCIÓN

alta capacidad para formar espumas en soluciones acuosas, y además forman compuestos muy estables en asocio con otros químicos, propiedad que se aprovecha para aislar y purificar esteroides y otros compuestos químicos.

- 3) **Evaluación de la producción de esteroides a partir del jugo de fique con *Cunninghamella Spp.*** Centro de Investigaciones Biotecnológicas. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia. Se pretende plantear una solución al impacto ambiental disminuyendo la carga contaminante que causa el vertimiento del jugo de fique a las fuentes de agua. Se tiene como principal objetivo, evaluar la síntesis de esteroides en la fermentación de jugo de fique con la *Cunninghamella Spp*, por medio de procesos de biotransformación.
- 4) **Fique licor as raw construction material. Rubby de Gutiérrez. Universidad del Valle, Cali, Colombia, 1990.** En esta investigación se 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. ⁽²¹⁾
- 5) **Factibilidad Técnica para producir aditivos para construcción por extracción de compuestos poliméricos de jugos residuales de la fibra de fique.** Hernán Chávez Cifuentes y Carlos Fernando Flórez Orozco. Tesis de Ingeniero Químico. Universidad del Valle, 1995. Esta tesis estudia distintas posibilidades para el control del deterioro del jugo luego de extraído de la penca, analiza el efecto de la concentración sobre la acción del aditivo en el hormigón, estudia el efecto del formol sobre la reacción entre cemento y el agua. Identifica el efecto del aditivo en la fluidez de los morteros y plantea un diseño general para la producción de aditivo de fique. ⁽²²⁾
- 6) **Evaluación de un concreto incorporando un aditivo a partir del jugo de fique.** Héctor Fabio García Muriel y Saúl Fernando Aponte Gutiérrez. Tesis de Ingeniero Químico. Universidad del Valle, Cali, Colombia, 1997. En esta tesis se estudia la fluidez, la resistencia y la cantidad de aire ocluido en mezclas de mortero y hormigón con distintos porcentajes de aditivo. Concluyen que el jugo de fique posee propiedades como ocluidor de aire, lo que incide en la disminución de los esfuerzos a compresión y flexión. ⁽²³⁾.

En el ámbito internacional se conoce poco del fique, pero se ha estudiado otro tipo de extractos orgánicos de origen vegetal como aditivo en materiales cementicios. Entre ellos se reseñan:

- 7) **Empleo de polímeros tensoactivos naturales como aditivos inclusores de aire en hormigón celular.** D. Revuelta, L. Fernández, M.J. Lana. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja – CSIC. España. El empleo de polímeros orgánicos tenso-activos como agentes espumantes durante el amasado de materiales de matriz cementicia permita la reducción de la densidad del hormigón o mortero resultantes. En el llamado hormigón celular, la fase gruesa (grava) desaparece, quedando constituido por tres fases: pasta de cemento, arena y aire. Esta incorporación de aire lleva sin embargo aparejada una bajada de la resistencia significativa, que es necesario conocer de antemano. Este trabajo presenta los resultados obtenidos al incorporar un aditivo constituido por polímeros naturales estabilizados a un mortero durante el proceso de mezcla y amasado de los componentes.
- 8) **Use of cactus in mortars and concrete.** S. Chandra, L. Eklund, and R.R. Villareal. Chalmers University of Technology, Sweden; Swedish Ceramic Institute, Sweden; University of Nuevo Leon, Monterrey, México. En este trabajo ha sido probado el licor extraído del cactus Nopal originario de México. Las conclusiones más relevantes a que llegan son que incrementa la plasticidad del mortero y mejora, sustancialmente, la resistencia a la absorción en los morteros, no así en los hormigones. El hidróxido cálcico producido por la hidratación del cemento Portland interactúa con los componentes del extracto de cactus, polisacáridos o proteínas, y forman complejos. Esto afecta la cristalización del proceso. Al recubrir el hormigón con el extracto se obtienen también mayores resistencias. ⁽²⁴⁾.
- 9) **Influence of organic admixtures and testing method on freeze-thaw resistance of concrete.** Juhon Aavik and Satish Chandra. 1995. Una de las propiedades de durabilidad del hormigón que más preocupa en muchos países es la resistencia al hielo-deshielo. Esta es medida por diferentes métodos. Los resultados varían con el método usado; por ejemplo, el hormigón podría fallar después de 20 ciclos en un método pero mostrar buena resistencia aun después de 300 ciclos con otro método. En este trabajo se probó la resistencia de un hormigón usando cuatro métodos diferentes. En una segunda parte, se fabricaron hormigones con diferentes aditivos orgánicos, y se le aplicaron los mismos cuatro ensayos de resistencia hielo-deshielo. Se observó que, independientemente del método usado, la resistencia al hielo-deshielo se aumentó con la adición del aditivo orgánico. En particular, la adición de un polímero aumenta sustancialmente la resistencia. ⁽²⁵⁾

1. INTRODUCCIÓN

- 10) **Uso de extractos de plantas suculentas para la preparación de morteros y hormigones de cemento Pórtland.** Proyecto final de carrera de la estudiante María Antonia Climent de la Universidad Politécnica de Valencia. Destaca en el licor de *Agave americana* su efecto como reductor de agua y retardador de fraguado en pastas de cemento; el incremento de la trabajabilidad, reducción de la porosidad y el mejoramiento de las resistencias mecánicas a flexotracción y compresión, cuando se utiliza cemento Pórtland II/A-L 32.5, pero no cuando se usa el cemento Pórtland I-52.5R excepto para los 28 días de curado a 20°C.

Como se aprecia los resultados obtenidos en las investigaciones son diversos y dispersos; quedan muchos campos y variables por profundizar que indiquen la posibilidad del uso de los jugos de las plantas como aditivo en los compuestos de cemento Pórtland.

1.3.2 Aditivos orgánicos

Se han estudiado diversos aditivos orgánicos para morteros 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 oclusores de aire.

Con la adición de un subproducto de la producción de azúcar, la miel de remolacha, se analizaron propiedades tanto en el hormigón 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 ⁽²⁶⁾. En la Ilustración 11 se muestran los resultados obtenidos para la resistencia en hormigones 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 ocluser de aire significativo y la modificación de las propiedades del mortero fresco y endurecido, con buenas expectativas de uso. ⁽¹⁸⁾

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 (Ilustración 12. Ilustración 13.).

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. ⁽²⁴⁾

En cuanto a la relación de la estructura de poros con estos aditivos orgánicos oclusores 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 hormigón; la dispersión y la influencia de la finura del poro juega un papel sumamente importante. ⁽²⁵⁾

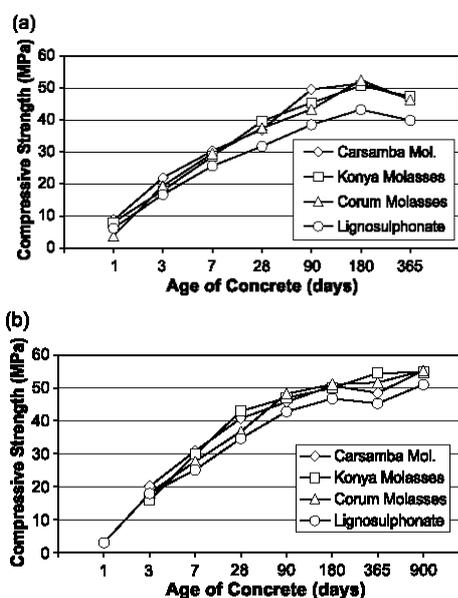


Ilustración 11. Gráficos de la resistencia a la compresión desarrollada en hormigones con adiciones de (a) 0,25% y (b) 0,50% ¹⁸

1. INTRODUCCIÓN



Ilustración 12. Apariencia microscópica del mortero sin adición de aditivo proteínico (30X) ¹⁸



Ilustración 13. Apariencia microscópica del mortero con adición del 0,2 % de aditivo proteínico ¹⁸

2. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

2 OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En Colombia, alrededor de un millón de personas en el campo subsisten directa o indirectamente del cultivo de la planta de fique y de la utilización de su fibra. La calidad de vida de estos campesinos se ha deteriorado por la baja productividad del cultivo, por la pobreza de los suelos, por las deficientes prácticas culturales en el cultivo, las formas de distribución y costos de transporte a centros de acopio, los costos de adecuación y de cosechar otros productos, la competencia de los materiales sucedáneos como el polipropileno, que ha desplazado en un 40% el mercado de la fibra de fique, los problemas fitopatológicos de las plantas, el reducido tamaño de los cultivos y las parcelas, y el mercado limitado a la pocas utilidades.

El objetivo general de esta investigación es determinar la influencia del jugo de las plantas de la familia de las Agavaceas, específicamente del *Agave americana* y de la *Furcraea cabuya* (fique cenizo), en el comportamiento mecánico y la durabilidad de las pastas, morteros y hormigones de cemento Portland. Pretende contribuir a la disminución de la contaminación producida por la extracción y procesamiento de la fibra de la planta de fique en Colombia dando uso al licor (zumo residual del proceso de extracción) como aditivo para morteros y hormigones. Como consecuencia se lograría incrementar el valor económico agregado de la planta.

El impacto que generaría el resultado de la investigación podría conducir a:

- 1) Utilizar un recurso natural renovable en lugar de aditivos sintéticos, cuya producción demanda energía y consumo de materias primas, en algunos casos no renovables, con un alto impacto ambiental, y que incrementa en gran medida el precio del hormigón.
- 2) Conferir valor agregado a la fibra de fique al desarrollar aplicaciones en morteros y hormigones de su jugo con un mayor aprovechamiento de la planta.
- 3) Posibilitar una mejora en los procesos constructivos con hormigón y en prefabricación de elementos constructivos, para los colectivos menos

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

favorecidos que podrían aplicar productos más económicos y de origen autóctono.

- 4) Contribuir al mejoramiento del estándar y condiciones de vida de las personas que cultivan el fique.

Para lograr estos objetivos, se debe:

1. Caracterizar física y químicamente el jugo de la planta de fique y de otras plantas suculentas similares a través de ensayos normalizados de aditivos.
2. Estudiar la influencia de estos aditivos vegetales en las pastas y morteros de cemento Pórtland en estado fresco y en distintas condiciones de trabajo.
3. Estudiar la influencia de estos aditivos en las propiedades mecánicas de los morteros endurecidos y en distintas condiciones experimentales.
4. Estudiar su influencia en la trabajabilidad, la exudación y la densidad del hormigón fresco, en diferentes condiciones experimentales.
5. Analizar la influencia del tipo del cemento, el tamaño del árido y del tiempo de mezclado en el contenido de aire ocluido de los hormigones.
6. Realizar ensayos de durabilidad sobre morteros y hormigones dosificados, tales como: ciclos hielo-deshielo, resistencia a los sulfatos, humectación-secado.
7. Comparar el comportamiento de conglomerados fabricados con el aditivo orgánico frente al de conglomerados fabricados con aditivos comerciales

3. EXPERIMENTAL

3 EXPERIMENTAL

3.1 Materiales

Para llevar a cabo este trabajo se utilizaron materiales de origen Español y Colombiano. Cada uno de ellos se describe a continuación.

3.1.1 Cemento Pórtland gris

Para la elaboración de pastas y morteros con licor de *Agave americana*, aditivo superplastificante Sikament FF y aditivo aireante tipo Microair 100, se utilizó un cemento Pórtland gris tipo CEM I - 52.5R, suministrado por la empresa CEMEX (España). En los morteros y hormigones fabricados con licor de *Furcraea cabuya* se usó cemento Tipo I y Tipo III de la empresa Rio Claro en Colombia. La composición química del cemento se detalla en el Cuadro 6:

Cuadro 6. Composición química de los cementos

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PF*	RI**	SS*** cm ² /g
CEM I 52.5R	19,33	5,66	2,66	63,07	0,36	3,38	1,88	0,14	1,64	0,76	4590
TIPO I	21,00	4,50	3,50	62,00	1,00	2,00	0,40	0,10	3,00	1,50	2800
TIPO III	20,00	3,50	3,00	64,80	1,00	1,50	0,60	0,12	2,50	1,50	4200

* Pérdida al fuego

** Residuo insoluble

*** Superficie específica

3.1.2 Áridos finos.

En la fabricación de morteros con el licor de *Agave americana*, se utilizó una mezcla de áridos de carácter silíceo suministrados por la empresa Caolines Lapiedra (Liria- Valencia). La mezcla, compuesta por un 40% de arena AFA 60 y un 60% de AFA 45, tiene un módulo de finura de 3,34

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

Para los morteros fabricados con el licor de *Furcraea cabuya* se usó arena de Ottawa estándar con la granulometría que establece la norma ASTM C33-03 ⁽²⁷⁾

En la fabricación de hormigones se utilizó una arena de triturada de Canteras de Colombia y cuya granulometría se muestra en la Ilustración 14:

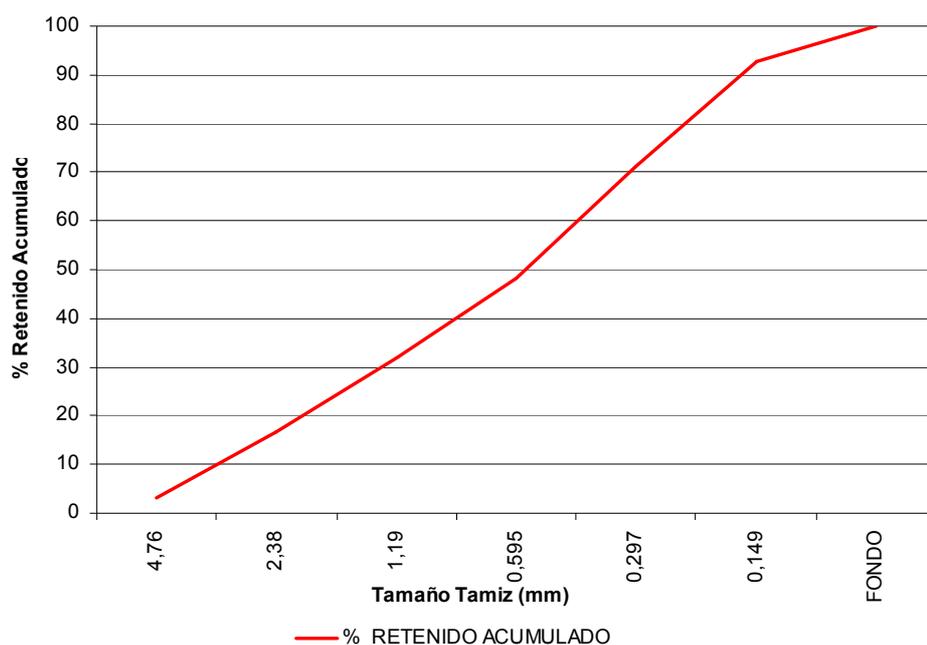


Ilustración 14. Curva granulométrica del árido fino

3.1.3 Áridos gruesos

El árido grueso de 19,0 mm que se usó en la investigación es de procedencia de la empresa Canteras de Colombia ubicada en la ciudad de Medellín, Colombia.

Es un triturado de iguales tonalidades negruzcas; su forma es angular y a simple vista tiene tamaños diferentes. Su módulo de finura es de 5,61.

De los estudios realizados en el laboratorio se obtuvo que el porcentaje de absorción es del 0,5% y tiene una densidad aparente seca de 2,94 kg/dm³. En la curva granulométrica, Ilustración 15, se observa que existen

3. EXPERIMENTAL

partículas entre 19,0 y 4,76 mm, en consecuencia se podría decir que es un árido bien gradado.

El árido grueso de 9,51 mm que se utilizó es extraído de río. Es de diferentes tonalidades amarillentas; su forma es redondeada y a simple vista son de tamaño uniforme. Tiene un módulo de finura de 6,04, y su porcentaje de absorción es de 3,09%

En la Ilustración 16, se observa la curva granulométrica de este árido. Los tamaños de partículas son uniformes en el tamiz de 9,51 mm lo que significa que no tiene una buena gradación

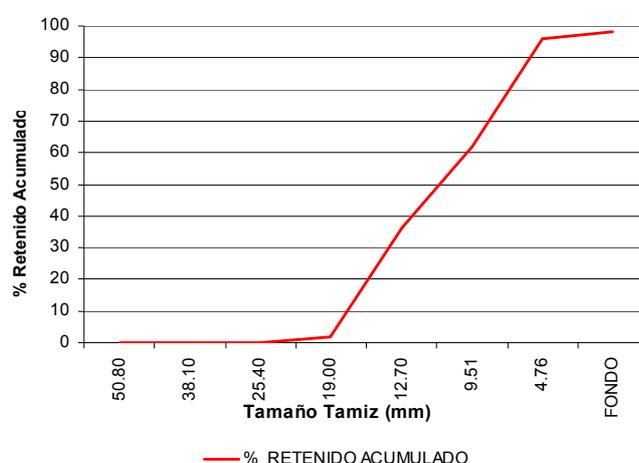


Ilustración 15. Curva granulométrica árido grueso de 19,0 mm

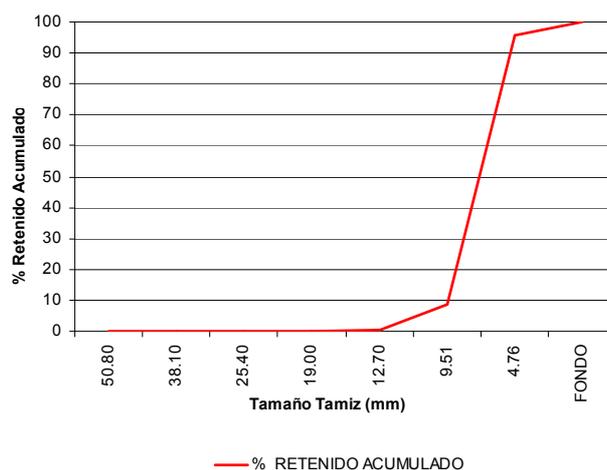


Ilustración 16. Curva granulométrica árido grueso de 9,51 mm

3.1.4 Agua

El agua utilizada en la preparación de pastas y morteros es el agua potable suministrada a la red de la Universidad Politécnica de Valencia – España. El análisis químico es el indicado en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Análisis químico del agua de amasado red Universidad Politécnica de Valencia

Cloruros	Ca y Mg	Sulfatos	Conductividad	pH
mg/l	Expresado en mg/l de CaCO ₃	mg/l	μS/cm	
93	480	298	939	7,88

El agua utilizada en los ensayos de hormigones y algunos morteros, es el agua potable suministrada a la red de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. En el Cuadro 8 se muestra su análisis químico.

Cuadro 8. Análisis químico del agua de amasado red de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín

Cloruros	Ca y Mg	Sulfatos	Conductividad	pH
mg/l	Expresado en mg/l de CaCO ₃	mg/l	μS/cm	
4,9	41	14,6	No determinado	7,02

3.1.5 Extracto de *Furcraea cabuya* (Fique)

Para los estudios en hormigones y algunos de durabilidad, se utilizó el licor de la planta *Furcraea Cabuya* de nombre vulgar: cabuya hembra o fique cenizo, y cuya composición y proceso de extracción se describió en la sección 1.1. El origen fue el Centro Comunitario de Beneficio del Fique, de la vereda Pantanillo en el municipio de Girardota (Departamento de Antioquia - Colombia).

3.1.6 Extracto de *Agave americana*

Después de consultar y verificar que en España no existía el cultivo ni la producción de la especie *Furcraea cabuya*, se decidió utilizar para algunos

3. EXPERIMENTAL

ensayos, el licor del *Agave americana* que presenta similitudes taxonómicas con la anterior especie.

Los Agave son plantas decorativas, originarias de América y se encuentran particularmente en España (especialmente el *Agave americana*), así como en muchos otros países del Sur de Europa, del Norte y Sur de África.

Su tallo es corto e incluso inexistente en muchos casos. Las hojas, dispuestas en roseta, son duras y más o menos carnosas, con los márgenes dentados en muchas ocasiones y acabando generalmente en un dura espina terminal (²⁸). Su clasificación taxonómica la podemos observar en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Clasificación Taxonómica del *Agave americana*

Clasificación Taxonómica	
REINO	Vegetal
PHYLUM	Tracheophyta
DIVISIÓN	Spermatophyta
CLASE	Angiospermae
SUBCLASE	Monocotyledonea
ORDEN	Liliflorae
FAMILIA	Agavaceae
GÉNERO	Agave

La especie *Agave americana* es la más conocida en España y pertenece al paisaje mediterráneo. Mide de 2 a 3m de ancho, las hojas son gruesas, lanceoladas de color azulado y se hallan bordeadas de espinas. Pueden llegar a medir más de 1,75 m de largo y 30 cm de ancho.

Las hojas se recogieron en los términos municipales de Paterna y de Bétera, en la provincia de Valencia – España. Cada muestra del licor está denominada por un primer número que reconoce el sector donde fue recogida y un segundo número, entre paréntesis, que designa la planta origen. Así pues, las muestras 2(1) y 2(2) fueron obtenidas en el mismo

sector pero pertenecen a diferentes plantas; lo mismo sucede con las muestras 3(1) y 3(2).

Las hojas fueron empacadas en bolsas de polietileno y transportadas hasta los laboratorios del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Valencia, donde en el transcurso de las siguientes 24 horas fueron procesadas. Después de limpiar las hojas con abundante agua se trocearon en tres partes, aproximadamente iguales en longitud, y cada una fue pesada y medida. La sección que pertenece a la punta se denomina 1/3; la sección media 2/3 y la base de la hoja 3/3. (Ilustración 17)

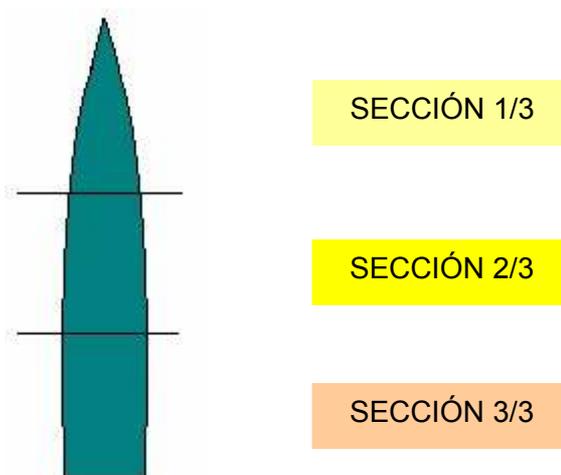


Ilustración 17. Secciones de la hoja de *Agave americana*

Cada trozo de la hoja se licuó para obtener el licor correspondiente. Algunas secciones 3/3 fueron antes peladas, con el propósito de caracterizar el licor con y sin piel; de ahí la denominación cp o sp. La licuadora utilizada permitió separar la fibra más larga y exprimir el licor. El líquido obtenido de cada sección se pesó, para conocer el rendimiento relativo al peso de la hoja, se envasó en pequeños botes con 25g, cada uno, y se congeló inmediatamente. Allí permaneció, a una temperatura promedio de -14°C , hasta que fue utilizado.

Las características de dimensión y peso de las hojas seleccionadas se presentan en el Cuadro 10. Las columnas 3 y 4 muestran la longitud y el ancho de la hoja. En la columna cinco se indica la sección de la hoja, en la columna seis su peso y en la columna siete el porcentaje que representa respecto al peso de la sección. La longitud de la hoja, desde la base hasta

3. EXPERIMENTAL

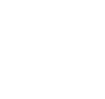
su punta, está entre 155 y 175 cm., considerando que aquellas que estén hacia la base son más cortas que las que están hacia la parte superior de la planta; el ancho está entre 15 y 20 cm. El peso de cada hoja está entre 2.965 y 4.090 g, y el promedio calculado a partir de las muestras estudiadas es de 3.422 gramos por hoja. El mayor peso de la hoja está en su parte baja (3/3), donde se acumula la mayor cantidad de tejido carnoso y rico en agua. En promedio se considera que la base de la hoja representa el 61,42% de la misma, la parte central el 29,43% y la punta el 9,15%.

En el Cuadro 11 se muestra el peso del licor extraído de las hojas. La columna 1 hace referencia a la planta seleccionada, la columna 2 a la sección de la hoja, la columna 3 al peso de la sección de la hoja, la columna 4 al peso del licor extraído de la misma sección, en la columna 5 se muestra el porcentaje de licor respecto al peso de la sección de la hoja y la columna 6 muestra el porcentaje de licor respecto al peso total de la hoja. El total es el promedio ponderado del licor con respecto al peso de la hoja.

En todas las secciones, el peso del licor respecto a la sección de donde se extrajo, está entre un 44,43% y un 65,71%, siendo un poco menor el licor extraído en la punta de la hoja, sección 1/3 y mayor el de la base, sección 3/3.

El mayor porcentaje respecto al peso ponderado total de la hoja, está entre un 31,99% y 38,51%, de licor y se obtiene de la base de la hoja (3/3), por concentrarse allí el tejido carnoso y el agua. Las secciones media (2/3) y la punta (1/3), aportan menos cantidad de licor al global de la hoja. Es pertinente aclarar que sólo se peló la sección de la base de la hoja (3/3) por la imposibilidad técnica que existía de hacerlo en las secciones media (2/3) y la punta (1/3).

Cuadro 10. Características de las hojas de *Agave americana* utilizadas en los ensayos

1	2	3	4	5	6	7
P	Imagen	Longitud de la hoja	Ancho de la hoja	Sec.	Peso de la sección de la hoja	% respecto al peso total de la hoja
		cm	cm		g	%
1		154,00	20,00	3/3	2592,35	63,37
				2/3	1199,67	29,32
				1/3	298,90	7,4
				TOTAL	4090,92	100
2 (1)		176,00	15,00	3/3	1774,19	59,83
				2/3	884,79	29,84
				1/3	306,51	10,33
				TOTAL	2965,49	100
2(2)		162,00	18,00	3/3	2574,37	65,98
				2/3	1040,17	26,66
				1/3	287,13	7,36
				TOTAL	3901,67	100
3(1)		172,00	15,00	3/3	1742,05	58,72
				2/3	904,60	30,49
				1/3	320,11	10,79
				TOTAL	2966,76	100
3(2)		167,00	15,00	3/3	2146,21	62,93
				2/3	924,80	27,12
				1/3	339,30	9,95
				TOTAL	3410,31	100
4		167,00	17,00	3/3	1845,07	57,67
				2/3	1060,76	33,15
				1/3	293,80	9,18
				TOTAL	3199,63	100

3. EXPERIMENTAL

Cuadro 11. Peso del licor del *Agave americana* extraído de las hojas

1	2	3	4	5	6
P	Sec.	Peso de la sección de la hoja	Peso del licor extraído	% del licor respecto a la sección de la hoja	% del licor respecto al peso total de la hoja
		g	g	%	%
1	3/3	2592,35	1345,49	51,90	32,89
	2/3	1199,67	683,51	56,97	16,70
	1/3	298,90	132,80	44,43	3,25
	TOTAL	4090,92	2161,80		52,84
2 (1)	3/3	1774,19	977,77	55,11	32,97
	2/3	884,79	484,34	54,74	16,33
	1/3	306,51	137,35	44,81	4,63
	TOTAL	2965,49	1599,46		53,93
2(2)	3/3	2574,37	1502,53	58,36	38,51
	2/3	1040,17	587,84	56,51	15,07
	1/3	287,13	142,45	49,61	3,65
	TOTAL	3901,67	2232,82		57,23
3(1)	3/3	1742,05	949,12	54,48	31,99
	2/3	904,60	445,09	49,20	15,00
	1/3	320,11	182,89	57,13	6,16
	TOTAL	2966,76	1577,10		53,15
3(2)	3/3	2146,21	1185,94	55,26	34,78
	2/3	924,80	513,21	55,49	15,05
	1/3	339,30	179,02	52,76	5,25
	TOTAL	3410,31	1878,17		55,08
4	3/3	1845,07	1050,29	62,18	32,83
	2/3	1060,76	548,15	61,10	17,13
	1/3	293,80	133,60	45,47	4,18
	TOTAL	3199,63	1732,04		54,14

3.1.7 Aditivo Superplastificante

Se escogió, para obtener datos comparativos, un aditivo superplastificante considerando que algunas investigaciones previas habían justificado características plastificantes similares al licor de la planta de *Agave*.

El producto seleccionado fue Sikament FF de la empresa SIKA cuyas características se detallan a continuación:

Cuadro 12. Características físicas del Sikament FF

Sikament FF	
Tipo	Melamina
Aspecto	Líquido incoloro
Densidad aproximada	1,25 Kg/l
Contenido de sólidos	40%
pH	12

En el desarrollo del trabajo se denominará SPs

3.1.8 Aditivo Aireante

Para comparar algunas propiedades de los morteros, como consistencia y resistencias mecánicas, se utilizó un aditivo aireante comercial denominado Micro-Air 100 de la empresa Bettor. Sus características son las siguientes:

Cuadro 13. Características físicas del Micro-Air 100

Micro-Air 100	
Función principal	Incluser de aire
Efecto secundario	Posible pérdida de resistencias mecánicas
Aspecto físico	Líquido ámbar-marrón
Densidad aparente, 20°C	1,01 g/cm ³
Contenido de cloruros	< 0,1 %

FUENTE:[http://www.degussa-cc.es/DCCSpain/BLX/ Productos/Indice+ por+aplicacion/ Aditivos/ Aireantes/ MICRO+AIR+ 100.htm](http://www.degussa-cc.es/DCCSpain/BLX/Productos/Indice+por+aplicacion/Aditivos/Aireantes/MICRO+AIR+100.htm)

3.1.9 Yeso

Para los ensayos correspondientes se utilizó un yeso grueso de construcción que se utiliza para pasta de agarre en la ejecución de tabicados, en revestimientos interiores y como conglomerante auxiliar de obra de marca la Maruxiña.

3. EXPERIMENTAL

Las características físicas de este yeso se muestran en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Características físicas del yeso tipo YG

Yeso tipo YG La Maruxiña	
Índice de pureza	75%
pH mínimo	6
Finura de molido	50%
Principio de fraguado	8 minutos
Final de fraguado	10 minutos
Resistencia mecánica mínima a flexotracción	2,0 MPa

3.2 Procedimientos experimentales y equipos

3.2.1 Ensayos de caracterización Físico – Química

La caracterización físico-química de un aditivo tiene como objetivo identificar su composición, para poder entender y explicar los mecanismos de su actuación en las pastas, morteros y hormigones de cemento Pórtland

3.2.1.1 Determinación del extracto seco convencional

Este ensayo tiene como objeto determinar el contenido de residuo seco (extracto seco convencional), a $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$, en los aditivos líquidos para hormigones, morteros y pastas. El procedimiento se hizo siguiendo la norma UNE-EN 480-8 ⁽²⁹⁾.

Los aparatos utilizados son: cápsula de evaporación de fondo plano, desecador, estufa con ventilación forzada con regulador termostático a $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$. (Ilustración 18)

La cápsula de evaporación se calienta durante al menos una hora a $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$. Se pesa después de enfriarla en un desecador. Se pesa una masa entre 5g y 10g de aditivo líquido con una exactitud de 0,001g. Se coloca la muestra en la estufa precalentada a $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ y se mantiene durante 4 horas después de lo cual se pasa a un desecador y se pesa hasta constancia de masa.

El resultado se expresa en tanto por ciento en masa y se calcula por medio de la expresión:

$$\text{Extracto seco } X = \frac{R}{M} \times 100$$

Donde

X es el extraco seco en masa, en tanto por ciento

R es la masa del residuo, en gramos

M es la masa del aditivo, en gramos



a)



b)



c)

Ilustración 18. Fotografía de equipos para el ensayo de extracto seco convencional. a) desecador, b) estufa con ventilación forzada con regulador termostático $105 \pm 3^\circ \text{ C}$, c) balanza analítica.

3.2.1.2 Pérdida por calcinación a $1050 \pm 25^\circ \text{ C}$

Tiene por objeto determinar la pérdida de masa que experimentan los aditivos para hormigones, morteros y pastas cuando se someten a $1050 \pm 25^\circ \text{ C}$, hasta constancia de masa. Se determina por pesada del residuo seco obtenido a $105 \pm 3^\circ \text{ C}$ y del que queda cuando éste se somete a la acción del calor a $1050 \pm 25^\circ \text{ C}$, hasta constancia de masa.

3. EXPERIMENTAL

Este ensayo se realizó siguiendo la norma UNE 83-207-85 ⁽³⁰⁾. El equipo utilizado es: material corriente de laboratorio, horno de mufla, cápsula de platino o de porcelana. (Ilustración 19).

La cápsula de platino que contiene el residuo seco del aditivo líquido (extracto seco convencional), se introduce durante una hora en el horno de mufla a 1050° C. Transcurrido este tiempo, se saca la cápsula del horno; se pasa por un desecador donde se deja enfriar, durante 30 minutos, hasta la temperatura ambiente y, a continuación, se pesa con una precisión no inferior a ± 0,001g. Se vuelve a introducir la cápsula en el horno de mufla durante 15 minutos; se pasa al desecador, donde se deja enfriar durante 30 minutos y se pesa con la precisión anterior.

Los resultados se expresan en tanto por ciento en masa, con relación a la cantidad de aditivo ensayado, y se calculan por medio de la siguiente expresión:

$$\text{Pérdida por calcinación, \%} = \frac{M_3 - M_1}{M_2 - M_1} \times 100$$

Donde:

M_1 masa de la cápsula, en gramos

M_2 masa de la cápsula con el residuo seco a 105° C

M_3 masa de la cápsula con el resto del aditivo, sometido a 1050 ± 25° C



a)



b)

Ilustración 19. Fotografía de equipo para ensayo de pérdida por calcinación a 1050 ± 25°C. a) cápsulas de platino, b) horno mufla

3.2.1.3 Residuo insoluble en agua desionizada

El objeto de este ensayo es determinar el residuo insoluble en agua desionizada de los aditivos para hormigones, morteros y pastas. Para su realización se utilizó la norma UNE 83208 ⁽³¹⁾.

La determinación del residuo insoluble en agua desionizada de un aditivo, se realiza por pesada del producto no soluble en un volumen dado de agua desionizada caliente (75° C aproximadamente), a partir de una cantidad conocida de dicho aditivo.

Para el ensayo se utiliza como único reactivo el agua desionizada y los equipos son: material corriente de laboratorio, embudo con placa filtrante de vidrio poroso (porosidad media), kitasato de 1000 ml, bomba de vacío, desecador. (Ilustración 20).

Se parte de unos 10g de aditivo, que se pesan con una exactitud no menor de $\pm 0,005g$. Se ponen en un vaso de 250 ml que contiene 150 ml de agua desionizada. A continuación se agita y se calienta hasta ebullición, manteniendo ésta durante 5 minutos. Se decanta y filtra en caliente a través del embudo con placa filtrante, que se ha tarado previamente. Las aguas de filtrado y lavado se recogen en el kitasato y se pasan a un matraz aforado de 500 ml completando el volumen con agua; esta sustancia será la que se utilizará posteriormente para calcular el poder reductor del aditivo.

El embudo que contiene el residuo insoluble, previamente lavado, se seca a $105 \pm 3^\circ C$ hasta masa constante, y a continuación se pone en un desecador donde se deja enfriar y se pesa con una exactitud no inferior a $\pm 0,005g$.

Los resultados del residuo insoluble en agua desionizada se expresan en tanto por ciento en masa, con relación a la cantidad de aditivo ensayado, y se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$\text{Residuo insoluble en agua desionizada, en \%} = \frac{M_3 - M_2}{M_1} \times 100 \%$$

Donde

M_1 es la masa del aditivo, en gramos

M_2 es la masa del embudo con placa filtrante, en gramos

3. EXPERIMENTAL

M_3 es la masa del embudo con placa filtrante más el residuo insoluble en agua desionizada en gramos.



a)



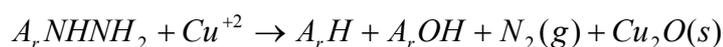
b)

Ilustración 20. Fotografía del equipo para la determinación del residuo insoluble en agua destilada. a) desecador, cápsulas de porcelana y embudo de placa filtrante de vidrio poroso, b) bomba de vacío

3.2.1.4 Contenido de reductores (azúcares)

Este ensayo permite conocer la presencia de azúcares en los aditivos, que podrían influir sobre la velocidad de fraguado o de endurecimiento de una pasta, de un mortero o de un hormigón. Se basa en la reacción que tiene lugar entre una disolución neutra de sustancias reductoras con el reactivo de FEHLING.

La presencia de un azúcar reductor, se pone de manifiesto mediante la reacción de FEHLING, que puede representarse así:



En medio alcalino, el cobre procedente del $CuSO_4$ se encuentra en forma de hidróxido cúprico, y se forma la correspondiente sal Na_2SO_4 . Cuando el $Cu(OH)_2$ (de color azul) se calienta en presencia de un compuesto reductor se forma óxido cuproso (un precipitado de color rojo ladrillo).

Si hay un compuesto reductor, el Cu cambia su estado de oxidación de (2+ a 1+), lo que se evidencia por el cambio de color.

Los reactivos utilizados son: ácido clorhídrico concentrado (HCl), disolución de ácido clorhídrico aproximadamente 2N, hidróxido de sodio (NaOH), disolución de hidróxido de sodio, aproximadamente 2N, disolución de

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

FEHLING (sulfato de cobre $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y tartrato de sodio y potasio $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6^-$).

El procedimiento utilizado fue el de la norma UNE 83-212-89 ⁽³²⁾ y se describe en la Ilustración 21

Los equipos utilizados son: el usual de un laboratorio de análisis químico, balanza analítica, embudo de placa filtrante de porosidad media, equipo de filtrado al vacío. (Ilustración 22)

El poder reductor se calcula por medio de la expresión:

$$\text{Poder reductor} = \frac{M_3 - M_2}{M_1} \times n$$

Donde

M_1 es la masa del aditivo utilizada para obtener la fracción soluble en agua desionizada.

M_2 es la masa del embudo con placa filtrante, en gramos.

M_3 es la masa del embudo con placa filtrante que contiene el precipitado.

n es la inversa de la fracción alícuota

3. EXPERIMENTAL

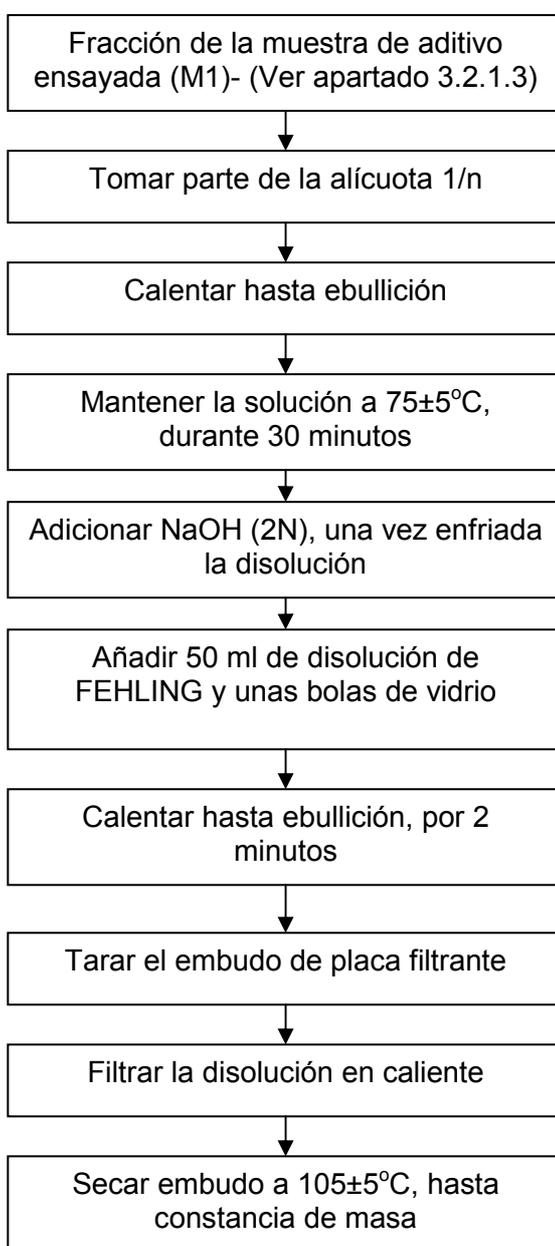


Ilustración 21. Diagrama del procedimiento para el ensayo de contenido de reductores (azúcares)



a)



b)

Ilustración 22. Fotografía del equipo utilizado para el ensayo de contenido de reductores (azúcares). a) balanza analítica, b) equipo de filtrado

3.2.1.5 Contenido de halogenuros totales

Este ensayo tiene como objeto determinar el contenido de halogenuros (cloruros, bromuros y ioduros) totales (solubles y no solubles en agua) en los aditivos para hormigones, morteros y pastas. El procedimiento se basa en la norma UNE 83-210-88 ⁽³³⁾.

El contenido de halogenuros totales (solubles y no solubles en agua) en los aditivos se determina mercurimétricamente en la disolución de la muestra en medio nítrico, de la que previamente se han eliminado los posibles compuestos orgánicos por medio de una disgregación con la mezcla Eschka (carbonato de sodio o de potasio + óxido de magnesio, 1 + 2 en masa) con objeto de fijar los halogenuros.

El ion mercurio (II) reacciona con los iones halogenuro formando los compuestos correspondientes poco disociados en disolución acuosa. El punto de equivalencia se determina por medio del indicador coloreado difenil-carbazona, que reacciona con los iones mercurio (II), formando complejos intensamente coloreados, estables a pH controlado (3,2 a 3,3); para ajustar el pH 3,3 se utiliza azul de bromofenol, que adquiere un color amarillo-verdoso complementario del violeta del complejo difenil-carbazona-mercurio (II), el cual enmascara el ligero color que podría aparecer en las proximidades del punto de equivalencia.

A pesar de que el cloruro mercurio (II) está poco disociado en disoluciones diluídas, la pequeña concentración de iones mercurio (II), libres antes de

3. EXPERIMENTAL

alcanzar el punto de equivalencia tiende a adelantar el punto final de reacción. En disoluciones concentradas tiene lugar la formación del ion complejo ClHg^+ , que tiende a retrasar la aparición del mencionado punto. Por todo ello, es indispensable realizar, en cada caso, un ensayo en blanco para determinar la cantidad necesaria de disolución, correspondiente al punto final de valoración.

Los reactivos utilizados son: agua desionizada, mezcla Eschka (se mezclan íntimamente 2 partes en masa de óxido de magnesio ligero calcinado, con una parte en masa de carbonato de sodio o de potasio anhidro, que deben estar exentos de cloruros), ácido nítrico concentrado, disolución de ácido nítrico, aproximadamente 2N, disolución de hidróxido de sodio aproximadamente 2N, disolución de cloruro de sodio 0,1 N, disolución de difenil-carbazona, con una concentración de 5,0 g/l en etanol de 94°, disolución de nitrato de mercurio (II) 0,1 N.

Como muestras se tomó el extracto de *Agave americana* en estado seco y liofilizado con piel y el superplastificante comercial Sikament FF. Las muestras se prepararon y se determinó el contenido de halogenuros totales mediante el procedimiento presentado en la Ilustración 23.

Una vez conseguida la igualdad de coloración, se deduce del volumen de la disolución de nitrato de mercurio (II) 0,01 N, el utilizado en la disolución testigo. Éste será el volumen realmente consumido en la valoración. Para determinar el contenido de halogenuros totales es indispensable realizar un ensayo en blanco.

El contenido de halogenuros totales en los aditivos, expresado como miligramos de ion cloruro por gramo de aditivo, se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$\text{Cloruros (mg/g aditivo)} = \frac{V_t \times T}{m_t}$$

Donde

V_t es el volumen en ml de la disolución de nitrato de mercurio (II) = 0,01 N consumido en la valoración de halogenuros totales, corregido por los resultados del ensayo en blanco;

T es la concentración de la disolución de nitrato de mercurio (II) 0,01 N, expresado en mg de ion cloruro por mililitro de disolución;

m_i es la masa del aditivo utilizada para determinar el contenido de halogenuros totales, expresada en gramos.

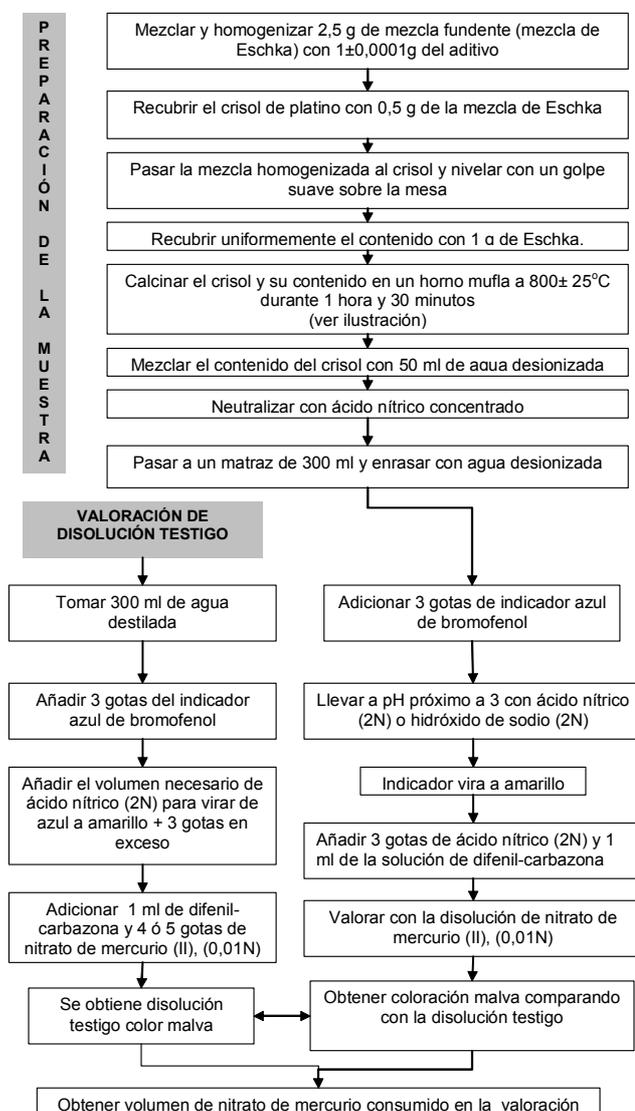


Ilustración 23. Diagrama para la preparación de la muestra y procedimiento para el ensayo de contenido halogenuros totales

3.2.1.6 Conductividad

Alternativamente a la evaluación del contenido de halogenuros se utilizó la medida de la conductividad eléctrica como indicador de los iones presentes

3. EXPERIMENTAL

en solución acuosa, para lo cual se ha utilizado un equipo que consta de los siguientes elementos (Ilustración 24):

- Un reactor con termostato de vidrio Pirex con doble pared, para la regulación de la temperatura del sistema, el cual se mantiene cerrado mediante una tapa para evitar la carbonatación. A dicha tapa se le pueden introducir los electrodos de medida de pH y conductividad eléctrica;
- pH-metro Crison micropH 2001 con salida RS232 dotado de un electrodo de pH resistente a medios alcalinos;
- Conductímetro Crison microCM2201 con salida RS232 provisto de un electrodo con una constante de celda de 1,07;
- Baño termostático Selecta Ultraterm para controlar la temperatura del sistema;
- Agitador magnético;
- Tarjeta de adquisición de datos;
- Ordenador personal;
- Software desarrollado para la adquisición y registro de datos;



Ilustración 24. Fotografía del equipo para el ensayo de conductividad eléctrica

El procedimiento experimental para la medición de la conductividad eléctrica es el siguiente:

- Introducir 50 ml de agua desionizada al vaso termostático.

- Ajustar los electrodos de pH (previamente calibrado) y conductividad al sistema, fijando la temperatura del experimento.
- Adicionar el extracto seco del licor de la planta o del aditivo comercial.
- Manteniendo el sistema en continua agitación se hace la lectura después de un minuto aproximadamente.

3.2.1.7 Peso específico

La determinación del peso específico se hace sobre tres muestras distintas. Se adiciona a una probeta graduada de 100 ml, previamente tarada, un muestra de aditivo evitando la formación de burbujas de aire (espuma) y si es el caso se eliminan. A continuación se pesa la probeta con el contenido de aditivo.

Los resultados son la media aritmética de los tres resultados y se expresan en kg/l, el valor se expresa con dos cifras decimales.

3.2.1.8 Determinación del pH

Para la determinación del pH de las muestras estudiadas se siguió el método de la norma UNE 83-22786 ⁽³⁴⁾. El equipo utilizado se muestra en la Ilustración 25.

A partir del aditivo homogenizado, se toman tres muestras de 100 ml, y a continuación, se realiza a $20 \pm 2^\circ \text{C}$, sobre cada una, la medida del pH, una vez tarado según las especificaciones técnicas del fabricante.

Posteriormente se preparan tres muestras de 10 ml, cada una, del aditivo y se diluyen en 100 ml de agua desionizada, se homogenizan, se agitan y se realiza, en cada muestra, a $20 \pm 1^\circ \text{C}$, la determinación del pH.

Los resultados se expresan con una cifra decimal, a $20 \pm 1^\circ \text{C}$. Dichos resultados son la media aritmética de las tres medidas realizadas, si ninguno de los tres valores se diferencia en más de 0,2 unidades de dicha medida. En caso contrario, se indican los valores individuales.

3. EXPERIMENTAL



Ilustración 25 Fotografía del pH-metro de sensibilidad 0,01 unidades de pH

3.2.1.9 Termogravimetría y Análisis Térmico Diferencial

La definición generalmente aceptada de análisis térmico abarca al grupo de técnicas en las que se mide una propiedad física de una sustancia y/o productos de reacción en función de la temperatura, mientras se somete a un programa de temperatura controlado.

Se puede distinguir más de una docena de métodos térmicos, que difieren en las propiedades medidas y en los programas de temperatura. El método usado en este trabajo es la termogravimetría (TG), donde se registra continuamente la variación de masa de una muestra colocada en una atmósfera controlada, en función de la temperatura, o del tiempo, al ir aumentando la temperatura de la muestra. La representación de la masa o del porcentaje de masa en función del tiempo se denomina termograma o curva de descomposición térmica. ⁽³⁵⁻³⁶⁾

La curva DTG es la representación gráfica de la derivada de la curva TG, y nos proporciona información sobre la velocidad de pérdida o ganancia de masa con la temperatura o con el tiempo. Esta representación permite identificar con mayor facilidad las alteraciones de masa, especialmente cuando las pérdidas son muy pequeñas o bien cuando existen varios procesos con temperaturas de activación muy cercanas. Adicionalmente, la curva DTG permite, por medio de la integración, evaluar saltos pequeños que resultan complejos de medir sobre la curva TG.

La curva DTA es aquella que presenta gráficamente la diferencia entre la temperatura de la muestra y la del entorno, con el tiempo o la temperatura, al ser calentada a una determinada atmósfera. El área encerrada entre la curva y la línea base está relacionada con el calor involucrado en el proceso. En los gráficos obtenidos en este trabajo, los eventos exotérmicos

aparecen hacia arriba, mientras que los procesos endotérmicos se muestran hacia abajo.

El equipo que se ha empleado para la termogravimetría y el análisis térmico diferencial es un módulo TGA 850 Mettler- Toledo, que permite medir simultáneamente la curva termogravimétrica (TG) y la curva de análisis térmico-diferencial (DTA), sin necesidad de usar material de referencia (single differential thermal analysis, SDTA)

El equipo cuenta con una electrobalanza horizontal, un horno y sensores de temperatura que están en comunicación con un ordenador, donde se registran y se procesan los datos. La microbalanza tiene una resolución de 0,1 μg . En algunas experiencias se utilizan crisoles de alúmina, para poder trabajar hasta 1000° C de temperatura, mientras que para la realización del estudio en pastas se emplean crisoles de aluminio sellados con una tapa microperforada. Ver Ilustración 26.

El programa de temperaturas y las condiciones del ensayo por termogravimetría se explican más detalladamente en el apartado de resultados y discusión.



a)



b)

Ilustración 26. Fotografía del equipo utilizados en el ensayo de termogravimetría y análisis térmico diferencial. a) crisoles de aluminio y alúmina; b) termobalanza TGA 850 Mettler - Toledo

3.2.1.10 Microscopía electrónica de barrido

Para el estudio de la morfología y composición del licor de *Agave americana*, se utilizó la microscopía electrónica de barrido (SEM). Las principales características del equipo utilizado son las que se describen a continuación: modelo utilizado JEOL JSM6300; Voltaje aplicado para la obtención de imágenes: 20KV; distancia de trabajo: 15mm. (Ilustración 27)

3. EXPERIMENTAL

Las imágenes se obtuvieron a partir de los electrones secundarios generados en las condiciones citadas anteriormente.

Previamente al estudio por microscopía, las muestras fueron recubiertas con carbono para facilitar la conductividad eléctrica de las mismas. El programa de adquisición de rayos X fue "X Ray analysis" y el programa para cuantificar fue "SEM Quant" que utiliza el método ZAF. Finalmente, la adquisición de imágenes se realizó mediante el programa "Autobeam".



Ilustración 27. Fotografía del Microscopio Electrónico de Barrido SEM

3.2.1.11 Espectroscopía Infrarroja

El uso de la espectroscopía infrarroja para la determinación cualitativa y cuantitativa de grupos funcionales es cada vez más común en el campo de la química del cemento. En el presente trabajo se ha utilizado para caracterizar cualitativamente el licor de *Agave americana*.

La región del espectro de infrarrojo abarca entre $4000-400\text{ cm}^{-1}$. La interacción de este tipo de radiación con la materia origina cambios de estados vibracionales y rotacionales de las moléculas. Los espectros de absorción de I.R., están constituidos por bandas estrechas características, debidas a la modificación de estados vibracionales de los átomos de la molécula problema.

El equipo de infrarrojo por transformación de Fourier utilizado es el modelo espectrómetro Mattson Genesis II F.T.I.R. Además el espectrómetro posee un software analítico que utiliza el programa WinFIRST- FTIR. (Ilustración 28)

El sistema dispersante que se utilizó para la fabricación de las pastillas a analizar por I.R. fue KBr, que constituye un blanco para la zona espectral

de $4000-400\text{ cm}^{-1}$. Las pastillas se realizan con el extracto seco obtenido en el ensayo correspondiente (ver 3.2.1.1), mezclando íntimamente trazas de la muestra problema con KBr puro y seco en una proporción aproximada del 1% en masa de la mezcla y comprimiéndola mediante una prensa manual.

La característica principal de la espectroscopia infrarroja es que permite identificar especies químicas a través de la determinación de la posición (número de onda) a la que distintos grupos funcionales presentan bandas de absorción en el espectro IR ⁽³⁷⁾.



Ilustración 28. Fotografía del Espectrómetro Mattson Genesis II F.T.I.R

3.2.2 Ensayos en pastas de cemento

3.2.2.1 Consistencia normal y tiempos de fraguado

Para obtener la consistencia normal y tiempos de fraguado de los cementos, se utilizó la norma UNE-EN 196-3 ⁽³⁸⁾. En esta norma se establece que el tiempo de fraguado se calcula observando la penetración de una aguja en una pasta de cemento de consistencia normal, hasta que alcanza un valor especificado. Dicha pasta de consistencia normal tiene una resistencia específica a la penetración de una sonda normalizada. El agua requerida para la confección de la pasta se determina por medio de sucesivos ensayos de penetración, en pastas con diferentes contenidos de agua.

En el ensayo se utiliza el aparato de Vicat, que aparece en la Ilustración 29 a), y que se compone:

3. EXPERIMENTAL

-
- Sonda de metal no corrosivo, con forma de cilindro recto y longitud efectiva de 50 ± 1 mm y un diámetro de $10,00\pm 0,05$ mm. Ilustración 29 b)
 - Aguja de metal no corrosivo, de longitud efectiva de 50 ± 1 mm y un diámetro de $1,13\pm 0,05$ mm. Ilustración 29 c)
 - Aguja de metal no corrosivo con accesorio para determinar el final del fraguado. El diámetro de la aguja es de $1,13\pm 0,05$ mm y el del accesorio es de 5 mm. Ilustración 29 d)
 - Molde de caucho, de rigidez adecuada y de forma tronco cónica, de $40,0\pm 0,02$ mm de altura con diámetros internos de 70 ± 5 mm y 80 ± 5 mm superior e inferior respectivamente.
 - Placa base de vidrio plano de mayor dimensión que el molde y con espesor mínimo de 2,5mm.

El procedimiento para la obtención de la consistencia normal es el siguiente:

- Pesar 500 ± 1 g de material cementante y una cantidad cualquiera de agua, por ejemplo 125g.
- Se añade el agua a la amasadora que cumple con la norma UNE-EN 196-1⁽³⁹⁾. A continuación se añade el cemento, entre los 5s a 10s, anotándose el instante final de la adición como tiempo cero, e inmediatamente se pone en funcionamiento la amasadora a velocidad lenta durante 90s. Se detiene la amasadora y se deja reposar 15s (aprovechando para rascar el material impregnado en las paredes). A continuación se pone en funcionamiento la amasadora a velocidad lenta, durante otros 90s.
- Se transfiere inmediatamente la pasta al molde y se llena hasta rebosar, sin compactar ni vibrar. Se elimina el exceso de material, mediante enrasado suave, de forma que se obtenga una superficie superior lisa.
- Se calibra el aparato de Vicat con la sonda antes del ensayo, bajando la sonda hasta la placa base de vidrio y ajustando la puesta a cero en la escala.

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

- Se coloca el molde debajo de la sonda, colocando ésta en contacto con la superficie de la pasta, manteniendo entre 1s o 2s esta posición. A continuación, se libera la parte móvil del aparato, tal que la sonda penetre verticalmente en el centro de la pasta. El tiempo que ha de transcurrir desde que se inicia el amasado (tiempo cero) hasta que se libera la sonda será de 4 minutos. Se toma la lectura en la escala, cuando la penetración ha terminado o 30s después de la liberación de la sonda. La lectura indica la distancia entre la placa base y la cara inferior de la sonda.
- Se repite el ensayo con diferentes cantidades de agua hasta obtener una lectura de 6 ± 1 mm, que es la pasta de consistencia normal.

El procedimiento para obtener los tiempos de fraguado inicial y final es el siguiente:

- Calibrar el aparato de Vicat.
- Llenar el molde con una pasta de consistencia normal.
- Introducir el molde lleno y la placa base en la cámara húmeda, en la que se mantienen las condiciones de temperatura y humedad constantes ($20\pm 1^\circ$ C y 95% de humedad relativa).
- Después de un tiempo adecuado, se coloca el molde en el aparato de Vicat, se baja la aguja suavemente hasta que haga contacto con la superficie de la pasta, se suelta la aguja y se toma la lectura cuando la penetración ha terminado o cuando hayan transcurrido 30s después de la liberación de la aguja, registrando el tiempo (el instante cero es el inicio del amasado).
- Se repite el ensayo a intervalos espaciados. El principio del fraguado será cuando la distancia entre la aguja y la placa base sea de 4 ± 1 mm.
- Para determinar el final del fraguado, se invierte el molde lleno, al cual se le ha determinado el tiempo de fraguado inicial, sobre la placa base.
- Se inserta la aguja de Vicat para la determinación del final de fraguado y se realiza el ensayo de forma análoga a la determinación del inicio de fraguado.

3. EXPERIMENTAL

- El final del fraguado se produce cuando la aguja por primera vez penetra sólo 0.5 mm en la pasta, que es cuando el accesorio anular de la aguja deja de hacer una marca en la pasta, registrándose el tiempo con una precisión de 15 minutos.



a)



b)



c)



d)

Ilustración 29. Fotografía del equipo utilizado para la los ensayos de consistencia normal y tiempos de fraguado en pastas de cemento. a) aparato de Vicat, b) Sonda para determinar el agua de consistencia normal en pastas de cemento, c) aguja para determinar el tiempo inicial de fraguado en pastas y morteros de cemento, d) aguja para determinar el tiempo final de fraguado en pastas de cemento.

3.2.2.2 Viscosidad

La viscosidad es una propiedad de los fluidos que refleja la resistencia, debida al rozamiento, que unas partes del fluido oponen al desplazamiento relativo de las otras. Cuando el fluido se encuentra en movimiento, con un gradiente de velocidad, sus partes más veloces rozan con las más lentas, resultando que las primeras se ven frenadas y las segundas aceleradas, como consecuencia de dicho roce.

La medición de las curvas de flujo en pastas de cemento que relacionan la viscosidad plástica y esfuerzo de corte con la velocidad de cizalla, se llevó a cabo con un viscosímetro rotacional Bohlin Visco 88 BV. (Ilustración 30 a).

El equipo está conectado a un ordenador personal para la adquisición de datos, y que contiene el software Bohlin Windows V06.00.03 (The Corinium Centre, Dircncester, England), con el que se manipulan los datos.

La mezcla de las pastas se realizó con un mezclador de laboratorio Hidolph Type RZR1, con una hélice con doble pala helicoidal a una velocidad de 280 rpm. Ver Ilustración 30 b) y c).

Las principales características del viscosímetro son:

- Rango de velocidad rotacional de 0 a 1000 rpm;
- Rango de velocidad de corte de 0 a 20000 s⁻¹;
- Rango de par de 0 a 10 mNm;
- Rango de esfuerzo de cizalla de 0 a 10000 Pa;
- Rango de viscosidad de 3,8 a 1x10⁷ mPa s;
- Rango de temperatura de -50°C a 200° C.

La geometría utilizada ha sido la de cilindros concéntricos (DIN estándar). La ventaja de esta geometría es que se puede aplicar a suspensiones, que junto con la gran superficie de medición, es ideal para aumentar la sensibilidad y por lo tanto, registrar buenos datos a bajas velocidades de cizalla. Dentro de esta geometría, utilizamos el cillindro (GAP) "C25 infinite sea", donde el 25 se refiere al diámetro del cilindro interior y el término "infinite sea", se refiere a que el diámetro del recipiente que contiene la muestra es lo suficientemente grande, como para no afectar la medición de la viscosidad.

Para la mezcla del ensayo, se utilizan 125 g de cemento para la pasta testigo, y esa misma cantidad de cemento con 1,1 % de aditivo para las muestras prueba.

Los valores de los parámetros de medición (rango de velocidad de cizalla, número de datos por ensayo, tiempos de integración, etc), así como el

3. EXPERIMENTAL

procedimiento operatorio se encuentra descrito en la sección de resultados y discusión.



a)



b)



c)

Ilustración 30. Fotografía del equipo utilizado para el ensayo de viscosidad. a) Viscosímetro Bohlin Visco 88 BV, b) mezclador de laboratorio Hidolph Type RZR1, con hélice con doble pala helicoidal, c) detalle de la hélice

3.2.3 Ensayos en pastas de yeso

3.2.3.1 Determinación de la relación agua/yeso (a/y). Método de la mesa de sacudidas

Este método se utiliza para los yesos premezclados. La relación a/y se determina mediante el método de ensayo-error, hasta que se forme una galleta de un diámetro determinado, cuando un cono truncado relleno con la pasta se levanta y golpea en la forma descrita. Para este ensayo se siguió la norma UNE 102031 ⁽⁴⁰⁾.

La relación agua/yeso para yesos premezclados se define mediante una consistencia dada. La consistencia exigida se alcanza cuando el diámetro de la pasta, determinado empíricamente, es de (165 ± 5) mm.

Los aparatos utilizados son:

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

- Mezcladora amasadora, recipiente de amasado y paleta. (Ilustración 31 a);
- Mesa de sacudidas y molde troncocónico. (Ilustración 31 b);
- Espátula;
- Calibre, cinta métrica;
- Cronómetro

El procedimiento que se lleva a cabo es el siguiente:

- Se pesan $2500 \pm 25,0$ g de yeso, con una precisión de 1g (m_4);
- Se pesa la cantidad de agua (m_3) determinada por ensayos previos y se vierte en el recipiente de amasado seco. Se añade el yeso al agua y se remueve manualmente con la espátula y la paleta durante 1 minuto aproximadamente. La pasta formada se mezcla con la mezcladora amasadora durante un minuto a baja velocidad (140 ± 5) min^{-1} en rotación y (62 ± 5) min^{-1} en movimiento planetario;
- El molde cónico debe colocarse en el centro de la placa de cristal de la mesa de sacudidas y sujetarse firmemente con una mano. Debe rellenarse el molde con la pasta en exceso y eliminarse el exceso mediante una espátula;
- Al cabo de unos 10s a 15s, debe levantarse el cono verticalmente. La pasta que haya quedado adherida al molde se debe añadir a la pasta del cono. Mediante la mesa de sacudidas deben aplicarse 15 golpes verticales a una velocidad constante de una revolución por segundo;
- Debe medirse el diámetro de la galleta resultante con una precisión de 1mm en dos direcciones perpendiculares, La media de estos valores debe ser de 165 ± 5 mm;
- Cuando el diámetro de la galleta difiera del especificado para el producto que se ensaya, se debe repetir el ensayo desde el principio utilizando cantidades mayores o menores de agua.

La relación agua/yeso, R , viene dada por la expresión:

3. EXPERIMENTAL

$$R = \frac{m_3}{m_4}$$

Donde

m_3 es la masa de agua de amasado en gramos;

m_4 es la masa del yeso en gramos.



a)



b)

Ilustración 31. Fotografía de equipo para la determinación del relación agua/yeso. a) amasadora mezcladora según norma EN 196-1: 1994, b) mesa de sacudidas y molde cónico según norma EN 459-2:2001

3.2.3.2 Tiempos de fraguado para pastas de yeso. Método del aparato de Vicat

Este método se usa para todos los yesos premezclados que llevan aditivos y/o retardadores. Se llevó a cabo siguiendo la norma UNE 102031 ⁽⁴⁰⁾.

Mediante este ensayo se determina la profundidad de la penetración de la aguja o del cono de Vicat dentro de una pasta de yeso a medida que progresa el fraguado. Este ensayo se usa para determinar el tiempo de fraguado inicial y final de fraguado.

Los aparatos utilizados son:

- Aparato de Vicat. Ver Ilustración 29 a);
- Cono de Vicat;

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

- Placa de vidrio de 150mm de longitud por 150mm de anchura aproximadamente;
- Molde de caucho duro de 40mm de altura, de 65mm de diámetro interno superior y 75mm de diámetro interno inferior. Ver Ilustración 29 a);
- Espátula plana de 140mm de longitud;
- Cronómetro;
- Mezcladora, amasadora y paleta. Ver Ilustración 31 a);

El procedimiento para la realización de la mezcla es el siguiente:

- Colocar el molde de caucho con su parte más ancha en contacto con la placa de vidrio;
- Amasar el yeso con la cantidad de agua determinada;
- Se anota el momento en que se empieza a echar el yeso en el agua, t_0 ;
- Se debe rellenar el molde de caucho con un exceso de pasta de yeso;
- Se elimina el exceso de material con la espátula plana en posición vertical mediante un movimiento serrado;
- Se pone en contacto el cono con la superficie de la pasta soltando el dispositivo de Vicat;
- Se debe abrir la barra guía utilizando el mecanismo de disparo. No debería transcurrir más de una vigésima parte del tiempo de principio de fraguado entre penetraciones sucesivas del cono;
- Se debe limpiar y secar el cono entre cada penetración y debería haber como mínimo distancias de 12mm entre cada marca de penetración;
- Se considera el inicio de fraguado cuando la aguja se detiene 1mm por encima de la placa de vidrio. El dinal de fraguado se obtiene cuando la aguja penetra 0,5mm de la superficie del cono.

3. EXPERIMENTAL

El tiempo de principio y/o final de fraguado viene dado por la expresión:

$$T_i = t_1 - t_0$$

Donde

t_1 es el tiempo, en minutos, en que la aguja se detiene 1mm por encima de la placa de yeso para el principio de fraguado, o cuando penetra 0,5mm de la superficie del cono para el caso del final de fraguado.

t_0 es el tiempo, en minutos, en que el yeso se pone en contacto con el agua.

3.2.3.3 Resistencia mecánica a flexotracción

La resistencia mecánica a flexotracción es la carga necesaria para romper una probeta prismática de 160mm x 40mm x 40mm, apoyada sobre rodillos cuyos centros estén separados 100mm. Este ensayo se siguió de acuerdo con la norma UNE-EN 196-1 ⁽³⁹⁾.

Los aparatos utilizados son los siguientes

- Mezcladora amasadora y paleta. (Ilustración 32 a);
- Espátula;
- Moldes con base. (Ilustración 32 b);
- Rascador;
- Desecador. (Ilustración 32 c);
- Prensa de flexión. (Ilustración 32 d);

Para la preparación de las probetas de ensayo se debe amasar según el procedimiento indicado en el apartado 3.2.3.1, con la relación agua/yeso determinada según el procedimiento descrito en ese mismo apartado.

Inmediatamente después de la preparación, con la ayuda de una espátula para rellenar los huecos y las esquinas, se debe pasar la pasta de yeso a los moldes previamente engrasados. Para eliminar la aparición de burbujas de aire, se debe elevar el molde 10mm desde su extremo superior y dejarlo caer.

Esta operación debe repetirse 5 veces. Todo el proceso de relleno de los moldes no debe superar los 10min desde el comienzo del amasado y su superficie no debe ser alisada, Cuando la pasta haya fraguado debe eliminarse el material sobrante con una regla metálica o un cuchillo, mediante un movimiento de sierra. Se deben preparar de esta manera tres probetas como mínimo



a)



b)



c)



d)

Ilustración 32. Fotografía de los aparatos utilizados en los ensayos mecánicos a flexotracción en probetas de yeso. a) amasadora mezcladora según norma EN 196-1: 1994, b) moldes con base, c) desecador, d) prensa a flexión.

Cuando la pasta haya adquirido el grado adecuado de resistencia, se deben desmoldar las probetas identificándolas. Las probetas debe mantenerse durante siete días en una atmósfera de laboratorio de $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$; la humedad relativa del aire debe ser de $(50\pm 5)\%$. Después deben desecarse hasta masa constante a una temperatura de $(40\pm 2)^{\circ}\text{C}$. Tras su secado, las probetas deben enfriarse en desecador hasta la temperatura del laboratorio de ensayo.

3.2.3.4 Resistencia mecánica a compresión

La resistencia mecánica a compresión es la carga necesaria para comprimir una probeta hasta su rotura. Este ensayo se siguió de acuerdo a la norma UNE 102031.

3. EXPERIMENTAL

Los equipos necesarios para este ensayo son prácticamente los mismos utilizados para el ensayo a flexotracción. Sólo varía la prensa que es una prensa para compresión. Los equipos usados son:

- Mezcladora amasadora y paleta. (Ilustración 32 a);
- Espátula;
- Moldes con base. (Ilustración 32 b);
- Rascador;
- Desecador. (Ilustración 32 c);
- Prensa de compresión. (Ilustración 33);



Ilustración 33. Fotografía de prensa utilizada en los ensayos a compresión de yesos

La resistencia a compresión debe determinarse aplicando una carga a los trozos rotos de las probetas procedentes del ensayo de resistencia a flexión.

Los trozos de las probetas se colocan con sus caras laterales hacia arriba y hacia abajo entre los dos platos de acero de la prensa de compresión, de forma que los lados de la probeta que estuvieron en contacto con las caras del molde estén en contacto con los platos de la prensa en una sección de 40mm x 40mm.

Se permite inclinar el plato superior para establecer un contacto perfecto entre las caras de las probetas y los platos de la prensa. El eje de rotación

del plato superior debe estar centrado sobre la superficie de la probeta sometida a compresión, La carga debe aplicarse sobre la probeta hasta su rotura.

Debe calcularse el valor medio de los 6 valores obtenidos y expresarse en N/mm^2 . La carga de resistencia a compresión R_c viene dada por la fórmula:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Donde

R_c es la resistencia a compresión en N/mm^2 ;

F_c es la máxima carga en la rotura en N;

1600 $40\text{mm} \times 40\text{mm}$ es el área de la probeta en mm^2 .

3.2.4 Ensayos en morteros de cemento Pórtland

3.2.4.1 Tiempo de fraguado

El tiempo de fraguado en morteros se determina observando la penetración de una aguja en el mortero de referencia hasta que se alcance un valor especificado. El mortero de referencia con el aditivo (mortero de ensayo) debe tener la misma consistencia que el mortero referencia sin aditivo (mortero testigo) de acuerdo a lo especificado en la norma UNE-EN 480-1 (⁴¹).

En el ensayo se utiliza el aparato de Vicat, el mismo utilizado en pastas, pero con distintos pesos), el cual se compone de los siguientes elementos; (Ilustración 29)

- Aguja de metal no corrosivo, de longitud efectiva de 50 ± 1 mm y un diámetro de $1,13 \pm 0,05$ mm. La masa total de las partes móviles debe ser igual a 1000 ± 2 g;
- Molde de caucho, de rigidez adecuada y de forma tronco cónica, de $40,0 \pm 0,02$ mm de altura con diámetros internos de 70 ± 5 mm y 80 ± 5 mm superior e inferior respectivamente;
- Placa base de vidrio plano de mayor dimensión que el molde y con espesor mínimo de 2,5 mm.

La composición del mortero de referencia es la siguiente:

3. EXPERIMENTAL

- 450±2 g de cemento;
- 1350± 5g de arena. Dividido en 810g de arena AFA 45 y 540g de AFA 60;
- 225g±1g de agua.

El procedimiento de amasado es el siguiente:

- Mezclar la arena seca y el cemento durante 30s en una amasadora como la descrita en la norma UNE-EN196-1 (³⁹), a velocidad lenta;
- Añadir toda el agua (más el aditivo en los morteros de ensayo) durante los 30 segundos siguientes, a velocidad lenta;
- Continuar el amasado a velocidad lenta durante 60s;
- Detener la amasadora y, durante 30s, recoger los productos no mezclados que se encuentran en el borde y en el fondo del recipiente de la amasadora con ayuda de una espátula;
- Volver a amasar y continuar así durante 60s a velocidad rápida. La duración total del amasado es de 3min y 30s.

Para determinar el tiempo de principio de fraguado se lleva a cabo el siguiente procedimiento:

- Se calibra el aparato de Vicat bajando la aguja hasta que esté en contacto con la placa base y ajustar la puesta en cero de referencia en la escala;
- Se transfiere el mortero al molde y se llena hasta rebosar, sin compactar ni vibrar. Se elimina el exceso de material mediante enrasado suave, de forma que se obtenga una superficie superior lisa;
- Introducir el molde lleno y la placa base en la cámara húmeda, en la que se mantienen las condiciones de temperatura y humedad constantes ($20 \pm 1^\circ \text{C}$ y 100% de humedad relativa);
- Después de un tiempo adecuado, se coloca el molde en el aparato de Vicat, se baja la aguja suavemente hasta que haga contacto con la superficie de la pasta, se suelta la aguja y se toma la lectura

cuando la penetración ha terminado o cuando hayan transcurrido 30s después de la liberación de la aguja, registrando el tiempo (el instante cero es el inicio del amasado);

- Se repite el ensayo a intervalos espaciados. El principio del fraguado será cuando la distancia entre la aguja y la placa base sea de 4,0mm;
- Para determinar el final del fraguado, se invierte el molde lleno, al cual se le ha determinado el tiempo de fraguado inicial, sobre la placa base;
- Se inserta la aguja de Vicat para la determinación del final de fraguado y se realiza el ensayo de forma análoga a la determinación del inicio de fraguado;
- El final del fraguado se produce cuando la aguja no penetra más de 2,5mm en la probeta;

3.2.4.2 Absorción capilar

El objetivo de este ensayo es determinar el efecto de los aditivos sobre la absorción capilar de los morteros. Consiste en medir la masa de agua absorbida por una probeta de mortero en unas condiciones especificadas en la norma UNE-480-5 (⁴²).

Los equipos utilizados son:

- balanza con una exactitud de, aproximadamente, 0,1g;
- recipiente de 200mm de altura, bastante grande para contener doce probetas prismáticas de base plana y con una tapadera;
- dispositivo que permita mantener un nivel de agua constante en el recipiente, prismas de mortero de 40mm x 40mm x 160mm de acuerdo con Norma EN 196-1 (³⁹);
- armario climatizado, regulado a $20 \pm 2^\circ \text{C}$ y $65 \pm 5\%$ de humedad relativa. En nuestro caso, y ante la imposibilidad de disponer de dicho armario, se optó por curar las probetas en cajas de plástico donde pudiésemos controlar la humedad relativa por medio de gel de sílice y/o disoluciones de glicerina.

Las probetas se pesan, antes de ser puestas en el recipiente de nivel de agua constante, después de 7 y 90 días de curado. Se colocan a

3. EXPERIMENTAL

continuación, verticalmente en el recipiente que contiene el agua a nivel constante; para ello se utilizan barras de vidrio cilíndricas pegadas sobre el fondo del recipiente con el fin de permitir que el agua acceda libremente a su base. El nivel del agua debe mantenerse a 3 ± 1 mm por encima de la base. Debe evitarse cualquier contacto entre las probetas. Se tapa inmediatamente el recipiente.

Las probetas conservadas durante 7 días en el recipiente de nivel de agua constante se deben pesar tanto después del primer día como a los 7 días de contacto con el agua. Las probetas conservadas durante 90 días en el recipiente de nivel de agua constante se deben pesar después de 1, 7 y 28 días de contacto con el agua. En estos tiempos se retira cada probeta del recipiente, se limpian las caras ligeramente con papel secante o con un paño para eliminar el agua excedente, se pesa y se vuelve a colocar en el recipiente en posición vertical.

La absorción capilar para cada edad especificada es la media de los tres valores determinados en cada serie de 3 probetas de cada tipo de mortero (mortero testigo y mortero de ensayo), se expresan en g/mm^2 y se calculan por medio de la expresión:

$$CA = \frac{M_j - M_o}{1600}$$

Donde

M_j es la masa de la misma probeta después del tiempo requerido de absorción, expresada en gramos

M_o es la masa de probeta después de conservada durante 7 días o 90 días, expresada en gramos

1600 es la superficie de la probeta en contacto con el agua, expresada en mm^2

3.2.4.3 Índice de consistencia por medio de la mesa de sacudidas

El índice de consistencia es el escurrimiento que tiene una masa de mortero específica, determinada por el volumen de un molde, después de aplicar quince golpes en una mesa de sacudidas, especialmente diseñada para ello.

La amasadora y el procedimiento de amasado que se utilizaron para los diferentes estudios de consistencia, cumplen con la norma UNE-EN 196-1⁽³⁹⁾ y consta de:

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

- Un recipiente de acero inoxidable de una capacidad de 5l. Dicho recipiente está equipado de forma que pueda ser fijado firmemente al bastidor de la amasadora durante el amasado, pudiendo ajustarse con precisión la separación entre pala y recipiente;
- Una pala de acero inoxidable, accionada por un motor eléctrico de velocidades controladas. Los movimientos de rotación de dicha pala se realizan sobre su propio eje y el movimiento planetario alrededor del eje del recipiente. (Ilustración 38 a).

El procedimiento de mezclado es el mismo que se sigue para el ensayo de tiempo de fraguado en morteros.

La medida de la consistencia se realizó en una mesa de sacudidas, cumpliendo los requisitos exigidos en la norma UNE 83-258-88 ⁽⁴³⁾. La mesa consta de:

- Un armazón colocado sobre una base rígida horizontal;
- La propia mesa construida de acero sostenida por dicho armazón;
- Una placa de vidrio de 7mm de espesor y 350mm de diámetro, sujeta al tablero;
- Una leva para levantar la mesa a la altura indicada por la norma, y dejarla caer por su propio peso. (Ilustración 34 b).

El molde usado es de cobre, de forma tronco-cónica, de 60mm de altura, con diámetros interiores de 100mm en la base y 70mm en la parte superior. Cuenta con una tolva para facilitar la alimentación del material, la cual encaja en la parte superior. El pisón es un cilindro de madera de 40mm de diámetro y 250g de peso. Su función es la de compactar el mortero una vez introducido en el molde.

El proceso de las medidas de la consistencia fue el siguiente:

- Se coloca el molde con su tolva en el centro de la mesa;
- Se rellena el molde en dos fases adicionando en cada una de ellas el mortero necesario para cubrir la mitad del volumen del molde;
- Se apisona manualmente el contenido de cada fase con diez golpes de pisón, con una frecuencia de un golpe cada segundo;

3. EXPERIMENTAL

- Se retira la tolva enrasando a la vez la superficie;
- Se retira el molde y se deja caer el tablero de la mesa por su propio peso sobre la leva quince veces, con una frecuencia de una vez cada segundo;
- Se miden dos diámetros perpendiculares de la masa extendida y el valor de la consistencia, en mm, se obtiene como la media de los cuatro valores obtenidos en dos ensayos de la misma amasada;



a)



b)

Ilustración 34. Fotografía del equipo utilizado para el ensayo en morteros del índice de consistencia en mesa de sacudidas. a) Amasadora para morteros; b) Mesa de sacudidas

3.2.4.4 Contenido de aire ocluido. Método de presión

Este procedimiento tiene como objeto determinar el aire ocluido en morteros de cementos, con y sin aditivos. El procedimiento se siguió de la norma UNE 83259 ⁽⁴⁴⁾.

El equipo utilizado fue un aerómetro para morteros de cemento de 1 litro marca Bluhm & Feuerherdt GmbH, modelo E 27. Consta de las siguientes partes. (Ilustración 35):

- Calderín de capacidad 1 litro de volumen;
- Tapa en la que se encuentra una cámara de aire;
- Bomba de inyección de aire;
- Manómetro de precisión;

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

- Válvulas de esfera que comunican el calderín con el exterior;
- Una válvula para igualar la presión de las dos cámaras;
- Una válvula para efectuar la descompresión;
- Junta de goma entre el calderín y la tapa.

Los morteros testigo y de referencia se componen, en masa, de una parte de cemento ($450 \pm 2g$), tres partes de arena normalizada ($1350 \pm 5g$) y media parte de agua ($225 \pm 1g$). Relación a/c = 0,5. Las pesadas se ejecutan por medio de una balanza, con precisión de $\pm 1g$.

Para la preparación del mortero de referencia primero se vierte el agua en el recipiente de la amasadora y se añade el cemento; se pone la amasadora en marcha a pequeña velocidad. Después de 30s se introduce regularmente toda la arena en 30s. Se pone la amasadora a su velocidad mayor y se continúa la mezcla durante 30s más; se para la máquina durante 1 minuto y 30 segundos. Durante los 15 primeros segundos se separa por medio de una raqueta de caucho todo el mortero adherido a las paredes y al fondo. Dicho mortero se empuja hacia el fondo. Se cubre el recipiente durante el tiempo restante (1 minuto y quince segundos); se reemprende a continuación el amasado a gran velocidad durante 60s; la duración de los diversos períodos de amasado debe observarse con precisión de $\pm 1s$.

La preparación del mortero testigo se hace como el mortero anterior, incorporando al agua de amasado, previamente a su introducción en la amasadora, el aditivo de ensayo.

La cantidad de agua será la misma en ambos casos, cuando se pretende conocer la influencia del aditivo para la relación a/c fijada de 0,5. Dicha agua se disminuye, en la cantidad precisa, en el caso de morteros con aditivos cuando se pretende conocer la influencia de éste para consistencia constante, con relación a la del mortero testigo (sin aditivo).

La muestra de mortero se introduce en el calderín en dos capas de aproximadamente igual espesor, procediéndose a un compactado adecuado. En nuestro caso se puso sobre la mesa de sacudidas y se le aplicaron 20 golpes a cada muestra. Se procede a realizar la inyección de aire de acuerdo a las especificaciones técnicas del equipo utilizado.

La media aritmética correspondiente a tres determinaciones, se considera como el resultado definitivo.

3. EXPERIMENTAL



Ilustración 35. Fotografía de Aerómetro para el ensayo de aire ocluido en morteros

3.2.4.5 Resistencias mecánicas en morteros

Para la determinación de resistencias mecánicas de morteros (flexotracción y compresión) se procedió a la fabricación de las probetas según la recomendación y procedimientos especificados en la norma UNE-EN 196-1 ⁽³⁹⁾.

La amasadora y el procedimiento de amasado fueron los mismos que para el estudio de consistencia con la mesa de sacudidas (ver apartado 3.2.4.3).

Los moldes utilizados son de acero, disponen de tres compartimentos horizontales para la preparación simultánea de tres probetas, con un espesor de pared de 10mm. Las dimensiones del interior de cada compartimiento son de 40x40mm de sección transversal y 160mm de longitud (Ilustración 36 a).

Cada molde está provisto de una placa base, de acero mecanizado. El conjunto del molde ensamblado, permanece rígidamente unido y fijado a la base. La placa base asegura un contacto adecuado con la mesa de la compactadora y es lo suficientemente rígido para evitar las vibraciones secundarias. Al montar el molde limpio, listo para su uso, se aplica una capa fina de aceite de desmoldeado a las caras internas del molde.

Para facilitar el llenado del molde, se utiliza una tolva mecánica, bien ajustada, de paredes verticales de 30mm, de altura. Las paredes exteriores de la tolva están provistas de medios de fijación que aseguran la correcta posición del molde.

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

La compactadora utilizada está compuesta de una mesa rectangular, unida rígidamente por dos brazos ligeros a un eje de rotación, que distan 800mm del centro de la mesa. (Ilustración 36 b).

Dicha mesa está provista en el centro de su cara inferior de un martinete de superficie redondeada. Debajo del martinete existe un pequeño yunque, cuya cara superior es plana. Los brazos que unen la mesa al eje de rotación son rígidos y con forma redondeada, el martinete y el yunque son de acero.



a)



b)



c)



d)

Ilustración 36. Fotografías del equipo utilizado en los ensayos de resistencia mecánica de morteros. a) Moldes para probetas de mortero; b) Compactadora de probetas de mortero; c) Prensa para ensayos de resistencia a flexotracción; d) Prensa para ensayos de resistencia a compresión

Durante el funcionamiento, la mesa se levanta con una leva de acero, que le permite caer libremente desde una altura de 15mm, entre el martinete y el yunque. El accionamiento de la leva se hace por medio de un motor eléctrico, a una velocidad uniforme de una revolución por segundo. Un dispositivo de control y un contador regulan el periodo de compactación a

3. EXPERIMENTAL

60 golpes. Para el curado de las probetas se ha utilizado una cámara húmeda en la que se mantienen las condiciones de temperatura y humedad constantes ($20 \pm 1^\circ\text{C}$ y 100% de humedad relativa), donde las probetas permanecen hasta la edad de rotura a flexotracción y compresión siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 196-1 ⁽³⁹⁾.

3.2.5 Ensayos en hormigones

3.2.5.1 Trabajabilidad. Método del cono de Abrams

La manejabilidad, conocida también como trabajabilidad, se considera como aquella propiedad del hormigón mediante la cual se determina su capacidad para ser colocado y consolidado apropiadamente y para ser terminado sin segregación.

No se conoce ningún método directo para medir la manejabilidad de una mezcla de hormigón, sin embargo hay algunos ensayos que permiten correlacionar esta propiedad del hormigón, en estado plástico, con alguna característica. El ensayo más ampliamente usado en el mundo, por su simplicidad y rapidez, es el de asentamiento, el cual mide la consistencia o fluidez de una mezcla fresca de hormigón ⁽⁴⁵⁾.

La determinación del asentamiento del hormigón fresco se realizó de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC-396 ⁽⁴⁶⁾.

Las herramientas y equipo que debe usarse para este ensayo de acuerdo con la norma se observa en la Ilustración 37.

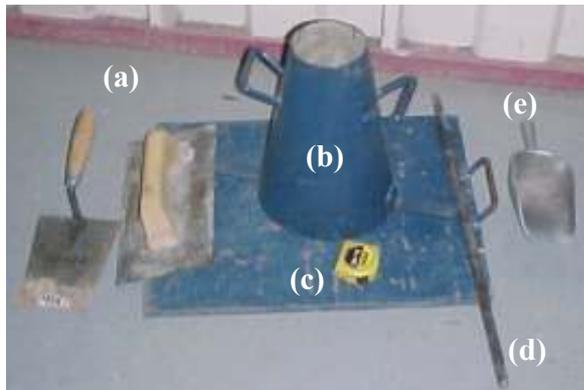


Ilustración 37. Fotografía del equipo para determinar la trabajabilidad del hormigón

- Instrumentos para enrasar (a);
- Cono de Abrams (b);
- Flexómetro (c);

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

- Varilla compactadora (d);
- Pala para adicionar mezcla (e);

El procedimiento para llevar a cabo el ensayo es el siguiente. (Ilustración 38):

- Se humedece el molde y se coloca sobre una superficie horizontal rígida, plana, húmeda y no absorbente.
- Se sujeta firmemente con los pies y se llena con la muestra de hormigón en tres capas, cada una de ellas de 1/3 del volumen del molde aproximadamente. Cada capa debe compactarse con 25 golpes de la varilla, distribuidos uniformemente sobre su sección transversal. Ver Ilustración 38 (a), (b), (c);
- Se enrasa la superficie del molde. Ver Ilustración 38 (d);
- Luego se levanta el molde a una distancia de 300mm durante 5 segundos mediante un movimiento uniforme hacia arriba sin producir movimiento lateral o de torsión al concreto, la operación completa desde que se comienza a llenar el molde hasta que se retira debe efectuarse sin interrupción durante el tiempo máximo de 2 minutos y 30 segundos. Ver Ilustración 38 (e);
- Inmediatamente se mide el asentamiento determinando la diferencia vertical entre la parte superior del molde y el centro desplazado de la superficie superior de la muestra, si ocurre un derrumbamiento pronunciado del concreto hacia un lado de la muestra debe rechazarse y efectuarse de nuevo. Ver Ilustración 38(f).

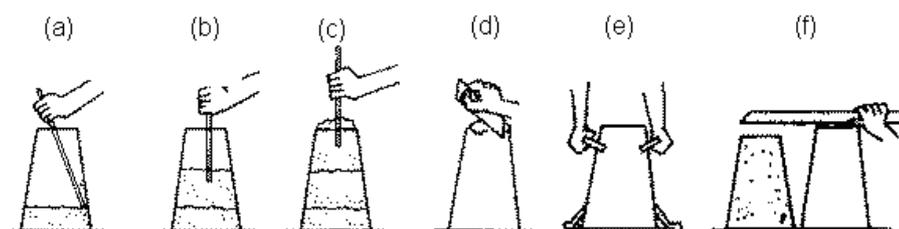


Ilustración 38. Esquema del procedimiento del ensayo de asentamiento con el cono de Abrams.

3. EXPERIMENTAL

3.2.5.2 Contenido de aire ocluido. Método de Presión

Con este método es posible determinar el contenido del aire en el hormigón fresco mediante la observación del cambio en el volumen debido al cambio de presión.

El contenido de aire del hormigón fresco se realizó de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC-1032 ⁽⁴⁷⁾. La norma propone el uso de alguno de los dos tipos de aerómetros, tipo A o de tipo B, los cuales tienen diseños distintos pero ambos se rigen por el principio de la ley de Boyle.

Para el ensayo se usó un medidor de aire o aerómetro Tipo B, el cual se presenta en la Ilustración 39, así como los elementos que se describen a continuación:

- Recipiente de Medida;
- Cubierta;
- Vaso de Calibración;
- Resorte en espiral u otro mecanismo para sostener el vaso de calibración en su lugar;
- Tubo rociador;
- Palustre;
- Varilla apisonadora;
- Maceta o mazo;
- Barra de enrase;
- Platina (lámina de enrase);
- Embudo;
- Medidor de agua;
- Vibrador;
- Tamices.



Ilustración 39. Fotografía del aerómetro de presión Tipo B

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

El procedimiento para llevar a cabo el ensayo fue el siguiente de acuerdo con la norma:

- Preparación de la muestra de hormigón para el ensayo;
- Se obtiene una muestra de hormigón fresco, de acuerdo con los procedimientos aplicables de la NTC 454 ⁽⁴⁸⁾; si el hormigón tiene partículas de agregado grueso que pueda retenerse en el tamiz de 50mm se tamiza en húmedo una cantidad suficiente de la muestra sobre el tamiz 37,5mm de acuerdo con la NTC 454 ⁽⁴⁸⁾, para producir una cantidad mayor que la necesaria, y llenar el recipiente de medida del tamaño seleccionado para uso. El tamizado húmedo se realiza alterando lo menos posible el mortero;
- Colocación y compactación de la muestra;
- Se humedece el interior del recipiente de medida y se coloca sobre una superficie plana, nivelada y plana. Se coloca una muestra representativa de hormigón en el recipiente de medida en capas iguales, se compacta cada capa y se enrasa.

Previo a la medición, el equipo se debe preparar de la siguiente forma:

- Se limpian completamente los flanches o bordes del recipiente y de la cubierta ensamblada, de tal forma que cuando la tapa se ajuste en su lugar, se obtenga un sello hermético;
- Se ensambla el aparato, se cierra la válvula de aire entre la cámara de aire y el recipiente de medida y se abren los dos grifos de la cubierta. Usando una pera de caucho, se inyecta agua por un grifo hasta que esta salga por el otro grifo. El medidor de aire se somete a vibración suave, hasta que todo el aire sea expelido por este mismo grifo;

La medida de la cantidad de aire ocluido se hace de la siguiente forma:

- Se cierra la válvula de purga de aire en la cámara de aire y se bombea aire dentro de esta cámara, hasta que la manecilla del manómetro este en la línea de presión inicial;
- Se dejan pasar algunos segundos para que el aire comprimido se enfrie a la temperatura normal. La manecilla del manómetro se estabiliza en la línea de presión inicial bombeando o liberando aire,

3. EXPERIMENTAL

como sea necesario, golpeando suavemente el manómetro con la mano;

- Se cierran ambos grifos en los huecos de la cubierta;
- Se abre la válvula de aire entre la cámara de aire y el recipiente de medida, y se golpean vigorosamente los lados del recipiente de medida con el mazo;
- Se golpea suavemente el manómetro, con la mano para estabilizar la manecilla, el porcentaje de aire se lee en la carátula del manómetro. Si se cierra la válvula principal de aire antes de liberar la presión tanto del contenedor como de la cámara de aire, podrá penetrar agua a la cámara de aire;
- En el caso de que penetre agua a la cámara de aire se debe expulsar a través de la válvula de purga, haciendo que la bomba realice varios ciclos que le permitan retirar las últimas trazas de agua. Se libera la presión abriendo ambos grifos antes de retirar la cubierta.

El resultado lo da directamente el equipo en porcentaje de aire con respecto al volumen de la muestra.

3.2.5.3 Agua de exudación

La exudación o sangrado, es la parte del agua de mezclado que tiende a elevarse a la superficie del hormigón recién colocado o durante el proceso de fraguado.

La exudación del hormigón fresco se midió de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC-1294 ⁽⁴⁹⁾. A continuación se describen las características del ensayo.

Se usaron los equipos definidos en la norma:

- Recipiente cilíndrico de 250 ± 10 mm diámetro por 280 ± 10 mm de altura;
- Báscula;
- Pipeta o instrumento similar;
- Vaso graduado de 100ml;
- Varilla de compactación;
- Vaso de precipitado metálico;
- Balanza;
- Estufa.

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

El procedimiento para llevar a cabo el ensayo es el siguiente:

- Se compacta la muestra por apisonamiento y se alisa la superficie de la muestra;
- Se coloca la muestra y el recipiente en una plataforma nivelada o en un piso libre de vibración, y se cubre para prevenir la evaporación del agua de exudación, se mantiene la cubierta en su lugar durante el ensayo, excepto al retirar el agua;
- Se extrae con una pipeta u otro instrumento similar, el agua que se ha acumulado a intervalos de 10 minutos durante los primeros 40 minutos; después a intervalos de 30 minutos, hasta que cese la exudación;
- Luego se inclina el recipiente colocando una cuña de 50mm de espesor bajo uno de los lados del recipiente 2 minutos. Cada vez que se va a retirar el agua a un recipiente gradado de 100ml y se registra la cantidad, si se desea determinar la masa del agua se procede a decantar;
- Durante el ensayo, es necesario mantener la temperatura ambiente entre 18° C y 24° C;

La exudación B se expresa en tanto por ciento de la cantidad total de agua contenida en el hormigón y se calcula como sigue:

$$B = \frac{m_w}{w \times m_s} \times 100$$

Donde

m_w es la masa del agua de exudación, en gramos;

m_s es el masa total de la muestra, en gramos;

w es la proporción de agua del hormigón fresco, en % de la masa

Se considera que la densidad del agua de exudación es 1kg/l.

3. EXPERIMENTAL



Ilustración 40. Fotografía del ensayo de exudación en hormigones

3.2.5.4 Estructura de poros

Este método determina la estructura de los huecos de aire en una muestra de hormigón endurecido que contenga aire ocluido. Esta estructura de los huecos se define por medio de los siguientes parámetros: contenido total de aire, superficie específica de los huecos de aire, factor de espaciado y distribución dimensional de los huecos de aire.

En este caso utilizamos, para el licor de *Agave americana*, el procedimiento de la norma UNE-EN 480-11⁽⁵⁰⁾, y para el licor de *Furcraea cabuya*, uno de los métodos de conteo de puntos recomendado por la norma en la ASTM C 457⁽⁵¹⁾. El hecho de utilizar distinta normativa fue debido a los distintos emplazamientos donde se realizaron las experiencias (España y Colombia) y a la instrumentación de la que se disponía.

3.2.5.4.1 Procedimiento por barrido

Las probetas destinadas a este análisis se cortan perpendicularmente a la cara superior de las muestras de hormigón endurecido con aire ocluido. Las probetas se pulen con el fin de obtener una superficie plana y lisa de la calidad necesaria para el examen microscópico. (Ilustración 41)

La estructura de los huecos se examina por barrido a través de una serie de líneas transversales paralelas a la cara superior original. Se registra el número de huecos de aire intersectados por cada línea transversal, así como las longitudes de las cuerdas individuales del barrido a través de los huecos de aire.

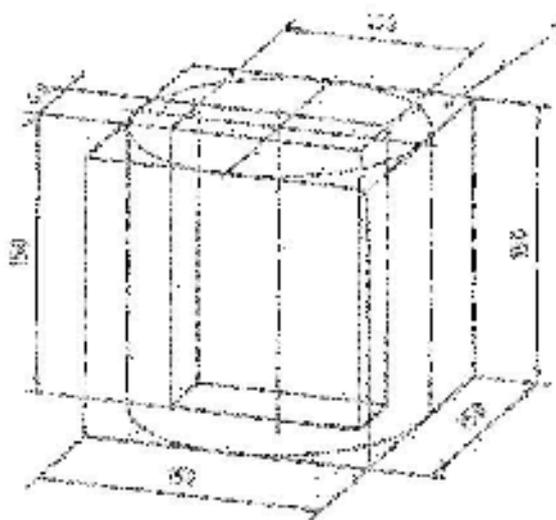


Ilustración 41. Fabricación de una probeta de 150mm x 100mm x 40 mm a partir de una muestra de 150 mm (dimensiones aproximadas)⁵⁰

Un análisis matemático de los valores obtenidos permite calcular los parámetros que sirven para determinar la estructura de los huecos de aire.

Las probetas utilizadas para el licor de *Agave americana*, se obtuvieron de cubos de 100mm de arista, los mismos que fueron utilizados para los ensayos a compresión de los hormigones. Después de un curado de 14 días se cortó de la zona central de la muestra, una probeta de 100mm de anchura, 100mm de altura y 20mm de espesor.

La superficie para el análisis se debe pulir con agua, hasta que sea totalmente plana. Una vez pulida se debe limpiar para eliminar los residuos. La finalidad es obtener una superficie apropiada para el examen microscópico de la estructura de los huecos de aire en el hormigón. La superficie, una vez seca, debería ser mate y no presentar ningún relieve visible entre la pasta de cemento y la superficie de los áridos. Las aristas de los huecos deberían ser vivas y no quebradas ni redondeadas.

Se coloca cada probeta en la mesa de recuento de tal manera que las líneas transversales, que se deben observar durante el ensayo, sean paralelas a la cara superior de la probeta.

Para cada probeta se requiere una distancia mínima de recorrido de 1200mm, lo que da un total de 2400mm por ensayo. Se necesitan un número mínimo de recorridos transversales para obtener la distancia total

3. EXPERIMENTAL

requerida. La disposición de las líneas transversales para recorrer en la siguiente:

Se colocan cuatro líneas transversales en la parte superior de la superficie, a lo largo de toda la anchura. La línea más alta se deberá situar, aproximadamente, a 6mm del borde superior de la probeta, y las líneas siguientes a una distancia de 6mm unas de otras; (Ilustración 42)

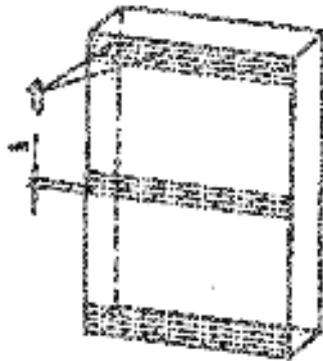


Ilustración 42. Distribución de líneas de barrido en la superficie para ensayo⁵⁰

Se coloca una segunda serie de cuatro líneas en la parte inferior de la superficie. La línea más baja se debería situar, aproximadamente, a 6mm del borde inferior de la probeta y las siguientes a unos 6mm, unas de otras;

Una última serie de líneas de barrido se sitúan en la parte central de la superficie, espaciadas unas de otras, aproximadamente, 6mm con el fin de obtener la distancia de barrido total requerida. En esta zona se necesitan cuatro líneas como mínimo, pudiendo ser más, para proporcionar las longitudes de barrido mínimas requeridas, si la superficie presenta zonas dañadas.

Se debe examinar la cara para ensayo con un microscopio utilizando un aumento de $(100 \pm 10) \times$; este aumento no se debe modificar durante el ensayo. Se examina la muestra a lo largo de las líneas de barrido. Durante el barrido, se deben utilizar dos tornillos de desplazamiento para el movimiento paralelo en la cara superior, con objeto de poder determinar por separado los valores siguientes:

Distancia recorrida en las fases sólidas de la superficie de la probeta, T_s ;

Distancia recorrida a través de los huecos de aire, T_a ;

La suma de los dos valores de la distancia recorrida, T_{tot} ;

Este método permite distribuir todas las cuerdas en 28 clases de diferentes longitudes, La distribución de los correspondientes huecos de aire se puede calcular a partir de esta clasificación. El recuento debe tener en consideración todas las cuerdas de los huecos de aire, visibles en la pasta de cemento endurecido, cuya longitud esté comprendida entre $0\mu\text{m}$ y $4000\mu\text{m}$; solamente se exceptúan las fisuras obvias. Ver Cuadro 15.

Si, a pesar de un pulido cuidadoso, los bordes de los huecos de aire están dañados y este daño se encuentra en el trayecto de una línea transversal, se debe utilizar la sección circular completa como base para determinar la longitud de la cuerda. (Ilustración 43)

Para los fines de cálculo, los totales de cada probeta para el mismo hormigón sometido a ensayo se deben sumar:

Contenido en pasta de cemento en volumen, calculado a partir de las proporciones de la mezcla, P ;

Longitud total de barrido correspondiente a las fases sólidas, T_s ;

Longitud total de barrido correspondiente a los huecos de aire, T_a ;

Número de cuerdas individuales que atraviesan huecos de aire, contenidos en cada clase dimensional, C_i ;

3. EXPERIMENTAL

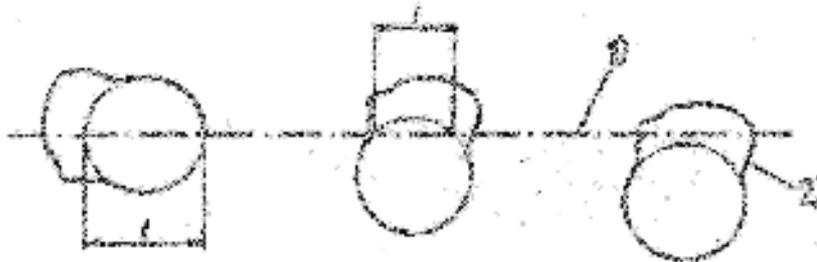


Ilustración 43. Estimación durante el examen microscópico de la longitud de una cuerda l para bordes rotos de los huecos de aire. 1) Línea transversal ficticia; 2) ninguna cuerda interceptada l^{50}

La longitud total barrida es la suma correspondiente a las fases sólidas y a los huecos de aire:

$$T_{tot} = T_s + T_a \text{ en mm} \quad \text{Ecuación 1}$$

La longitud total de barrido debe ser como mínimo 2400mm

El contenido de aire es la proporción de la longitud total recorrida que corresponde a los huecos de aire

$$A = \frac{T_a \times 100}{T_{tot}} \text{ expresado en \%} \quad \text{Ecuación 2}$$

El número total de cuerdas medidas es la suma N del número de cuerdas en cada una de las cuerdas dimensionales

$$N = \sum C_i \quad \text{Ecuación 3}$$

La superficie específica de los huecos de aire está dada por:

$$\alpha = \frac{4 \times N}{T_a}, \text{ en mm}^{-1} \quad \text{Ecuación 4}$$

La relación pasta aire es la relación, R , entre el volumen de la pasta, P , determinado según las proporciones de la mezcla, y el contenido de aire calculado por la ecuación 2

$$R = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 5}$$

El factor de espaciado depende del valor de R calculado por medio de la Ecuación 5

Si $R > 4,342$ se debe utilizar la Ecuación 6

Si $R \leq 4,342$ se debe utilizar la Ecuación 7

$$L = \frac{3 \left[1,4(1 + R)^{1/3} - 1 \right]}{\alpha}, \text{ en mm} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$L = \frac{P \times T_{tot}}{400 \times N}, \text{ en mm} \quad \text{Ecuación 7}$$

El contenido de microhuecos de aire, A_{300} , se deduce directamente del valor calculado en la columna 10 para la clase 18 de la tabla. Este valor se expresa en % en volumen. Ver Cuadro 15.

La distribución de los huecos de aire se calcula a partir de la distribución de las cuerdas medidas durante el barrido transversal. El cálculo se basa en el modelo que supone la existencia de un solo conjunto de diámetros nominales de huecos de aire. Los diámetros nominales corresponden al valor máximo de la longitud de la cuerda en cada una de las clases.

Los datos necesarios para este cálculo son la longitud total barrida, T_{tot} , así como la distribución de la longitud de las cuerdas.

Las cuerdas medidas, con una aproximación de $5\mu\text{m}$, se distribuyen según su longitud, en un determinado número de clases, según la tabla que aparece en el Cuadro 15. El número de designación y los límites de las clases figuran en las columnas 1 y 2 del Cuadro 15. Cada cuerda se coloca en una clase en función de su longitud. Por ejemplo, una cuerda de $150\mu\text{m}$ de longitud se colocará en la clase 11. El número total de cuerdas en cada clase se inscribe en la columna 3. El número de cuerdas por milímetro de

3. EXPERIMENTAL

línea se obtiene dividiendo los valores de la columna 3 por la longitud total barrida T_{tot} . Los resultados se anotan en la columna 4.

No todos los huecos de aire presentes en la pasta de cemento serán interceptados en el barrido realizado en la superficie ensayada, ya que las líneas transversales no cubren la totalidad de la muestra de hormigón. Por tanto es necesario calcular el número de huecos de aire por milímetro cúbico de hormigón, de manera que se pueda determinar la distribución de los huecos de aire. Es posible calcular la proporción del número total de huecos de aire interceptados y que pueden contener una cuerda de una longitud determinada.

Para cada clase de longitud de cuerda, el valor de esta proporción figura en la columna 5.

Dividiendo los valores de la columna 4 por los de la columna 5 se obtiene, por consiguiente, el número total de huecos de aire presentes en un milímetro cúbico de hormigón que pueden contener cuerdas de una determinada clase. Este valor se introduce en la columna 6. En todos los casos los valores de la columna 5 son constantes y se obtienen por medio de la ecuación siguiente:

Proporción de huecos de aire encontrados:

$$= \frac{\pi \times (5 + l_{máx} - l_{mín}) \times (l_{máx} + l_{mín})}{4 \times 10^6}$$

En mm^2 . Donde $l_{máx}$ y $l_{mín}$ son la longitud máxima y mínima de la cuerda de una clase dada.

El factor 5 del numerador se debe al hecho de que todas las longitudes de las cuerdas se redondean, aproximadamente a $5\mu\text{m}$. La ecuación se basa en una valoración estadística de la población de huecos de aire.

Una cuerda de una longitud particular se puede encontrar en cualquier hueco de aire de un diámetro superior a la longitud de la cuerda. Por lo tanto, para cada clase, el valor de la columna 6 incluye, además de los huecos cuyo diámetro está comprendido dentro de los límites de esta clase, todos los huecos cuyo diámetro sobrepase el límite superior de esta clase. Para tener el número de huecos cuyo diámetro corresponda al límite superior de una clase, se resta el valor de la clase dimensional siguiente, que figura en la columna 6, del valor de la clase considerada, y se coloca en la columna 7. Por ejemplo el valor de la columna 7 para la clase 10 se

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

obtiene se obtiene restando el valor de la columna 6 para la clase 11 del valor de la columna.

En ciertos casos, es posible que los valores de la columna 7 y los que de ella se deriven sean negativos. Esto es debido a la distribución de las cuerdas en diferentes clases y los límites establecidos para éstas. Este hecho se puede evitar realizando un ajuste apropiado de los límites de las clases, siempre que no afecten de modo alguno la distribución final del volumen de aire calculado. Para las necesidades del cálculo, conviene retener el valor negativo y no ignorarlo.

El volumen total de aire correspondiente a cada clase se obtiene multiplicando los valores de la columna 7 por los de la columna 8, que contiene el volumen de un hueco para la clase considerada y sirve para determinar el contenido en aire como fracción total. Multiplicando por 100 las cifras de la columna se obtiene el volumen de aire, en porcentaje, del volumen total de aire. Este resultado se lleva a la columna 9. El contenido de aire acumulado, igual al total del acumulado de la columna 9, se introduce en la columna 10.

Cuadro 15. Tabla modelo para la determinación de la distribución de los huecos de aire

Clase	Límite de las clases	Número de cuerdas registradas en cada clase	Frecuencia de las cuerdas	Fracción encontrada	Total posible	Volumen de los huecos en la clase	Volumen de los huecos	Contenido de aire	Contenido de aire acumulado
	μm		mm^{-1}	mm^2	mm^3	mm^3	mm^3	%	%
1	0 a 10			0.0001178			5.24E-07		
2	15 a 20			0.0002749			4.19E-06		
3	25 a 30			0.0004320			1.41E-05		
4	35 a 40			0.0005890			3.35E-05		
5	45 a 50			0.0007461			6.54E-05		
6	55 a 60			0.0009032			1.13E-04		
7	65 a 80			0.0022780			2.68E-04		
8	85 a 100			0.0029060			5.24E-04		
9	105 a 120			0.0035340			9.05E-04		
10	125 a 140			0.0041630			1.44E-03		
11	145 a 160			0.0047910			2.14E-03		
12	165 a 180			0.0054190			3.05E-03		
13	185 a 200			0.0060476			4.19E-03		
14	205 a 220			0.0066760			5.58E-03		
15	225 a 240			0.0073040			7.24E-03		
16	245 a 260			0.0079330			9.20E-03		
17	265 a 280			0.0085610			1.15E-02		
18	285 a 300			0.0091890			1.41E-02		
19	305 a 350			0.0257200			2.24E-02		
20	355 a 400			0.0298500			3.35E-02		
21	405 a 450			0.0335800			4.77E-02		
22	455 a 500			0.0375000			6.54E-02		
23	505 a 1000			0.5910000			5.24E-01		
24	1050 a 1500			0.9837000			1.77E+00		
25	1505 a 2000			1.3760000			4.19E+00		
26	2005 a 2500			1.7690000			8.18E+00		
27	2505 a 3000			2.1620000			1.41E+01		
28	3005 a 4000			5.5020000			3.35E+01		

3. EXPERIMENTAL

3.2.5.4.2 Procedimiento mediante análisis de imágenes

Las probetas fabricadas con el licor de *Furcraea cabuya* fueron analizadas teniendo en cuenta los lineamientos del procedimiento B de la norma ASTM C-457 correspondiente al método del conteo de puntos modificado.

Este método se basa en consideraciones estadísticas donde se requiere una malla regular trazada en la superficie pulida de las probetas donde cada intersección de la malla se contabiliza. Los datos que se obtienen son:

Distancia entre puntos a lo largo del trayecto, I

Número total de puntos, S_t

Número de puntos en poros, S_a

Número de puntos en pasta, S_p

Número de poros intersectados por la línea a través de la cual se toman los datos, N

A partir de estos datos el contenido de aire y otros parámetros del sistema de poros son calculados como se describe a continuación:

Longitud total del área transversal, $T_t = S_t I$ en mm **Ecuación 8**

Contenido de aire, $A = \frac{S_a \times 100}{S_t}$ expresado en % **Ecuación 9**

Frecuencia de poros, $n = \frac{N}{T_t}$ **Ecuación 10**

Contenido de pasta, $p = \frac{S_p \times 100}{S_t}$ expresado en % **Ecuación 11**

Relación pasta aire, $\frac{p}{A} = \frac{S_p}{S_a}$ **Ecuación 12**

Longitud promedio de la cuerda, $\bar{l} = \frac{S_a \times I}{N}$ ó $\bar{l} = \frac{A}{100n}$ **Ecuación 13**

Superficie específica, $\alpha = \frac{4}{l}$ ó $\alpha = \frac{400n}{A}$, en mm^{-1} **Ecuación 14**

Factor de espaciamiento, $L = \frac{3 \left[1,4(1 + R)^{1/3} - 1 \right]}{\alpha}$ **Ecuación 15**
 en mm, para $R > 4,342$
 ó

$L = \frac{p}{400 \times n}$, en mm **Ecuación 16**

para $R \leq 4,342$

De acuerdo con la norma para un tamaño máximo nominal de agregado en el concreto de una pulgada, la longitud transversal mínima debe ser de 2.413 mm y el número total de puntos de 1.425.

Para el análisis de tamaño de poros se empleó microscopía asistida por computador. Las muestras de hormigón fueron preparadas para obtener una imagen apropiada donde se diferenciaran los poros de la pasta y se observaron en el microscopio usando luz reflejada. La cámara de captura de video convierte la imagen del campo del microscopio en una señal electrónica que es enviada al computador para efectuar el análisis.

El procedimiento que se llevó a cabo para el análisis de poros con el uso de microscopía asistida por computador se resume en la Ilustración 44 y se describe a continuación.

3. EXPERIMENTAL

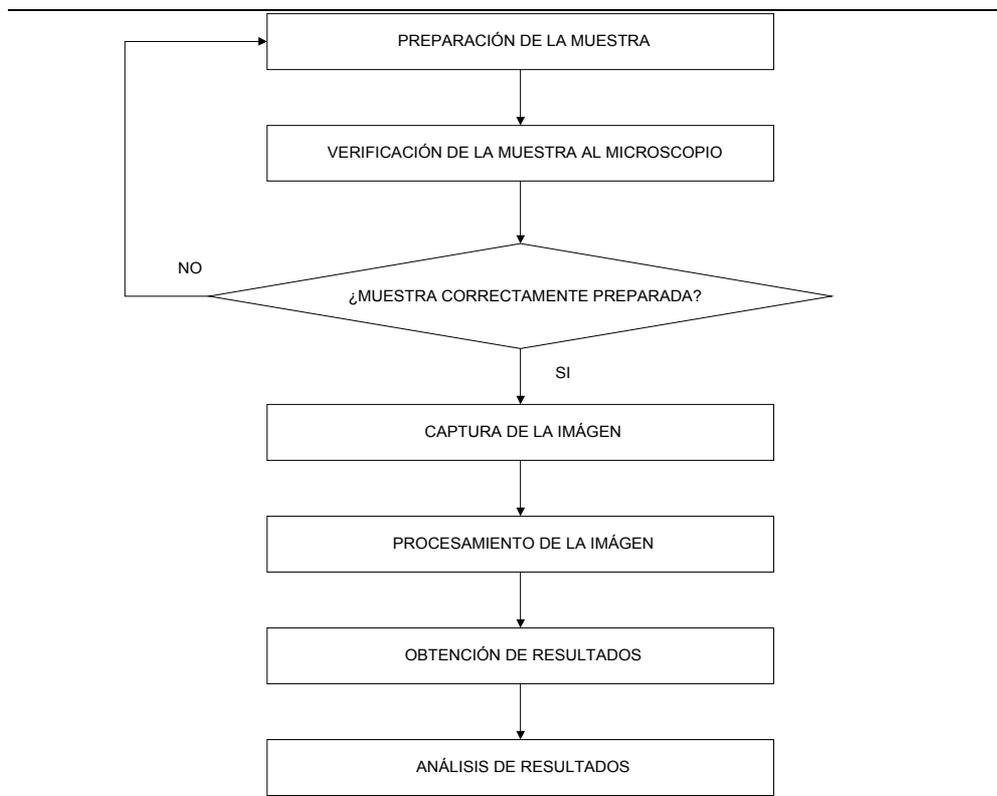


Ilustración 44. Diagrama de flujo del procedimiento para el análisis de poros mediante microscopía asistida por computador

- **Preparación de la muestra:**

Es necesario realizar un tratamiento especial a la cara de la probeta, para ensayo con el fin de producir un mejor contraste entre los poros de aire y la pasta de cemento (ver Ilustración 45).

El procedimiento seguido para la preparación de las muestras es el siguiente:

- Pulido inicial con una serie de papeles abrasivos.
- Pulido con abrasivos finos (óxido de aluminio, carburo de silicio)
- Aplicar una capa de tinta en la superficie de la probeta con un tampón simple o con un rodillo teniendo cuidado de que la tinta no penetre en los huecos de aire. Se usó una tinta negra base de aceite de alta viscosidad usada para litografía offset (ver Ilustración 45).

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

- Secar la probeta en una estufa a 50°C durante cuatro horas.
- Recubrir la superficie para ensayo con una pasta de cinc y refrigerar antes de eliminar el exceso de pasta (ver Ilustración 46).
- Recubrir la superficie con una capa delgada de yeso teniendo la precaución de que penetre en los huecos de aire llenos de polvo de cinc y retirar el exceso de pasta de yeso con ayuda de una lima.



a)



b)



c)

Ilustración 45. Aplicación de tinta para preparación de muestras de hormigón a) tinta usada para la tinción; b) homogenización de tinta en el rodillo; c) aplicación de tinta a la muestra de hormigón

3. EXPERIMENTAL



a)



b)



c)

Ilustración 46. Aplicación de pasta de blanco de cinc para preparación de muestras de hormigón a) preparación de pasta de blanco de cinc; b) aplicación de capa de blanco de cinc a la muestra; c) muestra refrigerada y cubierta con pasta de blanco de cinc

- **Verificación de la muestra al microscopio:**

Una vez terminada la sección pulida, debe ser verificada al microscopio, usando la resolución a la cual se trabajará. La sección debe aparecer completamente plana y libre de estrías. En caso de encontrarse algún defecto, se deberá repetir el proceso de pulido con el fin lograr una sección óptima, la cual no introduzca errores al trabajo.

Si al efectuar esta verificación, se detecta que los poros son difícilmente diferenciables de la pasta de cemento, es necesario rechazar la muestra y realizar de nuevo el tratamiento tratando de encontrar un alto contraste para obtener las imágenes apropiadas que serán analizadas.

- **Captura de la imagen:**

Para la captura de la imagen se usó una cámara de video conectada al microscopio. Las características del microscopio se observan en el Cuadro 16 y las de la cámara de video en el Cuadro 17.

Una vez ubicada la muestra sobre la platina del microscopio, se verifican las condiciones de iluminación y posición de la muestra.

Por medio de los tornillos de enfoque grueso y fino del microscopio, se realiza el enfoque óptimo de la imagen a capturar, se debe graduar la intensidad de la luz y la apertura del diafragma para obtener la mejor calidad posible de la imagen. Para seleccionar la porción de la imagen a capturar, se emplean los tornillos de desplazamiento horizontal y vertical de la platina del microscopio.

Cuadro 16. Especificaciones técnicas del microscopio utilizado para la captura de imágenes

Marca	Nikon, Industrial Microscope
Modelo	ECLIPSE LV100D
Sistema óptico	CF160 (infinity-corrected CF optical system) Microscopio binocular, lente ocular 10X
Lente objetivo usado	5X

Cuadro 17. Especificaciones cámara de video utilizada para la captura de imágenes

Marca	Nikon
Modelo	DS Camera Control Unit DS-L2
Display	LCD display: 8.4 pulg TFT liquid crystal display, 1024x768 XGA Formato de salida externo: Digital DVI output (DVI standards 1.0) or analog RGB output (0.7 Vp-p) (75 Ω), SXGA/XGA seleccionable

3. EXPERIMENTAL

El microscopio y la cámara utilizada se observan en la Ilustración 47. Posteriormente se inicia la captura de imagen con las opciones digitales de la cámara utilizada y se almacena en medio magnético.



Ilustración 47. Microscopio y cámara usados en la captura de imágenes

- **Procesamiento de la imagen:**

La primera etapa del análisis de imágenes asistido por computador es la digitalización de la señal de la cámara, esto implica la división de la imagen en una matriz de píxeles y la asignación de un número correspondiente al nivel de gris promedio para cada uno de los píxeles que conforman la imagen.

La segunda etapa es la conversión de la imagen en escala de grises a una imagen binaria, esto se logra mediante un proceso llamado segmentación. En este proceso, los objetos de interés en la imagen son identificados por un rango dado de niveles de gris; la imagen resultante de este proceso, posee sólo píxeles blancos o negros, de acuerdo con que cada píxel se encuentre o no en el rango de niveles de grises elegidos. Con este proceso, los poros se identifican únicamente por sus coordenadas del contorno; estas coordenadas son los datos de entrada para el procesamiento por computador, a fin de obtener la información acerca de la geometría del poro y sus características dentro de la sección.

Las coordenadas de los píxeles del contorno del poro en la imagen binaria, son consideradas como las coordenadas de los vértices de un polígono irregular, el cual se ajusta lo más posible a dicho contorno.

La última etapa del proceso, corresponde a la medición de la geometría del polígono, los parámetros que comúnmente se analizan para la geometría del poro son: Área, Perímetro, Diámetro de Feret Máximo y Mínimo, Diámetro Equivalente, Redondez, Forma, Orientación, entre otras.

Los principios esenciales del análisis cuantitativo de imágenes y la microscopía óptica asistida por computador, se muestran en la Ilustración 48.

Para el análisis digital de las imágenes capturadas se utilizó un software de origen inglés LEICA Qwin de la compañía Leica Imaging Systems Ltd.

Mediante la observación de varias imágenes capturadas se definieron las condiciones patrón del nivel de grises que presentan los poros para poder realizar el análisis, como los poros se observan de color blanco se seleccionó un nivel de blanco como patrón (ver Ilustración 49).

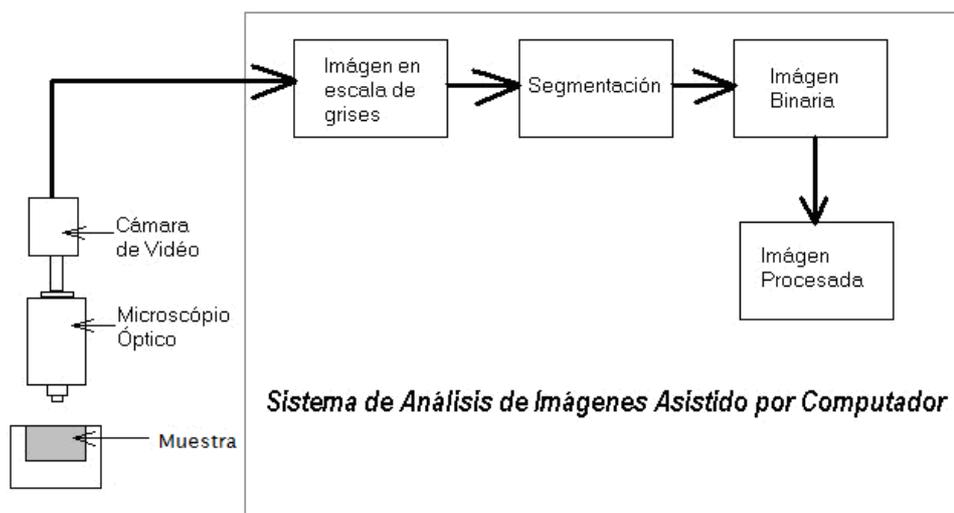
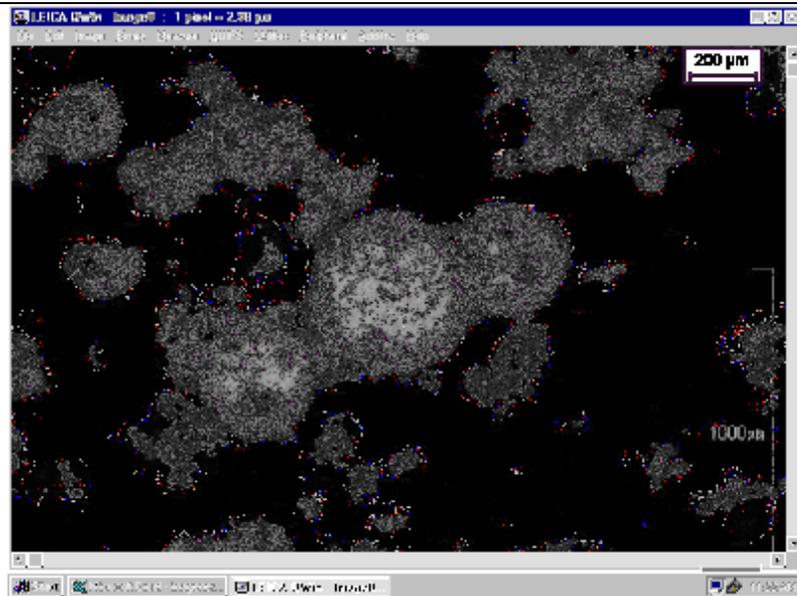
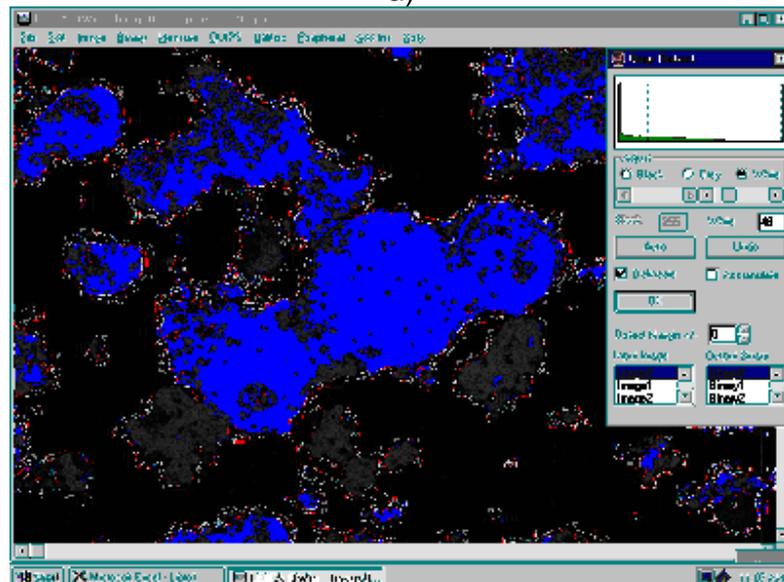


Ilustración 48. Diagrama esquemático del análisis de imágenes de microscopía óptica cuantitativa asistido por computador

3. EXPERIMENTAL



a)



b)

Ilustración 49. Proceso de segmentación de la imagen a) imagen a procesar; b) detección de blanco de los poros

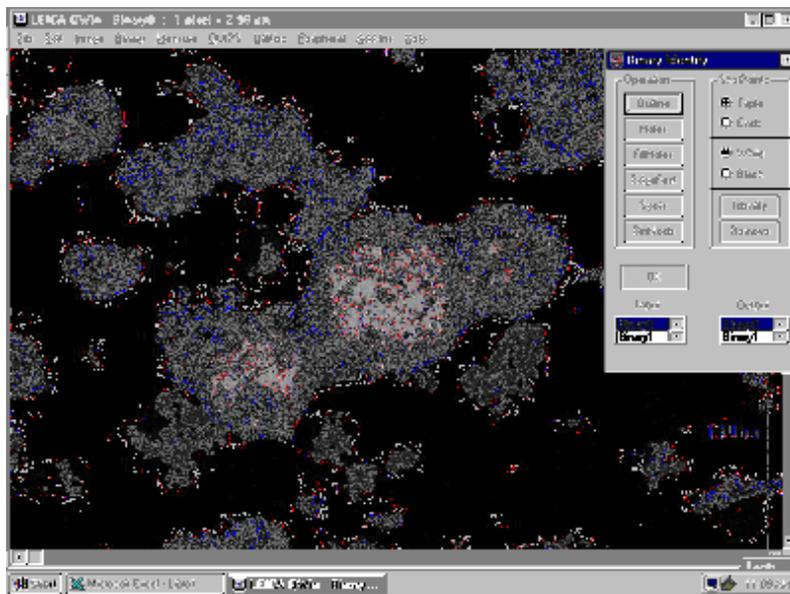
Al detectar los elementos a estudiar, por medio del nivel de grises, se obtiene una imagen mediante la cual se detectan las posibles imperfecciones, tales como poros que no se encuentran completamente

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

ubicados dentro del campo visual y huecos dentro de los contornos de la partícula.

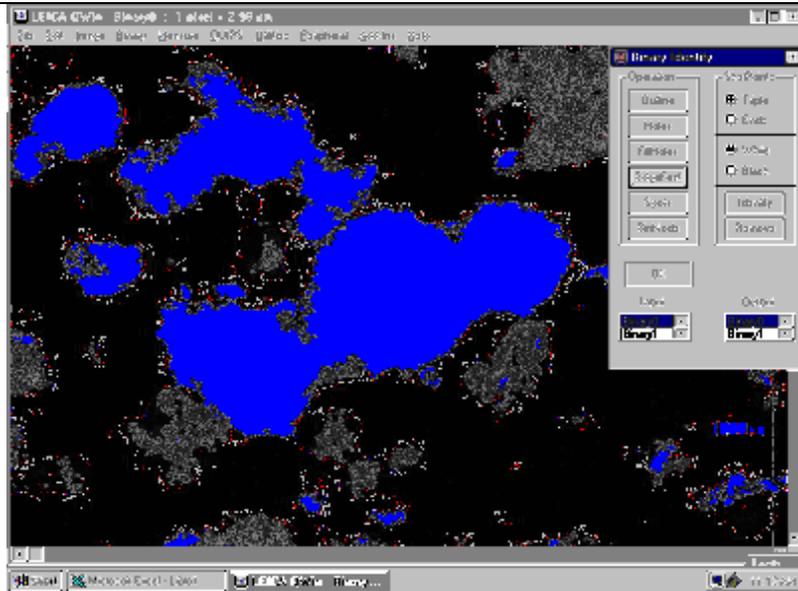
El proceso de corrección se realiza mediante las opciones Binary – Identify del menú principal, mediante una serie de operaciones que se detallan en la Ilustración 50.

Una vez efectuadas las operaciones de segmentación de la imagen, se obtiene la imagen binaria en la cual sólo se incluyen los poros a ser analizados.

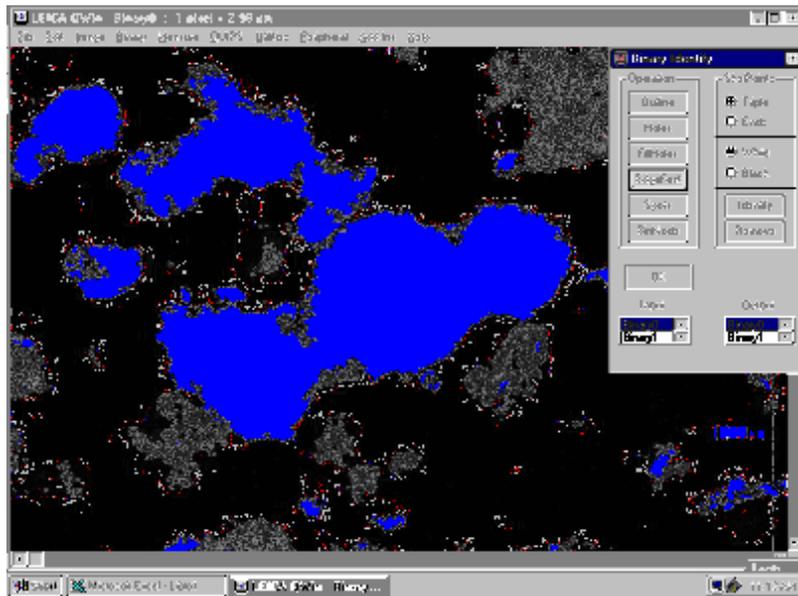


a)

3. EXPERIMENTAL



b)



c)

Ilustración 50. Corrección de la imagen binaria a Definición del contorno de poros; b) llenado de los poros; c) evitar poros fuera del campo visual

- **Análisis de resultados:**

Sobre la imagen binaria obtenida, se efectúan los procesos de medición de los parámetros que se requieran para el análisis.

El software ofrece múltiples parámetros a ser analizados, pero de acuerdo con estudios previos sobre porosidad para otras muestras sólidas, el análisis de los datos, se centró en los siguientes parámetros:

- Número de poros detectados
- Área
- Perimeter (Perímetro)
- Roundness (Redondez)
- EquivDiam Equivalent Circle Diameter (diámetro del círculo equivalente)

Los parámetros escogidos son los que presentan una relación más directa con la porosidad.

Al realizar el proceso de medición, el programa genera un archivo de texto y las estadísticas asociadas. Con estos resultados se analizan el conjunto de imágenes correspondientes a cada muestra de hormigón.

3.2.5.5 Resistencia a compresión del hormigón

Los moldes y medidas de las probetas, así como fabricación y curado de las probetas de hormigón cumplen con las normas UNE-EN 12390-1⁽⁵²⁾ y UNE-EN 12390-2⁽⁵³⁾, respectivamente.

Se utilizaron dos tipos de moldes, moldes cilíndricos de dimensiones 15 de diámetro y 30 centímetros de altura, ver Ilustración 51 a), y moldes cúbicos de dimensiones 10x10cm, ver Ilustración 51 b). La amasadora y mesa vibrante también se muestran en la Ilustración 51 c) y en la Ilustración 51 d).

El proceso de amasado es el que se describe a continuación:

- Humectación de la tolva;
- Adición de la totalidad de los áridos y la mitad del agua de amasado con el aditivo;
- Amasado durante 2 minutos;
- Reposo por 2 minutos;
- Adición del cemento;

3. EXPERIMENTAL

- Amasado por 30 segundos;
- Adición del agua restante, con el aditivo, en los siguientes 30 segundos.
- Amasado durante 2 minutos;
- Reposo por 5 minutos para la determinación de la consistencia mediante el cono de Abrams.

El curado de las probetas es el mismo realizado para las probetas de mortero, es decir, una vez desmoldeadas a las 24 horas de su amasado se guardan en la cámara húmeda hasta la edad de curado escogida.

Para medir la resistencia a compresión se utiliza una prensa (Ilustración 52) que cumple las especificaciones exigidas por la norma UNE-EN 12390-4⁽⁵⁴⁾ y donde se selecciona una velocidad de carga dentro del intervalo de 0,2 MPa/s a 1,0 MPa/s según indica la misma norma

La resistencia a compresión viene dada por la ecuación:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Donde

f_c es la resistencia a compresión (N/mm²)

F es la carga máxima de rotura (N)

A_c es el área transversal de la probeta sobre la que actúa la fuerza de compresión.

Las probetas cilíndricas, antes de ensayarlas se debe proceder al refrentado de las mismas, con un mortero de azufre, según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 12390-3.



a)



b)



c)



d)

Ilustración 51. Fotografías del equipo utilizado en la elaboración de probetas para resistencia a compresión en hormigones. a) molde cilíndrico para hormigones; b) molde cúbico para cilindros; c) amasadora; d) mesa de vibrado



Ilustración 52. Fotografía de prensa para medir la resistencia a compresión de los hormigones

3.2.5.6 Módulo de elasticidad en compresión del hormigón.

Adicionalmente al estudio de resistencias a compresión de probetas de hormigón, se realizó el ensayo de determinación del módulo de elasticidad a los 28 días de curado. Se procedió del modo que indica la norma UNE 83316 ⁽⁵⁵⁾.

Para ello se empleó la misma prensa que la empleada en la rotura de probetas a compresión y se utilizaron captadores extensométricos como instrumentos para medir los cambios de longitud (Ilustración 53 a).

El ensayo consiste en aplicar una tensión inicial, σ_b , de $0,5 \text{ N/mm}^2$ y registrar la deformación leída en cada línea de medición.

3. EXPERIMENTAL

Posteriormente se incrementa la tensión hasta alcanzar un tercio de la resistencia a compresión del hormigón a ensayar (σ_a). Se mantiene la carga durante 60 segundos y se registra la deformación medida. En ese momento se reduce la carga hasta el nivel de la tensión inicial. Se realiza al menos dos ciclos adicionales de carga-descarga, utilizando las mismas velocidades, y manteniendo las tensiones constantes (σ_a y σ_b) durante un período de 60 s. Después de terminar el último ciclo y de esperar un período de 60s manteniendo la tensión inicial, se registran las lecturas de las deformaciones, ε_b , tomadas al cabo de 30s. Se vuelve a cargar la probeta hasta la tensión σ_a y se registra las deformaciones relativas ε_a .

Cuando todas las medidas se han realizado, se incrementa la carga en la probeta de ensayo hasta que se produzca la rotura.

Se dispone de un equipo de medida acoplado a un PC que permite el registro de los ciclos de carga y descarga así como las medidas de deformación registradas por los tres captadores acoplados a la probeta (Ilustración 53).



Ilustración 53. Fotografías de los captadores extensométricos utilizados para medir el módulo de elasticidad en hormigones

El módulo de elasticidad estático en compresión, E_c (N/mm²), está dado por la fórmula:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b}$$

Donde

σ_a es la tensión en el escalón correspondiente a un tercio de la resistencia a compresión

σ_b es la tensión inicial (0,5 N/mm²)

ε_a es la deformación media, bajo el nivel de carga máxima

ε_b es la deformación media, bajo el nivel de esfuerzo base de carga

Los resultados se redondean a 500 N/mm² para valores superiores a 10000 N/mm² y a 100 N/mm² para valores por debajo de 10000 N/mm².

3.2.6 Ensayos de durabilidad

3.2.6.1 Ataque por sulfatos

Para la determinación de la influencia del aditivo sobre la expansión en morteros, se utilizó la norma UNE 80112⁽⁵⁶⁾. Estos ensayos consistieron en la medición de la variación de la longitud con el tiempo de probetas de mortero, expuestas al aire, sumergidas en agua potable, y en una disolución sulfato sódico al 10% (Na₂SO₄ 10%).

Se fabricaron 3 probetas prismáticas de 28,7 x 2,5 x 2,5 cm en los moldes que aparecen en la Ilustración 54 a), y que cumplen la norma UNE 80113⁽⁵⁷⁾, en la cual también se establece el procedimiento operatorio para el amasado y enmoldado, que en términos generales es el siguiente:

- A los moldes limpios y previamente engrasados se les introducen dos cilindros de teflón de 61mm de diámetro y 2,5cm de longitud, perpendicularmente a la anchura del molde y centrados en ambos laterales, de forma que queden enrasados a las paredes exteriores del molde y que sobresalgan por la cara interior.
- Se coloca el molde con su tolva, bien ajustados, en la compactadora.
- Seguidamente se amasan las probetas mortero, y se rellenan los moldes en dos etapas, vertiendo en el molde el volumen aproximado a la mitad del volumen del molde.
- Se conecta la compactadora y se somete la pasta enmoldada a 60 golpes de compactación, posteriormente se rellena el total del molde y se somete nuevamente a 60 golpes de compactación.

3. EXPERIMENTAL

- Se enrasa la pasta que sobresale por la cara superior del molde.
- Se colocan los moldes en la cámara húmeda ($20\pm 1^\circ\text{C}$ y 100% de humedad relativa) durante 24 horas. Transcurrido este tiempo, se desmoldan las probetas y se curan durante 28 días en cámara húmeda.
- Posteriormente, se mide la distancia que separa los extremos exteriores de las piezas cilíndricas de referencia mediante el comparador de longitudes. Ver Ilustración 54 b).
- A continuación, las probetas se sumergen en agua y en la disolución agresiva de ataque a la temperatura de $20\pm 1^\circ\text{C}$ y se conservan sumergidas durante todo el tiempo que dura la experiencia (las disoluciones se renuevan periódicamente cada 60 días o cada vez que se observe algún cambio).
- Se realizaron mediciones cada 7 días hasta los primeros 120 días y a partir de dicho periodo, las medidas se realizaron cada 30 días de inmersión, hasta la edad de 200 días.



a)



b)

Ilustración 54. Fotografía del equipo utilizado en el ensayo de expansión retracción de morteros expuesto a una solución de sulfatos. a) Moldes para probetas; b) aparato para la medida de expansión retracción

3.2.6.2 Resistencia al hielo-deshielo

Este ensayo permite identificar la resistencia de morteros a ciclos rápidos de hielo– deshielo, a partir de dos procedimientos diferentes. El

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

procedimiento A consiste en ciclos rápidos de hielo–deshielo en agua, y el procedimiento B en ciclos rápidos de hielo en aire y deshielo en agua.

Para el ensayo de hielo–deshielo, es necesario contar con el equipo de refrigeración con especificaciones según la norma ASTM C666 y con el comparador de longitud de acuerdo a la norma ASTM C490.

El ensayo consiste en someter prismas de mortero con dimensiones de 25mm x 25mm x 285mm según la norma ASTM C1012, a ciclos que comprenden condiciones de hielo entre 4,4° C y -17,8 ° C; y condiciones de deshielo entre -17,8°C y 4,4°C, en no menos 2 horas o más de 5 horas. Para el procedimiento A, el tiempo de deshielo no debe ser menor al 25% del tiempo total del ciclo, y para el procedimiento B no menor del 20%. Los prismas deben haber sido curados inicialmente por mínimo 14 días antes de someterse a los ciclos de hielo deshielo.

Las medidas longitudinales de los prismas se harán cada 36 ciclos o 10 ciclos si se sospecha que los prismas puedan deteriorarse rápidamente. Finalmente, el ensayo se dará por terminado al cabo de 300 ciclos o hasta que el cambio de longitud, en este caso expansión, sea de un 0,10%.

Para conocer la expansión de las probetas, se utiliza la fórmula

$$Lc = \frac{(l_2 - l_1)}{L_g} \times 100$$

Lc es el cambio longitudinal de la probeta después, del ciclo de hielo deshielo, en %

l_1 es la lectura del comparador de la probeta a 0 ciclos, es decir, antes de someter al hielo deshielo.

l_2 es la lectura del comparador después del ciclo.

L_g es la longitud nominal entre los topes de medida (250 mm).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este capítulo, de resultados y discusión, recopila los resultados obtenidos de los distintos ensayos realizados en la tesis y que tienen que ver con la caracterización físico química de los aditivos vegetales y comerciales estudiados, de su influencia en algunas propiedades de las pasta, morteros y hormigones de cemento Pórtland en estado fresco y endurecido, y de su influencia en la durabilidad.

En primer lugar, se realizó la caracterización físico-química de los aditivos extraídos de las plantas de *Agave americana* y *Furcraea cabuya* (fique cenizo). Los ensayos correspondientes se hicieron sobre el licor extraído de distintas plantas y diferentes hojas de la planta, tal y como se describe en el apartado de materiales 3.1.6. El propósito de la caracterización es la de tener parámetros comparativos entre el aditivo en estudio y los aditivos utilizados comúnmente en la industria de la construcción, a fin de proporcionar la información suficiente para intentar explicar el comportamiento y el efecto de estos en las pastas de cemento, en las pastas de yeso, en los morteros y los hormigones de cemento Pórtland.

Una vez caracterizados, se empezaron a utilizar los aditivos en las mezclas de pastas cemento Pórtland. Los estudios en pasta estuvieron orientados a determinar la influencia de los aditivos en propiedades como la consistencia, la viscosidad, y el tiempo inicial y final de fraguado. También se utilizó, como técnica experimental, el análisis termogravimétrico con el propósito de analizar las reacciones de la hidratación de la pasta, el contenido de hidratos y contenido de cal.

Se realizó un análisis sucinto, del comportamiento del aditivo vegetal, en pastas de yeso. Para esto sólo se utilizó el licor del *Agave americana*, se estudiaron propiedades reológicas y se evaluaron las resistencias mecánicas a flexo-tracción y compresión.

Después de los ensayos en pastas se procedió a realizar ensayos en morteros. Se analizaron las siguientes propiedades: consistencia, tiempos de fraguado, absorción capilar, contenido de aire ocluido y resistencias mecánicas a flexo-tracción y compresión.

La importancia del hormigón, como material de gran relevancia en la industria de la construcción, nos indujo a conocer el efecto de los aditivos en algunas de sus propiedades en estado plástico y en estado endurecido. Es así como se realizaron ensayos de trabajabilidad, aire ocluido,

exudación, estructura de poros y resistencias mecánicas a compresión y módulo de elasticidad.

Por último, y dada la importancia de los aditivos aireantes en las condiciones de durabilidad de los hormigones, se procedió a realizar ensayos de cambio de longitud de expansión-retracción en morteros expuestos a una solución de sulfatos, y el efecto hielo-deshielo.

4.1 Caracterización Físico – Química

Para la caracterización físico-química de los extractos de las plantas de *Agave americana* y la *Furcraea cabuya*, se realizaron los siguientes ensayos: extracto seco convencional, pérdida por calcinación, contenido de halógenos, conductividad, determinación del contenido de reductores (azúcares), peso específico, pH, análisis termogravimétrico y análisis térmico diferencial, microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis por espectroscopía infrarroja.

Estos ensayos nos ayudaron a conocer la naturaleza de los aditivos y de encontrar datos científicos que nos permitan explicar su comportamiento en las pastas, los morteros y los hormigones de cemento Pórtland.

4.1.1 Determinación del extracto seco convencional

El ensayo para determinar el extracto seco convencional permite, a partir de una muestra del aditivo que se seca en una estufa a $105 \pm 3^\circ \text{C}$ durante 4 horas, conocer el porcentaje de extracto seco y el contenido de agua de un aditivo líquido.

Para este ensayo se tomaron entre 5g y 10g del licor de *Agave americana*, extraídos de seis hojas de distintas plantas, que se denominan en el “muestras”, y de cada una de las secciones de las hojas que se nombran como 1/3, 2/3 y 3/3 refiriéndose a su ubicación en la longitud hoja, así: la sección 1/3 corresponde a la punta de la hoja y el extracto se obtuvo de la hoja sin pelar, la sección 2/3 corresponde al tercio medio de la hoja y la sección 3/3 corresponden a la sección más baja de la hoja-(Ilustración 55). Cada uno de los resultados es el resultado medio de dos ensayos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

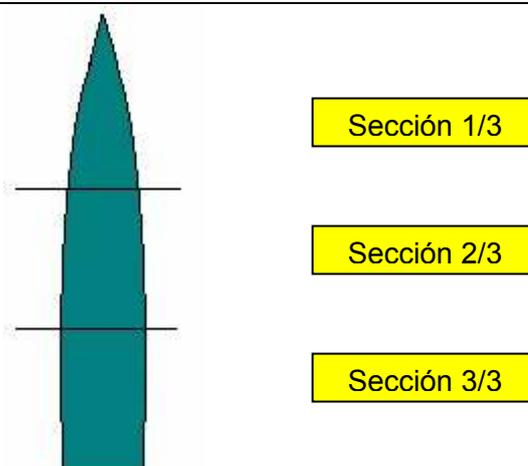


Ilustración 55. Gráfico de las secciones de la hoja de la planta de *Agave americana*

De la planta *Furcraea cabuya*, se tomaron dos muestras de 5g aproximadamente cada una. La diferencia en la cantidad de muestras, respecto con el *Agave americana*, se halla en que para la *Furcraea* el licor fue recogido directamente del proceso agroindustrial que extrae la fibra (cabuya) de la hoja y no directamente de la planta, como sí se hizo con la primera. De manera comparativa se obtuvo el extracto seco convencional de un superplastificante comercial llamado Sikament FF, cuyas características se pueden observar en la sección 3.1.7, y de un aditivo aireante Micro air-100 cuyas características se leen en la sección 3.1.8. Para ambos se tomaron 2g de aditivo como muestra, tal como lo exige la norma correspondiente. ⁽⁵⁰⁾

Con cada uno de los resultados obtenidos, en cada sección de la hoja del *Agave americana*, se calculó un porcentaje medio ponderado con respecto a su peso total. Los resultados del licor del fique cenizo y de los aditivos comerciales son el resultado del promedio aritmético de las dos determinaciones.

En los resultados obtenidos, y que se relacionan en el Cuadro 18 y la Ilustración 56, se observa:

- La mayor cantidad de residuo de la planta de *Agave americana*, se obtiene de la sección de la punta hoja (1/3), en el intervalo 10,27% - 13,01% del total de la muestra, resultado que indica un mayor volumen de piel y menor contenido de tejido carnoso y agua en esa sección.

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

- La cantidad de residuo de la planta de *Agave americana*, disminuye en las otras dos secciones: la media (2/3) en el intervalo 6,76% - 9,94% y la base (3/3) en el intervalo 6,25% - 8,89%. Aunque no hay valores muy diferentes entre los extractos con piel y sin piel, se advierte un menor contenido de extracto seco en este último; así, el valor del extracto seco promedio de las muestras de la base (3/3) sin piel, oscilan entre el 6,25% y 7,25%, mientras que para las que tienen piel, se obtienen valores entre 8,89% y 7,22%.
- Los valores medios ponderados (valor relativo de extracto obtenido respecto al peso de la sección en la hoja), están entre el 7,0% y el 9,2%, obteniéndose un valor medio para las 6 hojas ponderadas del 7,9%. No se observan grandes diferencias entre las distintas plantas, ni se ve afectada la determinación por la cantidad de muestra secada dentro del intervalo de los 5g y 10g.
- El valor obtenido del extracto seco convencional en la muestra de *Furcraea cabuya*, es del 5,7% promedio aritmético de las determinaciones, valor menor al obtenido para la planta de *Agave americana*. Posiblemente incida la procedencia y el sistema de extracción del licor de la hoja.
- El resultado para el superplastificante Sikament FF, indica un contenido de residuo sólido de 41,3%, valor que se corresponde con el dado por el productor (ver sección 3.1.7). Es considerablemente mayor el residuo sólido en el superplastificante que en las plantas de *Agave americana* y *Furcraea cabuya*, lo que indica su mayor concentración en el producto..
- El aditivo aireante Micro air-100 presenta un extracto seco convencional del 12,7% resultado del promedio aritmético de dos determinaciones. Es menor que el encontrado en el Sikament FF pero ligeramente mayor que en las plantas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuadro 18. Extracto seco convencional para los diferentes aditivos

Muestra	Sección de la hoja	Estado	Masa inicial del aditivo	Masa del residuo	Extracto seco convencional	
			g	g	%	% ponderado
<i>Agave americana</i>	3/3	Sp	10,04	0,728	7,25%	8,3%
	2/3	Cp	10,03	0,997	9,94%	
	1/3	Cp	9,97	1,023	10,27%	
<i>Agave americana</i>	3/3	Cp	10,04	0,725	7,22%	8,6%
	2/3	Cp	10,01	0,975	9,75%	
	1/3	Cp	10,28	1,337	13,01%	
<i>Agave americana</i>	3/3	Sp	10,17	0,717	7,05%	7,4%
	2/3	Cp	10,27	0,731	7,12%	
	1/3	Cp	10,01	1,195	11,94%	
<i>Agave americana</i>	3/3	Sp	5,54	0,346	6,25%	7,0%
	2/3	Cp	5,22	0,353	6,76%	
	1/3	Cp	5,07	0,590	11,63%	
<i>Agave americana</i>	3/3	Cp	5,20	0,462	8,89%	9,2%
	2/3	Cp	5,33	0,475	8,91%	
	1/3	Cp	5,47	0,650	11,88%	
<i>Agave americana</i>	3/3	Sp	10,04	0,680	6,77%	7,0%
	2/3	Cp	10,06	0,767	7,62%	
	1/3	Cp	10,26	1,150	11,21%	
Media aritmética						7,9%
<i>Furcraea cabuya</i>	1,00		5,95	0,348	5,8%	5,7%
	2,00		4,60	0,260	5,7%	
Media aritmética						5,7%
<i>Sikament FF</i>	1,00		2,06	0,856	41,6%	41,3%
	2,00		2,11	0,866	41,0%	
Media aritmética						41,3%
Micro air 100	1,00		2,09	0,263	12,6%	12,7%
	2,00		2,11	0,269	12,8%	
Media aritmética						12,7%

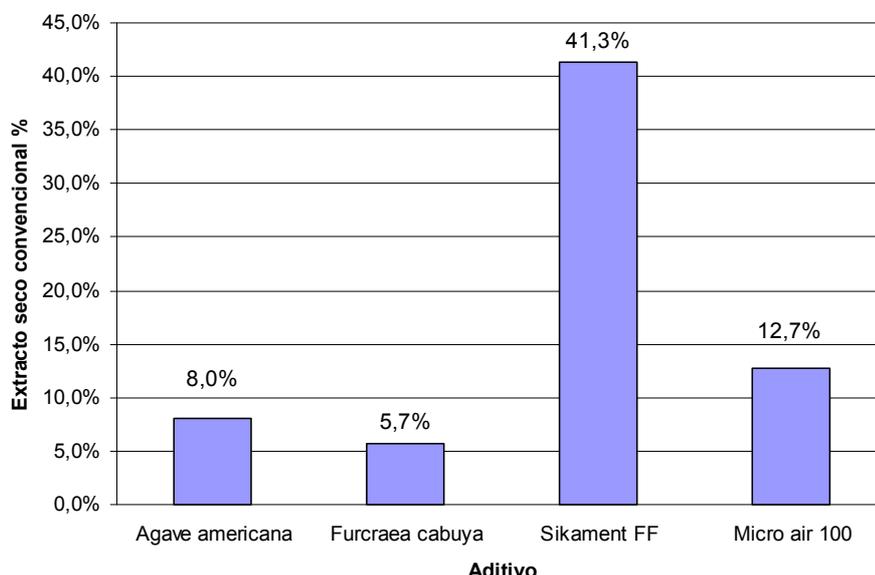
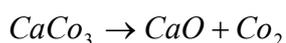


Ilustración 56. Gráfico del extracto seco convencional de los distintos aditivos

4.1.2 Determinación de la pérdida por calcinación a $1050 \pm 25^{\circ}\text{C}$.

La pérdida por calcinación indica fundamentalmente el porcentaje de materia orgánica que tiene un aditivo respecto a su masa total; sin embargo pueden existir pérdidas debido a la descomposición de compuestos inorgánicos, como por ejemplo el carbonato cálcico, que a los 870°C aproximadamente, se descompone en dióxido de carbono y óxido de calcio.



El ensayo determina la pérdida de masa que experimentan los aditivos para hormigones, morteros y pastas cuando se someten a $1050 \pm 25^{\circ}\text{C}$, hasta constancia de masa. Se fija por pesada del residuo seco obtenido a $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ y del que queda cuando éste se somete a la acción del calor a $1050 \pm 25^{\circ}\text{C}$, hasta constancia de masa. El procedimiento seguido se describe en la sección 3.2.1.2.

En el Cuadro 19 y la Ilustración 57, se pueden observar los siguientes resultados:

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Los aditivos vegetales extraídos de las plantas del *Agave americana* y la *Furcraea cabuya* al igual que el aditivo aireante comercial Micro air 100, muestran el menor porcentaje de residuo calcinado: 7,0%, 7,1% y 6,2% respectivamente. Esto significa, que estos aditivos se caracterizan por su alto contenido de materia orgánica.
- El mayor porcentaje de residuo calcinado corresponde al aditivo superplastificante Sikament FF con 29,8%. Al contrario de lo anterior significa que es el aditivo con menor cantidad de materia orgánica, o con productos inorgánicos, que no se han descompuesto a esa temperatura.

Cuadro 19. Pérdida por calcinación de los aditivos

Muestra	Sección de la hoja	Estado	Masa del extracto seco	Masa del residuo calcinado	Extracto calcinado	
			g	g	%	% ponderado
<i>Agave americana</i>	3/3	Sp	0,728	0,038	5,22%	6,9%
	2/3	Cp	0,997	0,060	6,02%	
	1/3	Cp	1,023	0,092	8,99%	
<i>Agave americana</i>	3/3	Cp	0,725	0,038	5,24%	8,8%
	2/3	Cp	0,975	0,078	8,00%	
	1/3	Cp	1,337	0,151	11,29%	
<i>Agave americana</i>	3/3	Sp	0,717	0,033	4,60%	7,1%
	2/3	Cp	0,731	0,035	4,79%	
	1/3	Cp	1,195	0,119	9,96%	
<i>Agave americana</i>	3/3	Sp	0,346	0,016	4,62%	9,2%
	2/3	Cp	0,353	0,032	9,07%	
	1/3	Cp	0,590	0,070	11,86%	
<i>Agave americana</i>	3/3	Cp	0,462	0,044	9,52%	10,4%
	2/3	Cp	0,475	0,045	9,47%	
	1/3	Cp	0,650	0,077	11,85%	
<i>Agave americana</i>	3/3	Sp	0,680	0,028	4,12%	7,0%
	2/3	Cp	0,767	0,050	6,52%	
	1/3	Cp	1,150	0,103	8,96%	
Media aritmética						7,0%
<i>Furcraea cabuya</i>	1,00		0,348	0,025	7,2%	7,1%
	2,00		0,260	0,018	6,9%	
Media aritmética						7,1%
Sikament FF	1,00		0,856	0,285	33,3%	29,8%
	2,00		0,866	0,227	26,2%	
Media aritmética						29,8%
Micro air 100	1,00		0,263	0,015	5,7%	6,2%
	2,00		0,269	0,018	6,7%	
Media aritmética						6,2%

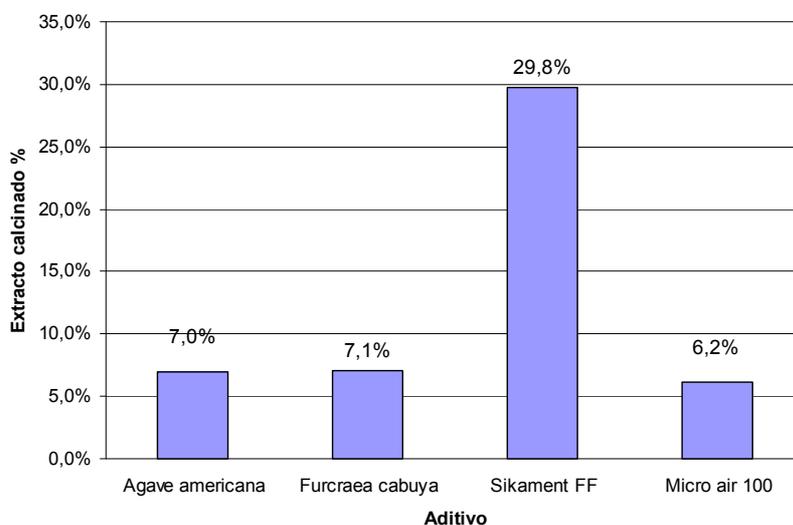


Ilustración 57. Gráfico de pérdida por calcinación de los diferentes aditivos

4.1.3 Determinación del pH

El pH se determinó a partir del aditivo homogenizado en estado líquido. Para esta tesis se tomaron muestras de 100 ml del licor extraído de cada sección y cada hoja del *Agave americana*; del aditivo comercial se toma la misma cantidad directamente del envase. A continuación se realizó, a $20 \pm 2^\circ\text{C}$, sobre cada una, la medida con el pH-metro previamente calibrado según las especificaciones técnicas del fabricante.

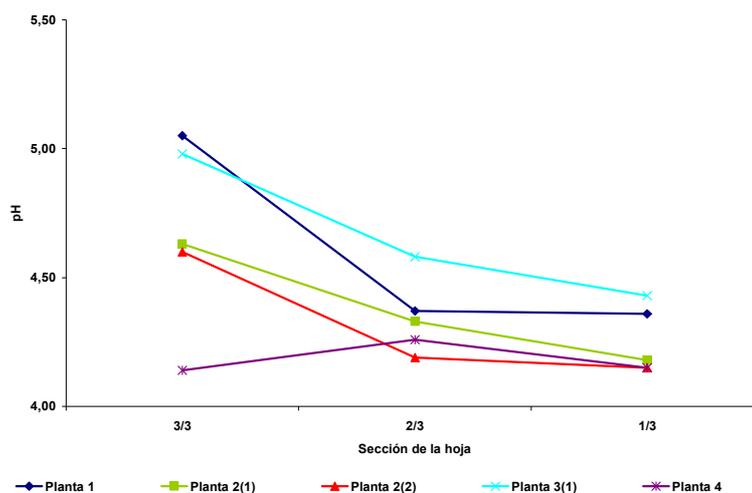
Posteriormente, se preparan muestras de 10 ml y se diluyen en 100 ml de agua desionizada, se homogenizan, se agitan y se realiza en cada muestra, a $20 \pm 1^\circ\text{C}$, la determinación del pH.

Los resultados, expuestos en el Cuadro 20, en la Ilustración 58 y la Ilustración 59, indican:

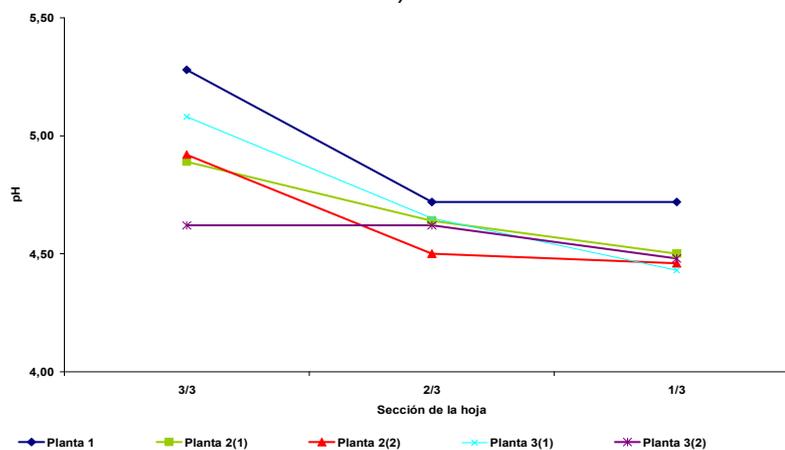
- Las muestras del licor de *Agave americana* y de *Furcraea cabuya* son ácidas, con pH entre 4 y 5. Las muestras, en estado puro, lógicamente son siempre más ácidas que las muestras diluidas, debido a la disminución de la concentración.
- Las muestras del licor de *Agave americana* con piel son, en general, ligeramente más ácidas que las muestras sin piel.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- La sección de la punta de la hoja (1/3) es ligeramente más ácida que la de la base (3/3) lo que indicaría que la acidez de la hoja la aporta en mayor medida la piel.
- Los aditivos Sikament FF y Micro Air 100, presentan un pH básico, alrededor de 12 en estado puro de y 12,4 diluidos. Estos datos confirman las especificaciones técnicas del fabricante.



a)



b)

Ilustración 58. Gráficos de pH a) para el licor del *Agave americana* en estado puro b) para el licor de *Agave americana* diluido en agua desionizada

Cuadro 20. Determinación de pH

Muestra	Sección de la hoja	Estado	pH en muestra pura	pH en muestra pura Promedio	pH en muestra diluida	pH en muestra diluida Promedio
1,00	3/3	sp	5,05	4,59	5,28	4,91
	2/3	cp	4,37		4,72	
	1/3	cp	4,36		4,72	
2 (1)	3/3	sp	4,63	4,38	4,89	4,68
	2/3	cp	4,33		4,64	
	1/3	cp	4,18		4,50	
2(2)	3/3	cp	4,60	4,31	4,92	4,63
	2/3	cp	4,19		4,50	
	1/3	cp	4,15		4,46	
3(1)	3/3	sp	4,98	4,66	5,32	4,99
	2/3	cp	4,58		4,92	
	1/3	cp	4,43		4,73	
3(2)	3/3	cp	4,79	4,43	5,08	4,72
	2/3	cp	4,36		4,65	
	1/3	cp	4,14		4,43	
4,00	3/3	Sp	4,14	4,18	4,62	4,57
	2/3	Cp	4,26		4,62	
	1/3	Cp	4,15		4,48	
MEDIA				4,43		4,75
Fique	1		4,51	4,54	4,61	4,61
	2		4,51		4,61	
	3		4,59		4,62	
Sikament FF	1		12,11	12,10	12,45	12,44
	2		12,08		12,48	
	3		12,08		12,40	
Micro-air 100	1		12,05	12,06	12,38	12,39
	2		12,11		12,45	
	3		12,03		12,33	

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

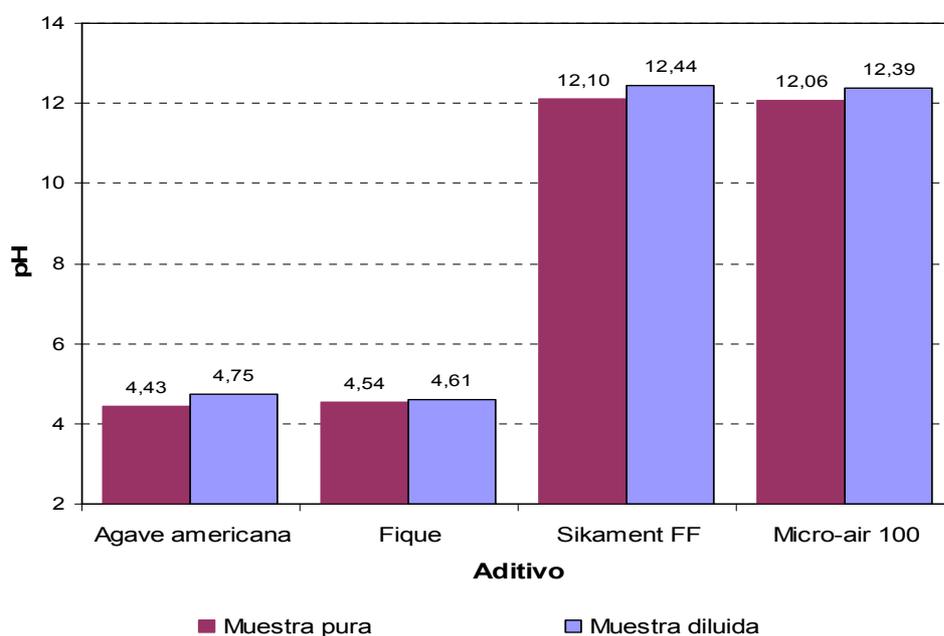


Ilustración 59. Gráfico de pH para los diferentes aditivos

4.1.4 Análisis Termogravimétrico y Análisis Térmico Diferencial.

Para conocer los tipos de compuestos que contienen los aditivos se utilizó la técnica de la termogravimetría y el análisis térmico diferencial

Para la caracterización del licor del *Agave americana* se tomaron tres muestras: dos de extracto seco convencional, con piel y sin piel, correspondientes a las secciones 2/3 y 3/3 de una de las hojas, y otra de extracto seco liofilizado con piel correspondiente a la sección 2/3 de la misma hoja. Se analizaron cantidades, no mayores de 3,5 mg en crisol de alúmina, y se sometió a calentamiento entre 35°C y 1000°C con una velocidad de calentamiento de 20°C/min, bajo una atmósfera oxidante de aire seco con el propósito de facilitar la oxidación total de la materia orgánica presente.

La curva TG muestra las pérdidas de peso que se producen con el calentamiento de la muestra, debido a que durante dicho calentamiento se producen reacciones de deshidratación, oxidación o descomposición en las que se forman compuestos gaseosos.

La curva derivada, DTG, es una medida de la velocidad de dichos procesos químicos, en donde los mínimos de la curva corresponden a la

temperatura donde la velocidad de la reacción química producida es máxima.

Por último la curva DTA mide la variación entre la temperatura de la muestra y la del entorno y representa dicha variación con el aumento de temperatura del horno. Esta curva guarda relación con los procesos exotérmicos y endotérmicos que se producen en dichas reacciones químicas, considerando procesos exotérmicos cuando la curva presenta máximos y procesos endotérmicos cuando la curva describe un mínimo.

En la Ilustración 60 se grafica, a manera de ejemplo, la curva TG y su derivada DTG de una muestra del extracto seco del licor de *Agave americana*. Las asignaciones de picos es la siguiente: pico 1 muestra la pérdida debido al agua débilmente combinada (35°C -140°C); pico 2 presenta una pérdida probablemente debido a la deshidratación-descomposición de los compuestos presentes en el extracto (140°C - 280°C); el pico 3 se asigna a la oxidación de la materia más fácilmente oxidable junto con procesos de volatilización y descomposición térmica de la materia orgánica (280°C - 440°C); el pico 4 es una pérdida debida a la oxidación del resto de la materia orgánica presente que se oxida a mayor temperatura (440°C - 600°C). Los dos picos 3 y 4 se asignan a oxidación porque la curva DTA demuestra que son procesos exotérmicos. El pico 5 (600°C - 760°C) muestra el proceso de descarbonatación por presencia de carbonatos, según la reacción $\text{Ca CO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

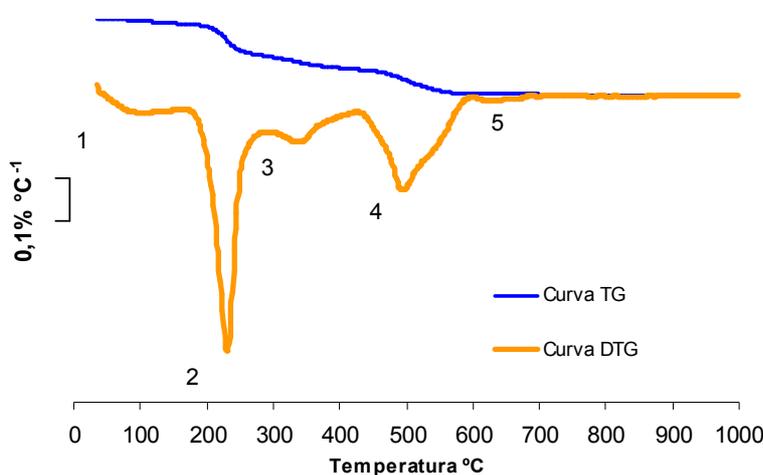
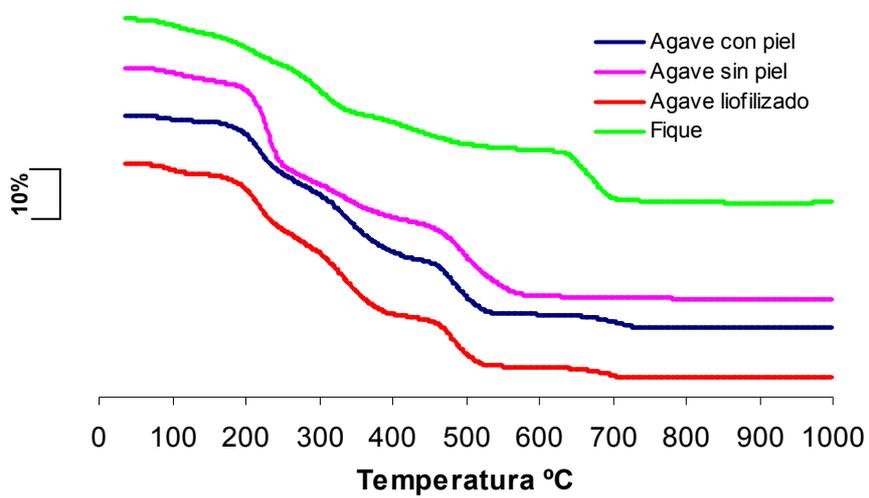
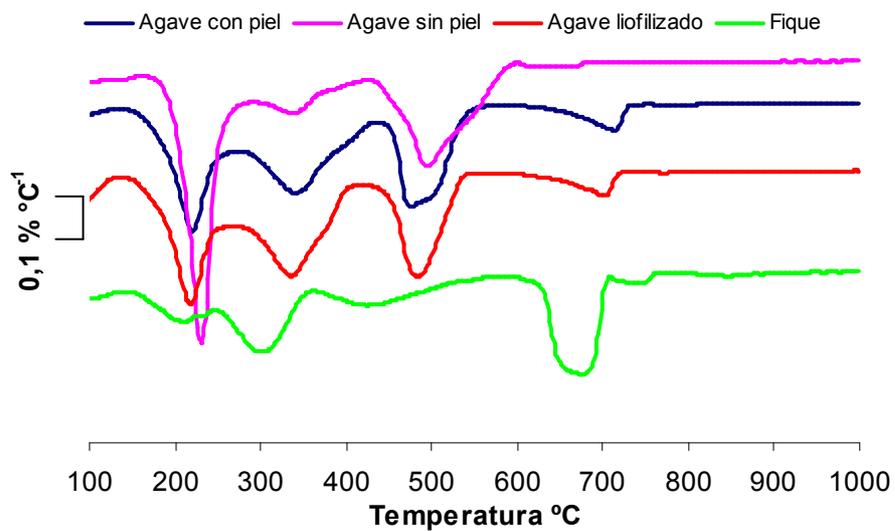


Ilustración 60. Gráfico del Análisis Termogravimétrico del licor de *Agave americana*

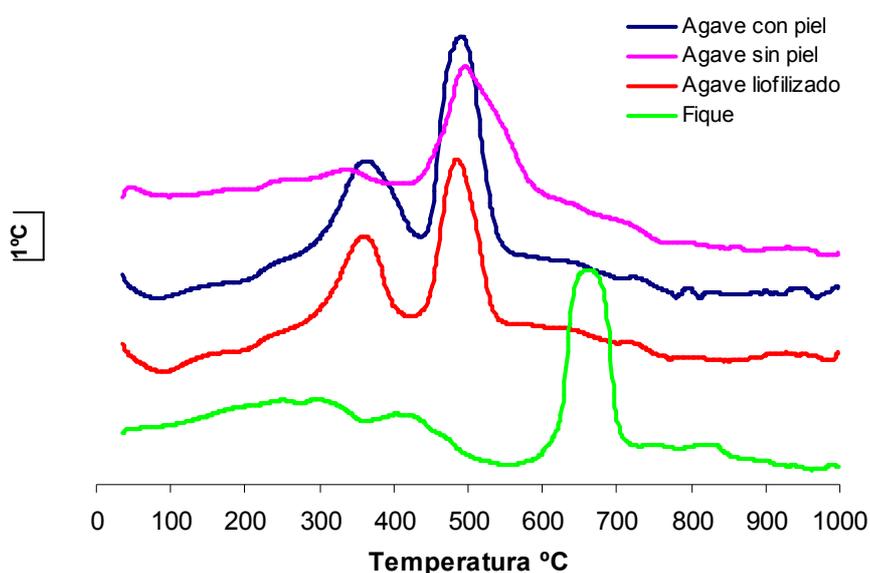
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



a)



b)



c)

Ilustración 61. Gráficos del Análisis Térmico a) curvas de análisis termogravimétrico TG, b) curva derivadas de análisis termogravimétrico (DTG) y c) curvas de análisis térmico diferencial (SDTA) para licor de *Agave americana* seco con piel, sin piel y liofilizado con piel, y para el extracto de fique

Los datos de pérdida de peso de cada intervalo, así como las temperaturas de los picos de la curva DTG y los resultados que se pueden deducir de éstos, se encuentran en el cuadro 21, cuadro 22, cuadro 23 y en el Cuadro 24. En la ilustración 61 se dibujan las curvas TG, DTG, y DTA respectivamente del extracto seco convencional del *Agave americana*, con piel, sin piel y liofilizada, y la muestra del extracto seco convencional del fique. En la curva TG se observa una pérdida continua de masa durante todo el intervalo estudiado donde se destacan pérdidas específicas con la ayuda de las curvas DTG y DTA y que coinciden con las curvas del ejemplo antes visto.

Las pérdidas entre 280°C-400°C y 400°C-600°C, muestran un proceso fuertemente exotérmico, que confirma la oxidación de la materia orgánica presente en el sistema.

En el caso del *Agave*, los resultados de pérdida total de masa del análisis termogravimétrico superan el 90%, tal como sucede en el ensayo de

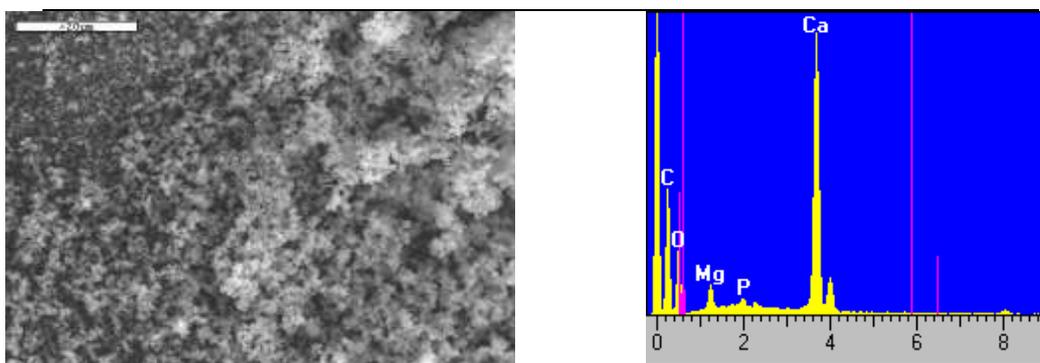
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

pérdida de masa por calcinación. Mientras que las pérdidas de masa en el extracto seco con piel (Cuadro 21) y el liofilizado son prácticamente coincidentes (Cuadro 22), en el extracto seco sin piel se observa una mayor diferencia (Cuadro 23). Parece que en dicha muestra el proceso de deshidratación-descomposición, es más importante, mientras que la cantidad de materia orgánica fácilmente oxidable es menor. Por otra parte la materia orgánica que se oxida a mayor temperatura es más importante que en las otras dos muestras (31,20%).

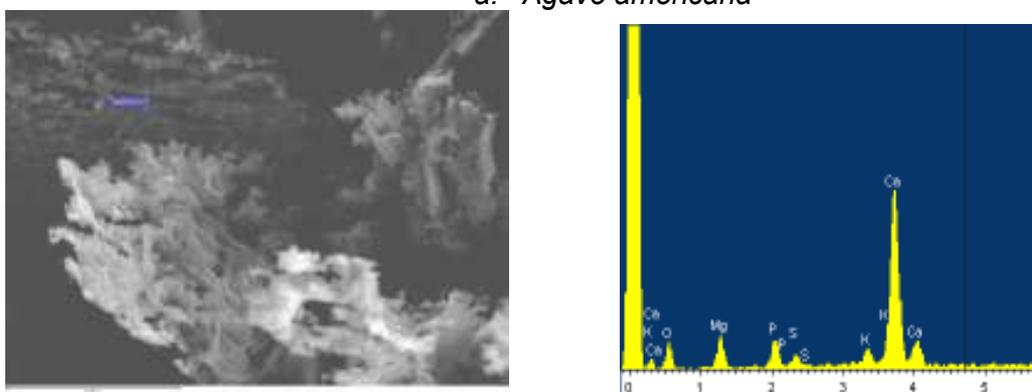
Cabe destacar, además, que la cantidad de carbonatos presentes en la muestra sin piel (2,75%) es menor que la de las otras dos muestras. En la muestra de extracto seco con piel es de 11,80% y en la muestra del extracto liofilizado, es del 19,9% (resultados expresados como %CaCO₃).

En la curva DTG del fique se observa que la combustión se produce cerca de los 600°C, debido seguramente a que la mayor presencia en materia fibrosa hace que se produzca una carbonización en ese intervalo de temperatura. Es decir, en los primeros intervalos se descompone la materia orgánica, de manera análoga al *Agave americana*, pero se produce una carbonización (se forma carbón en la combustión de la materia orgánica en los primeros intervalos) y ese carbón se quema alrededor de los 600°C (ver Ilustración 61).

En el caso del fique, cabe destacar, a la vista de los resultados mostrados en el Cuadro 24, que la pérdida total es menor que en el caso del *Agave* (78,15% para el fique y 91,29% para el *Agave*). El residuo producido en la calcinación a 1000°C, se analizó por EDX, comprobando que, en ambos casos, para el procedente del licor de *Agave* y para el del fique, el elemento mayoritario es el Ca, pero que, efectivamente, al producirse el proceso de carbonización en este último, no se detecta la presencia de carbono (ver Ilustración 622 a y b). Los procesos distintos de calcinación, son probablemente la razón por la que el fique presenta un mayor porcentaje de residuo, después de la calcinación.



a. *Agave americana*



b. *Fique cenizo*

Ilustración 62. Micrografía y espectro del residuo calcinado del licor de la hoja de a) *Agave americana*; b) *Fique cenizo*.

Cuadro 21. Resultados del Análisis Termogravimétrico del extracto seco de *Agave americana* seco con piel

Intervalos de temperatura °C	Pérdida de peso %	Temperatura Picos °C (DTG)
0 – 140	2,61	92
140 – 280	27,53	220
280 – 400	28,01	350
400 – 600	26,65	478
600 – 760	5,20	715
Pérdida Total	90,02	

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuadro 22. Resultados del Análisis Termogravimétrico del extracto liofilizado de *Agave americana* liofilizado con piel

Intervalos de temperatura °C	Pérdida de peso %	Temperatura Picos °C (DTG)
0-140	4,57	98
140-280	29,43	222
280-440	30,17	337
440-600	22,48	498
600-760	4,64	708
Pérdida Total	91,29	

Cuadro 23. Resultados del Análisis Termogravimétrico del extracto seco de *Agave americana* seco sin piel

Intervalos de temperatura °C	Pérdida de peso %	Temperatura Picos °C (DTG)
0-140	4,97	105
140-280	42,17	230
280-440	16,85	342
440-600	33,34	495
600-760	1,21	700
Pérdida Total	98,54	

Cuadro 24. Resultados del Análisis Termogravimétrico del extracto seco del Fique

Intervalos de temperatura °C	Pérdida de peso %	Temperatura Picos °C (DTG)
0-140	5,84	105
140-280	19,29	212
280-440	18,88	305
440-600	11,82	458
600-760	22,32	677
Pérdida Total	78,15	

4.1.5 Determinación del contenido de halogenuros totales

La determinación del contenido de halogenuros totales (solubles y no solubles en agua) en los aditivos se determina mercurimétricamente, en la disolución de la muestra en medio nítrico, de la que previamente se han eliminado los posibles compuestos orgánicos por medio de una disgregación con la mezcla Eschka (carbonato de sodio o de potasio + óxido de magnesio, 1 + 2 en masa) con objeto de fijar los halogenuros. El procedimiento seguido se describe en la sección 3.2.1.3.

La determinación de las especies iónicas presentes en un aditivo proporciona una información muy importante acerca de la funcionalidad del polímero y de la presencia de electrolitos. Los resultados se representan como la cantidad de miligramos de cloruros, por cada gramo de aditivo ⁽³³⁾.

Se prepararon, para este ensayo, muestras del extracto seco del licor de *Agave americana* con piel, extracto seco del licor de *Agave americana* liofilizado y extracto seco del superplastificante comercial Sikament FF.

En la Ilustración 63, se observa que el contenido de halogenuros totales en los extractos de *Agave americana*, obtenidos con diferentes muestras (secas y liofilizadas), es prácticamente el mismo. El superplastificante comercial Sikament FF, aunque presenta una mayor cantidad de halogenuros que el licor de *Agave americana*, se puede considerar que contiene un valor bajo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En cualquiera de los casos, el licor de *Agave americana* o el superplastificante comercial, los contenidos de halogenuros totales, expresado en mg/g de cloruros, son inferiores al 0,1% en masa, haciéndolos utilizables en hormigones de acuerdo a los requisitos establecidos por UNE-EN 934-2.

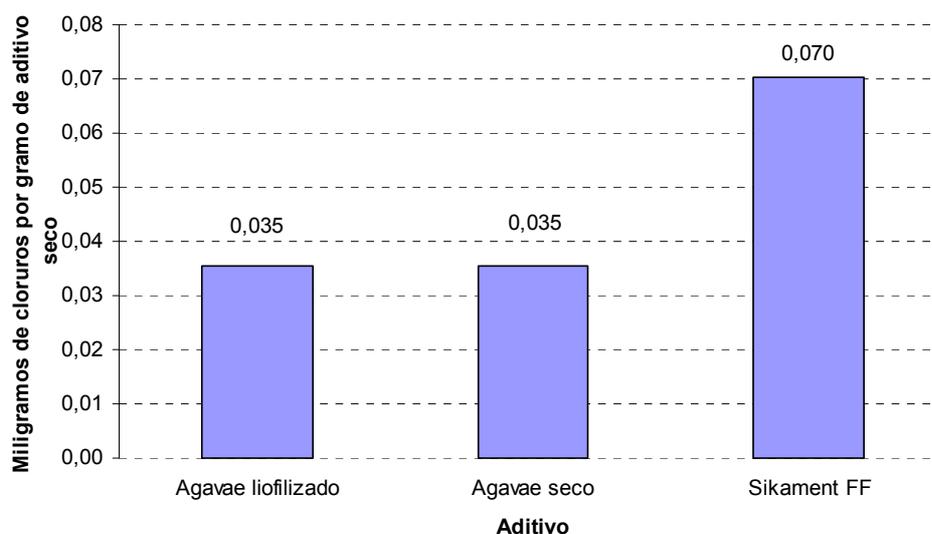


Ilustración 63. Gráfico de contenido de halogenuros totales

4.1.6 Conductividad

Alternativamente a la evaluación del contenido de halogenuros se utilizó la medida de la conductividad eléctrica como indicador de los iones presentes en solución acuosa. El método general utilizado para medir la conductividad eléctrica y el pH de una disolución consiste en el uso de dos electrodos de medida de pH y conductividad tal como se explica en el apartado 3.2.1.6.

Para la medida se utilizaron muestras de aproximadamente 1g de licor de *Agave americana* y del fique, del extracto seco o liofilizado del aditivo, y del superplastificante Sikament FF. Se diluyeron en 50 ml de agua desionizada y se midió la conductividad.

Los resultados se muestran en el Cuadro 25 y la Ilustración 64 y se explican a continuación:

- El superplastificante comercial es que el presenta la mayor conductividad, seguida del licor de *Agave americana* y de fique.
- La muestra del *Agave americana* seca con piel muestra una mayor conductividad que la muestra liofilizada sin piel, lo que indica la contribución de la piel al contenido total de iones de la muestra.
- Todas las muestras de los aditivos estudiados, tienen una conductividad mayor que el agua desionizada y que el agua potable.

Cuadro 25. Determinación de la conductividad

Muestra	Conductividad	pH
	$\mu\text{S/cm}$	
Agave Liofilizado sin piel	1201	5,2
Agave seco con piel	1807	4,8
Fique	1850	5,0
Sikament FF	2920	12,2
Agua desionizada	58,3	6,9
Agua potable de la red (España)	939	7,8

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

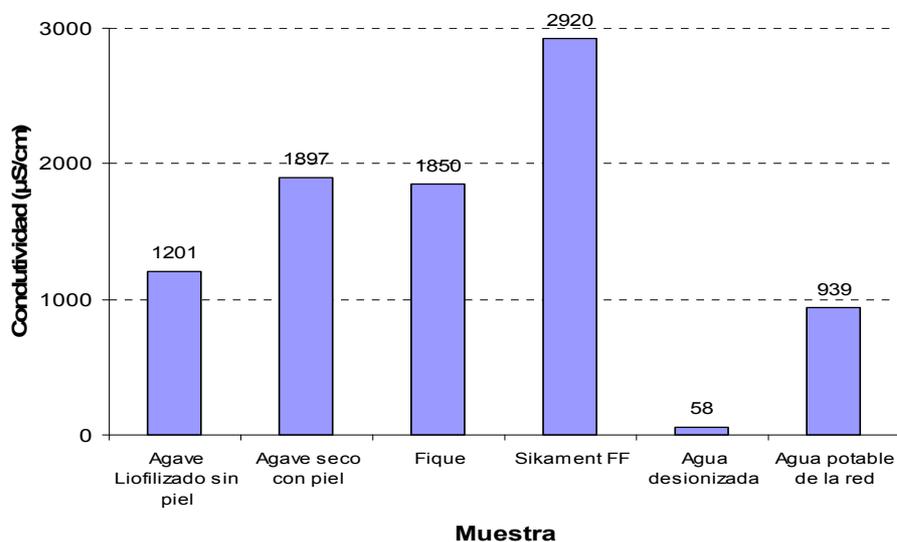


Ilustración 64. Gráfico de conductividad del licor de *Agave americana*, fique, Sikament FF y agua potable

4.1.7 Determinación del contenido de reductores (azúcares)

Este ensayo permite conocer la presencia de azúcares en los aditivos, que podrían influir sobre la velocidad de fraguado o de endurecimiento de una pasta, de un mortero o de un hormigón. Se basa en la reacción que tiene lugar entre una disolución neutra de sustancias reductoras con el líquido de Fehling, dando un precipitado de color rojo, de óxido de cobre. Ver Ilustración 65.

Los investigadores Cabrera y Nwaubani (⁵⁸), manifiestan que la selección y/o aceptación de fibras para el uso en compuestos de cemento tiene que estar inevitablemente basado en los valores límites de los compuestos orgánicos solubles en agua y que retardan la hidratación del cemento. Se conoce que el contenido de lignina es beneficioso para la adherencia mientras que la celulosa y más aún la hemicelulosa (la cual es bastante álcali-soluble), afecta fuertemente las resistencias. Las medidas de solubilidad no están claramente definidas en algunos casos, pero el principio general es que los compuestos solubles están directamente relacionados con el contenido de azúcar de la fibra y es por eso que debería ser limitado. Un ejemplo de valores límites, que proponen los autores, están dados en la cuadro 26.



Ilustración 65. Fotografía del precipitado producto de la disolución neutra de sustancia reductoras con el líquido de Fehling.

Cuadro 26. Valores de los porcentajes de glucosa y almidón que producen efectos retardantes de fraguado en el cemento Pórtland de acuerdo a Cabrera y Nwaubani⁽⁸²⁾

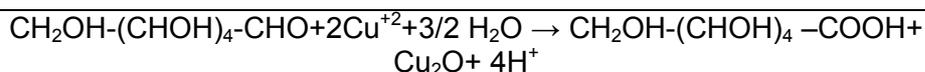
Compuesto	Porcentaje sobre el peso del cemento	Efecto
Glucosa	$\geq 0,25$	retarda la hidratación
Almidón	$\geq 0,125$	retarda la hidratación

Para realizar este ensayo se tomaron 10g, aproximadamente, de licor de *Agave americana*, extraídos de la sección 1/3 con piel de la hoja de una planta. Para la preparación de la muestra se filtró, previamente, el residuo insoluble en agua destilada, de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 3.2.1.3. La determinación del poder reductor se realizó de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 3.2.1.4.

El resultado obtenido para el licor de *Agave americana* fue de 0,087. Este valor no pudo ser contrastado con ningún otro, dada la escasa información bibliográfica que existe sobre el tema, ya que la Norma Europea tampoco define ningún parámetro ni requisito al respecto.

Adicionalmente se determinó el contenido de azúcar en la misma muestra, expresado como mg de glucosa por gramo de aditivo, a partir de la reacción:

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



El resultado obtenido fue de 110 mg de glucosa por gramo de aditivo. Esto significa, en nuestro caso, de acuerdo a los parámetros establecidos por Cabrera y Nwaubani (⁵⁸), que la cantidad máxima de aditivo de licor de *Agave americana* que se podría utilizar en una amasada de mortero de 450g de cemento, sin que hubiera un retraso en la hidratación, sería 1-125mg de glucosa. Esto, en peso de aditivo sería 10.227mg, y en porcentaje sobre el peso de cemento de una amasada del 2,27%.

4.1.8 Determinación del Peso Específico

El peso específico de los aditivos estudiados se obtuvo mediante el peso de 100 cm³ en una probeta previamente tarada. Del licor de la planta de *Agave americana* se tomaron tres muestras distintas.

De los resultados obtenidos, que se aprecian en el cuadro 27, tenemos un valor medio de 105,77g, de aditivo de licor de *Agave americana*, por cada 100 cm³; esto significa que el peso específico de este aditivo es de 1,06 g/cm³ aproximadamente. El licor de fique tiene un peso similar al del *Agave*, y del superplastificante comercial se obtuvo el mayor peso.

Comparativamente el valor obtenido para el aditivo comercial Sikament FF, es de 1,25 g/cm³, lo que ratifica el resultado encontrado en el ensayo del extracto seco convencional, de que el Sikament FF contiene una mayor cantidad de residuo sólido que el licor de las plantas en estudio.

Cuadro 27. Determinación del peso específico *Agave americana*

Muestra	Sección de la hoja	Estado	Peso de 100 cm ³	Peso específico (media)
			g	g/ cm ³
2 (1)	2/3	Cp	104,98	1,06
2(2)	1/3	Cp	107,23	
3(1)	2/3	Cp	105,11	
Fique			106,21	1,06
Micro-air 100			110,00	1,01
Sikament FF			125,00	1,25

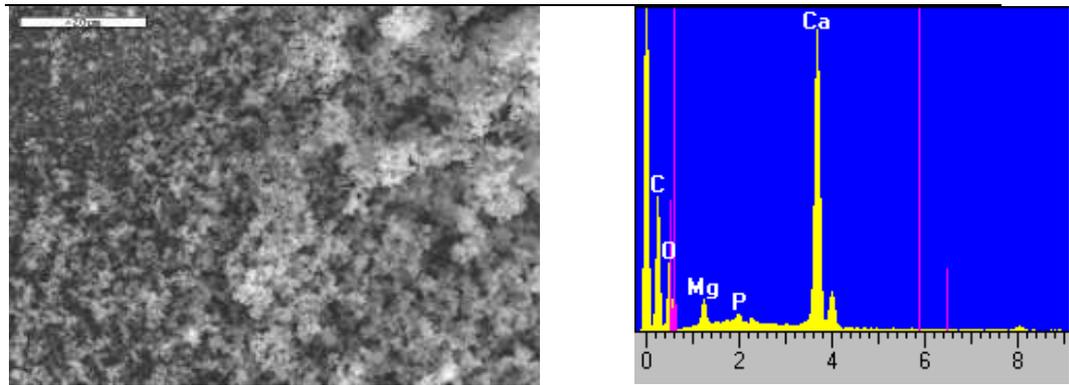
4.1.9 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

Para la caracterización del licor de Agave mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido, se analizaron muestras del licor: liofilizado con piel y sin piel, extracto seco con piel obtenido del ensayo correspondiente, y el residuo calcinado con piel y sin piel del resultado del ensayo de calcinación.

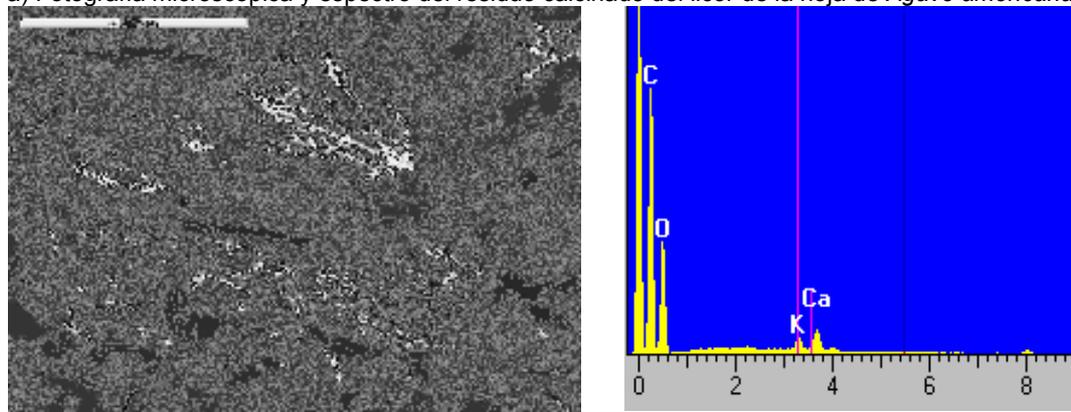
De las micrografías y espectros de correspondientes a las fotografías que aparecen en la Ilustración 66 se observó que:

- La micrografía a) es una fotografía general del residuo calcinado del *Agave americana*. Se observa material pulverulento de partículas muy pequeñas. La fluorescencia de rayos X (EDX) correspondiente a esa misma micrografía, muestra contenidos mayoritarios de calcio y pequeñas cantidades de magnesio y fósforo. Esto se atribuye a que en el residuo calcinado se ha perdido la materia orgánica presente en el licor y probablemente esté formado por CaO y MgO.
- En las micrografías b), c) y d) que corresponde al extracto seco o liofilizado del licor de la hoja de *Agave americana* con piel o sin piel, se observan fundamentalmente fibras cortas propias de la constitución de las hojas.
- En el EDX del extracto liofilizado del licor de la hoja de *Agave americana* con piel b), y del extracto seco también con piel d) se observan picos altos de carbono, debidos seguramente al recubrimiento, con una pequeñas cantidades de calcio y potasio relativas a la cantidad de carbono. En el EDX del extracto liofilizado sin piel c) no aparece el pico correspondiente al potasio, lo que nos hace pensar que es en la piel donde se encuentra, fundamentalmente, ese elemento.

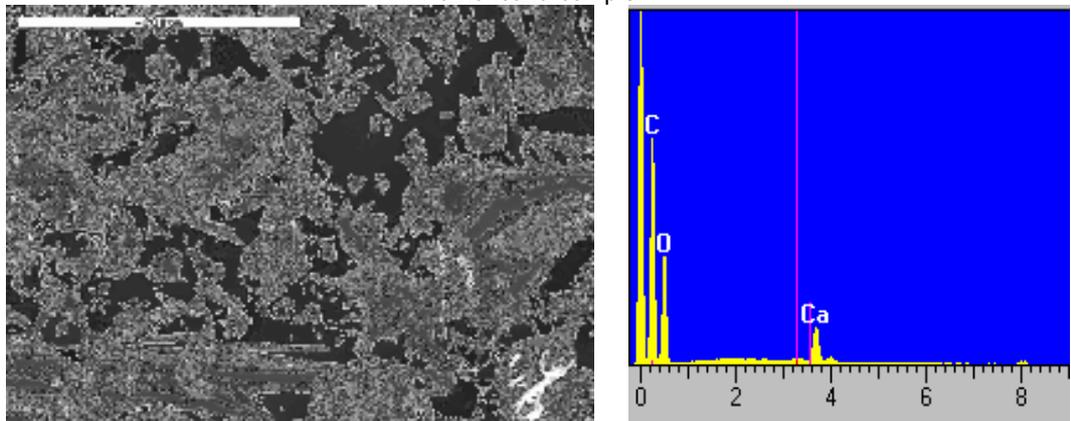
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



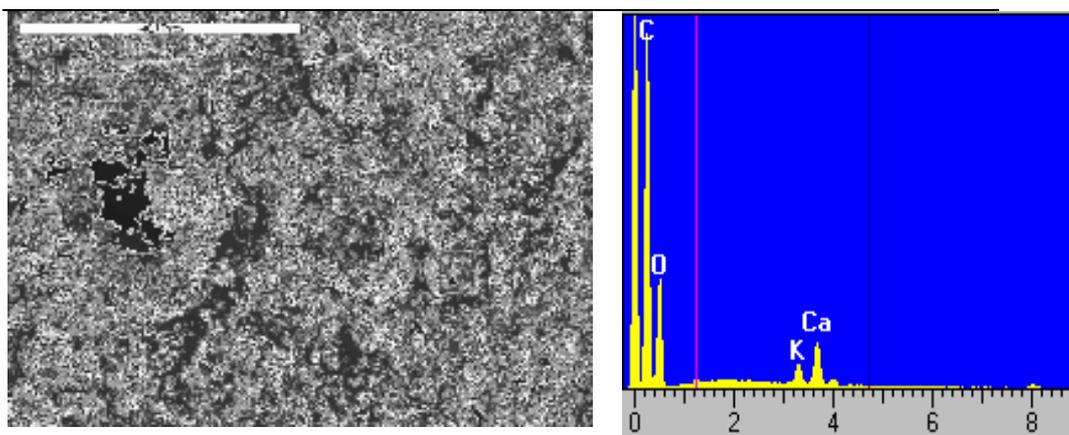
a) Fotografía microscópica y espectro del residuo calcinado del licor de la hoja de *Agave americana*



b) Fotografía microscópica y espectro del extracto liofilizado del licor de la hoja de *Agave americana* con piel



c) Fotografía microscópica y espectro del extracto seco del licor de la hoja de *Agave americana* sin piel



d) Fotografías microscópica y espectro del extracto seco del licor de la hoja de *Agave americana* con piel

Ilustración 66. Micrografías y espectros de fluorescencia para el extracto de *Agave americana*

Para la caracterización del licor de la *Furcareia cabuya*, fique cenizo, mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido, se analizó la muestra de extracto seco.

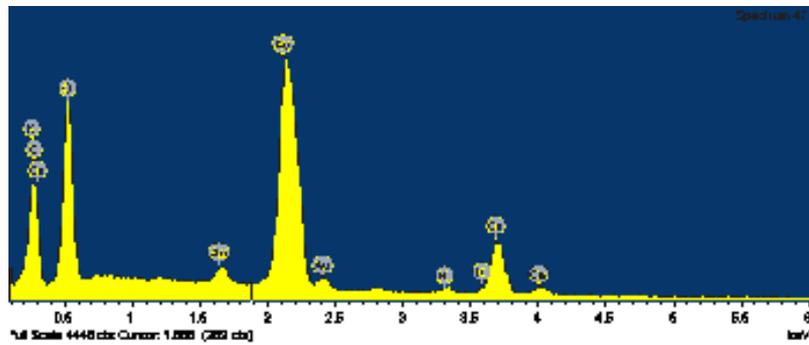
De las micrografías y espectros de correspondientes a las fotografías que aparecen en la Ilustración 67 se observó que:

- Las micrografías a) y c) correspondiente al extracto seco del licor del fique, se observan fundamentalmente fibras cortas con una textura similar a la del *Agave americana*. La fluorescencia de rayos X (EDX), b) y d), correspondiente a esas mismas micrografías, muestra contenidos mayoritarios de carbono, contenido en la materia orgánica, y pequeñas cantidades de calcio, potasio y algo de magnesio. Esta composición elemental es similar a la del *Agave americana*.

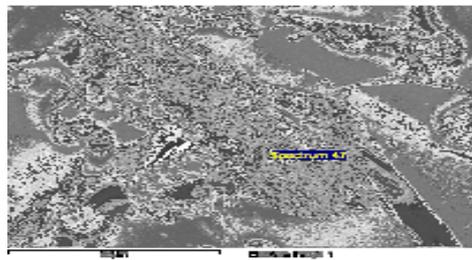


a)

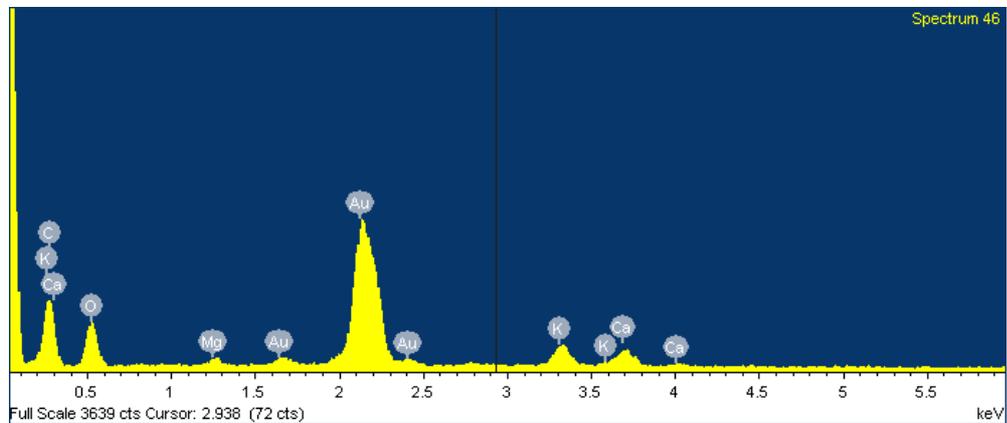
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



b)



c)



d)

Ilustración 67. Micrografías de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectros de fluorescencia para el extracto de *Furcraea cabuya* – fique cenizo

4.1.10 Análisis Infrarrojo.

La principal característica de la espectroscopía infrarroja es que permite identificar especies químicas a través de la determinación de la posición (número de onda) a la que distintos grupos funcionales presentan bandas de absorción en el espectro IR.

La mayor parte de las especies moleculares con pequeñas diferencias de energía entre los estados vibracionales y rotacionales son capaces de absorber radiación infrarroja. La interacción entre la radiación infrarroja y la molécula se produce cuando el vector de campo eléctrico de la radiación electromagnética oscila con la misma frecuencia que el momento dipolar de la molécula al vibrar. Por ello, para que una vibración sea activa en IR, debe producirse un cambio en el momento dipolar neto de la molécula.

En el caso de compuestos orgánicos, se pueden clasificar las vibraciones en dos clases: vibraciones de esqueleto, en las cuales participan todos los átomos de la molécula, y vibraciones características de grupos.

Las frecuencias de las vibraciones de esqueleto están en el intervalo 1400 – 700 cm^{-1} y depende de la estructura lineal o ramificada de la cadena hidrocarbonada del compuesto. Intervienen sobre todo los enlaces C-C en las vibraciones. No es posible asignar las bandas correspondientes a cada modo vibracional, pero el conjunto de las bandas de esta región es característico de cada estructura molecular y por tanto equivale a su “huella dactilar”.⁽⁵⁹⁾

Para las pruebas del análisis infrarrojo, se confeccionó una pastilla de bromuro de potasio (KBr) previamente pulverizado con el extracto seco convencional del licor de *Agave americana* con piel y con el extracto liofilizado con piel. La cantidad de extracto seco representa aproximadamente el 1% en masa de la mezcla. Se registró el espectro entre 4.000 y 500 cm^{-1}

En la Ilustración 68, se puede observar los espectros IR, que muestran:

- Una banda alrededor de 1000 cm^{-1} que pertenece a los polisacáridos;
- Una banda alrededor de 1600 cm^{-1} que pertenece a los grupos amida (proteínas);
- Una banda alrededor de 2920 cm^{-1} que pertenece a los grupos C-H;

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- y una banda a 3400 cm^{-1} que corresponde a los hidroxilos y amidas.
- Como patrón del espectro se utilizó el identificado por S. Chandra et al.⁽²⁴⁾, en el extracto del cactus Nopal originario de México.

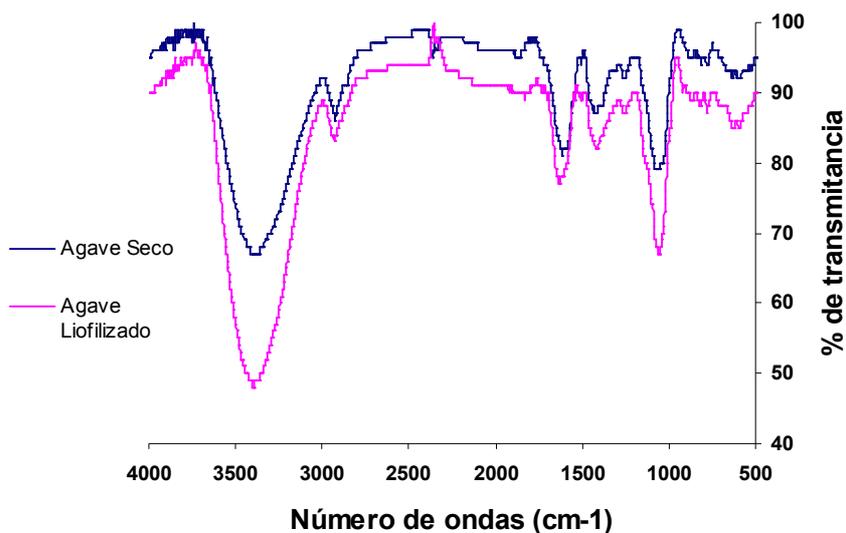


Ilustración 68. Espectro infrarrojo del extracto de licor de *Agave americana* seco y liofilizado

4.1.11 Conclusiones de la caracterización físico-química

- Respecto a su caracterización física, el licor de la planta de *Agave americana*, es un líquido de color verde poco denso; muestra un bajo contenido de sólidos. El mayor contenido de agua se encuentra en la base de la hoja, sección 3/3, aproximadamente un 93%, y el mayor contenido de residuo sólido en la punta, sección 1/3.
- El licor de la planta *Furcraea cabuya* (fique cenizo), tiene unas características similares a las del *Agave americana*, aunque se encontró una menor cantidad de residuo sólido y mayor cantidad de agua. En ambos casos los sólidos están representados fundamentalmente por materia orgánica y carbonatos.
- Respecto a su caracterización química, los extractos de las plantas estudiadas son de naturaleza ácida. Esto sugiere que tienen una

rápida fermentación y, por lo tanto, requieren de una buena conservación.

- El licor de la planta de *Agave americana* presenta muy bajo contenido de cloruros y una baja conductividad eléctrica.
- El alto contenido de azúcar del licor de *Agave americana* hace sospechar que puede actuar como retardante de la hidratación del cemento.

4.2 Pastas de cemento Pórtland gris

En este apartado se evaluó el efecto que tienen los aditivos, en algunas propiedades físicas y químicas de las pastas de cemento Pórtland gris. Se estudió la influencia del aditivo en la consistencia normal de la pasta, la viscosidad, el tiempo inicial y final de fraguado y la hidratación de la pasta mediante análisis termogravimétrico, con distintas relaciones a/c y distintos porcentajes de aditivo. Se usaron extractos de hojas sin piel y con piel.

Para evaluar el agua de consistencia normal de la pasta se utilizó como técnica la Aguja de Vicat y los procedimientos correspondientes a las normas UNE que aparecen descritos en la sección 3.2.2.1. La viscosidad se midió con un viscosímetro de cilindro cuyas características y procedimiento se describen en la sección 3.2.2.2. Para estudiar el efecto de los aditivos sobre las reacciones de hidratación de la pasta se utilizó la termogravimetría en pastas, con y sin aditivo, a distintos tiempos de curado.

4.2.1 Influencia del aditivo en la consistencia de la pasta

4.2.1.1 Estudio de consistencia por Aguja de Vicat

La consistencia normal de una pasta es la resistencia que opone a la penetración de una sonda normalizada. El agua requerida para la confección de la pasta se determina por medio de sucesivos ensayos de penetración con diferentes contenidos de agua. El procedimiento para la determinación del agua de consistencia normal se explica en la sección 3.2.2.1 del capítulo experimental.

En el Cuadro 28 se observan las cantidades de agua y aditivo determinadas para una penetración de la aguja de 6 ± 1 mm. Para efectos de cálculo de la relación a/c se corrigió el agua de amasado en 4,8 gramos para las muestras con licor de *Agave americana* y licor de fique y en 3g

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

para el aditivo comercial, correspondientes al 92% del promedio ponderado de agua contenida en el licor de *Agave americana* y de fique y 60% del superplastificante obtenido mediante el ensayo de extracto seco convencional. (Ver sección 3.2.1.1).

En la Ilustración 69 se observa que para conseguir la consistencia normal en la pasta de cemento control se obtuvo una relación a/c 0,32. Para esa misma consistencia, utilizando licor de *Agave americana* con piel se obtuvo una relación a/c 0,296 y sin piel 0,308; con licor de fique se obtuvo una relación a/c 0,286 y en la pasta con aditivo comercial se obtuvo una relación a/c 0,262.

Cuadro 28. Dosificación de las pastas para el ensayo de consistencia normal en las pastas de cemento Pórtland y licor de *Agave americana*. Penetración de la aguja de Vicat

Muestra	Sección	Cemento	Aditivo	Agua de amasado	Agua del aditivo	Agua total	Relación a/c	Distancia de la base a la punta de la sonda
		g	g	g	g	g		mm
Control		500	0	160,0	0	160,0	0,320	5,0
Licor de Agave con piel	1/3 - cp	500	5,0	143,3	4,80	148,1	0,296	7,0
Licor de Agave sin piel	3/3 - sp	500	5,0	145,6	4,80	150,4	0,308	7,0
Licor de Fique		500	5,0	138,2	4,80	143,0	0,286	7,0
Sikament FF		500	5,0	128,0	3,00	131,0	0,262	5,0

- El agua del licor orgánico es el 92% de la masa total y el del aditivo comercial es el 60% de su masa.

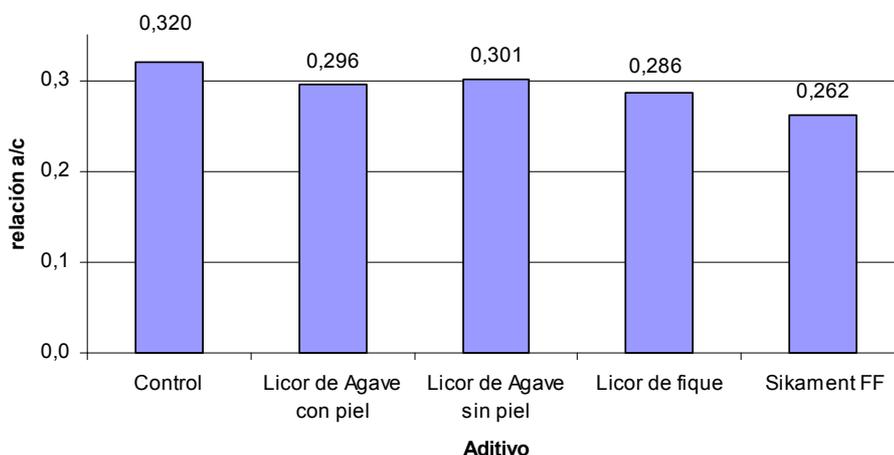


Ilustración 69. Consistencia normal en pastas de cemento Pórtland y aditivo de licor de *Agave americana*, fique y superplastificante

Con el uso de cualquiera de los aditivos se obtuvo una disminución en el agua de consistencia normal. La menor cantidad de agua se obtuvo con el superplastificante comercial. Con el licor de fique se obtuvo un valor intermedio entre el licor de *Agave americana* y el superplastificante, lo que indica que el licor de fique contiene sustancias activas que producen mayor plasticidad que el licor del *Agave*. Aunque no es importante la diferencia en la relación a/c entre el licor de *Agave americana* con piel y sin piel, sí se advierte una menor cantidad de agua cuando se utiliza el primero lo que da indicios sobre la existencia de compuestos activos plastificantes en esa parte de la hoja

4.2.1.2 Estudio de viscosidad en pastas

La trabajabilidad es el término que se utiliza para indicar cómo un hormigón puede ser mezclado, transportado, puesto en obra y compactado para obtener un material uniforme. Dicha trabajabilidad no depende sólo de propiedades de tipo físico de la pasta del cemento, pero el estudio de aquella requiere el entendimiento de estas propiedades. Una de las más importantes es la reología de la pasta de cemento, desde su mezclado hasta antes del fraguado ⁽⁶⁰⁾.

La reología es la disciplina que estudia la deformación y flujo de materiales. La resistencia que un fluido opone al flujo puede ser modelada

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

como la situación existente entre dos planos paralelos, donde uno de ellos se mueve en la dirección de su propio plano y el otro está fijo. Se considera que el flujo es unidimensional y que la velocidad es directamente proporcional a la distancia perpendicular entre los planos. Así, los líquidos de estructura simple y estable obedecen la ley de Newton:

$$\tau = \eta \cdot \gamma;$$

Donde τ es el esfuerzo cortante o de cizalla (Pa), η es la viscosidad (Pa·s) y, γ es la velocidad de corte (s^{-1}), por lo que la resistencia a fluir, a una temperatura y presión dada, está definida por una constante de proporcionalidad, que es la viscosidad.

Otras sustancias como geles (pasta de cemento), pinturas, polímeros fundidos o disoluciones poliméricas, fluidos orgánicos como la sangre y otros materiales conocidos hoy bajo la denominación de fluidos no-newtonianos presentan propiedades tanto elásticas (relacionadas con los sólidos) como viscosas. Muchas de estas sustancias pueden ser modeladas con la ecuación de Bingham:

$$\tau = \tau_0 + (\mu \cdot \gamma)$$

donde τ_0 es el esfuerzo inicial (que hay que superar para que exista flujo) y μ es la viscosidad plástica. Existen muchas variaciones más complejas de este modelo, siendo la principal modificación la que toma en cuenta la no linealidad entre τ y γ . En estas expresiones, la relación para un fluido no newtoniano entre τ y γ es llamada viscosidad aparente, la cual varía con γ ; además si existe histéresis (propiedad de un material de tomar valores distintos de respuesta a partir del valor de estímulo en el que se invierte el sentido del mismo, por ejemplo, que al registrar la viscosidad aparente, al variar la velocidad de corte, los valores sean diferentes al incrementarse con respecto a los valores obtenidos cuando se reduce dicha velocidad, también dependerá de la historia previa de la muestra analizada.

Se han realizado varios estudios de pastas de cemento fresco utilizando viscosímetros rotacionales para obtener las curvas de flujo, en las que la velocidad de corte (γ) se grafica en función del esfuerzo cortante (τ).

Desafortunadamente, existe mucha discrepancia en cuanto a la metodología y condiciones de los experimentos, provocando que en la mayoría de las ocasiones, los datos existentes en la literatura no sean

comparables entre ellos. Sin embargo, dentro de cada investigación, sí son bastante útiles para determinar la influencia de varias variables en unas condiciones dadas.

El objetivo de esta sección es determinar la influencia de licor de *Agave americana* en el comportamiento viscoso de la pasta de cemento en estado fresco, utilizando para ello un viscosímetro rotacional con geometría de cilindros coaxiales, descrito en la sección 3.2.2.2 de la parte experimental.

Existen en la literatura, ensayos de viscosidad desde dos puntos de vista: uno en los que la velocidad de cizalla se mantiene constante y se registra el esfuerzo de corte y/o la viscosidad aparente en función del tiempo (^{61 62}), mientras que otros autores realizan un ensayo variando la γ en un cierto intervalo (^{63 64}).

Cuando el hormigón se pone en obra existe cierto flujo, pero dos granos de arena que están cercanos entre si, al principio de la operación, probablemente seguirán estando cerca al final, esto significa que la pasta de cemento que está entre los granos de arena está sujeta a velocidades de corte muy pequeñas durante la puesta en obra. Para simular las condiciones de cizallamiento de la pasta de cemento durante la puesta en obra del hormigón, las mediciones reológicas de viscosidad deben ser llevadas a velocidades muy bajas y durante muy poco tiempo (⁶⁵). Esta es una de las principales tesis que defienden los autores que se inclinan por un ensayo con γ constante.

Las conclusiones que se pueden obtener de este tipo de ensayos son: duración del periodo de inducción, tiempo inicial de fraguado, comportamientos tixotrópicos (descenso de la viscosidad con el tiempo a velocidad de cizalla constante) o reopexia (incremento de la viscosidad con el tiempo a velocidad de cizalla constante), características de flujo dependientes de la "historia de cizallamiento" del material, entre otras.

Por otro lado, al variar la velocidad de cizalla con el tiempo, es posible determinar adecuadamente su relación con el esfuerzo de corte bajo condiciones específicas, obteniendo así curvas de flujo que caracterizan adecuadamente las pastas de cemento como fluidos no newtonianos, puesto que su viscosidad depende tanto de la velocidad de corte como de la duración del esfuerzo a que está sometida (⁶⁶). Otros comportamientos que pueden ser estudiados con este tipo de ensayos son: comportamiento pseudoplástico (shear thinning), en el que la viscosidad disminuye al aumentar la velocidad de corte; comportamiento dilatante (shear

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

thickening), en el que la viscosidad crece al aumentar la velocidad de cizalla, histéresis, etc.

El propósito, para esta investigación, es precisar el comportamiento viscoso de la pasta de cemento, cuando son adicionadas diferentes cantidades de aditivo de licor de *Agave americana*, estudiando variables como la relación a/c y, el porcentaje de aditivo. Ante esta premisa, se decide trabajar a una velocidad de corte variable γ , para obtener la curva de flujo, la cual pudiéramos modelar matemáticamente para poder predecir comportamientos.

Para llevar a cabo un ensayo de viscosidad se tienen que definir varias condiciones, a saber:

- velocidad de cizalla (γ , constante o variable);
- mezclado (método y tiempos);
- pre-acondicionamiento (aplicarlo o no): velocidad de cizalla (γ , constante o variable), tiempo, con espera o no después del preacondicionamiento.
- Si se realiza un ensayo con variación de γ , especificar: rango de variación (rampas de variación ascendentes, descendentes o ambas), número de datos a tomar, tiempo de integración para cada punto (número de veces que se toman datos en un mismo punto para obtener un promedio), tiempos de espera (tiempo antes de iniciar el registro de datos de cada nuevo punto).

La velocidad de corte durante el mezclado es una de las variables más importantes que afecta las propiedades reológicas de las pastas de cemento en estado fresco. El incremento, en la velocidad de corte en el mezclado, reduce la viscosidad aparente de las pastas de cemento y disminuye el área de histéresis. Williams et al (⁶³), realizaron un estudio variando la velocidad de corte de mezclado así como el equipo utilizado para ello, concluyendo que altas velocidades (entre 1500-2500 rpm) mejoraban las propiedades de flujo, en el sentido de que dichas pastas contenían menor cantidad de partículas aglomeradas. Dado que existe en la literatura una gran diversidad de métodos para el mezclado de las pastas a ensayar en viscosimetría, se decidió elegir uno de ellos y mantenerlo fijo en todas nuestras experiencias. El método utilizado fue el propuesto por Miranda et al (⁶¹) el cual consiste en: mezclar el agua con la mitad del cemento durante dos minutos, añadir el resto de cemento y mezclar durante 4 minutos más (hasta $t = 6$ min.), dejar minuto y medio en reposo (hasta $t = 7,5$ min.), mezclar durante 2,5 minutos más (tiempo total

de 10 minutos). Si se utiliza aditivo este se añade con el agua al inicio del mezclado.

Para llevar a cabo el mezclado se utilizó un mezclador de laboratorio Heidolph (Type RZR1) con una hélice con doble pala helicoidal, a una velocidad de 280 rpm. Esta velocidad junto con la geometría del agitador y el tiempo de mezclado nos permitió obtener una pasta homogénea. La pasta se mezclaba directamente en un vaso de precipitados, el cual se adaptaba al viscosímetro para la medición, por lo que no era necesario hacer ninguna manipulación adicional posterior al mezclado.

Ya que al retirar la pasta de la mezcladora, para sumergirla en el cilindro rotatorio del viscosímetro, se pueden producir zonas heterogéneas, se decidió aplicar un pre-acondicionamiento de la pasta para asegurarnos de tener las mismas condiciones de homogeneidad en todas nuestras experiencias. Dicho pre-acondicionamiento consistió en someter a la pasta a una velocidad de cizalla constante durante 60 segundos a un valor igual al de la velocidad máxima del ciclo del ensayo (100 s^{-1}). Al finalizar este tiempo, se dejaba la pasta en reposo durante otros 60 segundos, pues el ciclo elegido fue una rampa ascendente-descendente, por lo que necesitábamos iniciar a bajas velocidades y debíamos dar tiempo a que la estructura interna se estabilizara. Cabe señalar que para dar tiempo a la manipulación de la muestra en el viscosímetro, se iniciaron todas las mediciones exactamente 5 minutos después de terminado el mezclado.

Ya que se decidió hacer los ensayos variando γ , había que definir el rango de variación. El límite inferior lo imponía el viscosímetro (2 s^{-1}), por lo que sólo habría que discutir la velocidad máxima. En la literatura se reportaban valores máximos tan bajos como 50 s^{-1} ⁽⁶⁷⁾ y tan altos como 1800 s^{-1} ⁽⁶⁸⁾. Velázquez ⁽⁶⁹⁾, realizó varios ensayos de prueba, variando la velocidad de cizalla máxima, desde 50 s^{-1} hasta 200 s^{-1} , observando que a medida que aumentaba el valor máximo empezaba a tener dos problemas: uno de ellos era el no tener el llamado *infinite sea*, condición necesaria cuando se utiliza la geometría de cilindros coaxiales, que implica que la viscosidad aparente (o esfuerzo de cizalla) que se mide, sea la del material entre los cilindros y no esté influenciada por el cilindro estático externo.

El segundo problema que se observaba, al aumentar la velocidad de cizalla máxima, era el deslizamiento (*sliding*) en la superficie del cilindro interno. Además observó que las experiencias eran más reproducibles, conforme era menor la velocidad máxima. Por todo ello y en orden de tratar de no perturbar la estructura interna de la pasta de cemento, se decidió utilizar una velocidad de cizalla máxima de 100 s^{-1} , de manera que

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

el rango resultante no presentaba los problemas descritos, además de permitir la repetibilidad de las experiencias.

Con respecto a los ciclos, ya que al incrementar la velocidad de cizalla la estructura interna de la pasta se destruye, en todas las experiencias se observó histéresis, ya que la viscosidad aparente (o el esfuerzo cortante) nunca era la misma en la rama descendente (Ilustración 70). Con base en esto se decidió hacer el ciclo completo (ascendente-descendente), pero el modelado matemático se realizó con la rama descendente, para partir de una pasta con la estructura destruida y permitir su “estabilización”.

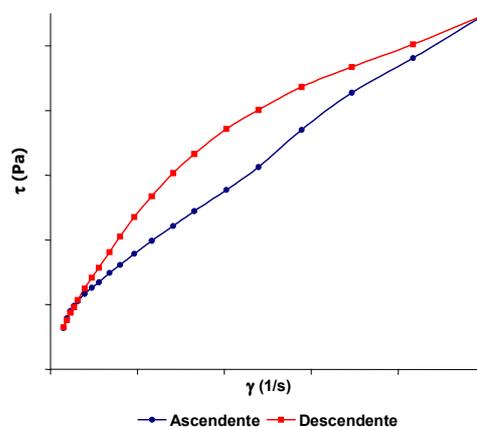


Ilustración 70. Gráfico de la curva de flujo típica obtenida en la que se observa la histéresis al realizar el ensayo con el ciclo completo, ascendente y descendente⁶⁹

Se tomaron 20 datos, espaciados logarítmicamente, para dar mayor peso a las bajas velocidades de corte, ya que es la zona donde tenemos mayores cambios de viscosidad por unidad de cambio de $\dot{\gamma}$, dando un tiempo de integración de 15 segundos (tiempo en el cual el equipo adquiere datos a una cierta $\dot{\gamma}$ y obtiene un promedio) y con un tiempo de espera de 5 segundos (tiempo en el cual el equipo varía la $\dot{\gamma}$ y no toma datos). Así, el tiempo total del ensayo fue de 15 minutos más los 10 minutos de mezclado, más los 5 minutos de reposo antes de la medición, para todas las experiencias realizadas.

Según los explican Edmeades y Hewlett (¹⁹), los aditivos aireantes comprenden un grupo de surfactantes los cuales actúan en la interfase aire-agua de la pasta de cemento, y es por esa razón que el aire atrapado durante el proceso de amasado se estabiliza en forma de pequeñas

burbujas. Estos surfactantes se caracterizan por poseer una cadena hidrocarbonada que termina en un grupo polar, típicamente un grupo ácido carboxílico o sulfónico. El grupo polar ionizado se orienta dentro de la fase acuosa, mientras que la cadena hidrocarbón se orienta hacia la burbuja. (ver Ilustración 71). La tensión superficial del agua se reduce, facilitando la formación de burbujas cuando un hormigón o mortero es agitado, y la capa de surfactante que rodea cada burbuja permite la repulsión mutua, y de esa manera se previene su coalescencia.

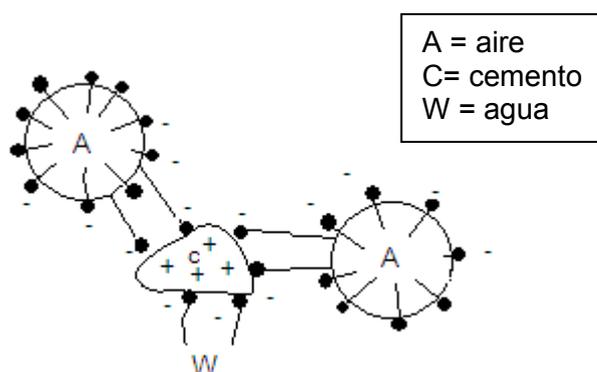


Ilustración 71. Interacciones entre cemento – aire, agua y moléculas del aditivo aireante¹⁹.

En los hormigones y morteros esta superficie cargada produce burbujas estables que se adhieren a las partículas de cemento y áridos, cargadas contrariamente. El efecto total es un sistema árido-aire-cemento-aire-árido tipo puente, que incrementa la cohesión de la mezcla y mejora la estabilidad del sistema de aire ocluido. Es evidente que tal sistema permitiría el movimiento relativamente libre del esfuerzo cortante con las burbujas de aire estabilizadas que actúan como los cojinetes compresibles. De esta manera tanto la cohesión de la mezcla como la trabajabilidad se incrementan.

4.2.1.2.1 Influencia de la relación a/c en pastas con el mismo porcentaje de aditivo

Los primeros ensayos realizados estaban enfocados a estudiar la influencia de la relación agua/cemento en el comportamiento viscoso de la pasta de cemento. En los cuadros: Cuadro 29, Cuadro 30, y Cuadro 31, se muestran las condiciones establecidas para las pastas ensayadas. Cabe señalar que ya que la viscosidad depende de la temperatura, todos los ensayos fueron realizados a la temperatura del laboratorio de 25 ± 1 °C.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Ilustración 72 se muestran las gráficas para los resultados obtenidos. Para evitar confusiones al tener demasiadas líneas, se graficaron por separado las pastas control (a) y las de adición del 5% del licor de *Agave americana* (b). Los marcadores indican los datos experimentales de la rampa descendente, mientras que las líneas corresponden al ajuste matemático realizado sobre ellos, que tal como se mencionó en la sección anterior, se realizó sólo en la rampa descendente (que son los datos experimentales mostrados).

Para ambos tipos de pasta, se observa claramente como al aumentar la relación a/c el esfuerzo de cizalla es menor (para una velocidad de cizalla dada). Atzeni et. al. ⁽⁶²⁾ obtuvieron aceptables correlaciones entre la trabajabilidad (mesa de sacudidas) y un parámetro, X_{η} , que está en función de varias variables tales como la viscosidad aparente, y la relación a/c, la relación agua/agregado, entre otras.

Cuadro 29 Condiciones establecidas para las pastas de cemento gris I-52,5R ensayadas por viscosimetría. Relación a/c 0,32

Relación a/c 0,32						
Muestra	Cemento (g)	Agua de amasado (g)	Aditivo		Agua del aditivo (g)	Agua total (g)
			%	g		
Control	125	40,00	0,00	0,00	0,00	40,00
5%	125	34,25	5,00	6,25	5,75	40,00

Cuadro 30 Condiciones establecidas para las pastas de cemento gris I-52,5R ensayadas por viscosimetría. Relación a/c 0,40

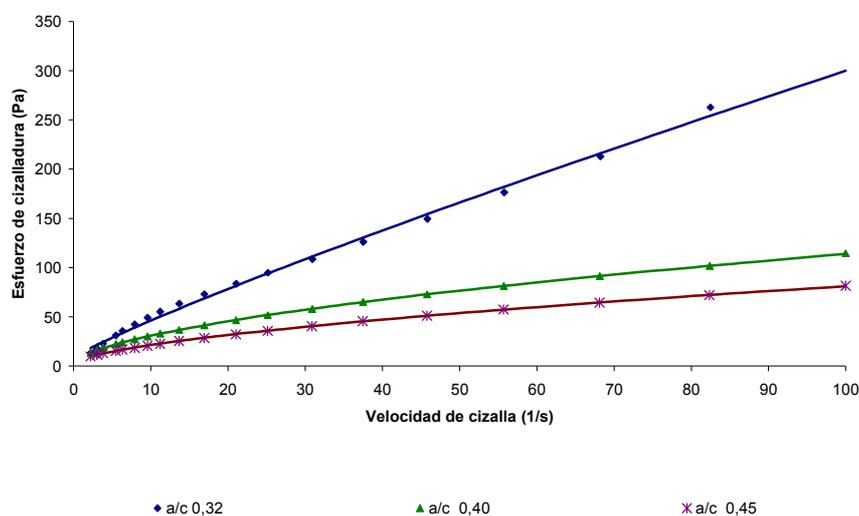
Relación a/c 0,40						
Muestra	Cemento (g)	Agua de amasado (g)	Aditivo		Agua del aditivo (g)	Agua total (g)
			%	g		
Control	125	50,00	0,00	0,00	0,00	50,00
5%	125	44,25	5,00	6,25	5,75	50,00

Cuadro 31 Condiciones establecidas para las pastas de cemento gris I-52,5R ensayadas por viscosimetría. Relación a/c 0,45

Relación a/c 0,45						
Muestra	Cemento (g)	Agua de amasado (g)	Aditivo		Agua del aditivo (g)	Agua total (g)
			%	g		
Control	125	56,25	0,00	0,00	0,00	56,25
5%	125	50,50	5,00	6,25	5,75	56,25

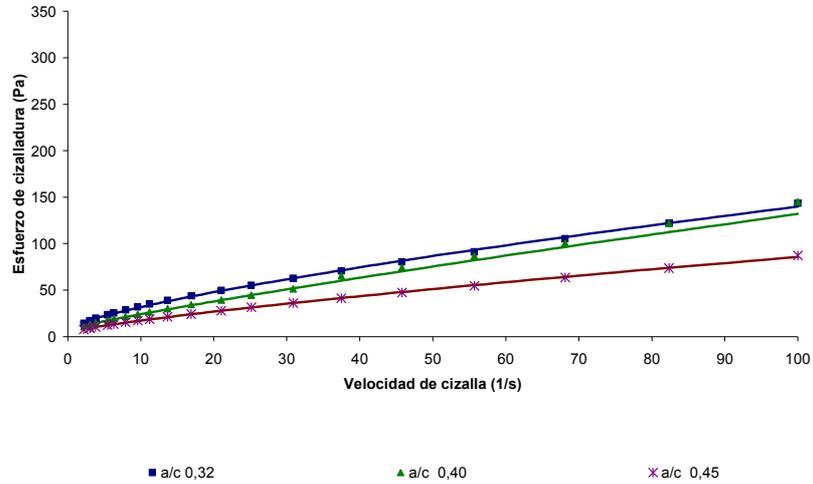
Se observa que la disminución del esfuerzo no es lineal. En las muestras control, el esfuerzo a cizalla, para bajas relaciones a/c es mucho mayor que para altas. Cuando adicionamos un 5% de aditivo sigue siendo no lineal pero el esfuerzo al corte de la relación a/c más baja (0,32) es bastante cercano a la siguiente (0,40).

Al comparar las pastas control y adicionada con el licor de *Agave americana* con la misma relación a/c, observamos que el aditivo disminuye el esfuerzo de cizalla, a una velocidad de corte dada, en relaciones a/c bajas, como es el caso de 0,32 (Ilustración 73 a). Cuando las relaciones a/c son 0,40 y 0,45 el efecto es prácticamente igual a la muestra control. (Ilustración 73 b y c)



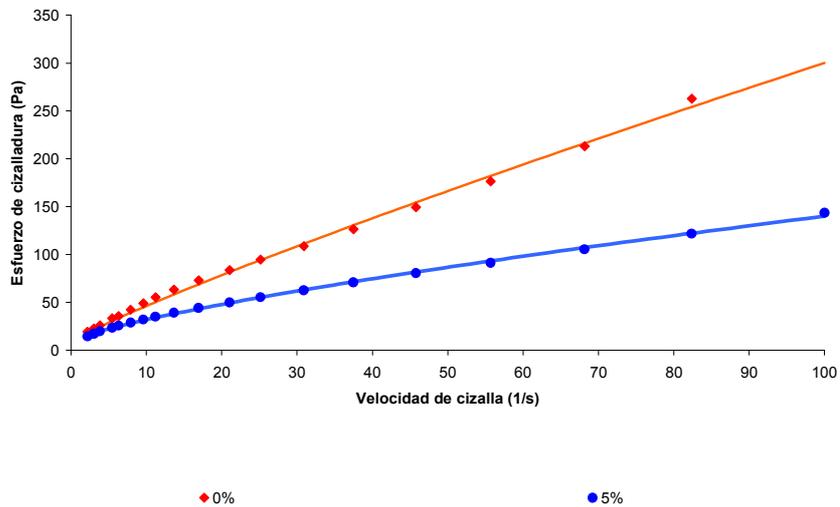
a) Control (0%)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

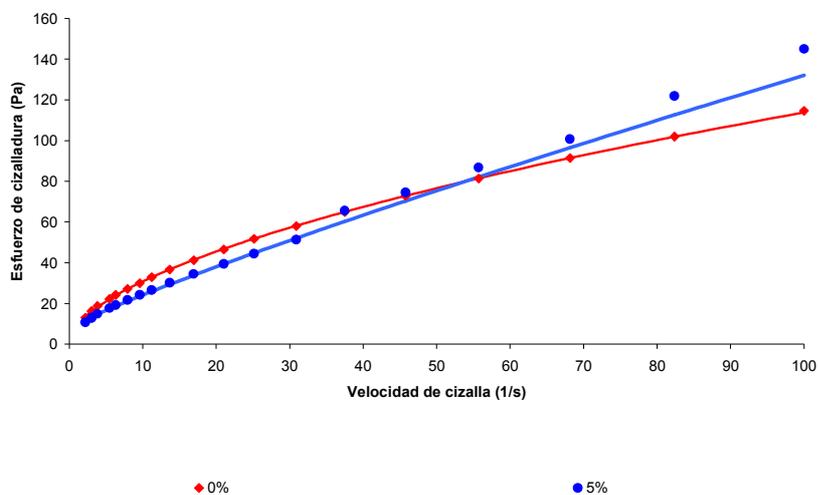


b) 5% *Agave americana*

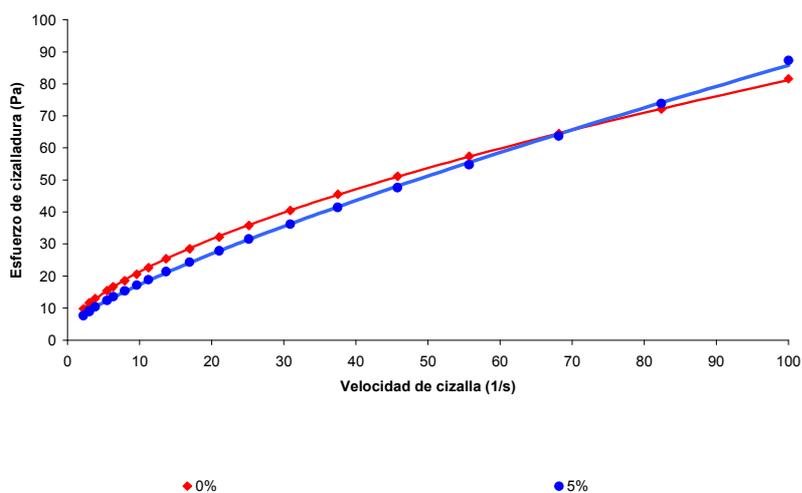
Ilustración 72. Evolución del esfuerzo de cizalla con la velocidad de corte para pastas de cemento gris a) influencia de la relación a/c en las muestras control b) influencia de la relación a/c con un 5% de aditivo. Marcadores-datos experimentales, líneas-ajuste con al ecuación de Herschel Bulkley



a)



b)



c)

Ilustración 73. Evolución del esfuerzo de cizalla con la velocidad de corte para pastas de cemento gris a) influencia del porcentaje de aditivo en la relación 0,32 b) influencia del porcentaje de aditivo en la relación a/c 0,40 c) influencia del porcentaje de aditivo en la relación 0,45. Marcadores-datos experimentales, líneas-ajuste con al ecuación de Herschel Bulkley

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las correlaciones mostradas en la Ilustración 72 corresponden al modelo de Herschel Bulkley, el cual tiene la forma:

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n$$

de k es el índice de consistencia y n es el índice de flujo. Notar que si τ_0 es nulo y $n=1$ se tiene el modelo de fluido newtoniano; si $\tau_0=0$ y n es diferente de cero se tiene el llamado modelo de la ley de la potencia; y finalmente si τ_0 es no nulo y $n=1$ se tiene la ecuación de Bingham. Se puede apreciar que el modelo ajusta de forma excelente a los datos experimentales.

En el Cuadro 32 están tabulados los valores de los parámetros de ajuste, así como el factor de correlación, los cuales arrojan valores muy cercanos a la unidad. El valor del índice de flujo n indica si se tiene un comportamiento pseudoplástico ($n < 1$, shear thinning, viscosidad disminuye al aumentar la velocidad de corte) o comportamiento dilatante ($n > 1$, shear thickening, en la que la viscosidad aumenta al aumentar la velocidad de cizalla). Podemos apreciar que para estos ensayos siempre tenemos un comportamiento pseudoplástico.

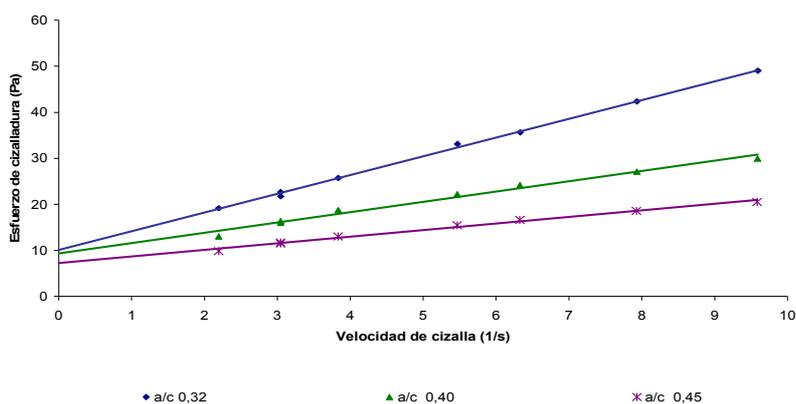
Cuadro 32 Parámetros de ajuste de la ecuación Herschel Bulkley para pastas de cemento gris I-52,5R adicionadas con 5% de licor de *Agave americana*. Influencia de la relación a/c

Aditivo en pasta	a/c	τ_0 (Pa)	k	n	R
Control	0,32	8,357	4,894	0,8877	0,998
	0,40	1,294	7,748	0,5812	1,000
	0,45	2,233	4,628	0,6159	1,000
5,00 %	0,32	8,465	4,140	0,7511	0,999
	0,40	7,557	2,211	0,8751	0,998
	0,45	3,709	3,558	0,6935	0,998

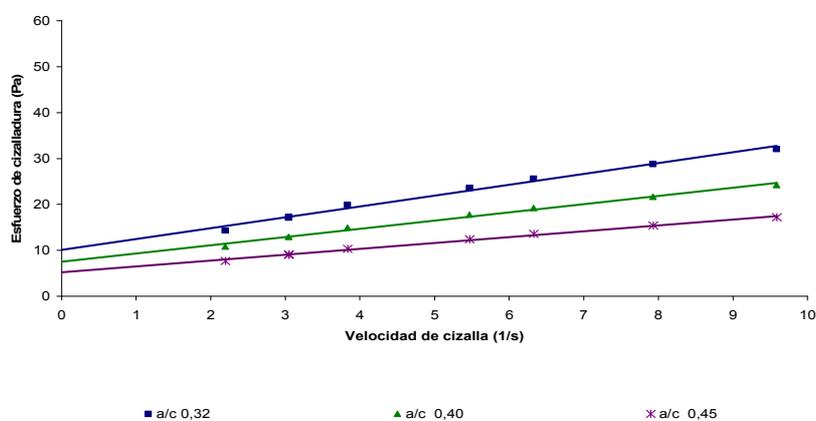
Una forma de ajustar mejor el esfuerzo inicial, es tomar en cuenta principalmente los datos a más bajas velocidades de cizalla, en una zona donde se pueda ajustar a una línea recta. En la Ilustración 74 se han graficado nuevamente los datos de la Ilustración 72, tomando en cuenta solamente los datos inferiores a 10 s^{-1} de velocidad de corte, mientras que en el Cuadro 33 están tabuladas las pendientes y ordenadas al origen (τ_0), así como los factores de correlación de los ajustes lineales. Se aprecia que todos los ajustes arrojan factores del orden de $R > 0,99$. Observando los

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

valores tabulados de τ_0 del control vemos que se cumple la tendencia esperada; los valores marcan una tendencia definida tanto para la pasta control como para la pasta con aditivo.



a) Control (0%)



b) 5%

Ilustración 74. Variación del esfuerzo con la velocidad de cizalla para las pastas de cemento gris I-52,5R. Influencia de la relación a/c. Ajustes lineales; marcadores-datos experimentales, líneas-ajustes

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuadro 33 Parámetros de los ajustes lineales de las curva de flujo para las pastas de cemento gris I-52,5R. Influencia de la relación a/c.

Aditivo en pasta	a/c	Pendiente (Pa s)	τ_0 (Pa)	R
Control	0,32	4,071	10,093	0,9985
	0,40	2,234	9,386	0,9848
	0,45	1,429	7,266	0,9918
5,00 %	0,32	2,366	10,083	0,990
	0,40	1,789	7,549	0,992
	0,45	1,281	5,219	0,995

4.2.1.2.2 Influencia del porcentaje de aditivo en pastas con la misma relación a/c.

Posteriormente se realizaron ensayos buscando estudiar la influencia del porcentaje de aditivo en el comportamiento viscoso de la pasta de cemento. Inicialmente se verá el efecto del aditivo en una pasta de relación a/c 0,40 y porcentajes de aditivo de 1,5% y 5%. En el Cuadro 34, se muestran las condiciones establecidas para las pastas ensayadas.

Cuadro 34 Condiciones establecidas para las pastas de cemento gris I-52,5R ensayadas por viscosimetría. Distintos porcentajes de aditivo y relación a/c constante 0,4

Relación a/c 0,40						
Muestra	Cemento (g)	Agua de amasado (g)	Aditivo		Agua del aditivo (g)	Agua total (g)
			%	g		
0% Control	125	50,00	0,00	0,00	0,00	50,00
1,5	125	48,28	1,50	1,88	1,73	50,00
5,0	125	44,25	5,00	6,25	5,75	50,00

En la Ilustración 75 se muestra las gráficas para los resultados obtenidos. Los marcadores indican los datos experimentales de la rampa descendente, mientras que las líneas corresponden al ajuste matemático realizado sobre ellos, que tal como se mencionó en la sección anterior, se

realizó sólo en la rampa descendente (que son los datos experimentales mostrados).

Al comparar la pasta control (0%) con las pastas con aditivo se observa un comportamiento prácticamente similar con un 1,5% y un esfuerzo levemente menor pero con una pequeña tendencia a aumentar, en la velocidades más altas, con un 5% de aditivo. Este comportamiento podría explicarse por un incremento en la cohesión de las partículas debido a la atracción entre la carga de la superficie de la burbuja y la carga contraria de la partícula de cemento (⁷⁰). Parece que en esta relación a/c el aditivo se comporta más como un aireante que como plastificante.

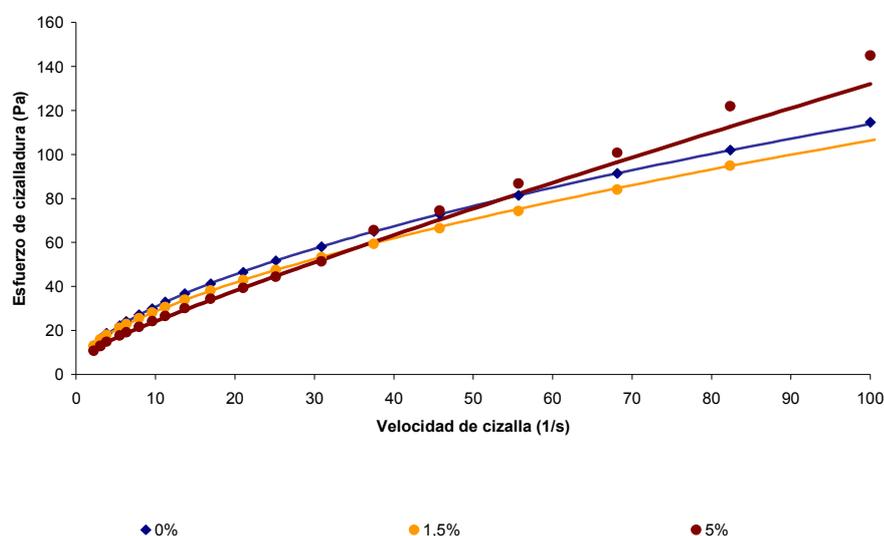


Ilustración 75. Evolución del esfuerzo de cizalla con la velocidad de corte para pastas de cemento gris. Influencia del porcentaje de aditivo con una relación a/c de 0,40. Marcadores-datos experimentales, líneas-ajuste con al ecuación de Herschel Bulkley

También se evaluó el comportamiento de las pastas con los mismos porcentajes de aditivo, 1,5% y 5,0% pero con una relación a/c 0,5. En el Cuadro 35, se muestran las condiciones establecidas para las pastas ensayadas. Igualmente, todos los ensayos fueron realizados a la temperatura del laboratorio que fue de 25 ± 1 °C.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuadro 35. Condiciones establecidas para las pastas de cemento gris I-52,5R ensayadas por viscosimetría. Distintos porcentajes de aditivo y relación a/c 0,5

Relación a/c 0,50						
Muestra	Cemento (g)	Agua de amasado (g)	Aditivo		Agua del aditivo (g)	Agua total (g)
			%	g		
Control	125	62,50	0,00	0,00	0,00	62,50
1,5	125	60,78	1,50	1,88	1,73	62,50
5,0	125	56,75	5,00	6,25	5,75	62,50

En la Ilustración 76 se observa que la pasta con un 1,5% aumenta el esfuerzo a cizalladura, con respecto al control, mientras que la pasta con un 5% de aditivo tiene menor esfuerzo. Aunque los datos difieren respecto a la relación a/c 0,40 podría decirse que para que se dé realmente el efecto cohesivo, se necesita mayor cantidad de aditivo con relaciones a/c bajas y menos aditivo con relaciones a/c altas. Para todos los porcentajes de aditivo, el esfuerzo a cizalladura es menor cuando más alta es la relación a/c, situación que fue estudiada en el subcapítulo anterior.

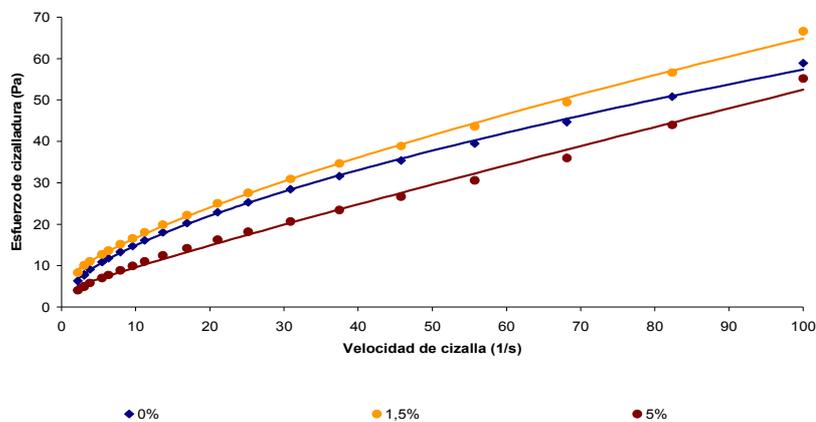


Ilustración 76. Evolución del esfuerzo de cizalla con la velocidad de corte para pastas de cemento gris. Influencia del porcentaje de aditivo con una relación a/c de 0,50. Marcadores-datos experimentales, líneas-ajuste con al ecuación de Herschel Bulkley

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

En el Cuadro 36 están tabulados los valores de los parámetros de ajuste, así como el factor de correlación, los cuales arrojan valores muy cercanos a la unidad. El valor del índice de flujo n nos indica si se tiene un comportamiento pseudoplástico ($n < 1$, shear thinning, viscosidad disminuye al aumentar la velocidad de corte) o comportamiento dilatante ($n > 1$, shear thickening, en la que la viscosidad aumenta al aumentar la velocidad de cizalla). Se aprecia que para estos ensayos siempre se tiene un comportamiento pseudoplástico.

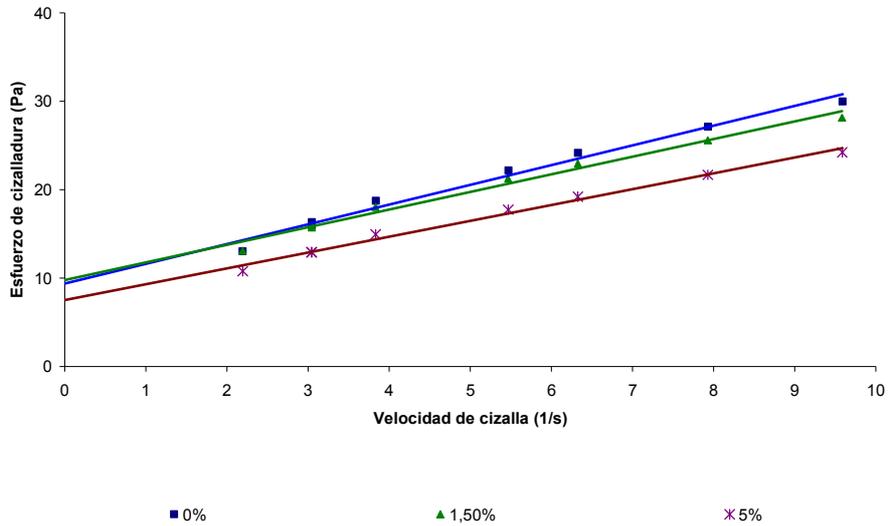
Cuadro 36 Parámetros de ajuste de la ecuación Herschel Bulkley para pastas de cemento gris I-52,5R adicionadas con 5% de licor de *Agave americana*. Influencia de la relación a/c

Aditivo en pasta	a/c	τ_0 (Pa)	k	n	R
0% Control	0,40	1,294	7,748	0,5812	1,000
	0,50	1,718	3,108	0,6264	1,000
1,50%	0,40	5,458	5,735	0,6249	1,000
	0,50	5,299	2,172	0,719	0,999
5,00 %	0,40	7,557	2,211	0,8751	0,998
	0,50	3,604	0,7293	0,9130	0,997

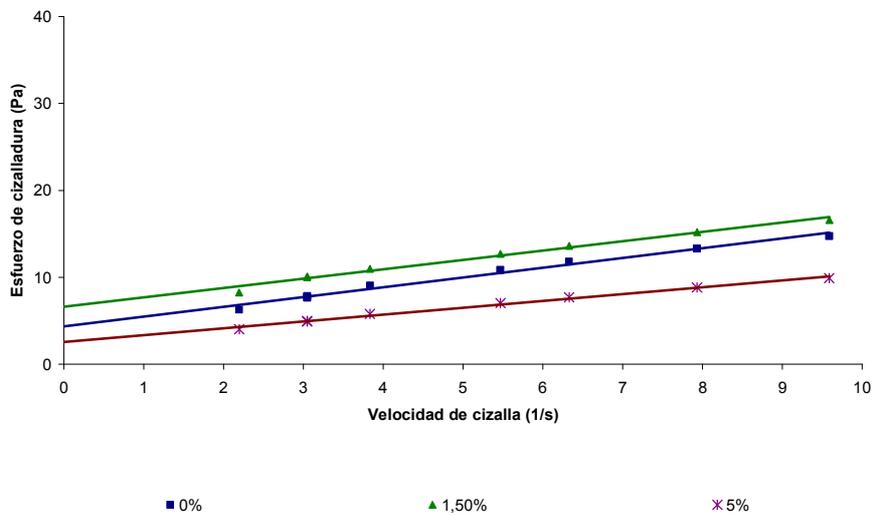
En este apartado también se efectuó un ajuste con línea recta, en la zona de bajas velocidades, buscando obtener un mejor ajuste del esfuerzo inicial. En la Ilustración 77 se han graficado nuevamente los datos de la Ilustración 75 y la Ilustración 76, tomando en cuenta solamente los datos inferiores a 10 s⁻¹ de velocidad de corte, mientras que en el Cuadro 37 están tabuladas las pendientes y ordenadas al origen (τ_0), así como los factores de correlación, de los ajustes lineales.

Se aprecia que todos los ajustes arrojan factores $R > 0,98$. Observando los valores tabulados de τ_0 del control, para la relación 0,40 se ve que cumple con la tendencia anterior, prácticamente el mismo comportamiento de la muestra control y la del 1,5% de aditivo y un menor esfuerzo de la pasta con 5% de aditivo. En la relación a/c 0,5 se comprueba el efecto de cohesión, observado anteriormente, para la pasta con un 1,5% de aditivo pues presenta un pequeño incremento del esfuerzo con respecto al control, y se conserva la tendencia del 5% de aditivo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



a) Relación a/c 0,40



b) Relación a/c 0,50

Ilustración 77. Variación del esfuerzo con la velocidad de cizalla para las pastas de cemento gris I-52,5R. Influencia del porcentaje de aditivo. Ajustes lineales; marcadores-datos experimentales, líneas-ajustes

Cuadro 37 Parámetros de los ajustes lineales de las curva de flujo para las pastas de cemento gris I-52,5R. Influencia del porcentaje de aditivo.

a/c	Aditivo en pasta	Pendiente (Pa s)	τ_0 (Pa)	R
0,40	0,0%	2,234	9,386	0,9848
	1,5%	1,993	9,786	0,9859
	5,0%	1,789	7,550	0,9919
0,50	0,0%	1,254	4,364	0,9858
	1,5%	1,075	6,616	0,9853
	5,0%	0,790	2,558	0,9933

4.2.1.3 Conclusiones al estudio de consistencia y viscosidad.

Las siguientes conclusiones se pueden extraer del estudio de consistencia y viscosidades, con distintos porcentajes de aditivo de licor de *Agave americana*:

1. La adición del aditivo orgánico a una pasta de cemento Pórtland, bien sea licor de la planta de *Agave americana* o el licor del fique, disminuye la relación a/c, para obtener el agua de consistencia normal. Con el superplastificante comercial se obtiene la mayor disminución de la relación a/c, indicando su mayor capacidad plastificante.
2. El esfuerzo a cizalladura de una pasta con licor de *Agave americana*, disminuye a medida que aumenta la relación a/c.
3. El esfuerzo a cizalladura de una pasta de cemento con una relación a/c dada, permanece igual a la pasta sin aditivo, o aumenta levemente, con pequeños porcentajes de aditivo (1,5%) y disminuye con porcentajes más altos (5%).
4. Parece que a relaciones a/c constantes, pequeñas cantidades de aditivo ejercen un mayor efecto cohesivo, es decir hace que el aditivo manifiesta sus propiedades aireantes, mientras que cantidades mayores facilitan que se comporte como aditivo plastificante.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.2.2 Influencia del aditivo en los tiempos de fraguado

4.2.2.1 Estudio del tiempo fraguado por Aguja de Vicat

Los tiempos iniciales y finales de fraguado se determinaron mediante la resistencia a la penetración de una aguja específica en una masa de pasta. La influencia del licor de las plantas sobre el tiempo de fraguado se comprobó sobre las mismas pastas utilizadas para la consistencia normal (ver Cuadro 38), y de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 3.2.2.1. Se utilizaron distintas secciones de la hoja y se estudió la influencia en el tiempo de fraguado del licor del *Agave americana*, con piel y sin piel, y del licor de fique.

En el Cuadro 38 se tabulan los datos y se grafican en la Ilustración 78. Se observa que en todos los casos se incrementan considerablemente los tiempos iniciales y finales de fraguado, con respecto a la muestra control.

En las pastas con licor de *Agave americana*, los tiempos de fraguado son mayores cuando fue extraído de la hoja con piel. Estos nos sugiere que es en la hoja donde se encuentra la mayor concentración de sustancias activas retardantes. El licor de fique aumenta levemente los tiempos del *Agave* con piel, lo que nos hace pensar, que esta planta contiene sustancias activas de mayor capacidad retardante que las del *Agave*. El fenómeno de aumento de los tiempos de fraguado que se obtiene con el licor de las plantas se podría adjudicar a su alto contenido de azúcares.

Edmeades y Hewlett (⁷⁰), explican el fenómeno del retardo en los tiempos de fraguado de una pasta de cemento de la siguiente forma: las adiciones que prolongan el período de la hidratación, de tal modo que alargan los tiempos de fraguado, se conocen como retardadores. Sin embargo, funcionan de diversas maneras. Generalmente, lo hacen reduciendo la solubilidad de los componentes de hidratación en el cemento, como es el caso del yeso que retarda la disolución del aluminato. Alternativamente, los aditivos reaccionan con un componente para formar un precipitado en las partículas del cemento, que cubre los granos, disminuye la permeabilidad y retrasa así la hidratación. Es el caso de los azúcares, estos reaccionan en la presencia del calcio para formar sales, que sellan las partículas del cemento y retardan su hidratación. Posiblemente, este último mecanismo, es el que aplica en este caso, conociendo de antemano del alto contenido de azúcares de los licores de las plantas.

Además debe tenerse en cuenta que el agua total, para las pastas con licor de planta, es algo menor que para la pasta control. Como es bien sabido, la reducción en la relación a/c disminuye los tiempos de fraguado, lo que sugiere que el efecto retardante de estos licores es muy importante.

Cuadro 38. Dosificación de las pastas para el ensayo de tiempos de fraguado en las pastas de cemento Pórtland y licor de *Agave americana*, y de fique

Muestra	Sección	Cemento	Aditivo	Agua de amasado	Agua del aditivo	Agua total	Relación a/c	Tiempo inicial de fraguado	Tiempo final de fraguado
		g	g	g	g	g		min	min
Control		500	0	160,0	0	160,0	0,320	117	190
Licor de Agave con piel	1/3 - cp	500	5	143,3	4,8	148,1	0,296	290	410
Licor de Agave sin piel	3/3 - sp	500	5	145,6	4,8	150,4	0,308	191	288
Licor de fique		500	5	138,2	4,8	143,0	0,286	310	430

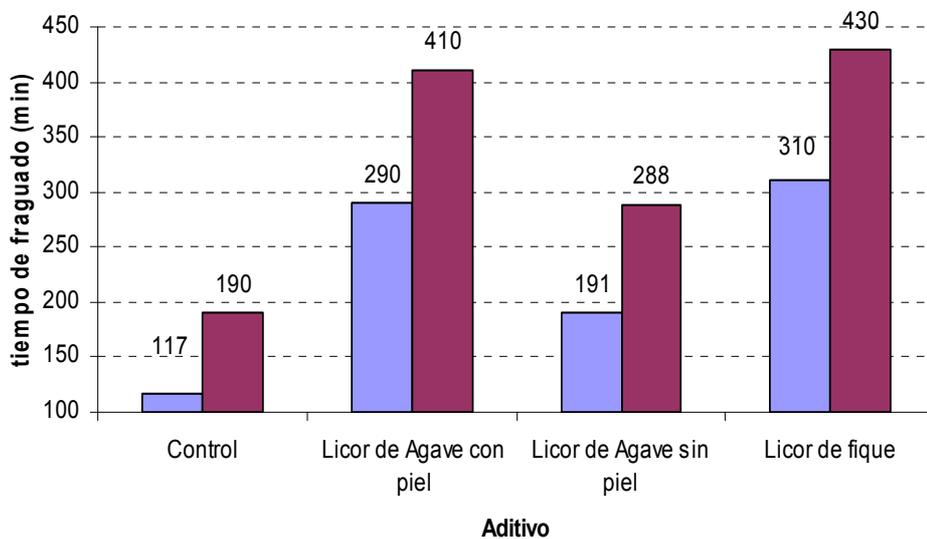


Ilustración 78. Tiempos de fraguado en pastas de cemento Pórtland y aditivo de licor de *Agave americana* y fique. Aguja de Vicat

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.2.2.2 Estudio, por Análisis Termogravimétrico, de la influencia de los aditivos en las reacciones de hidratación del cemento.

En términos químicos, la hidratación es una reacción de un compuesto anhidro con agua, que genera un nuevo compuesto, un hidrato. En la química del cemento, la hidratación se entiende como la reacción de un cemento no hidratado, o uno de sus constituyentes, con agua, y se asocia con cambios químicos, físicos y mecánicos del sistema, particularmente con el tiempo de fraguado y la resistencia.

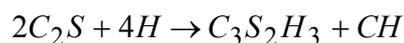
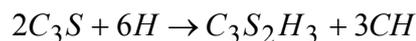
Una hidratación parcial de cemento puede llevarse a cabo con la humedad del ambiente, sin embargo, para una completa hidratación debe mezclarse con suficiente agua. La relación agua-cemento de la mezcla, afecta la reología, la hidratación y las propiedades del material hidratado (⁷¹).

Las reacciones de hidratación del cemento son principalmente las reacciones de hidratación del clinker, sumándose a ellas, las debidas a la presencia del sulfato de calcio (yeso), de las adiciones activas (si las hay) y de los aditivos y compuestos menores.

Pueden considerarse como principales reacciones de hidratación del clinker las correspondientes a la hidratación de los silicatos y aluminatos de calcio. Durante la reacción con el agua y los silicatos y aluminatos se libera hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Un esquema simplificado de las reacciones que se llevan a cabo es:

Silicatos tricálcicos (C_3S) y bicálcicos (C_2S)



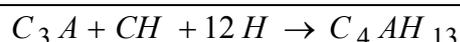
Donde $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ es comúnmente llamada la fase C-S-H.

Aluminato tricálcico (C_3A) en ausencia de sulfatos

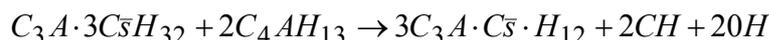


Aluminato tricálcico en presencia de sulfatos

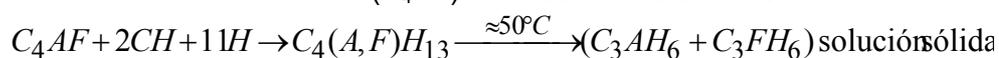
JUAN CARLOS OCHOA BOTERO



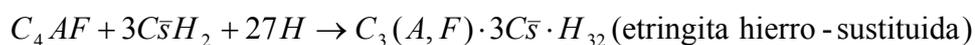
Donde $C_3A \cdot 3C\bar{s} \cdot H_{32}$ es la etringita. Cuando el sulfato ha sido agotado, la etringita reacciona con el C_4AH_{13} para formar monosulfoaluminato, de acuerdo con la ecuación:



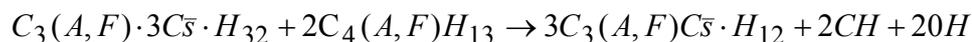
Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) en ausencia de sulfatos



Ferroaluminato tetracálcico en presencia de sulfatos



cuando todo el sulfato se ha agotado, la etringita hierro-sustituida reacciona con el $C_4(A,F)H_{13}$ para forma monosulfoaluminato hierro-sustituido, siguiendo la reacción:



Con el fin de conocer el efecto del licor de *Agave americana* en la hidratación de la pasta de cemento se prepararon pastas con 1,5% y 5,0% de licor y comparativamente con 0,26% del aditivo aireante Micro-Air 100. Cada uno de estos porcentajes se evaluó en dos relaciones a/c: 0,32 y 0,50. Se estudió la cal presente, liberada en la hidratación del cemento, para las edades de curado de 1, 3, 7, 14 y 28 días. El método que se aplicó a todas las muestras analizadas consistió principalmente en:

Intervalo de calentamiento de 35-600°C.

Velocidad de calentamiento de 10°C/min.

Crisol de aluminio de 100 µL sellable con orificio en la tapa para atmósfera autogenerada.

Atmósfera inerte de N₂ seco.

Flujo de N₂ de 75 mL/min.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se eligió dicho intervalo de temperaturas, debido a que los procesos de deshidratación de los hidratos formados, así como de deshidroxilación de la portlandita que queda disponible se encuentran en este intervalo.

En la curva TG se observa una pérdida continua de masa en el intervalo 80-250°C, debido a la deshidratación de los SCH, ACH y SACH. La curva DTG nos permite identificar dichos procesos. En la Ilustración 79 se representa, a manera de ejemplo, la curva DTG de una pasta control (0% de aditivo) curada a 28 días. Sobre ella se indican los principales procesos de pérdida de masa.

La asignación de picos es la siguiente: pico 1 para la deshidratación del SCH (100-180°C); el pico 2 corresponde a la etringita y el pico 3 para las deshidrataciones de SACH-ACH (240-300 °C). La pérdida de masa que tiene lugar en el intervalo de temperatura 520-600°C (pico 4) es la correspondiente a la deshidroxilación del CH. La deshidroxilación del CH responde a la reacción:

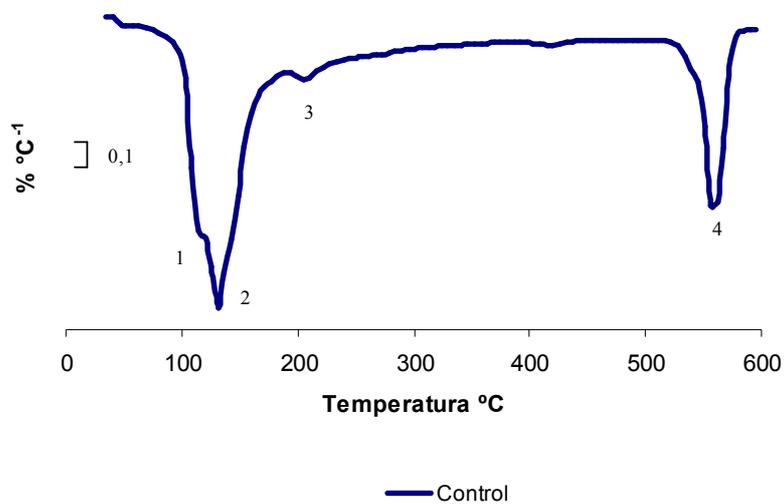
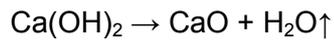


Ilustración 79 Curva DTG para pasta de cemento control, 0% de aditivo, a 28 días de curado

4.2.2.2.1 Estudio en pastas con aditivo de la planta *Agave americana*

Para este estudio se utilizó cemento Pórtland gris Tipo CEM I-52,5R, cuya composición se describe en la sección 3.1.1, del capítulo experimental y licor de *Agave americana*. En el Cuadro 39, se muestran las condiciones establecidas para las pastas ensayadas. La temperatura promedio a la que se realizaron los ensayos fue de 25 ± 1 °C. El mezclado se realizó siguiendo el mismo procedimiento para la fabricación de las pastas de viscosimetría, exceptuando que, después de terminado el amasado, se procedió a guardar en botes plásticos y conservar en la cámara húmeda a 95% de humedad relativa y 20° C. A los tiempos de curado determinados una porción de pasta es machacada con acetona, para detener las reacciones de hidratación, se filtra y se seca en estufa a 60°C durante 30 minutos. Para ambas relaciones a/c, 0,32 y 0,50, se prepararon muestras con un 1,5% y un 5,0% de aditivo.

Cuadro 39. Dosificación de las pastas para Análisis Térmico. *Agave americana*

Relación a/c 0,32						
Muestra	Cemento	Agua de amasado	Aditivo		Agua del aditivo	Agua total
	g	g	%	g	g	g
Control	125	40,00	0,0	0,00	0	40,00
1,5	125	38,31	1,5	1,88	1,69	40,00
5,0	125	34,38	5,0	6,25	5,63	40,00
MA	125	39,80	0,26	0,33	0,20	40,00
Relación a/c 0,50						
Muestra	Cemento	Agua de amasado	Aditivo		Agua del aditivo	Agua total
	g	g	%	g	g	g
Control	125	62,50	0,0	0,00	0	62,5
1,5	125	60,81	1,5	1,88	1,69	62,5
5,0	125	56,87	5,0	6,25	5,63	62,5
MA	125	62,30	0,26	0,33	0,20	62,50

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las curvas DTG para una pasta de cemento sin aditivo (control), así como para las pastas de cemento con aditivo de 1,5%, 5% y con un aditivo aireante comercial (Micro Air 100), con relaciones a/c 0,32 y 0,50 se muestran en la Ilustración 80.

En el primer día de curado se observó que la deshidroxilación del CH (520-600°C), para ambas relaciones a/c, con un porcentaje de aditivo de 1,5% es menor que para la muestra testigo y la muestra del aditivo comercial. Con un 5% la deshidroxilación del CH es mínima comparada con la del 1,5% de aditivo. También se observa que con un 5% de aditivo solamente aparece el pico de la etringita, lo que parece indicar un retraso en la hidratación de los CSH mientras que con 1,5% se ven los picos solapados de la etringita y CSH.

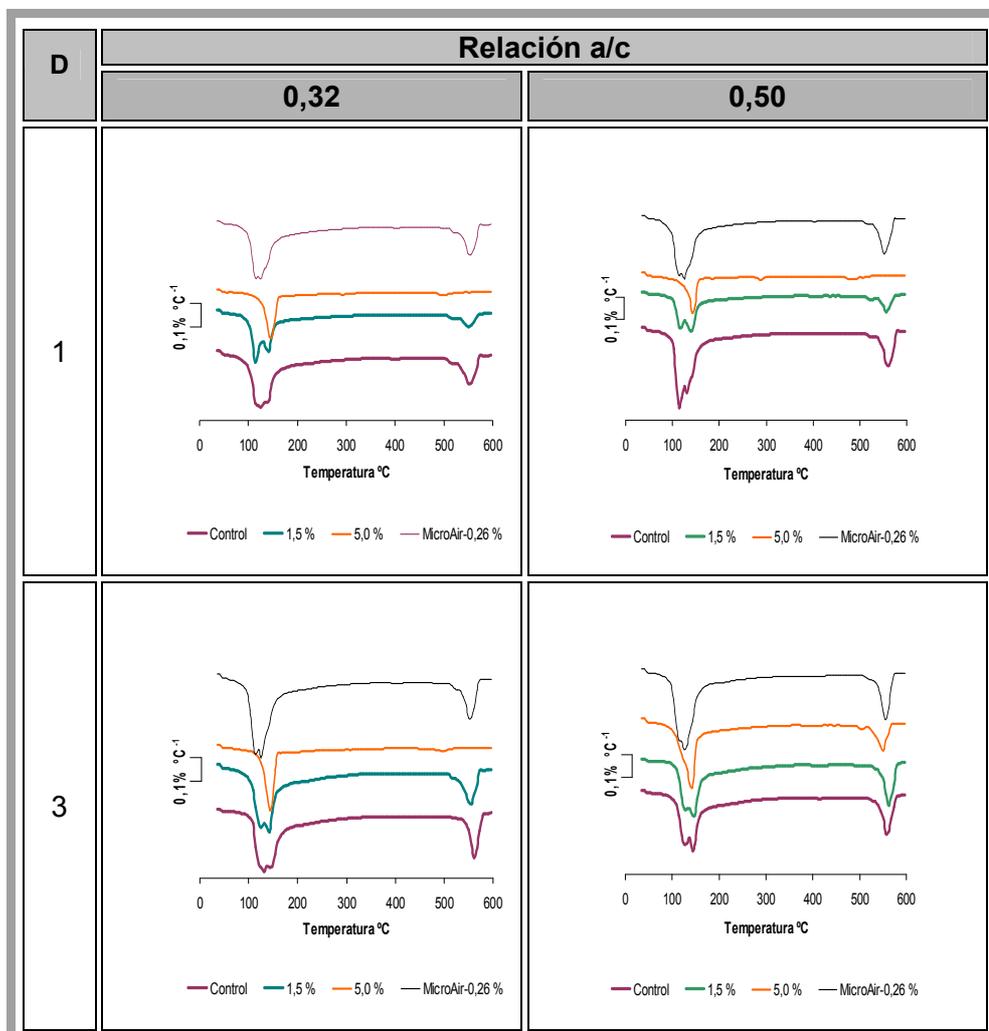
En el tercer día de curado se observa, para la relación a/c 0,32, una deshidroxilación del CH muy parecida entre la muestra control, 1,5% de aditivo y aditivo comercial. La deshidroxilación del CH con un 5% de aditivo sigue siendo muy pequeña comparada con las anteriores. No sucede lo mismo con la relación a/c 0,50 donde empieza a apreciarse el pico de deshidroxilación del CH.

Para las demás edades de curado se observa prácticamente el mismo comportamiento en las dos relaciones a/c y con los distintos porcentajes de aditivo orgánico y el aditivo comercial.

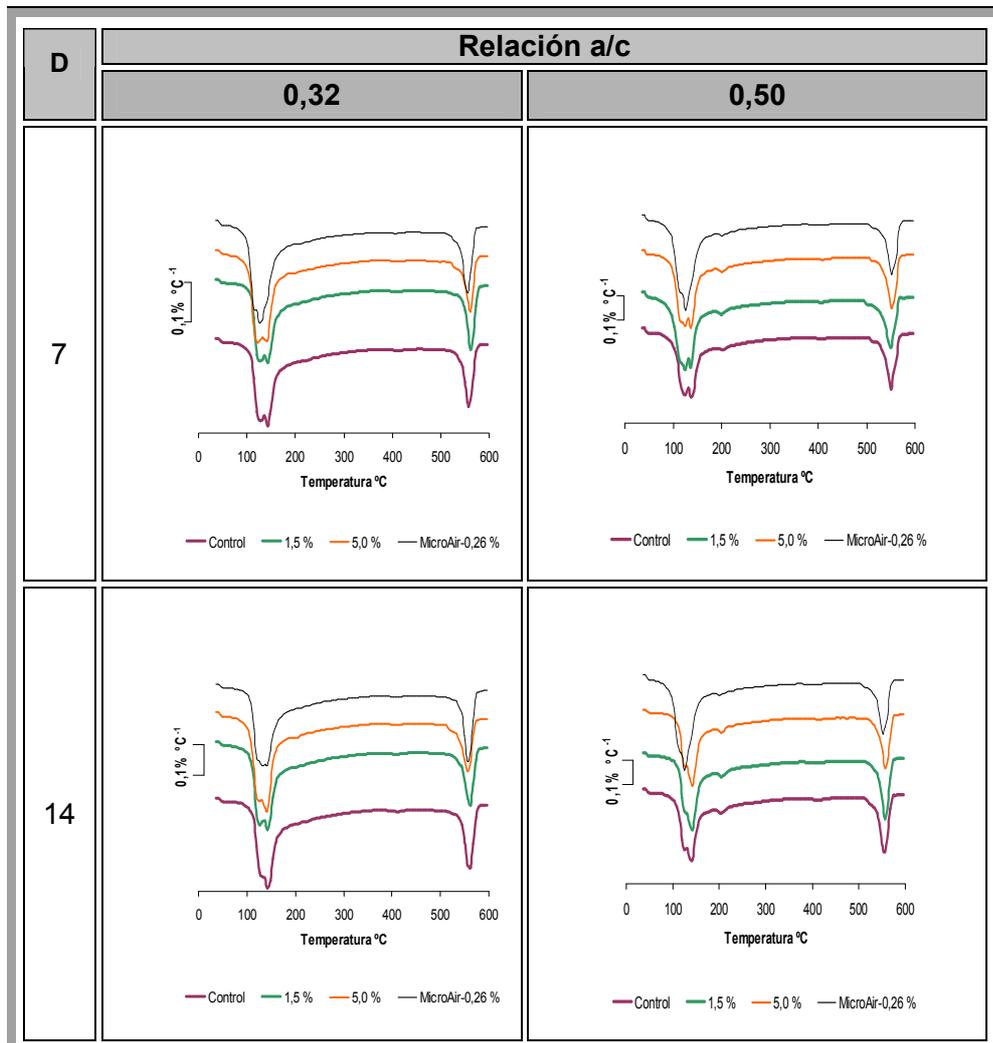
El valor de la portlandita presente, a cierta edad de curado (CH_p) se puede calcular por estequiometría según la fórmula:

$$CH_p = \frac{H}{PM_H} * PM_{CH}$$

Donde H es la pérdida de agua evaluada en el intervalo anteriormente señalado, PM_{CH} es el peso molecular de $Ca(OH)_2$ y PM_H es el peso molecular del H_2O .



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



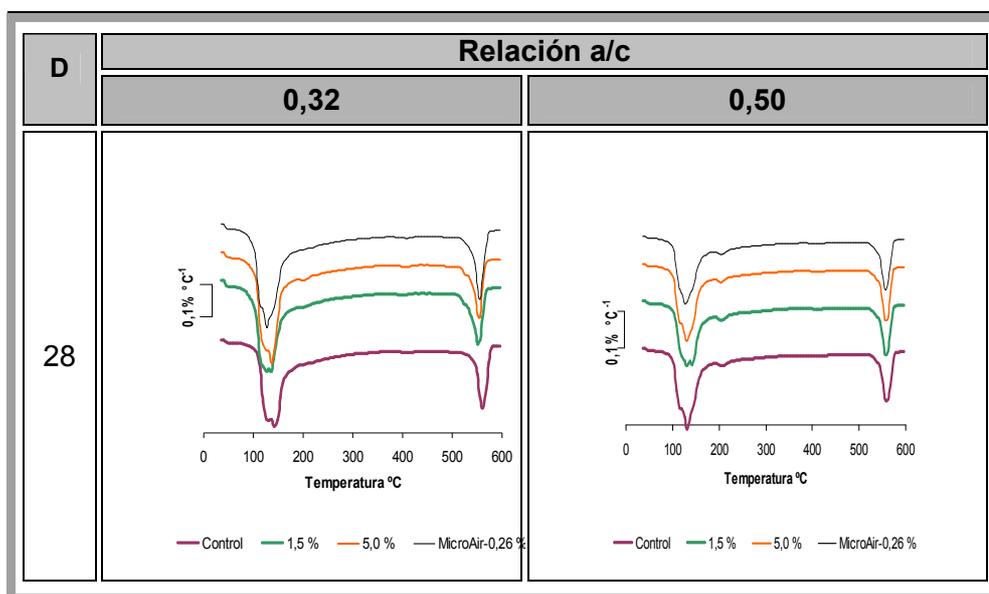


Ilustración 80. Gráficos de curvas DTG para pastas de cemento Pórtland con distinto porcentajes de aditivo. Relaciones a/c 0,32 y 0,50

Para este estudio se calculó la cal presente en las pastas con relación a/c 0,32 y 0,5, a la cuales se les adicionó 1,5% y 5% de licor de *Agave americana*. Se evaluó también el aditivo aireante comercial Micro-Air 100. En el Cuadro 40 se tabulan los datos y en la Ilustración 81 y Ilustración 82 se grafican.

Para un día de curado y ambas relaciones a/c, la cal presente es menor a medida que aumenta el porcentaje de aditivo. Sin embargo con a/c 0,50 la cal presente es mayor, en todos los casos. Este hecho puede ser atribuible a que dado que existe una menor cantidad de agua en la pasta con a/c 0,32, la concentración de las sustancia retardantes de la hidratación es mayor que con a/c 0,50, por lo que los efectos permanecen por más tiempo.

Para tres días de curado y 1,5% de aditivo la cal presente es levemente mayor que la muestra control, para ambas relaciones a/c. Con un 5,0% es menor sobre todo en la a/c 0,32, atribuible seguramente al hecho que se explicó en el párrafo anterior. Con el aditivo aireante comercial el comportamiento es bastante similar a la muestra control.

A las edades de 7 y 14 días y a/c 0,32, la cal presente es levemente menor que la de la muestra control con ambos porcentajes de aditivo. Con a/c 0,50 el comportamiento es bastante similar en todos los porcentajes. El

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

aireante comercial sigue teniendo un comportamiento similar a la muestra control, por lo que este aditivo en poco modifica la hidratación del cemento.

A la edad de 28 días se observó una tendencia a disminuir la cal presente de la muestra control, en ambas relaciones a/c, presumiblemente por un inicio de carbonatación de la muestra o más probablemente por un aporte de la cantidad de calcio en los CSH. Este comportamiento no se da en las muestras con aditivo, que por el contrario, continúan con los mismos valores y en algunos casos con un leve crecimiento.

A manera de conclusión es evidente que en el licor del *Agave americana* existen sustancias activas que retrasan el proceso de hidratación de la pasta de cemento.

Cuadro 40 Cantidad de cal presente en las pastas con cemento relación a/c 0,32 y 0,5. Influencia del porcentaje de aditivo.

Aditivo	Tiempo de curado(días)				
	1	3	7	14	28
Cal presente %					
a/c 0,32					
Control (0%)	7,68	8,20	9,22	9,52	8,90
1,5%	3,44	8,76	8,94	8,85	9,68
5,0%	0,82	1,00	7,80	8,38	8,28
Micro air 100	7,71	9,05	9,83	10,03	9,81
a/c 0,50					
Control (0%)	9,45	11,40	13,02	14,10	13,83
1,5%	4,38	11,58	13,37	13,43	13,51
5,0%	1,18	8,27	13,25	12,56	14,16
Micro air 100	9,82	12,51	13,68	14,09	13,75

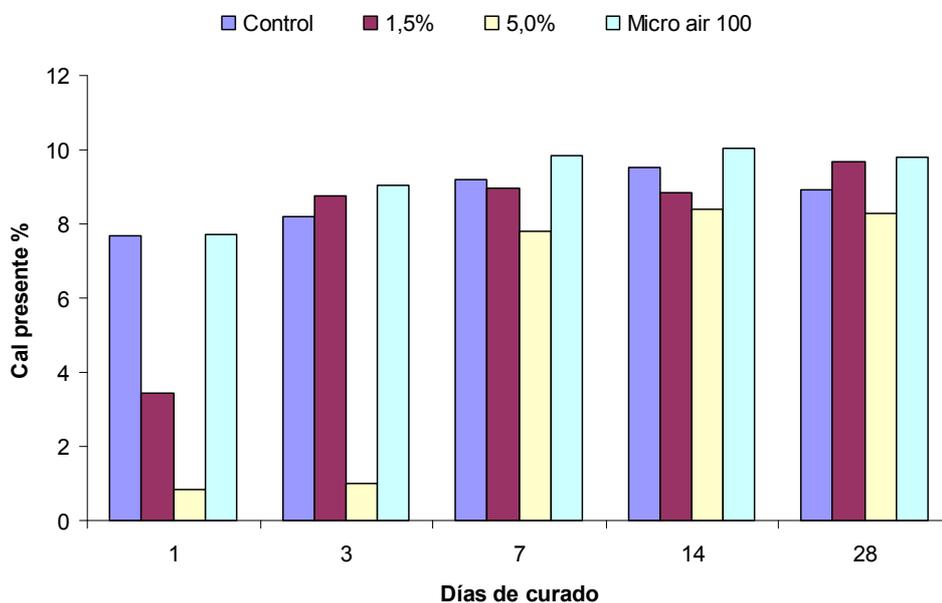


Ilustración 81. Gráfico de la cantidad de cal producida en las pastas de cemento relación a/c 0,32

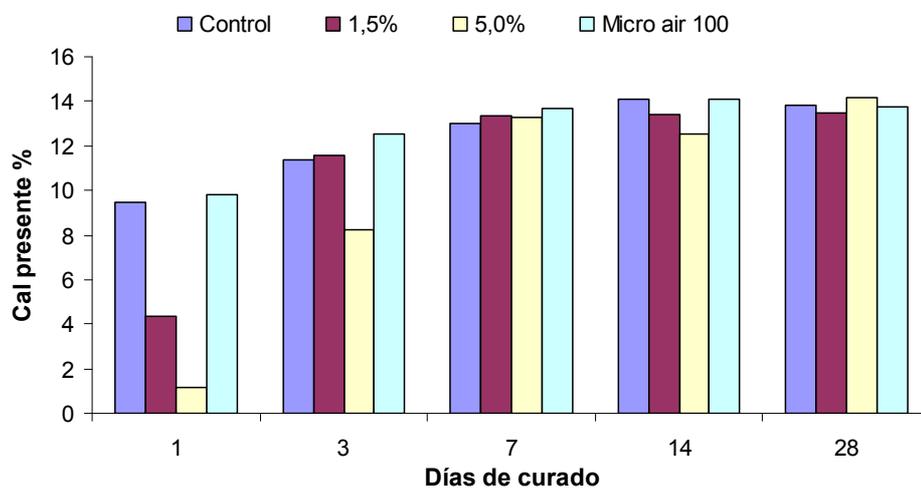


Ilustración 82 Gráfico de la cantidad de cal producida en las pastas de cemento relación a/c 0,50

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El agua combinada de los hidratos se trata de un parámetro muy útil que indica la cantidad de agua asociada a los productos de hidratación, y por lo tanto da una idea del porcentaje de productos de hidratación formados.

Cuando se realiza la evaluación de las curvas termogravimétricas se calcula un porcentaje total de pérdida de masa (P_T) de la muestra desde los 35°C hasta los 600°C y un porcentaje de pérdida de masa debido a la deshidroxilación de la cal (P_{CH}) en el intervalo de temperatura de 520-600°C; si se resta al porcentaje de pérdida de masa total, el porcentaje de pérdida debido a la cal, se obtiene el porcentaje de agua asociado a los hidratos (P_H) del tipo CSH, CAH, CSAH y sulfoaluminatos.

$$P_H = P_T - P_{CH}$$

Si calculamos el agua combinada de los hidratos (P_H) como se ha comentado anteriormente, obtenemos los valores que se muestran en el Cuadro 21 y que a continuación se representan en la Ilustración 83.

Se observa que:

- En todos los casos se observa que a medida que aumenta la edad de curado se forman mayor cantidad de productos de hidratación y por lo tanto, aumenta el porcentaje de agua combinada de los hidratos.
- La cantidad de productos de hidratación, a un día de curado, es menor a medida que se incrementa el porcentaje del licor de la planta a la pasta. Con el aditivo comercial es similar.
- A tres días de curado y 5% de aditivo de licor de la planta se encuentra una diferencia importante en la cantidad de productos de hidratación. Con 1,5% de aditivo y con aditivo aireante comercial los valores son muy similares.
- A los 7, 14 y 28 días de curado la cantidad de productos de hidratación es muy similar con los porcentajes de aditivo de licor de la planta y con el aditivo aireante comercial.
- La cantidad de productos de hidratación, en una pasta con a/c 0,32 a tiempos cortos de curado confirman el carácter retardante del licor del *Agave americana* cuando ha sido adicionado a la pasta de cemento.

Cuadro 41 Porcentajes de agua combinada de los hidratos (P_H) en las pastas a/c 0,32 a diferentes edades de curado

RELACIÓN a/c 0,32					
Muestra	Agua combinada de hidratos (%) - Muestra Control (0%)				
	Días				
	1	3	7	14	28
P_T	12,85	15,50	15,86	16,01	15,96
P_{CH}	1,87	1,99	2,24	2,31	2,17
P_H	10,98	13,50	13,62	13,70	13,79
	Agua combinada de hidratos (%) - Muestra 1,5%				
P_T	8,77	16,56	17,15	16,14	17,62
P_{CH}	0,84	2,13	2,18	2,15	2,36
P_H	7,94	14,43	14,98	13,99	15,26
	Agua combinada de hidratos (%) - Muestra 5%				
P_T	4,61	5,87	15,66	16,37	17,39
P_{CH}	0,20	0,24	1,90	2,04	2,01
P_H	4,41	5,63	13,77	14,33	15,38
	Agua combinada de hidratos (%) - Muestra Micro air-100				
P_T	12,81	16,56	17,15	16,14	17,62
P_{CH}	1,88	2,20	2,39	2,44	2,39
P_H	10,93	14,36	14,76	13,70	15,23

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

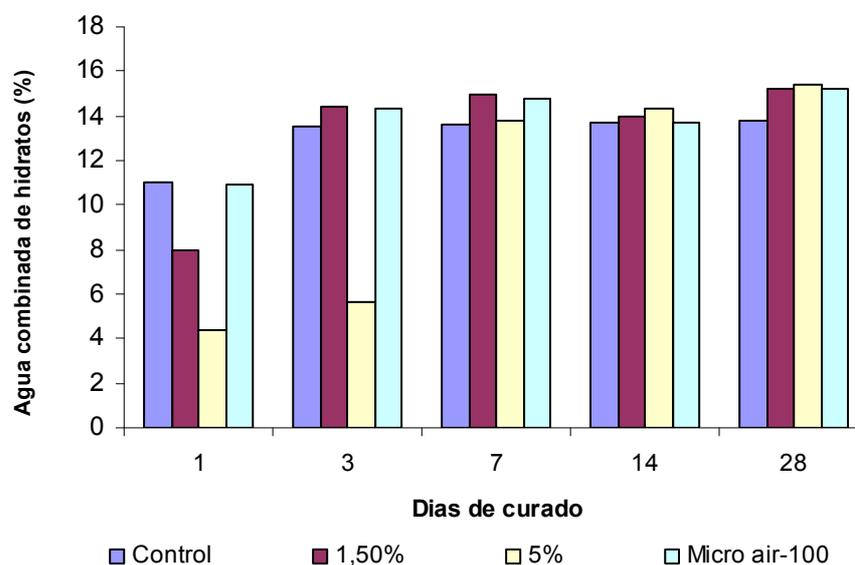


Ilustración 83 Gráfico de los porcentajes de agua combinada de los hidratos (P_H) para pastas a/c 0,32 a diferentes edades de curado

Igualmente, y con el mismo procedimiento, se calculó el agua combinada de los hidratos (P_H), para las pastas a/c 0,50. Los valores se muestran en el Cuadro 42 y en la Ilustración 84.

Se observa que:

- Al igual que con a/c 0,32, en todos los casos, se observa que a medida que aumenta la edad de curado se forman mayor cantidad de productos de hidratación y por lo tanto, aumenta el porcentaje de agua combinada de los hidratos.
- La cantidad de productos de hidratación, a un día de curado, es menor a medida que se incrementa el porcentaje del licor de la planta a la pasta. Con el aditivo comercial es similar. Se observa que hay mayor cantidad de productos de hidratación en la pasta control y con aditivo aireante comercial con a/c 0,50 que con a/c 0,32, lo cual es lógico dado que la cantidad de agua disponible es mayor para la relación a/c 0,5, pero esta variación es mínima cuando se utiliza el licor de la planta.
- A tres días de curado y 5% de aditivo de licor de la planta se encuentra una diferencia importante en la cantidad de productos de

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

hidratación, pero en proporción menor que la que se encontró con a/c 0,32, debido posiblemente a la mayor concentración de las sustancia activas retardantes en esta última. Con 1,5% de aditivo es muy similar y con aditivo aireante comercial se observa un incremento en los productos de hidratación.

- A los 7, 14 y 28 días de curado la cantidad de productos de hidratación es muy similar con los porcentajes de aditivo de licor de la planta y con el aditivo aireante comercial.
- Se observa que, a un día de curado y con aditivo del licor de la planta, el a/c no es un factor determinante en la producción de hidratos.

Cuadro 42 Porcentajes de agua combinada de los hidratos (pH) en las pastas a/c 0,50 a diferentes edades de curado

RELACIÓN a/c 0,50					
Muestra	Agua combinada de hidratos (%) - Muestra Control (0%)				
	Días				
	1	3	7	14	28
P_T	15,76	17,44	19,31	20,06	23,32
P_{CH}	2,30	2,77	3,17	3,43	3,36
P_H	13,46	14,66	16,15	16,63	19,95
	Agua combinada de hidratos (%) - Muestra 1,5%				
P_T	8,81	17,01	20,55	19,80	21,80
P_{CH}	1,07	2,82	3,25	3,27	3,29
P_H	7,74	14,19	17,30	16,54	18,51
	Agua combinada de hidratos (%) - Muestra 5%				
P_T	3,82	13,61	20,94	18,87	23,17
P_{CH}	0,29	2,01	3,22	3,06	3,44
P_H	3,54	11,60	17,72	15,81	19,73
	Agua combinada de hidratos (%) - Muestra Micro air-100				
P_T	15,64	20,21	21,55	19,95	22,13
P_{CH}	2,39	3,04	3,33	3,43	3,35
P_H	13,25	17,17	18,22	16,52	18,78

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

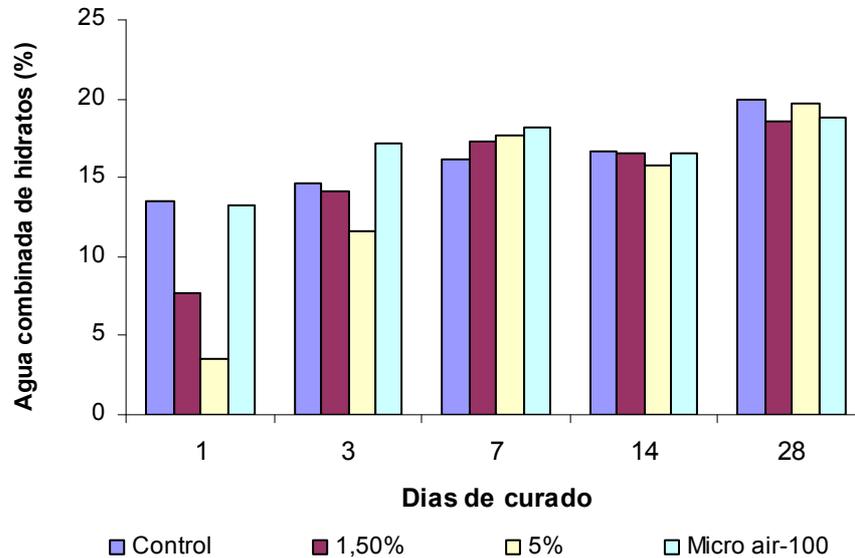


Ilustración 84 Gráfico de los porcentajes de agua combinada de los hidratos (P_H) para pastas a/c 0,50 a diferentes edades de curado

4.2.2.2 Estudio en pastas con aditivo de la planta *Furcraea cabuya* (fique cenizo)

Para este estudio se utilizó cemento gris tipo I de origen colombiano, cuya composición se describe en la sección 3.1.1, del capítulo experimental y licor de la planta *Furcraea cabuya* (fique cenizo), también de origen colombiano. En el Cuadro 43, se muestran las condiciones establecidas para las pastas ensayadas. La temperatura promedio a la que se realizaron los ensayos fue de 25 ± 1 °C. El mezclado se realizó siguiendo el mismo procedimiento que se utilizó para la fabricación de las pastas de viscosimetría, exceptuando que, después de terminado el amasado, se procedió a guardar en botes plásticos y conservar en la cámara húmeda a 95% de humedad relativa y 20° C.

El valor de la portlandita presente, a cierta edad de curado (CH_p) se puede calcular por estequiometría según la fórmula:

$$CH_p = \frac{H}{PM_H} * PM_{CH}$$

Donde H es la pérdida de agua evaluada en el intervalo anteriormente señalado, PM_{CH} es el peso molecular de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y PM_H es el peso molecular del H_2O .

Cuadro 43. Dosificación de las pastas para Análisis Térmico. *Furcraea cabuya* (fique cenizo)

Relación a/c 0,40						
Muestra	Cemento	Agua de amasado	Aditivo		Agua del aditivo	Agua total
	g	g	%	g	g	g
Control	125	50,00	0,0	0,00	0	50,00
1,5	125	48,29	1,5	1,88	1,71	50,00
5,0	125	44,37	5,0	6,25	5,63	50,00

Se aprecia claramente que a menor tiempo de curado también es menor la pérdida atribuida a la cal presente. Es interesante observar que no aparece el pico 1 correspondiente a los CSH y sólo aparece el pico 2 de la etringita. Esto indica que a 1 día de curado, y con un 5% de aditivo, no se alcanzan a hidratar suficientemente los silicatos y por consiguiente se retrasa el tiempo de fraguado.

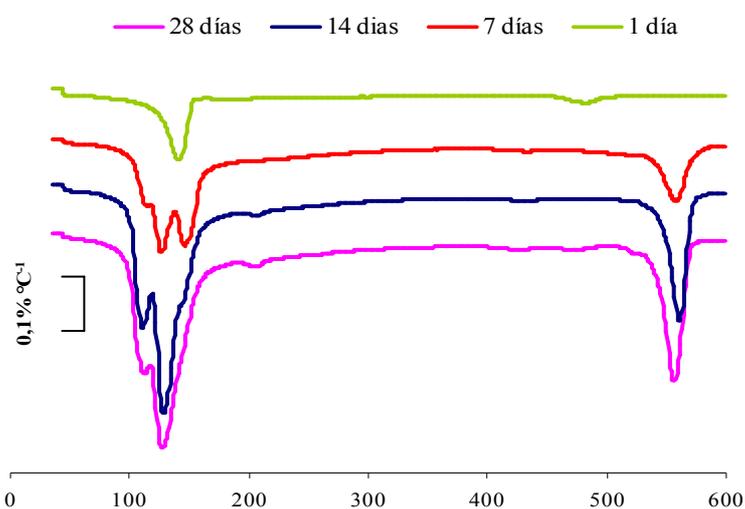


Ilustración 85. Gráfico de la curva DTG para pastas de cemento Portland a distintas edades de curado y un 5% de extracto de fique

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Ilustración 86 se aprecian las curvas DTG para distintos porcentajes de aditivo y 1 día de curado. Se observa que a medida que se aumenta el porcentaje de aditivo se disminuye la pérdida de cal, corroborando la premisa de que el aditivo retrasa tanto la hidratación de los silicatos como del hidróxido de calcio.

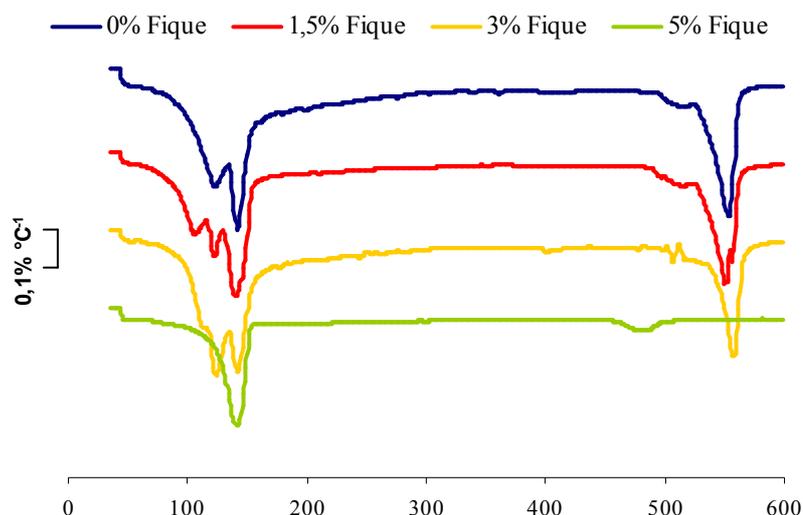


Ilustración 86. Gráfico de la curva DTG para pastas de cemento Portland con distintos porcentajes de aditivo de fique a 1 día de curado.

Utilizando el mismo procedimiento que se usó para el cálculo de la cal presente en las pastas de *Agave americana*, se calculó para las pasta con Fique. En el Cuadro 44 se muestran lo datos obtenidos y se grafican en la Ilustración 87. Comparativamente se muestran los datos obtenidos para la misma relación a/c (0,40) con extracto de *Agave americana* (Cuadro 45, Ilustración 88)

En todos los casos la cantidad de cal presente es mayor a medida que aumenta el tiempo de curado y menor cuanto se incrementa el porcentaje de aditivo.

Comparativamente, con el *Agave americana*, se observa una mayor disminución de cal presente, relativa a la cantidad de la muestra control, en el fique que en el *Agave*. Quiere decir que si se compara, por ejemplo, la disminución de la cal producida, con respecto al control, a 1 día de curado y con un 5% de aditivo, se obtiene que con el *Agave* es de 47,6% menos, mientras que con el fique es de 92%. Esto posiblemente indique una mayor actividad del agente retardante en el fique que en el *Agave*.

Cuadro 44 Cantidad de cal presente en las pastas con cemento relación a/c 0,40. Influencia del porcentaje del aditivo del licor de la *Furcraea cabuya* (fique cenizo)

RELACIÓN A/C 0,40				
Muestra	Cal presente %			
	Días			
	1	7	14	28
Control (0%)	8,52	13,54	13,12	12,95
1,5%	1,91	8,74	12,82	13,76
3,0%	1,04	8,36	12,46	13,92
5,0%	0,68	5,85	10,94	13,72

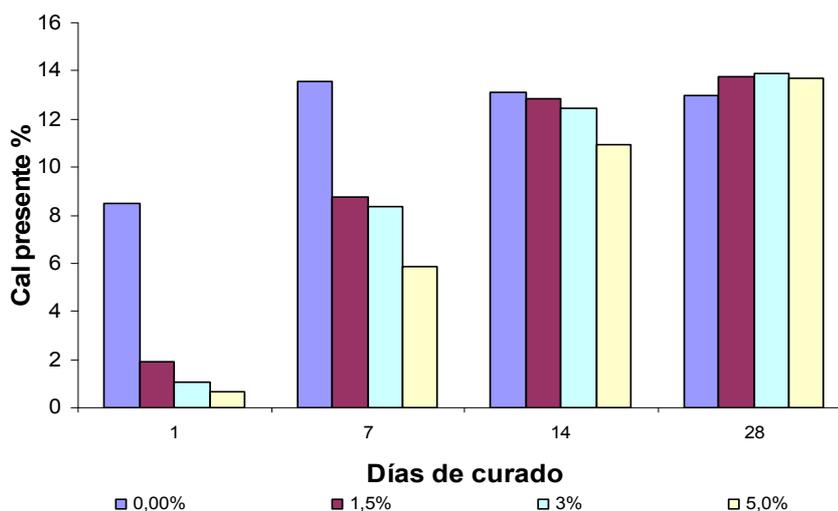


Ilustración 87. Gráfico del porcentaje de Ca(OH)_2 en pastas de cemento Pórtland con relación a/c 0,40. *Furcraea cabuya* (fique cenizo)

A la edad de 7 días la cal presente sigue siendo menor en las pastas con aditivo. Respecto al *Agave* se conserva la misma tendencia que el día 1, pues la cantidad relativa de cal presente, comparada con el control, sigue siendo significativamente menor. Entre el 1,5%, y el 3% de aditivo la cal presente es prácticamente la misma, pero mayor que con el 5%.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A los 14 días la cal producida es cercana a la de la muestra control pero sigue siendo un poco menor. A los 28 días de curado se podría decir que la cal producida es la misma en todas las pastas.

Cuadro 45. Cantidad de cal presente en las pastas con cemento relación a/c 0,40. Influencia del porcentaje del aditivo del licor del *Agave americana*

RELACIÓN A/C 0,40				
Muestra	Cal presente %			
	Días			
	1	7	14	28
Control (0%)	6,08	11,27	11,79	11,73
1,5%	5,73	11,29	11,82	11,37
3,0%	4,46	10,77	11,59	11,29
5,0%	2,10	9,62	11,28	11,27

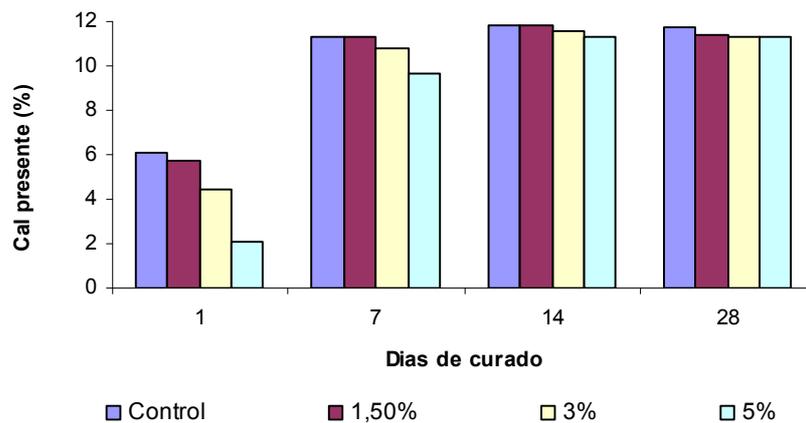


Ilustración 88. Gráfico del porcentaje de Ca(OH)_2 en pastas de cemento Pórtland con relación a/c 0,40. *Agave americana*.

Con el mismo procedimiento que se usó para el licor de *Agave americana*, se calculó el agua combinada de los hidratos (P_H) para el licor de fique. Los valores obtenidos se muestran en el Cuadro 46 y se representan en la Ilustración 89.

Se puede observar que:

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

- En todos los casos se observa que a medida que aumenta la edad de curado se forman mayor cantidad de productos de hidratación y por lo tanto, aumenta el porcentaje de agua combinada de los hidratos. Este comportamiento es similar al del *Agave americana*
- La cantidad de productos de hidratación, a 1 y 7 días de curado es menor a medida que se incrementa el porcentaje del licor de la planta en la pasta.
- A los 14 y 28 días de curado la cantidad de productos de hidratación es muy similar con los porcentajes de aditivo de licor de la planta.
- Estos resultados confirman el carácter retardante de hidratación del licor de fique y son similares, en su gran mayoría, a los que se encontró con el licor de *Agave americana*.

Cuadro 46. Porcentajes de agua combinada de los hidratos P_H en las pastas a/c 0,40 a diferentes edades de curado. *Furcraea cabuya* (fique cenizo)

RELACIÓN a/c 0,40				
Muestra	Agua combinada de hidratos (%) - Muestra Control (0%)			
	Días			
	1	7	14	28
P _T	10,60	17,86	19,78	20,18
P _{CH}	2,23	3,27	3,23	3,15
P_H	8,36	14,60	16,56	17,03
	Agua combinada de hidratos (%) - Muestra 1,5%			
P _T	6,69	15,70	20,01	21,87
P _{CH}	0,53	1,52	2,95	3,32
P_H	6,15	14,18	17,07	18,55
	Agua combinada de hidratos (%) - Muestra 5%			
P _T	2,69	12,84	19,31	21,16
P _{CH}	0,25	1,54	2,74	3,23
P_H	2,44	11,30	16,58	17,93

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

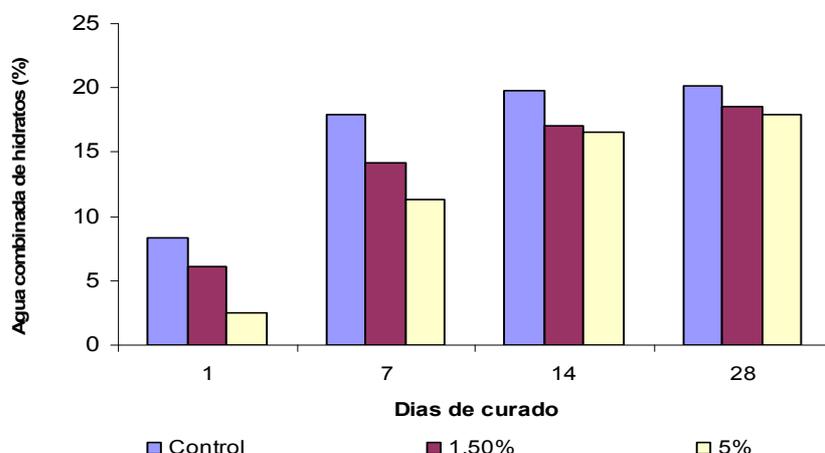


Ilustración 89. Gráfico de los porcentajes de agua combina de los hidratos (P_H) para pastas a/c 0,40 con licor de fique a diferentes edades de curado

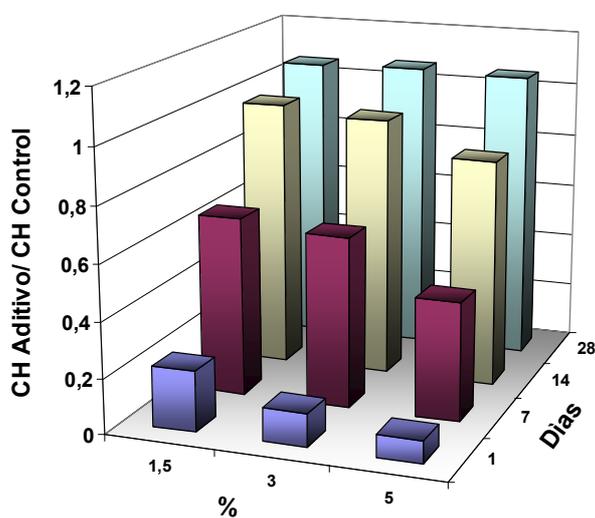
4.2.2.3 Conclusiones sobre el estudio en tiempos de fraguado e hidratación de la pasta

Las conclusiones más importantes sobre la influencia de los aditivos orgánicos sobre los tiempos de fraguado e hidratación de la pasta de cemento Pórtland son:

1. Tanto el aditivo orgánico extraído de la planta de *Agave americana* como de la *Furcraea cabuya* retrasan los tiempos iniciales y finales de fraguado de las pastas de cemento Pórtland. Se observó un mayor retraso con el aditivo extraído de la hoja con piel del *Agave americana* y con el licor de fique. Al parecer la mayor concentración de sustancias activas se encuentran, en el caso del *Agave*, en la piel de la hoja. El fique presentó un mayor poder retardante que el *Agave* con piel.
2. Respecto al efecto sobre la hidratación del cemento, a la vista de la Ilustración 90, donde se grafica la relación entre la cal presente en la pasta con aditivo y la cal presente en la pasta control, para los dos tipos de aditivos, *Agave americana* y fique y con porcentajes de 1,5%, 3% y 5,0% de aditivo. se observa una disminución considerable en la producción de CH en el primer día de curado, siendo más pronunciado en el fique que en el *Agave* y corroborando la disminución de la velocidad de reacción de

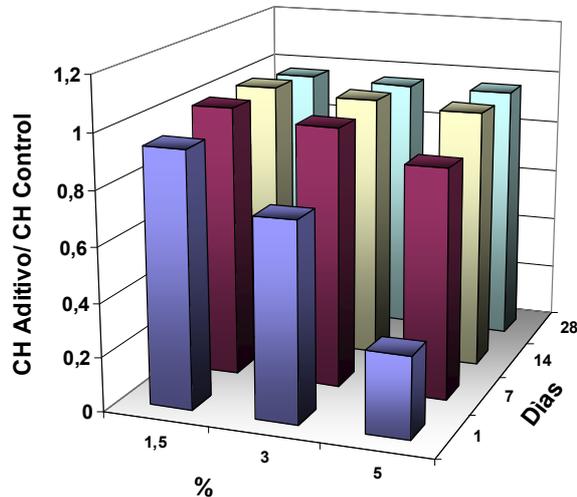
hidratación en la pasta. Este efecto decrece, hasta llegar a los valores de la muestra control, a partir del tercer día de curado. Este efecto también se observa en el agua combinada de hidratos.

3. Se observó que la disminución en la producción de CH de las pastas con aditivo de *Furcraea cabuya* (fique cenizo), se prolonga hasta los siete días de curado y sólo a partir de allí se normaliza hasta alcanzar, a los 28 días, los valores de la muestra control. La diferencia de los valores con la muestra control es significativamente mayor que cuando utilizamos el licor de *Agave americana*.



a)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



b)

Ilustración 90. Gráficas de la relación entre CH aditivo/CH control, a) fique; b) *Agave americana*

4.3 Pastas de Yeso

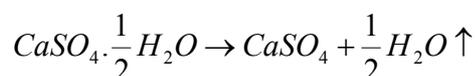
El libro “Materiales de Construcción” de Hornbostel⁷² define el yeso como un sulfato hidratado de calcio de origen natural (fórmula: $CaSO_4 \cdot 2H_2O$). Es un mineral común, por lo general se presenta combinado con óxidos de hierro y aluminio, con carbonatos de calcio y magnesio, entre otros. Cuando es puro es de color blanco, pero es más frecuente en colores gris, rojo o café debido a su contenido de impurezas.

El yeso tiene una propiedad única que lo hace valioso para la construcción. Cuando se calienta (o calcina) de 100 a 150°C, pierde tres cuartas partes de su agua de combinación.



JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

Entre 150°C y 180°C pierde medio mol de agua restante resultando un sulfato de calcio anhidro:



El yeso se vende en forma calcinada, en sacos o bolsas de papel de varias hojas. El yeso calcinado se utiliza en la industria de la construcción como recubrimiento de acabado (enlucidos) o paneles divisorios. Su rápida hidratación obliga a que en algunas ocasiones deber ser adicionado con sustancias que retrasen el proceso de fraguado; de allí que las normas técnicas consideren la clasificación de un yeso común de construcción que por incorporación de aditivos reguladores de fraguado, tiene un tiempo mayor de puesta en obra.

Las burbujas de aire en el yeso de construcción buscan mejorar las prestaciones como aislamiento térmico aunque se disminuyen las resistencias mecánicas. Los yesos aligerados se logran por la incorporación de aditivos y agregados ligeros, orgánicos e inorgánicos, tales como perlita expandida o vermiculita. ⁽⁷³⁾

Arikan y Sobolev ⁽⁷⁴⁾, en su trabajo sobre la optimización de materiales compuestos basados en yeso, comentan que un aditivo importante al yeso puede ser un polímero soluble en agua, generalmente un eter de celulosa: un metil celulosa (MC) o un metil celulosa modificado (MMC). Estos aditivos proporcionan una alta retención de agua y aumentan la consistencia, también la adhesión y la plasticidad del sistema. Un aditivo retardador es necesario para controlar la velocidad de fraguado y le permite su aplicación en un límite de tiempo entre 1-3 horas. La aplicación de aditivos aireantes también es importante para la estabilización de los poros generados en el amasado y proveen trabajabilidad y una superficie suave y lustrosa. Estos aditivos también incrementan el volumen de la pasta y el aislamiento al calor y al sonido.

Estos mismos autores usando en sus experimentos un aireante cuya marca comercial es *Hostpur (Olefine Sulfonate Sodium Salt)*, en un rango de dosificación entre 0,005% – 0,08% por peso encontraron que: el incremento del aireante en dosificaciones por encima de 0,033% da como resultado una excesiva oclusión (un 12% más de aire comparado con un

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

estuco sin aireante). Encontraron además que el aditivo retrasa el tiempo de fraguado y no tiene efecto en la fluidez. El decrecimiento en la densidad debido a la oclusión de burbujas de aire produjo una fuerte pérdida en la resistencia a compresión.

En este apartado se estudió, de manera preliminar, los efectos que tiene el licor de *Agave americana* en la consistencia, los tiempos de fraguado y las resistencias mecánicas de una pasta de yeso tipo YG, según la norma española, y cuyas características se mencionan en el apartado 3.1.9.

4.3.1 Influencia del aditivo en la relación agua/yeso y en la consistencia de la pasta

Para determinar la consistencia en una pasta de yeso se utilizó el método de la mesa de sacudidas cuyo principio se basa en la medida del diámetro de escurrimiento después de haber sido sometida a una serie de sacudidas. El diámetro de la galleta deberá ser de $165 \pm 5 \text{ mm}$. El procedimiento y equipos utilizados se describen en la sección 3.2.3.1 del capítulo experimental.

El yeso utilizado para este ensayo fue Tipo YG, que lo define la norma UNE 102-010-86 (75) como yeso común de construcción que se utiliza para pasta de agarre en la ejecución de tabicados, en revestimientos interiores y como conglomerante auxiliar de obra. Las dosificaciones utilizadas se muestran en el Cuadro 47.

En primer lugar se determinó la influencia en la relación a/y. Se realizaron varias amasadas de tal manera que con la disminución en el agua de amasado y la incorporación del aditivo se mantuviera constante la consistencia, cuantificada como el diámetro de la galleta en la mesa de sacudidas $165 \pm 5 \text{ mm}$.

Cuadro 47 y la Ilustración 91a), muestran la disminución de la relación a/y a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo en la pasta. La mayor disminución de la relación se aprecia cuando se adiciona el 1% de aditivo respecto de la muestra sin aditivo. A partir de allí las disminuciones son menos importantes cuantitativamente, hasta llegar a diferencias mínimas como en el caso del 3% y el 5%.

Cuadro 47. Efecto del aditivo en la relación a/y. Consistencia constante 165 ± 5 mm

Muestra	Yeso (g)	Aditivo			Agua de amasado (g)	Agua total (g)	a/y
		%	g*	H ₂ O			
1	2500	0	0	0	1200,0	1200,0	0,480
2	2500	1	25,0	24,5	1040,0	1065,0	0,426
3	2500	3	75,0	69,0	937,5	1006,5	0,403
4	2500	5	125,0	115,0	875,0	990,0	0,396

*El agua del aditivo es el 92% de la masa total

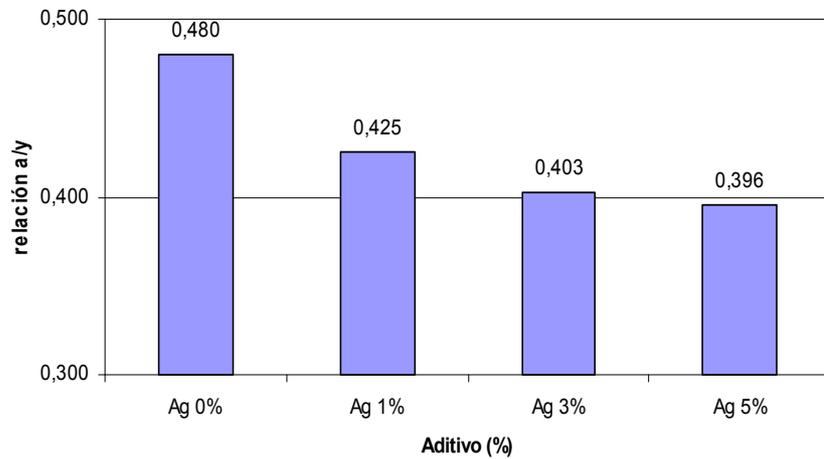
Para determinar el efecto del plastificante en la consistencia se efectuaron amasadas, conservando la misma relación a/c 0,48, y se midió el diámetro de la galleta en la mesa de sacudidas.

En el Cuadro 48 y la Ilustración 91b) se presenta la influencia del aditivo en la consistencia de la pasta. Se observa que a la misma relación a/c 0,48, la plasticidad de la pasta se incrementa entre 0% y 1% de adición de aditivo en un 11% aproximadamente, y entre 1% y 3% de aditivo el incremento en la plasticidad es del 19%. Con la adición del 5% no fue posible determinar la plasticidad porque la fluidez fue tal que desbordó el tablero de la mesa. Ésta y la anterior medida nos demuestran que adiciones mayores del 3% del aditivo en la pasta de yeso no aportan beneficios al material para esa relación a/y.

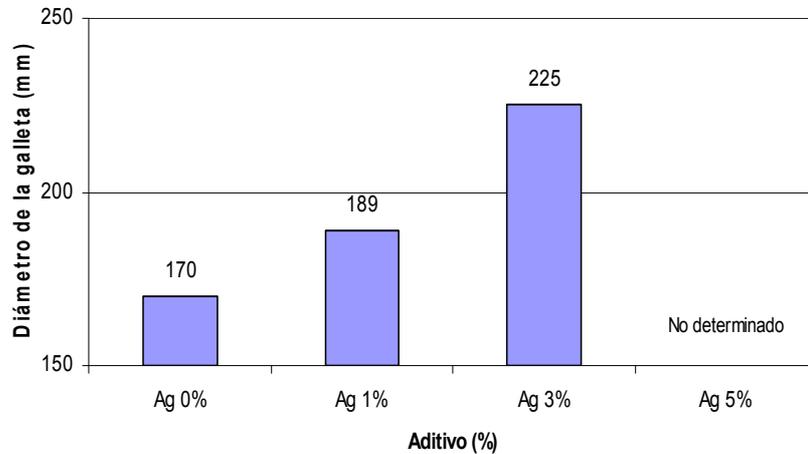
Cuadro 48. Efecto del aditivo en la consistencia del yeso. Relación a/y constante 0,48

Muestra	Yeso (g)	Aditivo			Agua de amasado (g)	Agua total (g)	FTS (mm)
		%	g	H ₂ O			
1	2500	1	25	24,5	1176	1200	189
2	2500	3	75	69,0	1131	1200	225
3	2500	5	125	115,0	1085	1200	N.D

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



a) Influencia del aditivo en la relación a/y



b) Influencia del aditivo en la consistencia

Ilustración 91. Influencia del aditivo en la relación a/y y en la consistencia de la pasta de yeso

4.3.2 Influencia del aditivo en los tiempos de fraguado del yeso

Para este ensayo se utilizaron las mismas dosificaciones del ensayo de consistencia. (Ver Cuadro 47). El procedimiento para obtener los tiempos iniciales y finales de fraguado se realizó con el aparato de Vicat y se explica en la sección 3.2.3.2 del capítulo experimental.

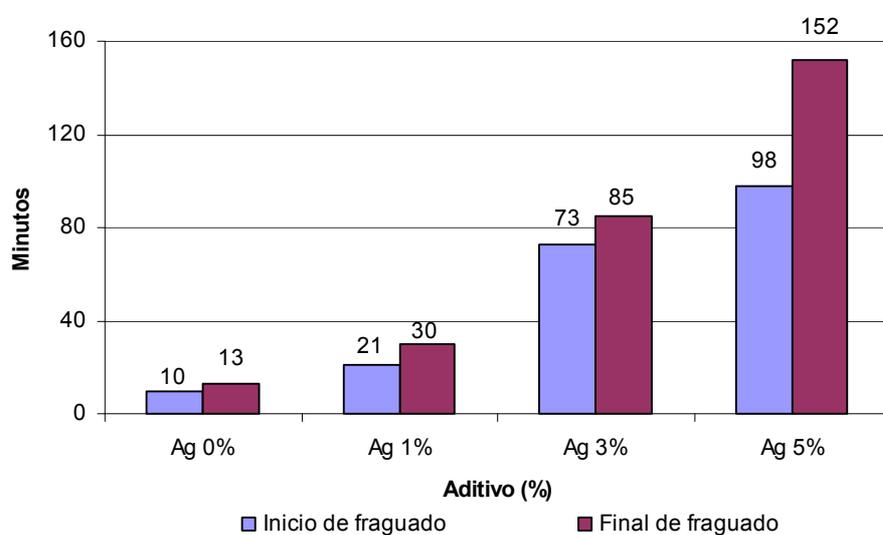
De los resultados obtenidos, que se observan en la Ilustración 92, podemos decir:

En el gráfico a) se muestran los tiempos inicial y final de fraguado de las pastas de yeso que se prepararon con igual consistencia a la de la muestra control y que corresponden a las muestras 1, 2, 3 y 4 del Cuadro 47. En esa gráfica observamos que tanto los tiempos inicial y final de fraguado aumentan a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo en la pasta. Con el 1% de aditivo el tiempo inicial de fraguado aumenta en 11 minutos, con un 3% de aditivo el tiempo inicial de fraguado aumenta en 63 minutos y con un 5% el tiempo inicial de fraguado aumenta 88 minutos, con respecto a la muestra control.

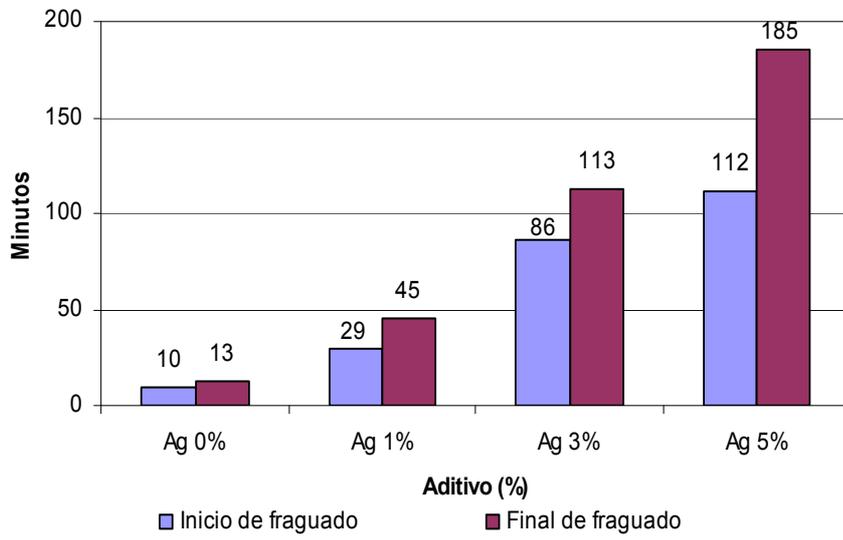
- En ese mismo gráfico se observa que el tiempo final de fraguado, con 1% de aditivo se incrementa en 17 minutos, con un 3% el tiempo final de fraguado se incrementa en 72 minutos y con 5% de aditivo se incrementa en 139 minutos.
- En el gráfico b) se expresan los resultados de los tiempos inicial y final de fraguado de la pastas de yeso preparadas con igual relación a/y que la muestra control, y que corresponde a las muestras 1, 2, y 3 del Cuadro 48. Al igual que en las muestras preparadas con igual consistencia, los tiempos de inicio y final de fraguado aumentan a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo en la pasta. Con 1% de aditivo, el tiempo inicial de fraguado se aumenta en 19 minutos, con un 3% de aditivo el tiempo inicial de fraguado se aumenta en 76 minutos y con un 5% el tiempo inicial de fraguado se aumenta 102 minutos.
- En esa misma ilustración se observa que el tiempo final de fraguado, con 1% de aditivo se incrementa en 32 minutos, con un 3% el tiempo final de fraguado se incrementa en 100 minutos y con 5% de aditivo se incrementa en 172 minutos.
- En el gráfico c) y d) se comparan los tiempos iniciales y finales de fraguado a igual relación a/y y con igual consistencia. En ambos

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

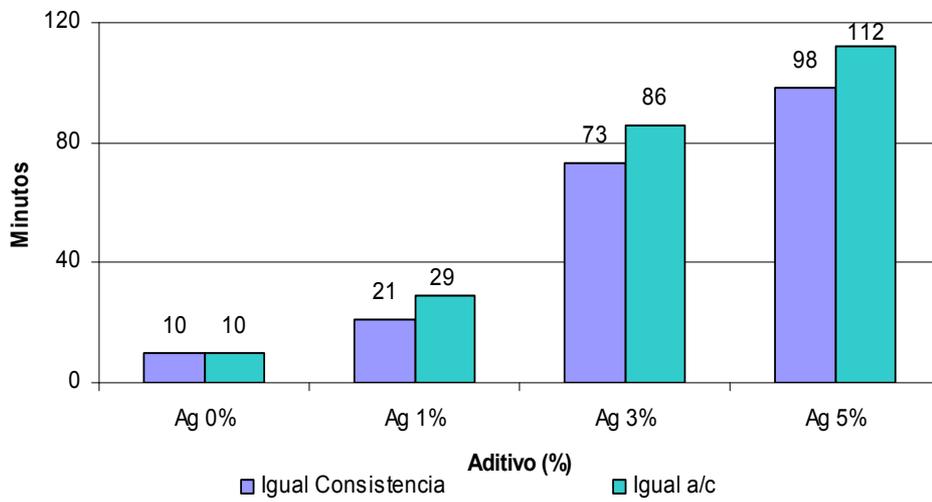
se observa, que tanto los tiempos iniciales y finales de fraguado, son mayores en las pastas con igual relación a/y que las pastas con igual consistencia. Esto se explica porque el fraguado del yeso se logra por la hidratación de su partículas, que forman cristales, que a su vez se entrelazan y producen el endurecimiento de las pasta. La mayor cantidad de agua existente en las pastas con igual relación a/y, aumentan la distancia entre las partículas hidratadas, y por lo tanto requiere de una mayor formación de cristales, para que se logre su enlace y su fraguado.



a)

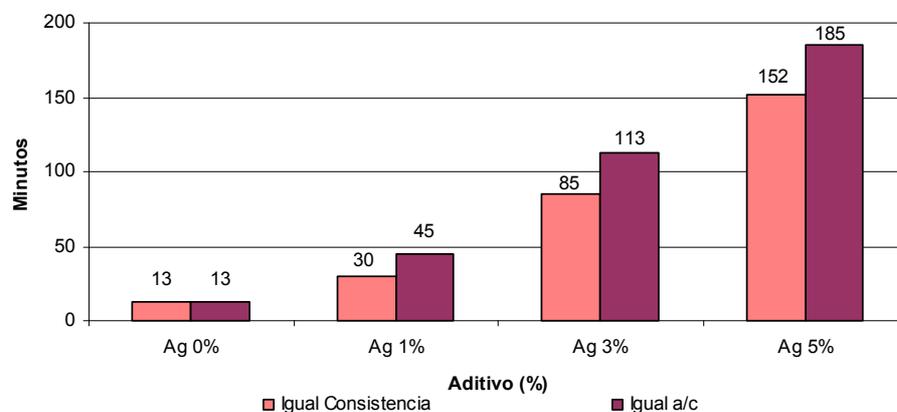


b)



c)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

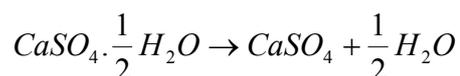


d)

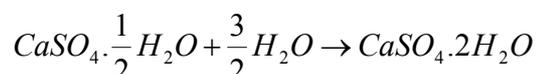
Ilustración 92. Gráficos a) tiempos de fraguado inicial y final a igual consistencia; b) tiempos de fraguado inicial y final a igual relación a/y; c) comparación entre tiempos de fraguado inicial a igual consistencia e igual relación a/y; d) comparación entre tiempos de fraguado finales a igual consistencia e igual relación a/y.

Adicionalmente se llevó a cabo una determinación de la composición del yeso mediante un analizador de humedad. El método consiste en calentar la muestra muy rápidamente (por lámpara de halógenos), a una temperatura de 180°C, durante un cierto tiempo. El aparato utilizado lleva acoplada una balanza muy precisa que registra pérdidas de peso, debido a la materia volátil que se produce durante el calentamiento.

Previamente a la aplicación de este método se ha comprobado por análisis termogravimétrico que no existe dihidrato en la muestra de yeso original. A continuación procedemos mediante el analizador de humedad a determinar el porcentaje de hemihidrato presente inicialmente en el yeso. Para ello, previamente, secamos en la estufa a 60°C, una muestra de yeso para eliminar la humedad. A continuación la sometemos al calentamiento por halógenos, obteniendo un dato de pérdida total (Pérdida total de yeso). En estas condiciones, este dato de pérdida total es debido, únicamente a la cantidad de agua químicamente combinada en el hemihidrato presente en la muestra de yeso:



Durante la determinación del tiempo inicial y final de fraguado, se produce la reacción:

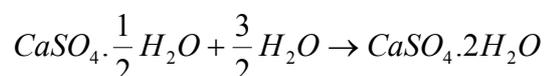


La reacción no se completa totalmente durante este tiempo, sino que sólo parte del hemihidrato reacciona con el agua para formar el dihidrato. El resto del hemihidrato sin reaccionar, lo hace más lentamente, con el exceso de agua que queda en la pasta. Por ello, con el analizador de humedad se puede determinar, también el porcentaje de dihidrato y hemihidrato que contiene una muestra de yeso fraguado, en el tiempo final de fraguado.

Con los datos de pérdida total de yeso fraguado y el original, se puede calcular el porcentaje de agua incorporada a la muestra durante el tiempo de fraguado como:

$$\%H_2O \text{ incorporada} = \% \text{ pérdida total (yeso fraguado)} - \% \text{ pérdida total (yeso original)}$$

El agua incorporada, es la que ha reaccionado con el yeso para formar el dihidrato.



Mediante cálculos estequiométricos se puede calcular el porcentaje de dihidrato formado y la cantidad de hemihidrato que queda sin reaccionar.
(76)

La determinación de la composición del yeso, se hizo con el propósito de identificar la acción del aditivo vegetal en el proceso de hidratación de las pastas de yeso, a 0,5 horas, 1, 3 y 24 horas.

Para el estudio se realizaron muestras con 0% (muestra control), 3% y 5% de aditivo, con la relación a/y constante de 0,48, y con 1%, 3% y 5% para la misma consistencia de la muestra control. Las dosificaciones que aparecen en el Cuadro 47 y Cuadro 48 son las mismas utilizadas para los estudios de consistencia y tiempos de fraguado. El método para frenar la hidratación de la pasta fue el mismo utilizado para preparar las muestras de termogravimetría en las pastas de cemento.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se evaluó la pérdida del agua combinada y el porcentaje de hemihidrato en una muestra de yeso original. El resultado que obtuvimos fue que la muestra de yeso en polvo, obtenida directamente del empaque, tuvo una pérdida por deshidratación del 5,19% lo que corresponde, estequiométricamente, a una cantidad de hemidrato 83,62%.

A continuación se evaluaron las muestras control y con aditivo. Los ensayos se realizaron, a la media hora (0,5 horas), a la 1, a las 3 y a las 24 horas. Los resultados obtenidos se muestran, en el Cuadro 49 y en el Cuadro 50 y se grafican en la Ilustración 93. Se puede observar que:

- En el gráfico a) se relacionan los datos obtenidos del porcentaje de dihidrato formado a las 0,5, 1, 3 y 24 horas de hidratado el yeso, con pastas de igual relación a/y (0,48) y con 3% y 5% de aditivo. A las 0,5 horas se observa una disminución del porcentaje de dihidrato formado a medida que se aumenta la cantidad de aditivo. Con un 3% de aditivo el porcentaje de dihidrato formado es de 50,84% y con un 5% de aditivo es de 31,85%. Ambos valores son menores que el dihidrato formado en la pasta control que fue de 68,42%.
- En ese mismo gráfico, se observa que el porcentaje de dihidrato formado a 1 hora sigue siendo menor que el control. Con un 3% el porcentaje es de 59,82% y con 5% 34,72%, ambos levemente mayores que los porcentajes obtenidos a 0,5 horas. A 3 y 24 horas, y con cualquier cantidad de aditivo, presenta una leve disminución con respecto a la muestra control. Lo que significa que el poder retardante del aditivo en el yeso se manifiesta considerablemente en la primera hora de hidratación. También se observa que la formación de dihidrato se sigue incrementando con el paso de las horas.
- En el gráfico b) se relacionan los datos obtenidos del porcentaje de dihidrato formado a las 0,5, 1, 3 y 24 horas de hidratado el yeso, con pastas de igual consistencia que la muestra control y por ende con una variación en la relación a/y. A las 0,5 horas se observa, al igual que en las pastas con igual relación a/y, una disminución del porcentaje de dihidrato formado a medida que se aumenta la cantidad de aditivo. Con un 1% de aditivo el porcentaje de dihidrato formado es de 61,98%, con un 3% es del 48,80% y con un 5% de aditivo es de 20,64%.
- En ese mismo gráfico se observa que en el comportamiento a 1 hora hay disminución en el porcentaje de dihidrato, con 3 y 5%,

respecto al mismo porcentaje a igual relación a/y, esto seguramente debido a la menor cantidad de agua de la pasta. El comportamiento a 3 y 24 horas de hidratación, es similar a las muestras a igual relación a/y.

- En el gráfico c) se determinó comparativamente la evolución de la formación del dihidrato en las pastas de yeso, con un 3% de aditivo, a igual consistencia e igual relación a/y. Se observa que el porcentaje de dihidrato formado, a 0,5 y 1 horas de hidratación, en la pasta con igual relación a/y es mayor que en la pasta con igual consistencia que la pasta control. A partir de 3 horas los valores son prácticamente iguales.
- En el gráfico d) se determinó comparativamente la evolución de la formación del dihidrato en las pastas de yeso, pero esta vez con un 5% de aditivo. El comportamiento es similar que con un 3% de aditivo. A las 0,5 y 1 horas de hidratación se observa mayor porcentaje de formación de dihidrato en la pasta a igual relación a/y que la pasta a igual consistencia. A partir de 1 hora las diferencias no son significativas.
- Se observa que a 24 horas, y en todos los casos, la hidratación del yeso dihidrato ha sido prácticamente completa.
- En general se puede decir que el aditivo funciona como un retardante de la formación de los cristales de yeso dihidrato, hasta 1 hora. Este retardo es mayor cuando la pasta se encuentra preparada a igual consistencia posiblemente porque tenemos el aditivo más concentrado, pues la cantidad de agua de amasado es menor.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuadro 49. Resultados de la hidratación del yeso a igual relación a/y (0,48)

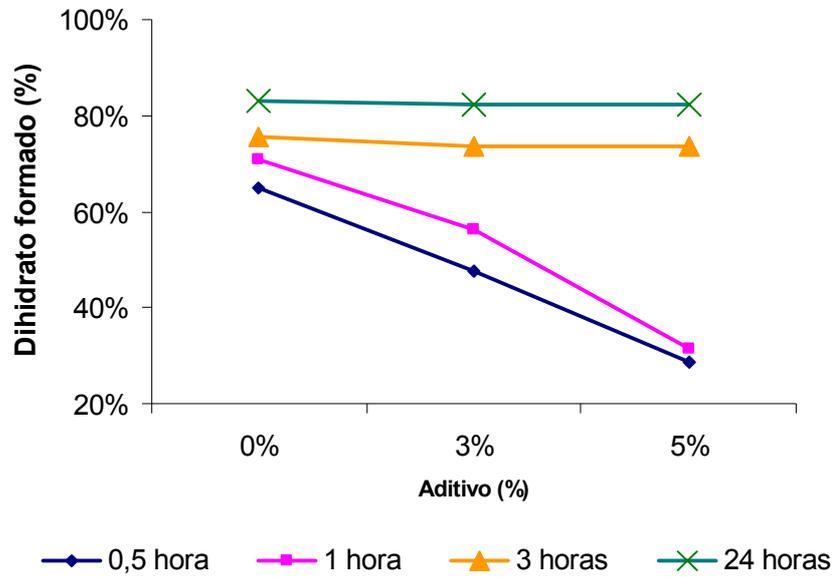
RELACIÓN A/Y 0,48						
Muestra	CaSO ₄ .1/2H ₂ O		CaSO ₄ .2H ₂ O		% dihidrato formado	% de hemihidrato sin reaccionar
	Pérdida	% hemihidrato	Pérdida	% de agua incorporada		
0,5 horas						
0%	5,19%	83,62%	15,40%	10,21%	65,04%	18,58%
3%			12,64%	7,45%	47,46%	36,16%
5%			9,66%	4,47%	28,48%	55,14%
1 hora						
0%	5,19%	83,62%	16,32%	16,32%	11,13%	70,90%
3%			14,05%	14,05%	8,86%	56,44%
5%			10,11%	10,11%	4,92%	31,34%
3 horas						
0%	5,19%	83,62%	17,04%	11,85%	75,49%	8,13%
3%			16,74%	11,55%	73,58%	10,04%
5%			16,76%	11,57%	73,71%	9,91%
24 horas						
0%	5,19%	83,62%	17,72%	13,06%	83,20%	0,42%
3%			17,57%	12,91%	82,24%	1,38%
5%			17,57%	12,91%	82,24%	1,38%

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

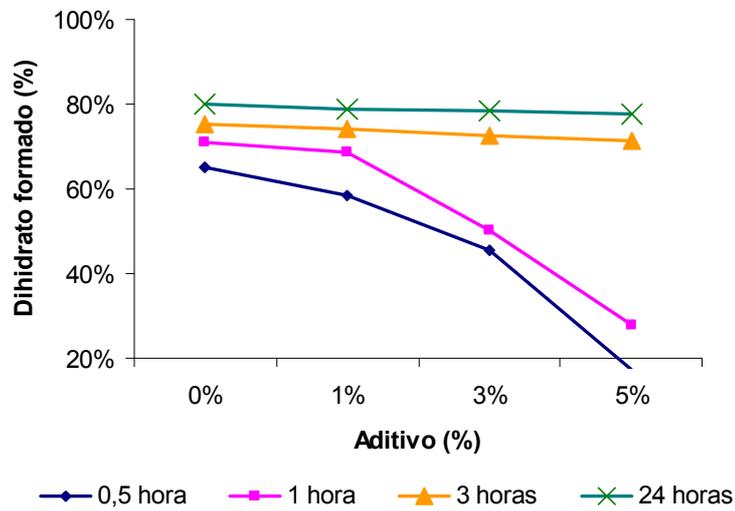
Cuadro 50. Resultados de la hidratación del yeso a igual consistencia de la muestra control

RELACIÓN a/y VARIABLE. IGUAL CONSISTENCIA						
Muestra	CaSO ₄ .1/2H ₂ O		CaSO ₄ .2H ₂ O		% dihidrato formado	% de hemihidrato sin reaccionar
	Pérdida	% hemihidrato	Pérdida	% de agua incorporada		
0,5 horas						
0%	5,19%	83,62%	15,40%	10,21%	65,04%	18,58%
1%			14,39%	9,20%	58,61%	25,01%
3%			12,32%	7,13%	45,42%	38,20%
5%			7,90%	2,71%	17,26%	66,35%
1 hora						
0%	5,19%	83,62%	16,32%	11,13%	70,90%	12,71%
1%			15,99%	10,80%	68,80%	14,82%
3%			13,08%	7,89%	50,26%	33,35%
5%			9,59%	4,40%	28,03%	55,59%
3 horas						
0%	5,19%	83,62%	17,04%	11,85%	75,49%	8,13%
1%			16,83%	11,64%	74,15%	9,47%
3%			16,57%	11,38%	72,49%	11,12%
5%			16,39%	11,20%	71,35%	12,27%
24 horas de curado						
0%	5,19%	83,62%	17,72%	12,56%	80,01%	3,60%
1%			17,58%	12,39%	78,93%	4,69%
3%			17,49%	12,30%	78,36%	5,26%
5%			17,36%	12,17%	77,53%	6,09%

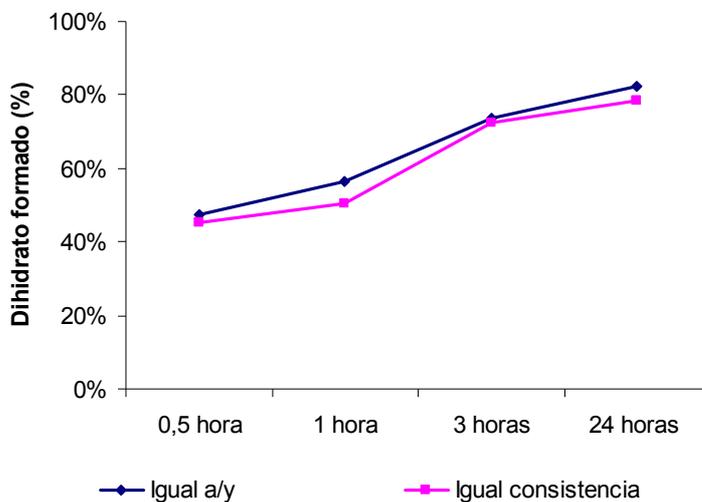
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



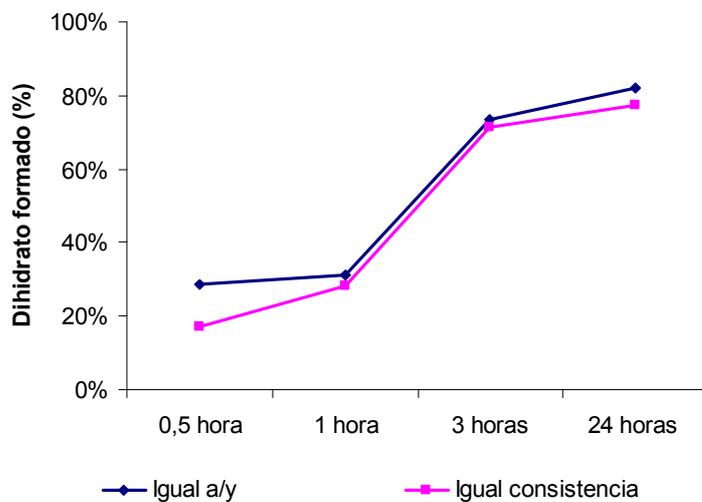
a)



b)



c)



d)

Ilustración 93. Gráficos a) porcentaje de dihidrato formado a igual relación a/y; b) porcentaje de dihidrato formado a igual consistencia c) evolución de la formación del dihidrato con un 3% de aditivo; d) evolución de la formación del dihidrato con un 5% de aditivo

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.3.3 Influencia del aditivo en las resistencias mecánicas a flexo-tracción y compresión de las pastas de yeso

Para este ensayo se elaboraron probetas a igual consistencia y a igual relación a/y de tal manera que se pudiera apreciar la variación en las resistencias mecánicas debida a la incorporación del aditivo. Las dosificaciones utilizadas se presentan en el Cuadro 51.

Cuadro 51. Dosificación de materiales para ensayos de resistencia mecánicas en yeso

Muestra	Yeso (g)	Aditivo			Agua de amasado (g)	Agua total (g)	a/y
		%	g*	H ₂ O			
1	2500	0	0	0	1200,0	1200,0	0,480
2	2500	1	25,0	24,5	1040,0	1065,0	0,426
3	2500	3	75,0	69,0	937,5	1006,5	0,403
4	2500	5	125,0	115,0	875,0	990,0	0,396
5	2500	1	25,0	24,5	1176,0	1200,0	0,480
6	2500	3	75,0	69,0	1131,0	1200,0	0,480
7	2500	5	125,0	115,0	1085,0	1200,0	0,480

*El agua del aditivo es el 92% de la masa total

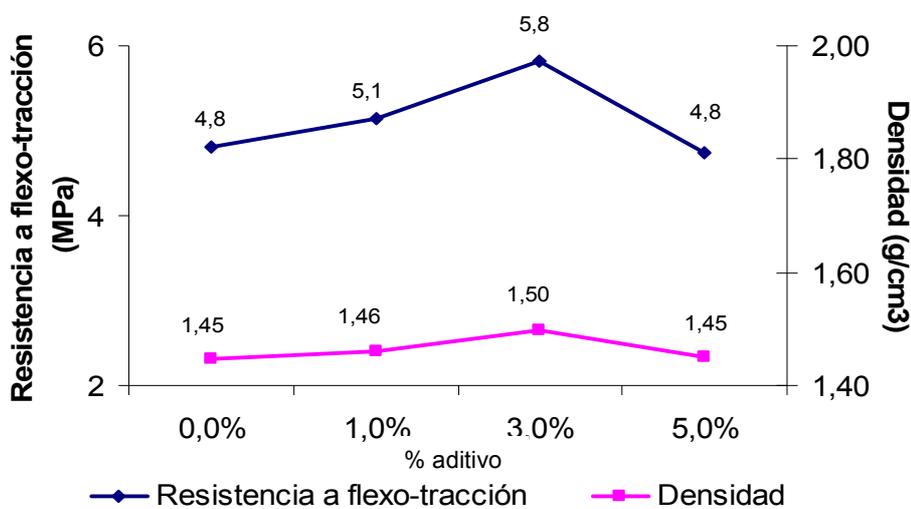
Para la fabricación de las probetas se utilizaron moldes de acero con tres compartimientos iguales cuya dimensión interior es de 160mm x 40mm x 160 mm. El yeso se amasó en amasadora mecánica fija, según el procedimiento descrito en la sección de consistencia, y se vertió en los moldes. Se sacudió el molde para evitar la aparición de burbujas de aire. Cuando la probeta adquirió una adecuada dureza, se sacó del molde, se mantuvo durante cinco (5) días en cámara húmeda (humedad relativa 90% \pm 5%) y dos (2) días en estufa a 40°C \pm 2°C. Tras su secado, las probetas se enfriaron en un desecador hasta la temperatura de laboratorio de ensayo y se pesaron. A continuación se procedió a su rotura a flexión y posteriormente a compresión. Este método es el recomendado por la norma UNE 102031 ⁽⁴⁰⁾.

En la Ilustración 94, se graficaron los datos de las resistencias a flexo-tracción y compresión en probetas de pastas de yeso a igual consistencia. Podemos observar que:

- El gráfico a) muestra las resistencias a flexo-tracción de las probetas preparadas con igual consistencia que la muestra control

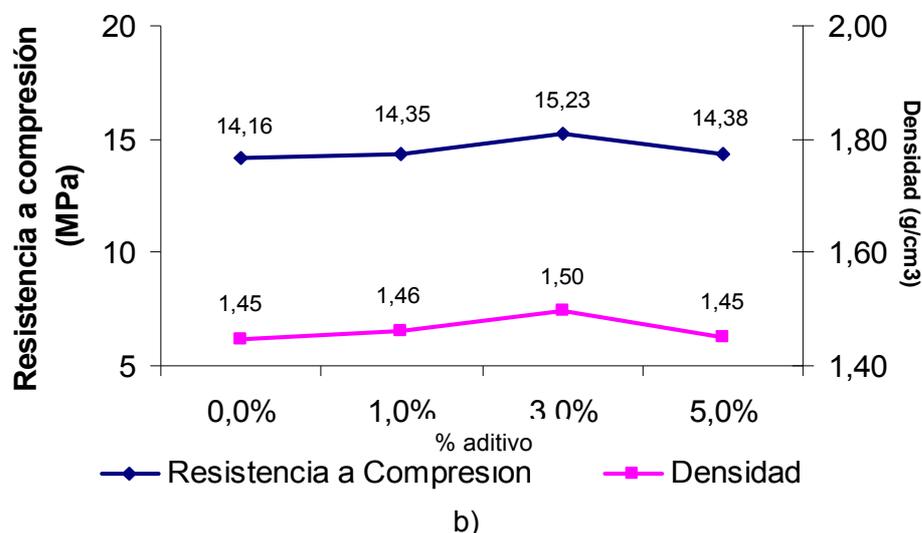
(Muestras 1, 2, 3 y 4 en el Cuadro 51). Observamos que hay un leve incremento de la resistencia cuando adicionamos 1% y 3% de aditivo. Con un 5% la resistencia se iguala a la resistencia de la probeta control. Este incremento de la resistencia está relacionado directamente con la densidad de las probetas con aditivo.

- El gráfico b), muestra las resistencias a compresión de las probetas preparadas con igual consistencia que la muestra control (Muestras 1, 2, 3 y 4 en el Cuadro 51). Se observa el mismo comportamiento de la resistencia flexo-tracción. Con 1% y 3% de aditivo hay un incremento de la resistencia pero con un 5% se disminuye, pero conserva un valor muy cercano a la probeta control.
- Este aumento de resistencias puede ser debido a la reducción en el agua de amasado (ver Cuadro 51), que evita la formación de grandes poros, producto del agua no combinada en la reacción del hemihidrato. A pesar de la oclusión de aire que hace el aditivo, no se reducen las resistencias, posiblemente por el tamaño tan pequeño de los poros y su buena distribución en la pasta.



a)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

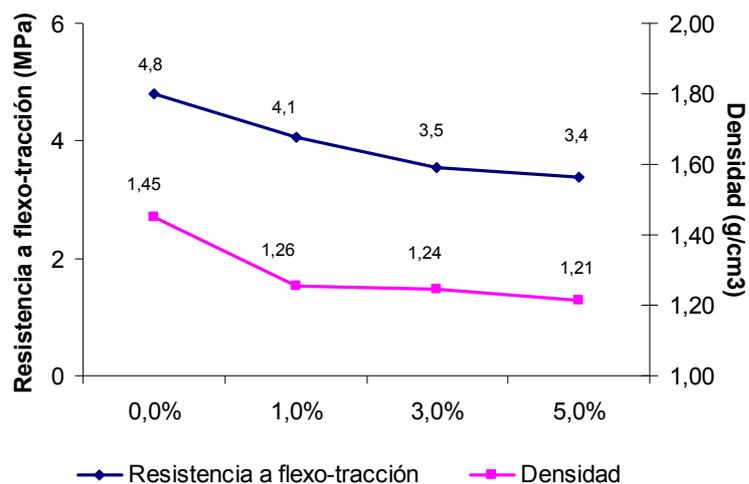


b)
Ilustración 94. Gráficos de yesos: a) resistencia a flexo-tracción a igual consistencia vs., densidad de la probeta seca; b) resistencia a compresión a igual consistencia vs., densidad de la probeta seca

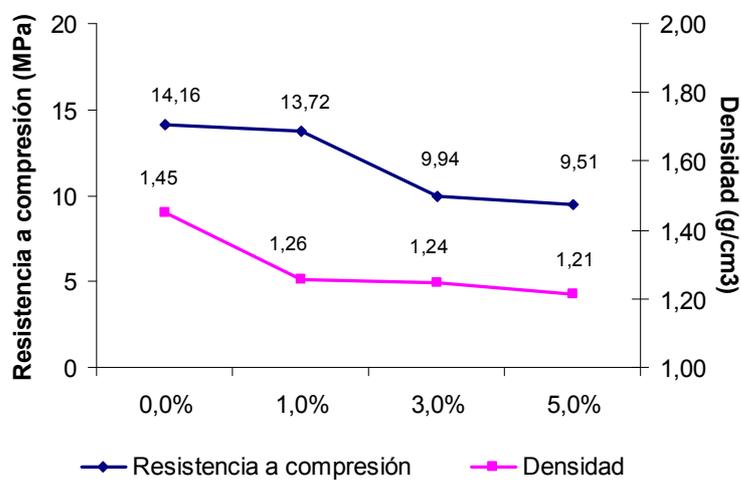
En la Ilustración 95, se graficaron los datos de las resistencias a flexo-tracción y compresión de probetas con pastas de yeso a igual relación a/y. Se puede observar que:

- En el gráfico a) aparecen los datos correspondiente a las resistencias a flexo-tracción de las probetas de yeso preparadas con igual relación a/y que la muestra control. Corresponden a las muestras 1, 5, 6 y 7 del Cuadro 51. La tendencia es que cuando se adiciona aditivo la resistencia a flexotracción se disminuye, aunque con 3% y 5% de aditivo la diferencia es muy pequeña. La densidad también tiende a disminuir a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo.
- En el gráfico b) aparecen los datos correspondiente a las resistencia a compresión de las probetas de yeso preparadas con igual relación a/y que la muestra control. Corresponden a las muestras 1, 5, 6 y 7 del Cuadro 51. La tendencia es similar a la de la resistencia a flexo-tracción. Cuando adicionamos aditivo la resistencia a compresión disminuye.

- La disminución en las resistencia mecánicas a igual relación a/y se podría atribuir a la cantidad de macroporos que se generan debido a una mayor cantidad de agua no combinada y también a la cantidad de aire ocluido por el aditivo.



a)

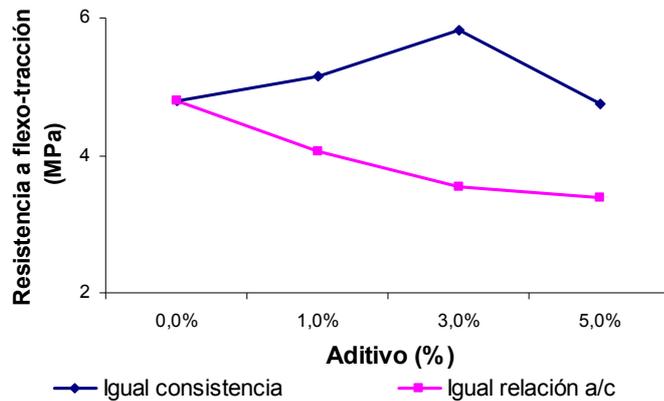


b)

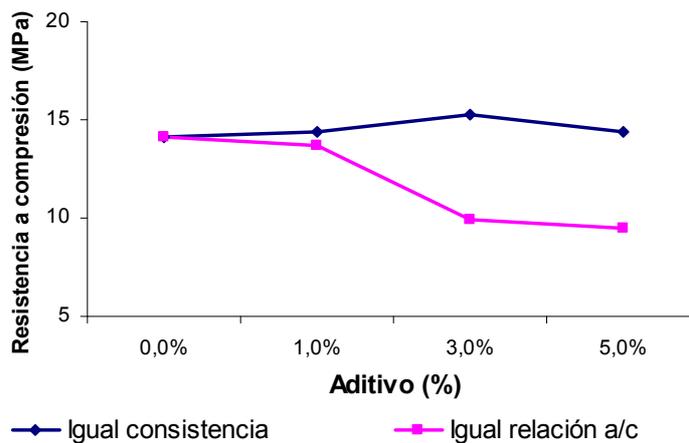
Ilustración 95. Gráficos de la resistencia mecánica a flexo-tracción y compresión en pastas de yeso a igual relación a/y: a) resistencia a flexo-tracción a igual relación a/y; b) resistencia a compresión a igual relación a/y

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comparativamente, como se observa en el gráfico a) de la Ilustración 96, la resistencia a flexo-tracción en una pasta de yeso a igual consistencia y la otra a igual relación a/y, presenta diferencias considerables, con 1% , 3% y 5% de aditivo.



a)



b)

Ilustración 96. Gráficos de comparación entre las resistencias mecánicas: a) comparación entre resistencia a flexo-tracción a igual consistencia e igual relación a/y; b) comparación entre resistencia a compresión a igual consistencia e igual relación a/y

Por el contrario, en el gráfico b) de la Ilustración 96, se observa que la diferencia entre la resistencia a compresión en una pasta de yeso a igual consistencia y la otra a igual relación a/y, con porcentajes de aditivo de 1%, es muy pequeña, pero se logra buenos aumentos con buena

consistencia de la pasta (ver Ilustración 91). La diferencia se hace notoria cuando se utiliza 3% y 5% de aditivo.

4.3.4 Conclusiones sobre pastas de yeso

1. Se podría concluir inicialmente que con una pequeña cantidad de aditivo se logran buenas consistencias y disminuciones considerables de la relación a/y pero a partir de adiciones del 3% el efecto del incremento aditivo no es significativo. Este efecto reductor de la relación a/y es el mismo que se apreció en las pastas de cemento y trae como consecuencia un aumento en las resistencias mecánicas del material.
2. La mezcla del aditivo mejora considerablemente la plasticidad de la pasta, al tiempo que retrasa los tiempos iniciales y finales de fraguado. La mejora de estas propiedades ayudaría en la aplicación de escayolas de enlucido, y a su aspecto final. De igual manera disminuiría la fisuración por retracción plástica de la pasta, situación que se observa con frecuencia en este material.
3. Es evidente el aumento en las resistencias mecánicas conservando constante la consistencia de la pasta, hasta un 3% de aditivo. Esto se explica en parte por la disminución en el agua de amasado y en el tiempo suficiente para la formación de los cristales de dihidrato.
4. Es preciso destacar que con adiciones hasta del 3%, a igual consistencia, no se presenta disminución en la densidad de la probeta, a pesar del efecto espumante e inclusor de aire del aditivo. Esto se puede atribuir a una muy buena formación de cristales que aminora el efecto de la oclusión de aire y probablemente a una buena distribución de poros en las probetas.
5. Aunque el propósito de esta tesis no es hacer un estudio exhaustivo del comportamiento de las pastas de yeso cuando se utiliza un aditivo orgánico de origen vegetal, y por lo tanto los datos no son determinantes, sí se vislumbra un posible campo de aplicación de estos aditivos en otros materiales conglomerantes con base yeso.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.4 Morteros de cemento Pórtland

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 cálcico 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 ⁽¹⁹⁾. La inclusión de aditivos modifica las cualidades de la mezcla lo que se hace apreciable en los distintos ensayos hasta ahora expuestos.

Los ensayos de morteros se realizaron comparativamente. Es decir, las prestaciones de los aditivos se determinaron por comparación entre un mortero que contenía aditivo (mortero de ensayo) y un mortero de referencia sin aditivo (mortero control). Se utilizó, en todos los casos, como mortero de referencia el mortero normalizado según la Norma EN 196-139. Se midió: la consistencia, los tiempos iniciales y finales de fraguado, la cantidad de aire ocluido, la penetración por capilaridad y las resistencias mecánicas a flexo-tracción y compresión.

4.4.1 Influencia del aditivo en la consistencia

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

Los aditivos aireantes ocluyen burbujas microscópicas, que desempeñan el papel de un fluido que reemplaza parte del agua; igualmente reemplazan por su granulometría parte del árido fino (inferior a 1 ó 2 mm). Pero, además, tiene la ventaja, sobre la arena, de poseer un mejor coeficiente de forma, de ser deformables, elásticas y de poder deslizarse sin rozamiento. Todo ello explica su papel de mejora en la reología del mortero y del hormigón en estado plástico. ⁽⁷⁷⁾

El índice de consistencia es el escurrimiento que tiene una masa de mortero específica, determinada por el volumen de un molde, después de que son aplicados quince golpes en una mesa de sacudidas especialmente

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

diseñada para ello. La dimensión del diámetro del escurrimiento nos indica la capacidad del aditivo para plastificar la mezcla cementante (y por lo tanto la facilidad de puesta en obra de un hormigón con cada uno de los aditivos). Cada índice es el promedio de tres determinaciones, sobre una mezcla de iguales características.

El primer estudio consistió en determinar la influencia del licor de *Agave americana*, en la consistencia y la relación a/c de los morteros, y compararlo con un aditivo superplastificante comercial. Se usó, en todos los casos, una cantidad de 5g de aditivo, correspondiente al 1,1%, aproximadamente, de la masa de cemento. Se amasó la muestra control, de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 3.2.4.3 del capítulo experimental.

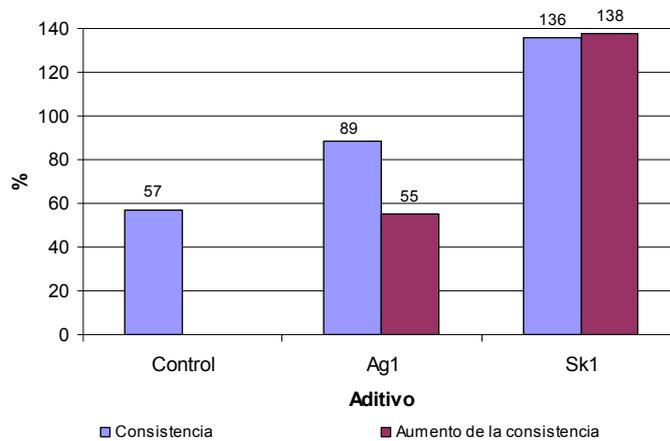
Primero se determinó la consistencia en la mesa de sacudidas de la muestra control con una relación a/c de 0,50; posteriormente se midieron las consistencias de las mezclas con adición de licor de *Agave americana* y aditivo superplastificante comercial sin variar la relación a/c. Para ello se consideró, previa determinación del extracto seco convencional, un contenido de agua del 92% para el licor de *Agave americana* y 60% para el superplastificante comercial (muestras Ag1 y SPs1). Por otra parte, y teniendo el dato de la consistencia de la muestra control, se hicieron tanteos sobre las muestras con aditivos, con distintas cantidades de agua, para obtener aproximadamente ese mismo valor de consistencia. A esas muestras las denominamos de igual consistencia (muestras Ag2 y SPs2). Las dosificaciones de material para este estudio se observan en el Cuadro 52.

Cuadro 52. Dosificación de muestras de mortero con licor de *Agave americana* y aditivo superplastificante

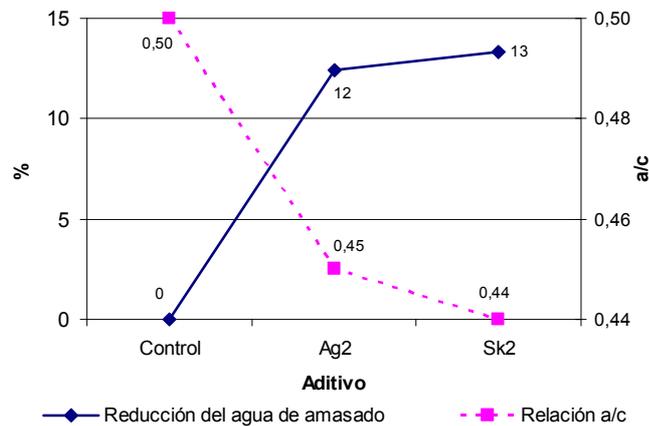
Muestra	Aditivo	Cemento (g)	Arena (g)	Aditivo		Agua			Relación a/c	Asent. %
				%	g	amasado (g)	aditivo (g)	Total (g)		
Control	Sin aditivo	450	1350	0	0	225,0		0	0,50	57
Ag1	Licor de <i>Agave americana</i>	450	1350	1,1	5	220,4	4,6	225,0	0,50	89
Ag2	Licor de <i>Agave americana</i>	450	1350	1,1	5	196,0	4,6	200,6	0,45	58
SPs1	Sikament FF	450	1350	1,1	5	222,0	3,0	225,0	0,50	136
SPs2	Sikament FF	450	1350	1,1	5	197,0	3,0	200,0	0,44	59

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Ilustración 97 se pueden hacer las siguientes observaciones: con una relación a/c constante 0,50, tanto el mortero con el aditivo de licor de *Agave americana* como el mortero con superplastificante aumentan la consistencia de la muestra con respecto a la muestra control. Con el aditivo orgánico el aumento en la consistencia es de 55% y con el superplastificante comercial es del 138% aproximadamente. Para conseguir la misma consistencia que la muestra control, tanto el aditivo orgánico como el superplastificante reducen la cantidad de agua de amasado en un 12% y en un 13% respectivamente. La diferencia entre las dos relaciones a/c obtenidas es mínima 0,45 y 0,44.



a) Valor y aumento de la consistencia. Relación a/c 0,50



b) Reducción del agua de amasado y efecto en la relación a/c
Ilustración 97. Gráficos de consistencia en morteros con aditivo de *Agave americana* y superplastificante

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

En un estudio posterior se buscó determinar la influencia del aditivo cuando se mezcla con el mortero en distintos porcentajes con respecto a la masa de cemento: 1%, 3% y 5%, variando la relación a/c para una misma consistencia. Esta vez se comparó con un aditivo aireante, Micro-Air 100 de la empresa Bettor, cuya descripción se encuentra en la sesión 3.1.8 del capítulo experimental. Las dosificaciones para esos estudios aparecen en el Cuadro 53.

Cuadro 53. Dosificación de muestras de mortero con licor de *Agave americana* y aditivo aireante para ensayo de consistencia

Muestra	Aditivo	Cemento (g)	Arena (g)	Aditivo		Agua			Relación a/c
				%	g	amasado (g)	aditivo (g)	Total (g)	
Control	Sin aditivo	450	1350	0	0	225		0	0,50
1%	Licor de <i>Agave americana</i>	450	1350	1	4,50	200	4,14	204,14	0,45
3%	Licor de <i>Agave americana</i>	450	1350	3	13,50	180	12,42	192,42	0,43
5%	Licor de <i>Agave americana</i>	450	1350	5	22,5	165	20,70	185,70	0,41
MA	Micro-Air 100	450	1350	0,26	1,17	210	1,02	211,02	0,47

En la Ilustración 98, se puede observar:

- A medida que se incrementa el porcentaje de aditivo se reduce el agua total de la mezcla (agua de amasado más agua del aditivo).
- Con un 1% de licor de *Agave americana* la disminución en el agua total es de 12%, con un 3% de aditivo orgánico la disminución en el agua total es de 15% y con un 5% de aditivo orgánico es de 18%. Esto produce una disminución en la relación a/c de 0,45, 0,43 y 0,41 respectivamente debido al efecto lubricante que el aditivo ejerce entre las partículas de cemento y de éstas con los áridos.
- El efecto del aditivo aireante Micro-Air 100 no es tan grande como el aditivo orgánico: la reducción del agua total de amasado es del 6% y el correspondiente valor de la relación a/c es de 0,47.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

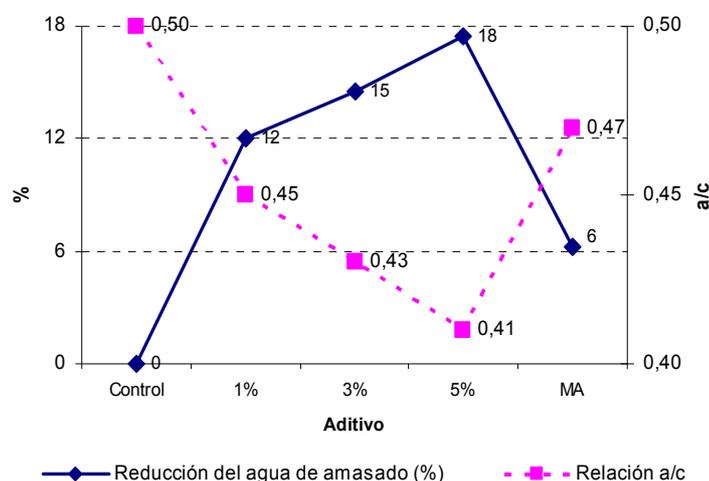


Ilustración 98. Gráfico de consistencia en morteros con 1%, 3% y 5% de aditivo de *Agave americana* y aireante Micro-Air 100

4.4.2 Conclusiones sobre la influencia del aditivo en la consistencia

- El aditivo de licor de *Agave americana*, actúa como un plastificante pues aumenta la consistencia del mortero, pero no alcanza los niveles de un superplastificante comercial aunque supera a un aditivo inductor de aire comercial como el Micro Air 100 incluso en porcentajes bajos de adición (1%).
- La cantidad de aditivo requerida, para obtener la misma consistencia de la muestra control, es similar para el licor de *Agave americana* y para el superplastificante comercial.
- Con adiciones entre el 1% y 3% de aditivo orgánico, se logra el mismo efecto reductor de agua que el del superplastificante, conservando la misma consistencia de la muestra control.

4.4.3 Influencia del aditivo en los tiempos de fraguado del mortero

Las condiciones de fraguado del mortero y del hormigón son importantes no sólo para regular los tiempos de mezclado, transporte y colocación de la

mezcla, sino porque de ellas dependen también muchas propiedades posteriores. Los aditivos retardantes se emplean principalmente para reducir el efecto acelerante del clima cálido sobre el fraguado del hormigón, o simplemente para retrasar el fraguado inicial cuando las condiciones de colocación y compactación son dispendiosas, como en el caso de elementos muy esbeltos (columnas largas) o bombeos a grandes distancias. ⁽⁷⁸⁾

Se pretende con este ensayo determinar el comportamiento de los tiempos de fraguado de los morteros, por la presencia del licor de *Agave americana* en la proporciones indicadas anteriormente: igual relación a/c e igual consistencia, y compararla con el comportamiento que presenta un mortero control y un mortero con aditivo superplastificante comercial.

El principio del ensayo consiste en medir la resistencia a la penetración que opone un mortero a una aguja cuyo peso está especificado en 1000g. El procedimiento seguido es de la norma UNE-EN 480-2 y se encuentra explicado en la sección 3.2.4.1 del capítulo experimental.

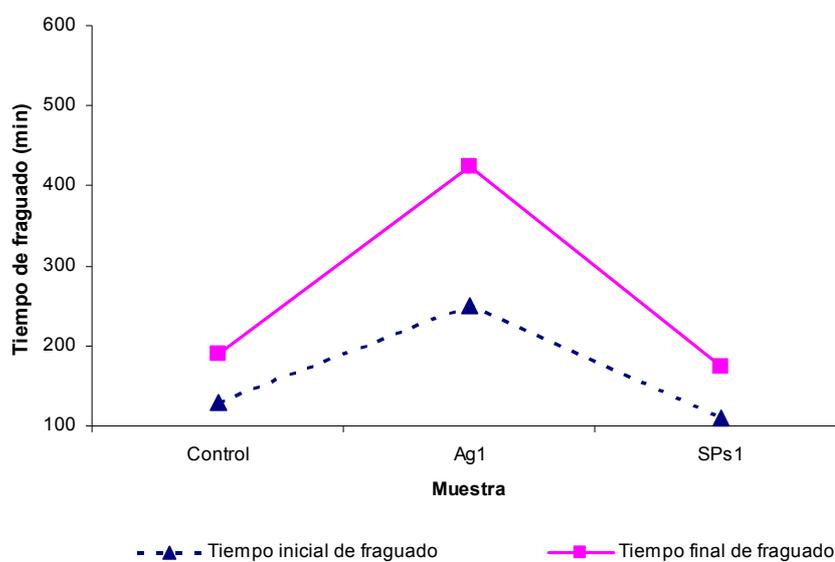
Los resultados se observan en el Cuadro 54 y se grafican en la Ilustración 99. Se puede decir que:

- Tanto en los morteros con relación a/c constante, como en los morteros a igual consistencia con licor *Agave americana*, se incrementan los tiempos inicial y final de fraguado con respecto a la muestra control, siendo mayores los tiempos en los morteros con igual consistencia debido, posiblemente, a la mayor concentración de aditivo.
- En los morteros con igual consistencia se produce un aumento en el tiempo inicial y final de fraguado, cuando se adiciona el licor de *Agave americana*, respecto a la muestra control y a la muestra con aditivo superplastificante SPs1. Con el aditivo superplastificante, los tiempos de fraguado respecto a la muestra control son casi los mismos, determinando un efecto no significativo en el mortero.
- En los morteros con igual relación a/c, el comportamiento de ambos aditivos, es similar a los morteros con igual consistencia. Sin embargo, cabe anotar, que el intervalo entre el tiempo inicial y final de fraguado cuando se utiliza el licor de *Agave americana* es mayor que en la muestra realizada a la misma consistencia.

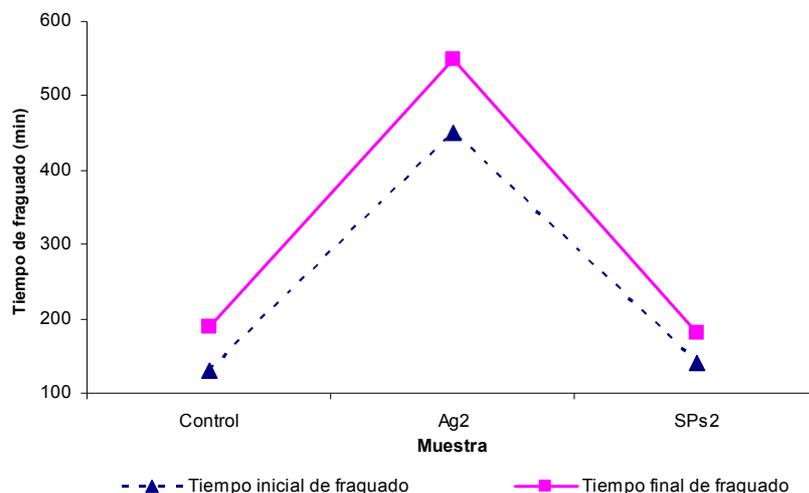
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuadro 54 Tiempos de fraguado en morteros

Muestra	a/c	Fraguado Inicial	Fraguado Final
		Min	min
Control	0,5	130	190
Ag1	0,5	250	425
Ag2	0,45	450	550
SPs1	0,5	110	175
SPs2	0,44	140	180



a)



b)

Ilustración 99. Gráficos de tiempos de fraguado en mortero a) tiempos de fraguado a igual relación a/c; b) tiempos de fraguado a igual consistencia

4.4.4 Conclusiones sobre la influencia del aditivo en los tiempos de fraguado

- De acuerdo a los valores de tiempos de fraguado establecidos por la Norma Europea, el licor de *Agave americana* se puede clasificar como un aditivo retardador de fraguado: fraguado inicial \geq al tiempo de la muestra control mas 90 minutos y el fraguado final \leq al tiempo de la muestra control mas 360 minutos.
- A menor relación a/c y uso del licor del *Agave* son mayores los tiempos de fraguado debido, posiblemente, a la mayor concentración de sustancias activas.
- El superplastificante comercial no tiene efectos sobre los tiempos de fraguado del mortero.

4.4.5 Influencia del aditivo en la absorción capilar

La permeabilidad del hormigón, consiste en que éste pueda ser atravesado por un fluido (agua, aire, vapor de agua) a causa de una diferencia de presión entre las dos superficies opuestas del material.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La permeabilidad de un mortero y hormigón depende de la porosidad de la pasta de cemento y de la porosidad de los agregados, así como de los vacíos causados por una compactación deficiente o por los poros capilares dejados por el agua de exudación. En general, se ha mencionado que este porcentaje de vacíos en un hormigón adecuadamente consolidado puede ser de aproximadamente del 1% (aire naturalmente atrapado). Sin embargo, en la práctica se ha determinado que la permeabilidad del hormigón depende principalmente de la permeabilidad de la pasta de cemento, probablemente debido a que, en un hormigón adecuadamente compactado, las partículas del árido quedan envueltas por la pasta de cemento. Por otra parte la permeabilidad de la pasta de cemento depende de la cantidad de poros y de su distribución. En el caso de relaciones a/c bajas, el volumen de poros grandes se reduce y causa, por lo tanto, una reducción en la permeabilidad de la pasta de cemento endurecida. La permeabilidad del hormigón está asociada a su vulnerabilidad al ataque de muchas sustancias que los pueden deteriorar.

Para medir la permeabilidad de los morteros con distintos aditivos se usa el ensayo de absorción capilar. Consiste en medir la masa de agua absorbida por una probeta de mortero en un tiempo determinado. En nuestro caso decidimos medir la absorción capilar de los morteros a 7 y 90 días de curado. La probetas se fabricaron según la norma UNE-EN 196-139, a una temperatura controlada de $20 \pm 2^\circ \text{C}$ y una humedad relativa de $65 \pm 5\%$. El procedimiento se describe en la sección 3.2.4.2, del capítulo experimental.

Se usaron la mismas dosificaciones de los ensayos de consistencia y tiempos de fraguado para la elaboración de las probetas. De tal manera que los resultados se observan en probetas a igual relación a/c y a igual consistencia que la muestra control. (Cuadro 52)

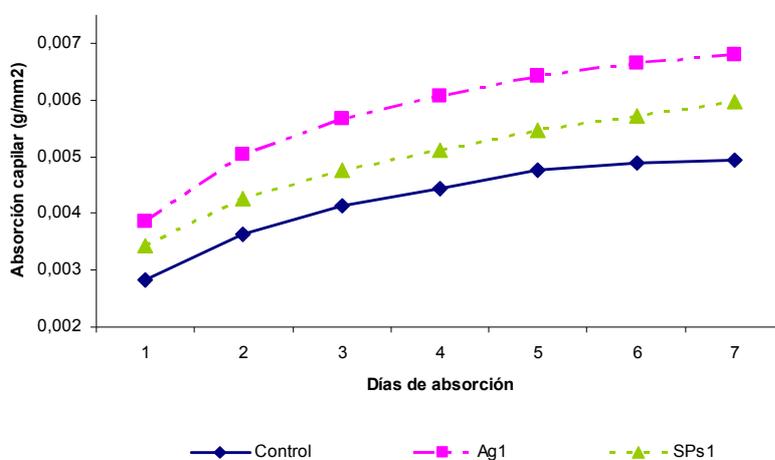
4.4.5.1 Absorción capilar a los 7 días de curado

La determinación de la absorción capilar a los 7 días de curado se llevó a cabo mediante la medida de la masa promedio de tres probetas por cada muestra. En este ensayo las probetas se curaron 7 días al aire y posteriormente se sumergieron parcialmente en agua y se pesaron, de acuerdo al procedimiento descrito, cada día hasta los 7 días que indica el ensayo de absorción capilar.

En Ilustración 100 se pueden observar los resultados cuando se comparan las muestras con relación a/c constante y con igual consistencia:

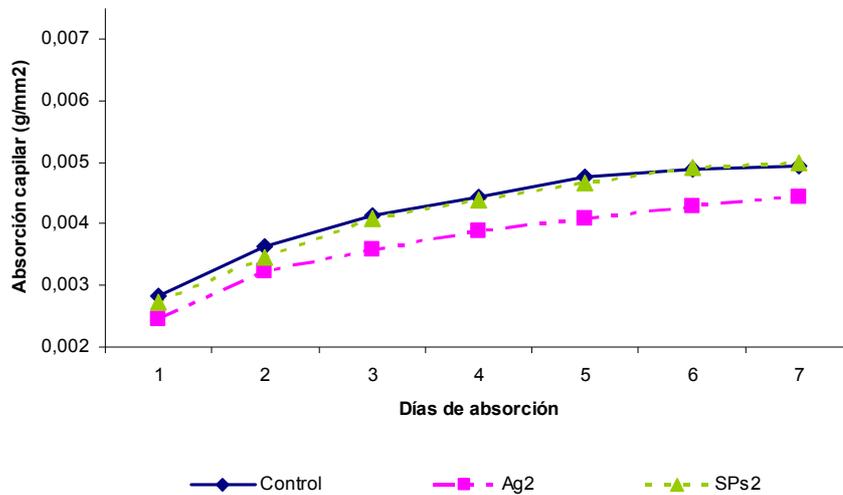
JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

- La absorción capilar, en todos los casos, es menor cuando las muestras se fabricaron a igual consistencia respecto a las fabricadas a relación a/c constante.
- Con la relación a/c constante, las probetas con aditivo, muestran mayor absorción capilar que las probetas control, siendo mayor la absorción cuando se utiliza el aditivo orgánico Ag1.
- Cuando las muestras tienen igual consistencia, la absorción capilar de la muestra control y la del superplastificante comercial (SPs2) son similares. Por el contrario, la absorción capilar de las probetas en que se utilizó el aditivo vegetal es significativamente menor.
- Los datos extremos, la mayor y la menor absorción capilar, se presenta en la muestra con licor de *Agave americana*, a igual relación a/c e igual consistencia, respectivamente. Esto nos induce a pensar que existe un valor máximo y mínimo de cantidad de aditivo que sería el óptimo de consistencia para disminuir la absorción capilar respecto a la muestra testigo y a la muestra con una aditivo comercial.



a)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



b)

Ilustración 100. Gráficos de la absorción capilar en morteros a los 7 días de curado a) a/c constante; b) igual consistencia

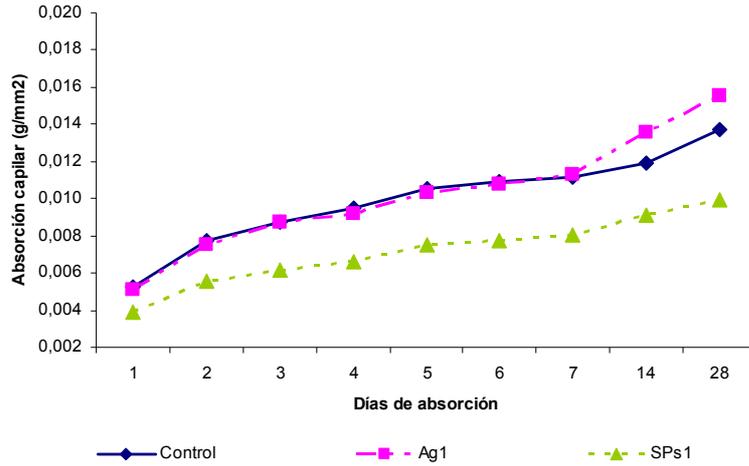
4.4.5.2 Absorción capilar a los 90 días de curado

La determinación de la absorción capilar a los 90 días de curado se realizó mediante la medida de la masa promedio de tres probetas por cada muestra. En este ensayo las probetas se curaron 90 días al aire, de acuerdo al procedimiento descrito, se sumergieron parcialmente en agua y posteriormente se pesaron, cada día hasta los 28 días.

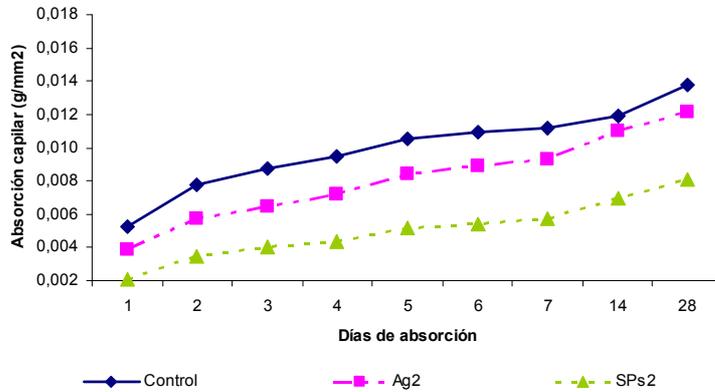
En la Ilustración 101, se observan los resultados comparativos de las muestras con relación a/c constante y con igual consistencia:

- A igual consistencia la absorción capilar, en todos los casos, es menor que cuando las probetas son fabricadas a relación a/c constante.
- Con la relación a/c constante, las probetas con aditivo orgánico de licor de *Agave americana*, muestran un comportamiento similar a la muestra control hasta los 7 días, a partir de allí la muestra con aditivo orgánico presenta una mayor absorción capilar que la muestra control y la muestra con superplastificante. La absorción capilar con superplastificante es menor que las otras dos en todos los tiempos de medida.

- Cuando las muestras tienen igual consistencia, la absorción capilar de la muestra control indica una mayor absorción capilar respecto de la muestra con aditivos. La muestra con aditivo orgánico es menor que la muestra control pero mayor que la muestra con superplastificante.



a)



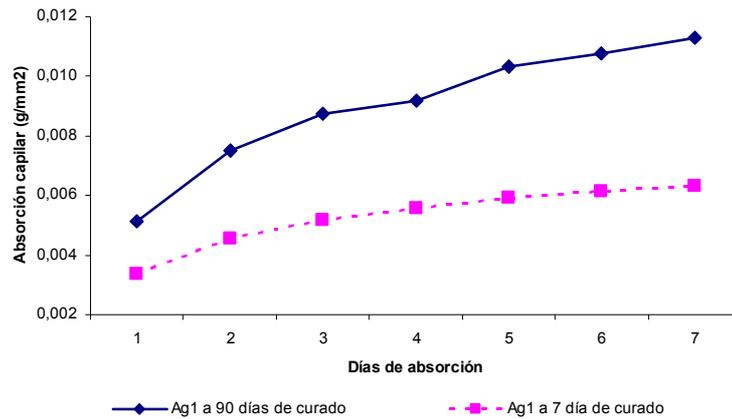
b)

Ilustración 101. Gráficos de la absorción capilar en morteros a los 90 días de curado a) a/c constante; b) igual consistencia

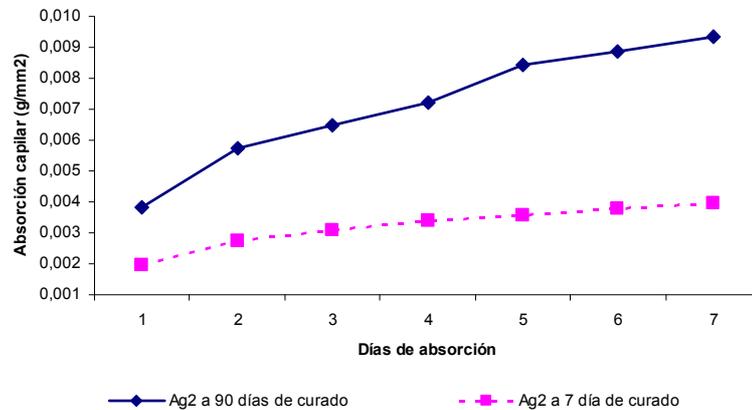
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Ilustración 102 a) se grafican los datos comparativos para 7 y 90 días de curado e igual relación a/c. En la Ilustración 102 b) los mismos datos pero para igual consistencia.

Se observa que, en ambos casos, la absorción capilar es menor a los 7 días de curado que a los 90 días de curado ya que el curado se hizo al aire con humedad relativa del 65%, y por ello la evaporación del agua y la capilaridad es mayor.



a) igual a/c



b) igual consistencia

Ilustración 102. Gráficos comparativos de la absorción capilar a 7 y 90 días de curado a) igual a/c; b) igual consistencia

4.4.6 Conclusiones de la influencia del aditivo en la absorción capilar

- El licor de *Agave americana*, reduce la absorción capilar de los morteros cuando están fabricados con igual consistencia que una muestra control.
- Cuando se fabrican con igual relación a/c, por el contrario tiende a aumentar la absorción capilar, sobre todo, a los 7 días de curado al aire.
- El superplastificante comercial reduce sustancialmente la absorción capilar de los morteros, posiblemente por la mayor densificación de la masa.

4.4.7 Influencia del aditivo en el contenido de aire ocluido

El hormigón endurecido, además del cemento hidratado y de los áridos, contiene huecos, de forma y dimensiones varias. En el caso de un hormigón sin aditivos, estos huecos tienen múltiples orígenes: aire arrastrado naturalmente durante el amasado; aire procedente de una evaporación del agua del hormigón (como es sabido se requiere de un exceso de agua para la puesta en obra correcta del hormigón y que sólo un 50%, aproximadamente, de este agua es necesaria para la hidratación completa del cemento). Estos huecos adoptan formas más o menos regulares que van desde los canales capilares muy finos hasta las cavidades de varios milímetros; en la mayoría de los casos, su presencia, disminuye las resistencias de los hormigones.

El aire ocluido debido a los aditivos, por el contrario, tiene propiedades muy diferentes. Se trata de burbujas de forma redondeada, cuyos diámetros oscilan entre 10 y 1000 micras, y que en su mayor parte, generalmente, está comprendida entre las 25 y las 250 micras.

Estas burbujas están separadas unas de otras; poseen una curva granulométrica continua, cuya zona cubre la de los cementos y la arena más fina del mortero y hormigones. La distancia entre las burbujas es variable: de 100 a 200 micras. El número de burbujas está comprendido entre 100000 y 4000000 por cm^3 , lo que representa una superficie del orden de $300 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ de hormigón. Actúan tanto sobre el hormigón fresco como sobre el hormigón endurecido. Lo que cuenta, por otra parte, no es tanto el porcentaje de aire ocluido, sino el tamaño de las burbujas y su

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

distribución. El estudio de la estructura de poros será abordado en el subcapítulo de hormigones en estado endurecido.

Para determinar la cantidad de aire ocluido en el mortero se utilizan dos métodos: el método de presión y el método de densidad seca. El primero es un ensayo característico de medida de aire ocluido en morteros en estado fresco, mientras el segundo se usa en los morteros en estado endurecido. Los resultados comparativos entre ambos nos permiten saber la estabilidad que tienen las burbujas que se forman, en el momento del amasado, por efecto del licor de *Agave americana*.

El método de presión determina, en porcentaje de volumen, el aire ocluido en los morteros frescos, con y sin aditivos, mediante la inyección de aire a presión a una masa de mortero determinada (aproximadamente 1 litro). El procedimiento se describe en la sección 3.2.4.4.

Un aditivo se clasifica como ocluidor de aire, según la Norma Europea, cuando el aire en un mortero fresco es \geq del 2,5% en volumen de la muestra control.

Se fabricaron las mismas muestras que para los ensayos anteriores y sus dosificaciones se encuentran definidas en el Cuadro 52.

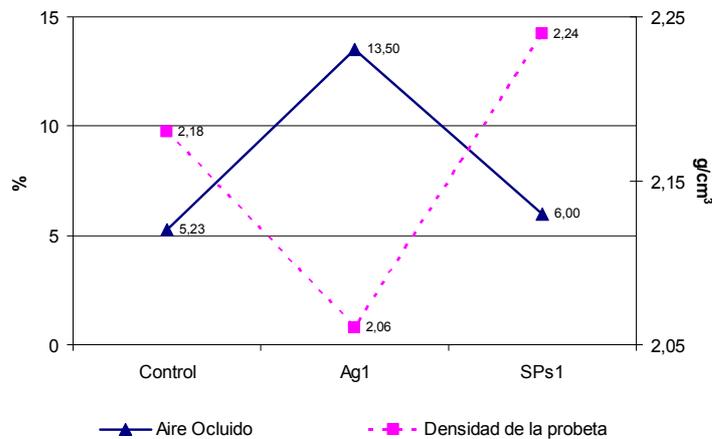
Las muestras fueron preparadas siguiendo el procedimiento descrito en la sección 3.2.4.4, con muestras comparativas a igual relación a/c e igual consistencia. De cada muestra se hicieron tres determinaciones.

En la Ilustración 103 a) se grafican los datos obtenidos para las muestras a igual relación a/c y en la b) las muestras con igual consistencia. En ambos casos se comparan con la densidad en seco de las probetas obtenidas de las mismas muestras a 28 días. Se observa que:

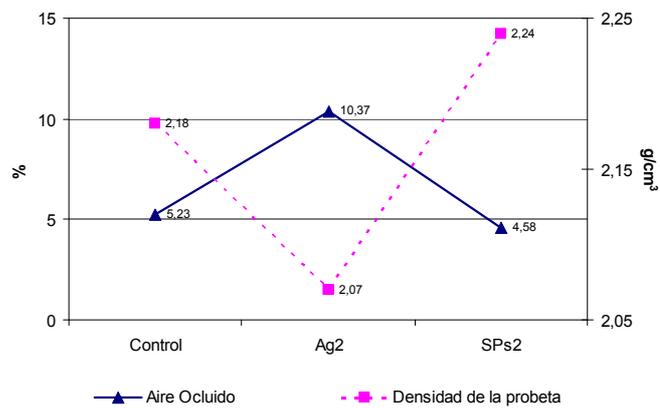
- La cantidad de aire ocluido es mayor cuando se adiciona el licor de *Agave americana*, en ambos casos. La densidad de la probeta en estado endurecido disminuye cuanto mayor es la cantidad de aire ocluido.
- A igual relación a/c se observa una mayor cantidad de aire ocluido. Esto se podría atribuir a la mayor cantidad de agua que mejora el efecto espumante del licor del *Agave*.
- La muestra del superplastificante comercial, a igual relación a/c, aumenta ligeramente la cantidad de aire respecto de la muestra control, quizá por el aumento en la cantidad de agua de amasado.

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

- La muestra del superplastificante comercial, a igual consistencia, muestra una cantidad de aire ocluido ligeramente menor a la muestra control quizá por el hecho de que compacta mejor y permite la liberación de aire ocluido
- La mayor densidad, con respecto a la muestra control, se observa en las muestras con superplastificante. Lo que nos induce a pensar que este aditivo además de aumentar la consistencia aumenta la compacidad de la mezcla.



a)



b)

Ilustración 103. Gráficos comparativos del aire ocluido en estado fresco por el método de presión y la densidad de las probetas a) igual a/c; b) igual consistencia

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.4.8 Conclusiones de la influencia del aditivo en el contenido de aire ocluido

- El aditivo de licor de *Agave americana*, ocluye altos porcentajes de aire en volumen, comparados con la muestra control y con el aditivo superplastificante, debido a su capacidad espumante.
- A igual relación a/c hay mayor cantidad de aire ocluido. Posiblemente, la mayor cantidad de agua aumenta el efecto espumante del aditivo orgánico.
- El aire ocluido permanece después de endurecido el mortero. Esto se evidencia en la densidad de las probetas y posiblemente por la resistencia de las burbujas al impacto de mezclado.
- El aditivo superplastificante comercial no actúa como aireante. Al parecer, el porcentaje de aire ocluido que se genera en la mezcla fresca no permanece, seguramente debido a que se libera en el proceso de compactación de la probeta.

4.4.9 Influencia del aditivo en las resistencias mecánicas

El objetivo de esta sección es estudiar el comportamiento a compresión y flexo-tracción de los morteros fabricados con licor de *Agave americana* y los resultados compararlos con los de un superplastificante comercial, a igual relación a/c y a igual consistencia.

Las resistencias mecánicas de los morteros con aditivos aireantes disminuyen por la presencia de las burbujas y por la disminución de la densidad. La norma europea considera, para el caso de la resistencia a compresión, que esta disminución no debe ser menor que el 75% de la resistencia de la muestra control. Para el caso de los superplastificantes se ha demostrado, que se producen incrementos en la resistencia a la compresión, flexión y módulo de elasticidad, en hormigones de alta trabajabilidad, autocompactantes, a igual relación a/c que en una muestra sin aditivo.

Las probetas se fabricaron con relación a/c constante y a igual consistencia respecto de la muestra control, de acuerdo a las dosificaciones que se presentan en el Cuadro 55; y con distintos porcentajes de aditivo de *Agave americana* tal como se define en el Cuadro 56. Se ensayaron mecánicamente a los 3, 7, 14, 28 y 90 días para las dosificaciones a relación a/c constante e igual consistencia de la muestra control y a los 3, 7, 14 y 28 días para las dosificaciones con distintos porcentajes de aditivo de *Agave americana*. Para todos los

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

ensayos se siguió el procedimiento descrito en la sección 3.2.4.5. del capítulo experimental.

Cuadro 55. Dosificación de muestras de mortero para resistencias mecánicas. Relación a/c constante e igual consistencia

Muestra	Aditivo	Cemento (g)	Arena (g)	Aditivo		Agua			Relación a/c
				%	g	amasado (g)	aditivo (g)	Total (g)	
Control	Sin aditivo	450	1350	0	0	225,0		0	0,50
Ag1	Licor de <i>Agave americana</i>	450	1350	1,1	5	220,4	4,6	225,0	0,50
Ag2	Licor de <i>Agave americana</i>	450	1350	1,1	5	196,0	4,6	200,6	0,45
SPs1	Sikament FF	450	1350	1,1	5	222,0	3,0	225,0	0,50
SPs2	Sikament FF	450	1350	1,1	5	197,0	3,0	200,0	0,44

Cuadro 56. Dosificación de muestras de mortero para resistencias mecánicas. Distintos porcentajes de aditivo e igual consistencia

Muestra	Aditivo	Cemento (g)	Arena (g)	Aditivo		Agua			Relación a/c
				%	g	amasado (g)	aditivo (g)	Total (g)	
Control	Sin aditivo	450	1350	0	0	225,0		0	0,50
1%	Licor de <i>Agave americana</i>	450	1350	1	4,50	200,0	4,14	204,14	0,45
3%	Licor de <i>Agave americana</i>	450	1350	3	13,50	180,0	12,42	192,42	0,43
5%	Licor de <i>Agave americana</i>	450	1350	5	22,5	165,0	20,70	185,70	0,41
MA	Micro-Air 100	450	1350	0,26	1,17	210,0	1,02	211,02	0,47

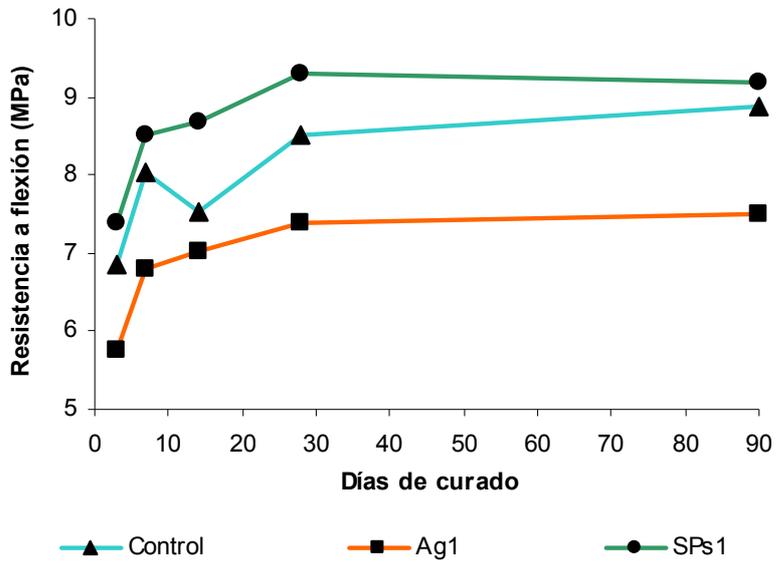
4.4.9.1 Resistencia mecánica a flexo-tracción

La resistencia a flexo-tracción se evaluó en probetas con un 1,1% de aditivo de licor de *Agave americana* y superplastificante, con relación a/c constante y con igual consistencia que la muestra control. Igualmente se evaluó la resistencia a flexo-tracción con un 1%, 3% y 5% de aditivo de *Agave americana* y con un 0,26% de aditivo aireante comercial a igual consistencia de la muestra control.

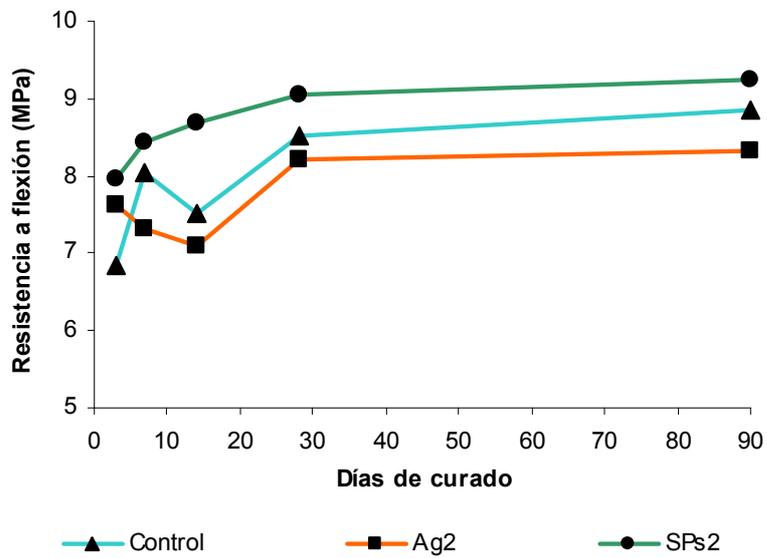
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Ilustración 104 se muestran los resultados obtenidos para los ensayos de flexotracción en probetas de mortero. Las observaciones son las siguientes:

- La resistencia a flexo-tracción de la muestra con un 1,1% de licor de *Agave americana* y con relación a/c constante es menor que la muestra control en todas las edades (Ilustración 104 a). Esta misma muestra, a igual consistencia que la muestra control, evidencia un leve incremento de resistencia los 3 días de curado y es prácticamente igual a la muestra control en las otras edades (Ilustración 104 b). Esto debido a la menor cantidad de agua libre en la mezcla.
- La resistencia a flexo-tracción de la muestra con 1,1% de aditivo superplastificante, en ambos casos es mayor que la muestra control y la muestra del aditivo orgánico. Además de la reducción en el agua de amasado posiblemente algunas sustancias presentes en el aditivo comercial mejoran la resistencia del mortero.
- Las resistencias a flexo-tracción de las muestras con un 1% y un 3% de licor de *Agave americana*, presentan un comportamiento similar a los 7 días de curado que la muestra control y un ligero aumento de resistencia a los 28 días de curado, debido a la disminución en el agua de amasado. (Ilustración 104 c)
- La resistencia a flexo-tracción de la muestra con un 5% de licor de *Agave americana* es significativamente menor que la resistencia de la muestra control para todas las edades de curado debido al aumento en el agua de amasado y a la creación de poros generados por el agua evaporada.
- La resistencia a flexo-tracción de la muestra con un 0,26% de aireante comercial es claramente menor que la resistencia de la muestra control y la muestra con un 5,0% de licor de *Agave americana*. (Ilustración 104 c)

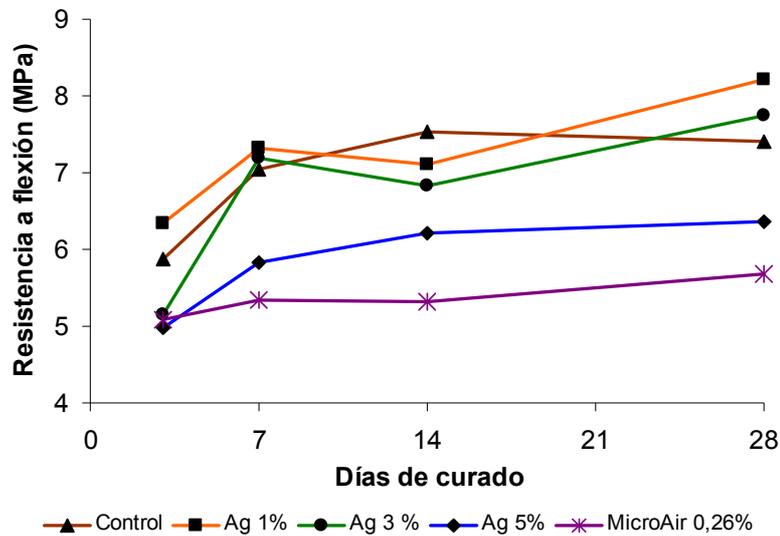


a)



b)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



c)

Ilustración 104. Gráfico comparativo de resistencia a flexo-tracción de probetas de mortero a) igual a/c; b) igual consistencia; c) distintos porcentajes de aditivo e igual consistencia

En resumen, la presencia del aditivo disminuye la resistencia a flexo-tracción de los morteros debido al aumento en la porosidad que deja el agua evaporada que no alcanza a reaccionar con el cemento, aunque a igual consistencia, los valores de flexo-tracción del mortero con 1 y 3% de aditivo orgánico son similares al control por la disminución en el agua de amasado. Respecto a los aditivos comerciales a igual consistencia, mientras que el aditivo superplastificante mejora la resistencia, el agente aireante la disminuye de manera importante más que un 5% del aditivo orgánico.

4.4.9.2 Resistencia mecánica a compresión

La resistencia a compresión se evaluó en probetas con un 1,1% de aditivo de licor de *Agave americana* y superplastificante, con relación a/c constante y con igual consistencia que la muestra control. Igualmente se evaluó la resistencia a compresión con un 1%, 3% y 5% de aditivo de *Agave americana* y con un 0,26% de aditivo aireante comercial a igual consistencia que la muestra control.

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

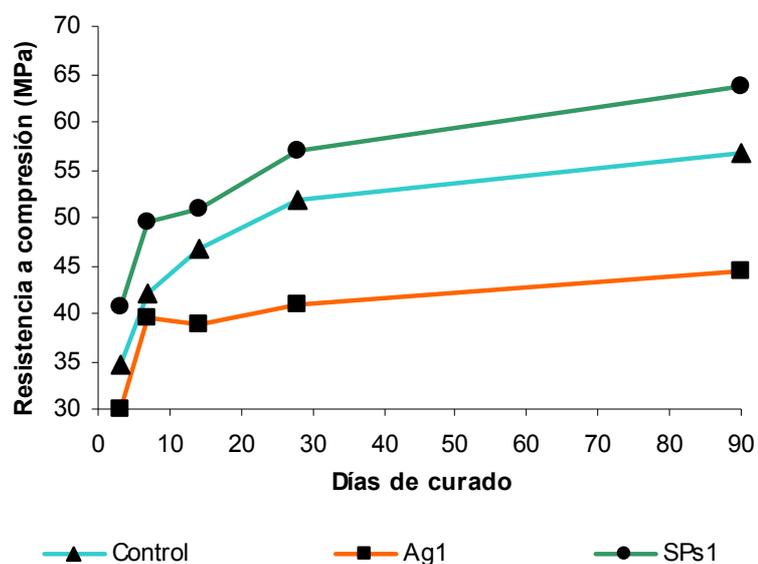
En la Ilustración 105 a) se grafican los resultados obtenidos para la misma relación a/c; la Ilustración 105 b) los correspondientes a la misma consistencia y en la Ilustración 105 c) los de distintos porcentajes de aditivo y los datos correspondientes al 75% de la resistencia a compresión de la muestra control. Las observaciones son las siguientes:

- La resistencia a compresión de la muestra con un 1,1% de licor de *Agave americana* y con relación a/c constante es similar a la muestra control a la edad de 7 días y menor en todas las otras edades (Ilustración 105 a). Esta misma muestra, a igual consistencia, evidencia un comportamiento similar a la muestra control en todas las edades hasta los 14 días de curado; a partir de allí presenta una considerable reducción. (Ilustración 105 c).
- La resistencia a compresión de la muestra con 1,1% de aditivo superplastificante, en ambos casos es mayor que la muestra control y la muestra del aditivo vegetal.
- Las resistencia a compresión de la muestra con un 1% de licor de *Agave americana*, presentan un comportamiento similar hasta los 14 días de curado que la muestra control y un decrecimiento a los 28 días de curado. (Ilustración 105 c)
- La muestra con un 3,0% de licor de *Agave americana* presenta un comportamiento similar, a los 14 y 28 días de curado, a la curva que representa el 75% de la resistencia a compresión de la muestra control. (Ilustración 105 c)
- La resistencia a compresión de la muestra con un 5% de licor de *Agave americana* es significativamente menor que la resistencia de la muestra control y similar a la muestra con un 3,0% de licor de *Agave americana*, a edades de 3 y 7 días. (Ilustración 105 c)
- La resistencia a compresión de la muestra con un 0,26% de aireante comercial es menor que la resistencia de la muestra control y la muestra con un 5,0% de licor de *Agave americana*. (Ilustración 105 c)

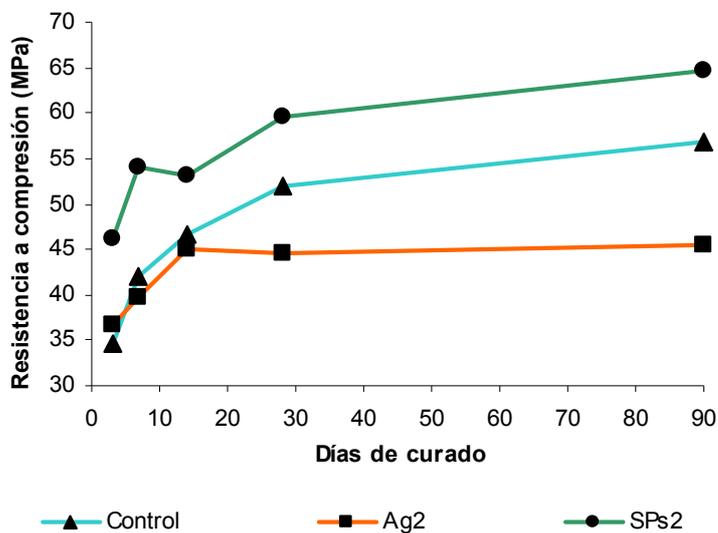
En resumen, al igual que en la resistencia a flexo-tracción, la presencia del aditivo disminuye la resistencia a compresión de los morteros por el aumento en la porosidad dejada por el agua evaporada que no reacciona con el cemento, aunque a igual consistencia, los valores de compresión del mortero con 1% de aditivo orgánico son similares al control hasta los 14

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

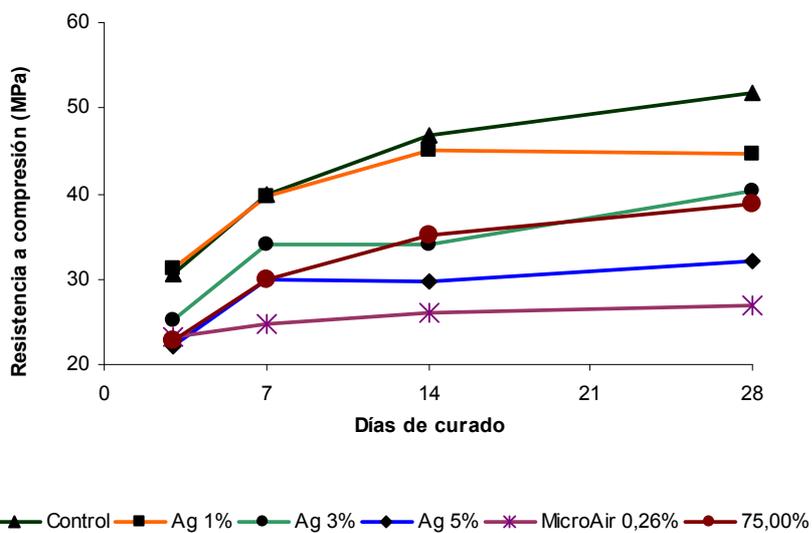
días de curado por la disminución en el agua de amasado. También, con el 1 y 3% de aditivo se alcanzan resistencias mayores al 75% de la muestra control, límite que especifica la Norma Europea para los aditivos aireantes. Se observa que el aditivo comercial superplastificante, a igual consistencia, mejora la resistencia mientras que el aditivo aireante la disminuye a menos del 75% de la muestra control, quizás a que está dosificado en cantidad elevada y a que es un aditivo exclusivo para hormigones.



a)



b)



c)

Ilustración 105. Gráficos comparativos de resistencia a compresión de probetas de mortero a) igual a/c; b) igual consistencia; c) distintos porcentajes de aditivo e igual consistencia

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.4.10 Conclusiones de la influencia del aditivo en las resistencias mecánicas de los morteros

Se puede concluir que:

- En general, los morteros con aditivo de licor de *Agave americana*, presentan resistencias menores respecto a las del mortero control.
- En el caso del plastificante comercial los valores son similares al mortero control o ligeramente superiores.
- No se observa una variación importante en los morteros con *Agave americana* en función de la relación a/c, a tiempos de curado medios y largos (14 – 90 días), mientras que sí parecen tener influencia a tiempos cortos de curado (3 – 7 días) donde la disminución de la relación a/c, aumenta el valor de la resistencia a flexo-tracción.
- Las menores resistencias que se observan en las muestras con licor de *Agave americana* se atribuyen a la existencia de las burbujas que son ocluidas por efecto de la reacción del licor con el agua, y por la consecuente disminución en la densidad del mortero.
- Los valores de la resistencia a compresión obtenidos en los morteros con 1,0% y 3,0% de *Agave americana* son mayores, o iguales, que el 75% de la resistencia de la muestra control (ver Ilustración 106). De acuerdo a la Norma Europea este aditivo se podría clasificar entonces como un aditivo inclusor de aire (ver sección 1.2.1).

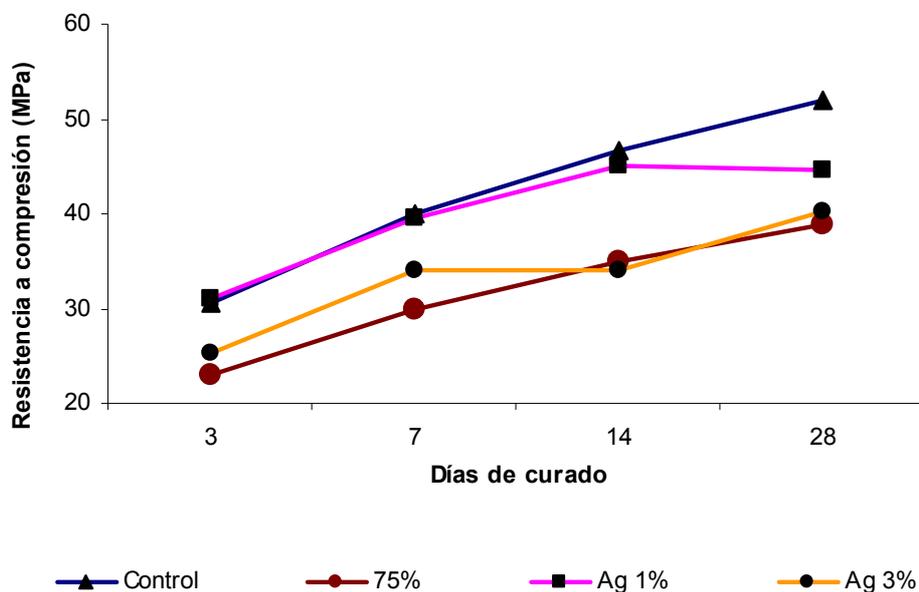


Ilustración 106. Gráfico comparativo de la resistencia a compresión, a igual consistencia, entre el 75 % del mortero control y el mortero con un 1% y un 3% de licor de *Agave americana*

4.5 Hormigones de cemento Pórtland

Los hormigones de cemento Pórtland son una mezcla de cemento, árido grueso, árido fino y agua. En ocasiones incorpora adiciones minerales y aditivos modificadores de alguna o algunas propiedades del hormigón fresco o endurecido.

El cemento es un producto inorgánico que finamente dividido y amasado con agua forma una pasta que fragua y endurece en virtud de reacciones y procesos de hidrólisis y que una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad, incluso bajo el agua. Su calidad se evalúa por el comportamiento respecto a las siguientes características: evolución del fraguado, desarrollo de resistencia, desprendimiento de calor, estabilidad de volumen, durabilidad.

Para esta investigación se evaluó la incidencia del aditivo del licor de *Agave americana* y de la *Furcraea cabuya* en los hormigones fabricados

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

con distintos tipos de cemento y distintos tamaños de árido. Para los ensayos del aditivo del licor de *Agave americana* se utilizó el cemento tipo CEM I-52,5R, de origen español, y para el aditivo del licor de la *Furcraea cabuya* se utilizaron los tipos I y III, de origen colombiano. Su composición química se encuentra en la sección 3.1.1.

Los áridos son partículas inertes, naturales o artificiales, tales como arena, grava, triturado, etc. que al mezclarse con el material cementante y agua dan lugar al hormigón. Se clasifican por su tamaño, origen, forma, textura y densidad. Para evaluar las implicaciones del árido, en la capacidad del aditivo de modificar propiedades del hormigón, se usaron áridos gruesos de tamaño máximo 9,5mm y de 19,00mm, cuyo origen y granulometría se especifican en la sección 3.1.3.

Los aditivos utilizados fueron de tipo orgánico y su origen se describe en la sección 3.1.5 y 3.1.6. El licor de *Agave americana* se obtuvo del corte de hojas de plantas silvestres y se utilizó en porcentajes del 1% y del 3%. El licor de fique se obtuvo del proceso de desfibrado realizado en una agroindustria típica colombiana y se usaron en las mezclas, porcentajes con respecto al peso de cemento de 3%, 5% y 10%.

4.5.1 Estudio en el hormigón fresco

4.5.1.1 Influencia del aditivo en la trabajabilidad del hormigón

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, que sirve de molde, y la del cono de hormigón que se forma al retirarlo. Esta medida la llamamos el asentamiento de la mezcla. El procedimiento se establece en el apartado 3.2.5.1.

Algunas variables que pueden modificar el asentamiento y cohesión de un hormigón, y, por tanto, su trabajabilidad son: la cantidad de cemento, la granulometría y morfología de los áridos, el uso de aditivos, el tiempo de amasado, etc.

Según lo explica Rixon ⁽¹⁶⁾, la presencia del aire ocluido produce un incremento en la trabajabilidad del hormigón. Esto está en una aparente contradicción con el efecto de espesamiento; y es debido, de hecho, a que el incremento del volumen de la pasta altera la relación en volumen pasta/árido y a la “lubricación” de las partículas de árido grueso y fino por las microscópicas burbujas de aire. Sugiere que un contenido de aire del 5% del volumen de hormigón produciría un incremento en el asentamiento

que podría ser de 12mm a 50mm. Igualmente que para mantener la trabajabilidad original se puede reducir de un 5% a un 15% la relación a/c dependiendo de los contenidos de cemento y aire.

Los ocluidores de aire actúan como un fluido que reemplaza parte del agua aumentando la fluidez del hormigón en estado fresco. Esto facilita la puesta en obra, sobre todo si los áridos son angulosos, ya que en este caso, las burbujas actúan como lubricante ⁽¹⁶⁾.

4.5.1.2 Influencia de los aditivos en la relación a/c y en la trabajabilidad

En primer lugar se estudió la influencia del licor de *Agave americana* en la relación a/c de los hormigones. En este ensayo, el efecto que tiene el aditivo, se determinó en una muestra control, sin aditivo, y en hormigones con 1% y un 3% de aditivo de licor de *Agave americana*, a igual asentamiento; de manera comparativa, se ensayó una mezcla con 0,26% de aditivo aireante comercial Micro-air 100.

Se busca determinar el efecto del licor de la planta en la relación a/c, por lo que se definió un trabajabilidad de 5 ± 1 cm., medida en el cono de Abrams. Para la dosificación se usaron 300 kg/m^3 , de cemento tipo CEM I-52,5R, 857 kg/m^3 de árido grueso y 771 kg/m^3 de árido fino. El agua y la relación a/c obtenida se relacionan en el Cuadro 57.

En la Ilustración 107, se puede observar que:

- Cuando se adiciona el 1% de aditivo (Ag-1%), y se conserva la misma trabajabilidad que la muestra control, se obtiene una disminución considerable (22%) en el agua de amasado, y por ende una disminución en la relación a/c (0,59).
- Cuando se adiciona 3% de aditivo (Ag 3%), y se conserva la misma trabajabilidad de la muestra control, se obtiene una disminución mucho mayor que la anterior (39,2%) en el agua de amasado y la correspondiente disminución en la relación a/c (0,51).
- Cuando se utiliza el aditivo comercial Micro-air 100 (MA-0,26%), se obtiene una disminución en el agua de amasado, muy cercana a la obtenida con un 1% del licor de *Agave americana* (21,2%) y por ello, prácticamente, la misma relación a/c.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Como conclusión general se puede decir que a medida que aumenta el porcentaje de extracto de *Agave americana* en el hormigón, disminuye, de forma importante, la relación a/c para la misma trabajabilidad, lo que representa que este aditivo incluso de aire tiene un efecto muy marcado sobre el hormigón en estado fresco.

Cuadro 57. Dosificación de hormigones para estudios con licor de *Agave americana*

Muestra	Cemento (kg/m ³)	H ₂ O (kg/m ³)	Árido grueso (kg/m ³)	Árido fino (kg/m ³)	a/c	Asentamiento en cono (cm)
0%	300	212	857	771	0,71	5,6
1%	300	176	857	771	0,59	5,0
3%	300	152	857	771	0,51	6,0
MA-100 0,26%	300	175	857	771	0,58	5,0

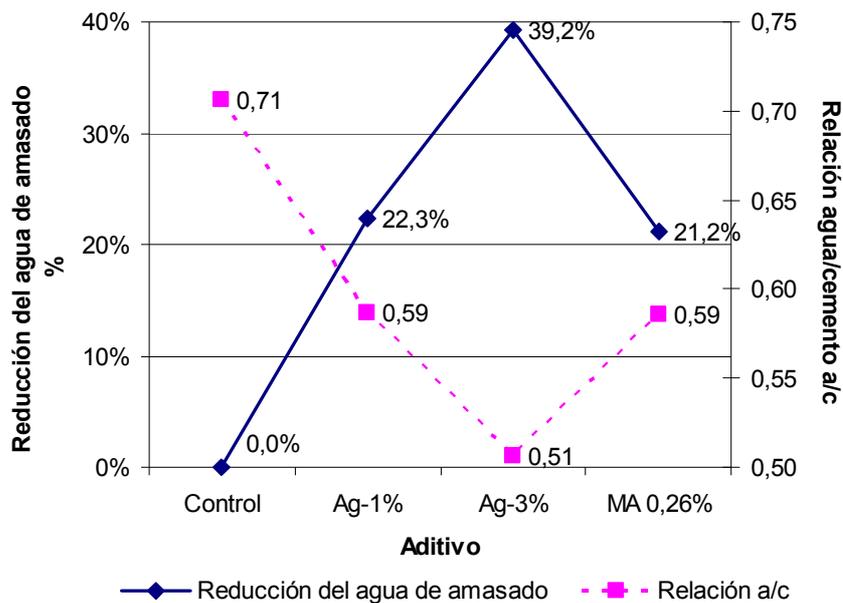


Ilustración 107. Gráfico del efecto del licor de *Agave americana* en la trabajabilidad del hormigón. Disminución del agua de amasado y efecto en la relación a/c

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

Para determinar la influencia del licor de la *Furcraea cabuya* en la consistencia del hormigón, se fabricaron muestras con igual relación a/c de la muestra control, variando el tamaño del árido grueso y el tipo de cemento.

Se utilizaron dos tipos de cemento Pórtland, I y III, según la clasificación de las Normas Técnicas Colombianas, que se especifican en la sección 3.1.1. Se conservó la relación a/c y el tamaño máximo del árido. Para conservar la relación a/c constante se descontó, del agua de amasado, el porcentaje de agua correspondiente al aditivo que había sido cuantificado a partir del ensayo de extracto seco convencional.

También se fabricaron muestras con igual consistencia que la muestra control. Para obtenerla se hicieron varias amasadas, disminuyendo el agua de amasado, hasta obtener el valor correspondiente a la muestra control.

Para determinar la cantidad de materiales a utilizar en la muestra control se efectuó un diseño de mezclas donde se optó por los siguientes parámetros: asentamiento en el cono de Abrams de 5cm. Este valor de asentamiento corresponde a hormigones de uso en vigas, fundaciones, muros de contención etc. Se consideró una resistencia estructural de 21 MPa y un coeficiente de variación de 10% que corresponde a una resistencia de diseño R_c de 24 MPa.

De los resultados obtenidos, que se observan en el, Cuadro 58, Cuadro 59,

Cuadro 60, Cuadro 61, e Ilustración 108, podemos decir:

- Con el cemento tipo III, y con todos los porcentajes de aditivo, Ilustración 108 a), se presenta un menor asentamiento que para los hormigones preparados con el cemento tipo I. Este fenómeno se podría atribuir a una mayor demanda de agua del cemento tipo III, debido al menor tamaño de sus partículas. (Ver Cuadro 6)
- Con el cemento tipo I y tipo III, la adición de un 3% de aditivo, produce un asentamiento bastante similar al de la muestra control. Con un 5% de aditivo el asentamiento aumenta con ambos tipos de cemento. Con un 10% de aditivo y el cemento tipo I se incrementa ampliamente el asentamiento mientras que con el cemento tipo III permanece constante.
- En el gráfico b), de la misma ilustración, observamos que para la muestra con tamaño máximo del árido 9,5 mm, se produce un aumento considerable del asentamiento al añadir un 3% de aditivo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con una mayor cantidad de aditivo el asentamiento se mantiene constante o aumenta ligeramente. En el caso del hormigón con tamaño máximo de árido de 19,0 mm, el aumento del asentamiento es menor que en el caso anterior y solamente a partir del 5% de aditivo.

- La diferencia entre el asentamiento en función del tamaño del árido utilizado en el hormigón es muy grande con adiciones pequeñas de extracto (3%) y se minimiza con adiciones grandes (10%)
- En general se observa que al adicionar un porcentaje de aditivo igual o superior al 3% del peso del cemento, se incrementa el asentamiento de las muestras, independientemente del tamaño del árido grueso y del tipo de cemento.

Cuadro 58. Dosificación de hormigones con cemento tipo I, árido grueso de tamaño máximo 19,0 mm y aditivo de fique. Relación a/c constante

Muestra fique	Cemento (kg/m ³)	H ₂ O (kg/m ³)	Árido grueso 19,0 mm (kg/m ³)	Árido fino (kg/m ³)	a/c	Asentamiento en cono (cm)
0%	343	206	1092	663	0,60	5,0
3%	343	206	1092	663	0,60	5,0
5%	343	206	1092	663	0,60	10,3
10%	343	206	1092	663	0,60	17,0

Cuadro 59. Dosificación de hormigones con cemento tipo I, árido grueso de tamaño máximo 9,5 mm y aditivo de fique. Relación a/c constante

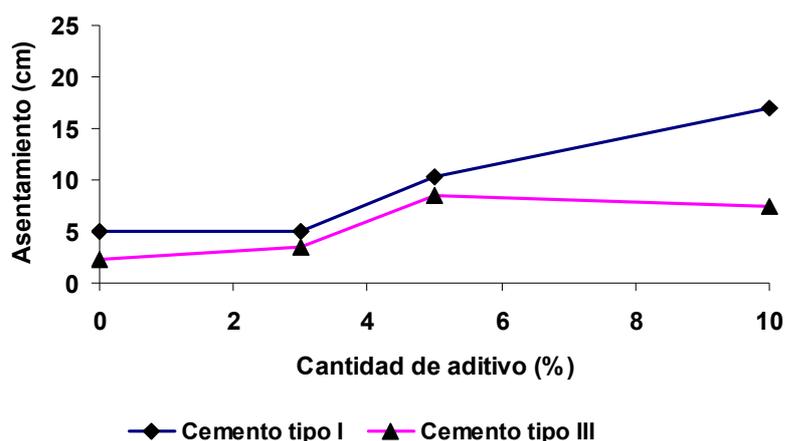
Muestra fique	Cemento (kg/m ³)	H ₂ O (kg/m ³)	Árido grueso 9,5 mm (kg/m ³)	Árido fino (kg/m ³)	a/c	Asentamiento en cono (cm)
0	382	260	1063	807	0,68	5,8
3%	382	260	1063	807	0,68	19,0
5%	382	260	1063	807	0,68	18,5
10%	382	260	1063	807	0,68	21,5

Cuadro 60. Dosificación de hormigones con cemento tipo III, árido grueso de tamaño máximo 19,0 mm y aditivo de fique. Relación a/c constante

Muestra fique	Cemento (kg/m ³)	H ₂ O (kg/m ³)	Árido grueso 19,0 mm (kg/m ³)	Árido fino (kg/m ³)	a/c	Asentamiento en cono (cm)
0%	343	206	1092	663	0,60	2,2
3%	343	206	1092	663	0,60	3,5
5%	343	206	1092	663	0,60	8,5
10%	343	206	1092	663	0,60	7,5

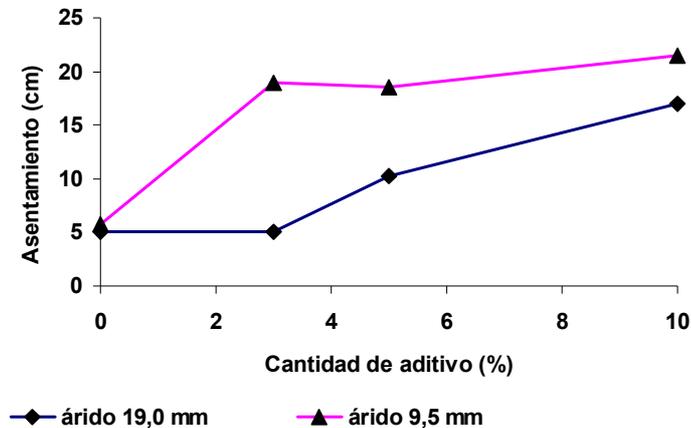
Cuadro 61. Dosificación de hormigones con cemento tipo III, árido grueso de tamaño máximo 19,0 mm y aditivo de fique. Trabajabilidad constante

Muestra fique	Cemento (kg/m ³)	H ₂ O (kg/m ³)	Árido grueso 19,0 mm (kg/m ³)	Árido fino (kg/m ³)	a/c	Asentamiento en cono (cm)
0%	343	206	1092	663	0,60	5,0
3%	343	206	1092	663	0,59	5,0
5%	343	206	1092	663	0,54	5,0
10%	343	206	1092	663	0,53	5,0



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a) Asentamiento con dos tipos de cementos, árido de 19,0 mm a igual relación a/c. Aditivo de fique



b) Asentamiento con el árido de 19,0 mm (a/c 0,6) y el árido de 9,5 mm (a/c 0,68), y cemento tipo I. Aditivo de fique

Ilustración 108. Gráficos comparativos del asentamiento y la relación a/c del hormigón fresco con diferentes cantidades de licor de *Furcraea cabuya*

4.5.1.3 Influencia del aditivo en el porcentaje de aire ocluido del hormigón

Para determinar la cantidad de aire ocluido en los hormigones, se usó el método de presión, que fija, en porcentaje de volumen, el aire ocluido en los hormigones frescos, con y sin aditivos, mediante la inyección de aire a presión a una masa de hormigón determinada. El procedimiento se describe en la sección 3.2.5.2.

Esta propiedad se midió en las muestras elaboradas con 3%, 5% y 10% de extracto de *Furcraea cabuya*, con áridos gruesos de 19,0mm y 9,5mm y con relación a/c constante para cada tipo de árido. Los resultados obtenidos se expresan en el Cuadro 62, y se graficaron en la Ilustración 109. Se pueden interpretar de la siguiente manera:

- En el gráfico a) se observa que si comparamos los hormigones fabricados con árido máximo de 19,0 mm y los dos tipos de cemento, el porcentaje de aire ocluido es similar, hasta la adición

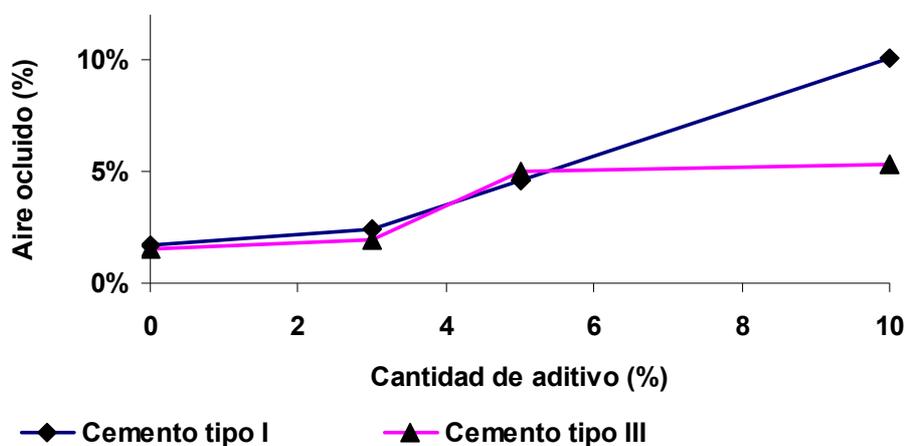
JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

de un 5% de aditivo. Con el 10% de aditivo el hormigón preparado con cemento tipo I, ocluye mayor cantidad de aire.

- En el gráfico b) vemos que en general con un mismo tipo de cemento se produce un aumento del porcentaje de aire ocluido conforme al aumento de la cantidad de aditivo. Este aumento es más importante en el hormigón fabricado con árido de tamaño 9,5 mm.

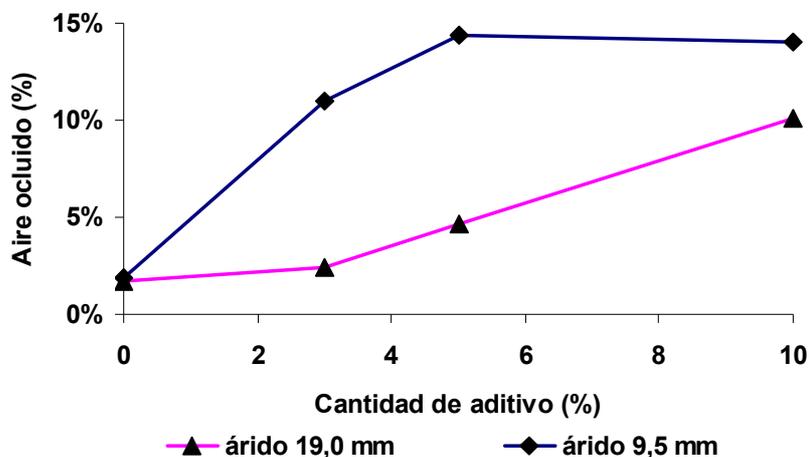
Cuadro 62. Porcentaje de aire ocluido en hormigones con licor de *Furcraea cabuya*.

Porcentaje de aditivo (%)	Aire ocluido (%)		
	Cemento tipo I		Cemento tipo III
	Árido 19,0 mm	Árido 9,5 mm	Árido 19,0 mm
0	1,7	1,9	1,5
3	2,4	11,0	1,9
5	4,6	14,4	5,0
10	10,5	14,0	5,3



a) Porcentaje de aire ocluido en hormigones con cemento tipo I y III. Tamaño de árido de 19,0 mm. Igual relación a/c que la muestra control. Aditivo fique

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



b) Porcentaje de aire ocluido en hormigones con tamaño de árido de 19,0 mm y 9,5 mm. Cemento tipo I a igual asentamiento que la muestra control. Aditivo fique

Ilustración 109. Gráficos de la cantidad de aire ocluido en el hormigón fresco con diferentes tipos de árido, distintos tipos de cemento y aditivo de fique

En la Ilustración 110 se relaciona el asentamiento de hormigón con el porcentaje de aire ocluido, para muestras de hormigón fresco fabricadas con árido grueso de 19,0 mm y cemento tipo I y con igual relación a/c igual (0,60). Las cantidades de aditivo son del 3%, 5% y 10% del peso del cemento.

En general se observa que al aumentar el porcentaje de aire ocluido aumenta considerablemente el asentamiento de la mezcla, sobre todo a partir del 5% de adición. Existe entonces una relación directa entre la cantidad de aire ocluido y la trabajabilidad del hormigón, tal y como se conoce de la bibliografía (110).

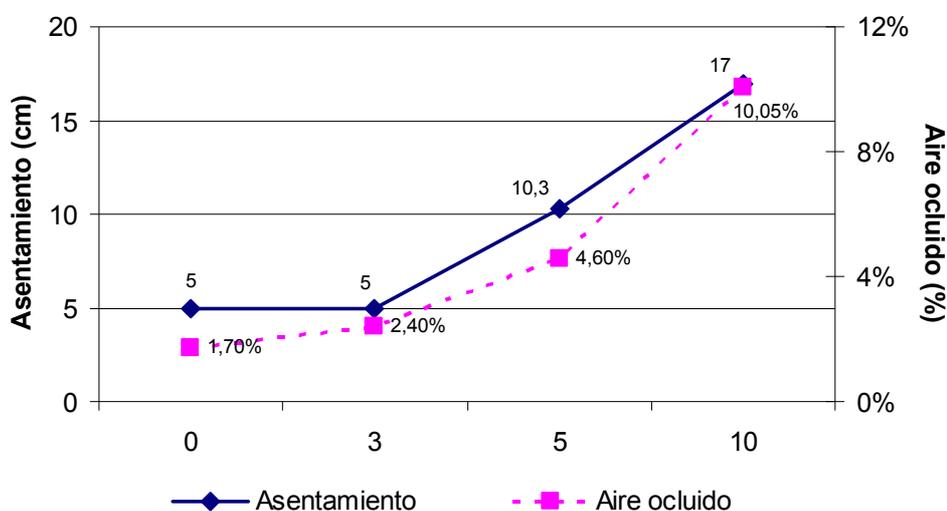


Ilustración 110. Gráfico comparativo entre asentamiento y aire ocluido en el hormigón fresco. Cemento tipo I y árido grueso de 19,0mm

4.5.1.4 Influencia del aditivo en el agua de exudación

La exudación del hormigón es el ascenso del agua de amasado de la mezcla, producida por el asentamiento de las partículas más pesadas; áridos y cemento.

Este proceso, si no es controlado, podría generar problemas graves en los hormigones: las capas más superficiales serían susceptibles de mayor desgaste y menor resistencia mecánica; la falta de agua en el resto de la masa disminuye el agua requerida para la completa hidratación de las partículas de cemento.

El paso del agua a la superficie origina conductos capilares que, a la postre, disminuyen la impermeabilidad de la masa y la hace vulnerable a ataques químicos. No toda el agua de exudación logra llegar a la superficie, alguna permanece bajo las partículas gruesas, que al evaporarse, generan espacios vacíos que disminuyen su resistencia mecánica.

La exudación es reducida siempre por la oclusión de aire, tanto en condiciones estáticas como durante la vibración, y esto es particularmente útil para producir hormigón con áridos finos, deficientes en sus partículas

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

más pequeñas, en los que la exudación es frecuentemente un problema⁽¹⁶⁾.

Los aditivos aireantes aumentan la cohesión y disminuyen la exudación, debido a que las burbujas sostienen los granos inertes y frenan su descenso en el hormigón fresco, obturan los pasos por donde el agua podría volver a subir y crean puentes entre los granos de arena y cemento⁽¹⁶⁾.

Este estudio determina la cantidad relativa de agua de amasado susceptible de exudar en una muestra de hormigón fresco; se expresa en tanto por ciento de cantidad total de agua contenida en el hormigón. Se realizó en un recipiente de cilíndrico rígido, cuyo diámetro interior era de 250 ± 10 mm y una altura interior de 280 ± 10 mm. El procedimiento llevado a cabo fue el descrito en la sección 3.2.5.3.

Los ensayos anteriores, tanto en hormigones como en morteros, dan cuenta de la capacidad del aditivo en estudio para ocluir aire y disminuir la absorción capilar. Es de esperar entonces que la exudación, en el hormigón, sea menor.

En este ensayo la exudación se determinó en una muestra control, sin aditivo, y en hormigones con 1% y un 3% de aditivo de licor de *Agave americana*, a igual asentamiento; de manera comparativa, se ensayó una mezcla con 0,26% de aditivo aireante comercial Micro-air 100.

Las dosificaciones son las mismas que las utilizadas en el ensayo de trabajabilidad y se relacionan en el Cuadro 57.

Los resultados de la Ilustración 111 muestran que:

- Con un 3% de aditivo de *Agave* se presenta una disminución considerable del porcentaje de agua de exudación. Este valor es ligeramente mayor al del aditivo comercial Micro-Air-100.
- En general se observa una disminución en el agua de exudación, a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo. Esto se debe, lógicamente, a la disminución en el agua total –menor relación a/c– pero también se puede deber a la oclusión de aire que produce el aditivo.

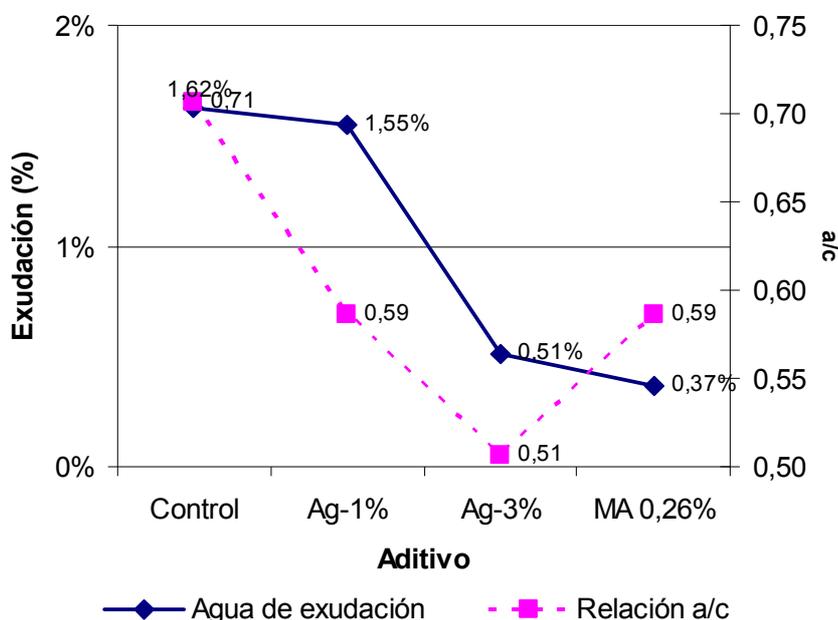


Ilustración 111. Gráfico de la exudación en hormigones con aditivo del licor del *Agave americana* y la relación a/c

Para probar el efecto del licor de la *Furcraea cabuya* en la exudación del hormigón, se utilizaron 3%, 5% y 10% del aditivo, en mezclas con tipo de cemento tipo I y III, y tamaños del árido grueso de 19,0mm y 9,5mm a igual asentamiento. El procedimiento fue el mismo del ensayo con licor de *Agave americana*.

En el Cuadro 63 se relacionan los resultados obtenidos en el ensayo. Los gráficos que se presentan a continuación (Ilustración 112) nos muestran, comparativamente, el porcentaje de aire ocluido y el porcentaje de agua de exudación. Al respecto podemos hacer los siguientes comentarios:

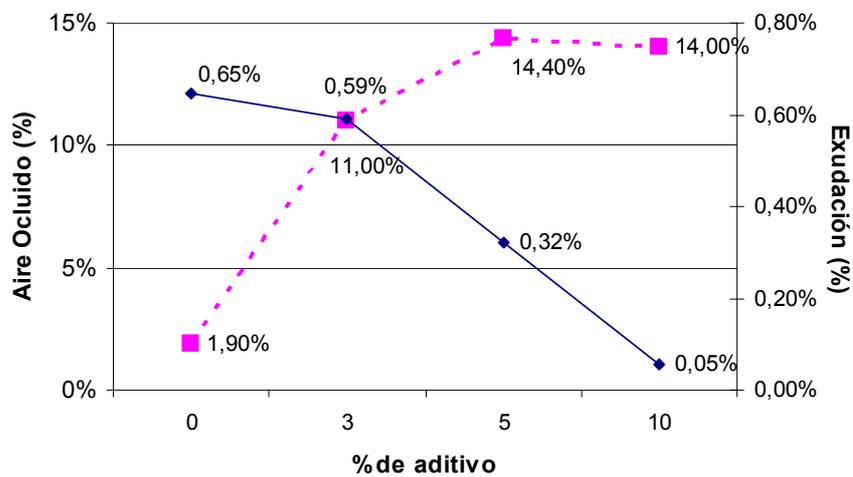
- En los hormigones con cemento tipo I y árido de 9,5mm, a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo, se incrementa también el porcentaje de aire ocluido y se disminuye el porcentaje de agua de exudación, Ilustración 112 a).
- Cuando se utiliza cemento tipo I, y árido de 19,0 mm (Ilustración 112 b), se observa el mismo comportamiento anterior, pero con menor cantidad, de aire ocluido y por ende de agua de exudación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Con el cemento tipo III y el árido de 19,0mm, (Ilustración 112 c) se logran, igualmente, reducciones en los porcentajes de aire ocluido y de exudación pero siempre porcentajes mayores que con el cemento tipo I.
- En general existe la tendencia a que cuando usamos, bien sea extracto de *Agave americana* o extracto de *Furcraea cabuya*, el agua de exudación tiende a disminuir con el incremento del aditivo, Esta disminución del porcentaje de agua de exudación es mayor cuando usamos cemento tipo I y árido de 19,0mm.

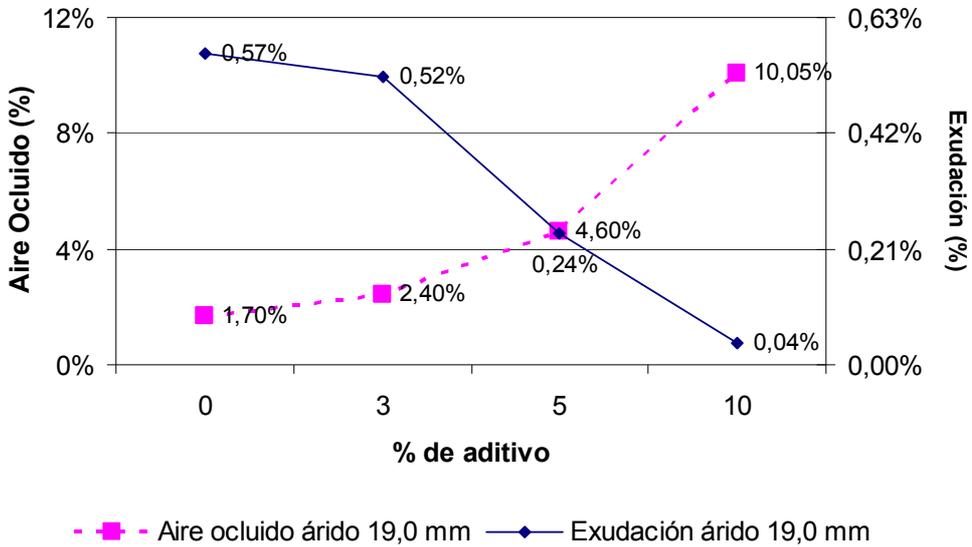
Cuadro 63. Porcentaje de agua de exudación en hormigones con aditivo de fique.

Porcentaje de aditivo de fique (%)	Agua de exudación (%)		
	Cemento tipo I		Cemento tipo III
	Árido 19,0 mm	Árido 9,5 mm	Árido 19,0 mm
0	0,57	0,65	0,87
3	0,52	0,59	0,76
5	0,24	0,32	0,56
10	0,04	0,05	0,12

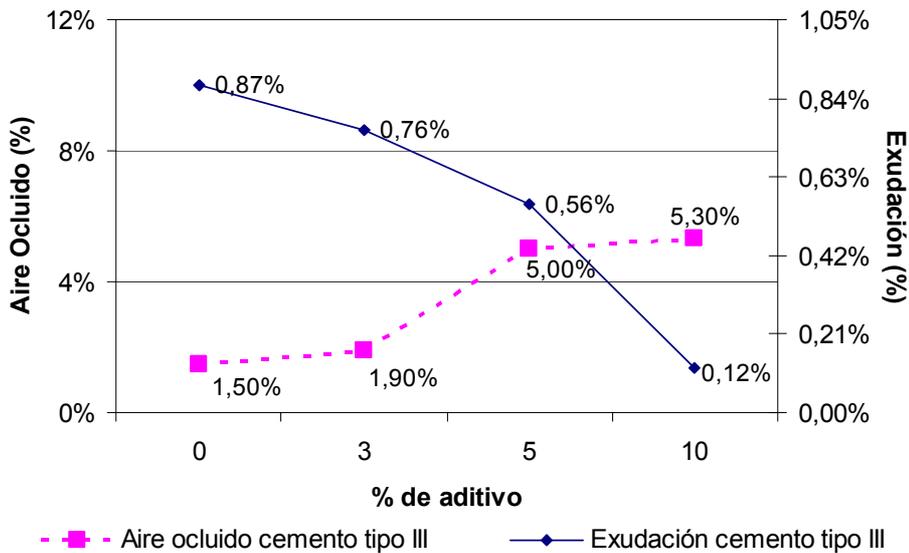


- ■ - Aire ocluido árido 9,5 mm — ◆ — Exudación árido 9,5 mm

a) Aire ocluido vs exudación en hormigones con cemento tipo I y árido de 9,5 mm



b) Aire ocluido vs. Exudación en hormigones con cemento tipo I y árido de 19,00 mm



c) Aire ocluido vs. Exudación en hormigones con cemento tipo III y árido de 19,00 mm.

Ilustración 112. Gráficos de aire ocluido vs. Exudación. Aditivo de fique

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.5.1.5 Influencia del aditivo en función del tiempo de amasado

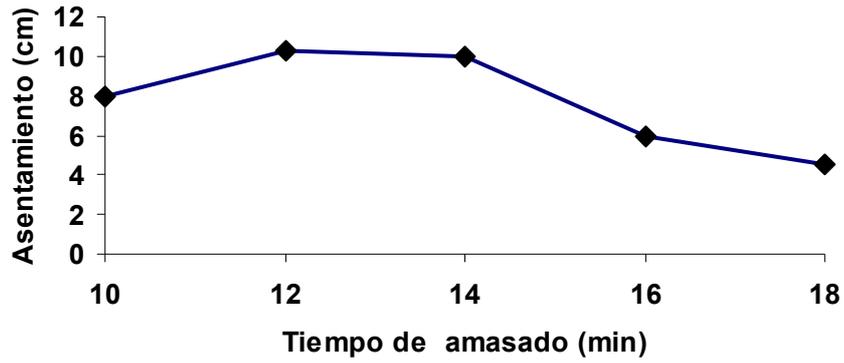
Numerosos parámetros de amasado pueden modificar la cantidad de aire: el modo, la energía y la duración del amasado, así como el tipo de amasadora y el volumen del hormigón tratado. Se comprueba que hay un máximo de aire para un tiempo de duración dado, más allá del cual, la proporción de aire disminuye de nuevo (¹⁶).

Para determinar la influencia del tiempo de amasado en el asentamiento, la cantidad de aire ocluido y la exudación, se usó una mezcla de hormigón con 5% de licor de *Furcraea cabuya*, árido grueso de 19,0mm y una relación a/c de 0,60. La muestra fue sometida a 10, 12, 14, 16 y 18 minutos de amasado en una mezcladora de tolva, y se midió con un cronómetro digital, de acuerdo al procedimiento descrito en el numeral 3.2.5.5.

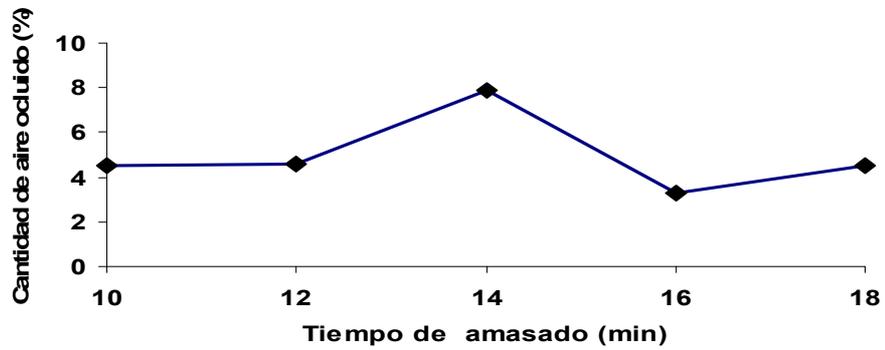
En la Ilustración 113 se observan los gráficos de la influencia del tiempo de amasado en hormigones preparados con cemento tipo I, árido de 19,0 mm y 5% de aditivo. Se puede ver que:

- Con 12 y 14 minutos de amasado se aumenta el asentamiento de la muestra con respecto a la muestra de los 10 minutos. Con 16 y 18 minutos se disminuye considerablemente el asentamiento, como se aprecia en la Ilustración 113 a).
- En la Ilustración 113 b) se observa que la cantidad de aire ocluido permanece constante con 12 minutos de amasado, respecto a la muestra control. Con 14 minutos de amasado se consigue un porcentaje de aire ocluido ampliamente mayor. Con 16 minutos se disminuye y con 18 minutos es prácticamente igual que la muestra control.
- En la Ilustración 113 c) se observa que la exudación se disminuye a partir de los doce minutos de amasado, consiguiendo su menor porcentaje a los 14 minutos. Con 16 minutos el porcentaje de exudación aumenta considerablemente y con 18 minutos toma prácticamente los mismos valores que la muestra control.
- En conclusión, y teniendo en cuenta que no se modificaron ni el modo de amasado, ni la energía de amasado, ni el tipo de amasadora, ni tampoco el volumen del hormigón, se podría pensar que con tiempos de amasado superiores a los 14 minutos, se revientan las burbujas que se han producido por la acción espumante del aditivo y por lo tanto disminuye la cantidad de aire

ocluido y que afecta consecuentemente al asentamiento y la exudación de los hormigones frescos.

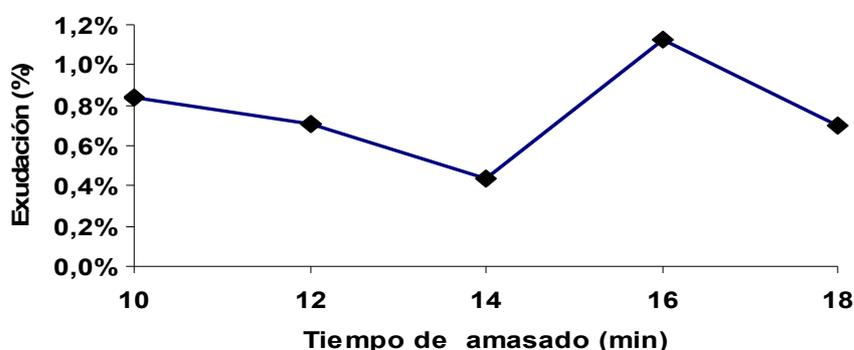


a) Tiempo de amasado vs. Asentamiento



b) Tiempo de amasado vs. Cantidad de aire ocluido

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



c) Tiempo de amasado vs. exudación

Ilustración 113. Gráficos de la influencia del tiempo de amasado en el hormigón

4.5.1.6 Conclusiones del estudio en hormigón fresco

De los estudios en el hormigón fresco se puede concluir que:

- Al igual que en los morteros, los aditivos orgánicos estudiados aumentan considerablemente la trabajabilidad del hormigón, a igual relación a/c, y disminuyen el agua de amasado cuando se preparan con igual trabajabilidad que la muestra control.
- El tipo de cemento no es un factor determinante en el asentamiento, cuando se adiciona hasta un 5% de aditivo orgánico. Con cemento tipo I y 10% sí se advierte un mayor asentamiento respecto a los hormigones preparados con cemento tipo III. Al parecer el menor tamaño de las partículas del cemento tipo III demanda una mayor cantidad de agua.
- Existe una relación inversa entre el tamaño del árido grueso y la plasticidad del hormigón, cuando se incluye el aditivo orgánico. Con un menor tamaño de árido, 9,5 mm, obtenemos un mayor asentamiento.
- Existe una relación directa entre la cantidad de aire ocluido y la consistencia del hormigón. A mayor aire ocluido hay mayor asentamiento.

- Existe una relación indirecta entre la cantidad de aire ocluido y la exudación del hormigón. A mayor cantidad de aire ocluido es menor la exudación. El comportamiento es mejor con el árido de menor tamaño y con el cemento tipo I.
- El tiempo de amasado es definitivo en la cantidad de aire ocluido, Se determinó que con 14 minutos de amasado se obtiene la mayor cantidad de aire ocluido y por ende la mejor trabajabilidad y la menor exudación.
- Tanto el licor de *Agave americana* como el licor de *Furcraea cabuya* disminuyen la exudación de los hormigones frescos.
- El tiempo óptimo de amasado para que el aditivo cumpla la función de agente aireante es de 12 – 14 minutos.

4.5.2 Estudio en el hormigón endurecido

4.5.2.1 Influencia del aditivo en la estructura de poros del hormigón endurecido

Como se ha explicado anteriormente, debido a los aditivos, el aire ocluido 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 deben formar poros de forma redondeada, cuyos diámetros oscilen entre 10 y 1000 micras, y que en su mayor parte, generalmente, estén comprendidos entre 25 y 250 micras. Estas burbujas deben estar separadas unas de otras y poseer una curva granulométrica continua, cuya zona cubra la de los cementos y las arenas más finas del mortero y el hormigón. La distancia entre las burbujas es variable: de 100 a 200 micras. El número de burbujas debe estar comprendido entre 100000 y 4000000 por cm^3 , lo que representa una superficie del orden de $300 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ de hormigón.

Estas burbujas actúan tanto sobre el hormigón fresco como sobre el hormigón endurecido. En el hormigón endurecido lo más importante, no es tanto el porcentaje de aire ocluido, sino el tamaño de las burbujas y su distribución (¹⁶). Precisamente estas variables, tamaño de las burbujas y su distribución, que la hemos denominado la estructura de poros, es el tema que se aborda en este capítulo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se evaluó la estructura de poros en hormigones con licor de *Agave americana*, preparados con las dosificaciones que aparecen en el Cuadro 57; y con licor de *Furcraea cabuya* de acuerdo a las dosificaciones que aparecen en el: Cuadro 59,

Cuadro 60 y Cuadro 61.

4.5.2.2 Influencia de licor de *Agave americana* en la estructura de poros

Para el aditivo de *Agave americana* la estructura de los poros se determinó en dos probetas de hormigón de 10cm x 10cm x 2cm., y 14 días de curado tal como lo sugiere la norma UNE-EN 480-11, por cada muestra. Las mezclas se fabricaron con 1% y 3% de aditivo de licor de *Agave americana* y con 0,26% de aditivo aireante comercial Micro-air 100.

El procedimiento seguido corresponde al descrito en la sección 3.2.5.4. En la Ilustración 114 se observan dos fotografías, tomadas por el microscopio óptico, de las probetas de hormigón con aditivo de *Agave americana*.

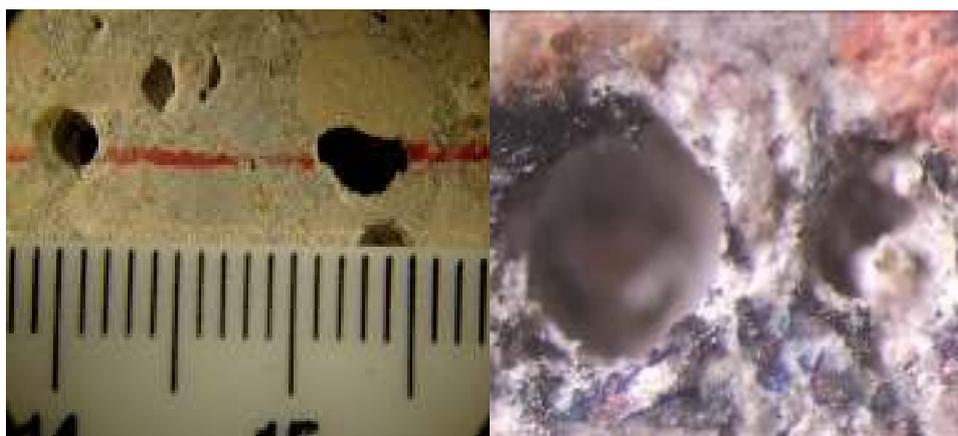


Ilustración 114. Fotografías de microscopía óptica para el ensayo de estructura de poros en hormigón

Para obtener el posible número total de huecos de aire presentes en un milímetro cúbico de hormigón, se dividió el valor correspondiente a la frecuencia de las cuerdas medidas en el microscopio por cada clase, sobre un valor constante que se obtiene por medio de la ecuación siguiente:

Proporción de huecos de aire encontrados en $\text{mm}^2 =$

$$= \frac{\pi \times (5 + l_{\max} - l_{\min}) \times (l_{\max} + l_{\min})}{4 \times 10^6}$$

Donde l_{\max} y l_{\min} son la longitud máxima y mínima de la cuerda de una clase dada.

El factor 5 del numerador se debe al hecho de que todas las longitudes de las cuerdas se redondean, aproximadamente a $5\mu\text{m}$. La ecuación se basa en una valoración estadística de la población de huecos de aire.

Los resultados de este cálculo se encuentran relacionados en el: Cuadro 80, Cuadro 81, Cuadro 82, Cuadro 83 de los anexos, y graficados en la Ilustración 115. Para mayor claridad sólo se graficaron los diámetros entre 0 y 400 micras.

Es esta ilustración se puede observar que:

- La muestra control es la que tiene la menor cantidad de poros por milímetro cúbico de hormigón. La gran mayoría de estos están ubicados en el rango de diámetro entre 185 a 205 micras.
- La muestra con un 1% de aditivo orgánico incrementa considerablemente el número de poros por milímetro cúbico de hormigón. Igualmente disminuye las dimensiones nominales de los poros que se ubican en un rango entre las 45 y las 245 micras de diámetro; encontrándose la mayor cantidad entre 45 y 55 micras.
- La distribución de poros del hormigón con un 3% de aditivo se encuentra en el rango de las 25 a 265 micras de diámetro, con el mayor número en el rango 55 a 65 micras
- Con un 0,26% del aditivo aireante comercial los poros se encuentra entre 0 y 355 micras, con el mayor número entre 45 y 55 micras.
- La distribución de poros en varios tamaños micrométricos y la similitud del comportamiento del hormigón con 3% de aditivo orgánico y 0,26% de aditivo aireante comercial, confirman la capacidad aireante del licor de *Agave americana* y su posible uso como aditivo ocluser de aire.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

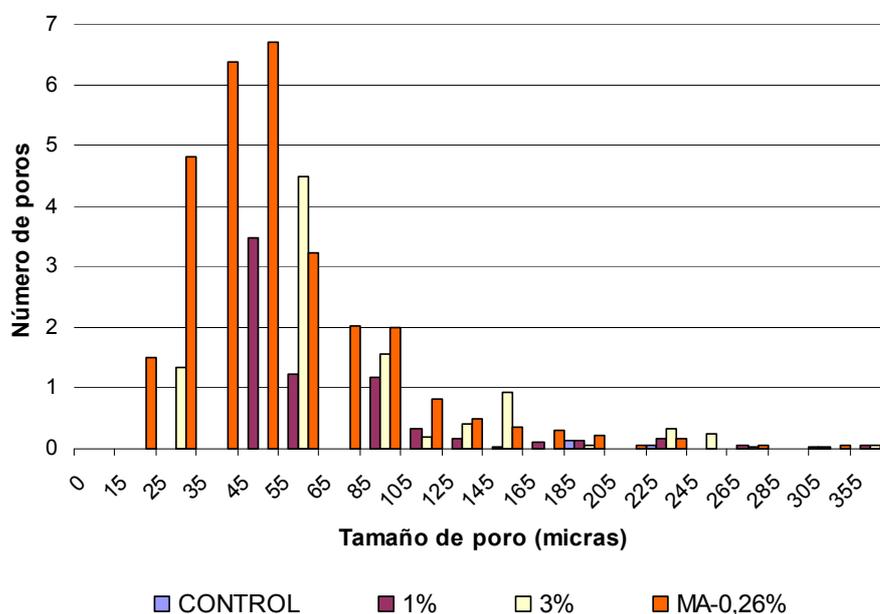


Ilustración 115. Gráfico de la distribución del número de poros por milímetro cúbico de hormigón.

El contenido total de aire ocluido se obtiene por la relación entre el volumen de los poros de aire y el volumen de hormigón, expresado en tanto por ciento.

El contenido total de aire es la proporción de la longitud total recorrida que corresponde a los huecos de aire que se obtiene mediante la ecuación:

$$A = \frac{T_a \times 100}{T_{tot}} \text{ expresado en \%} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

A es el volumen total de aire;

T_a es la longitud total de barrido correspondiente a los huecos de aire;

T_{tot} es la distancia recorrida en las fases sólidas de la superficie de la probeta, más la distancia recorrida a través de los huecos de aire, T_a ;

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

El volumen de los poros lo obtuvimos con el procedimiento anterior y el volumen de hormigón lo obtuvimos de forma teórica, sumando los pesos de cada uno de los componentes necesarios para fabricar un metro cúbico de hormigón y que se relacionan en el Cuadro 64

Cuadro 64. Peso de 1 metro cúbico de hormigón para distintas muestras de hormigón y porcentaje de pasta

Muestra	Cemento kg	Arido fino kg	Arido grueso kg	Agua kg	Aditivo kg	Total de la mezcla kg	% de pasta
Control	300	771	857	212	0,00	2140	23,93
Ag1	300	771	857	176	3,00	2107	22,59
Ag2	300	771	857	152	9,00	2089	21,64
MA	300	771	857	175	0,76	2104	22,58

Los resultados de contenido total de aire ocluido para cada dosificación de aditivo se observan en la Ilustración 116.

En nuestro caso es evidente que el contenido total de aire aumenta a medida que aumenta el porcentaje de aditivo en la mezcla. El aditivo comercial apenas supera moderadamente el porcentaje de aire de la muestra control, mientras que los hormigones con aditivo del licor del *Agave americana*, tienen porcentajes significativamente superiores a la muestra control.

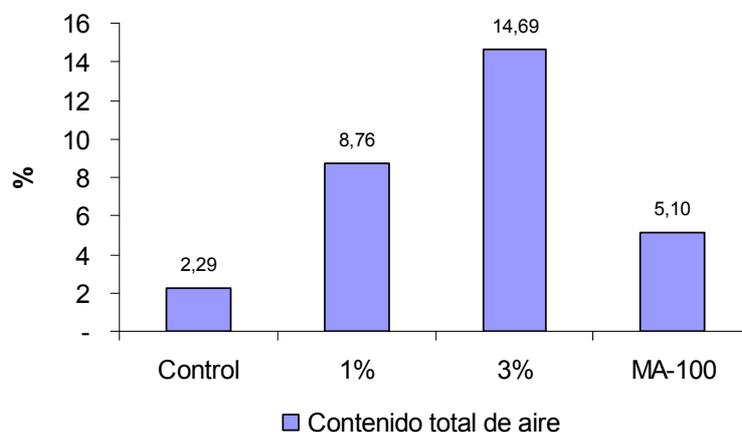


Ilustración 116. Gráfico del contenido total de aire en hormigones endurecidos (calculado a partir de la ecuación 17)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

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} . El método de cálculo utilizado se basa en la longitud media de las cuerdas y es válido para cualquier sistema de huecos esféricos. La superficie específica de los huecos de aire está dada por:

$$\alpha = \frac{4 \times N}{T_a}, \text{ en } \text{mm}^{-1} \qquad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

α es la superficie específica en mm^{-1} ;

N es el número total de cuerdas medidas en cada una de las cuerdas dimensionales;

T_a es la longitud total de barrido correspondiente a los huecos de aire;

En los resultados que se observan en el Cuadro 65 y la Ilustración 117 podemos leer que la superficie específica para el hormigón con 1% de aditivo, es levemente superior a la superficie específica de la muestra control. El hormigón con un 3% de aditivo tiene una superficie específica bastante mayor que las otras muestras. El hormigón con aditivo comercial es prácticamente igual que el hormigón con 3% de aditivo orgánico. Se puede considerar, que para efectos de la superficie específica de los poros, es similar el efecto en los hormigones de 3% del licor de *Agave americana*, y el 0,26% del aditivo comercial Micro-air 100.

La relación pasta/aire es la relación R entre el volumen de la pasta P determinado según las proporciones de la mezcla (Cuadro 64) y el contenido de aire A . En el Cuadro 66 y la Ilustración 118 se observan los resultados obtenidos.

Se observa que el hormigón control indica el mayor porcentaje de pasta con respecto al contenido de aire y es bastante superior a los porcentajes que se obtuvieron en los hormigones con aditivos orgánicos o comerciales. Los hormigones con aditivo de licor de *Agave americana* muestran los menores porcentajes, y el porcentaje de pasta con respecto al contenido de aire del hormigón con aditivo comercial es superior al de los hormigones

con el aditivo orgánico, pero sigue siendo inferior a la muestra control sin aditivo. Estos resultados son consecuentes con los de la cantidad de aire ocluido.

Cuadro 65. Superficie específica de huecos de aire en el hormigón endurecido. Aditivo de *Agave americana*

Muestra	Longitud de huecos de aire en mm T_a	Número total de cuerdas N	Superficie específica α
Control	27,5	17	2,47
1%	105,1	97	3,69
3%	176,3	377	8,55
MA-100	61,2	131	8,57

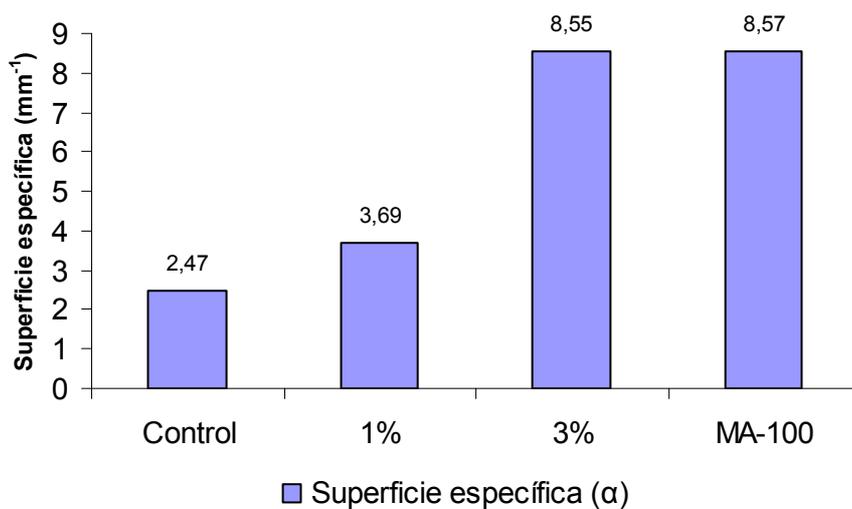


Ilustración 117. Gráfico de la superficie específica de los poros en el hormigón endurecido. Aditivo de *Agave americana*

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuadro 66 Relación pasta/aire en el hormigón endurecido. Aditivo de *Agave americana*

Muestra	Longitud huecos de aire (Ta) mm	Longitud total (Tt) mm	Contenido total de aire %	Volumen de la pasta %	Relación pasta/aire R
Control	27,5	1200	2,29	23,93	10,44
1%	105,1	1200	8,76	22,59	2,58
3%	176,3	1200	14,69	21,64	1,47
Ma-100	61,150	1200	5,10	22,58	4,43

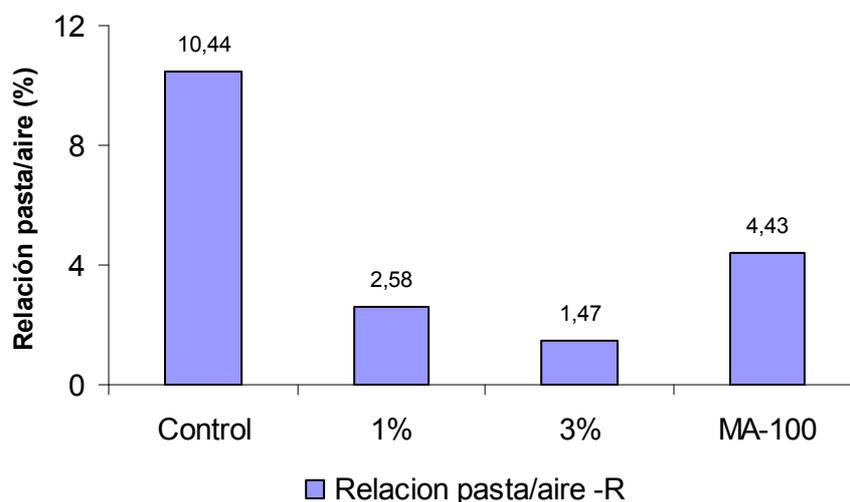


Ilustración 118. Gráfico de la relación pasta/aire en los hormigones endurecidos. Aditivo de *Agave americana*

El factor de espaciado es el parámetro calculado que representa la distancia máxima entre cualquier punto de la pasta de cemento y el borde de un hueco de aire; se expresa en mm. El factor de espaciado depende del valor de la relación pasta/aire R y de la superficie específica α . Se obtiene mediante la siguiente ecuación

$$L = \frac{3[1,4(1 + R)^{1/3} - 1]}{\alpha}, \text{ en mm} \quad \text{Ecuación 19}$$

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

En nuestro estudio los resultados del factor de espaciado coinciden con los anteriores resultados. El mayor factor de distanciamiento es el de la muestra control, pues presenta una menor superficie específica de poros y una mayor relación pasta/aire.

El factor de espaciado del hormigón con aditivo comercial Micro-air 100 es mayor que el de los hormigones con aditivo orgánico, a pesar de que la superficie específica es levemente mayor que la del hormigón con un 3% de aditivo orgánico. Esto obedece a que contiene una mayor cantidad de poros en las dimensiones nominales más pequeñas, como se observó en la Ilustración 115.

Cuadro 67. Factor de espaciado de los poros en el hormigón en estado endurecido. Aditivo de *Agave americana*

Muestra	Superficie específica (α) mm^{-1}	Relación pasta/aire R	Factor de espaciado
Control	2,47	10,44	2,83
1%	3,69	2,58	0,08
3%	8,55	1,47	0,01
Ma-100	8,57	4,43	0,56

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

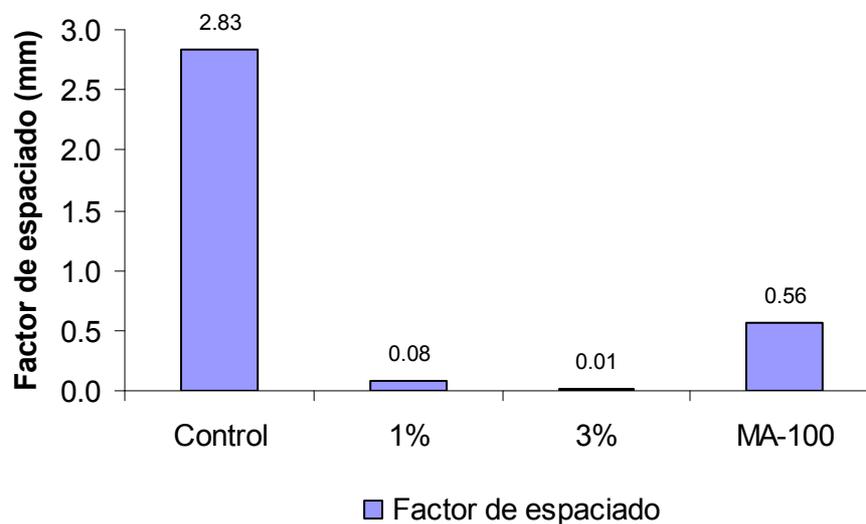


Ilustración 119. Gráfico del espaciado de los poros en el hormigón en estado endurecido. Aditivo *Agave americana*

4.5.2.3 Influencia de licor de la *Furcraea Cabuya* (fique cenizo), en la estructura de poros

Para el aditivo de *Furcraea Cabuya* la estructura de los poros se determinó en dos probetas de hormigón con 3, 5 y 10% de aditivo.

El procedimiento seguido corresponde al descrito en la sección 3.2.5.4 mediante el uso de microscopía asistida por computador. En la Ilustración 120 se observan dos fotografías, tomadas por el microscopio óptico, de las probetas de hormigón con aditivo de *Furcraea cabuya*.

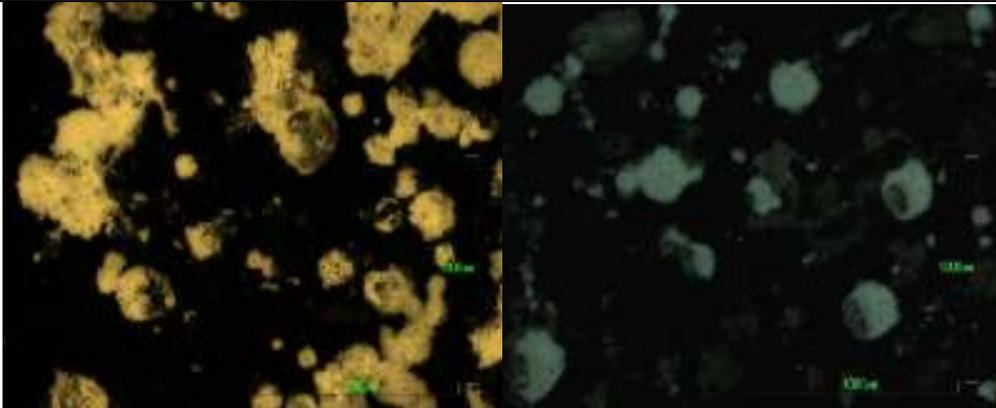


Ilustración 120. Fotografías de microscopía óptica para el ensayo de estructura de poros para el aditivo *Furcraea Cabuya*

Se determinó la distribución de tamaño de los poros encontrados en las probetas de hormigón mediante el analizador digital de imágenes, pero fue necesario hacer una corrección por efecto de la redondez.

El análisis de los datos, se centró en los parámetros que presentan una relación más directa con la porosidad que son:

- Número de poros detectados
- Área
- Perimeter (Perímetro)
- Roundness (Redondez)
- EquivDiam Equivalent Circle Diameter (diámetro del círculo equivalente)

El aire presente en el hormigón no sólo corresponde al ocluido por el aditivo sino también al aire arrastrado naturalmente durante el amasado y el procedente de una evaporación del agua del hormigón. Estos huecos adoptan formas más o menos regulares que van desde los canalículos capilares muy finos hasta cavidades de varios milímetros; el aire ocluido debido a los aditivos, por el contrario son burbujas de forma redondeada.
(⁷⁷)

Teniendo en cuenta lo anterior es posible que en el análisis existan poros con diámetro equivalente similar, pero con redondez diferente tal como se ejemplifica en la Ilustración 121. Por lo tanto para el análisis de la distribución de tamaños de poros en el hormigón se tuvieron en cuenta los poros con valor de la redondez inferior a dos. Lo anterior se determinó teniendo en cuenta estudios de poros en otros materiales sólidos como carbones.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

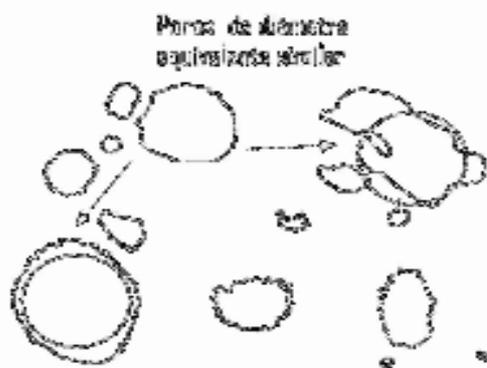


Ilustración 121. Comparación de poros con diámetro equivalente similar y diferencias en la redondez

La distribución de tamaños de poros corregida para varios porcentajes de aditivo en el hormigón se presenta en la Ilustración 122. Se grafican sólo los diámetros entre 0 y 120 μm por ser los mayoritarios en las muestras estudiadas.

Es esta ilustración se puede observar que:

- Para todos los porcentajes, es mayor la cantidad de poros en las muestras con aditivo que en la muestra control.
- Los diámetros de mayor frecuencia, para 5% y 10% de aditivo, son 0 y 10 micras. Con un 3% de aditivo son 15 y 20 micras. Estos valores corresponden a los aditivos oclusores de aire.
- A partir de las 35 micras de diámetro la cantidad de poros es prácticamente igual con cualquier porcentaje de aditivo y cercana a la muestra control.

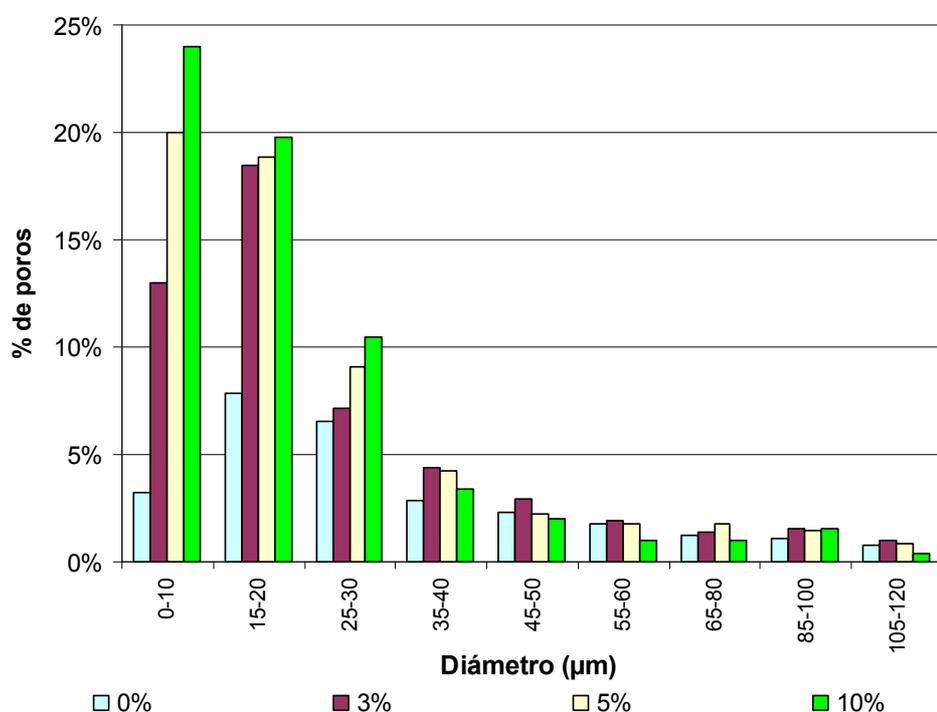


Ilustración 122. Distribución de tamaño de poros en el hormigón con *Furcraea Cabuya*

Otros parámetros del sistema de poros se calcularon de acuerdo con las gráficas presentadas por la norma ASTM C457 (ver Ilustración 123) teniendo en cuenta la composición de las mezclas de hormigón elaboradas las cuales se presentan en el Cuadro 68. Se tuvo en cuenta una superficie específica de 500 inch^{-1} como valor promedio típico de los sistemas de poros con aditivos aireantes.

Cuadro 68. Peso de 1 metro cúbico de hormigón para distintas muestras de hormigón con *Furcraea cabuya*

Muestra	Cemento kg	Arido fino kg	Arido grueso kg	Agua kg	Aditivo kg	Total de la mezcla kg	% de pasta	Aire ocluido (%)
0%	382,4	806,86	1063,07	260,03	0	2512,36	25,57	1,9
3%	343,28	650,98	1045,73	202,54	0,609	2243,14	24,33	2,4
5%	343,28	650,98	1045,73	185,37	1,015	2226,38	23,74	3,2
10%	343,28	650,98	1045,73	200,73	2,03	2242,75	24,26	5,3

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

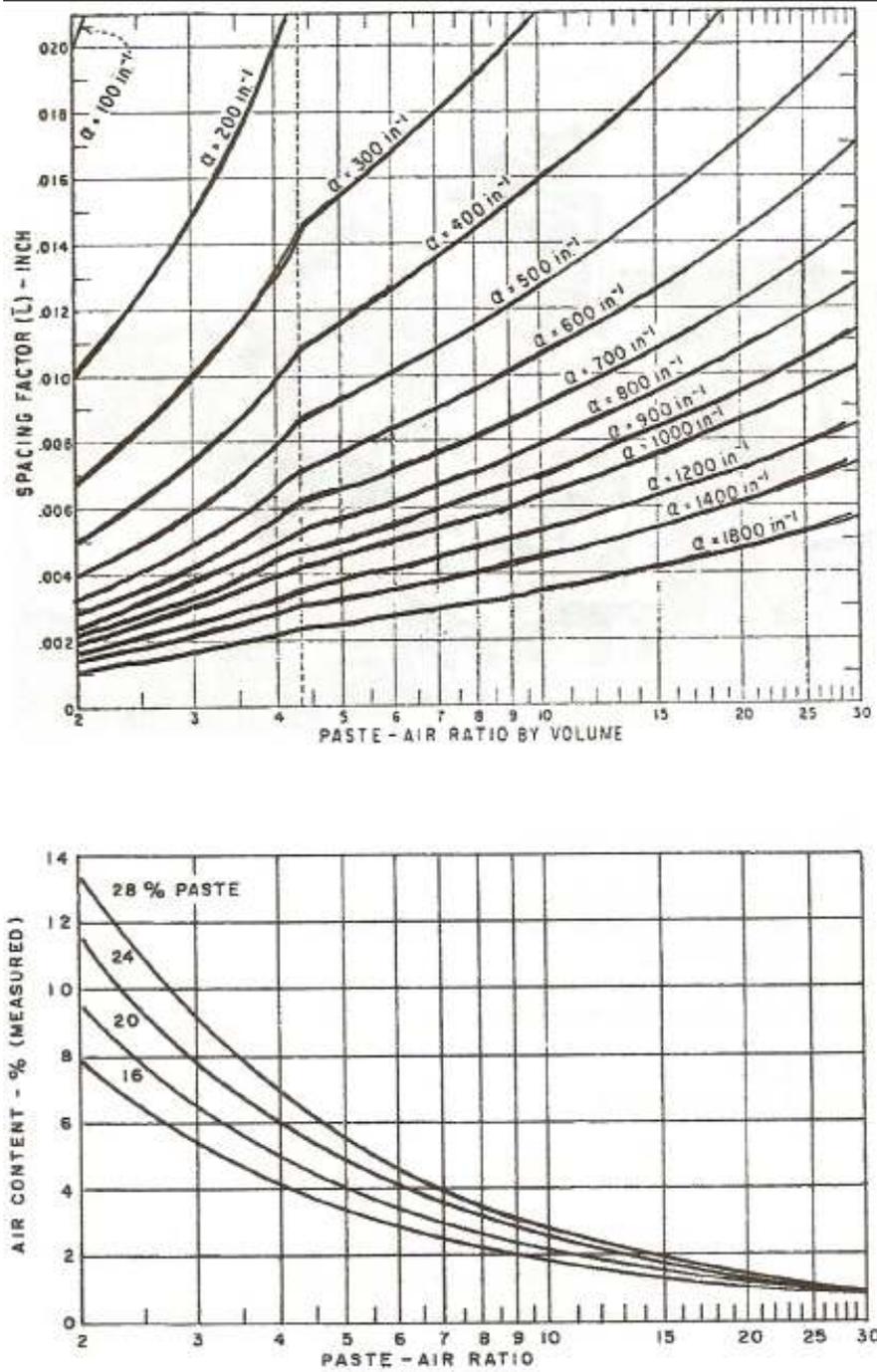


Ilustración 123. Gráficas de la norma ASTM C-457 para estimar el factor de espaciado

La relación pasta/aire obtenida se presenta en la Ilustración 124 donde puede observarse una disminución hasta del 64% de este parámetro con la adición del 10% de aditivo.

El factor de espaciado obtenido se presenta en Ilustración 125 donde puede observarse que la diferencia entre la muestra control y la que tiene un 3% de aditivo no es significativa. La diferencia es más importante con adiciones del 5% y 10%. La distancia entre burbujas normalmente recomendada es 0,1 a 0,2mm pero en algunos casos hay algunos estudios que mencionan como apropiado hasta 0,28 mm. En este caso las muestras con 3 y 5% superan esta recomendación pero también la muestra control, lo que nos podría indicar alguna variación en la aplicación de la técnica.

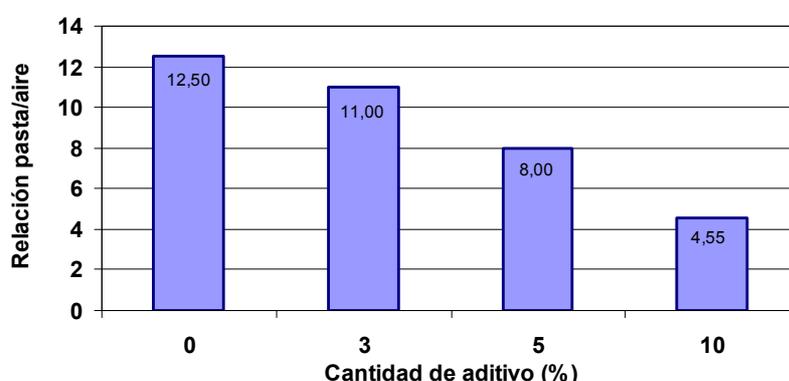


Ilustración 124 Gráfico de la relación pasta/aire en los hormigones con *Furcraea cabuya* endurecidos

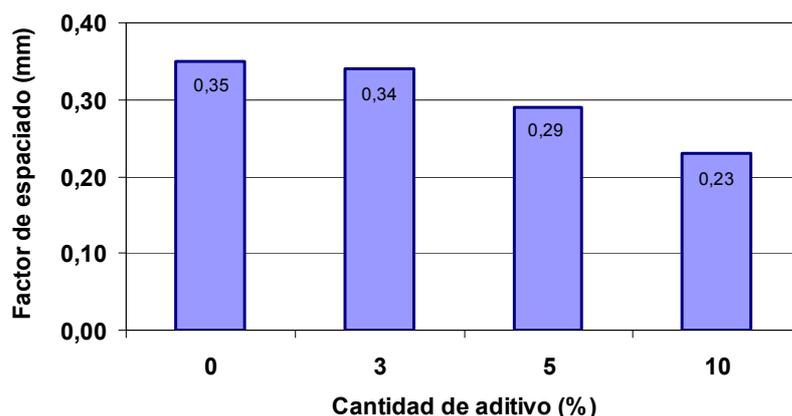


Ilustración 125 Gráfico del espaciado de los poros en el hormigón en estado endurecido con *Furcraea cabuya*

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.5.2.4 Influencia del aditivo en las resistencia mecánicas

4.5.2.4.1 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión de los hormigones, se midió para probetas con el aditivo de licor de *Agave americana* y el licor de *Furcraea cabuya*.

4.5.2.4.2 *Agave americana*

Para los ensayos en hormigones con *Agave americana*, se usaron las mismas dosificaciones expuesta en el Cuadro 57, para hormigones con 0%, 1%, 3% de licor de *Agave americana*, y 0,26% del aireante comercial Micro air-100. Las probetas fueron de forma cúbica con una dimensión de 10x10x10cm. El procedimiento de amasado se hizo de acuerdo con la norma UNE-EN 480-1. El porcentaje de humedad de los áridos se midió mediante un analizador de humedad. El tiempo de curado fue de 7, 28 y 90 días y como parámetro de diseño se trabajó siempre con el mismo asentamiento en cono de Abrams, 5 ± 1 cms.

En el Cuadro 69 se observan los resultados obtenidos para los hormigones control, 1% y 3% de *Agave americana*, y comparativamente los valores correspondientes al 75% de la resistencia de la muestra control. En la Ilustración 126 a) se grafican los datos de la relación entre la resistencia de cada porcentaje de aditivo (R_i) y la resistencia control (R_c) a cada edad de curado. En la Ilustración 126 b) se grafican las mismas resistencias, pero en relación con el 75% de la resistencia del control.

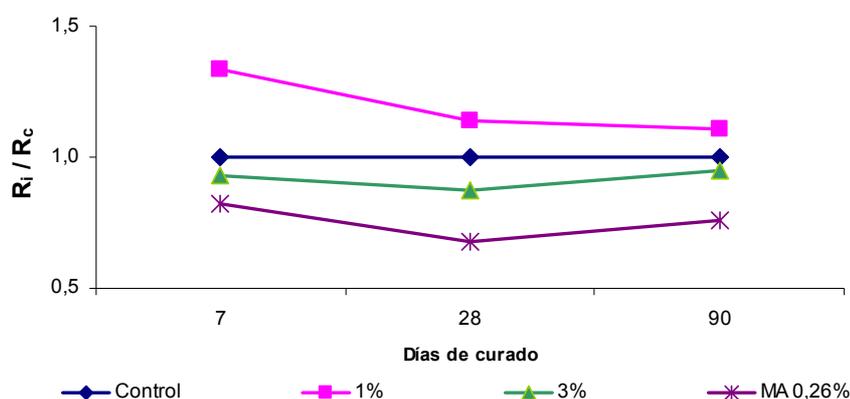
Se puede observar que:

- Para todas las edades, el hormigón con 1% de aditivo de licor de *Agave*, presenta una mayor resistencia a la compresión que la muestra control. Esto se podría atribuir a la disminución en la relación a/c, y a una buena distribución del aire ocluido. Ilustración 126 a)
- Los hormigones con 3% de aditivo y con 0,26% de aireante comercial muestran una menor resistencia que la muestra control. Posiblemente el mayor volumen de aire incorporado afecta notablemente la resistencia a compresión, a pesar de la disminución en la relación a/c. Es de notar que la disminución en la resistencia es mayor con el aditivo aireante comercial que con el licor de *Agave americana*. Ilustración 126 a)

- Para todas las edades, la resistencia a compresión de los hormigones fabricados con aditivo de licor de *Agave americana*, son significativamente mayores que el 75% de la resistencia compresión del hormigón control, lo que ratifica que de acuerdo a la norma UN-EN 934-2, el licor de esta planta puede ser clasificado con una aditivo ocluser de aire. Ilustración 126 b)
- En la Ilustración 126 c) se observa que si bien la relación a/c decrece, lo que inicialmente produciría un aumento en la resistencia a la compresión, ésta se ve disminuida por la inclusión de aire. Como ya se ha dicho las burbujas de aire producen este efecto reductor de la resistencia, lo que debe ser compensado con una mayor cantidad de cemento o una disminución de la relación a/c.

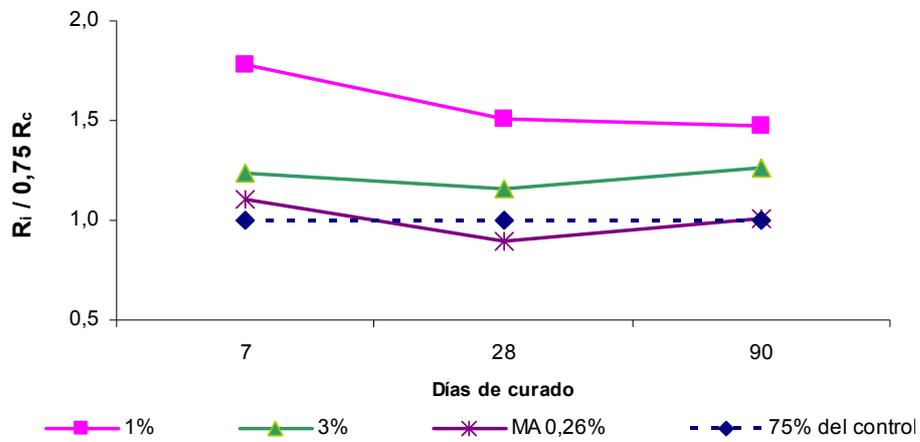
Cuadro 69. Resistencia a compresión de hormigones con *Agave americana*. Igual asentamiento

Muestra	a/c	Resistencia a Compresión (MPa)		
		7	28	90
Control	0,71	21,1	29,7	32,6
1%	0,59	28,2	33,8	36,1
3%	0,51	19,6	26,0	30,9
MA 0,26%	0,59	17,4	20,1	24,8
75% del control		15,8	22,4	24,5

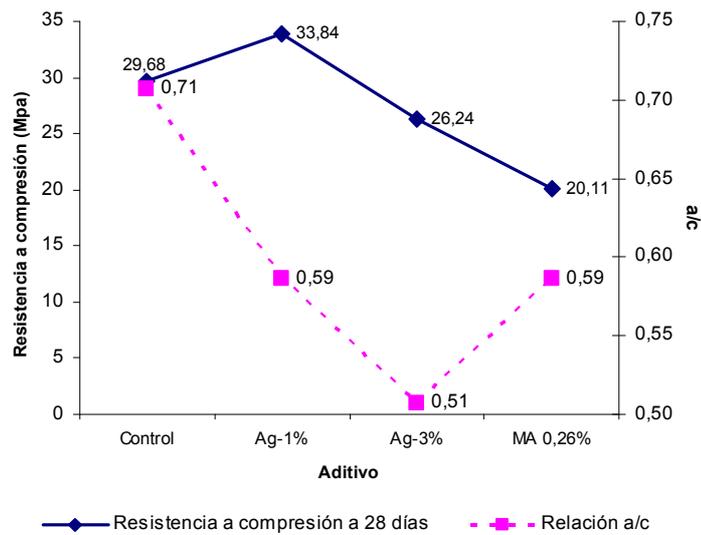


a) Relación entre la resistencia a compresión de los distintos aditivos y la muestra control

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



b) Relación entre la resistencia a compresión de los distintos aditivos y la del 75% de la muestra control



c) Datos comparativos entre la relación a/c y la resistencia compresión a 28 días

Ilustración 126. Gráficos de resistencia compresión en hormigones con *Agave americana*.

4.5.2.4.3 *Furcraea cabuya* (fique cenizo). Variación del porcentaje de aditivo para hormigones con igual asentamiento

Para evaluar la influencia del porcentaje de licor de fique en la resistencia a compresión de los hormigones, preparamos muestras con 3%, 5% y 10% del licor de fique con igual asentamiento que la muestra control (5 cm). Las dosificaciones se pueden ver en el Cuadro 62. Se utilizó cemento tipo I de origen colombiano y árido grueso de tamaño máximo 19,0 mm. Las probetas fueron de forma cilíndrica con una dimensión de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura. El procedimiento de amasado se hizo de acuerdo con la normas NTC colombiana y se especifica en el apartado 3.2.5.5. El porcentaje de absorción de los áridos se obtuvo mediante el método de secado al horno. El tiempo de curado fue de 7, 14 y 28 días.

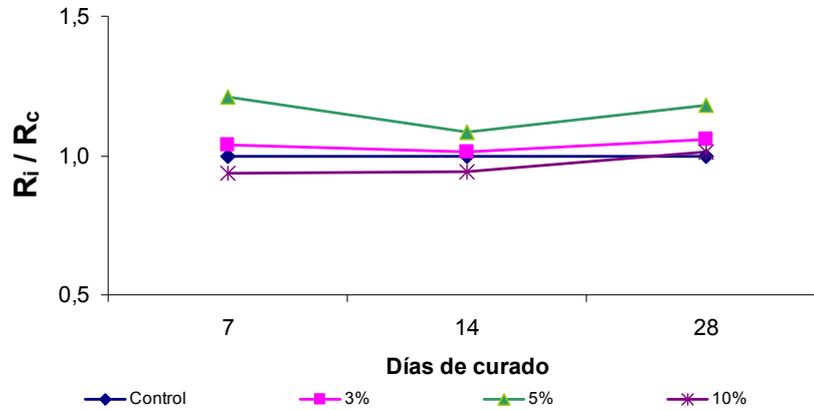
Los resultados obtenidos se encuentran en el Cuadro 70 y se grafican las relaciones entre la resistencia a compresión de los distintos aditivos con el control, Ilustración 127 a); y la de estos mismos con el 75% de la resistencia control, Ilustración 127 b). Podemos observar que:

- Los hormigones preparados con 3% y 5% de aditivo presentan mayor resistencia a compresión que la muestra control en todas las edades. Esto se podría atribuir a la disminución en el agua de amasado y por ende en la relación a/c. El hormigón con un 10%, por el contrario, muestra una leve disminución en la resistencia respecto a la muestra control. Al igual que se observó con el *Agave americana* las grandes cantidades de licor de la planta ocluye mayor cantidad de aire y afecta la resistencia.
- Con todos los porcentajes de aditivo se logran mayores resistencias que el 75% de la resistencia de la muestra control.

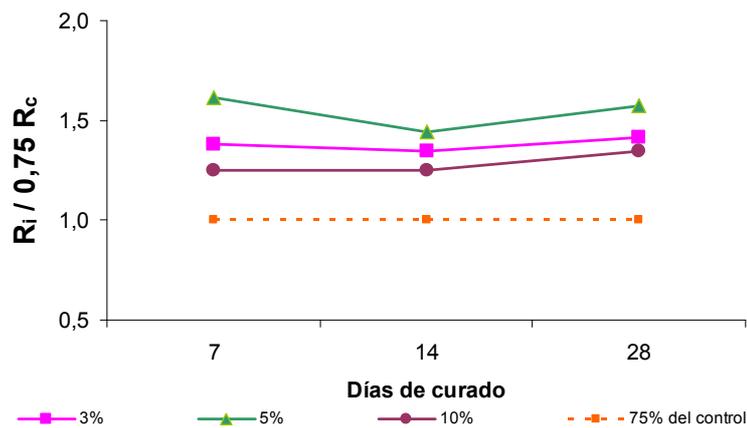
Cuadro 70. Resistencia a compresión de hormigones con Fique. Igual asentamiento

Muestra	Resistencia a compresión (MPa)			
	a/c	7	14	28
Control	0,60	20,6	24,7	26,3
3%	0,59	21,4	24,9	27,9
5%	0,54	24,9	26,7	31,1
10%	0,53	19,3	23,1	26,6
75% del control		15,4	18,53	19,7

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



a) Relación entre la resistencia a compresión de los distintos aditivos y la muestra control



c) Relación entre la resistencia a compresión de los distintos aditivos y la del 75% de la muestra control

Ilustración 127 Gráfico de la resistencia a compresión en hormigones con licor de fique. Igual asentamiento.

4.5.2.4.4 *Furcraea cabuya* (fique cenizo). Efecto de la relación a/c sobre la resistencia de los hormigones

Posteriormente se evaluó la influencia del porcentaje de aditivo en los hormigones pero conservando la relación a/c. Inicialmente se utilizó un cemento tipo I de origen colombiano y árido grueso de tamaño máximo

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

19,0 mm. Las dosificaciones se pueden observar en el Cuadro 58. El tiempo de curado fue de 7, 14 y 28 días.

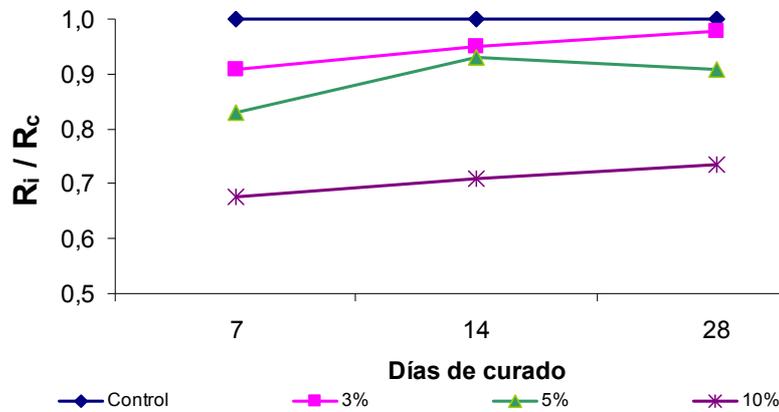
En Cuadro 71 se observan los resultados y en la Ilustración 128 se grafican las mismas relaciones anteriores. Apreciamos que:

- Con todos los porcentajes de aditivo utilizados se observa una disminución de la resistencia a compresión con respecto a la muestra control. A medida que se aumenta el porcentaje, disminuye la resistencia. Ésto se debe posiblemente a los volúmenes de aire que ocluye el licor de la planta. Ilustración 128 a)
- Con 3 y 5% se supera el 75% de la resistencia compresión de la muestra control. Con 10% de aditivo la resistencia a la compresión se reduce ampliamente superando el límite permitido, para aditivos aireantes, por la norma UN-EN 934-2. Ilustración 128 b)

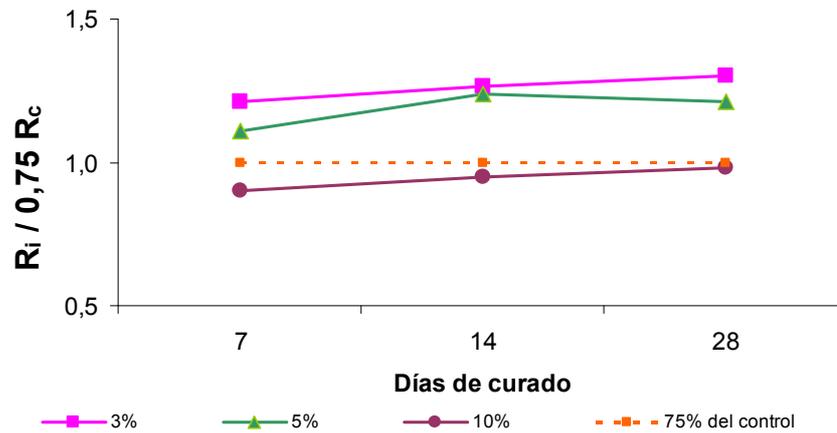
Cuadro 71. Resistencia a compresión de hormigones con Fique. Igual relación a/c, cemento tipo I y árido grueso de 19,0 mm

Muestra	Resistencia a compresión (MPa)			
	a/c	7	14	28
Control	0,60	20,6	24,6	26,3
3%	0,60	18,7	23,4	25,7
5%	0,60	17,1	22,9	23,9
10%	0,60	13,9	17,5	19,3
75% del control		15,4	18,5	19,7

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



a) relación entre la resistencia a compresión de los distintos aditivos y la muestra control



b) relación entre la resistencia a compresión de los distintos aditivos y la del 75% de la muestra control

Ilustración 128. Gráfico de la resistencia a compresión en hormigones con licor de fique. Igual relación a/c, cemento tipo I y árido grueso 19,0 mm.

También se realizó una serie de ensayos variando la relación a/c de manera importante, utilizando dos relaciones a/c extremas. El primer ensayo se hizo con una consistencia seca, a/c 0,45, con árido de 19,0 mm y cemento tipo I. Se utilizó un porcentaje de licor de fique de 5%.

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

En el Cuadro 72 se tabulan los datos obtenidos y se grafican en la Ilustración 129. Se comparan las relaciones del 5% de aditivo con el control y el 75% de la muestra control. Se observa que:

- Con un 5% de licor de fique hay una disminución considerable de la resistencia a compresión respecto a la muestra control. A los 7 días de curado supera ligeramente el 75% de la resistencia a compresión de la muestra control. Esto se explica por una mayor concentración de las sustancias activas retardantes en el aditivo.
- A 28 días, la reducción de resistencia a compresión, es menos significativa, y prácticamente del mismo orden que para los hormigones con a/c 0,60 (Ver Cuadro 71).

Cuadro 72. Resistencia a compresión de hormigones con Fique. Relación a/c 0,45, cemento tipo I y árido grueso de 19,0 mm

Muestra	Resistencia a compresión (MPa)			
	a/c	7	14	28
Control	0,45	25,3	29,7	31,8
5%	0,45	18,1	25,5	28,9
75% del control	0,45	19,0	22,3	23,9

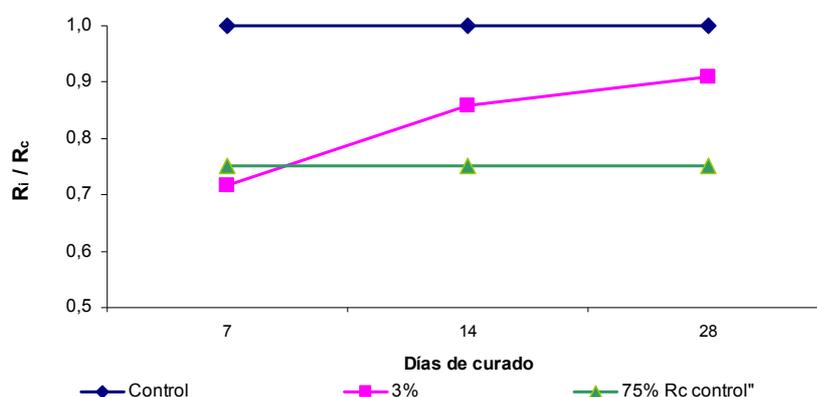


Ilustración 129. Gráfico de las relaciones de resistencia a compresión en hormigones con licor de fique. Relación a/c 0,45, cemento tipo I y árido grueso 19,0 mm.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los mismos materiales se llevó a cabo el ensayo con una relación a/c 0,70. Los resultados se encuentran en el Cuadro 73 y la Ilustración 130.

- Con relación a/c 0,7 la resistencia a compresión se reduce ligeramente respecto al control y supera ampliamente el 75%. Esto podría explicarse porque la mayor cantidad de agua diluye las sustancias activas y por ende la acción aireante del aditivo se disminuye.
- Como era de esperar, en todos los casos, la resistencia a compresión es significativamente menor que con relación a/c 0,45

Cuadro 73. Resistencia a compresión de hormigones con Figue. Relación a/c 0,7, cemento tipo I y árido grueso de 19,0 mm

Muestra	Resistencia a compresión (MPa)			
	a/c	7	14	28
Control	0,7	11,2	13,5	15,4
5%	0,7	10,8	12,9	14,5
75% del control	0,7	8,4	10,1	11,6

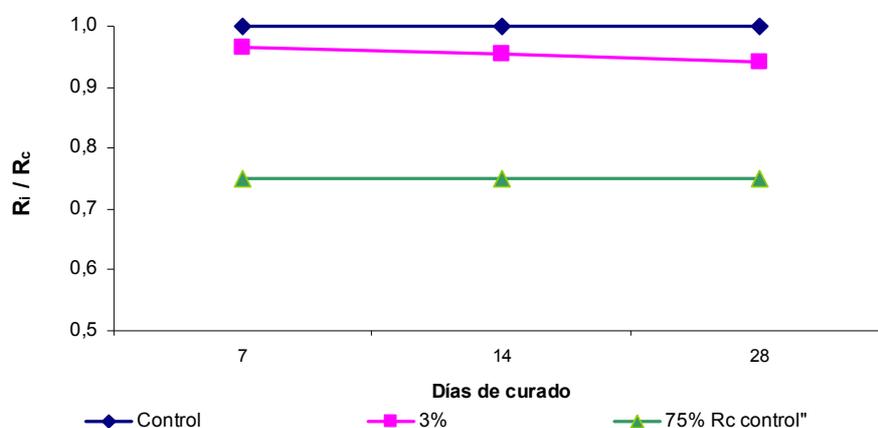


Ilustración 130. Gráfico de las relaciones de resistencia a compresión en hormigones con licor de figue. Relación a/c 0,70, cemento tipo I y árido grueso 19,0 mm.

4.5.2.4.5 *Furcraea cabuya* (fique cenizo). Influencia del tipo de cemento sobre la resistencia a compresión.

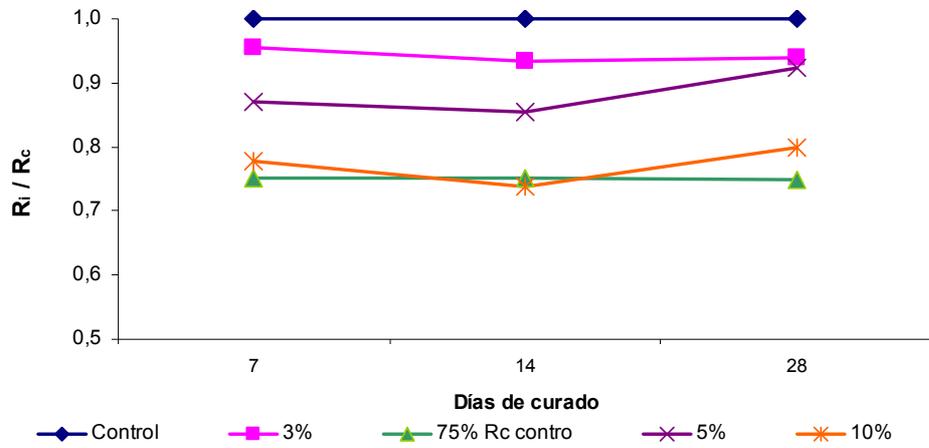
Con el propósito de identificar la incidencia del tipo de cemento en la resistencia a compresión, se prepararon hormigones, con iguales condiciones a los anteriores pero con cemento tipo III (Cuadro 59). En el Cuadro 74 se expresan los resultados y se grafican en la Ilustración 131.

- En general se observa que, en todos los casos, las resistencias son mayores que con el cemento tipo I (Cuadro 71) a pesar de la mayor relación a/c empleada. Esto podría explicarse por la diferencia de su composición química y por su mayor superficie específica. (Cemento tipo I 2800 cm²/g; cemento tipo III 4200 cm²/g).
- La tendencia es la misma que con el cemento tipo I. A medida que se aumenta el aditivo disminuye la resistencia a compresión. Con un 10% de aditivo se observa una disminución considerable de la resistencia pero muy cercana al 75% de la resistencia a compresión de la muestra control a 28 días de curado.
- Comparando las relaciones entre la resistencia a compresión de los dos tipos de cemento, con un 5% de aditivo, se observa un comportamiento prácticamente similar. En ambos casos la resistencia a compresión es ligeramente menor a la control pero mayor al 75% de la resistencia control. Ilustración 131 a)

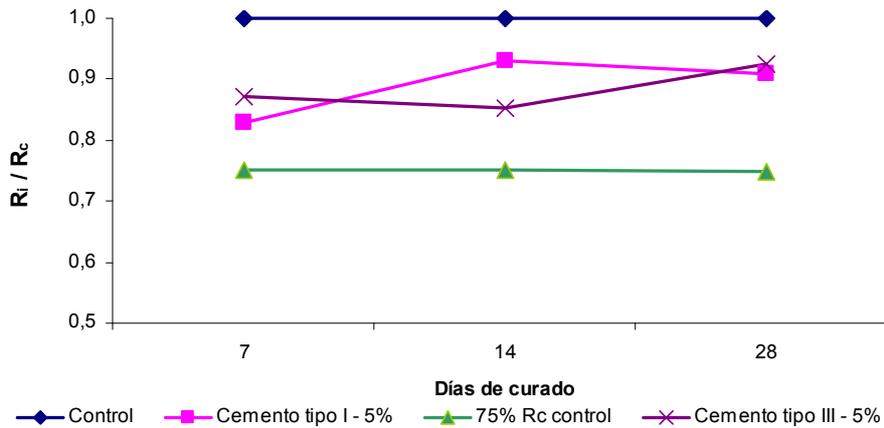
Cuadro 74. Resistencia a compresión de hormigones con Fique. Igual relación a/c, cemento tipo III y árido grueso de 19,0 mm

Muestra	Resistencia a compresión (MPa)			
	a/c	7	14	28
Control	0,68	27,1	30,1	31,8
3%	0,68	25,9	28,1	29,9
5%	0,68	23,6	25,7	29,4
10%	0,68	21,1	22,2	25,4
75% del control		20,3	22,6	23,9

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



a) Gráfico de las relaciones de resistencia a compresión en hormigones con licor de fique. Relación a/c 0,68, cemento tipo III y árido grueso 19,0 mm.



b) Gráfico comparativo de las relaciones de resistencia a compresión entre el cemento tipo I y tipo III, 5% de aditivo.

Ilustración 131. Gráfico de las relaciones de resistencia a compresión en hormigones con licor de fique. Tipos de cemento

4.5.2.4.6 *Furcraea cabuya* (fique cenizo). Influencia del tiempo de amasado

Con el propósito de evaluar la incidencia del tiempo de amasado, en la resistencia a compresión de los hormigones con aditivo de licor de fique, se prepararon mezclas con cemento tipo I, tamaño máximo de árido grueso de 19,00 mm, relación a/c 0,60 y un 5% de aditivo. En Cuadro 75 se presentan los resultados y se grafican en la Ilustración 132. Podemos observar que para las dos edades de curado, 7 y 28 días, la resistencia a compresión permanece constante entre los 10 y 12 minutos de amasado y se aumenta a partir de los 14 minutos. Posiblemente después de 12 minutos de agitación se destruyen las burbujas de aire ocluidas por el aditivo, como se observó al estudiar la influencia del aire ocluido (sección 4.5.1.5) con la trabajabilidad.

Cuadro 75. Resistencia a compresión con distintos tiempos de amasado

Tiempo de amasado min	Resistencia a compresión MPa	
	7	28
10	18,9	26,3
12	18,7	25,7
14	20,1	26,9
16	20,4	27,4
18	22,9	28,7

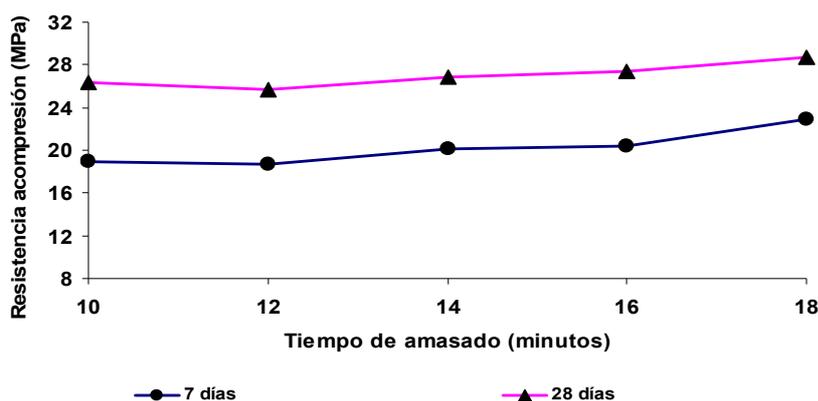


Ilustración 132. Gráfico de la resistencia a compresión en hormigones con licor de fique. Distintos tiempo de amasado.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.5.2.4.7 Módulo de elasticidad

Conocer el módulo de elasticidad de un hormigón es muy importante para determinar su forma de trabajar, en las estructuras de las que va a formar parte. Los componentes del hormigón, considerados aisladamente, tienen módulos de elasticidad muy diferentes; así el de los áridos es más elevado que el del hormigón, mientras que el de la pasta de cemento es más bajo que éste. El comportamiento del conjunto está muy influenciado por las microfisuras que aparecen en las interfases pasta-árido al cargar el hormigón y que hacen que la curva de tensión-deformación deje de ser lineal, dando lugar a que el hormigón se comporte como un pseudo-sólido.

Cuanto mayor es el módulo de elasticidad de los áridos y mayor es la proporción en que entran a formar parte en el hormigón, mayor es el módulo de elasticidad de éste. El módulo de elasticidad es mayor con la edad del hormigón, aumentando más rápidamente que la resistencia a compresión⁷⁹.

Es posible mediante la determinación del módulo de elasticidad, predecir la resistencia a compresión de un hormigón puesto en obra, siempre que se establezca una correlación entre ambos y en la que influirán: el tipo de árido, la dosificación del mismo, condiciones de curado, etc.

Para esta investigación se evaluó el módulo de elasticidad de los hormigones preparados con aditivo del licor de la *Furcraea cabuya*, a igual trabajabilidad de la muestra control, y cuyas dosificaciones se encuentran en el Cuadro 59. El ensayo se llevó a cabo en probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Se realizaron dos medidas del módulo por cada muestra de hormigón.

También se realizó el cálculo del valor teórico del módulo de elasticidad según la fórmula propuesta por la ACI 363⁸⁰ y cuya expresión es la siguiente:

$$E_c = \left(0,0297\sqrt{f_c} + 0,0617 \right) * (\omega_c)^{1,5}$$

Donde f_c es la resistencia en MPa de una probeta cilíndrica curada a 28 días, ω_c es la densidad teórica media del hormigón en kg/m^3

En el Cuadro 76, se pueden observar los resultados obtenidos en las distintas muestras. En la Ilustración 133, podemos observar los resultados comparativos entre las resistencia a compresión y los módulos de

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

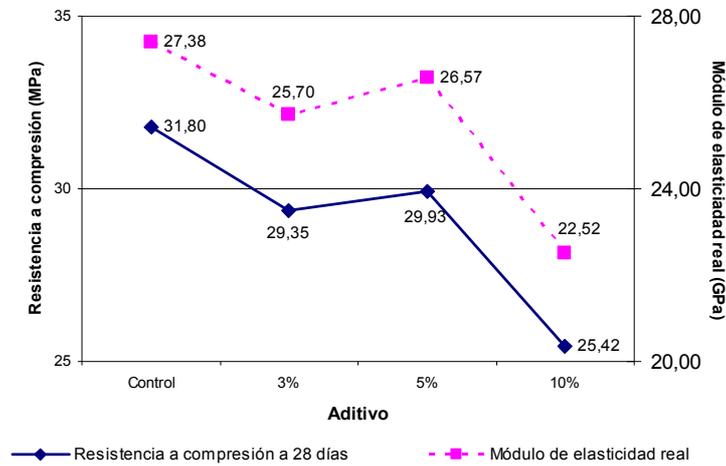
elasticidad, de los mismos hormigones, tanto el real o experimental como el teórico. Los comentarios que podemos hacer son los siguientes:

- El módulo de elasticidad real, de los hormigones con un 3% y 5% de licor de *Furcraea cabuya*, es ligeramente menor que el de la muestra control. Si bien la muestra con un 5% de aditivo tiene un módulo de elasticidad mayor que el que tiene 3%, ninguno de los dos supera un 10% de desviación respecto de la muestra control.
- El módulo de elasticidad real, del hormigón con un 10% de aditivo de licor de *Furcraea cabuya*, es menor que el de la muestra control en un 17% aproximadamente, demostrando la gran cantidad de aire que se ocluye cuando se usan porcentajes muy altos de aditivo.
- El módulo de elasticidad teórico, para todos los hormigones, muestra la misma tendencia del módulo de elasticidad real, y son muy similares.
- Ambos módulos de elasticidad, el teórico y el real, presentan el mismo comportamiento de las resistencias a la compresión, en todas las muestras.

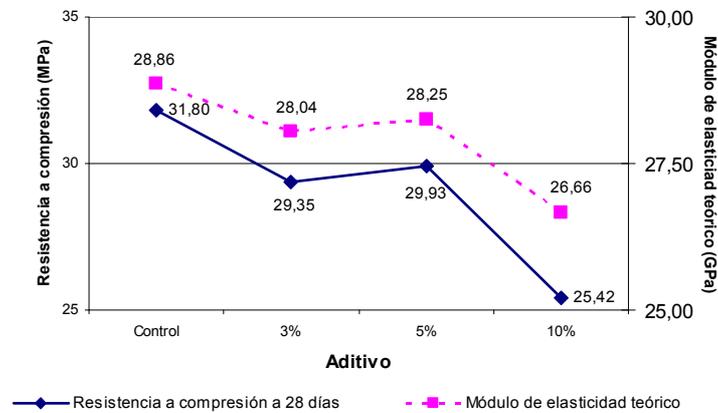
Cuadro 76. Valores de resistencia a compresión, módulo de elasticidad real y módulo de elasticidad teórico de hormigones con aditivo de licor de *Furcraea cabuya*

Muestra	R _c (MPa)	E _c (GPa)	E _c (GPa) Teórico
Control	31,80	27,38	28,86
3%	29,35	25,70	28,04
5%	29,93	26,57	28,25
10%	25,42	22,52	26,66

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



a)



b)

Ilustración 133. Gráficos del módulo de elasticidad en hormigones con aditivo de licor de *Furcraea cabuya*. a) Módulo de elasticidad real vs. Resistencia a compresión; b) Módulo de elasticidad teórico vs. Resistencia a compresión.

4.5.3 Conclusiones del estudio en hormigones endurecidos

Pudimos observar que los poros que se formaron por efecto de los aditivos estudiados fueron, en su mayoría, de forma redondeada. En el caso del *Agave americana* el mayor porcentaje de poros tuvo un diámetro entre 45 y 65 micras y presentó un comportamiento similar al del aditivo comercial.

Para el caso del fique los diámetros de mayor frecuencia se ubicaron entre 0 y 20 micras. Esta diferencia entre los dos aditivos se podría atribuir a una mayor concentración de sustancias activas existentes en el licor de fique, sin considerar las diferencias en los resultados que podría atribuirse al cambio de las técnicas de lectura o a los materiales utilizados. Como consecuencia de la gran cantidad de poros de tamaño pequeño se disminuyó también el factor de espaciado.

Respecto a la superficie específica de poros, como era de esperarse, se obtuvo una superficie específica mayor a medida que se aumentó la cantidad de aditivo en la mezcla. Con un 3% de *Agave americana*, se obtuvo una superficie específica similar que con 0,26% del aditivo comercial.

Los dos aditivos orgánicos estudiados ocluyeron grandes cantidades de aire que se aumentan a medida que aumenta la cantidad de aditivo en la mezcla. Ese comportamiento en el hormigón endurecido concuerda con el comportamiento en el mortero u hormigón fresco. La relación pasta/aire, en los dos aditivos, fue consecuente con la cantidad de aire ocluido. A medida que aumenta la cantidad de aire se disminuyó dicha relación

En general, con respecto a la estructura de poros, se pudo corroborar que el contenido total de aire aumenta a medida que se aumenta el porcentaje de aditivo. Igualmente que las burbujas de aire que se ocluyen durante el proceso de amasado se conservan durante el endurecimiento.

Respecto a la resistencia a la compresión se observó que con el 1% de *Agave americana*, a igual asentamiento que la muestra control, se obtuvo una mayor resistencia. En el caso de fique se logró una mayor resistencia hasta con un 5% de aditivo a todas las edades. Esto se explica, posiblemente, en la disminución de agua que se obtiene por el efecto plastificante del aditivo. En los dos casos se supera la resistencia a compresión que tuvo el aditivo comercial.

No ocurrió lo mismo cuando usamos la misma relación a/c. Con una relación a/ de 0,6 y hasta un 5% de aditivo de fique se obtuvo una leve disminución en la resistencia a compresión. Con un 10% de aditivo hay

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

una disminución considerable de la resistencia incluso un poco por debajo del 75% de la resistencia de la muestra control debido, posiblemente, a la gran cantidad de aire ocluido. Con una relación a/c 0,45 se observó una disminución considerable de la resistencia, a los 7 días de curado, comportamiento que se explica en la mayor concentración de las sustancias activas retardantes en el aditivo. A los 14 y 28 días se superó ampliamente el 75% de resistencia de la muestra control. Con una relación a/c 0,7 la resistencia a compresión, a todas las edades, se redujo ligeramente pero también superó ampliamente el 75% de la resistencia de la muestra control. Esto posiblemente porque se reduce la acción aireante y retardante del aditivo por la mayor cantidad de agua.

Se observó que el tipo de cemento influye en la resistencia a compresión de los hormigones con aditivo. Cuando utilizamos cemento tipo III y aditivo de fique obtuvimos mejores resistencias a compresión que con el tipo I debido posiblemente a que el tipo III, por su composición química y su superficie específica, ocluye menor cantidad de aire que el tipo I.

El tiempo de amasado también es un factor determinante en el comportamiento del aditivo y por ende en la resistencia a compresión. Observamos que entre los 10 y 12 minutos de amasado se conserva la resistencia a compresión. A partir de los 14 minutos se aumentó la resistencia lo que nos indica que, posiblemente, debido a la agitación se rompieron las burbujas y se disminuyó la cantidad de aire ocluido.

En general, si bien la resistencia a compresión disminuye, en casi todos los casos está por encima del 75% de la resistencia de la muestra control, que es el límite propuesto por la norma UNE, para los aditivos aireantes.

El módulo de elasticidad presenta un comportamiento similar al de la resistencia a compresión. La diferencia entre el módulo de elasticidad experimental y el módulo de elasticidad teórico es pequeña.

4.6 Estudios de durabilidad

El tema de este apartado es el comportamiento del hormigón cuando está expuesto a distintas condiciones ambientales que le pueden causar deterioro. Estos deterioros pueden ser causados por efectos físicos, como es el caso del hielo, o efectos químicos. Las sustancias químicas que causan daño a los concretos son numerosas e incluye aquellas que

permanecen de forma natural en los suelos o en el agua y aquellas que tienen origen en los procesos industriales.

Como resultado de las investigaciones que sobre hormigón se han hecho, en el campo y en el laboratorio, se ha logrado incrementar la resistencia del cemento a los agentes químicos y también se ha concluido que la calidad del hormigón es de primordial importancia para evitar o mitigar los efectos de los agentes químicos o las acciones físicas.

La calidad de un hormigón no está necesariamente referida a las resistencias mecánicas, por consiguiente no se puede asegurar que porque un hormigón cumple ampliamente las resistencias para los propósitos que fue diseñado, sea también resistente al ataque y desintegración en cualquier ambiente en el que es colocado. Sin embargo, también es verdad, que algunas variables que aumentan la resistencia del hormigón, por ejemplo la alta densidad, también favorecen la durabilidad. Un hormigón muy denso puede ser casi inmune a los ataques donde uno de menor calidad sufre desintegración y puede fallar con el paso de los años. Hay excepciones como en el caso de los hormigones con aire ocluido.

Casi todas las formas de deterioro son resultado del ingreso del agua. La acción del agua puede ser de dos tipos: ataque físico, donde la congelación del agua o la cristalización de sales disueltas en el agua causan daño; y el daño químico, que está asociado a la formación de iones. ⁽⁸¹⁾

4.6.1 Influencia del aditivo en morteros expuestos a una solución de sulfatos

Algunos sulfatos de sodio, potasio, calcio y magnesio que están naturalmente en el suelo o disueltos en el agua freática o subterránea pueden llegar a encontrarse junto o alrededor de estructuras de hormigón, especialmente cimentaciones, susceptibles a su efecto perjudicial. En otros casos, la superficie del hormigón se puede ver expuesta a evaporaciones (fábricas, industrias, etc.), que tiene sulfatos (sales) disueltos, los cuales pueden acumularse sobre dicha superficie, incrementando su concentración y por lo tanto sus posibilidades de deterioro. Los mecanismos que intervienen en el ataque del hormigón por sulfatos, aparentemente son dos reacciones químicas, a saber: combinación de los sulfatos con hidróxido de

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

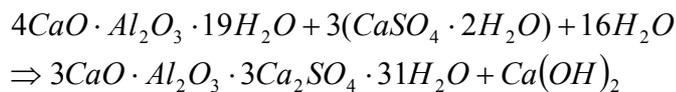
calcio (cal hidratada), liberada durante el proceso de hidratación del cemento, esta combinación forma sulfato de calcio (yeso); combinación de yeso y aluminato hidratado de calcio para formar sulfoaluminato de calcio (etringita). Estas dos reacciones tienen como resultado un aumento del volumen sólido. A la segunda se atribuye la mayoría de las expansiones y rupturas del concreto causadas por soluciones de sulfatos.⁸²

Taylor⁽⁸¹⁾ en su libro sobre la química del cemento manifiesta que para suelos que contienen hasta 1,4 g/l de iones de SO_4^{2-} , se debe garantizar al menos 330 kg de cemento por metro cúbico de hormigón y una relación a/c no mayor de 0,5. Con niveles de sulfatos hasta de 6,0 g/l, sin altas concentraciones de magnesio, con niveles altos de adiciones puzolánicas, o cemento Pórtland resistente a sulfatos, no sería necesario. En contenidos mayores de sulfatos, o cuando se encuentran niveles altos de magnesio, el uso de un cemento Pórtland resistente a los sulfatos combinado con un hidrófugo es esencial. En cualquiera de los casos es sumamente importante hacer una buena compactación para lograr un hormigón impermeable.

Margy Eglinton⁽⁸³⁾ comenta que todos los sulfatos solubles tienen una acción deteriorante en el hormigón, pero el mecanismo y severidad del ataque varía de acuerdo a la base. Mientras que el sulfato de calcio reacciona solamente con los aluminatos cálcicos hidratados para formar sulfoaluminato de calcio, el sulfato de sodio reacciona con el hidróxido de calcio para formar sulfato de calcio, el cual reaccionará con los aluminatos. Las reacciones son:



Reacción 1



Reacción 2

Con el sulfato cálcico sólo se da la reacción 2.

El sulfato de magnesio tiene una mayor acción que otros sulfatos y descompone los silicatos cálcicos hidratados además de reaccionar con los aluminatos e hidróxido de calcio. Si los silicatos tri – o dicálcicos son puestos en una solución de sulfato de magnesio, la formación de cristales

de yeso ocurre rápidamente. Los silicatos cálcicos hidratados reaccionan de la siguiente manera:



Reacción 3

La razón por la cual esta reacción logra completarse, mientras con sulfato de sodio no lo hace, es por la baja solubilidad del hidróxido de magnesio y el bajo valor de pH de su solución saturada. Es soluble sólo cuando logra valores de aproximadamente 0,001 g/L y su solución saturada tiene un pH alrededor de 10,5. Esto es más bajo que el pH requerido para estabilizar los silicatos cálcicos hidratados. Los silicatos liberan cal a la solución para establecer su pH de equilibrio, pero cuando está presente el sulfato de magnesio la cal reacciona con él, formando hidróxido de magnesio y reduciendo el valor del pH a 10,5 de nuevo; más cal pasa a la solución para reestablecer el pH, y entonces se da la reacción. El sulfato cálcico se acumula en la solución hasta que se satura y los cristales de yeso se separan.

La reacción 3 no es la final pues el hidróxido de magnesio y el gel de sílice pueden reaccionar muy lentamente hasta formar un silicato de magnesio hidratado. Esto fue confirmado por el hallazgo en una pared de mar de un material blanco el cual dió un patrón de rayos X con una composición aproximada de $4MgO \cdot SiO_2 \cdot 8.5H_2O$. Este silicato de magnesio hidratado parece no tener un poder aglomerante, y su formación representa entonces un estado final en el deterioro del ataque de la solución de sulfato de magnesio, aunque en la práctica esto sólo se podría lograr después de largos períodos.

Cuando el hidróxido cálcico, en presencia de sulfatos, reacciona para formar yeso, duplica su volumen en sólido, los respectivos volúmenes moleculares son 33,2 y 74,2 mL (ver Cuadro 77). La combinación del aluminato cálcico hidratado y el yeso, para formar sulfoaluminato cálcico también supera el doble del volumen sólido.

Aunque es claro que el ataque con sulfatos permite un incremento en el volumen sólido, hay incertidumbre en cuanto al mecanismo. Una dificultad para atribuir la expansión directamente al incremento del volumen de los sólidos producidos es que hay una pequeña correlación entre la cantidad de sulfoaluminato cálcico o yeso y el grado de expansión observado. La distinción entre la fase sólida y líquida es importante. Es generalmente aceptado que la combinación de sulfato en una reacción en estado sólido provoca una expansión, mientras que no hay expansión cuando la reacción

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

tiene lugar en solución y los productos pueden ser distribuidos, entre la masa. Hay, sin embargo, diferencias de opinión en cuanto a qué compuestos del cemento están involucrados en las reacciones. Se ha sugerido, por ejemplo, que es la conversión en estado sólido de $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$ a $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$, la responsable pero otros puntos de vista dicen que es debido a la presencia de $19H_2O$ y no de $13H_2O$ de aluminato tricálcico hidratado durante el fraguado. Como se ve en el Cuadro 77, esta conversión para el hidrato de $19H_2O$, produciría un decremento, y no un incremento, en el volumen sólido.

La tasa de ataque para la resistencia de los morteros y hormigones debido a las soluciones de sulfatos depende, de la concentración de la solución. La tasa se incrementa rápidamente cuando la concentración es mayor de 0,5% para sulfato de magnesio y 1,0% de sodio, pero más allá de estos límites hay una disminución de la tasa. Así la pérdida de resistencia en un 5% de solución podría ser solamente alrededor de dos o tres veces la del 0,5% de solución. En una concentración de 5%, los sulfatos de magnesio y sodio tienen el mismo efecto, pero para un 0,5%, el sulfato de sodio tiene una acción más lenta.

Cuadro 77. Volumen molecular de los compuestos de hormigón

Compuesto	Peso molecular g/mol	Densidad g/cm ³	Volumen molecular ml
$Ca(OH)_2$	74,1	2,23	33,2
$Mg(OH)_2$	58,3	2,38	24,5
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	272,2	2,32	74,2
$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$	378,2	2,52	150,1
$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 19H_2O$	668,3	1,81	369,2
$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$	622,3	1,99	312,7
$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$	1236,6	1,73	714,9

Fuente: (83)

Para este estudio se fabricaron probetas con arena de sílice del tipo descrito en la sección 3.1.2, cemento tipo CEM I-52,5R descrito en la sección 3.1.1 del capítulo experimental y extracto de *Agave americana*. Las dosificaciones utilizadas se presentan en el Cuadro 78.

Cuadro 78. Dosificación de materiales para estudio de ataque por sulfatos

Muestra	Cemento (g)	Arena (g)		Aditivo			Agua de amasado (g)	Agua total (g)	a/c
		AFA 45	AFA 60	%	g	H ₂ O*			
1	450	810	540	0	0	0	225,0	225	0,5
2	450	810	540	1	4,5	4,2	220,8	225	0,5
3	450	810	540	3	13,5	12,4	212,6	225	0,5
4	450	810	540	5	22,5	20,7	204,3	225	0,5

* El agua del aditivo es el 92% de la masa total.

Se preparó la mezcla de acuerdo al procedimiento descrito en la sección del capítulo experimental 3.2.4. Los moldes utilizados para las probetas fueron de acero en forma prismática, con una dimensión de $25 \times 25 \times 285 \text{ mm}$ (volumen 0,178 L), y de dos y tres compartimientos cada uno (ASTM C490). Este molde permite una longitud real, entre las bases interiores de los pines, de 250 mm . Después de llenados los moldes se taparon con un vidrio y se introdujeron en la cámara húmeda hasta las 24 horas, tiempo en el cual se desmoldaron y se sumergieron en agua para el curado. Se fabricaron cinco probetas de cada muestra.

Cuando alcanzaron una resistencia a la compresión de $20 \pm 1 \text{ MPa}$, una probeta de cada muestra se dejó secar al aire (21°C y 65% de humedad relativa aproximadamente) y las cuatro restantes se sumergieron en una solución de 50,0 g de sulfato sódico (Na_2SO_4) disuelta en 900 mL de agua desionizada para obtener 1,0 L de disolución (5%). La disolución se preparó con un día de anticipación a la inmersión de las probetas y se verificó que su pH estuviera en un rango entre 6,0 y 8,0. Se vertió en una cubeta plástica y se mantuvo durante todo el ensayo una cantidad correspondiente a $4,0 \pm 0,5$ volumen de disolución por volumen de probeta. Quiere decir que por cada cuatro probetas se prepararon 0,702 L de disolución aproximadamente.

4.6.1.1 Estudio de la masa en morteros con aditivo

Para el estudio de la variación de la masa en el tiempo se usó una balanza de capacidad 600 g con resolución 0,01 g. El peso inicial (día 0) se tomó con la probeta saturada de agua de curado. Posteriormente se efectuaron medidas a los 7, 14, 21, 28, 56, 91, 105, 120, 180, 270 y 360 días. El porcentaje de pérdida o ganancia de masa se calculó con respecto al peso de la probeta saturada de agua.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Ilustración 134, se muestra la variación de masa frente al tiempo de inmersión de las probetas de mortero, curadas al aire. Los resultados ponen de manifiesto que:

- Hasta los 120 días de curado se observa una pérdida de masa, posiblemente debido a la evaporación del agua que no reacciona con el cemento. A partir de los 180 días de curado se empieza a ganar peso posiblemente debido a procesos de carbonatación de la probeta al estar curada en el medio ambiente.
- En todos los casos, la pérdida de peso es menor en los morteros con aditivo. Esto se explica en parte por la disminución de la densidad que aportan los poros de aire y por otra en que la porosidad, que como se ha dicho anteriormente es mayoritariamente cerrada, bloquea el ingreso del agua. A medida que se aumenta el porcentaje de aditivo es más evidente el fenómeno.

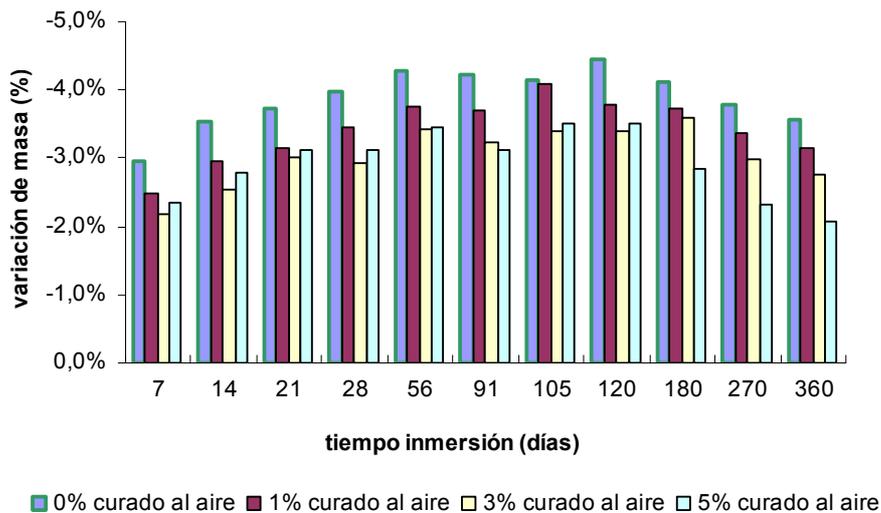


Ilustración 134. Gráfico de la variación de la masa en probetas curadas al aire con distintos porcentajes de aditivo de Agave.

En la Ilustración 135, se muestra la variación de masa frente al tiempo de inmersión de las probetas de mortero, en la disolución al 5% de Na_2SO_4 . Se observa que:

- A medida que aumenta el tiempo de curado aumenta también el peso de las probetas de mortero. Esto se podría explicar por la formación del sulfato de calcio de la reacción del sulfato de sodio con el hidróxido de calcio, como se muestra en la reacción 1 de este mismo capítulo.
- El peso es igual o ligeramente mayor cuando se aumenta el porcentaje de aditivo en el mortero en especial para edades prolongadas. Esto se debe posiblemente a que en la superficie de la probeta quedan poros abiertos que permiten el depósito del sulfato cálcico propio de la reacción antes mencionada (Ilustración 136). No se observa deterioro de las probetas y por ello no se advierten pérdidas de peso.

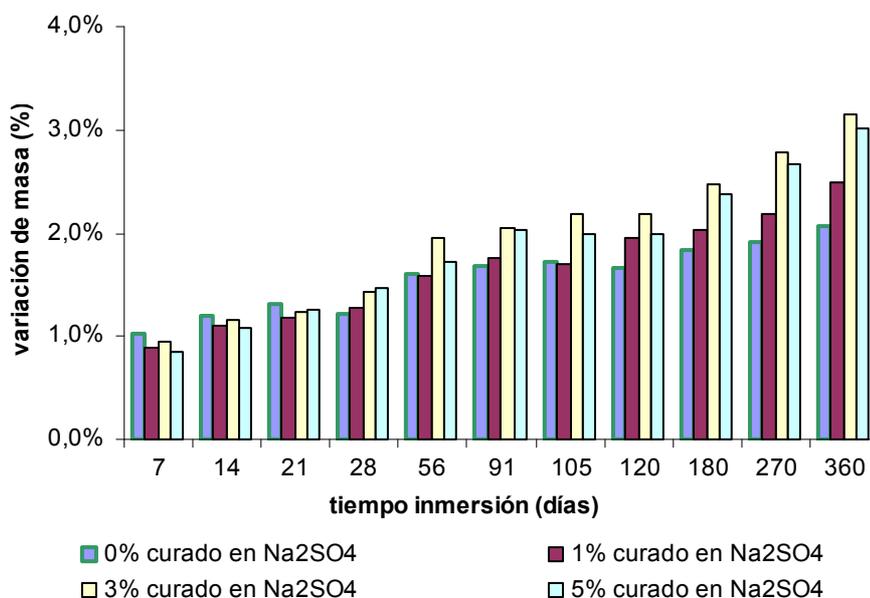


Ilustración 135. Gráfico de la variación de la masa sometida a un ataque por sulfato de sodio y con distintos porcentajes de aditivo de *Agave*

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



Ilustración 136. Fotografía de probetas sometidas a un ataque por sulfato de sodio

4.6.1.2 Estudio del cambio de longitud de los morteros con aditivo

Para este ensayo se utilizaron las mismas probetas para el estudio de la evolución de la masa y cuya dosificación aparece descrita en el Cuadro 78. También se utilizaron los mismos moldes y el procedimiento de amasado e inmersión en solución de Na_2SO_4 .

Se utilizó un comparador de lectura para medir el cambio de longitud en las probetas, incremento o decremento, medido a lo largo del eje longitudinal de la probeta. Después de limpiar el hueco de la base del comparador donde descansa uno de los pines de la probeta, se leyó la lectura de la barra de referencia. Se tomó una probeta de la cubeta de inmersión, se secó con papel absorbente, se puso en el comparador y se hizo la lectura correspondiente. Posteriormente se volvió la probeta a la cubeta y así sucesivamente con las otras probetas. Las lecturas se hicieron a los 7, 14, 21, 28, 56, 91, 105, 120, 180, 270 y 360 días. El procedimiento del ensayo se describe en la sección 3.2.6.1 del capítulo experimental.

La variación de longitud (retracción o hinchamiento) de cada probeta se calcula, a cada edad, por la fórmula siguiente:

$$V\% = 100 \frac{\Delta L}{L_o}$$

Donde:

ΔL = es la variación de longitud de la probeta con relación a la longitud inicial.;

L_o = es la longitud de la base del molde, igual a 285 mm

Para el cálculo se tomó el promedio de la lectura de cuatro probetas por cada porcentaje de aditivo, con una aproximación de 0,01%.

- En la Ilustración 137 se observa graficados los datos obtenidos del cambio de longitud de las probetas curadas al aire y con distintos porcentajes de aditivo. Se puede observar que la muestra control presenta mayor retracción, en todas las edades de curado, respecto a las muestras con aditivo, ésto debido, en parte, a la mayor cantidad de agua de amasado y que el agua está sujeta por tensión capilar y su eliminación causa retracción. La retracción de las muestras con aditivo es prácticamente igual con cualquier porcentaje. En todos los casos la retracción permanece prácticamente igual en todo el tiempo de exposición al aire.

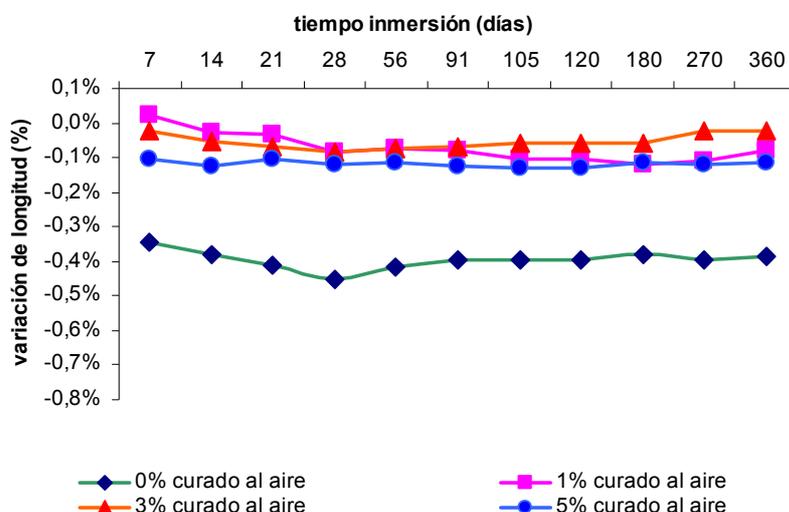


Ilustración 137. Gráfico de la variación de la longitud en probetas curadas al aire con distintos porcentajes de aditivo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Ilustración 138 se observa graficados los datos obtenidos del cambio de longitud de las probetas curadas en una solución de Na_2SO_4 y con distintos porcentajes de aditivo. Se aprecia que con 0% y 1% de aditivo hay una leve tendencia a la expansión pero no existen cambios volumétricos importantes. Por el contrario cuando adicionamos el licor del Agave en porcentajes del 3% y 5% se aprecian expansiones significativas. Esto es debido, posiblemente, al aporte externo de agua. No se apreciaron a simple vista desconchamientos significativos ni fisuramientos por efecto de la solución salina, en ningún caso, lo que significa que el uso de este aditivo no produce patologías inherentes a la expansión por sulfatos.

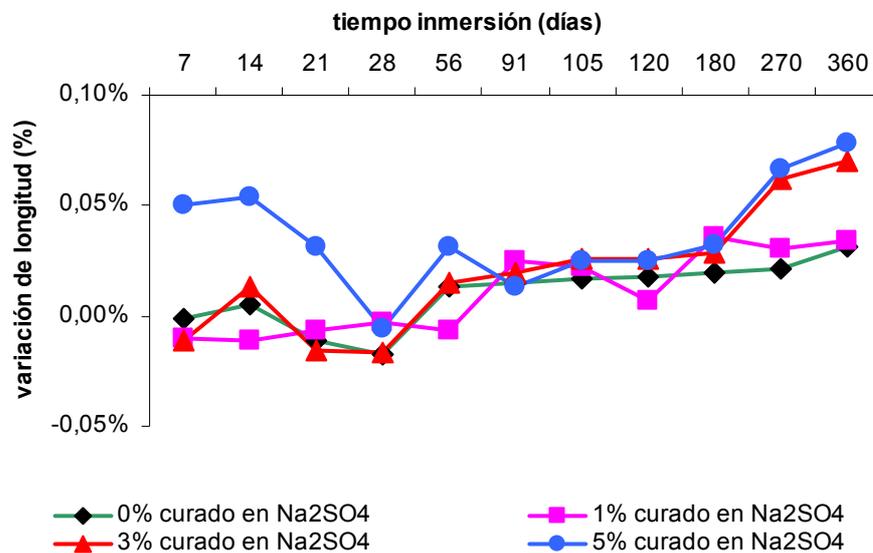


Ilustración 138. Gráfico de la variación de la longitud de probetas con distintos porcentajes de aditivo, sometidas a un ataque por sulfato de sodio.

4.6.2 Influencia del aditivo en la resistencia al efecto hielo-deshielo

Hay tres prerequisites para que exista un ataque por congelamiento:

- Un hormigón permeable que admita agua
- La presencia de agua (aunque los materiales no necesitan estar saturados para que sean afectados por el congelamiento)
- Temperaturas por debajo de 0 °C

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

El mecanismo de ataque ha sido atribuido al 10% de expansión del agua absorbida y congelada, aunque es ahora conocido que mucho del daño puede resultar de movimiento del agua en el hormigón cuando alcanza temperaturas por debajo de 0 °C. El agua se acumula en los poros y grietas grandes y pueden causar grandes expansiones, mientras en otras áreas se está produciendo una desecación. El daño por congelamiento del hormigón se agrava por:

- Las superficies horizontales tienden a absorber más agua en condiciones de humedad, toman mucho tiempo para secarse y también se enfrían más rápido ante la radiación del cielo en una noche clara.
- Muy bajas temperaturas ayudan a la migración del agua que trae como consecuencia el congelamiento a mayores profundidades.
- Los ciclos hielo-deshielo aumentan el daño. Una vez el congelamiento ha ocurrido no se presenta ningún otro daño a una temperatura constante. Sin embargo, un descongelamiento seguido por otro congelamiento iniciará otro ciclo de daño.
- Los hormigones permeables son más vulnerables a ser atacados.
- Las sales de deshielo, derriten el hielo pero se cristalizan y aumentan el daño.

El uso de agentes inclusores de aire evitan o disminuyen el riesgo de daño. Es importante darse cuenta que un hormigón recién hecho, con una estructura hidratada incompleta y una alta permeabilidad tiene un alto riesgo de congelamiento, y debe ser protegido por un material que le permita desarrollar la suficiente resistencia al congelamiento⁽⁸³⁾.

Para evaluar la influencia del aditivo al congelamiento se expusieron probetas con 1% ,3% y 5% de aditivo del licor de la *Furcraea cabuya* a los ciclos de hielo-deshielo, de acuerdo con el procedimiento de la norma ASTM C490 que se describió en capítulos anteriores. Las características de las mezclas elaboradas se presentan en el Cuadro 79.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuadro 79. Mezclas elaboradas con aditivo de *Fucraea Cabuya* para determinar el comportamiento al hielo-deshielo

Muestra	Cantidad de mortero (cm ³)	Cantidad de cemento (g)	Cantidad de agua (g)	Cantidad de arena Normalizada (g)	Cantidad de aditivo (g)
0%	552,8	500	242,0	1375	0
1%	552,8	500	237,3	1375	5
3%	552,8	500	227,3	1375	15
5%	552,8	500	218,3	1375	25

En la Ilustración 139 puede observarse el cambio de longitud de las probetas sometidas a 36, 72 y 94 ciclos de hielo deshielo. Se puede ver que:

- En general el aditivo disminuye la expansión del mortero. A medida que se aumenta el aditivo se disminuye la expansión. Esto posiblemente se debe a que existe una mayor cantidad de aire ocluido y a que los vacíos actúan como alojamientos del agua cuando se ve forzada a desplazarse por el aumento de volumen al llegar al punto de congelación, reduciendo la presión y previniendo que se exceda la resistencia a tensión del hormigón que lo podría llevar a la falla
- En las probetas con aditivo, no se aprecia un aumento considerable de la expansión a partir de los 36 ciclos, posiblemente porque a esta frecuencia ya se han logrado los cambios volumétricos por efecto del congelamiento del agua.

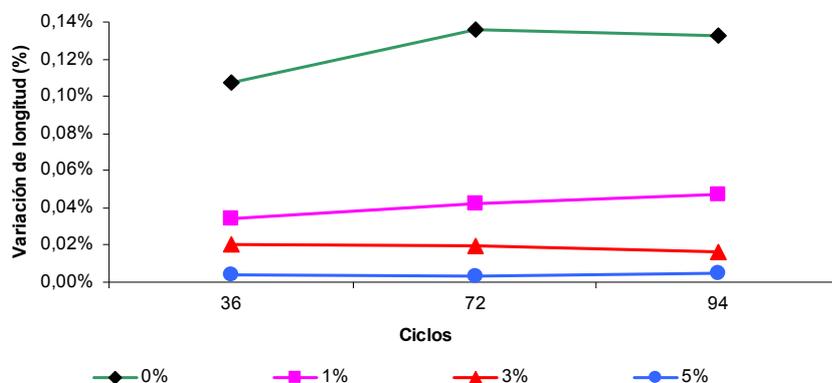


Ilustración 139. Gráfico del cambio de longitud por efecto del hielo deshielo para varios porcentajes de aditivo del licor de la *Furcraea cabuya*

4.6.3 Conclusiones de los estudios de durabilidad

Con respecto a la masa de las probetas se observó que cuando fueron curadas al aire se disminuyó la masa a medida que se aumentó el aditivo. Esto se explica por la disminución en la densidad de la probeta que aportan los poros de aire. Por el contrario, cuando estuvieron inmersas en la solución de sulfato de sodio, se produjo un aumento de la masa a medida que se aumentó la cantidad de aditivo debido a los productos que se forman en la reacción del sulfato de sodio con el hidróxido de calcio.

Se pudo observar, como era de esperarse, que las probetas curadas al aire presentaron retracción. La retracción, en todos los casos, es menor cuando el mortero tiene aditivo esto debido, en parte, a la menor cantidad de agua usada en el amasado.

Las probetas inmersas en la solución del sulfato no presentaron variaciones volumétricas importantes ni se observaron patologías inherentes a la expansión por sulfatos.

En general se pudo observar que las probetas con aditivo que estuvieron sometidas hasta 72 ciclos de hielo-deshielo presentaron menor expansión que la muestra control, demostrando que efectivamente mejoran la durabilidad a este agente físico.

5. CONCLUSIONES

5 CONCLUSIONES

A la vista de los resultados experimentales obtenidos y basándonos en la discusión realizada en esta memoria, podemos establecer las siguientes conclusiones de acuerdo a los parámetros de caracterización y comportamiento de los extractos de las plantas de *Agave americana* y *Furcraea cabuya* (fique) comparado con morteros y hormigones testigos y con morteros con aditivos superplastificantes y aireantes comerciales.

Respecto a su caracterización física, el licor de las plantas en estudio es un líquido de color verde poco denso; muestra un bajo contenido de sólidos, representados fundamentalmente en materia vegetal y carbonatos, y un alto contenido agua.

Respecto a su caracterización química, el licor de las plantas es una sustancia de naturaleza ácida, con muy poco contenido de cloruros y baja conductividad. Está compuesto básicamente por grupos funcionales polisacáridos y proteínas.

En las pasta de cemento Pórtland, los aditivos orgánicos en estudio, disminuyen la relación a/c para obtener una misma consistencia. Con relaciones a/c constantes pequeñas cantidades de aditivo ejercen un mayor efecto cohesivo. En resumen, el aditivo manifiesta propiedades aireantes, mientras que cantidades mayores facilitan que se comporte como un aditivo plastificante.

En los tiempos de fraguado e hidratación de la pasta, los aditivos estudiados, retrasan los tiempos iniciales y finales de fraguado y producen una disminución considerable en la producción de CH. Esta producción es claramente menor cuando usamos el extracto de fique, indicando que puede tener un mayor efecto retardante que el *Agave americana*.

En las pastas de yeso, con una pequeña cantidad de aditivo de *Agave*, se logran buenas consistencias y disminuciones considerables en la relación a/y. Al igual que en las pasta de cemento retrasa los tiempos de fraguado. Se evidencia un aumento en las resistencias mecánicas, hasta un 3% de aditivo y cuando se conserva la consistencia de la pasta. Con este mismo porcentaje de aditivo no se presentan disminuciones considerables en la densidad de la probeta probablemente por una buena formación de cristales y una buena distribución de los microporos.

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

En general los licores de las plantas de *Agave americana* tienen los siguientes efectos en la mezcla de mortero en estado fresco:

- Aumenta la plasticidad de la mezcla con relaciones a/c constante. Posiblemente mucha parte del componente activo plastificante se encuentre en la piel de la hoja.
- Disminuye el contenido de agua hasta en un 12%, conservando la misma consistencia.
- Ocluye porcentajes de aire, respecto a la masa, hasta de un 13%, al parecer producto de la presencia de sustancias tensoactivas..
- Aumenta considerablemente los tiempos iniciales y finales de fraguado debido a la presencia de azúcares en proporciones importantes. Contrasta con los resultados del aditivo superplastificante comercial que disminuye los tiempos iniciales y finales de fraguado.

En el mortero endurecido se observan los siguientes efectos:

- Incrementa 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 ligeramente la resistencia a la flexotracción, a igual relación a/c, pero la conserva a igual consistencia.
- Disminuye la resistencia a compresión a igual relación a/c y a igual consistencia en todas las edades. No obstante, en cantidades hasta el 3% de aditivo, su resistencia supera el 75% del control por lo que cumple con la normativa para aditivos aireantes. Esto es producto de la inclusión de pequeñas burbujas dentro de la matriz, y del retraso en la reacciones de hidratación del cemento por efecto de la materia orgánica.

En los hormigones se observa que:

- Al igual que en los morteros, la adición de pequeños porcentajes del aditivo aumenta considerablemente el asentamiento en hormigones con la misma relación a/c, o disminuye el agua de amasado para obtener el mismo asentamiento.

5. CONCLUSIONES

- Disminuye la exudación en el hormigón fresco, al parecer por la retención que hace del agua de amasado.
- Ocluye altos porcentajes de aire a través de burbujas estables que posteriormente se convierten en microporos de varios tamaños, mayoritariamente entre 0 y 250 micras.
- La cantidad de aire ocluido se ve afectada por: el tipo de cemento, el tamaño del árido grueso, y los tiempos de amasado.
- Respecto a la resistencia a la compresión se observó que con el 1% de *Agave americana*, a igual asentamiento que la muestra control, se obtuvo una mayor resistencia. En el caso de fique se logró una mayor resistencia hasta con un 5% de aditivo a todas las edades. Esto se explica, posiblemente, en la disminución de agua que se obtiene por el efecto plastificante del aditivo. En los dos casos se supera la resistencia a compresión que tuvo el aditivo comercial.
- Se observó que el tipo de cemento influye en la resistencia a compresión de los hormigones con aditivo. Cuando utilizamos cemento tipo III y aditivo de fique obtuvimos mejores resistencias a compresión que con el tipo I debido posiblemente a que el tipo III, por su composición química y su superficie específica, ocluye menor cantidad de aire que el tipo I.
- En general, si bien la resistencia a compresión disminuye, en casi todos los casos está por encima del 75% de la resistencia de la muestra control, que es el límite propuesto por la norma UNE, para los aditivos aireantes.

Respecto a los ensayos de durabilidad:

- Las probetas inmersas en la solución del sulfato no presentaron variaciones volumétricas importantes ni se observaron patologías inherentes a la expansión por sulfatos.
- En general se pudo observar que las probetas con aditivo que estuvieron sometidas hasta 72 ciclos de hielo-deshielo presentaron menor expansión que la muestra control, demostrando que efectivamente mejoran la durabilidad a este agente físico.

Los anteriores resultados determinan que el licor de estas plantas se podría clasificar como un aditivo aireante de acuerdo a la Norma Europea 934-2. Como inductor de aire podría mejorar algunas propiedades de los hormigones y se le podría dar los siguientes usos en la industria de la construcción:

- Aumentar la consistencia de los hormigones y por ende su trabajabilidad para ser puesto en secciones estructurales donde es difícil acceder con equipos de compactación.
- Incrementar la durabilidad al hielo – deshielo por razón de los pequeños microporos que actúan como válvulas del agua retenida en la matriz; su uso es especialmente importante en carreteras de hormigón y pistas de aeropuerto en países de climas extremos y altas precipitaciones de nieve.
- Mejorar las características del hormigón producido usando arenas con deficiencia en los tamaños finos, que muestran por ello, una tendencia a la exudación y a la segregación. La presencia de pequeñas cantidades de aire ocluido incrementa la cohesión o estabilidad de la mezcla.
- Ocluir grandes cantidades de aire, para bajar la densidad del hormigón, incrementando así las propiedades de aislamiento térmico o produciendo hormigón ligero en unión con áridos ligeros.

Con estos estudios se abren preguntas investigativas que a manera de propuesta se tendrán en cuenta para la elaboración de otros trabajos de investigación. Entre otras se proponen:

- Estudiar un procedimiento de extracción y concentración de la materia activa del licor que permita mejorar sus atributos como plastificante.
- Estudiar alternativas de conservación del licor pues por su acidez presenta una pronta fermentación y conocer las consecuencias que tendría en las mezclas de mortero y hormigón.
- Estudiar la dosificación y contenido de aire óptimos para obtener morteros y hormigones de buena trabajabilidad sin afectar sus propiedades mecánicas.

5. CONCLUSIONES

- Estudiar los efectos de filler, finos y puzolanas en mezclas de mortero y hormigón con este tipo de aditivos.
- Estudiar el efecto del aditivo en otros materiales conglomerantes y avanzar en el estudio del aditivo en el yeso que al parecer muestra unos buenos resultados.

El desarrollo investigativo de este trabajo tendría un alto impacto e interés en países de producción agroindustrial del fique sobre todo en América central y del sur, pues se reduciría el impacto ambiental generado por los desperdicios contaminantes del proceso de fabricación de la fibra y se daría un valor agregado a la planta. Por otra parte 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 otro tipo de plantas.

6. ANEXOS

6 ANEXOS

Cuadro 80 Determinación de la distribución de huecos de aire para el hormigón control

Clase	Limite de las clases		Número de cuerdas registradas en cada clase (Ci)	Longitud total de barrido correspondiente a los huecos de aire (Ta en µm)	Frecuencia de las cuerdas (mm ⁻¹)	Fracción encontrada (mm ²)	Total posible (mm ²)	Volumen de los huecos en la clase (mm ³)	Volumen de los huecos (mm ³)	Contenido de aire (%)	Contenido de aire acumulado (%)
	µm	µm									
1	0	10	0	0	0,00000	0,0001178	0,00000	0,00000	5,24E-07	0,000%	0,00%
2	15	20	0	0	0,00000	0,0002749	0,00000	0,00000	4,19E-06	0,000%	0,00%
3	25	30	0	0	0,00000	0,0004320	0,00000	0,00000	1,41E-05	0,000%	0,00%
4	35	40	0	0	0,00000	0,0005890	0,00000	0,00000	3,35E-05	0,000%	0,00%
5	45	50	0	0	0,00000	0,0007461	0,00000	0,00000	6,54E-05	0,000%	0,00%
6	55	60	0	0	0,00000	0,0009032	0,00000	0,00000	1,13E-04	0,000%	0,00%
7	65	80	0	0	0,00000	0,0022780	0,00000	0,00000	2,68E-04	0,000%	0,00%
8	85	100	0	0	0,00000	0,0029060	0,00000	0,00000	5,24E-04	0,000%	0,00%
9	105	120	0	0	0,00000	0,0035340	0,00000	0,00000	9,05E-04	0,000%	0,00%
10	125	140	0	0	0,00000	0,0041630	0,00000	0,00000	1,44E-03	0,000%	0,00%
11	145	160	0	0	0,00000	0,0047910	0,00000	0,00000	2,14E-03	0,000%	0,00%
12	165	180	0	0	0,00000	0,0054190	0,00000	-0,13780	3,05E-03	0,000%	0,00%
13	185	200	2	400	0,00083	0,0060476	0,13780	0,13780	4,19E-03	0,058%	0,06%
14	205	220	0	0	0,00000	0,0066760	0,00000	0,00000	5,58E-03	0,000%	0,06%
15	225	240	1	240	0,00042	0,0073040	0,05705	0,05705	7,24E-03	0,041%	0,10%
16	245	260	0	0	0,00000	0,0079330	0,00000	0,00000	9,20E-03	0,000%	0,10%
17	265	280	0	0	0,00000	0,0085610	0,00000	0,00000	1,15E-02	0,000%	0,10%
18	285	300	0	0	0,00000	0,0091890	0,00000	-0,01620	1,41E-02	0,000%	0,10%
19	305	350	1	350	0,00042	0,0257200	0,01620	0,01620	2,24E-02	0,036%	0,14%
20	355	400	0	0	0,00000	0,0296500	0,00000	0,00000	3,35E-02	0,000%	0,14%
21	405	450	0	0	0,00000	0,0335800	0,00000	0,00000	4,77E-02	0,000%	0,14%
22	455	500	0	0	0,00000	0,0375000	0,00000	-0,00423	6,54E-02	0,000%	0,14%
23	505	1000	6	6000	0,00250	0,5810000	0,00423	0,00381	5,24E-01	0,199%	0,33%
24	1050	1500	1	1500	0,00042	0,9837000	0,00042	0,00012	1,77E+00	0,021%	0,36%
25	1505	2000	1	2000	0,00042	1,3760000	0,00030	0,00000	4,19E+00	0,000%	0,36%
26	2005	2500	2	5000	0,00083	1,7690000	0,00047	0,00047	8,18E+00	0,385%	0,74%
27	2505	3000	0	0	0,00000	2,1620000	0,00000	-0,00023	1,41E+01	0,000%	0,74%
28	3005	4000	3	12000	0,00125	5,5020000	0,00023	0,00023	3,35E+01	0,761%	1,50%

Cuadro 81 Determinación de la distribución de huecos de aire para el hormigón con 1% de aditivo de *Agave americana*

Clase	Limite de las clases		Número de cuerdas registradas en cada clase (Ci)	Longitud total de barrido correspondiente a los huecos de aire (Ta en µm)	Frecuencia de las cuerdas (mm ⁻¹)	Fracción encontrada (mm ²)	Total posible (mm ²)	Volumen de los huecos en la clase (mm ³)	Volumen de los huecos (mm ³)	Contenido de aire (%)	Contenido de aire acumulado (%)
	µm	µm									
1	0	10	0	0	0,00000	0,0001178	0,00000	0,00000	5,24E-07	0,000%	0,00%
2	15	20	0	0	0,00000	0,0002749	0,00000	0,00000	4,19E-06	0,000%	0,00%
3	25	30	0	0	0,00000	0,0004320	0,00000	-0,70741	1,41E-05	0,000%	0,00%
4	35	40	1	40	0,00042	0,0005890	0,70741	0,14895	3,35E-05	0,000%	0,00%
5	45	50	1	50	0,00042	0,0007461	0,55846	0,55846	6,54E-05	0,004%	0,00%
6	55	60	0	0	0,00000	0,0009032	0,00000	-0,18291	1,13E-04	0,000%	0,00%
7	65	80	1	80	0,00042	0,0022780	0,18291	0,24724	2,68E-04	0,000%	0,00%
8	85	100	3	300	0,00125	0,0029060	0,43014	0,07644	5,24E-04	0,004%	0,01%
9	105	120	3	360	0,00125	0,0035340	0,35371	0,15353	9,05E-04	0,014%	0,02%
10	125	140	2	280	0,00083	0,0041630	0,20018	-0,06073	1,44E-03	0,000%	0,02%
11	145	160	3	480	0,00125	0,0047910	0,26091	-0,04665	2,14E-03	0,000%	0,02%
12	165	180	4	720	0,00167	0,0054190	0,30756	0,23866	3,05E-03	0,073%	0,09%
13	185	200	1	200	0,00042	0,0060476	0,06890	-0,11834	4,19E-03	0,000%	0,09%
14	205	220	3	660	0,00125	0,0066760	0,18724	0,00000	5,58E-03	0,000%	0,09%
15	225	240	3	720	0,00125	0,0073040	0,17114	0,08609	7,24E-03	0,048%	0,14%
16	245	260	2	520	0,00083	0,0079330	0,10505	-0,04096	9,20E-03	0,000%	0,14%
17	265	280	3	840	0,00125	0,0085610	0,14601	0,14601	1,15E-02	0,168%	0,31%
18	285	300	0	0	0,00000	0,0091890	0,00000	-0,04860	1,41E-02	0,000%	0,31%
19	305	350	3	1050	0,00125	0,0257200	0,04860	0,03455	2,24E-02	0,077%	0,39%
20	355	400	1	400	0,00042	0,0296500	0,01405	-0,01076	3,35E-02	0,000%	0,39%
21	405	450	2	900	0,00083	0,0335800	0,02482	0,00000	4,77E-02	0,000%	0,39%
22	455	500	3	1500	0,00125	0,0375000	0,03333	0,01994	6,54E-02	0,130%	0,52%
23	505	1000	19	19000	0,00792	0,5810000	0,01340	0,00000	5,24E-01	0,000%	0,52%
24	1050	1500	18	27000	0,00750	0,9837000	0,00762	0,00490	1,77E+00	0,867%	1,39%
25	1505	2000	9	18000	0,00375	1,3760000	0,00273	0,00000	4,19E+00	0,000%	1,39%
26	2005	2500	10	25000	0,00417	1,7690000	0,00236	0,00216	8,18E+00	1,769%	3,15%
27	2505	3000	1	3000	0,00042	2,1620000	0,00019	0,00000	1,41E+01	0,000%	3,15%
28	3005	4000	1	4000	0,00042	5,5020000	0,00008	0,00008	3,35E+01	0,254%	3,41%

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

Cuadro 82 Determinación de la distribución de huecos de aire para el hormigón con 3% de aditivo de *Agave americana*

Clase	Limite de las clases		Número de cuerdas registradas en cada clase (Ci)	Longitud total de barrido correspondiente a los huecos de aire (Ta en µm)	Frecuencia de las cuerdas (mm ⁻¹)	Fracción encontrada (mm ²)	Total posible (mm ³)	Volumen de los huecos en la clase (mm ³)	Volumen de los huecos (mm ³)	Contenido de aire (%)	Contenido de aire acumulado (%)
	µm	µm									
1	0	10	0	0	0.00000	0.0001178	0.00000	-6.06281	5.24E-07	0.000%	0.00%
2	15	20	4	80	0.00167	0.0002749	6.06281	-1.65324	4.19E-06	0.000%	0.00%
3	25	30	8	240	0.00333	0.0004320	7.71605	-1.34933	1.41E-05	0.002%	0.00%
4	35	40	9	360	0.00375	0.0005890	6.36672	-3.68555	3.35E-05	0.000%	0.00%
5	45	50	18	900	0.00750	0.0007461	10.05227	0.00000	6.54E-05	0.000%	0.00%
6	55	60	22	1320	0.00917	0.0009032	10.14910	4.47892	1.13E-04	0.051%	0.05%
7	65	80	31	2480	0.01292	0.0022780	5.67018	0.00000	2.68E-04	0.000%	0.05%
8	85	100	29	2900	0.01208	0.0029060	4.15806	1.56421	5.24E-04	0.082%	0.13%
9	105	120	22	2640	0.00917	0.0035340	2.59385	0.19174	9.05E-04	0.017%	0.15%
10	125	140	24	3360	0.01000	0.0041630	2.40211	0.40184	1.44E-03	0.058%	0.21%
11	145	160	23	3680	0.00958	0.0047910	2.00028	0.92382	2.14E-03	0.198%	0.41%
12	165	180	14	2520	0.00583	0.0054190	1.07646	0.00000	3.05E-03	0.000%	0.41%
13	185	200	10	2000	0.00417	0.0060476	0.68898	0.06485	4.19E-03	0.027%	0.43%
14	205	220	10	2200	0.00417	0.0066760	0.62413	0.00000	5.58E-03	0.000%	0.43%
15	225	240	15	3600	0.00625	0.0073040	0.85570	0.33046	7.24E-03	0.239%	0.67%
16	245	260	10	2500	0.00417	0.0079330	0.52523	0.23321	9.20E-03	0.215%	0.89%
17	265	280	6	1680	0.00250	0.0085610	0.29202	0.01996	1.15E-02	0.023%	0.91%
18	285	300	6	1800	0.00250	0.0091890	0.27206	0.00000	1.41E-02	0.000%	0.91%
19	305	350	5	1750	0.00208	0.0257200	0.08100	0.00000	2.24E-02	0.000%	0.91%
20	355	400	13	5200	0.00542	0.0296500	0.18269	0.05861	3.35E-02	0.196%	1.11%
21	405	450	10	4500	0.00417	0.0335800	0.12408	0.00000	4.77E-02	0.000%	1.11%
22	455	500	10	5000	0.00417	0.0375000	0.11111	0.09221	6.54E-02	0.538%	1.64%
23	505	1000	41	41000	0.01708	0.5910000	0.02891	0.02128	5.24E-01	1.119%	2.76%
24	1050	1500	18	27000	0.00750	0.9837000	0.00762	0.00811	1.77E+00	1.082%	3.84%
25	1505	2000	5	10000	0.00208	1.3760000	0.00151	0.00000	4.19E+00	0.000%	3.84%
26	2005	2500	3	7500	0.00125	1.7690000	0.00071	-0.00006	8.18E+00	0.000%	3.84%
27	2505	3000	4	12000	0.00167	2.1620000	0.00077	0.00000	1.41E+01	0.000%	3.84%
28	3005	4000	7	28000	0.00292	5.5020000	0.00053	0.00053	3.35E+01	1.776%	5.62%

Cuadro 83 Determinación de la distribución de huecos de aire para el hormigón con 0,26% de aditivo Micro air 100

Clase	Limite de las clases		Número de cuerdas registradas en cada clase (Ci)	Longitud total de barrido correspondiente a los huecos de aire (Ta en µm)	Frecuencia de las cuerdas (mm ⁻¹)	Fracción encontrada (mm ²)	Total posible (mm ³)	Volumen de los huecos en la clase (mm ³)	Volumen de los huecos (mm ³)	Contenido de aire (%)	Contenido de aire acumulado (%)
	µm	µm									
1	0	10	0	0	0.00000	0.0001178	0.00000	-1.51570	5.24E-07	0.000%	0.00%
2	15	20	1	20	0.00042	0.0002749	1.51570	-3.30683	4.19E-06	0.000%	0.00%
3	25	30	5	150	0.00208	0.0004320	4.82253	-1.54419	1.41E-05	0.000%	0.00%
4	35	40	9	360	0.00375	0.0005890	6.36672	-0.34479	3.35E-05	0.000%	0.00%
5	45	50	12	600	0.00500	0.0007461	6.70151	3.47226	6.54E-05	0.023%	0.02%
6	55	60	7	420	0.00292	0.0009032	3.22926	1.21726	1.13E-04	0.014%	0.04%
7	65	80	11	880	0.00458	0.0022780	2.01200	0.00466	2.68E-04	0.000%	0.04%
8	85	100	14	1400	0.00583	0.0029060	2.00734	1.18203	5.24E-04	0.062%	0.10%
9	105	120	7	840	0.00292	0.0035340	0.82532	0.32488	9.05E-04	0.029%	0.13%
10	125	140	5	700	0.00208	0.0041630	0.50044	0.15257	1.44E-03	0.022%	0.15%
11	145	160	4	640	0.00167	0.0047910	0.34787	0.04031	2.14E-03	0.009%	0.16%
12	165	180	4	720	0.00167	0.0054190	0.30756	0.10087	3.05E-03	0.031%	0.19%
13	185	200	3	600	0.00125	0.0060476	0.20669	0.14428	4.19E-03	0.060%	0.25%
14	205	220	1	220	0.00042	0.0066760	0.06241	0.00000	5.58E-03	0.000%	0.25%
15	225	240	3	720	0.00125	0.0073040	0.17114	0.17114	7.24E-03	0.124%	0.37%
16	245	260	0	0	0.00000	0.0079330	0.00000	-0.04867	9.20E-03	0.000%	0.37%
17	265	280	1	280	0.00042	0.0085610	0.04867	0.04867	1.15E-02	0.056%	0.43%
18	285	300	0	0	0.00000	0.0091890	0.00000	-0.06480	1.41E-02	0.000%	0.43%
19	305	350	4	1400	0.00167	0.0257200	0.06480	0.02264	2.24E-02	0.051%	0.48%
20	355	400	3	1200	0.00125	0.0296500	0.04216	0.04216	3.35E-02	0.141%	0.62%
21	405	450	0	0	0.00000	0.0335800	0.00000	-0.02222	4.77E-02	0.000%	0.62%
22	455	500	2	1000	0.00083	0.0375000	0.02222	0.00812	6.54E-02	0.053%	0.67%
23	505	1000	20	20000	0.00833	0.5910000	0.01410	0.00000	5.24E-01	0.000%	0.67%
24	1050	1500	9	19500	0.00375	0.9837000	0.00381	0.00290	1.77E+00	0.514%	1.19%
25	1505	2000	3	6000	0.00125	1.3760000	0.00091	0.00000	4.19E+00	0.000%	1.19%
26	2005	2500	3	2500	0.00042	1.7690000	0.00024	0.00004	8.18E+00	0.035%	1.22%
27	2505	3000	1	3000	0.00042	2.1620000	0.00019	0.00012	1.41E+01	0.165%	1.39%
28	3005	4000	1	4000	0.00042	5.5020000	0.00008	0.00008	3.35E+01	0.254%	1.64%

7. REFERENCIAS

7 REFERENCIAS

¹ Sin autor, *Plan Nacional Estratégico De Investigación, Desarrollo Tecnológico Y Transferencia Del Fique (Furcraea macrophila)*, CORPOICA, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Colombia, 2004.

² Sin autor, *Biotipos, Semillero Y Transplante De Fique*, Compañía de empaques S.A., ARD/CAPP, ISAGEN, USAID, Cartilla Agroambiental No. 1, Colombia, 2005.

³ ARROYAVE, Paola C. y VELÁZQUEZ, David E, *Aprovechamiento Integral De Furcraea Macrophylla Backer*, Universidad EAFIT. Departamento de Ingeniería de Procesos, Colombia, 2001.

⁴ *Guía Ambiental Del Subsector Fiquero*, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Version 01 en concertación, Colombia, 2005, p 5

⁵ *Acuerdo para el Fomento de la Producción y la Competitividad del Subsector Fiquero*, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Corporación Colombiana de Investigaciones Agropecuarias -CORPOICA-, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura -IICA-, Colombia, 2004

⁶ MARTÍNEZ, Angélica María y CAICEDO, Tania Ximena, *Bioensayo de toxicidad de los jugos de fique en peces, en el municipio de Tambo (Nariño)*. Universidad El Bosque, Tesis de Postgrado en la especialización de Salud Ambiental, Colombia, 2002, p 26.

⁷ *Proyecto Proceso De Descontaminación Por Contaminación De Lavado De Fibras Naturales Y Aguas Residuales En La Zona De Carga Hídrica Del Río Mogoticos, Fuente Abastecedora Del Acueducto De San Gil*, Empresa Cooperativa de Fibras Naturales de Santander -ECOFIBRAS-, Fondo para la Acción Ambiental -FPPA- Corporación Autónoma Regional de Santander -CAS-, Colombia, 2004.

⁸ *Guía Ambiental Del Subsector Fiquero, Op. cit, p. 9*

⁹ *Guía Ambiental Del Subsector Fiquero, Op. cit, pp 12-15*

¹⁰ *Proyecto Proceso De Descontaminación Por Contaminación De Lavado De Fibras Naturales Y Aguas Residuales En La Zona De Carga Hídrica Del Río Mogoticos, Fuente Abastecedora Del Acueducto De San Gil, Op. cit.*

¹¹ *Guía Ambiental Del Subsector Fiquero, Op. cit., p 13.*

¹² ACOSTA SOLÍS, Marco A. *La Cabuya Contra La Erosión Del Suelo*, Revista Naciona del Agricultura, Vol. 56, No. 8, Colombia, 1961, pp 22-26

- ¹³ *Guía Ambiental Del Subsector Piquero, Op. cit.*, pp 12-15
- ¹⁴ SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego, *Tecnología del Concreto y del Mortero*, Biblioteca de la Construcción, Bhandar Editores, Colombia, 2001, p 261
- ¹⁵ UNE-EN 934-2, *Aditivos Para Hormigones, Morteros Y Pastas. Parte 2: Aditivos Para Hormigones. Definiciones, Requisitos, Conformidad, Mercado Y Etiquetado*, 2002
- ¹⁶ RIXON, M.R, *Aditivos Para Los Hormigones. Composición, Propiedades Y Empleo*, Editores Técnicos Asociados, S.A, España, 1984
- ¹⁷ LIANXIANG Du , KEVIN J. Folliard., *Mechanisms Of Air Entrainment In Concrete*, Cement and Concrete Research, No. 35, 2005, pp 1463– 1471
- ¹⁸ ANSARI F. et al, *Effects Of Synthetic Air Entraining Agents On Compressive Strength Of Portland Cement Concrete-Mechanism Of Interaction And Remediation Strategy*, University of Illinois at Chicago Final report, 2002
- ¹⁹ EDMEADES R.M, HEWLETT P.C, *Cement Admixture*. En : LEA'S Chemistry of Cement and Concrete, 4a. Edition, Peter C. Hewlett, 1998, pp 837-896
- ²⁰ DELVALLE A., Silvio, *Investigación De Los Mecanismos De Adherencia En La Interfase Del Material Compuesto Hormigón–Fibra Natural De Fique Y De La Optimización De Su Comportamiento A La Tenacidad En Servicio*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, España, 1997.
- ²¹ DE GUTIERREZ R, *Fique As Raw Construction Material*, Vegetable Plants and Their Fibres as Building Material. Proceedings of the Second International Symposium Sponsored by RILEM, 1990, pp 343-350
- ²² CHÁVEZ, Herlán; FLÓREZ, Carlos. *Factibilidad Técnica De Producir Aditivos Para Construcción Por Extracción De Compuestos Poliméricos De Jugos Residuales De La Fibra De Fique*, Tesis Ingeniero Químico, Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Colombia, 1995
- ²³ GARCÍA, Hector; APONTE, Saul. *Evaluación De Un Concreto Incorporando Un Aditivo A Partir Del Jugo De Fique*, Tesis Ingeniero Civil, Universidad del Valle, Departamento de Materiales, Colombia, 1997.
- ²⁴ S. CHANDRA, L. EKLUND, RR. VILLAREAL, *Use Of Cactus In Mortars And Concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 1, 1998, pp 41-51
- ²⁵ AAVIK J, CHANDRA S, *Influence Of Organic Admixture And Testing Method On Freeze-Thaw Resistance Of Concrete*, ACI Materials Journal, January-February 1995, pp 10-14

7. REFERENCIAS

- ²⁶ JUMADURDIEYEV A., et .al, *The Utilization Of Beet Molasses As A Retarding And Water-Reducing Admixture For Concrete*, Cement and Concrete Research, No. 35, 2005, pp 874-882
- ²⁷ ASTM C33-03, *Standard Specification for Concrete Aggregates*, 1998
- ²⁸ BALLESTER O, José F. *Cactus Y Plantas Suculentas*. Floraprint, España, Sin fecha
- ²⁹ UNE-EN 480-8, *Aditivos Para Hormigones, Morteros Y Pastas. Métodos De Ensayo, Parte 8, Determinación Del Extracto Seco Convencional*, 1997
- ³⁰ UNE 83207, *Aditivos Para Hormigones, Morteros Y Pastas, Determinación De La Pérdida Por Calcinación A 1050±25°C*, 1985
- ³¹ UNE 83208, *Aditivos Para Hormigones, Morteros Y Pastas, Determinación El Residuo Insoluble En Gaua Desionizada*, 2002
- ³² UNE 83212, *Aditivos Para Hormigones, Morteros Y Pastas, Determinación Del Contenido De Reductores (poder reductor)*, 1989
- ³³ UNE 83210, *Aditivos Para Hormigones Morteros Y Pastas, Determinación Del Contenido De Halogenuros Totales*, 1988
- ³⁴ UNE 83227, *Aditivos Para Hormigones Morteros Y Pastas, Determinación Del pH*, 1986
- ³⁵ DOUGLAS A. Skoog, JAMES J. Leary. *Principles Of Instrumental Analysis*, Saundes Collage Publishing, 1992
- ³⁶ T. HATAKEYANA, ZHENHAI Liu. *Handbook Of Thermal Analysis*, Wiley, 1998
- ³⁷ WILLARD, MERRIT, DEAN AND SETTLE, *Métodos Instrumentales De Análisis*, Grupo Editorial Iberoamérica, 1991
- ³⁸ UNE-EN 196-3, *Métodos De Ensayo De Cementos, Parte 3, Determinación Del Tiempo De Fraguado Y De La Estabilidad De Volumen*, 1996
- ³⁹ UNE-EN 196-1, *Métodos De Ensayo De Cementos, Parte I, Determinación De Resistencias Mecánicas*, 1996
- ⁴⁰ UNE 102031, *Yesos Y Escayolas De Construcción, Métodos De Ensayo Físicos Y Mecánicos*, 1999
- ⁴¹ UNE-EN 480-1, *Aditivos Para Hormigones, Morteros Y Pastas, Métodos De Ensayo, Parte 1, Hormigón Y Mortero De Referencia Para Ensayos*, 1998

- ⁴² UNE-EN 480-5, *Aditivos Para Hormigones, Morteros Y Pastas, Métodos De Ensayo. Parte 5, Determinación De La Absorción Capilar*, 1997
- ⁴³ UNE 83258, *Aditivos Para Hormigones, Morteros Y Pastas, Morteros, Determinación De La Consistencia Por Medio De La Mesa De Sacudidas*, 1988
- ⁴⁴ UNE 83259, *Aditivos Para Hormigones, Morteros Y Pastas, Aditivo Para Morteros De Albañilería, Contenido De Aire Ocluido*, 2005
- ⁴⁵ SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. *Op. cit.*, pp 112-113
- ⁴⁶ NTC 396, *Ingeniería Civil Y Arquitectura, Método De Ensayo Para Determinar El Asentamiento Del Concreto*, 1992
- ⁴⁷ NTC 1032, *Ingeniería Civil Y Arquitectura, Método De Ensayo Para La Determinación Del Aire En El Concreto Fresco, Método De Presión*, 1994
- ⁴⁸ NTC 454, *Ingeniería Civil Y Arquitectura, Concretos, Concreto Fresco, Toma De Muestras*, 1998
- ⁴⁹ NTC 1294, *Ingeniería Civil Y Arquitectura, Método De Ensayo Para Determinar La Exudación Del Concreto*, 1994
- ⁵⁰ UNE-EN 480-11, *Aditivos Para Hormigones, Morteros Y Pastas, Métodos De Ensayo, Parte 11, Determinación De Las Características De Los Huecos De Aire En El Hormigón Endurecido*, 2006
- ⁵¹ ASTM C457, *Standard Test Method For Microscopical Determination Of Parametres Of The Air-Void System In Hardened Concrete*, 2006
- ⁵² UNE 12390-1, *Ensayos De Hormigón Endurecido, Parte I, Forma, Medidas Y Otras Características De Las Probetas Y Moldes*, 2001
- ⁵³ UNE 12390-2, *Ensayos De Hormigón Endurecido, Parte II, Fabricación Y Curado De Probetas Para Ensayos De Resitencia*, 2001
- ⁵⁴ UNE 12390-4, *Ensayos De Hormigón Endurecido, Parte 4, Resistencia A Compresión, Características De Las Máquinas De Ensayo*, 2001
- ⁵⁵ UNE 83316, *Ensayos De Hormigón, Determinación Del Módulo De Elasticidad De Compresión*, 1996.
- ⁵⁶ UNE 80112, *Métodos De Ensayo De Cementos, Ensayos Físicos, Determinación Del Secado Y Del Hinchamiento En Agua*, 1989

7. REFERENCIAS

- ⁵⁷ UNE 80113, *Métodos De Ensayo De Cementos, Determinación De La Expansión En Autoclave*, 1986
- ⁵⁸ CABRERA J.G., NWAUBANI S.O, *Experimental Methods For The Preparation Of Plant Fruit And Other Natural Fibres For Use In Reinforced Cement Composites*, Vegetable Plants and Their Fibres as Building Material, Proceedings of the Second International Symposium Sponsored by RILEM, 1990, pp 29-37
- ⁵⁹ PALACIOS, M. SIERRA, C. PUERTAS, F, *Métodos Y Técnicas De Caracterización De Aditivos Para El Hormigón*, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja – Respsol YPF, España, 2002
- ⁶⁰ TAYLOR H.F.W. *“Cement Chemistry”*. 2nd Edition, Thomas Telford, 1997
- ⁶¹ MIRANDA J., FLORES-ALÉS V., BARRIOS J., *Aportaciones Al Estudio Reológico De Pastas Y Morteros De Cemento Pórtland*, Materiales de Construcción, Vol 50, No. 257, 2000, pp. 27-55
- ⁶² ATAZANI C., MASSIDA L. AND SNNA U. *Rheological Properties And Amount Of Expansion Of Lightweight Fresh Cements*, Rheology of fresh cement and concrete. Proceedings of the International Conference organized by the British Society of Rheology, UK, 1990, pp. 3-12
- ⁶³ WILLIAMS D.A., SAAK A.W., JENNINGS H.M., *The Influence Of Mixing On The Rheology Of Fresh Cement Paste*, Cement and concrete research, Vol. 29, 1999, pp. 149-1496
- ⁶⁴ YONGMO X. DENENG, H., *The Relationship Between Microestructure And Rheology Of Fresh Cement Pastes*, Rheology of fresh cement and concrete. Proceedings of the International Conference organized by the British Society of Rheology, UK, 1990, pp. 55-58
- ⁶⁵ CHAPUIS J., *Rheological Measurements With Cement Pastes In Viscometers: A Comprehensive Approach*, Rheology of fresh cement and concrete. Proceedings of the international conference organized by the British Society of Rheology, UK, 1990, pp. 3-12
- ⁶⁶ SHUR, S., *Interactions Between Sulphate Minerals And C₃A In Cement Paste Rheology*, Rheology of fresh cement and concrete. Proceedings of the international conference organized by the British Society of Rheology, UK, 1990, pp. 47-54
- ⁶⁷ CYR M., LEGRAND C., MOURET M. *Study Of The Shear Thickening Effect Of Superplasticizers On The Rheological Behaviour Of Cement Pastes Containing Or Not Mineral Additives*, Cement and Concrete Research, No. 30, 2000, pp. 477-1483

⁶⁸ SYBERTZ F., REICK P. *Effect Of Fly Ash On The Rheological Properties Of Cement Paste*, Rheology Of Fresh Cements And Concrete, Proceedings of the International Conference organized by the British Society of Rheology, UK, 1990, pp. 1-22

⁶⁹ VELÁZQUEZ R. SERGIO. *Aplicaciones Del Catalizador De Craqueo Catalítico Usado (FCC) En La Preparación De Conglomerantes Hidráulicos. Estudio De Sus Propiedades Puzolánicas*, Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, – España, 2002

⁷⁰ EDMEADES R.M, HEWLWTT P.C. *Op. cit.*, pp 839-845

⁷¹ OLDER I., *Hydratation, Setting And Hardening Of Portland Cement*. En: *Lea's Chemistry of Cement and Concret*, 4a. edition, edited by Peter C. Hewlett, UK, 1998, pp 241 - 289

⁷² HORNBOSTEL, Caleb., *Materiales Para Construcción. Tipos, Usos Y Aplicaciones*, Editorial Limusa, S.A de C.V, México, 2002

⁷³ UNE 102014-1, *Yesos Especiales De Aplicación Manual Para La Construcción,. Definiciones Y Especificaciones, Parte 1, Yesos Aligerados*, 1999

⁷⁴ ARIKAN M, SOBOLEV K., *The Optimization Of A Gypsum-Based Composite Material*, *Cement and Concrete Research*, No. 32, 2002, pp 1725-1728.

⁷⁵ UNE 102010, *Yesos Para La Construcción, Especificaciones*, 1983

⁷⁶ BORRACHERO, Maria Victoria et al, *Práctica De Química De Materiales*, Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Valencia – España, 2005

⁷⁷ VENUAT, Michael, *Aditivos Y Tratamientos De Morteros Y Hormigones*, Primera edición española, traducida del francés por Adrian Margarit, Editores Técnicos Asociados, S.A., España, 1972

⁷⁸ SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. *Op. Cit.*, p. 270

⁷⁹ FERNANDEZ C, Manuel, *Hormigón*, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Cuarta edición, España, 1996

⁸⁰ ACI Comité 363, *State Of The Art Report On High Strenght Concrete*, ACI 363. American Concrete Institute, EE.UU 1992.

⁸¹ G.D. TAYLOR., *Material In Construction: An Introduction*. 3rd edition. Pearson Education Limited, 2000

⁸² SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. *Op. cit.*, p. 155-156

7. REFERENCIAS

⁸³ EGLINTON, M., *Resistance Of Concrete To Destructive Agencies*. En : LEA'S Chemistry of Cement and Concrete, 4 Edition, Edited by Peter C. Hewlett, UK, 1998, pp 299-340