



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

FACULTAD DE CONSTRUCCIONES
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Evaluación de la fisuración de hormigones en estructuras tipo Bungalows provocadas por retracción inducida por gradientes de humedad relativa.

Autor: Libán Luis Herrera Rodríguez

Tutores: Ing. Rafael Ramírez Díaz

DrSc. Fernando Martirena Hernández

Santa Clara

2014

"Año 56 de la Revolución"

“El verdadero sentido del deber no está en hacer lo que uno quiere, sino, en querer lo que uno hace”.

Dedico esta tesis al gran amor de mi vida, a quien me espera incondicional cuando me ausento, a quien sonríe por verme sonreír, a quien se quita lo que tiene para que lo tenga, a quien me sigue sin importar los obstáculos, a quien debo lo que soy y lo que ser e, a quien un día me trajo al mundo para amarla por siempre...

...a Mamá

Agradecimientos

Por su incansable esmero en hacer de mi un hombre de bien, por indicarme el camino para llegar a ser el buen profesional que aspiro, por su amor y su apoyo en los momentos felices y difíciles, por sus consejos, por su cariño y por su dedicación y comprensión, agradezco inmensamente a mi madre, a quien le debo el buen resultado de este trabajo.

A mi padre por su presencia, sus consejos y reflexiones de la vida.

A Yuve por el apoyo incondicional y sus valiosas enseñanzas.

A Lisi por quererme y comprender la necesidad de sacrificarse por el futuro.

A mis hermanos Luis Ernesto y Amandita.

A abuela Irma, siempre pendiente de mí.

A abuelo Calo, presente siempre.

A abuela Marina y abuelo Millo, por su cariño en todo momento.

A Reina, Franky, Pablo y Pancho por hacerme sentir su familia.

A Fefa, Amaury, Lianna y Dalia por su aprecio desde que los conocí.

A mi aguerrido equipo de Proyecto, Jesús, Livan y Yaité, que tendieron su mano para la realización de esta investigación.

A Artiles por su ayuda en el laboratorio de Cayo Santa María.

A Rafael, mi tutor, por su apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A mis profes de siempre, Mery, Tania, Yoslandy, Miriam y Amarilis, responsables de mi formación profesional.

A mis compañeros de enseñanza Secundaria, Pre y Universitaria.

A mi familia, tan amplia que no cabe en líneas de agradecimiento.

A todo aquel que no alcanzó un espacio en esta cuartilla, pero que merece mi más sincero agradecimiento.

Gracias a todos.

Resumen

La presente investigación se enmarca en el estudio y evaluación de las deformaciones que se producen en el hormigón con que se fabrican los muros de los bungalows de Cayo Santa María. El estudio comprende la evaluación de la retracción del hormigón, al ser sometidas un grupo de muestras con diferentes dosificaciones, a condiciones similares que los bungalows en Cayo Santa María. Para realizar un análisis detallado y poder comprobar el efecto moderador de la retracción que tienen los áridos gruesos, se estudia también la deformación de muestras de morteros con diferentes dosificaciones, que estén asociadas a las mezclas de hormigón evaluadas. Además se evalúa el efecto de una adición puzolánica y la utilización de dos aditivos químicos como medidas de mitigación de la retracción del hormigón. El análisis de una serie de factores que influyen significativamente en la deformación del hormigón, permiten que se arriben a conclusiones que determinan la validez del uso de algunas materias primas que favorecen al material durante el proceso de secado. Y se recomienda el uso de aditivos químicos como agentes reductores de la retracción por secado del hormigón.

Índice

Resumen.....	V
Introducción.....	1
Capítulo 1 Retracción del hormigón por gradientes de humedad relativa.....	3
1.1 Hormigón hidráulico	3
1.1.1 Materiales componentes del hormigón	3
1.1.2 Propiedades del hormigón	5
<i>Factores influyentes en la retracción.</i>	11
1.2 Fisuración del hormigón.....	15
1.2.1 Fuerzas expansivas influyentes en la fisuración del hormigón.....	16
1.2.2 Fuerzas de contracción o retracción influyentes en la fisuración del hormigón.....	16
<i>Factores influyentes en la retracción por secado.</i>	25
<i>Principales medidas de mitigación para minimizar la retracción por secado.</i>	29
1.3 Caso de estudio (Bungalows-cayo Santa María)	29
1.3.1 Características constructivas de los bungalows	29
1.3.2 Características del fenómeno de la fisuración que afecta los bungalows de cayo Santa María.....	30
Conclusiones parciales.....	32
Capítulo II: Evaluación experimental de la retracción del hormigón provocada por gradientes de humedad relativa.	33
2.1 Introducción.....	33
2.2 Diseño del plan experimental.....	34
2.2.1 Evaluación de hormigones tomados en planta	34
2.2.2 Evaluación de las muestras de morteros	38
2.2.3 Evaluación de las propuestas de mitigación de la retracción del hormigón.....	39
2.2.4 Evaluación entre morteros y hormigones	40
2.2.5 Análisis de la variación de la humedad relativa	41

2.3	Características de los materiales constituyentes de los hormigones, y morteros evaluados	42
2.3.1	Árido Grueso	42
2.3.2	Árido fino	45
2.3.3	Cemento.....	47
2.3.4	Aditivos.....	48
2.3.5	Zeolita.....	51
2.3.6	Arena sílice	52
2.4	Métodos.....	54
2.4.1	Ensayo de retracción	54
2.4.2	Resistencia a flexión y compresión de morteros.....	58
2.4.3	Resistencia a compresión del hormigón	60
2.5	Fabricación de las muestras.....	62
2.5.1	Preparación de los moldes	62
2.5.2	Revestimiento de los moldes con líquido desencofrante.....	63
2.5.3	Pesaje de los materiales.....	63
2.5.4	Mezclado	64
2.5.5	Medición de consistencia.....	64
2.5.6	Colocación	66
2.5.7	Desencofre.....	66
	Conclusiones parciales.....	67
	Capítulo III: Análisis de resultados.	68
3.1	Introducción.....	68
3.2	Análisis de la retracción de los hormigones tomados de planta	69
3.2.1	Análisis estadístico general de los resultados de retracción obtenidos.	70
3.2.2	Análisis de la influencia de la variable Tipo de Árido Grueso.....	72
3.2.3	Análisis de la influencia de la variable Tipo de Árido Fino.....	74

3.2.4	Análisis de la influencia de la variación de la Cantidad de Cemento.	76
3.2.5	Análisis de la influencia de la variación de la relación Agua/Cemento (a/c)	78
3.2.6	Análisis de la influencia de la variación de la Humedad Relativa.	80
3.2.7	Contornos de respuestas de interacción entre factores	84
3.3	Análisis de la retracción de las muestras de morteros.....	86
3.3.1	Análisis estadístico general de los resultados de retracción obtenidos.	88
3.3.2	Análisis de la influencia de la variable Cantidad de Cemento	89
3.3.3	Análisis de la influencia de la variable relación Agua/Cemento (a/c).	91
3.3.4	Análisis de la influencia de la variable uso de Zeolita	92
3.3.5	Análisis de la influencia de la variación de la Humedad Relativa.....	94
3.4	Comparación del desarrollo de la retracción entre morteros y hormigones	95
3.4.1	Análisis de la influencia de la variación de la Humedad Relativa.....	95
3.5	Análisis de las medidas de mitigación de la retracción del hormigón.....	97
3.5.1	Análisis general de las muestras propuestas como mitigación a la retracción	98
3.5.2	Análisis de la influencia del uso de la zeolita en la retracción del hormigón. ...	100
3.5.3	Análisis de la influencia del MEF-32 en la retracción del hormigón	100
3.5.4	Análisis de la influencia del aditivo Shrinko-tec nano 4 en la retracción del hormigón.....	101
	Conclusiones parciales	102
	Conclusiones.....	104
	Recomendaciones	105
	Referencias bibliográficas.....	106
	Anexos	109

Introducción

La fisuración del hormigón es un fenómeno que suele despreciarse con frecuencia y no pocas veces ha conducido a patologías que influyen en el deterioro de muchas estructuras. Diagnosticar a tiempo e intervenir aceptadamente en ellas, evita su propagación e influencia negativa sobre la vida útil de una edificación.

El Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) de la Universidad Central Marta Abreu de las Villas a petición de la Asociación Económica Internacional (AEI) UCM- Bouygues Bâtiment International, trabaja en el estudio de las fisuras encontradas en las estructuras tipo Bungalows de la cayería norte de Villa Clara.

Las fisuraciones en el hormigón pueden surgir por diferentes causas: los esfuerzos aplicados, la mala calidad del cemento, la reacción álcali-agregados, el ataque por sulfatos, la corrosión del refuerzo, el congelamiento, la restricción o contracción no uniforme, cambios de volumen por temperatura o las derivadas de la propia naturaleza del hormigón (ISPJAE, 1985).

En un diagnóstico inicial se determina que las fisuras en los muros de los bungalows de Cayo Santa María, no son causadas por factores de tipo estructural, o tensiones producidas que no hayan sido tenidas en cuenta en el proceso de diseño de la estructura sino que pueden estar relacionadas con los efectos del cambio de volumen propio del proceso de hidratación del cemento y la retracción provocada por gradientes de humedad relativa durante el secado a edades superiores, al encender el aire acondicionado dentro de las habitaciones.

El caso se estudia con detalles en una primera fase, haciendo un análisis comparativo de la retracción por secado entre hormigones con varias dosificaciones, donde se analiza la influencia de la cantidad de material aglomerante, de la relación Agua/cemento y de la adición de tobas zeolíticas como sustitución de partes de cemento. Los resultados indicaron que tanto el aumento de la relación agua/cemento como la reducción del contenido de cemento se traducen en un incremento de la retracción del hormigón. Mientras que se manifiesta reducción de la deformación e incremento de la resistencia mecánica mediante el uso de la zeolita como adición, evidenciando su eficacia en el objetivo de aumentar el rendimiento del cemento y el logro de hormigones con mejores prestaciones, economía y sustentabilidad.

Se pretende con la presente investigación, enmarcarse en la segunda fase del problema, donde se evalúen hormigones tomados directamente de planta tal y como son enviados a obra, someterlos a condiciones de temperatura y humedad relativa similares a las experimentadas por las estructuras reales para registrar su variación volumétrica, y no solo en hormigones, sino también en morteros con similares dosificaciones a los primeros, para determinar la influencia del árido grueso en la retracción del material. Para ello se plantea el siguiente

Problema científico:

¿Será posible determinar valores probables de deformación producto de retracción inducida por gradientes de humedad relativa, en hormigones hidráulicos con diferentes dosificaciones producidos en la ECOT Cayo Santa María?

Como respuesta al problema científico planteado se presenta la siguiente

Hipótesis:

- Con la aplicación de ensayos experimentales como el método estándar de cambio de longitud ASTM c157, para hormigones y morteros, es posible determinar valores probables de deformación producto de retracción inducida por gradientes de humedad relativa, en hormigones hidráulicos producidos en la ECOT Cayo Santa María.

Objetivo general

- Determinar los valores de deformación en morteros y hormigones hidráulicos con diferentes dosificaciones asociada a la retracción provocada por gradientes de humedad relativa.

Objetivos específicos:

- Realizar una revisión bibliográfica sobre la retracción del hormigón provocada por gradientes de humedad relativa.
- Realizar ensayos de cambio de volumen a muestras de morteros con similares características a los hormigones de los bungalows, para evaluar el efecto moderador de la retracción del árido grueso en las muestras a estudiar.
- Ensayar muestras de hormigón y morteros con diferentes dosificaciones, que incluyan adiciones de material puzolánico y aditivos reductores de la retracción.
- Realizar el procesamiento estadístico de los resultados y determinar la influencia de los componentes de cada mezcla en los cambios volumétricos de estas, haciendo énfasis en las propuestas de mitigación de la retracción (Adición de tobas zeolíticas y el uso de aditivo químico).

Capítulo 1 Retracción del hormigón por gradientes de humedad relativa.

1.1 Hormigón hidráulico

El hormigón hidráulico puede definirse como un material constituido por la mezcla de cemento, árido grueso, árido fino y agua, con o sin la incorporación de aditivos o adiciones, que desarrolla sus propiedades por la hidratación del cemento.(NC-120, 2007)

De forma general puede decirse que el hormigón es un material pétreo aglomerado, formado por un esqueleto de material de relleno (áridos) unido por una matriz cementante.

1.1.1 Materiales componentes del hormigón

Cemento

El tipo de cemento es seleccionado de acuerdo a las demandas a que estará sometido el hormigón, tales como resistencia a los esfuerzos mecánicos, estabilidad química, impermeabilidad(Acevedo, 1985), las condiciones de curado, las dimensiones de la estructura y las condiciones ambientales a que se expondrá.

Los cementos son productos que amasados con agua, fraguan y endurecen, formándose nuevos compuestos resultantes de reacciones de hidratación que son estables tanto al aire como sumergidos en agua. Existen varios tipos de cementos. Las propiedades de cada uno de ellos están íntimamente asociadas a la composición química de sus componentes iniciales, que se expresan en forma de sus óxidos, y que según cuales sean, formarán compuestos resultantes distintos en las reacciones de hidratación.(Díaz Gómez, 2012).

El cemento tiene como función constituir la matriz que permite la unión del esqueleto de material de relleno (áridos). Las especificaciones pueden encontrarse en la NC 95:2001 “Cemento Portland. Especificaciones”.

Áridos

Los áridos (o agregados, como también se les denomina) constituyen una parte importante en el hormigón, no sólo en el orden cuantitativo, ya que constituyen generalmente más del 75% del volumen del mismo, sino también en el comportamiento cualitativo. En ocasiones se le suele dar a los áridos una función puramente económica, presentándose simplemente como un material de relleno, sin embargo, los mismos tienen también una importante función técnica. Los áridos tienen una gran repercusión en las propiedades de los hormigones, tanto en su estado fresco como en el endurecido. La disminución de la fisuración y de las variaciones volumétricas en general, así como las propias resistencias mecánicas que se logran, se debe en gran medida a la presencia de los áridos en el aglomerado. Debe tenerse en cuenta además, que la durabilidad y resistencia química que caracterizan al hormigón se deben principalmente a la presencia de los áridos. (Betancourt, 2013).

Las propiedades que más resaltan en los áridos son las relacionadas con su aspecto físico-mecánico y su comportamiento químico, que al unirse influyen marcadamente en la durabilidad del hormigón que se elabore con ellos y en el logro de los parámetros técnicos deseados. Se requiere de un material pétreo que sea químicamente inerte, resistente a los esfuerzos mecánicos, de buena adherencia y de distribución granulométrica dentro de los parámetros exigidos.

Las principales características de los áridos son: resistencia a la compresión, absorción, granulometría, resistencia a la abrasión, contenido de impurezas orgánicas, partículas planas y alargadas, estabilidad de volumen y las relacionadas con el almacenamiento y transporte. Estas pueden ser verificadas en la NC 251:2005 “Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos.”

Agua

El agua para ser utilizada en el hormigón debe cumplir una serie de requisitos. Generalmente el agua potable es apta para el uso; en caso de duda antes de la utilización del líquido deben tomarse muestras y enviarlas a laboratorios especializados para validar su uso. Las especificaciones pueden ser encontradas en la NC 353:2004 “Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros. Especificaciones”.

El agua está presente en el hormigón desde el amasado, fraguado y durante el endurecimiento. Para que se desarrolle la correcta hidratación del cemento, debe estar en cantidades bien especificadas para cada caso, ya que un exceso de agua que no se

necesite para la hidratación, se evapora dejando poros capilares que conectan al hormigón con el ambiente, con su posterior influencia negativa para la durabilidad, y no llegar al agua necesaria implica obtener hormigones secos con dificultades para ser colocados.

Aditivos

Se consideran aditivos a las sustancias químicas que añadidas al hormigón en pequeñas dosis (< 5 % respecto a la masa de cemento) durante el proceso de mezclado, sirven para modificar favorablemente algunas de las propiedades del hormigón en estado fresco o endurecido, para que el material se adapte mejor a las especificaciones de la obra o las necesidades del constructor (Betancourt, 2013). Estos pueden producirse en forma de líquidos, pastas o polvos.

Los aditivos pueden ser clasificados en dependencia a su efecto en las propiedades del hormigón; los plastificantes y superplastificantes que influyen sobre la consistencia de la mezcla, los aceleradores y retardadores que influyen en el fraguado del hormigón y otros como los incorporadores de aire, impermeabilizantes en masa, inhibidores de la corrosión, cohesionantes, expansivos, espumantes y reductores de la retracción. Las especificaciones se encuentran en la NC 228-1:2005 “Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 1 Aditivo para hormigón. Especificaciones”.

1.1.2 Propiedades del hormigón

El hormigón hidráulico se presenta de una forma más o menos plástica al ser mezclados sus componentes en las primeras horas de manera que permite moldearse (Hormigón fresco). Mientras pasa el tiempo y se produce la hidratación del cemento la masa plástica pasa a ser un material sólido con características pétreas (Hormigón endurecido). Las propiedades del hormigón en estado fresco influyen grandemente en las propiedades del hormigón endurecido.

1.1.2.1 Hormigón en estado fresco

Consistencia

La consistencia es la capacidad que tiene el hormigón para deformarse y ocupar cada lugar del molde en que ha sido colocado. (Jiménez Montoya et al., 1987)

Muchos son los factores que modifican la consistencia del hormigón, sin embargo, es indudable que el más importante de ellos es el contenido de agua en la masa del material.

Otros factores son: contenido de finos, tamaño máximo del árido, forma y granulometría de los áridos, proporciones de la mezcla y la presencia de aditivos.

La consistencia es medida mediante el ensayo del cono de Abrams que se encuentra en la NC 174:2002 “Hormigón fresco. Medición del asentamiento por el cono”

Laborabilidad

Una propiedad indispensable de toda mezcla de hormigón en estado fresco es su laborabilidad (o docilidad), entendiéndose como tal la aptitud del material para dejarse fabricar, transportar, colocar y compactar, sin que se presenten afectaciones notables en dichas actividades. (Betancourt, 2013)

Esta propiedad depende de dos factores fundamentales: las condiciones de fabricación y puesta en obra y las características de los elementos. El primero se refiere a las condiciones tecnológicas que se tienen para el amasado, la transportación, la colocación y fundamentalmente para la compactación del hormigón. El segundo se refiere a las características de los elementos a que son destinados los hormigones, tales como la configuración y dimensiones de los moldes utilizados y la cantidad y distribución del acero de refuerzo. Un mismo hormigón puede ser considerado laborable para la fabricación de un elemento bajo las condiciones de mezclado, transportación, colocación y compactación y no ser laborables bajo otras condiciones.

Exudación

El fenómeno conocido como exudación ocurre cuando durante la colocación y compactación de la mezcla de hormigón dentro de los encofrados, las partículas componentes del material se van re-acomodando gracias a la lubricación de la pasta-mortero de cemento y a la energía que se le aplica. De esta manera, ya asentadas las partículas más gruesas, una parte del agua “en exceso” es forzada a ascender dentro del volumen del material, logrando parte de ella salir a la superficie y formar una película de agua visible, en los elementos recién hormigonados. Otra parte del agua migra dentro de la masa de hormigón, pero al ser obstaculizado su movimiento queda atrapada bajo las partículas de los áridos, mayormente bajo las partículas planas alargadas y las barras de refuerzo en el hormigón (Betancourt, 2013)

La exudación influye negativamente en las propiedades del hormigón endurecido; al evacuarse el agua hacia la superficie crea a su paso poros capilares que dejan abierta una puerta a los agentes agresivos. Los hormigones que tuvieron mucha exudación

generalmente son menos durables. Los principales factores que influyen en este fenómeno son la relación agua/cemento y el contenido de finos en la mezcla.

Para la medición de este fenómeno se determina el agua que es exudada en el proceso; y se realiza mediante la especificación de la NC 243:2003 “Hormigón. Pérdida de agua por exudación”.

Tiempos de fraguado

El tiempo de fraguado del hormigón es de gran importancia al acometer trabajos de hormigonado; indica el margen que se tiene para terminar el proceso constructivo. No debe confundirse con el tiempo de fraguado del cemento, ya que intervienen factores como las diferentes relaciones agua/cemento, la presencia de áridos y las condiciones ambientales.

Este método de ensayo se basa en la relación que existe entre la resistencia a la penetración de la masa de mortero tamizado de una muestra de hormigón a un grupo de agujas de sección circular conocida, a las cuales se le aplica una fuerza en sentido vertical, hasta que la aguja penetre una profundidad determinada, en un tiempo dado. Determinando así el tiempo de fraguado inicial y final de la mezcla de hormigón. (NC-168, 2002)

Tiempo de fraguado inicial (TFI): Tiempo transcurrido desde el contacto inicial del cemento y el agua de la mezcla, hasta que la resistencia a la penetración del mortero alcance un valor de resistencia de 3,5 MPa, medido en horas y minutos. (NC-168, 2002)

Tiempo de fraguado final (TFF): Tiempo transcurrido desde el contacto inicial del cemento y el agua de la mezcla, hasta que la resistencia a la penetración del mortero alcance un valor de resistencia de 27,6 MPa, medido en horas y minutos. (NC-168, 2002)

Las especificaciones se encuentran en la NC 168:2002 “Hormigón fresco. Determinación del tiempo de fraguado por resistencia a la penetración”.

Temperatura del hormigón

La temperatura del hormigón depende de factores estrechamente ligados a características propias de la mezcla (cantidad y tipo de cemento y tiempo de contacto del agua con el cemento), a condiciones ambientales (Temperatura de los áridos, cemento y del medio ambiente) y a la forma y dimensiones de los elementos a hormigonar.

Las elevadas temperaturas que se generan en los hormigones en el período de fraguado traen consigo influencias negativas traducidas en rápidas evaporaciones del agua, pérdida

de asentamiento, disminución de los tiempos de fraguado y aparición de fisuras prematuras. (Díaz Gómez, 2012)

Cuando se realizan procesos de hormigonados en países tropicales como Cuba, es necesario mantener un estricto control de la temperatura y tomar medidas de prevención para evitar la fisuración prematura del hormigón y otros efectos negativos, como la pérdida de asentamiento y disminución de los tiempos de fraguado.

Se recomienda que la temperatura del cemento en el momento de su uso no exceda los 50°C según la NC 120:2007 “Hormigón hidráulico. Especificaciones”. En el caso de los hormigones en estado fresco la temperatura indicada por la NC 354: 2004 “Hormigón fresco. Determinación de la temperatura” no debe sobrepasar los 35°C.

Hay un número de opciones para controlar la temperatura del hormigón, que incluye el ajuste de la temperatura de los materiales constituyentes y/o el enfriamiento de la mezcla. (Arquitectuba, 2009). La temperatura de la mezcla de hormigón depende en su mayoría de la temperatura de sus materiales componentes (cemento, áridos y agua), que en el caso de los áridos por constituir del 75 al 80% del volumen, representan el mayor aporte. Algunas recomendaciones para controlar la temperatura de los áridos son:

- Almacenaje en locales techados.
- Conservándolos húmedos con rociadores.
- El almacenamiento en depósitos pintados de blanco.
- Cuando se requiera el enfriamiento del hormigón pueden emplearse varias vías. Una manera muy efectiva es el uso de agua fría o incluso hielo finamente molido como parte del agua de amasado (Arquitectuba, 2009).

Contenido de aire y peso unitario

Cuando normalmente se efectúa la colocación y compactación de un hormigón en los moldes, siempre queda una cierta cantidad de aire “atrapado”. Bajo condiciones normales, la cantidad de aire atrapado es de alrededor de un 2 % (unos 20 litros/m³). Desde luego que una compactación deficiente dejará la masa de hormigón menos compacta, y pueden quedar coqueas adicionales al aire atrapado, pero en este caso se refiere al aire que queda en un hormigón “compactado”. Claro que el peso unitario de un hormigón dependerá de su grado de compactación, contenido de aire atrapado y del peso específico de los materiales

constituyentes (en sus cantidades respectivas). (Betancourt, 2013)

1.1.2.2 Hormigón en estado endurecido

Durabilidad

La durabilidad de un hormigón hidráulico es la capacidad que tiene de resistir a lo largo del tiempo los efectos del medio ambiente y los agentes agresivos que tienden a destruirlo.

Entre los factores que determinan la durabilidad se encuentran: la calidad del hormigón (materiales componentes, dosificación idónea y proceso de fabricación) y la naturaleza del medio ambiente que rodea el material (agentes y procesos que tienden a destruirlo).

Para garantizar la durabilidad del hormigón y la protección de las armaduras frente a la corrosión es importante realizar un hormigón con una permeabilidad reducida, realizando una mezcla con una relación a/c baja, una compactación idónea, un peso en cemento adecuado y la hidratación suficiente de éste añadiendo agua de curado para completarlo (Díaz Gómez, 2012).

Las propiedades que a continuación se hace referencia tienen gran influencia en la durabilidad del hormigón hidráulico.

Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad que tiene el hormigón de permitir el paso a su interior de materiales en disolución, por lo que es una propiedad de importancia en la durabilidad del material.

La permeabilidad del hormigón está determinada mayormente por la permeabilidad del mortero y la pasta de cemento endurecida, ya que en ellas se encuentran los poros permeables capaces de permitir el paso de sustancias a su través, mediante distintos fenómenos (Betancourt, 2013).

Resistencia a la compresión

El hormigón es un material que resiste a las solicitaciones de compresión, tracción y flexión. La resistencia que presenta frente a los esfuerzos de compresión es la más elevada de todas, cifrándose en unas 10 veces la de tracción, y es la que más interés presenta en su determinación, dado que en la mayor parte de las aplicaciones del hormigón se hace uso de esa capacidad resistente y a que, por otra parte, la resistencia a compresión es un índice de la magnitud de otras muchas propiedades del mismo (Díaz Gómez, 2012).

A diferencia de otros materiales pétreos, en el hormigón, muchas de sus propiedades estructurales dependen de la edad de fabricación y de las condiciones de curado. A menos que se especifique otra cosa, la resistencia a compresión del hormigón se determina sobre probetas ensayadas a los 28 días de edad y condiciones de curado normalizadas. Bajo determinadas circunstancias es posible que se especifique la resistencia a compresión a otras edades diferentes a los 28 días (Betancourt, 2013).

Los factores que afectan la resistencia a compresión del hormigón son: la relación agua/cemento, las características del cemento, edad, calidad de los áridos, proporciones de la mezcla, grado de compactación, temperatura y condiciones del ambiente de curado y las condiciones de ensayo.

Fatiga

El comportamiento del hormigón sometido a cargas repetidas es distinto al sometido a cargas estáticas. La repetición de millones de cargas durante la vida de un elemento de hormigón puede determinar el fallo del mismo, con una disminución de la resistencia del hormigón. Este fenómeno recibe el nombre de fatiga del hormigón, pues iguales tensiones van provocando cada vez mayores deformaciones (Betancourt, 2013).

Adherencia

La adherencia es una propiedad de particular importancia en el trabajo del hormigón armado, ya que el mismo está basado precisamente en la perfecta unión entre el hormigón y el acero de refuerzo, resistiendo bien el primero los esfuerzos de compresión y el segundo los esfuerzos a tracción.(EHE, 1999)

Retracción

La retracción es un fenómeno producto de la desecación que se genera en el hormigón, donde es mayor en las partes exteriores que en las interiores, en los elementos masivos se generan tensiones internas de tracción a causa de la retracción desigual, lo cual conduce a la formación de fisuras en la masa del hormigón, particularmente en la interface árido-pasta. (Betancourt, 2013)

Los hormigones después de su confección contienen una cantidad de agua que se encuentra normalmente muy por encima de la cantidad de agua necesaria para la reacción del cemento. Este exceso es necesario para asegurar la laborabilidad suficiente para su manipulación y compactación, así como asegurar que haya agua suficiente para el fraguado

y el endurecimiento del cemento, que depende de la reacción del cemento con el agua y puede demorarse por numerosos meses.

En la mayoría de los casos la pieza de hormigón está en contacto con la atmósfera (la cual no está saturada de agua) provocando la evaporación del agua, que unida a la que se va combinando con el cemento, provocan una más o menos lenta disminución del agua libre en el hormigón. (Acevedo, 1985)

Como el proceso de la difusión de la humedad del interior del hormigón hacia su superficie es muy lento, la superficie se seca más rápidamente que el interior y, por tanto, la contracción “libre” tiende a desarrollarse principalmente en la periferia de la sección. La distribución irregular de esta contracción “libre” y la deformación plana necesaria, provocan esfuerzos de tensión en las fibras exteriores y de compresión en las fibras interiores. La contracción “aparente” uniforme es el resultado combinado de la contracción “libre” y las deformaciones instantáneas y lentas, producidas por los esfuerzos inducidos. Así, sólo es posible que se produzca contracción sin restricciones en secciones delgadas de hormigón es decir en placas, cuerpo limitado por dos planos, a distancia pequeña en comparación con las otras dimensiones (Díaz Gómez, 2012)

Al continuar el secado se elimina el agua absorbida y el cambio en el volumen de la lechada de cemento en esa etapa es aproximadamente igual a la pérdida de una película de agua cuyo espesor es el de una molécula de la superficie de todas las partículas de gel. Como el “espesor” de una molécula de agua es aproximadamente 1% del tamaño de una partícula de gel, se suponía que el cambio lineal de dimensiones de la lechada de cemento al secado completo también era del orden de 1%. En la realidad se han observado valores hasta de 0.4%, pero el cambio global en el volumen del concreto en proceso de secamiento es menor que el volumen de agua extraída. (Arquitectuba, 2009)

Factores influyentes en la retracción.

- Influencia del cemento

Actualmente, aún se discute la influencia de la finura del cemento en la retracción. La finura muy alta no necesariamente conduce a una retracción muy alta en el hormigón, pero si es posible que ésta se acelere de manera que se produzca un aumento en el agrietamiento. (Díaz Gómez, 2012)

El tipo y la composición del cemento no son factores que influyan en la retracción, si se toma en cuenta la diferente rapidez en la adquisición de la resistencia y se comparan hormigones hechos con diferentes cementos que tengan la misma relación esfuerzo-resistencia (es decir, la relación de esfuerzo aplicado a la resistencia en el momento de aplicar la carga). (Sant, 2009)

Un alto contenido de cemento puede afectar la retracción, traducido en un incremento del calor de hidratación y la consiguiente evaporación del agua en la superficie del hormigón contribuyendo a la aparición de grietas en la interface árido-pasta.

➤ Influencia del contenido de agua

Añadir un exceso de agua de amasado para conseguir una masa homogénea y trabajable sin un ajuste de la relación a/c implica en cualquier caso un aumento de la porosidad, de la retracción y de la fisuración del hormigón endurecido y una disminución de la resistencia ya que esta agua de amasado escapa en su mayor parte de la masa en un momento u otro durante el endurecimiento. (BASF, 2009)

➤ Influencia del árido.

Un factor importante es el agregado, por su efecto moderador sobre la contracción libre de la pasta de cemento puro. Se ha encontrado que la contracción del hormigón, S_c , sigue la relación (Betancourt, 2013):

$$S_c = S_p(1-g)^n$$

Donde

S_p = Contracción de la pasta de cemento puro

g = Concentración de volumen del árido en el hormigón (es el contenido de agregados en volumen)

n - Constante empírica que varía entre 1.2 y 1.7

Puede verse que el contenido volumétrico de agregado tiene una influencia considerable en la magnitud de retracción que se produce realmente en el hormigón. El tamaño máximo y la granulometría del agregado no son factores principales y sólo afectan la retracción en cuanto a que controlan la pobreza de la mezcla. (Díaz Gómez, 2012)

El grado de restricción que presenta el árido depende de sus propiedades elásticas. Por tanto existe una relación directamente proporcional entre la retracción y el módulo de elasticidad del agregado usado.

Muy pocos áridos de los que se usan comúnmente están en sí sujetos a retracción. Los que lo están ordinariamente también tienen una elevada absorción, de manera que se puede

usar la prueba de absorción para comprobar la posibilidad de que un árido sea del tipo de los que se retraen. Si la absorción es alta, deberán hacerse pruebas con el agregado sospechoso. (Sant, 2009)

La presencia de arcilla en el agregado disminuye el efecto de restricción a la contracción y como la propia arcilla está sujeta a contracción, el recubrimiento de arcilla en el agregado puede aumentar la retracción hasta en un 20%. (Sant, 2009)

Algunas pruebas han demostrado que la porosidad del agregado influye en las deformaciones plásticas pero, como los agregados con una gran porosidad generalmente tienen un módulo de elasticidad inferior, no es posible separar con facilidad la influencia de estos factores. (Betancourt, 2013)

➤ **Influencia del curado**

Se produce retracción cualquiera que sea la edad a la que comienza el secado y una vez que comienza prosigue durante mucho tiempo: se han observado algunos movimientos aún después de 28 años, pero es posible que parte de la retracción a largo plazo se deba a carbonatación, pero la tasa de contracción a grandes edades es tan lenta que no tiene importancia. No todos los hormigones se contraen con la misma rapidez pero para los estructurales expuestos a una humedad relativa de 50 y 70%:

Del 14 a 34% de la retracción a los 20 años se produce en 2 semanas; del 40 al 80% de la retracción a los 20 años se produce en 3 meses; y del 66 al 85% de la retracción a los 20 años se produce en 1 año.

De esta disertación puede decantar la importancia del estudio de la retracción del hormigón en edades tempranas, así como la necesidad del proceso de curado como medio de prevención de una desecación acelerada o prematura que produciría fisuras y retracciones además de dificultar el proceso de hidratación. (Arquitectuba, 2009)

➤ **Efecto de la geometría**

Aunque la contracción libre es una propiedad inherente de una mezcla determinada en condiciones específicas, la retracción observada se rige por el grado de secado que se puede producir. Por tanto, es un factor importante el tamaño del miembro de hormigón que se encuentra en proceso de secado. (Arquitectuba, 2009)

La influencia del tamaño en la retracción muestra el hecho de que, en cualquier instante, diferentes partes de un elemento de hormigón se secan en mayor o menor medida y, por supuesto, la pérdida de humedad sólo se produce en la superficie. De esta manera, la

contracción no es uniforme y es inevitable que el núcleo más húmedo produzca una restricción. (Díaz Gómez, 2012)

El efecto del tamaño se puede tomar en cuenta indirectamente por la relación de la superficie de secado al volumen de hormigón que implica. Los elementos en forma de placa aunque poseen un secado más uniforme tienen una superficie de secado de mayor magnitud lo que influye directamente en la evaporación del agua presente en el gel derivando en la retracción de la superficie y aparición de fisuras. (Sant, 2009)

➤ **Influencia de la humedad relativa**

La humedad relativa es un factor importante, estrictamente hablando, no es la humedad en sí lo que importa, sino el proceso de secado mientras el hormigón está en proceso de retracción. Por tanto, la humedad relativa carece de importancia si el hormigón ya alcanzó su equilibrio hidráulico ya que en ese momento la retracción es muy pequeña.

La explicación del fenómeno no se hace simplemente en función de una pérdida adicional de agua del hormigón; el mecanismo por el cual la humedad relativa afecta la retracción es relativamente complejo, siendo uno de los factores claves el hecho de que el equilibrio de la presión del vapor del agua absorbida dependa de su estado de esfuerzo. (Betancourt, 2013)

➤ **Influencia de la resistencia**

La edad en que el hormigón se carga constituye un factor en la retracción, ya que influye en el grado de hidratación y la adquisición de resistencia. Para un contenido constante de lechada de cemento y los mismos esfuerzos aplicados, la retracción sufrida por el hormigón es inversamente proporcional a la resistencia del hormigón. (Betancourt, 2013)

La resistencia del hormigón (cualquiera que sea la naturaleza de los factores que la afecten) puede usarse como parámetro global de la retracción. (Arquitectuba, 2009)

Los anteriores y otros factores que modifican la magnitud de la retracción son enunciados por (Casanova.):

- Edad del Hormigón: menor retracción a mayor edad.
- Grado de exposición de la pieza: mayor exposición mayor retracción.
- Espesor de la pieza: mayor retracción a menor espesor.
- Cuantía y disposición de las armaduras: a mayor cuantía menor retracción.
- Humedad del ambiente de curado: mayor sequedad mayor probabilidad de retracción.
- Naturaleza de los áridos: la retracción de estos influye en la del hormigón.
- Contenido de áridos: reducen la retracción.
- Contenido de agua: mayor retracción a mayor contenido de agua.

- Contenido de cemento: mayor retracción a mayor contenido de cemento
- Relación a/c de la mezcla: a igualdad de relaciones agua/ cemento la retracción aumenta con la dosis de cemento
- Proporción árido/cemento: mientras mayor sea esta proporción menor será la retracción
- Curado: cuanto más prolongado menor retracción.

1.2 Fisuración del hormigón

Las fisuras en el hormigón pueden clasificarse como fisuras de tipo estructural y fisuras por restricción al movimiento propio del material. Las de tipo estructural suelen aparecer en los elementos de las edificaciones, ya sea por un inadecuado diseño de las juntas entre ellos o por la acción de las cargas a que están sometidos. Las fisuras por restricción se originan debido al impedimento de un elemento estructural, de cambiar libremente de volumen cuando sufren el efecto de fuerzas expansivas y de contracción. Otras fisuras pueden generarse por asentamientos diferenciales de una edificación y como consecuencia de la corrosión del acero de refuerzo.

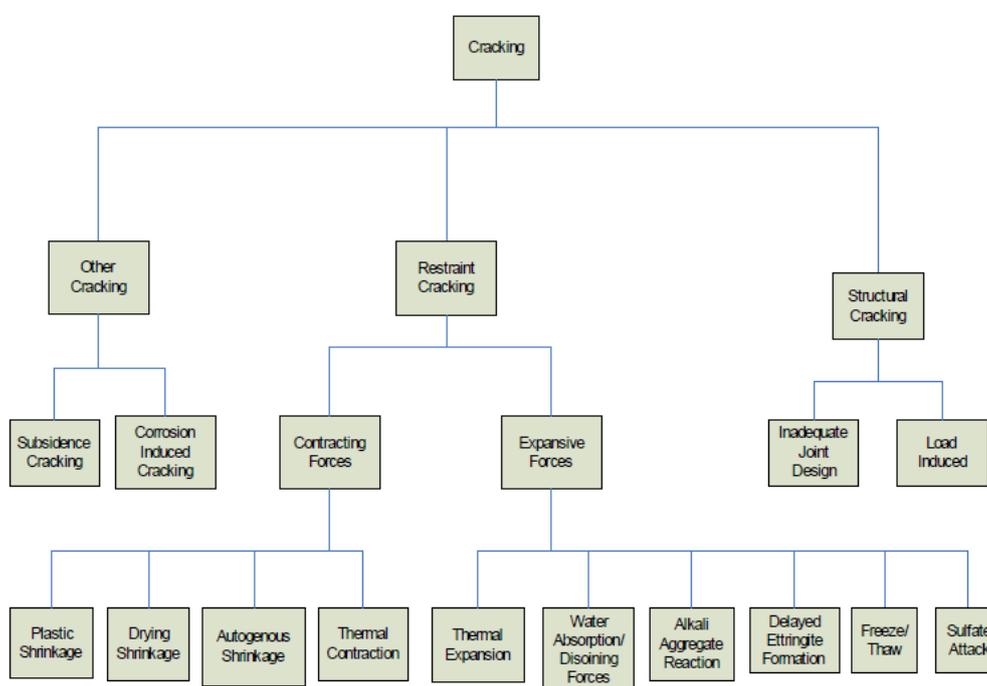


Fig.1.1 “Fisuración y sus causas”. Tomado de (Ideker, 2008)

1.2.1 Fuerzas expansivas influyentes en la fisuración del hormigón.

Las fuerzas expansivas que conllevan a la fisuración del hormigón pueden ser producidas por diferentes causas:

- Expansiones térmicas
- Absorción de agua
- Reacción Alkali-Agregado
- Formación de Etringita
- Heladas y deshielo
- Ataques de sulfatos

1.2.2 Fuerzas de contracción o retracción influyentes en la fisuración del hormigón

Las fisuras son causadas esta vez por la restricción, al movimiento que generan cuatro tipos de retracción posibles:

- Retracción Química
- Retracción Plástica
- Retracción Autógena
- Retracción por Secado

1.2.2.1 Retracción Química

Durante el proceso de hidratación del cemento ocurren cambios de volúmenes en los sólidos y líquidos de la mezcla de hormigón que se conocen como retracción química. Los productos hidratados constituyen solo una parte del volumen total de cemento y agua al inicio del proceso.

El cambio volumétrico durante la condición plástica es ilustrado por los dos primeros barros de la Fig. 1.2 (Copeland and Bragg)

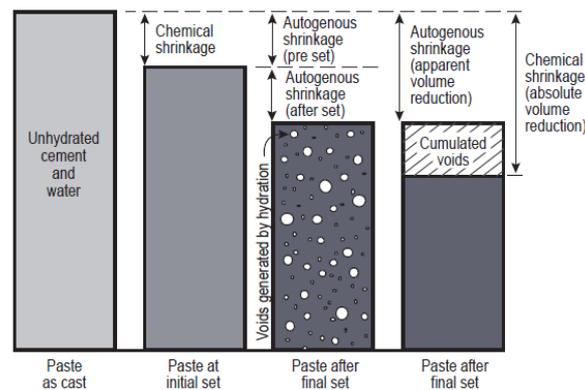


Fig.1.2 “Relación entre retracción química y autógena en el hormigón”.

La retracción química continúa ocurriendo en una escala microscópica mientras dura la hidratación del cemento aunque después del fraguado inicial la pasta no se deforma tanto como cuando estaba en una condición plástica. Un aumento en la hidratación y por consiguiente en la retracción es compensado por la formación de vacíos en la microestructura. La mayor parte de este cambio de volumen es interno y significativamente no cambia las dimensiones externas visibles de un elemento. (Díaz Gómez, 2012)

La expansión que produce el calor generado por las reacciones de hidratación del cemento provocan tensiones en las zonas a temperaturas más frías del mismo elemento, por estar en contacto con el ambiente, o con volúmenes de hormigón puestos en obra con anterioridad que van impidiendo su libre movimiento de retracción inicial. (Sant, 2009)

Debido a la retracción química se forman poros permeables que contribuyen a una depresión de la humedad relativa interna. (Thoma et al., 2001)

Fisuración por retracción química

El tiempo de formación incluye desde horas hasta varios días de la puesta en obra. La manifestación son fisuras de forma similar a las de tracción o flexión. Como observación se plantea que si el hormigón es armado suelen ser de pequeña anchura y separadas. Aparecen en la superficie en forma serpenteante, ubicadas al azar y orientadas en cualquier dirección. (Díaz Gómez, 2012)

Ensayos para la medición de la retracción química

Existen numerosos métodos para evaluar la retracción química, todos basados en la absorción del agua durante el proceso de hidratación, el protocolo de estos métodos se

encuentra en la norma ASTM C1608 “Método estándar para el cálculo de la retracción plástica en hormigones”. (Díaz Gómez, 2012)

Contracción Le Chatelier, 1900

Mide el decrecimiento de volumen de la pasta de cemento. (Thoma et al., 2001)

$V \text{ productos} < V \text{ reaccionantes}$

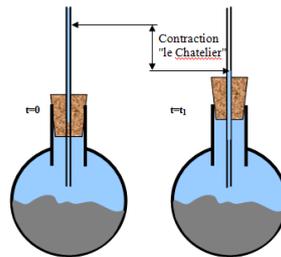


Fig. 1.3 “Contracción Le Chatelier”.

Método de Buoyancy

Se obtiene el valor del volumen final basado en los cambios de densidad a través de la expresión: (Thoma et al., 2001)

$$V_{CS} = \frac{\Delta V_{paste}(t)}{g_{cem}} = \frac{W_{sub}(t) - W_{sub}(30)}{\rho_{par} \cdot g_{cem}}$$

Involucra suspender, de una balanza, una muestra en un baño aceite de parafina graduado térmicamente, el conjunto se sitúa en la parte superior del agua que la contiene, como muestra la Fig. 1.4. Este es un proceso que puede automatizarse, es relativamente caro. (Thoma et al., 2001)

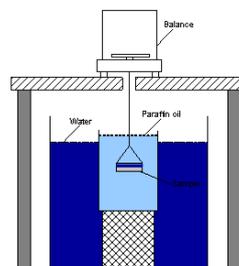


Fig. 1.4 “Método de Buoyancy”.

Método de análisis de imagen (EPFL)

Se miden los cambios de volumen a la pasta de cemento a través de la lectura del nivel del aceite, este proceso es registrado por una cámara digital. Se realiza con agua desionizada. (Thoma et al., 2001)

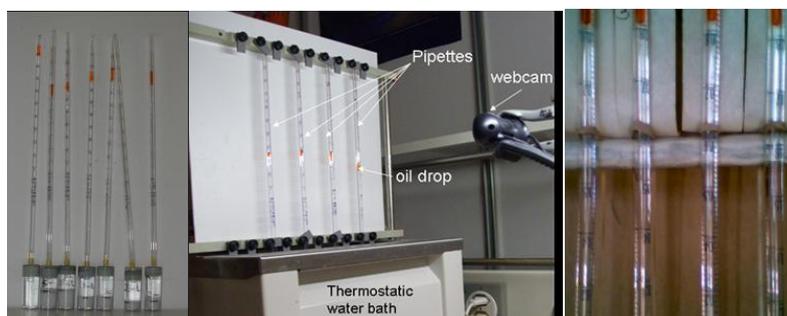


Fig. 1.5 "Método de procesamiento de imágenes de la EPFL".

1.2.2.2 Retracción Plástica

La retracción plástica ocurre debido a la pérdida de agua del hormigón fresco mientras este aun es plástico. Ocurre debido a la tensión que provocan los áridos al asentarse por la pérdida de agua, al ser más rápida la evaporación que la propia exudación del hormigón.

Es decir si la humedad se evapora de la superficie del hormigón recién colocado más rápido de lo que puede ser reemplazada por el agua de exudación, el hormigón superficial se contrae. Debido a la restricción proporcionada por el hormigón debajo de la capa superficial que se seca y en proceso de rigidización se desarrollan tensiones de tracción que provocan fisuras. (Thoma et al., 2001)

La retracción plástica comienza cuando el hormigón está sujeto a una pérdida de humedad muy rápida provocada por una combinación de factores que incluyen las temperaturas del aire y el hormigón, la humedad relativa, la geometría del elemento (mayor en secciones delgadas) y la velocidad del viento en la superficie del hormigón. Estos factores pueden combinarse y provocar niveles altos de evaporación superficial en todo tipo de clima, también se asocia a un alto contenido de cemento y/o baja relación agua cemento. (Grant et al., 2003)

Se pueden adoptar varias medidas como el uso de láminas plásticas para cubrir las superficies entre operaciones de acabado, resultan muy útiles los rompe-vientos que reducen la velocidad del viento y los parasoles que reducen la temperatura superficial, así como la realización de un curado satisfactorio. (Grant et al., 2003)

Fisuración por retracción plástica

Ocurren a las pocas horas del hormigonado. Las grietas rodean los granos del árido horizontalmente son poco profundas pero de profundidad variable, que pueden formar un patrón poligonal aleatorio, o bien pueden aparecer básicamente paralelas unas a otras. Estas fisuras a menudo son bastante anchas en la superficie. Su longitud varía entre pocos milímetros y más de un metro, y su separación puede ser de pocos milímetros o de hasta 3 m. Las fisuras por retracción plástica comienzan como fisuras de poca profundidad, pero pueden alcanzar de 25 a 50 mm. (Díaz Gómez, 2012)

Ensayos para la medición de la retracción plástica

Existen varias técnicas para estudiar la retracción plástica en el hormigón. Entre estos se puede mencionar los especímenes lineales con restricción en los extremos o con un extremo fijo y el otro móvil; el espécimen tipo losa donde las restricciones son perpendiculares; y el espécimen tipo anillo. (imcyc, 2011)

Método de prueba del panel rectangular ASTM C1579 “Método estándar para el cálculo de la retracción plástica”

Este método evalúa la contracción plástica mediante someter paneles rectangulares de hormigón a velocidades de viento de 4 m/s en una cámara de condiciones constantes de humedad (Humedad relativa del 30 %) y temperatura (36 °C). El parámetro de mayor importancia es la velocidad de evaporación del agua, que se debe mantener en un valor mínimo de 1 kg/m²/h para asegurar la generación de la fisura. La prueba termina cuando se completa el fraguado final del hormigón, que se determina de acuerdo con la ASTM C403 “Método estándar para la determinación de fraguado en hormigones hidráulicos”, sin embargo, el espesor de fisura final se determina a las 24 horas de iniciado el mezclado. (imcyc, 2011)

Método de prueba del anillo

El ensayo tipo anillo ha mostrado ser un método que proporciona un grado de restricción elevado y constante que permite resultados consistentes en muestras de pasta, mortero y hormigón. El dispositivo de prueba consiste en dos anillos de acero, y una base metálica, como se muestran en la Fig. 1.6 y 1.7. El anillo exterior tiene soldadas doce restricciones que sirven para generar la fisuración. La prueba consiste en moldear una muestra de hormigón entre los dos anillos metálicos para formar un anillo de concreto de 15 cm de espesor y 8 cm de altura. La mezcla de hormigón se moldea en una sola capa y la

compactación se hace sobre una mesa de vibrado. Todo el conjunto se somete a un flujo de aire constante (4 m/s) en un ambiente controlado de humedad (40% de Humedad relativa) y temperatura (20° C). También se puede calcular la evaporación de agua de la superficie del hormigón y por lo tanto predecir el posible inicio de la fisuración por contracción plástica. (imcyc, 2011)



Fig. 1.6 "Dispositivo de prueba".



Fig. 1.7 "Cámara de prueba".

1.2.2.3 Retracción Autógena

La retracción autógena en las pastas, morteros y hormigones son los cambios de volúmenes macroscópicos (Visibles) causados por el proceso de fraguado; son cambios químicos y variaciones provocados por la desecación debida a la utilización del agua necesaria para el proceso de hidratación dada la ausencia de agua externa.

Es provocada por la tensión que se genera en la masa de hormigón no sujeta a fuerzas externas. Esta retracción es directamente proporcional al contenido de cemento en la pasta e inversamente proporcional a la relación a/c. El encogimiento químico es la fuerza motriz detrás del encogimiento autógeno. (Sant, 2009)

Esta reducción macroscópica de volumen es mucho menor que la reducción absoluta provocada por el encogimiento químico debido a la rigidez que presenta la pasta endurecida. (DIAZ GOMEZ 2012)

Es un encogimiento que incluye cambios de volumen de la parte interna y externa que concierne a mezclas con relación a/c < 0.42. (Holt, 2001)

Fisuración por retracción autógena

Ocurren en los primeros días de la puesta en obra. Son fisuras importantes en muros y piezas de gran longitud que pueden alcanzar de 2 a 4 mm de ancho. Pueden limitarse por las armaduras o limitando el tamaño de las piezas con lo que variaría la restricción provocada por los mismos. Aparecen siguiendo las líneas del refuerzo. (Díaz Gómez, 2012)

Ensayos para la medición de la retracción autógena

Los ensayos para la obtención de la retracción autógena se dividen en dos grupos: métodos lineales y métodos volumétricos. Dentro de los lineales se encuentran el método del tubo corrugado y el láser, por otra parte, el método de la membrana es el más empleado de los volumétricos.

Método del tubo corrugado

Mide la deformación longitudinal de la muestra ya que el molde tiene una rigidez mucho mayor en la dirección radial que en la dirección longitudinal. El largo es de 400 mm y el diámetro de 30mm, la muestra se encapsula 30 min después de la adición de agua. Ofrece una exactitud de ± 5 mm/m. (Thoma et al., 2001)

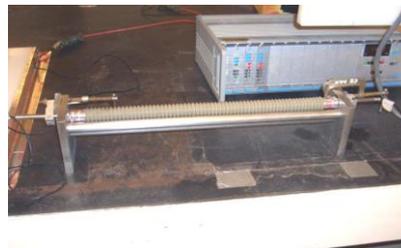


Fig. 1.8 "Tubo corrugado".

Método del láser.

Este método se basa en registrar el cambio longitudinal que experimenta la muestra con el uso de rayos láser. Se fija un punto y un ángulo de 20°, se registran en la computadora las diferentes posiciones que adopta la muestra. Tiene una precisión de 5 micras. (Thoma et al., 2001)



Fig.1.9 "Método del láser".

Método de la membrana

La muestra fresca es encapsulada en la membrana, esta se suspende de una balanza en un baño de aceite de parafina, el conjunto se sitúa en la parte superior del agua que la contiene pero esta agua no ejerce ninguna presión sobre la muestra, la membrana debe ser impermeable y el fluido debe brindar un efecto osmótico. La precisión es crucial porque durante el proceso se pueden cometer errores que falseen los resultados. (Thoma et al., 2001)

El resultado obtenido puede transformarse de volumétrico a lineal a través de un factor de conversión para el fluido de 2.53 determinado por O. M. Jensen.

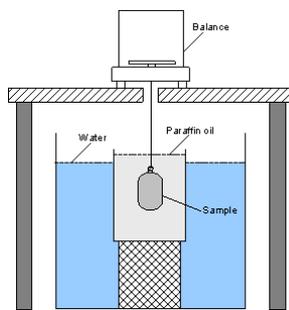


Fig. 1.10 “Método de la membrana”.



Fig. 1.11 “Membrana”.

1.2.2.4 Retracción por secado

La retracción por secado es provocada por la pérdida de humedad de la pasta de cemento, la cual se puede contraer hasta un 1%. Por fortuna, los agregados proveen una restricción interna que reduce la magnitud de este cambio de volumen a aproximadamente 0,06%. (Grant et al., 2003)

La magnitud de la retracción por secado depende principalmente de la cantidad y tipo de agregados y del contenido de agua de la mezcla. Cuanto mayor sea la cantidad de agregados, menor será la retracción. Cuanto más rígido sea el agregado, más efectivo será para reducir la retracción del hormigón. Cuanto mayor sea el contenido de agua, mayor será la retracción por secado. (Grant et al., 2003)

La retracción que el hormigón sufre debida al secado consiste básicamente en una deformación volumétrica de contracción, como consecuencia del movimiento de humedad dentro del material cuando existe un gradiente de humedad relativa entre el medio ambiente y la estructura. (Idiart)

Es decir, esta retracción, es debido a la pérdida de agua asociada al avance del secado hacia el interior de la masa de hormigón que causa una reducción del volumen de la pasta de cemento. (Díaz Gómez, 2012)

Fisuración por retracción por secado

La fisuración superficial irregular en muros y losas constituye un ejemplo de retracción por secado a pequeña escala. Estas fisuras aparecen en el mortero en las primeras semanas e incluso meses, suelen tener de 4 a 8 mm de espesor y son de profundidad y longitud variable siendo incrementables con el tiempo. Su dirección es perpendicular a la superficie expuesta al secado y el sentido es ascendente. (Díaz Gómez, 2012)

Del 4 al 34% aparecen a los 14 días, del 40 al 80% aparecen a los 90 días y del 66 al 85% aparecen a los 365 días. (Thoma et al., 2001)

Ensayos para la medición de la retracción por secado

El procedimiento se encuentra en la norma ASTM C157 “Método estándar para el cálculo de cambios de longitud en morteros y hormigones”, mide los cambios de longitud que experimenta la muestra entre dos puntos fijos.

Entre las características del procedimiento se encuentran:

- Especímenes de 75 mm x 75 mm x 285 mm (ASTM, 2006)
- Temperatura mantenida de $23 \pm 2^\circ\text{C}$
- Humedad relativa del $50 \pm 4\%$
- Desencofrado a las 24h
- Registro del cambio de longitud diario hasta 28 días.
- Precisión de $\pm 10\mu\text{m}$

Ensayos experimentales demuestran que, como es lógico, las deformaciones medidas en los bordes de las probetas son bastante mayores que en el centro de las mismas, a veces hasta 5 veces más, como muestra la Fig. 1.12. También es de gran importancia la esbeltez de las probetas empleadas, ya que los bordes tienen un efecto sobre la distribución del contenido de humedad. Por lo tanto, es importante medir las deformaciones longitudinales en el centro de las probetas. (López et al., 2005)

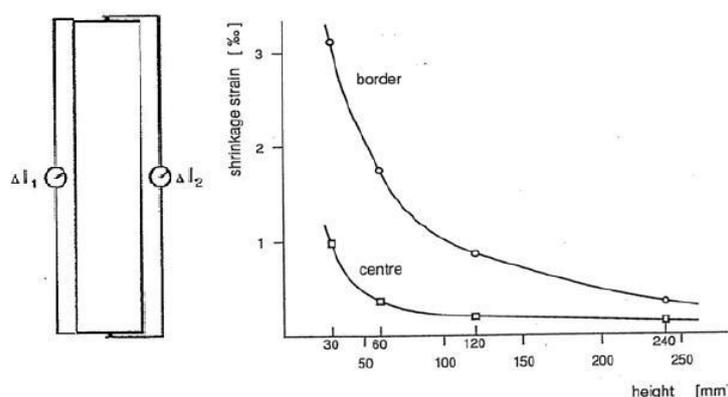


Fig.1.12 “Retracción medida en el borde y en el centro de la probeta”.

Factores influyentes en la retracción por secado.

Tipo de cemento.

Se ha observado que la cantidad de C3A (aluminato tricálcico) y el contenido alcalino tienen un efecto dominante y a la vez ambos están influenciados por el porcentaje de yeso en el cemento. Muchas veces las propiedades químicas del cemento no son tomadas en cuenta siendo más importante su desempeño final (resistencia). (Australia, Julio 2002)

Contenido de áridos.

La presencia de áridos en el hormigón restringe las deformaciones, ya que los áridos normalmente utilizados no sufren fluencia cuando son sometidos a las tensiones usuales de servicio en el hormigón. Cuanto más rígido sea el agregado, más efectivo será para reducir la retracción del hormigón. La Tabla 1.1 muestra la influencia del contenido de áridos en la retracción por secado. (Idiart)

En los hormigones que presentan una relación árido-cemento alta, se registran menores valores de retracción debido al efecto de restricción de la deformación de los áridos.

La tabla 1.1 muestra los valores típicos de la retracción de muestras de mortero y hormigón (sección de 127mm²), sometidos a un ambiente con 50% HR y 21°C” (Idiart)

Tabla 1.1 “Retracción del hormigón según relación agua/cemento y árido/cemento”

Relación árido/cemento	Retracción a 6 meses (x10-6) p/ relación a/c de:			
	0,4	0,5	0,6	0,7
3	800	1200	----	----
4	550	850	1050	----
5	400	600	750	850
6	300	400	550	650
7	200	300	400	500

Relación agua/cemento.

La retracción por secado es directamente proporcional a la relación agua/cemento.

Mayor relación a/c se traduce en mayor contenido de agua, este es uno de los factores más importante en la retracción por secado porque su aumento tiende a incrementar la contracción y al mismo tiempo a reducir la resistencia del hormigón. (Australia, 2004)

Los hormigones con un contenido de agua mayor presentan magnitudes de retracción por secado muy superiores provocados porque el agua que escapa en un momento u otro durante el endurecimiento (evaporación y auto-desecación) y la caída de la resistencia. (Australia, 2004)

Tiempo

La evolución de la retracción con el tiempo responde a una escala logarítmica como puede apreciarse en la Fig.1.13, en la que se aprecia que la retracción tiene un aumento muy considerable en las primeras horas e incluso días, debido a que el hormigón no ha adquirido la resistencia necesaria, finalmente tiende a estabilizarse y no crece indefinidamente. (Idiart)

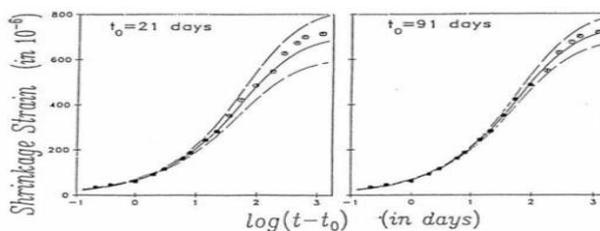


Fig.1.13 “Curvas de retracción-tiempo”.

Curado

El curado debería comenzar inmediatamente después del desencofre y es particularmente importante durante el primer día después de la colocación, ya que es el procedimiento

mediante el cual se evita que parte del agua de amasado del hormigón se pierda por distintas vías. Su correcta ejecución garantiza que se produzca de manera conveniente el proceso de fraguado y endurecimiento. (Holt, 2001)

Pero un curado muy prolongado tampoco es recomendable ya que el porcentaje de granos de cemento hidratados es de tal magnitud que el hormigón tiende a expandirse y por ende agrietarse. (Díaz Gómez, 2012)

Condiciones ambientales.

Dentro de las condiciones ambientales se encuentra la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento, todos afectarán la pérdida de agua en la superficie del hormigón (Australia, 2004). La combinación de estas puede resultar en una retracción por secado muy alta cuando la evaporación alcanza valores por encima de 1 kg/m²/h.

El encogimiento por secado es superior cuando aumenta la temperatura, disminuye la humedad relativa y se incrementa la velocidad del viento.

Humedad relativa

Dentro de las condiciones ambientales el efecto más significativo lo posee la humedad relativa como muestra la Fig. 1.14

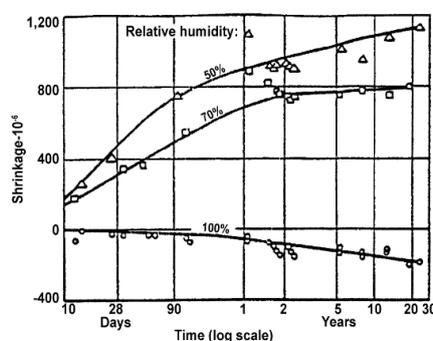


Fig.1.14 “Efecto de la humedad en la retracción”.

Para el estudio de la retracción por secado, se adopta generalmente como variable a la humedad relativa (HR). La humedad está presente tanto en su fase gaseosa (vapor de agua) como en su fase líquida (agua), aunque se puede considerar que hay equilibrio termodinámico entre las fases en todo momento (Bazant and Raftshol, 2002). En el secado intervienen mecanismos más o menos complejos que actúan de manera acoplada como son: tensión capilar, presión de desunión, tensión superficial y pérdida de la humedad entre capas del silicato de calcio hidratado. Estos ocurren simultáneamente en el seno de la pasta de cemento y están estrechamente ligados a la humedad relativa. (Norling, 2004)

La tensión capilar actúa en el rango de 40 a 50 % de humedad relativa. (López et al., 2005)

La presión de desunión actúa en el rango de humedades relativas cercanas a la saturación. (López et al., 2005)

La tensión superficial actúa en el rango de humedades relativas bajas. (López et al., 2005)

La pérdida de la humedad entre capas del silicato de calcio hidratado cuando la humedad cae por debajo de aproximadamente el 10% por lo que tiene poca importancia práctica. (López et al., 2005)

Muchos investigadores han propuesto relacionar estos quiebres en las curvas con diferentes mecanismos que actúan en distintas regiones o rangos de humedad relativa (Australia, 2004). Aunque es un procedimiento válido, resulta muy difícil cuantificar la influencia de cada uno de estos mecanismos. (Norling, 2004)

Cuando se somete una pieza de hormigón a una humedad relativa ambiente por debajo del punto de saturación, se produce el secado de la pieza, que comienza por la superficie en contacto con el aire. (Díaz Gómez, 2012)

El frente de secado avanza de acuerdo a una ley de difusión que se expresa a través del coeficiente de difusión el cual es altamente dependiente de la humedad relativa, una menor humedad contribuye al aceleramiento del secado de la pieza y por ende aumento de la evaporación del agua y la retracción asociada. (Australia, Julio 2002)

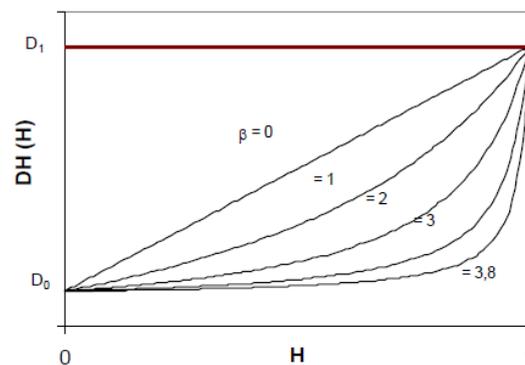


Fig. 1.15 “Relación entre el coeficiente de difusión (DH) y la humedad relativa (H)”.

Geometría

Los elementos de grandes dimensiones y espesores se secan más lento que los delgados y pequeños, como consecuencia su encogimiento será mayor para un mismo período de secado. (Díaz Gómez, 2012)

El efecto de la geometría en la retracción por secado es representado en la mayoría de los códigos y normas por un “espesor teórico” el cual se define como 2 veces el área de la sección transversal dividida entre el perímetro. Se deduce que un espesor teórico superior será asociado con un encogimiento por secado inferior. (Australia, 2004)

Práctica constructiva

La correcta colocación, compactación y curando son factores importantes para minimizar la magnitud del encogimiento de todo tipo y más el referente al secado.

Añadir más agua durante la colocación del hormigón para obtener mayores favorabilidades aumentará la retracción por secado debido a los ya mencionados efectos negativos de la cantidad de agua en la mezcla. La correcta compactación y curado conducen a un hormigón denso, de reducidos y/o discontinuos vasos capilares y reducen la pérdida de agua en el hormigón. (Díaz Gómez, 2012)

Principales medidas de mitigación para minimizar la retracción por secado.

- Uso del contenido mínimo de agua (cumpliendo con las especificaciones)
- Uso del tamaño máximo y el volumen del árido grueso lo más alto posible
- No usar adiciones que aumenten el encogimiento por secado, como son las que tienen alto contenido de cloruro de calcio.
- Correcta colocación, compactación y curado.
- Uso de aditivos reductores de la retracción.
- Uso de materiales cementicios suplementarios.

1.3 Caso de estudio (Bungalows-cayo Santa María)

1.3.1 Características constructivas de los bungalows

Los edificios tipo bungalows de cayo Santa María son estructuras de hormigón armado con una combinación de elementos prefabricados (vigas y losas balconeras) y elementos fundidos en el lugar de la obra (muros y losas), con predominio de los últimos en el conjunto. Los muros son los elementos de mayor importancia en este tipo de estructura, ya que están en mayor proporción y asumen todas las cargas del edificio.

El hormigón que se utiliza es producido en una planta tipo “batching plant”, dotada con dosificadores gravimétricos, con un alto nivel de automatización, que puede considerarse a

un buen nivel técnico en referencia a la práctica internacional. El hormigón es pre-mezclado, y transportado a obra en camiones-trompo, hasta que es colocado finalmente.

Para la conformación de los muros se utilizan moldes metálicos que son retirados 24 horas después de haber colocado el hormigón, con un deficiente curado, necesario para garantizar la correcta hidratación del cemento en las primeras edades.

1.3.2 Características del fenómeno de la fisuración que afecta los bungalows de cayo Santa María

Diagnósticos realizados descartan la posibilidad de que (de manera general) las fisuras hayan sido causadas por factores de tipo estructural, o tensiones producidas que no hayan sido tenidas en cuenta en el proceso de diseño de la estructura y en la concepción de su tecnología constructiva.

El fenómeno de la fisuración se produce de forma masiva en todas las edificaciones conocidas como bungalows. Los anchos de fisura superan en muchos casos los anchos máximos exigidos por las normas cubanas, lo que obliga a repararlas para poder garantizar la vida útil de estas obras. Esto puede representar una amenaza para la durabilidad de la estructura por la posibilidad de penetración de agentes externos agresivos.

En el proceso tecnológico se generan indisciplinas en la colocación de hormigón, especialmente la temprana retirada de los moldes metálicos, en momentos donde el fraguado y endurecimiento del hormigón está ocurriendo, y el material no es capaz de auto-sustentarse, entonces se pandea y produce ligeros esfuerzos de tracción que generan las grietas horizontales.

Las grietas verticales se producen de forma mayoritaria en las zonas debilitadas por las canalizaciones de electricidad y corrientes débiles, que son colocadas muy cerca de la superficie, y disminuyen la capacidad resistente del hormigón a edades tempranas (donde su resistencia es baja) ante tensiones de retracción química o autógena. En dependencia de la posición de las canalizaciones, estas grietas pueden ser pasantes o no. Esto puede verse agravado por el exceso de cemento en el hormigón utilizado, que produce un incremento de la retracción química y autógena.

1.3.2.1 Relación de la fisuración en los bungalows con la retracción por secado

En los muros también aparecen grietas verticales producto de la retracción que se genera en el proceso de secado del elemento. Esto ocurre cuando se crean diferencias de humedad relativa entre el interior del hormigón y el medio ambiente que lo rodea, provocado en el momento en que el edificio entra en explotación y son conectados los aires acondicionados. Se experimentan cambios de humedad relativa en diferentes zonas de los muros, provocando un encogimiento de estos y la consiguiente fisuración o agrandamiento de las grietas ya existente por causas anteriores.

Conclusiones parciales

- Siempre que el hormigón esté expuesto a condiciones de secado, se producirá el fenómeno de la retracción, independientemente del momento en que comience el secado.

- Solo podrá atenuarse la magnitud de la retracción, con un buen diseño del hormigón que se adapte a las condiciones a que será expuesto, utilizando el mayor tamaño máximo y volumen posible de áridos en la mezcla, un contenido mínimo de cemento y agua y de vital importancia una correcta compactación y un prolongado curado.

- La retracción del hormigón se divide en cuatro tipos fundamentales, retracción química, autógena, plástica y de secado.

Capítulo II: Evaluación experimental de la retracción del hormigón provocada por gradientes de humedad relativa.

2.1 Introducción

Se expone en este capítulo, el diseño experimental para la evaluación de la retracción de hormigones fabricados en la ECOT “Cayo Santa María” con destino a los muros de las estructuras tipo Bungalows de las instalaciones hoteleras de la cayería norte de Villa Clara.

Para lograr mayor nivel de detalle, se decide evaluar los cambios volumétricos, además de en hormigones, también en morteros que se vinculen con ellos según su dosificación, para verificar la influencia de los áridos en la retracción del hormigón. Los experimentos se concentran en chequear la retracción por secado, fenómeno a que está sujeto el hormigón, que conlleva a su fisuración. Este tipo de encogimiento es evaluado tanto para hormigones como para morteros. Los hormigones se tomaron directamente de la planta de forma aleatoria durante el proceso de control de la calidad; por lo que existen mayor cantidad de muestras de una variable que de otra.

Además de evaluar la influencia de los componentes del hormigón en la retracción, se elaboran muestras con un aditivo químico reductor de la retracción (Shrinko-tec nano 4) para utilizarlo como comparación con las muestras que representen también una medida de mitigación al fenómeno de la retracción (Adiciones Zeolíticas).

También se verifican las deformaciones de una muestra de hormigón que emplea como aditivo superplastificante los Micro-organismos Eficientes Finlay (MEF-32),

ante variaciones de la humedad relativa, y se evalúa su efecto en la retracción del hormigón.

Todas las muestras evaluadas se someten a diferentes regímenes de humedad relativa para evaluar la retracción con la variación de esta. Se someten a HR=100% durante los primeros 28 días, sumergidas en un tanque de curado; luego se colocan dentro de una estufa con una humedad relativa controlada del 70% hasta peso constante y después se someten a una HR=45% en una habitación con aire acondicionado.

2.2 Diseño del plan experimental

El plan experimental consta de varias etapas; donde se hace un análisis factorial de los cambios de volumen que se generan en hormigones y morteros; se comparan los resultados entre ellos y se evalúan de forma particular, la influencia de la variación de la humedad relativa en la retracción de las muestras y la utilización de aditivo químico como factor reductor de la retracción.

Se evalúan muestras de morteros con dosificaciones similares a los hormigones tomados directamente de planta, solo con la ausencia del árido grueso, para precisamente verificar el efecto de este como moderador de la retracción del material.

Además son evaluadas varias muestras que implican medidas de mitigación de la retracción, utilizando como aditivos reductores del encogimiento del material el MEF-32 y el Shrinko-tec nano 4. Como este último no ha sido utilizado en la ECOT “Cayo Santa María”, es evaluado en dosificaciones en conjunto con los superplastificantes normalmente usados, para verificar su compatibilidad con estos.

2.2.1 Evaluación de hormigones tomados en planta

Son evaluadas 10 muestras de hormigón mediante un análisis multifactorial donde intervienen 4 factores que según la literatura son los más influyen en el desarrollo de la retracción por secado. Este tipo de experimentos permiten el estudio del efecto de cada factor sobre la variable respuesta (retracción por secado), así como el efecto

de las interacciones entre factores sobre dicha variable. Los factores influyentes en el desarrollo de la retracción a estudiar se muestran en el siguiente esquema:

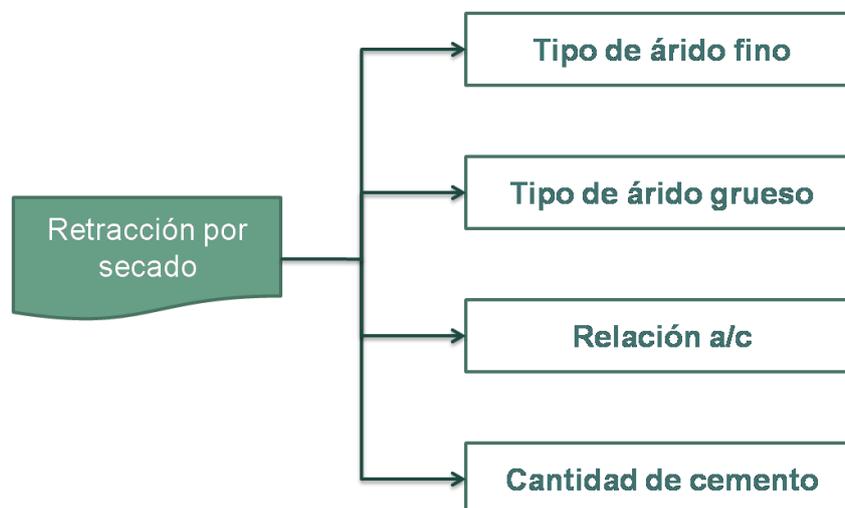


Fig. 2.1 “Factores evaluados en la retracción por secado”

Dosificación

Las mezclas de hormigón están compuestas por áridos de diferente procedencia y composición, mientras que el cemento utilizado en su confección es mayoritariamente elaborado en la fábrica “Karl Marx” de la provincia de Cienfuegos. Las muestras estudiadas se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 2.1 “Dosificación de mezclas de hormigón tomadas de planta”

Muestra			Cemento P-350		Zeolita	Agua	Arena		Gravilla		Aditivo		Ase	a/c
No.	ID.Labor	ID. Planta	Origen	(Kg)	(Kg)	Cant (Lt)	Origen	(Kg)	Origen	(Kg)	Tipo	(Lt)	nt	
MH1	Patrón	648	Cienfuegos	390	0	190	Purio	902	Purio	857	N 100 rc	3,9	21	0,49
MH2	CPP+Z	650	Cienfuegos	351	27	190	Purio	902	Purio	857	N 100 rc	3,9	21	0,50
MH3	CAY´	493	Cienfuegos	410	0	195	Arimao	680	El Yigre	1005	N 100 rc	3,9	21	0,48
MH4	CAY	519	Cienfuegos	410	0	195	Arimao	680	El Yigre	1005	N 100 rc	4	21	0,48
MH5	NAY	526	Nuevitas	410	0	200	Arimao	680	El Yigre	1005	N 100 rc	4	22	0,49
MH6	MAAm	531	Mariel	410	0	200	Arimao	733	Armando Mestre	981	N 100 rc	4	18	0,49
MH7	CAAm	539	Cienfuegos	369	29	200	Arimao	680	Armando Mestre	1005	N 100 rc	3,8	21	0,50
MH8	CAAg	558	Cienfuegos	410	0	190	Arimao	680	Algaba	1005	N 100 rc	4	23	0,46
MH9	CAGsAm	562	Cienfuegos	400	0	180	Algaba. 20% Sil	766	Armando Mestre	982	N 100 rc	3,9	20	0,45
MH10	CPHP	634	Cienfuegos	390	0	200	70% Purio 30% Hoyo	796	Purio	897	N 100 rc	3,9	21	0,51

2.2.1.1 Distribución de las muestras según variable de análisis

Tipo de árido fino

El árido fino utilizado es proveniente de tres canteras diferentes. El esquema siguiente distribuye las muestras evaluadas según la procedencia de este factor.

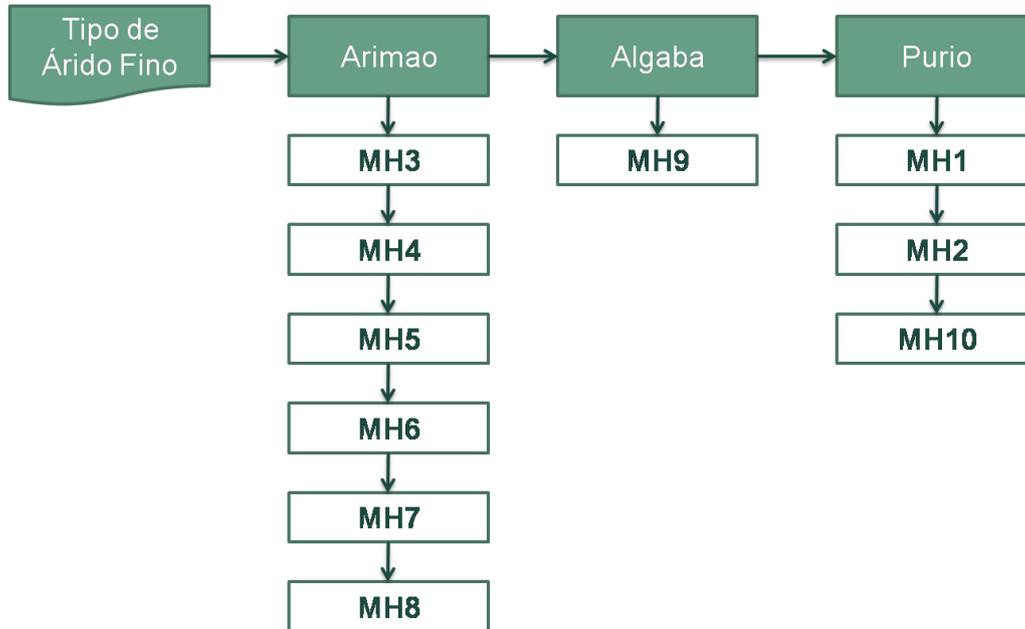


Fig. 2.2 “Distribución de muestras de hormigón según árido fino”

Tipo de árido grueso

Las muestras en análisis presentan cuatro tipos de árido grueso. Se presenta en el esquema siguiente la distribución de este factor según su procedencia.

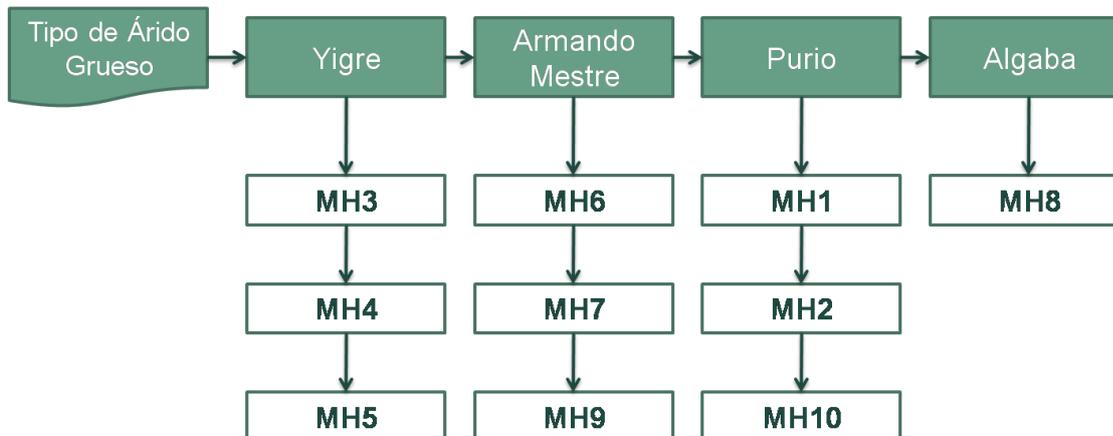


Fig. 2.3 “Distribución de muestras de hormigón según árido grueso”

Relación a/c

Se hace una evaluación de tres tipos de relación a/c. Se muestra a continuación la distribución de las muestras evaluadas según cada valor de este factor.

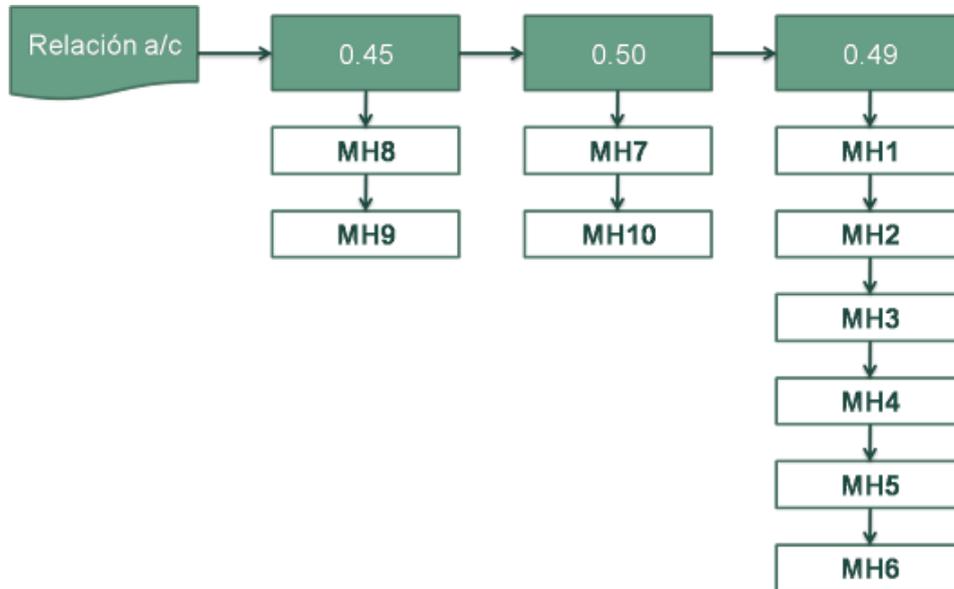


Fig. 2.4 “Distribución de muestras de hormigón según relación agua/cemento”

Cantidad de cemento

En la fabricación de los hormigones en estudio se utilizan cuatro cantidades distintas de cemento para 1m³. El esquema siguiente distribuye las muestras tomadas según los niveles de este factor.

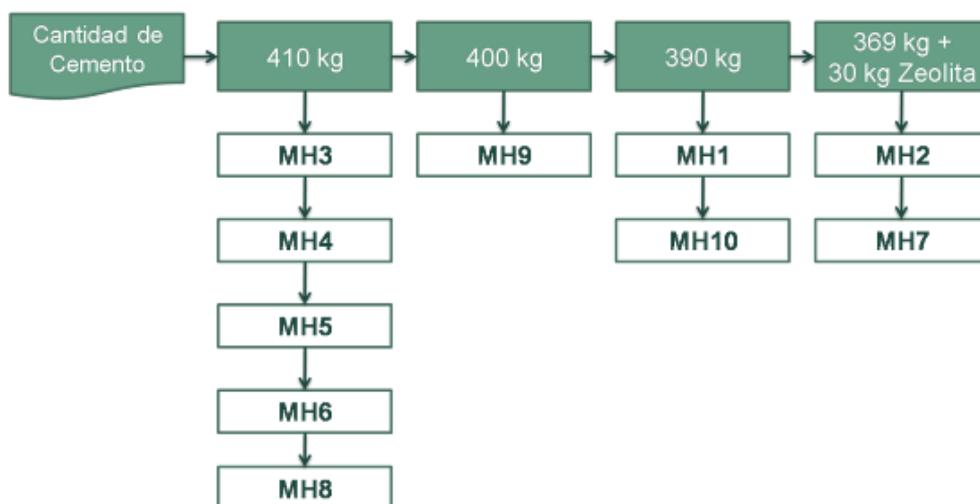


Fig. 2.5 “Distribución de muestras de hormigón según cantidad de cemento”

2.2.2 Evaluación de las muestras de morteros

Son evaluadas 11 muestras de mortero mediante el análisis multifactorial donde intervienen 3 factores que influyen en el desarrollo de la retracción por secado. Se estudia el efecto de cada factor sobre la variable respuesta (retracción por secado). Se prepara una mezcla patrón con características similares al patrón de los hormigones que junto a otras dos elaboradas con aditivo reductor de la retracción (Shrinko-Tecnano 4), representan una referencia de comparación para las demás, que fueron fabricadas variando el contenido de cemento, la adición zeolita y la relación agua/cemento. El diseño experimental de estos morteros se muestra en el siguiente esquema:

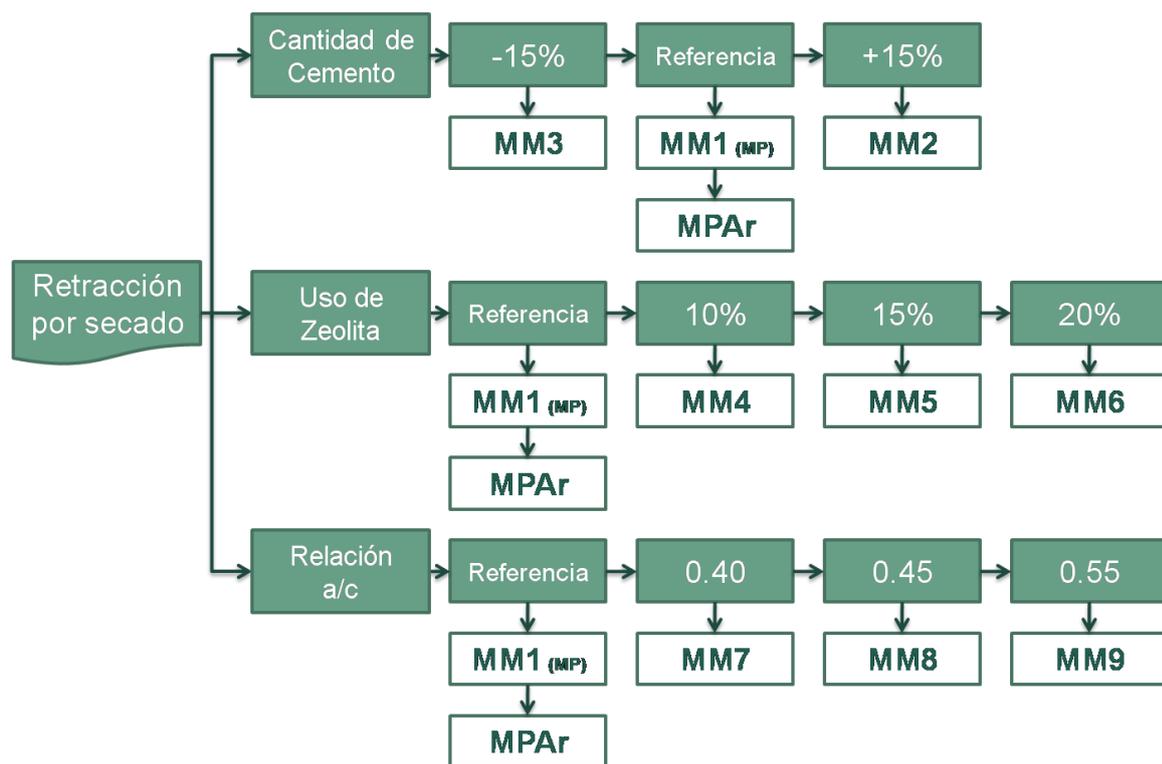


Fig. 2.6 “Diseño experimental de morteros con diferentes dosificaciones”

Dosificaciones

Tabla 2.2 “Dosificación de mezclas de morteros para 1m³”.

Muestra		Cemento P-350 Cienfuegos	Zeolita (Kg)	Agua	Arena-Purio	Aditivo		a/c
ID	ID.Labor	Cant (Kg)		(Lt)	(Kg)	Tipo	Cant (Lt)	
MM1	MP	390	0	190	902	-	-	0,49
MM2	MC+15	448,5	0	220	680	-	-	0,49
MM3	MC-15	331,5	0	163	680	-	-	0,49
MM4	MZ 10	351	22,9	172	733	-	-	0,46
MM5	MZ 15	331,5	34,38	163	680	-	-	0,45
MM6	MZ 20	312	45,84	153	680	-	-	0,43
MM7	MP 0.40	390	0	156	766	-	-	0,40
MM8	MP 0.45	390	0	175,5	766	-	-	0,45
MM9	MP 0.55	390	0	214,5	796	-	-	0,55
MM10	MP Ar Mn	390	0	167,7	1005,52	Shrinko- tec nano 4	1,95	0,43
MM11	MP Ar Mx	390	0	167,7	1005,52	Shrinko- tec nano 4	5,85	0,43

2.2.3 Evaluación de las propuestas de mitigación de la retracción del hormigón

Como medida de mitigación de la retracción del hormigón se propone además de la adición de puzolanas (tobas zeolíticas), la utilización de aditivos químicos que garanticen que el material reduzca su deformación al someterse a procesos de secado. Para ello se elaboran 6 muestras de hormigón con aditivo Shriko-tec nano 4, donde se utiliza en su mínima y máxima dosificación (0.5% – 1.5% en peso con relación al peso del cemento). Además se muestrea junto a los aditivos utilizados comúnmente en la planta de la ECOT “Cayo Santa María” (N100 rc y Dynamón Sx 32), para comprobar su compatibilidad con estos superfluidificantes. También se evalúa una muestra de hormigón que utiliza los Micro-organismos Eficientes Finlay

(MEF-32) como aditivo fluidificante para comprobar su efecto reductor de la retracción. Estas 7 muestras son sometidas a comparación con un patrón que no contiene aditivos en su composición.

Dosificación

Tabla 2.3 “Dosificación de mezclas de hormigones con aditivos reductores de la retracción”

Muestra		Cemento P-350		Agua	Arena-Purio	Gravilla-Purio	Aditivo			a/c
No.	ID.Labor	Origen	(Kg)	(L)	(Kg)	Cant (Kg)	Shrinkotec nano 4 (L)	N100R C (L)	Dynamón Sx32 (L)	
MH11	PS	Siguaney	390	167,7	966,8	874	-	-	-	0,43
MH12	PArMn	Siguaney	390	167,7	966,8	874	1,95	-	-	0,43
MH13	PArMx	Siguaney	390	167,7	966,8	874	5,85	-	-	0,43
MH14	PN100ArMn	Siguaney	390	167,7	966,8	874	1,95	3,9	-	0,43
MH15	PN100ArMx	Siguaney	390	167,7	966,8	874	5,85	3,9	-	0,43
MH16	PSx32ArMn	Siguaney	390	167,7	966,8	874	1,95	-	3,12	0,43
MH17	PSx32ArMx	Siguaney	390	167,7	966,8	874	5,85	-	3,12	0,43

2.2.4 Evaluación entre morteros y hormigones

Con una evaluación entre los dos grupos (Morteros y hormigones), puede entenderse el efecto reductor de la retracción que tienen los áridos gruesos. Estos funcionan como restricción al movimiento que se genera en la pasta del hormigón, evitando que alcancen valores de encogimiento, que puedan conllevar a la fisuración del material.

El esquema siguiente representa las muestras de ambos grupos que son compatibles para un análisis de la retracción entre ellas.

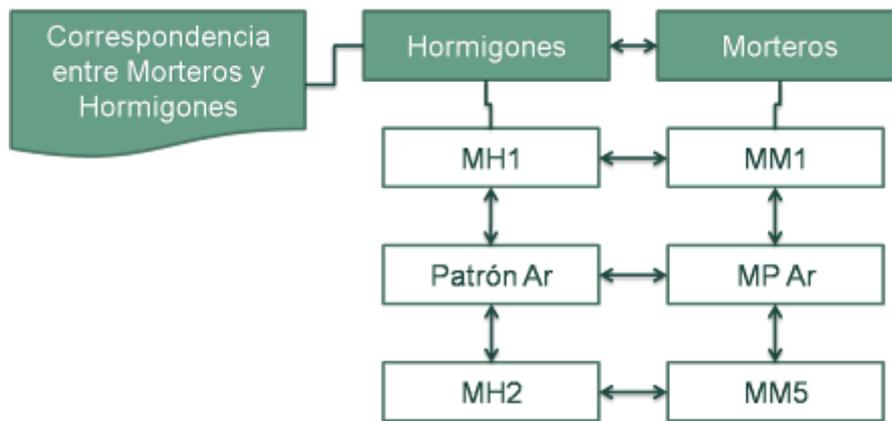


Fig. 2.7 “Correspondencia entre muestras de morteros y hormigones”

2.2.5 Análisis de la variación de la humedad relativa

El proceso de secado de los hormigones, no es más que la pérdida de peso y su correspondiente cambio de volumen al ser sometidos a una disminución de la humedad relativa. La presente investigación evalúa la influencia de la humedad relativa en la retracción del hormigón.

El esquema siguiente, muestra los valores de humedad relativa a que son sometidas todas las muestras de hormigones y morteros.

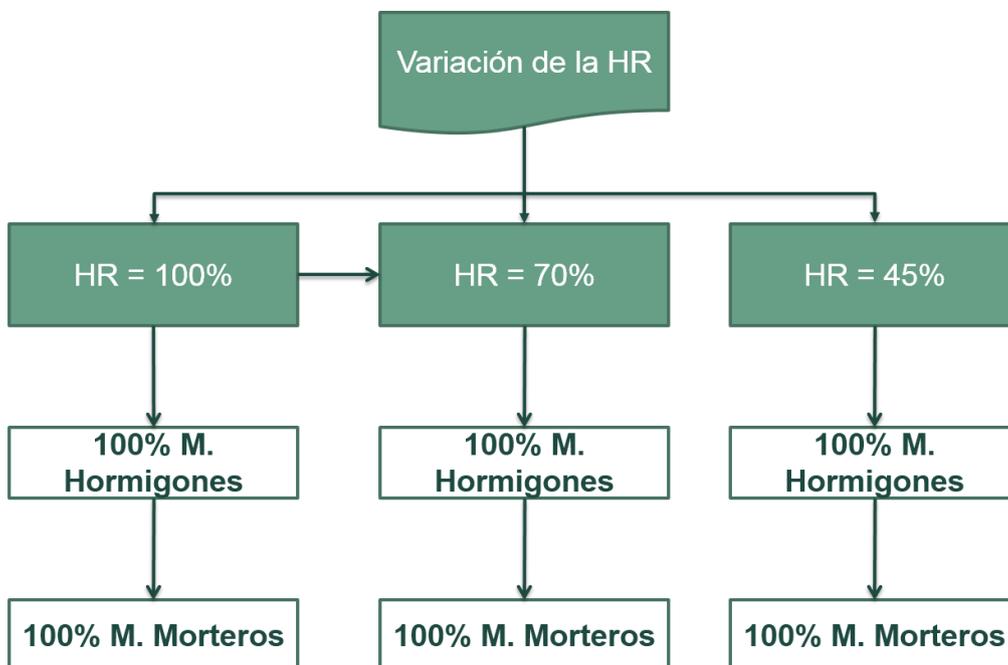


Fig. 2.8 “Variación de la humedad relativa”

2.3 Características de los materiales constituyentes de los hormigones, y morteros evaluados

Los hormigones, como refiere el capítulo anterior, se componen de cemento, agua, árido grueso, árido fino y muy comúnmente en la actualidad de aditivos y adiciones. En las muestras evaluadas en esta investigación se utilizan cementos fabricados en lugares diferentes del país, áridos de varias canteras, adición de material puzolánico y aditivos superfluidificantes y reductores de la retracción. A continuación se hace referencia a las principales características de estos materiales.

2.3.1 Árido Grueso

Los áridos gruesos utilizados para la conformación de las muestras evaluadas provienen de cuatro canteras, cuyas propiedades se presentan a continuación.

Gravilla de la cantera “El Yigre”

La cantera está ubicada cercana a la carretera a Meneses, Yigre, Yaguajay. Provincia Sancti Spiritus. (A 3,5 Km al Sur de Yaguajay, a 400 m al Este de la carretera asfaltada Meneses- Yaguajay).

Litología: Calizas duras color blanco a crema con venillas de calcitas secundarias pelitomórfica. Existen gran cantidad de intercalaciones de calizas porosas y blandas.



Fig. 2.9 “Gravilla de la cantera El Yigre”

Tabla 2.4 “Propiedades del árido grueso de la cantera “El Yigre””

Gravilla-Yigre		Análisis Granulométrico				
Ensayos	Valores	Tamiz (mm)		% Pasa	Norma	Conf.
Peso específico corriente (g/cm ³)	2,52	1	25,4	100	100	C
Peso específico saturado (g/cm ³)	2,58	¾	19,1	98	90-100	C
Peso específico aparente (g/cm ³)	2,67	½	12,7	98		
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1282	⅜	9,52	42	20-55	C
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1486	N-4	4,76	24	0-15	NC
Absorción (%)	2,55	N-8	2,38	16	0-5	NC
Partículas planas y alargadas (%)	3,16	N-16	1,19	0		
Terrones de arcilla (%)	0	N-200	0,074	0		
% de huecos (%)	38,84	Fondo		0		
Tamaño máximo del árido (mm)	19,5					

Gravilla de la cantera “Armando Mestre”

Tabla 2.5 “Propiedades del árido grueso de la cantera “Armando Mestre”

Gravilla-Armando Mestre		Análisis Granulométrico				
Ensayos	Valores	Tamiz (mm)		% Pasa	Norma	Conf.
Peso específico corriente (g/cm ³)	2,58	1	25,4	100	100	C
Peso específico saturado (g/cm ³)	2,61	¾	19,1	98	90-100	C
Peso específico aparente (g/cm ³)	2,65	½	12,7	57	20-55	NC
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1385	⅜	9,52	25	0-15	C
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1543	N-4	4,76	4	0-5	C
Absorción (%)	1,05	N-8	2,38	2		
Partículas planas y alargadas (%)	0,2	N-16	1,19	1		
Terrones de arcilla (%)	0	N-200	0,074			
% de huecos (%)	40,2	Fondo				
Tamaño máximo del árido (mm)	19,1					

Gravilla de la cantera Mariano Pérez “El Purio”

La cantera está ubicada en la finca La Caridad, Encrucijada. Provincia Villa Clara. (Al sur del CAI. Perucho Figueredo, a 30 km al norte de Santa Clara).

Formación Geológica: Purio.

Litología: Calizas puras organógenas, duras, compactas, blancas a crema, masivas o levemente brechosas. Hay tres tipos de Calizas: Afaníticas, de grano fino y caliza fragmentaria de grano grueso.



Fig. 2.10 “Gravilla de la cantera El Purio”

Tabla 2.6 “Propiedades del árido grueso de la cantera “El Purio”

Gravilla-El Purio		Análisis Granulométrico				
Ensayos	Valores	Tamiz (mm)	% Pasa	Norma	Conf.	
Peso específico corriente (g/cm ³)	2,53	1	25,4	100	100	C
Peso específico saturado (g/cm ³)	2,58	¾	19,1	98	90-100	C
Peso específico aparente (g/cm ³)	2,66	½	12,7	57	20-55	NC
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1404	¾	9,52	25	0-15	NC
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1508	N-4	4,76	4	0-5	C
Absorción (%)	2	N-8	2,38	2		
Partículas planas y alargadas (%)	6,1	N-16	1,19	1		
Terrones de arcilla (%)	0,1	N-200	0,074	0		
% de huecos (%)	39,2	Fondo		0		
Tamaño máximo del árido (mm)	19,1					

Gravilla de la cantera “Algaba”

La cantera está ubicada en la provincia Sancti Spiritus. (Márgen derecha del río Agabama, cerca del pueblo El Condado en un extenso meandro).

Formación Geológica: Aluvio

Litología: Arenas polimicticas de dioritas cuarcíferas, granodioritas y esquistos micaceos de granulometría variable y mucha grava, otra facie de limo arenoso.

Tabla 2.7 “Propiedades del árido grueso de la cantera “Algaba”

Gravilla-Algaba		Análisis Granulométrico				
Ensayos	Valores	Tamiz (mm)	% Pasa	Norma	Conf.	
Peso específico corriente (g/cm ³)	2,58	1	25.4	100	100	C
Peso específico saturado (g/cm ³)	2,64	¾	19.1	91	90-100	C
Peso específico aparente (g/cm ³)	2,73	½	12.7	34	20-55	C
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1493	¾	9.52	11	0-15	C
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1727	N-4	4.76	6	0-5	NC
Absorción (%)	2.81	N-8	2.38	6		
Partículas planas y alargadas (%)	0.6	N-16	1.19	0		
Terrones de arcilla (%)	0,13	N-200	0.074	0		
% de huecos (%)	34,3	Fondo		0		
Tamaño máximo del árido (mm)	19.1					

2.3.2 Árido fino

Arena de la cantera “Arimao”, provincia de Cienfuegos.

Formación Geológica: Aluvio. La litología: Arenas polimícticas. Arenas aluviales, Sedimentos areno- arcillosos con gravas.



Fig. 2.11 “Arena de la cantera Arimao”

Tabla 2.8 “Propiedades del árido fino de la cantera “Arimao”

Arena-Arimao		Análisis Granulométrico				
Ensayos	Valores	Tamiz (mm)	% Pasa	Norma	Conf.	
Peso específico corriente (g/cm ³)	2,66	¾	9,52	100	100	C
Peso específico saturado (g/cm ³)	2,68	N-4	4,76	98	90-100	C
Peso específico aparente (g/cm ³)	2,69	N-8	2,38	84	70-100	C
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1530	N-16	1,19	62	45-80	C
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1639,8	N-30	0,59	36	25-60	C
Absorción (%)	0,3	N-50	0,297	15	10 – 30	C
Mat. Más fino que tamiz 200 (%)	0	N-100	0,149	5	2 –10	C
Terrones de arcilla (%)	0	N-200	0,074	0		
% de huecos (%)	37,1	Fondo		0		
Tamaño máximo del árido (mm)	9,52	M. Finura		3	2.2 - 3.58	C

Arena de la cantera “Algaba”

Tabla 2.9 “Propiedades del árido fino de la cantera “Algaba”

Arena-Algaba		Análisis Granulométrico				
Ensayos	Valores	Tamiz (mm)	% Pasa	Norma	Conf.	
Peso específico corriente (g/cm ³)	2,58	¾	9,52	100	100	C
Peso específico saturado (g/cm ³)	2,64	N-4	4,76	97	90-100	C
Peso específico aparente (g/cm ³)	2,73	N-8	2,38	84	70-100	C
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1493	N-16	1,19	64	45-80	C
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1727	N-30	0,59	31	25-60	C
Absorción (%)	2,1	N-50	0,297	9	10 – 30	NC
Mat. Más fino que tamiz 200 (%)	0	N-100	0,149	2	2 –10	C
Terrones de arcilla (%)	0,13	N-200	0,074	0		
% de huecos (%)	34,3	Fondo		0		
Tamaño máximo del árido (mm)	9,52	M. Finura		3,1	2.2 - 3.58	C

Arena de la cantera Mariano Pérez “El Purio”



Fig. 2.12 “Arena de la cantera El Purio”

Tabla 2.10 “Propiedades del árido fino de la cantera “Mariano Pérez “El Purio”

Arena-Purio		Análisis Granulométrico				
Ensayos	Valores	Tamiz (mm)	% Pasa	Norma	Conf.	
Peso específico corriente (g/cm ³)	2,63	¾	9,52	100	100	C
Peso específico saturado (g/cm ³)	2,64	N-4	4,76	99	90-100	C
Peso específico aparente (g/cm ³)	2,72	N-8	2,38	79	70-100	C
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1536	N-16	1,19	51	45-80	C
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1698	N-30	0,59	30	25-60	C
Absorción (%)	1,24	N-50	0,297	13	10 – 30	C
Mat. Más fino que tamiz 200 (%)	0	N-100	0,149	5	2 –10	C
Terrones de arcilla (%)	0,15	N-200	0,074	0		
% de huecos (%)	36,3	Fondo		0		
Tamaño máximo del árido (mm)	9,52	M. Finura		3,2	2.2 - 3.58	C

2.3.3 Cemento

Las muestras son elaboradas mayoritariamente con cemento P 350 de la fábrica “Karl Marx” de Cienfuegos, aunque también son utilizados otros provenientes de Nuevitas, Mariel y Siguaney.

Cemento de la fábrica “Karl Marx” de Cienfuegos

Tabla 2.11 “Propiedades físico-mecánicas del cemento P 350 de Cienfuegos”

Cemento Cienfuegos			
Ensayo	Resultado	Especificación	Conf.
Tiempo de fraguado inicial (min)	150	≥ 45	C
Tiempo de fraguado final (h)	4:20	≤ 10	C
Consistencia Normal (%)	24,6	-	-
Finura de Molido (%)	6,5	-	-
P.U. Suelto (kg/m ³)	-	-	-
P.E. Real del cemento (g/cm ³)	3,08	-	-
Resistencia Comp. 7 días (MPa)	35,5	≥ 25	C
Resistencia Flexo-Tracc. 7 días (MPa)	8,6	-	-
Resistencia Comp. 28 días (MPa)	42,4	≥ 35	C
Resistencia Flexo-Tracc. 28 días (MPa)	9,5	-	-



Fig. 2.13 “Cemento P350 de la fábrica Karl Marx de Cienfuegos”

2.3.4 Aditivos

En la conformación de las muestras se utilizaron cuatro tipos de aditivos, 3 con propiedades plastificantes y uno con propiedades reductoras de la retracción.

Aditivo N100 RC

EL N100 RC es un superfluidificante de alta concentración, reductor de agua y retardador formulado para climas calientes.



Fig. 2.14 “Aditivo N100 RC”

Características principales:

Aditivo líquido con una notable propiedad superfluidificante y retardante. Aumenta la laborabilidad del hormigón, logra reducir la relación agua-cemento, proporcionándole una adecuada permeabilidad y una alta resistencia mecánica.

Propiedades:

Fuerte reducción de la relación agua-cemento sin alterar la laborabilidad. Reducción del fenómeno de sangrado “bleeding” en mezclas de elevados asentamientos. Incremento de la resistencia mecánica a la compresión.

Datos técnicos:

Peso específico: 1.165 ± 0.02 kg /lt a 20°C

Producto activo: 39%

Acción principal: reducción de agua y/o aumento de la laborabilidad

Acción colateral: retraso de la hidratación inicial, conservación de la laborabilidad

Clasificación: tipo G según ASTM C494

Aditivo Dynamón Sx 32

El producto es un aditivo líquido superplastificante, de color ámbar, especialmente diseñados para hormigones que requieran aumentar o mantener la laborabilidad y/o reducir la cantidad de agua de amasado.



Fig. 2.15 “Aditivo Dynamón Sx 32”

Tabla 2.12 “Propiedades del aditivo Dynamón Sx 32”

Dynamón Sx 32	
Desidad (g/cm ³)	1,08 ± 0,02 a 20°C
Clasificación	Reductor de agua de alta eficacia/superfluidificante
Cloruros solubles en agua (%)	< 0,1
Contenido de alcali Na ₂ OH (%)	< 3,5
PH	6,5 ± 1

Aditivo Micro-organismos Eficientes Finlay (MEF-32)

El Bioproducto MEF-32 (Microorganismos eficientes Finlay) fue obtenido en el Instituto Carlos J. Finlay, La Habana, Cuba, basado en la tecnología de microorganismos eficientes. Su elaboración tiene como base el producto obtenido por fermentación sólida en la Estación Experimental de Pastos y Forrajes “Indio Hatuey” en la provincia de Matanzas, el cual es sometido a dos fermentaciones posteriores. Es un líquido de color pardo con un olor parecido al vino, posee un porcentaje de sólidos solubles de aproximadamente 2,8% y un pH que oscila entre 3 y 4.

Aditivo Shrinko-tec nano 4

SHRINKO-tec nano 4 es un producto de RESIGUM, formulado para actuar sobre los mecanismos generadores de la retracción de los hormigones. No contiene expansivos, no contiene cloruros, actúa con funcionalidad químico-física y mejora la calidad de los conglomerados. Es formulado para hormigones con relación a/c = 0.40.



Fig. 2.16 “Aditivo SHRINKO-tec nano 4”

La acción de SHRINKO-tec nano 4, se produce, al reducir la tensión superficial del agua que se ejerce en los poros capilares del hormigón, causa que provoca la retracción y posterior fisuración del material.

Es recomendado el uso de este producto de 0.5-1.5% en peso con relación al peso del cemento y se emplea como primera aditivación contemporáneamente al agua de la mezcla, y es factible que sea añadido con los áridos ya saturados.

2.3.5 Zeolita

Esta proviene del yacimiento de Tasajeras ubicado en San Juan de los Yeras en el municipio de Ranchuelo y se denomina ZEOMICRO.

Tabla 2.13 “Propiedades físicas de la zeolita”

Ensayos	Valores	Norma utilizada	Especificaciones
Peso específico corriente	1.81 g/cm ³	NC 187/02	>2.5
Peso específico saturado	2.02 g/cm ³	NC 187/02	-
Peso específico aparente	2.30 g/cm ³	NC 187/02	-
Peso unitario suelto	1076 kg/cm ³	NC 181/02	-
Peso unitario compactado	1249 kg/cm ³	NC 181/02	-
% de absorción	11.66	NC 186/02	< 3
% de tamiz 200	20.81	NC 182/02	< 5 para hormigones
% de terrones de arcilla	0.00	NC 179/02	< 1
% de huecos	31.03	NC 177/02	-
Módulo de finura	1.65		-

Tabla 2.14 “Granulometría de la zeolita”

Análisis granulométrico: Según NC			
Tamiz	%	% de	
9.52	100	100	100
4.75	100*	90	100
2.38	100*	70	100
1.19	100**	45	80
0.59	71**	25	60
0.297	42**	10	30
0.149	23**	2	10

(*) Conforme (**) No conforme



Fig. 2.17 “Zeolita”

2.3.6 Arena sílice

La arena sílice es utilizada en la dosificación de una de las muestras de hormigón tomadas directamente de planta; esta proviene de Trinidad, Sancti Spiritus.



Fig. 2.18 “Arena sílice”

Tabla 2.15 “Propiedades físicas de la arena sílice”

Ensayos	Valores	Norma utilizada	Especificaciones
Peso específico corriente	2.62 g/cm ³	NC 187/02	>2.5
Peso específico saturado	2.64 g/cm ³	NC 187/02	-
Peso específico aparente	2.67 g/cm ³	NC 187/02	-
Peso unitario suelto	1146 kg/cm ³	NC 181/02	-
Peso unitario compactado	1623 kg/cm ³	NC 181/02	-
% de absorción	0.62	NC 186/02	< 3
% de tamiz 200	1.61	NC 182/02	< 5 para hormigones
% de terrones de arcilla	0.00	NC 179/02	< 1
% de huecos	38.12	NC 177/02	-
Módulo de finura	1.23		-

Tabla 2.16 “Granulometría de la arena sílice”

Análisis granulométrico: Según NC 178/02			
Tamiz (mm)	% Pasado	% de Especificaciones	
9.52	100	100	100
4.75	100	90	100
2.38	100*	70	100
1.19	98**	45	80
0.59	94**	25	60
0.297	71**	10	30
0.149	13**	2	10

(*) Conforme (**) No conforme

2.4 Métodos

2.4.1 Ensayo de retracción

Este ensayo conocido como retracción por secado se especifica en la norma ASTM C-157 “Método estándar para el cálculo de cambio de longitud en morteros y hormigones”. Se requieren emplear 2 tipos de probetas prismáticas en dependencia del Tamaño Máximo del árido empleado en las mezclas de hormigón y una para muestras de mortero:

25 x 25 x 285 mm (Morteros)

100 x 100 x 285 mm para TM de hasta 50 mm (Hormigones)

75 x 75 x 285 mm para TM de hasta 25 mm (Hormigones)



Fig. 2.19 “Probetas de hormigón”



Fig. 2.20 “Probetas de mortero”

Como el tamaño máximo del árido grueso empleado para las mezclas de hormigón es de 19.1 mm se escoge la probeta de 75 x 75 x 285 mm para las muestras de esta investigación. Se utilizan 3 probetas por cada condición de ensayo de hormigones o morteros.

En la cara superior e inferior de las probetas se ubican puntos de medición fijos, los cuales constituyen referencias constantes e invariables para realizar las mediciones de cambio de longitud. A las $23 \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ horas de hormigonadas las probetas deben ser desencofradas y medidas por vez primera. A continuación son sumergidas en una tina de curado por 28 días, donde se controla diariamente su longitud.



Fig. 2.21 "Puntos fijos de medición"



Fig. 2.22 "Curado inicial"

Pasos para la medición:

- Seleccionar un "comparador" (Varilla metálica de longitud invariable)
- Medición de la longitud real del "comparador" (285 mm). Esta es tarada en el defórmetro utilizado (la longitud de deformación de referencia del comparador es 250 mm).



Fig. 2.23 "Tarado de la longitud del comparador"

- Medir cada muestra por sus cuatro caras.
- Registrar la diferencia de las lecturas entre las muestras y el "comparador" (Este paso lo realiza automáticamente el defórmetro, la lectura del paso anterior es esta diferencia).
- Calcular la deformación de las probetas mediante la fórmula:

$$\Delta L_x = \frac{CRD - \text{initial } CRD}{G} \times 100 \quad (1)$$

$$\Delta L_x = \frac{CRD - \text{initial } CRD}{G} \times 1000000 \quad (2)$$

Donde:

ΔL_x = Deformación experimentada por la muestra a cualquier edad, expresada en % según (1) o en mm/mm x 10^{-6} según (2).

GRD = Diferencia entre las lectura de una probeta y la del comparador de referencia a cualquier edad. (Esta diferencia es registrada automáticamente en el defómetro utilizado; es precisamente este, el valor de la lectura hecha diariamente a la probeta).

G = Longitud de deformación de referencia del comparador (250 mm)

- Se determina la deformación de una probeta, calculando la media entre las deformaciones en sus cuatro caras.
- Se determina la media de las deformaciones de las tres probetas para conocer la deformación de la muestra.
- Se grafica la deformación (ΔL) contra tiempo (días) para cada condición ensayada.
- Pesar cada muestra hasta obtener peso constante.

Las mediciones se realizan en un intervalo entre 8:00-9:30 a.m. para minimizar el efecto de las condiciones ambientales, de modo tal que no se produzcan afectaciones significativas de la estabilidad en las muestras. Las muestras no deben permanecer más de 35 minutos fuera de las condiciones de temperatura y humedad relativa a que son expuestas.

Las muestras, en este caso, no estarán sujetas a las condiciones normadas, sino que después de permanecer durante los 28 días en una tina de curado con humedad constante (100%), se someten a condiciones similares a las que experimentan los bungalows en cayo Santa María; exponiéndolas a dos regímenes diferentes de curado:

Régimen sol

Las muestras son colocadas en una estufa con temperatura y humedad relativa controlada, con la utilización de un termómetro y un hidrómetro. Es simulado dentro de la estufa la cara exterior de los muros, los cuales en las condiciones de Cayo Santa María pueden experimentar temperaturas superiores a los 45°C por la incidencia directa de los rayos solares y estar expuestos a una humedad relativa de aproximadamente el 70%.



Fig. 2.24 “Estufa de curado en el ciclo sol”



Fig. 2.25 “Termómetro para controlar la temperatura dentro de la estufa”

Las muestras estarán bajo este régimen hasta alcanzar peso constante, de ahí la importancia de la medición del peso de la probeta cada vez que se mida su variación de longitud. De igual manera en este ciclo las mediciones se hacen diariamente.

La medición de la retracción experimentada por las probetas se hace con la ayuda de un defórmetro de precisión 0.001mm.



Fig. 2.26 “Balanza y defórmetro utilizado en la medición del peso y la longitud”

Régimen Sombra

Se exponen las muestras a condiciones similares a la de una habitación cuando es encendido el aire acondicionado, donde se experimentan temperaturas de 22-25°C y humedad relativa de 45-50%. Para ello se trasladan las probetas a una habitación climatizada donde puedan controlarse constantemente los parámetros de humedad y temperatura. Se prosigue a la medición de la deformación, tal y como fue expuesto anteriormente hasta alcanzar peso constante.



Fig. 2.27 "Muestras colocadas en habitación climatizada"

En una gráfica de deformación (ΔL) contra tiempo (días), de ambos regímenes, puede apreciarse la retracción que se genera en el hormigón, producto del secado por la variación de la humedad relativa al encenderse los aires acondicionados dentro de las habitaciones cuando el bungalow entra en explotación.

2.4.2 Resistencia a flexión y compresión de morteros

La resistencia a flexión y compresión se determina mediante la NC 173:2002 "Mortero endurecido. Determinación de la resistencia a flexión y compresión". Se realiza sobre probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm. La resistencia a flexión viene dada por la carga necesaria para romper cada probeta en dos mitades, la resistencia a compresión se determina a continuación sobre cada una de las mitades mediante la aplicación, hasta la rotura de una carga uniformemente repartida.

Los moldes utilizados son de acero, con tres compartimentos separados por paredes de 10 mm de espesor como mínimo, suficientemente rígidos para que no

sufran deformaciones. Las dimensiones de cada compartimento serán de $(40 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}) \times (40 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}) \times (160 \text{ mm} \pm 0,4 \text{ mm})$ formando ángulos rectos (90°) entre todos los lados.

Las muestras se compactan en los moldes utilizando una barra de sección circular de un material no absorbente y generalmente metálica con un diámetro en la cara de compactación de $(25 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm})$ y un peso aproximado de 340g.



Fig. 2.28 “Moldes para ensayo de flexo-compresión en morteros”

Se emplea un molde de $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ para cada ensayo, lo que genera tres probetas para el ensayo de flexión y seis para el ensayo a compresión. El molde debe estar limpio y bien cerrado. Las paredes y su base deben engrasarse previamente antes de ser utilizados.

Se vierte una porción representativa de la muestra de aproximadamente 300 g de mortero en cada compartimento del molde, para formar una primera capa que se compactará en toda su superficie con 25 golpes suaves y homogéneos. Se vierte el resto del material y se repite la operación de apisonado, de modo que no afecte la masa del mortero colocado inicialmente y ya apisonado. Se eliminan los espacios vacíos que hayan podido quedar en la superficie de los tres compartimentos. Cuando el mortero comience a endurecer, se engrasa el molde con una superficie metálica.

Las probetas se mantienen en el los moldes durante 24h en un ambiente húmedo a temperatura de $(27^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C})$ y más de 90% de humedad relativa (no sumergidas en agua) o cubiertas con una bolsa de plástico. A continuación se desmoldan, se marcan y se mantienen en el ambiente húmedo hasta la edad de ensayo.

Las probetas antes del ensayo deben ser pesadas y medidas, no deben poseer aristas, grietas, fisuras, deformaciones, ni material adherido a sus caras, lo cual pudiera distorsionar los resultados al aplicar la carga de rotura.

Los resultados de flexión y compresión de cada probeta se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 2.17 “Resistencia a flexión y compresión de los morteros”

Resistencia a flexión y compresión de los morteros									
Muestra		Flexión 28 días			Compresión 28 días				
ID	ID.Labor	1	2	Media	1	2	3	4	Media
MM1	MP	10,3	11,2	10,8	45,5	41,8	45	51,1	45,9
MM2	MC+15	3,1	2,6	2,9	42	47,6	41,4	39,9	42,7
MM3	MC-15	10,8	10,8	10,8	40,5	47	39,6	49,1	44,1
MM4	MZ 10	11,2	9,8	10,5	40,4	42,9	38,8	44	41,5
MM5	MZ 15	9,4	10,3	10	34,6	33,8	33,1	31,5	33,3
MM6	MZ 20	11,7	11,2	11,5	44,9	49	46,8	43,9	46,2
MM7	MP 0.40	12,6	10,9	11,8	45,8	57,1	49,1	48,4	50,1
MM8	MP 0.45	12,2	13,6	12,9	52,4	51,8	56,4	49,8	52,6
MM9	MP 0.55	11,2	10,9	11,1	40,8	39,4	38	43,3	40,4

2.4.3 Resistencia a compresión del hormigón

Se determina la resistencia a compresión de las muestras tomadas de planta; para ello se toman 6 probetas cilíndricas de 15 x 30 cm, tres para ensayarlas a los 7 días y tres a los 28 días. Este ensayo se hace según la NC 724:2009 “Ensayos del hormigón. Resistencia del hormigón endurecido”.

Con 24 horas de hormigonadas las probetas son sacadas de sus moldes y sumergidas en un tanque de curado hasta el momento del ensayo.

El ensayo es realizado en una prensa “Test Mark” en el laboratorio del batching plant de la ECOT “Cayo Santa María”, donde las probetas son extraídas del tanque de curado y secadas superficialmente antes de colocarse en la prensa.

La superficie de la prensa de limpia de cualquier material extraño y se coloca la probeta centrada y sus extremos se utilizan almohadillas de neopreno como separadores, que garantizan la uniformidad en la aplicación de la carga.

La carga se aplicará sin saltos bruscos y se incrementa continuamente a una velocidad

constante hasta que no pueda ser sostenida una carga mayor. Se selecciona una velocidad de aplicación de los esfuerzos no menor de 0,15 MPa/s y no mayor que 1,0 MPa/s.

El cálculo de la resistencia a compresión viene dado por la fórmula siguiente:

$$f_c = F/A_c$$

Donde:

f_c = Resistencia a compresión expresada en (MPa)

F = Carga Máxima, expresada en (N);

A_c = Área de la sección transversal de la probeta sobre la cual actúa la fuerza a compresión, expresada en (mm²).

El ensayo arroja los siguientes resultados individuales por probeta analizada.

Tabla 2.18 “Resistencia a compresión de los hormigones tomados de planta”

Rsistencia a compresión (MPa)								
Muestra			7 Dís			28 Dís		
No.	ID.Labor	ID. Planta	1	2	3	1	2	3
MH1	Patrón	648	33,7	34,1	34,3	43,2	43,6	43,7
MH2	CPP+Z	650	30,3	31,6	30,7	40,2	41,1	40,5
MH3	CAY´	493	35,6	34,5	35,2	42,2	41,7	42,8
MH4	CAY	519	36,2	37,3	36,5	46	44,8	45,4
MH5	NAY	526	23,5	24,7	24,5	33,5	33,7	34,3
MH6	MAAm	531	29	28,8	28,6	35,5	36	35,8
MH7	CAAm	539	24,8	26,1	25,1	34,9	35,2	36
MH8	CAAg	558	33,5	34,3	34,2	42,6	42,3	43,4
MH9	CAgsAm	562	31,6	32,4	32,2	41,6	42,2	41,7

2.5 Fabricación de las muestras

Las muestras se fabrican en tres etapas diferentes, una por cada grupo de evaluación (Hormigones tomados de planta, morteros y hormigones con aditivo reductor de la retracción). Las primeras muestras se tomaron directamente del camión hormigonera antes de salir hacia la obra, las segundas se fabricaron en el laboratorio de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de Villa Clara y las terceras se elaboraron en el laboratorio del Batching Plant de la ECOT “Cayo Santa María”.

2.5.1 Preparación de los moldes

Como se indica en epígrafes anteriores las dimensiones empleadas son 75 x 75 x 285 mm (para hormigones), las cuales se corresponden al tamaño máximo del árido grueso 19,1mm y 25 x 25 x 285 mm (para morteros).

Se elaboran para ello moldes de madera con las dimensiones especificadas, dejando en los extremos del molde, orificios para la colocación de los insertos metálicos, que sirven de puntos de referencia fijos para la medición. Se tuvo especial cuidado en que los moldes fueran fáciles de desmontar después de endurecido el hormigón.



Fig. 2.29 “Moldes de madera”

2.5.2 Revestimiento de los moldes con líquido desencofrante

Se realiza para el correcto desencofrado, evitando partiduras o fisuras causantes de variaciones a las dimensiones de las muestras, el líquido utilizado es el mismo empleado en los muros de los bungalows de Cayo Santa María. Se revisten los moldes y el piso donde quedaran apoyadas las probetas.

2.5.3 Pesaje de los materiales

Las dosificaciones de los morteros y hormigones con aditivo reductor de la retracción fueron ajustadas para mezclar amasadas acordes al volumen real de los moldes a hormigonar.

Tabla 2.19 “Ajuste de la dosificación para una amasada de 5 litros”

Dosificación para 5 litros (0,005 m3)										
Muestra		Cemento P-350		Zeolita (Kg)	Agua (Lt)	Arena		Aditivo		a/c
ID	ID.Labor	Origen	(Kg)			Origen	(Kg)	Tipo	(g)	
MM1	MP	Cienfuegos	1,95	0	0,95	Purio	4,51	-	-	0,49
MM2	MC+15	Cienfuegos	2,243	0	1,1	Purio	3,4	-	-	0,49
MM3	MC-15	Cienfuegos	1,658	0	0,815	Purio	3,4	-	-	0,49
MM4	MZ 10	Cienfuegos	1,755	0,1145	0,86	Purio	3,665	-	-	0,46
MM5	MZ 15	Cienfuegos	1,658	0,1719	0,815	Purio	3,4	-	-	0,45
MM6	MZ 20	Cienfuegos	1,56	0,2292	0,765	Purio	3,4	-	-	0,43
MM7	MP 0.40	Cienfuegos	1,95	0	0,78	Purio	0	-	-	0,40
MM8	MP 0.45	Cienfuegos	1,95	0	0,8775	Purio	3,83	-	-	0,45
MM9	MP 0.55	Cienfuegos	1,95	0	1,0725	Purio	3,98	-	-	0,55
MM10	MP Ar Mn	Cienfuegos	1,95	0	0,8385	Purio	5,0276	Shrinko- tec nano 4	9,75	0,43
MM11	MP Ar Mx	Cienfuegos	1,95	0	0,8385	Purio	5,0276	Shrinko- tec nano 4	29,25	0,43

Tabla 2.20 “Ajuste de la dosificación para una amasada de 13 litros”

Muestra		Cemento P-350		Agua	Arena-Purio	Gravilla-Purio	Aditivo		
No.	ID.Labor	Origen	(Kg)	(L)	(Kg)	Cant (Kg)	Shrinkotec nano 4 (L)	N100RC (L)	Dynamón Sx32 (L)
MH11	PS	Siguaney	5,1	1,83	12,569	11,363	-	-	-
MH12	PArMn	Siguaney	5,1	1,83	12,569	11,363	0,025	-	-
MH13	PArMx	Siguaney	5,1	1,83	12,569	11,363	0,076	-	-
MH14	PN100ArMn	Siguaney	5,1	1,83	12,569	11,363	0,025	0,51	-
MH15	PN100ArMx	Siguaney	5,1	1,83	12,569	11,363	0,076	0,51	-
MH16	PSx32ArMn	Siguaney	5,1	1,83	12,569	11,363	0,025	-	0,045
MH17	PSx32ArMx	Siguaney	5,1	1,83	12,569	11,363	0,076	-	0,045

2.5.4 Mezclado

El mezclado es realizado en una hormigonera para el caso de los hormigones y en una mezcladora para los morteros.



Fig. 2.30 “Mezcladora de morteros”

2.5.5 Medición de consistencia.

Se realiza la medición de la consistencia de las muestras de hormigón a través del cono de Abrams. Para la realización de este ensayo se utiliza un molde de hojalata en forma de cono truncado y sin fondo, cuyas dimensiones son: 20 cm de diámetro en su base mayor, 30 cm de altura y 10 cm de diámetro en su base menor.

Para efectuar el ensayo, el cono se coloca apoyando su base mayor sobre una superficie lisa y no absorbente, llenándose el mismo en tres capas de volúmenes aproximadamente iguales, que se compactan mediante una varilla (16 mm de diámetro y 60 cm de longitud).

La compactación debe hacerse repartiéndose uniformemente 25 golpes de varilla en cada una de las tres capas. Luego de terminado el proceso de llenado se enrasa la superficie usando la misma varilla de compactación y se elimina todo el material que haya caído alrededor del cono. Seguidamente se levanta el molde verticalmente y con mucho cuidado, colocándose al lado de la masa de hormigón que ha sido desmoldada. La disminución de altura que sufre la masa de hormigón debido a su propio peso se denomina asentamiento, según la cual se evalúa la consistencia.

Tabla 2.21 “Clasificación de Asentamiento por el cono de Abrams”

Tipo	Valoración cualitativa	Asentamiento en mm
A1	Seca	10 a 40
A2	Plástica	50 a 90
A3	Blanda	100 a 150
A4	Fluida	160 a 210
A5	Muy fluida	≥ 220

Tabla 2.22 “Asentamiento de los hormigones tomados de planta”

Hormigones tomados de Planta				
Muestra			Asent (cm)	Clasificación
ID.	ID.Labor	ID. Planta		
MH1	Patrón	648	21	Fluida
MH2	CPP+Z	650	21	Fluida
MH3	CAY´	493	21	Fluida
MH4	CAY	519	21	Fluida
MH5	NAY	526	22	Muy Fluida
MH6	MAAm	531	18	Fluida
MH7	CAAm	539	21	Fluida
MH8	CAAg	558	23	Muy Fluida
MH9	CAGsAm	562	20	Fluida
MH10	C PHP	634	21	Fluida



Fig. 2.31 “Medición del asentamiento por el cono de Abrams”

2.5.6 Colocación

La colocación del hormigón y el mortero en los moldes se hace cuidadosamente sin golpear los insertos metálicos en ambos extremos. La compactación se hace en dos capas con 25 golpes de una varilla metálica con punta redondeada.

2.5.7 Desencofre

Pasadas 24 horas de hormigonadas, las probetas son desencofradas con cuidado y colocadas en una tina de curado.



Fig. 2.32 “Probetas de hormigón colocadas en tina de curado tras 24 horas de hormigonadas”

Conclusiones parciales

- Se logran determinar los valores de retracción en hormigones y morteros provocados por variaciones de la humedad relativa de 100-70% y de 70-45%; mediante el procedimiento que indica la ASTM c-157 “Método estándar de cambio de longitud para morteros y hormigones”.
- Se obtiene la deformación de morteros con similares dosificaciones que los hormigones colocados en los muros de los bungalows, y se comprueba el aporte del árido grueso a la restricción de los cambios volumétricos en el material.
- Se evaluó la deformación de 18 muestras de hormigón y 11 de morteros, que barren una amplia gama de dosificaciones, incluyendo muestras fabricadas con adiciones de zeolita y con la utilización de aditivos como Srinko-tec nano 4 (reductor de la retracción) y los Microorganismos eficientes Finlay “MEF-32”(posible reductor de la retracción).

Capítulo III: Análisis de resultados.

3.1 Introducción

Para la realización del análisis de los resultados se propone la realización de un análisis estadístico mediante el software Statgraphic Centurión XV, el mismo es un programa diseñado para la realización de análisis profundos de datos. Los procedimientos estadísticos que contiene este programa van desde resúmenes de estadísticos hasta diseño de experimentos.

El análisis de los resultados experimentales se realiza mediante diferentes procedimientos, entre los que se encuentran:

El procedimiento “**Prueba de Hipótesis para Comparación de Desviaciones Estándar**” está concebido para determinar si las diferencias aparentes son estadísticamente significativas. La comparación de las Desviaciones Estándar realiza una prueba F de Fisher para determinar si son significativamente diferentes al considerar el radio de varianza.

El procedimiento “**Prueba de Hipótesis para Comparación de Medias**” realiza una Prueba t de Student para determinar si, las medias de las dos muestras son significativamente diferentes al considerar la diferencia definida: $\Delta = \mu_1 - \mu_2$.

El procedimiento “**Análisis de una variable**” es uno de los principales procedimientos para analizar una sola columna de datos numéricos. Calcula estadísticas de resumen, lleva a cabo pruebas de hipótesis, y crea una variedad de gráficos. Los gráficos incluyen gráfico de dispersión e histograma de frecuencia.

El procedimiento de “**Comparación de dos muestras**” está diseñado para comparar dos muestras independientes de datos de variables. Las pruebas son corridas para determinar si existe o no diferencia significativa entre medias, varianzas y/o medianas de las poblaciones de las cuales las muestras fueron tomadas. En adición, los datos pueden ser mostrados gráficamente.

El procedimiento “**Análisis multivariable**” está diseñado para resumir dos columnas o más de datos numéricos. Calcula estadísticos de resumen para cada variable, así como las varianzas y correlaciones entre las variables. Las gráficas incluyen una matriz de dispersión.

3.2 Análisis de la retracción de los hormigones tomados de planta

A partir de la aplicación de los ciclos de Sol y Sombra a las muestras tomadas se obtuvieron los siguientes resultados expresados a través de la gráfica siguiente, donde se indican como valores positivos a las expansiones experimentadas por las muestras y como valores negativos a las retracciones.

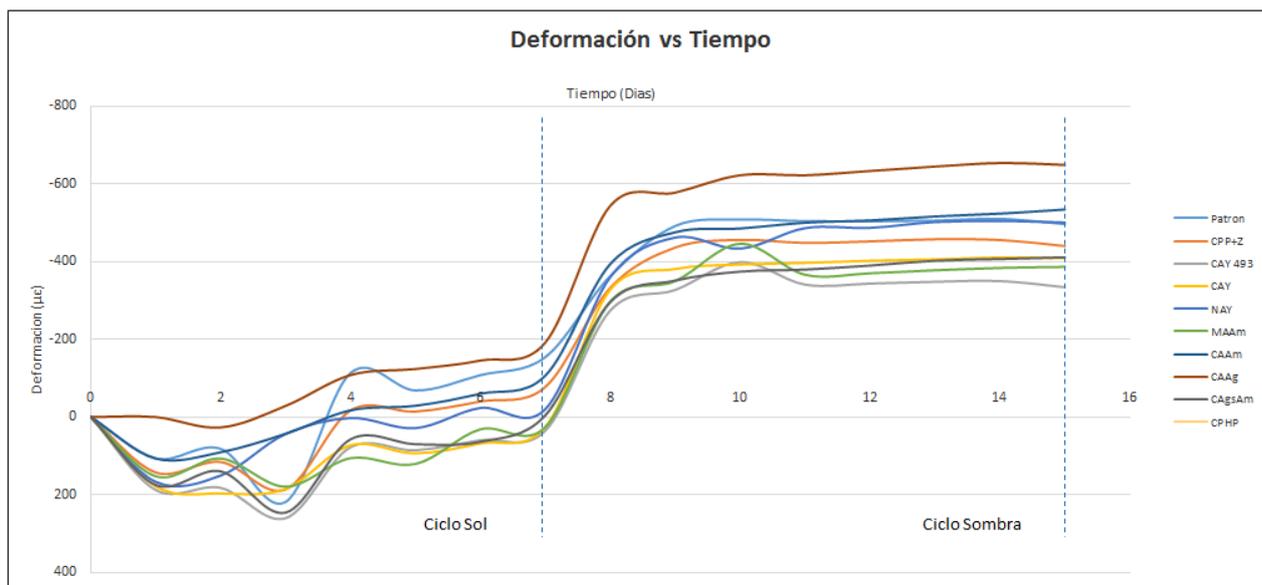


Fig.3.1 “Retracción experimentada por las muestras”.

Tabla 3.1 “Valores de retracción para cada uno de las condiciones aplicadas”.

No	Muestra	ID	Sol	Sombra
1	Patron	MH 1	-154,111111	-496,444444
2	CPP+Z	MH 2	-77,333333	-440,111111
3	CAY´	MH 3	35,166667	-334
4	CAY	MH 4	25,555556	-408,666667
5	NAY	MH 5	-20,111111	-500,333333
6	MAAm	MH 6	26,222222	-386,333333
7	CAAm	MH 7	-106,333333	-533,777778
8	CAAg	MH 8	-191,555556	-648,666667
9	CAgsAm	MH 9	-4,333333	-410,888889
10	CPHP	MH 10	-206,111111	-506

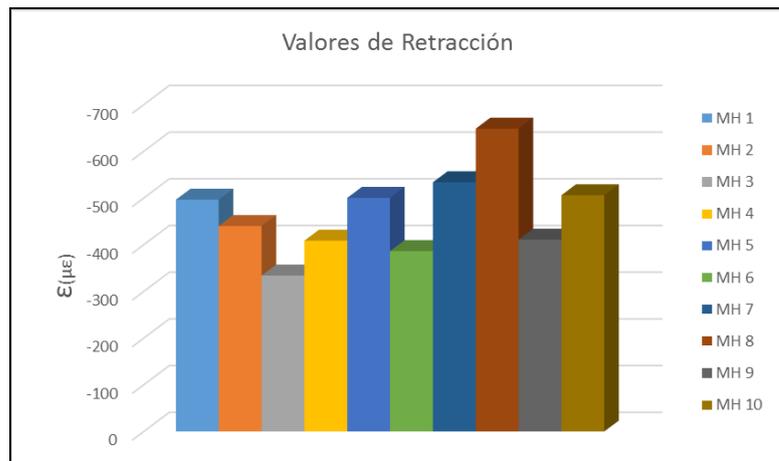


Fig.3.2 “Retracción máxima experimentada por cada muestra”.

3.2.1 Análisis estadístico general de los resultados de retracción obtenidos.

El análisis general de los resultados se llevó a cabo a partir de la aplicación de un análisis de los parámetros estadísticos fundamentales que logran describir una variable de una serie de muestras, donde se obtuvo la siguiente tabla resumen:

Tabla 3.2 “Resumen estadístico para retracción de todas las muestras”.

Recuento	10
Promedio	-466.522
Desviación Estándar	89.7089
Coefficiente de Variación	-19.2293%
Mínimo	-648.667
Máximo	-334.0
Rango	314.667
Sesgo Estandarizado	-0.806392
Curtosis Estandarizada	0.454805

Esta tabla muestra los estadísticos de resumen para los valores de retracción. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor del sesgo estandarizado y curtosis estandarizada se encuentran dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal.

El análisis del histograma de frecuencia de los datos obtenidos es otro parámetro de gran importancia para la caracterización y análisis de los resultados experimentales. Esta opción ejecuta una tabulación de frecuencias dividiendo el rango de retracción en intervalos del mismo ancho, y contando el número de datos en cada intervalo. Las frecuencias muestran el número de datos en cada intervalo, mientras que las frecuencias relativas muestran las proporciones en cada intervalo.

Tabla 3.3 “Tabla de frecuencia para la Retracción”.

	<i>Límite</i>	<i>Límite</i>			<i>Frecuencia</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Frecuencia</i>
<i>Clase</i>	<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>	<i>Punto Medio</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Relativa</i>	<i>Acumulada</i>	<i>Rel. Acum.</i>
	menor o igual	-670.0		0	0.0000	0	0.0000
1	-670.0	-590.0	-630.0	1	0.1000	1	0.1000
2	-590.0	-510.0	-550.0	1	0.1000	2	0.2000
3	-510.0	-430.0	-470.0	4	0.4000	6	0.6000
4	-430.0	-350.0	-390.0	3	0.3000	9	0.9000
5	-350.0	-270.0	-310.0	1	0.1000	10	1.0000
	mayor de	-270.0		0	0.0000	10	1.0000

Media = -466.522 Desviación Estándar = 89.7089

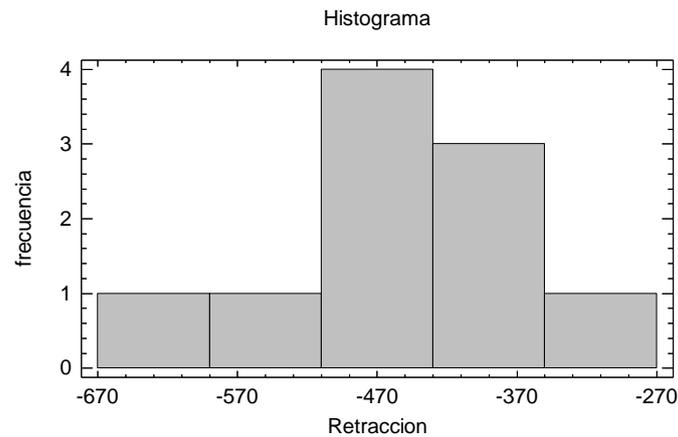


Fig.3.3 “Histograma de frecuencia para la variable Retracción”.

3.2.2 Análisis de la influencia de la variable Tipo de Árido Grueso

Para el análisis del factor Tipo de Árido Grueso se evalúan en 4 niveles, los mismos son los áridos procedentes de las canteras El Yigre, Armando Mestre, Purio y Algaba, a continuación se muestra la descomposición grafica del factor en sus diferentes niveles.

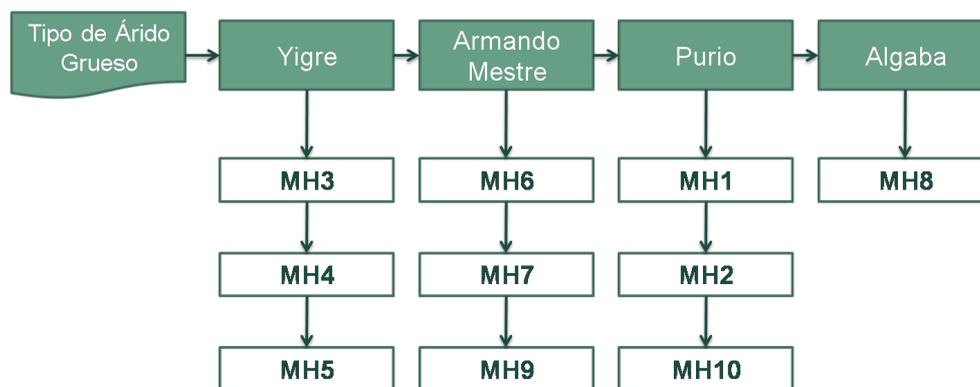


Fig.3.4 “Esquema de los niveles del factor Tipo de Árido Grueso”.

Los valores de retracción experimentados por cada una de las muestras fueron agrupados en función de cada uno de los niveles del factor evaluado (Fig.3.5) y fueron procesados estadísticamente con el fin de determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre ellos.

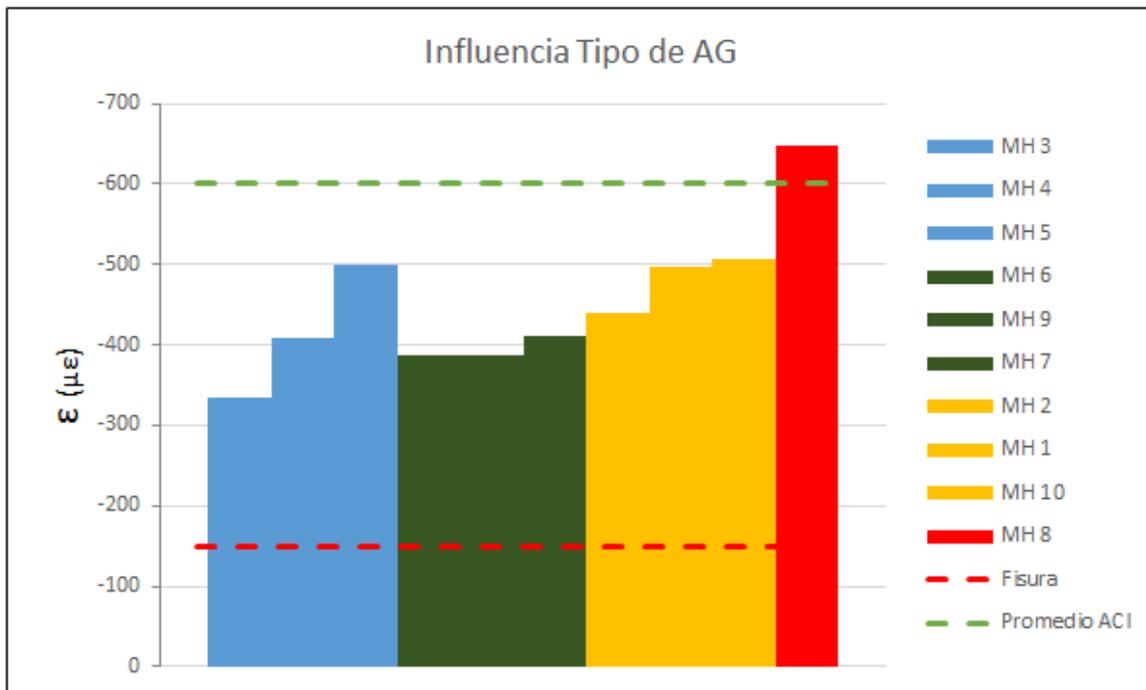


Fig.3.5 “Valores de retracción obtenidos en función del tipo de Árido Grueso”.

El procedimiento aplicado para la comparación de los resultados fue un análisis de comparación múltiple entre muestras. Este análisis se basa en la aplicación de pruebas de hipótesis, las cuales fueron realizadas para la obtención de un intervalo de confianza del orden del 95%. También se aplican en él análisis comparativos generales de las variables implícitas, Análisis de Anova y Prueba de Múltiples Rangos.

La realización del análisis de ANOVA permite la descomposición de la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro de grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 9,73292, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, se demuestra que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 4 variables con un nivel del 95,0% de confianza.

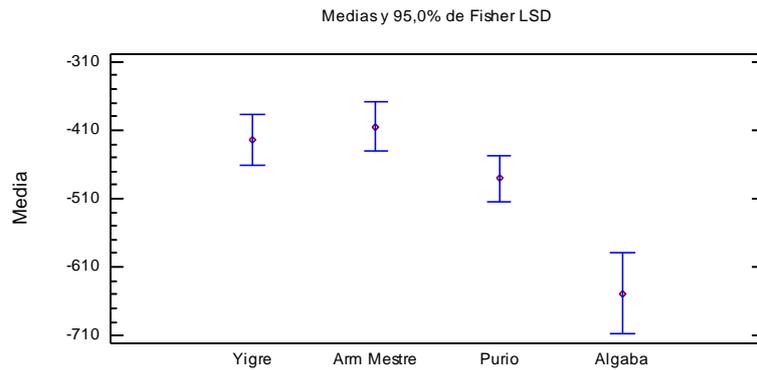


Fig.3.6 “Diagrama de Fisher”.

A partir del análisis estadístico de los resultados se demuestra que existen diferencias estadísticamente significativas en la manifestación de los valores de retracción de cada una de las muestras, por lo que se demuestra que el tipo de árido grueso es un factor determinante en la magnitud de la retracción por secado de las muestras de hormigón estudiadas. Concluyéndose que de los tipos de árido grueso estudiados el procedente de la cantera Algaba está asociado a los hormigones que experimentan mayor desarrollo de la retracción (con diferencia del 35% de la muestra patrón de referencia), por lo que se evalúa como el de menor capacidad restringente de la retracción. Mientras que los áridos procedentes de las canteras Armando Mestre y El Yigre manifiestan el mejor efecto moderador de la retracción (lográndose hormigones con disminución del 16% con respecto a la muestra patrón de referencia).

3.2.3 Análisis de la influencia de la variable Tipo de Árido Fino

Para el análisis del factor *tipo de árido fino* se evalúan en 3 niveles, los mismos son la utilización de áridos provenientes de las canteras Arimao, Algaba y Purio, a continuación se muestra la descomposición grafica del factor en sus diferentes niveles.

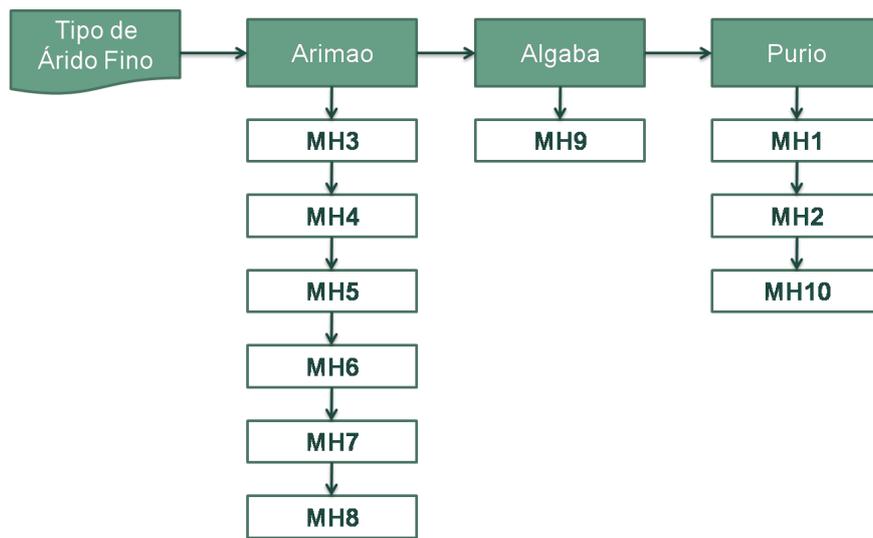


Fig.3.7 “Esquema de los niveles del factor Tipo de Árido Fino”.

Los valores de retracción experimentados por cada una de las muestras fueron agrupados en función de cada uno de los niveles del factor evaluado (Fig. 3.8) y fueron procesados estadísticamente con el fin de determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre ellos.

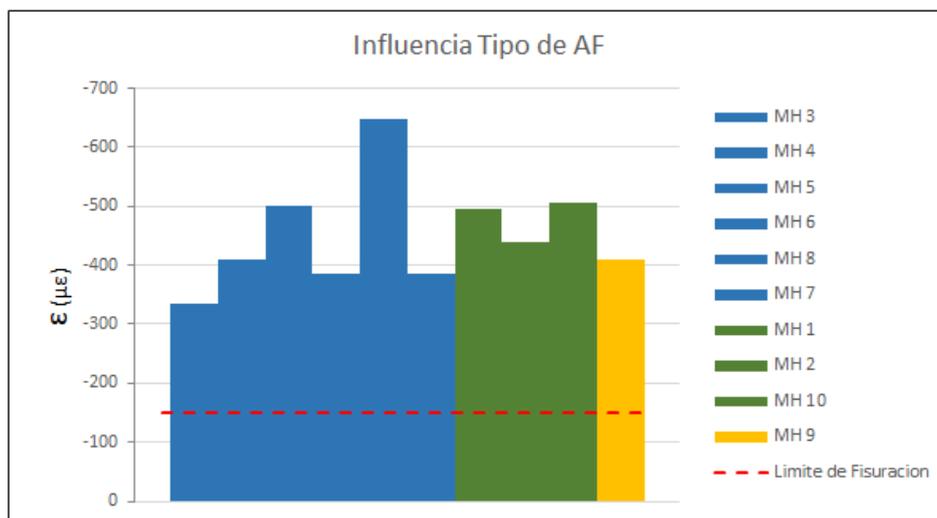


Fig.3.8 “Valores de retracción obtenidos en función de la Relación a/c”.

El procedimiento aplicado para la comparación de los resultados fue un análisis de comparación múltiple entre muestras, este análisis se basa en la aplicación de pruebas de

hipótesis, las cuales fueron realizadas para la obtención de un intervalo de confianza del orden del 95%. También se aplican en él, análisis comparativos generales de las variables implícitas, Análisis de Anova y Prueba de Múltiples Rangos.

La realización del análisis de ANOVA permite la descomposición de la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro de grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 0.752728, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es mayor que 0,05, se demuestra que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 4 variables con un nivel del 95,0% de confianza.

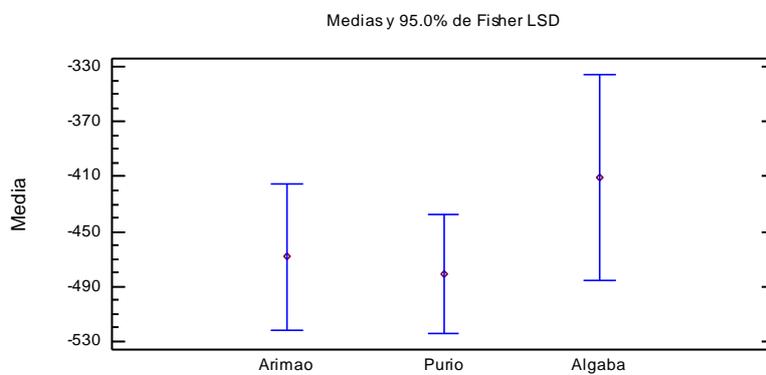


Fig.3.9 “Diagrama de Fisher”.

A partir del análisis estadístico de los resultados se demuestra que no existen diferencias significativas en la manifestación de los valores de retracción de cada una de las muestras, por lo que se demuestra que la variación del tipo de árido fino es un factor que no influye significativamente en el desarrollo de la retracción por secado de los hormigones producidos en la ECOT “Cayo Santa María”.

3.2.4 Análisis de la influencia de la variación de la Cantidad de Cemento.

Para el análisis del factor *cantidad de cemento*, se evalúan en 4 niveles, los mismos son la utilización de 369, 390, 400 y 410 Kg de cemento por metro cúbico de hormigón, a continuación se muestra la descomposición grafica del factor en sus diferentes niveles.

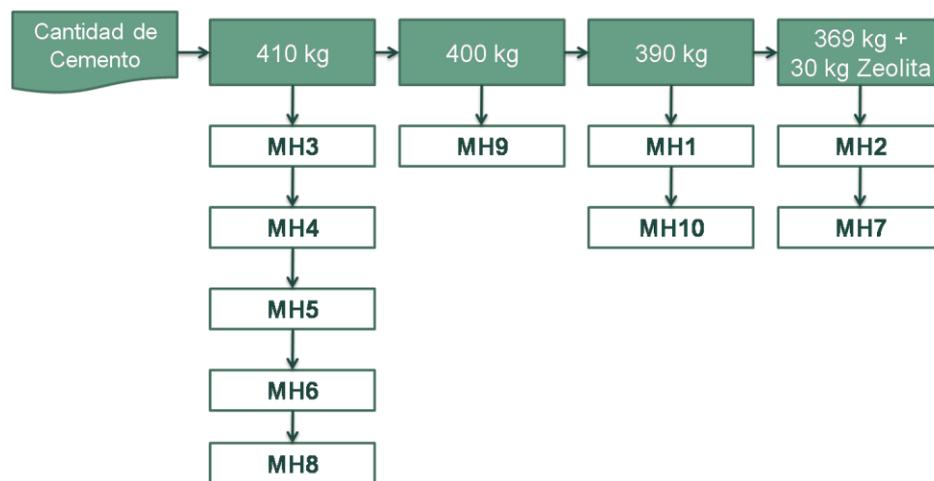


Fig.3.10 “Esquema de los niveles del factor Cantidad de Cemento”.

Los valores de retracción experimentados por cada una de las muestras fueron agrupados en función de cada uno de los niveles del factor evaluado (Fig. 3.11) y fueron procesados estadísticamente con el fin de determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre ellos.

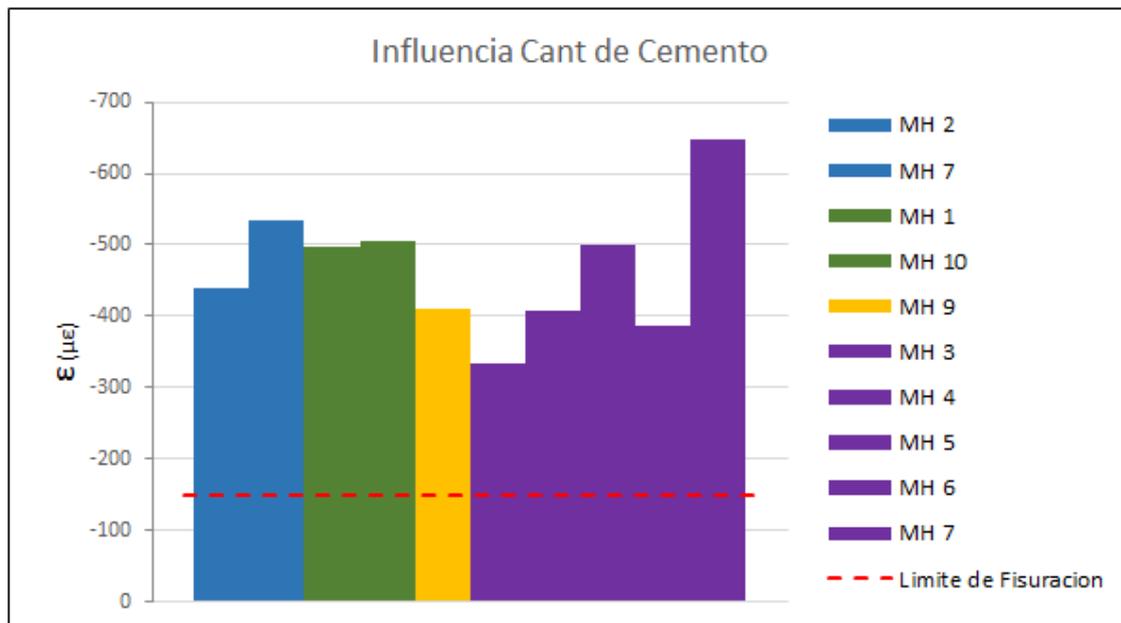


Fig.3.11 “Valores de retracción obtenidos en función de la Relación a/c”.

El procedimiento aplicado para la comparación de los resultados fue un análisis de comparación múltiple entre muestras, este análisis se basa en la aplicación de pruebas de hipótesis, las cuales fueron realizadas para la obtención de un intervalo de confianza del orden del 95%. También se aplican en él análisis comparativos generales de las variables implícitas, Análisis de Anova y Prueba de Múltiples Rangos.

La realización del análisis de ANOVA permite la descomposición de la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro de grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 1.03113, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es mayor que 0,05, se demuestra que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 4 variables con un nivel del 95,0% de confianza.

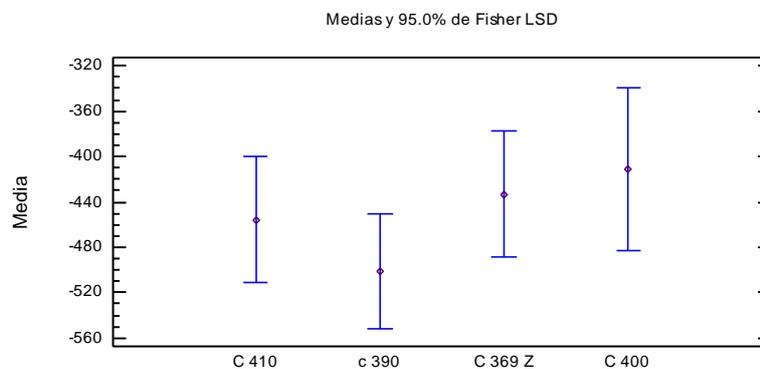


Fig.3.12 “Diagrama de Fisher”.

A partir del análisis estadístico de los resultados se demuestra que no existen diferencias estadísticamente significativas en la manifestación de los valores de retracción de cada una de las muestras, por lo que se demuestra que la variación de la cantidad de cemento que se utiliza en la ECOT “Cayo Santa María” es un factor que no influye significativamente en el desarrollo de la retracción por secado de los hormigones fabricados para las estructuras tipo Bungalows.

3.2.5 Análisis de la influencia de la variación de la relación Agua/Cemento (a/c)

Para el análisis del factor *cantidad de cemento* se evalúan en 3 niveles, los mismos son la utilización de relaciones a/c con valores de 0.45, 0.49 y 0.50, a continuación se muestra la descomposición grafica del factor en sus diferentes niveles.

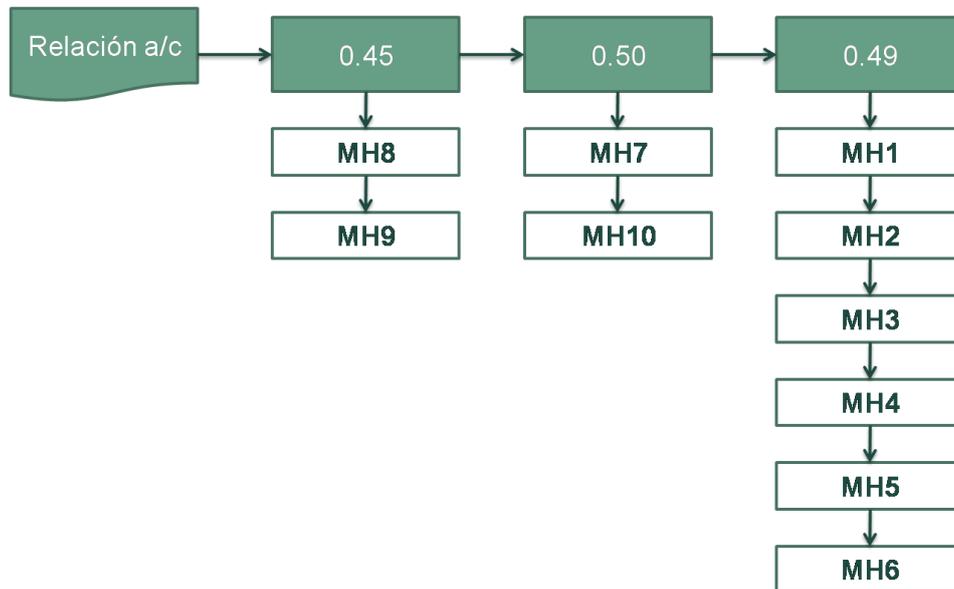


Fig.3.13 “Esquema de los niveles del factor relación a/c”.

Los valores de retracción experimentados por cada una de las muestras fueron agrupados en función de cada uno de los niveles del factor evaluado (Fig. 3.14) y fueron procesados estadísticamente con el fin de determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre ellos.

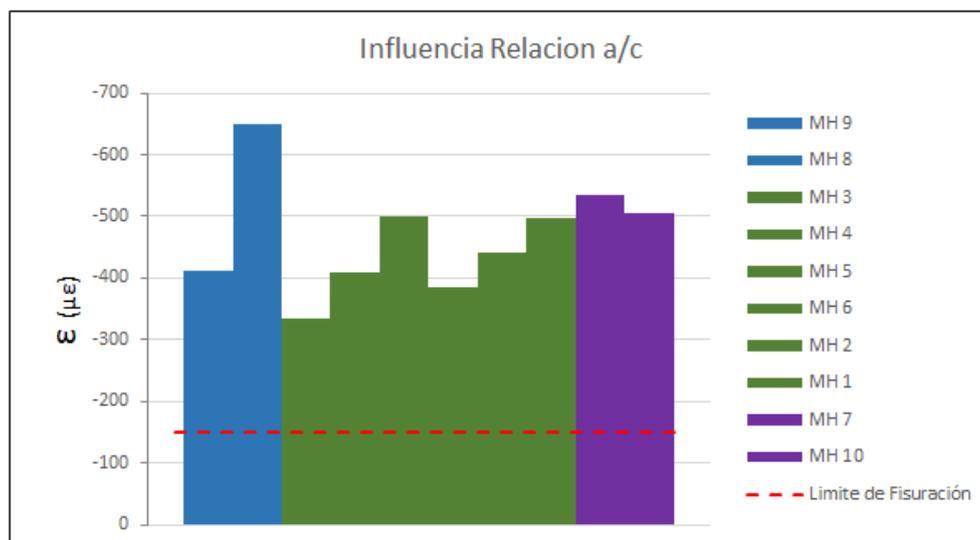


Fig.3.14 “Valores de retracción obtenidos en función de la Relación a/c”.

El procedimiento aplicado para la comparación de los resultados fue un análisis de comparación múltiple entre muestras, este análisis se basa en la aplicación de pruebas de hipótesis, las cuales fueron realizadas para la obtención de un intervalo de confianza del orden del 95%. También se aplican en él análisis comparativos generales de las variables implícitas, Análisis de Anova y Prueba de Múltiples Rangos.

La realización del análisis de ANOVA permite la descomposición de la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro de grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 1.51363, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es mayor que 0,05, se demuestra que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 4 variables con un nivel del 95,0% de confianza.

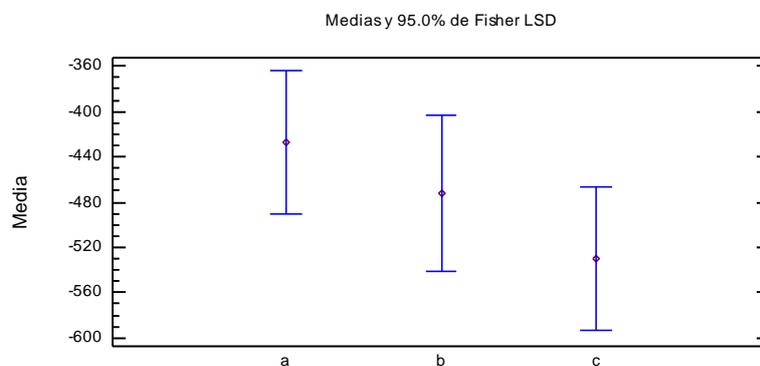


Fig.3.15 “Diagrama de Fisher”.

A partir del análisis de los resultados se demuestra que no existen diferencias estadísticamente significativas en la manifestación de los valores de retracción de cada una de las muestras, por lo que se demuestra que las variaciones de la relación a/c que se generan al producir hormigones en la ECOT “Cayo Santa María”, no influyen significativamente en el desarrollo de la retracción por secado de estos.

3.2.6 Análisis de la influencia de la variación de la Humedad Relativa.

Para el análisis del factor Variación de la Humedad Relativa se evalúa en 2 niveles, los mismos son la exposición de las muestras a valores de humedad relativa de 70% y 45%, a continuación se muestra la descomposición grafica del factor en sus diferentes niveles.

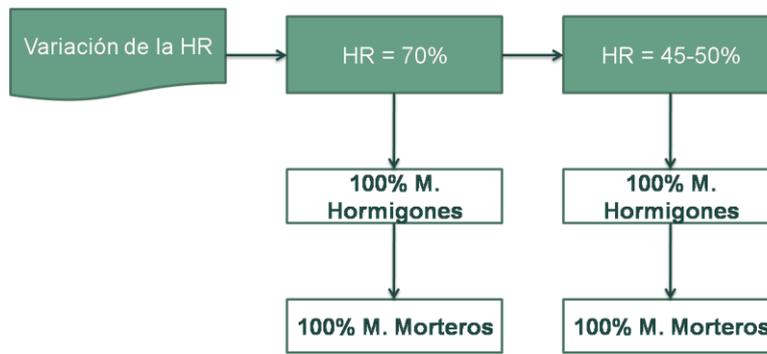


Fig.3.16 “Esquema de los niveles del factor Variación de la Humedad Relativa”.

Los valores de retracción experimentados por cada una de las muestras fueron agrupados en función de cada uno de los niveles del factor evaluado (Fig. 3.17) y fueron procesados estadísticamente con el fin de determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre ellos.

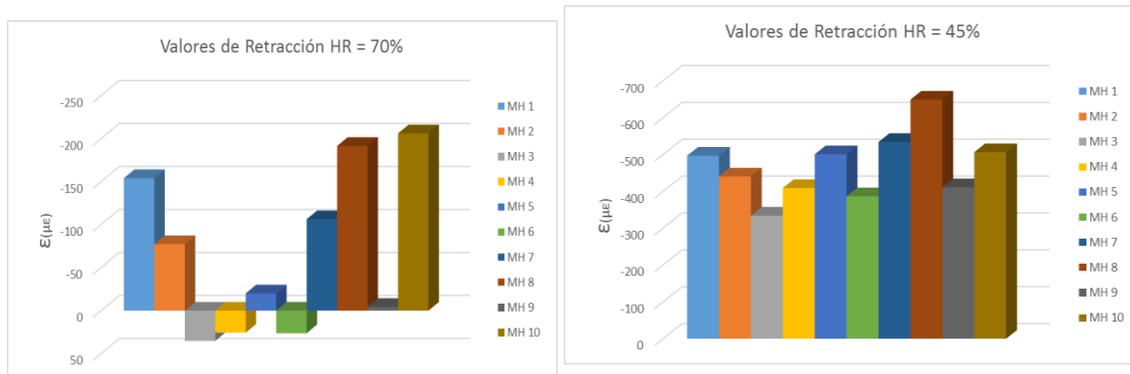


Fig.3.17 “Valores de retracción obtenidos en función de la Variación de la Humedad Relativa.

Comparación de Desviaciones Estándar

Tabla 3.4 “Desviación Estándar para cada nivel del factor Variación de Humedad Relativa ”.

	HR 70 %	HR 45 %
Desviación Estándar	93,0519	89,7089
Varianza	8658,66	8047,69
Gl	9	9

Razón de Varianzas= 1,07592

Intervalos de confianza del 95,0%

Desviación Estándar de HR 70 %: [64,0044; 169,877]

Desviación Estándar de HR 45 %: [61,7049; 163,774]

Razones de Varianzas: [0,267243; 4,33164]

Prueba-F para comparar Desviaciones Estándar

Hipótesis Nula: $\sigma_1 = \sigma_2$

Hipótesis Alternativa.: $\sigma_1 \neq \sigma_2$

F = 1,07592 valor-P = 0,914987

No se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

Se ejecuta una prueba-F para comparar las varianzas de las dos muestras. También se construyen intervalos ó cotas de confianza para cada desviación estándar y para la razón de varianzas. De particular interés es el intervalo de confianza para la razón de varianzas, el cual se extiende desde 0,267243 hasta 4,33164. Puesto que el intervalo contiene el valor de 1, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar de las dos muestras con un nivel de confianza del 95,0%.

Comparación de Medias

Intervalos de confianza del 95,0%

Media de HR 70 %: -67,2944 +/- 66,5655 [-133,86; -0,728937]

Media de HR 45 %: -466,522 +/- 64,174 [-530,696; -402,348]

Diferencia de medias suponiendo varianzas iguales: 399,228 +/- 85,872 [313,356; 485,1]

Prueba t para comparar medias

Hipótesis nula: $\mu_1 = \mu_2$

Hipótesis Alternativa.: $\mu_1 \neq \mu_2$

Suponiendo varianzas iguales: $t = 9,76742$ valor-P = $1,28127E-8$.

Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

Se ejecuta una prueba-t para comparar las medias de las dos muestras. También se construyen los intervalos, ó cotas, de confianza para cada media y para la diferencia entre las medias. De interés particular es el intervalo de confianza para la diferencia entre las medias, el cual se extiende desde 313,356 hasta 485,1. Puesto que el intervalo no contiene el valor 0, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos muestras, con un nivel de confianza del 95,0%.

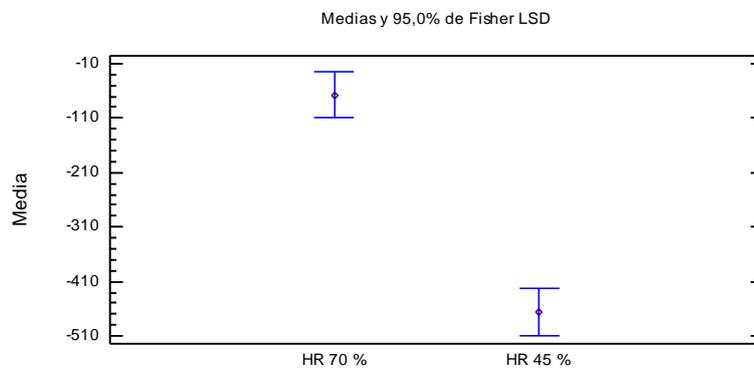


Fig.3.18 “Diagrama de Fisher”.

A partir del análisis estadístico de los resultados se demuestra que existen diferencias estadísticamente significativas en la manifestación de los valores de retracción de las medias de las muestras, por lo que se demuestra que la variación de la humedad relativa es un factor que influye significativamente en el desarrollo de la retracción por secado en las muestras de hormigón estudiadas. Concluyéndose que a medida que disminuye la humedad relativa del ambiente donde se encuentran los elementos de hormigón, aumenta la manifestación de la retracción por secado. Produciéndose con la disminución de la humedad relativa del 70% al 45% un aumento en los valores de la retracción en el orden del 85%.

3.2.7 Contornos de respuestas de interacción entre factores

Los contornos de respuesta son herramientas gráficas del análisis estadístico que permiten la evaluación simultánea del efecto de dos variables independientes sobre la variable respuesta. Permitiendo de esta manera la identificación de regiones de interacción de las variables evaluadas, que muestran tanto el mayor como el menor efecto sobre la respuesta.

A continuación se evalúa la interacción simultanea de los factores evaluados influyentes en la retracción del hormigón, mostrándose los diagramas de interacción de Árido Fino vs Árido Grueso, Cantidad de Cemento vs Árido Grueso y Relación a/c vs Árido Grueso (Fig. 3.19, 3.20 y 3.21).

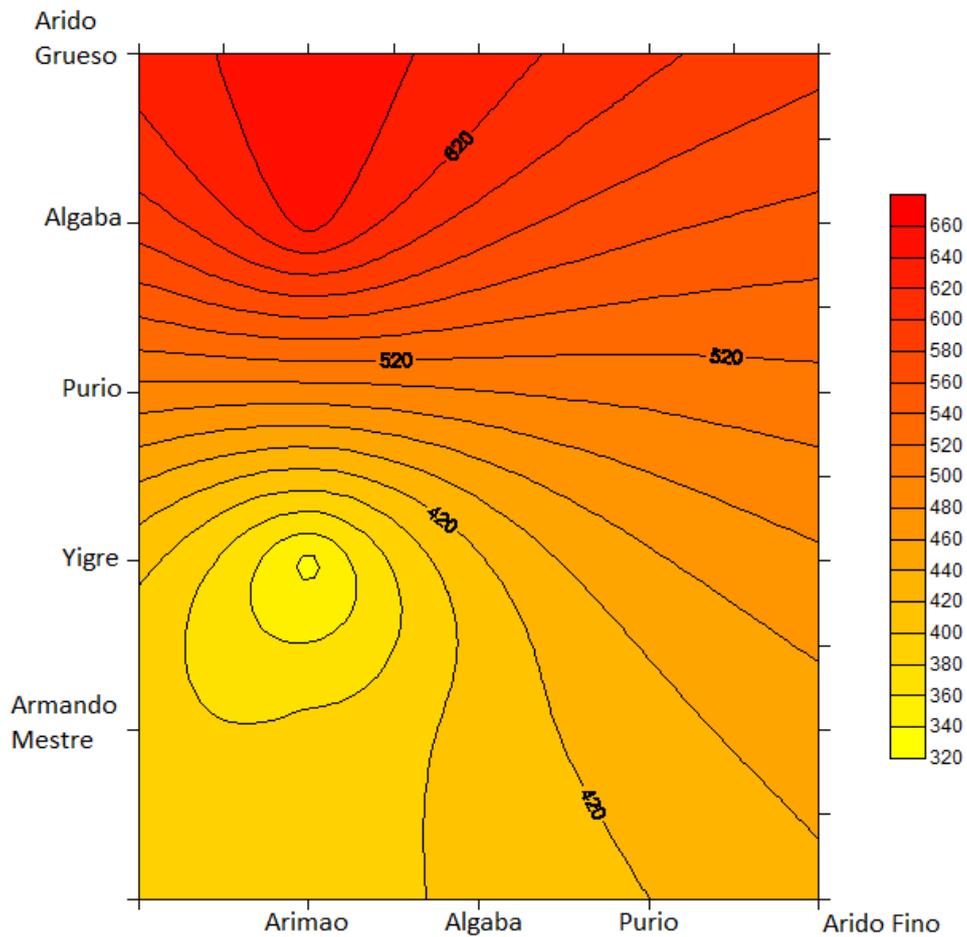


Fig.3.19 “Contorno de Respuesta: Árido Fino vs Árido Grueso”.

En la gráfica se identifica como la región de mínimo desarrollo de la retracción a las muestras confeccionadas con la combinación de la arena de la cantera Arimao y los Áridos Gruesos de las canteras de Armando Mestre y el Yigre. Mientras que la región de máximo desarrollo de la retracción a las muestras confeccionadas con el Árido grueso de la cantera Algaba combinadas con todas las arenas evaluadas. Este análisis permite al productor de hormigón, evaluar la medida en que un tipo u otro de árido grueso, es capaz de controlar la retracción en el hormigón al ser combinado con una arena específica.

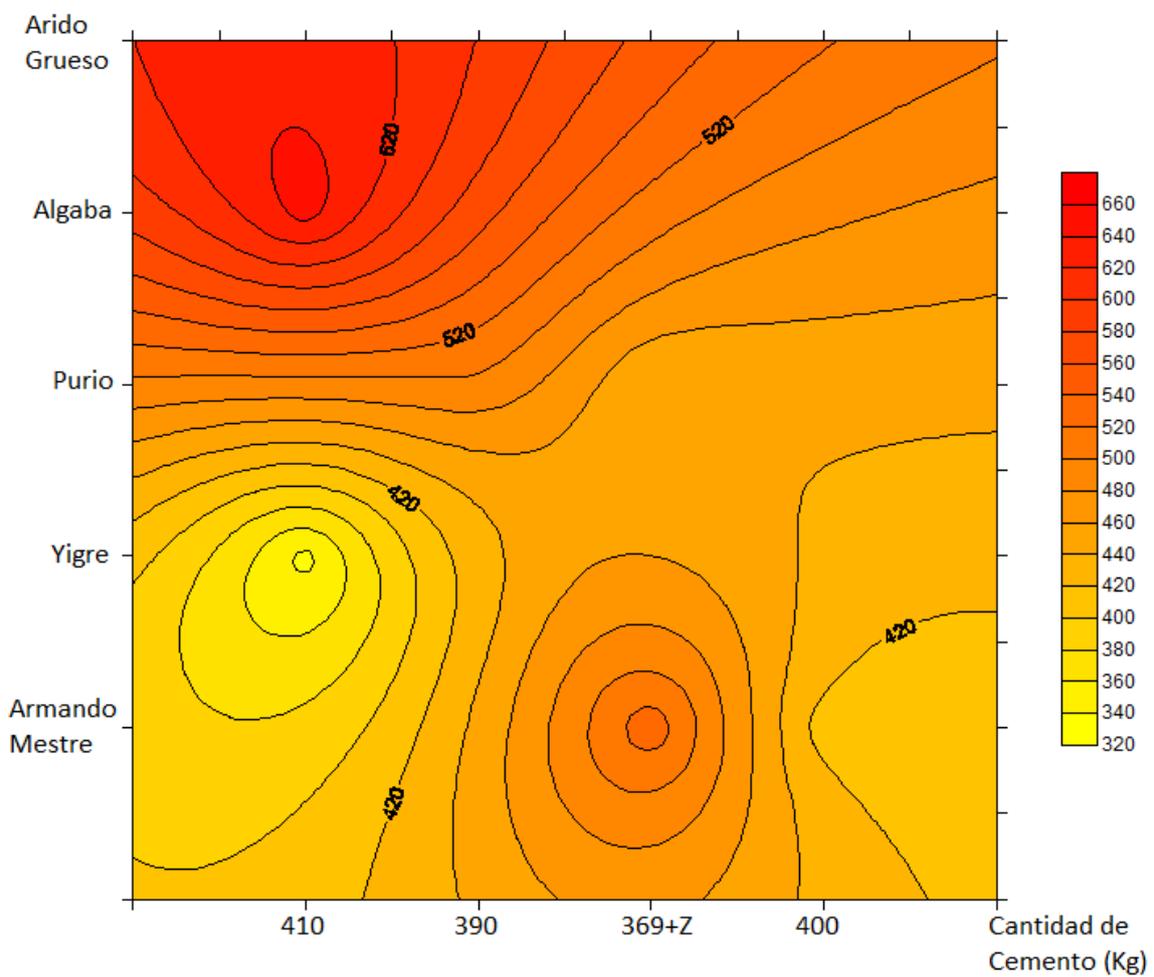


Fig.3.20 “Contorno de Respuesta: Cantidad de Cemento vs Árido Grueso”.

En la gráfica se identifica como la región de mínimo desarrollo de la retracción a las muestras confeccionadas con los Áridos Gruesos de las canteras de Armando Mestre y el

Yigre con la utilización de 410 Kg de cemento. Mientras que la región de máximo desarrollo de la retracción a las muestras confeccionadas con el Árido grueso de la cantera Algaba con la utilización de 410 Kg de cemento.

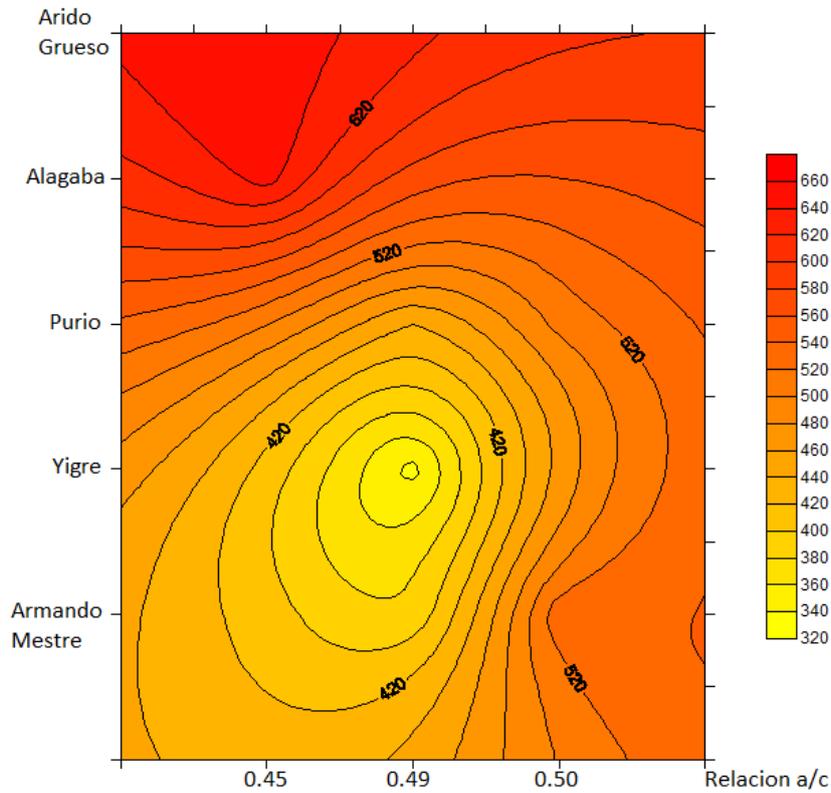


Fig.3.21 “Contorno de Respuesta: Relación a/c vs Árido Grueso”.

En la gráfica se identifica como la región de mínimo desarrollo de la retracción a las muestras confeccionadas con los Áridos Gruesos de las canteras de Armando Mestre y el Yigre con la utilización de relaciones a/c entre 0.45 y 0.49. Mientras que la región de máximo desarrollo de la retracción a las muestras confeccionadas con el Árido grueso de la cantera Algaba con la utilización de relaciones a/c entre 0.45 y 0.49.

3.3 Análisis de la retracción de las muestras de morteros

A partir del monitoreo del desarrollo de la deformación unitaria sin condiciones de restricción producto del desarrollo de la retracción en las muestras, se logra cuantificar el desarrollo de la retracción. Para ello se controló la deformación de las muestras durante la etapa de curado inicial durante los primeros 28 días de confeccionadas y durante la aplicación de los ciclos de Sol y Sombra. Donde se obtuvieron los siguientes resultados expresados a través

de la gráfica, donde se muestran como valores positivos a la expansión experimentada por las muestras y como valores negativos a la retracción experimentada por las muestras.

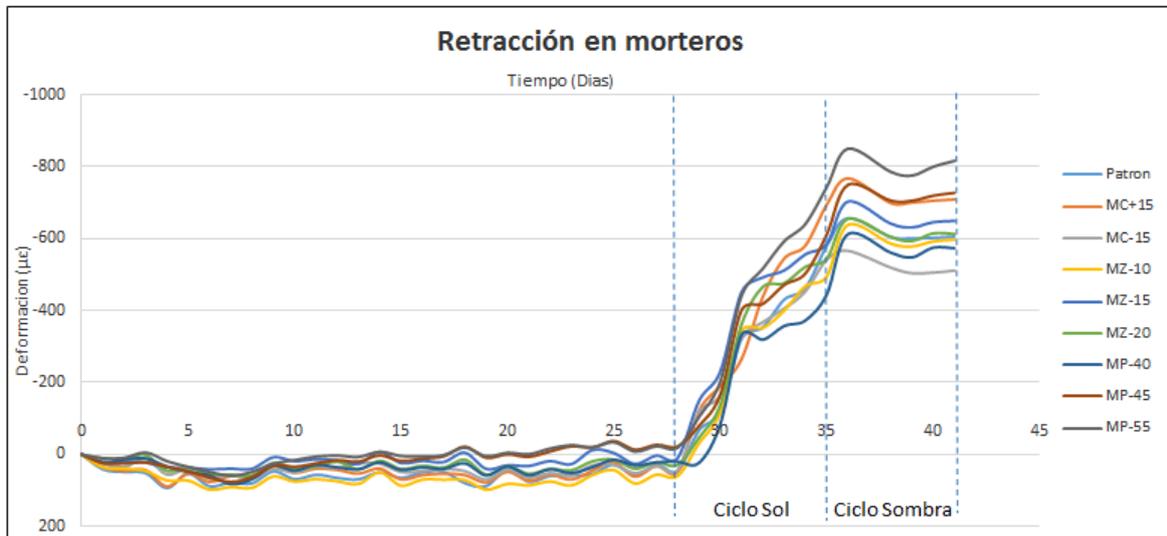


Fig.3.22 “Retracción experimentada por las muestras de morteros”.

Tabla 3.5 “Valores de retracción para cada uno de las condiciones aplicadas”

Muestras	Codigo	Sol	Sombra
Patron	MM1	-579.555556	-656.555556
MC+15	MM2	-693.666667	-767.666667
MC-15	MM3	-541.111111	-566.111111
MZ-10	MM4	-494.444444	-638.111111
MZ-15	MM5	-585.222222	-702.888889
MZ-20	MM6	-544.333333	-655
MP-0.40	MM7	-444.666667	-612.333333
MP-0.45	MM8	-610.888889	-749.555556
MP0.55	MM9	-742.666667	-850

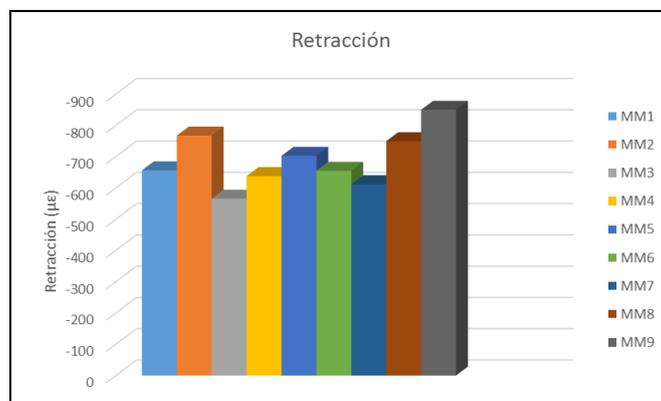


Fig.3.23 “Retracción máxima experimentada por cada muestra”.

3.3.1 Análisis estadístico general de los resultados de retracción obtenidos.

El análisis general de los resultados se llevó a cabo a partir de la aplicación de un análisis de los parámetros estadísticos fundamentales que logran describir una variable, a la totalidad de las muestras, donde se obtuvo la siguiente tabla resumen:

Tabla 3.6 “Resumen estadístico para retracción de todas las muestras”

Recuento	27
Promedio	-644.618
Desviación Estándar	98.4245
Coefficiente de Variación	-15.2687%
Mínimo	-849.33
Máximo	-495.33
Rango	354.0
Sesgo Estandarizado	-1.15062
Curtosis Estandarizada	-0.53699

Esta tabla muestra los estadísticos de resumen para los valores de retracción. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a $+2$ indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, los valores del sesgo estandarizado y de la curtosis estandarizada se encuentran dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

El análisis del histograma de frecuencia de los datos obtenidos es otro parámetro de gran importancia para la caracterización y análisis de los resultados experimentales. Esta opción ejecuta una tabulación de frecuencias dividiendo el rango de Retracción en intervalos del

mismo ancho, y contando el número de datos en cada intervalo. Las frecuencias muestran el número de datos en cada intervalo, mientras que las frecuencias relativas muestran las proporciones en cada intervalo.

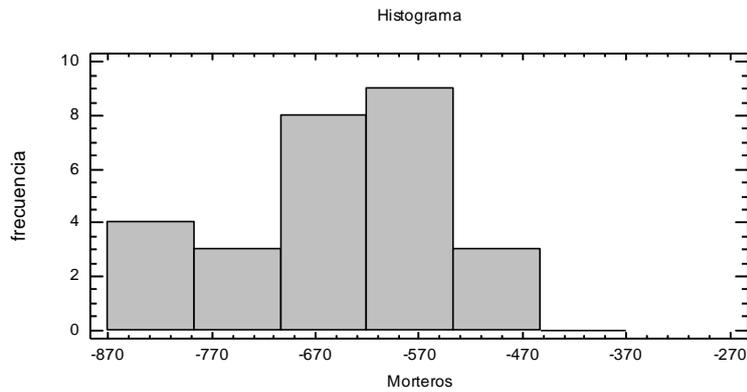


Fig.3.24 "Histograma de frecuencia para la variable Retracción".

3.3.2 Análisis de la influencia de la variable Cantidad de Cemento

Para el análisis del factor *Cantidad de Cemento* se evalúan en 3 niveles, los mismos son la cantidad patrón, un incremento del 15 % y un decremento del 15% con respecto a la muestra patrón.

Los valores de retracción experimentados por cada una de las muestras fueron agrupados en función de cada uno de los niveles del factor evaluado (Fig. 3.25) y fueron procesados estadísticamente con el fin de determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre ellos.

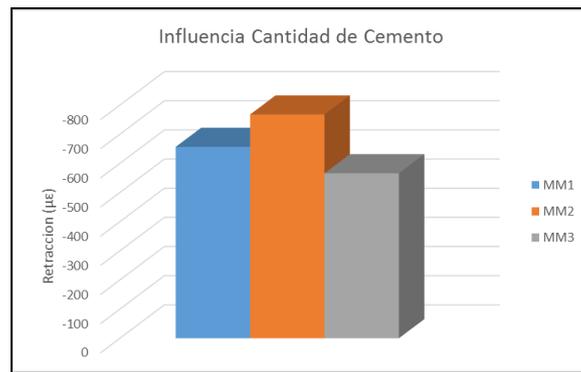


Fig.3.25 “Valores de retracción obtenidos en función de la Cantidad de Cemento”.

El procedimiento aplicado para la comparación de los resultados fue un análisis de comparación múltiple entre muestras, este análisis se basa en la aplicación de pruebas de hipótesis, las cuales fueron realizadas para la obtención de un intervalo de confianza del orden del 95%. También se aplican en él análisis comparativos generales de las variables implícitas, Análisis de Anova y Prueba de Múltiples Rangos.

La realización del análisis de ANOVA permite la descomposición de la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro de grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 7.04286, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, se demuestra que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel del 95,0% de confianza.

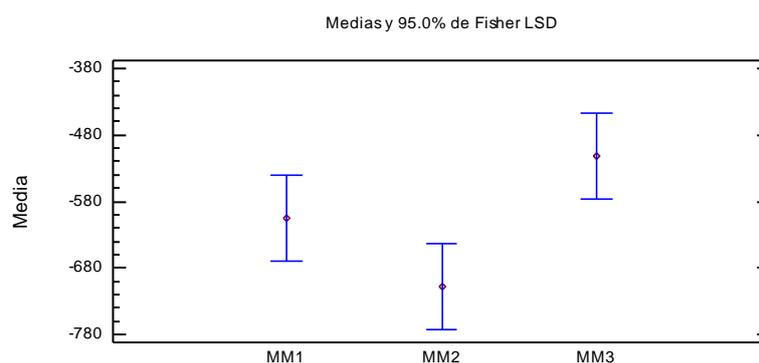


Fig.3.26 “Diagrama de Fisher”.

A partir del análisis de los resultados se demuestra que existen diferencias estadísticamente significativas en la manifestación de los valores de retracción de cada una de las muestras,

por lo que se demuestra que la cantidad de cemento es un factor que influye significativamente en el desarrollo de la retracción por secado en las muestras de mortero estudiadas. Concluyéndose que de las cantidades de cemento estudiadas el aumento de la concentración de cemento en la mezcla genera mayor desarrollo de retracción, provocando un aumento en los valores de la retracción con respecto a la muestra patrón del 17%. Mientras que el decremento genera una menor manifestación de la retracción, provocando una disminución en los valores de la retracción con respecto a la muestra patrón del 15%.

3.3.3 Análisis de la influencia de la variable relación Agua/Cemento (a/c).

Para el análisis del factor *relación a/c* se evalúa en 4 niveles, los mismos son relaciones de a/c iguales a 0.40, 0.45, 0.49 y 0.55.

Los valores de retracción experimentados por cada una de las muestras fueron agrupados en función de cada uno de los niveles del factor evaluado (Fig. 3.27) y fueron procesados estadísticamente con el fin de determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre ellos.

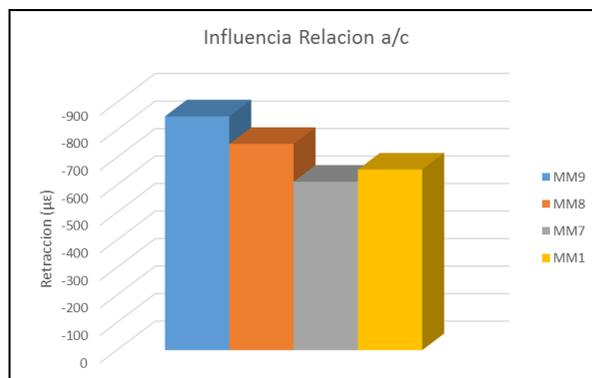


Fig.3.27 “Valores de retracción obtenidos en función de la Relación a/c”.

El procedimiento aplicado para la comparación de los resultados fue un análisis de comparación múltiple entre muestras, este análisis se basa en la aplicación de pruebas de hipótesis, las cuales fueron realizadas para la obtención de un intervalo de confianza del orden del 95%. También se aplican en él análisis comparativos generales de las variables implícitas, Análisis de Anova y Prueba de Múltiples Rangos.

La realización del análisis de ANOVA permite la descomposición de la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro de grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 28.7786, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, se demuestra que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 4 variables con un nivel del 95,0% de confianza.

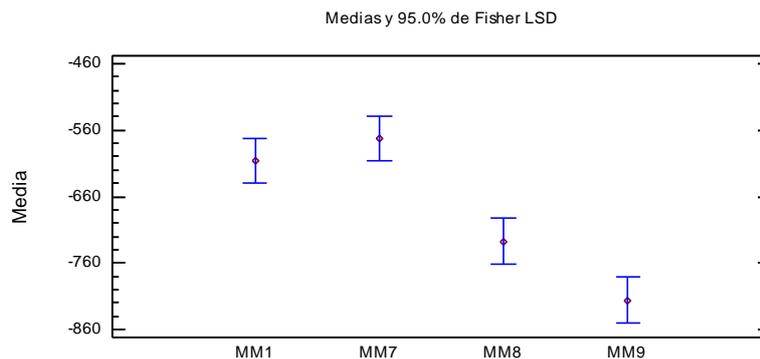


Fig.3.28 “Diagrama de Fisher”.

A partir del análisis estadístico de los resultados se demuestra que existen diferencias estadísticamente significativas en la manifestación de los valores de retracción de cada una de las muestras, por lo que se demuestra que la relación a/c es un factor que influye significativamente en el desarrollo de la retracción por secado en las muestras de mortero estudiadas. Concluyéndose que de las relaciones a/c estudiadas la relación a/c = 0.55 en la mezcla genera el mayor desarrollo de retracción, provocando un aumento en los valores de la retracción con respecto a la muestra patrón del 35%. Mientras que la relación = 0.40 genera la menor manifestación de la retracción, provocando una disminución en los valores de la retracción con respecto a la muestra patrón del 6%.

3.3.4 Análisis de la influencia de la variable uso de Zeolita.

Para el análisis del factor *uso de zeolita* se evalúa en 4 niveles, los mismos son la sustitución de un 10%, 15%, 20% y 0% del volumen de cemento por Zeolita Tasajera.

Los valores de retracción experimentados por cada una de las muestras fueron agrupados en función de cada uno de los niveles del factor evaluado (Fig. 3.29) y fueron procesados estadísticamente con el fin de determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre ellos.

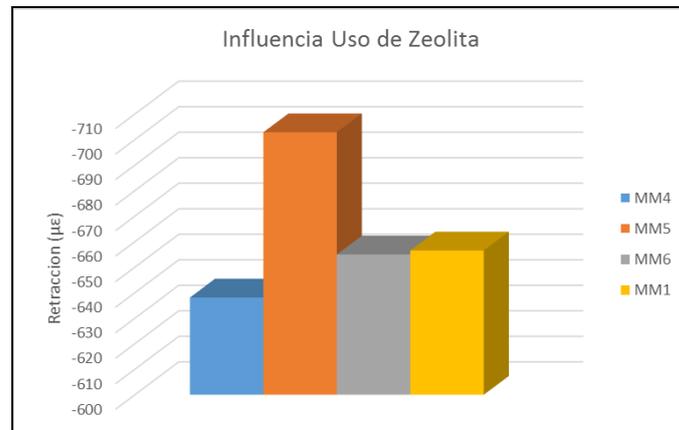


Fig.3.29 “Valores de retracción obtenidos en función de la Relación a/c”.

El procedimiento aplicado para la comparación de los resultados fue un análisis de comparación múltiple entre muestras, este análisis se basa en la aplicación de pruebas de hipótesis, las cuales fueron realizadas para la obtención de un intervalo de confianza del orden del 95%. También se aplican en él análisis comparativos generales de las variables implícitas, Análisis de Anova y Prueba de Múltiples Rangos.

La realización del análisis de ANOVA permite la descomposición de la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro de grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 0.548262, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es mayor que 0,05, se demuestra que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 4 variables con un nivel del 95,0% de confianza.

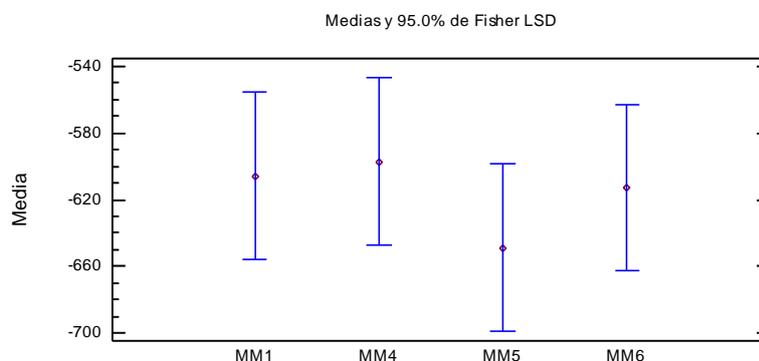


Fig.3.30 “Diagrama de Fisher”.

A partir del análisis estadístico de los resultados se demuestra que no existen diferencias estadísticamente significativas en la manifestación de los valores de retracción de cada una de las muestras, por lo que se demuestra que la sustitución de cemento por zeolita es un factor que no influye significativamente en el desarrollo de la retracción por secado en las muestras de mortero estudiadas.

3.3.5 Análisis de la influencia de la variación de la Humedad Relativa

Para el análisis del factor variación de la humedad relativa se evalúa en 3 niveles, los mismos son relaciones HR = 100%, HR = 70% y HR = 45%.

Los valores de retracción experimentados por cada una de las muestras fueron agrupados en función de cada uno de los niveles del factor evaluado (Fig. 3.31) y fueron procesados estadísticamente con el fin de determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre ellos.

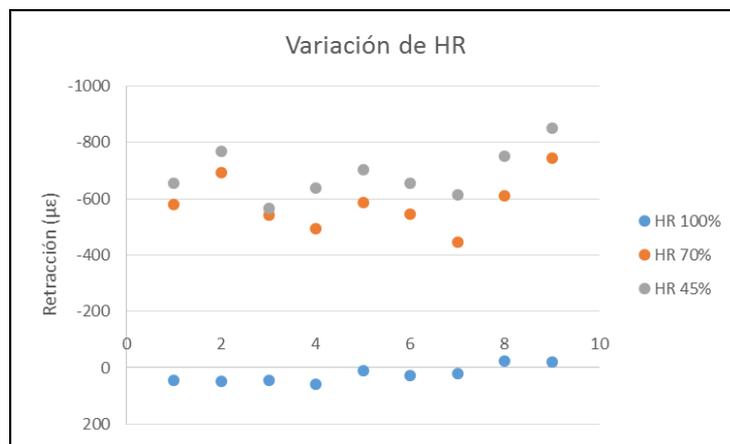


Fig.3.31 “Valores de retracción obtenidos en función de la Relación a/c”.

El procedimiento aplicado para la comparación de los resultados fue un análisis de comparación múltiple entre muestras, este análisis se basa en la aplicación de pruebas de hipótesis, las cuales fueron realizadas para la obtención de un intervalo de confianza del orden del 95%. También se aplican en él análisis comparativos generales de las variables implícitas, Análisis de Anova y Prueba de Múltiples Rangos.

La realización del análisis de ANOVA permite la descomposición de la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro de grupos. La

razón-F, que en este caso es igual a 231.869, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, se demuestra que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 4 variables con un nivel del 95,0% de confianza.

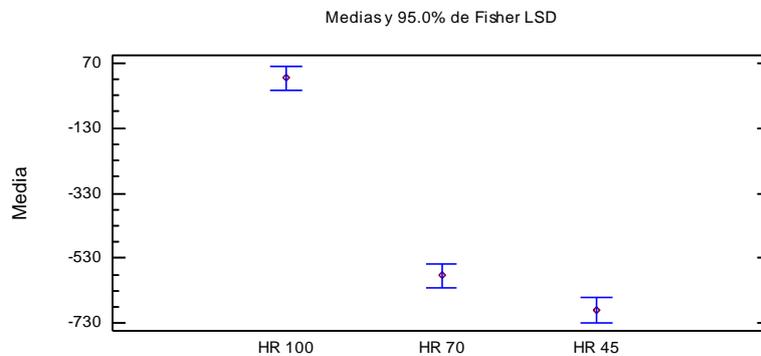


Fig. 3.32 "Diagrama de Fisher".

A partir del análisis estadístico de los resultados se demuestra que existen diferencias estadísticamente significativas en la manifestación de los valores de retracción de cada una de las muestras, por lo que se demuestra que la variación de la humedad relativa es un factor que influye significativamente en el desarrollo de la retracción por secado en las muestras de mortero estudiadas. Concluyéndose que de las variaciones de la humedad relativa estudiadas la HR = 45% genera el mayor desarrollo de retracción. Mientras que la HR = 100% genera la menor manifestación de la retracción.

3.4 Comparación del desarrollo de la retracción entre morteros y hormigones

3.4.1 Análisis de la influencia de la variación de la Humedad Relativa

Para el análisis de la diferencia del desarrollo de la retracción entre las muestras de morteros y hormigones se seleccionaron las muestras entre las cuales existe correspondencia en su formulación, diferenciándose solamente en la ausencia del árido grueso en las muestras de mortero, las mezclas evaluadas son: las mezclas patrón, las muestras con inclusión de zeolita y las muestras con relación $a/c = 0.55$.

Los valores de retracción experimentados por cada una de las muestras fueron agrupados en función de cada uno de los niveles del factor evaluado (Fig. 3.33) y fueron procesados

estadísticamente con el fin de determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre ellos.

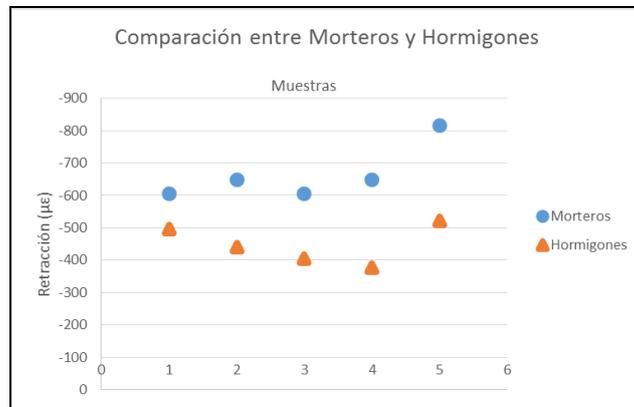


Fig. 3.33 “Valores de retracción obtenidos en función de la Relación a/c”.

El procedimiento aplicado para la comparación de los resultados fue un análisis de comparación múltiple entre muestras, este análisis se basa en la aplicación de pruebas de hipótesis, las cuales fueron realizadas para la obtención de un intervalo de confianza del orden del 95%. También se aplican en él análisis comparativos generales de las variables implícitas, Análisis de Anova y Prueba de Múltiples Rangos.

La realización del análisis de ANOVA permite la descomposición de la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro de grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 20.9503, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, se demuestra que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 2 variables con un nivel del 95,0% de confianza.

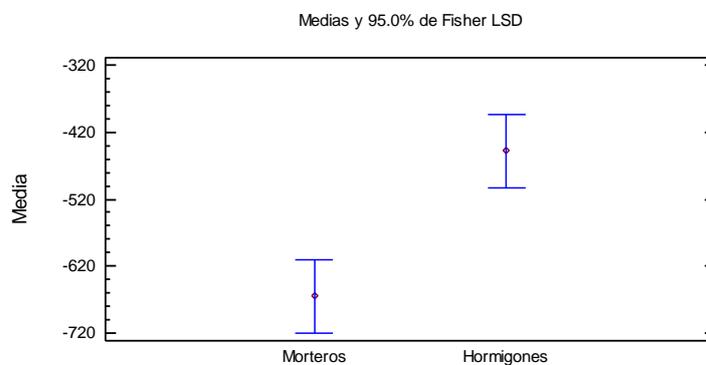


Fig. 3.34 “Diagrama de Fisher”.

A partir del análisis de los resultados se demuestra que existen diferencias estadísticamente significativas en la manifestación de los valores de retracción de cada una de las muestras, por lo que se concluye que las deformaciones producto del secado del hormigón se generan en mayor medida a escala de morteros, produciéndose una reducción del encogimiento del orden del 48% al evaluar el efecto del árido grueso en los hormigones.

Estos resultados muestran la importancia del uso de los áridos gruesos en la reducción del desarrollo de la retracción por secado en los elementos de hormigón.

3.5 Análisis de las medidas de mitigación de la retracción del hormigón

Como medidas de mitigación a la retracción del hormigón se evalúan muestras que contengan en su dosificación material puzolánico (zeolita), y aditivos que reduzcan el encogimiento del material durante su proceso de secado. Se evalúa la muestra MM4 con sustitución del 10% de cemento por zeolita comparándola con su patrón de referencia MM1, la muestra MH18 elaborada con el aditivo Microorganismos Eficientes Finlay (MEF-32), y las muestras MH14 y MH15 con utilización del 0.5% y 1.5% respectivamente al peso del cemento, del aditivo Shriko-tec nano 4. Estas últimas son sometidas a comparación con el patrón de referencia MH1.

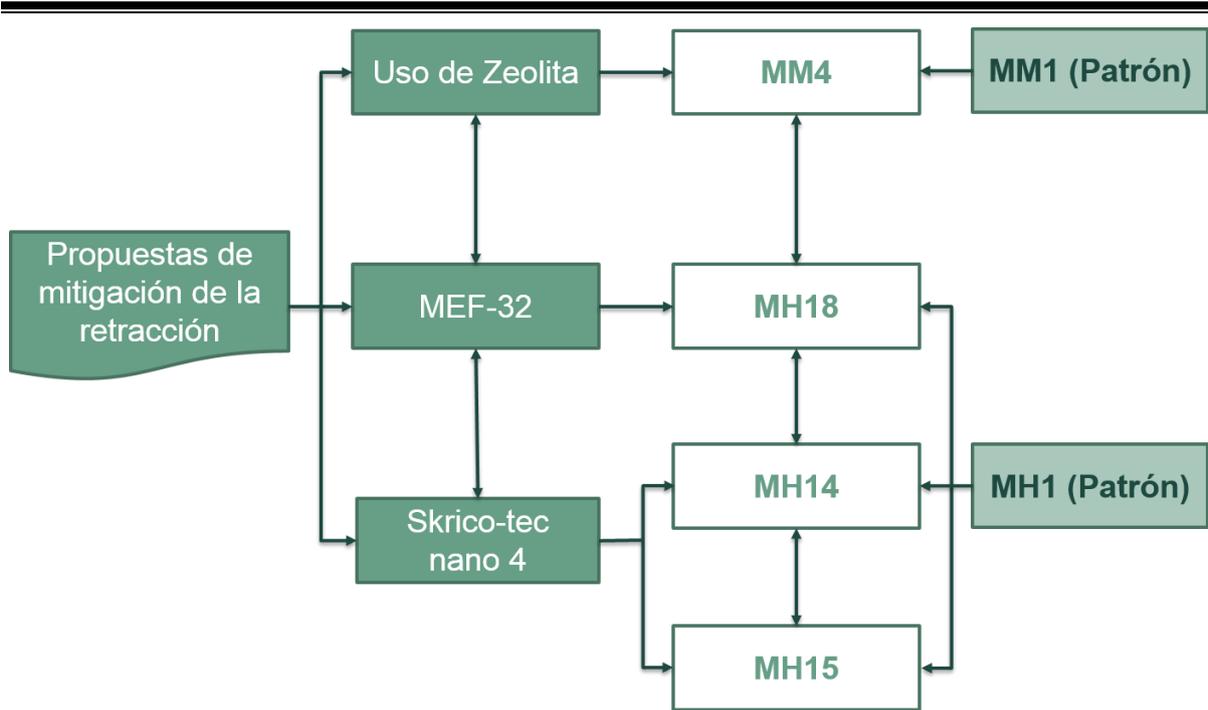


Fig. 3.35 “Esquema de análisis de las propuestas de mitigación de la retracción”.

3.5.1 Análisis general de las muestras propuestas como mitigación a la retracción

Los resultados de la aplicación de los ciclos de Sol y Sombra a las muestras analizadas se presentan en la gráfica siguiente, donde se indican como valores positivos a las expansiones experimentadas por las muestras y como valores negativos a las retracciones.

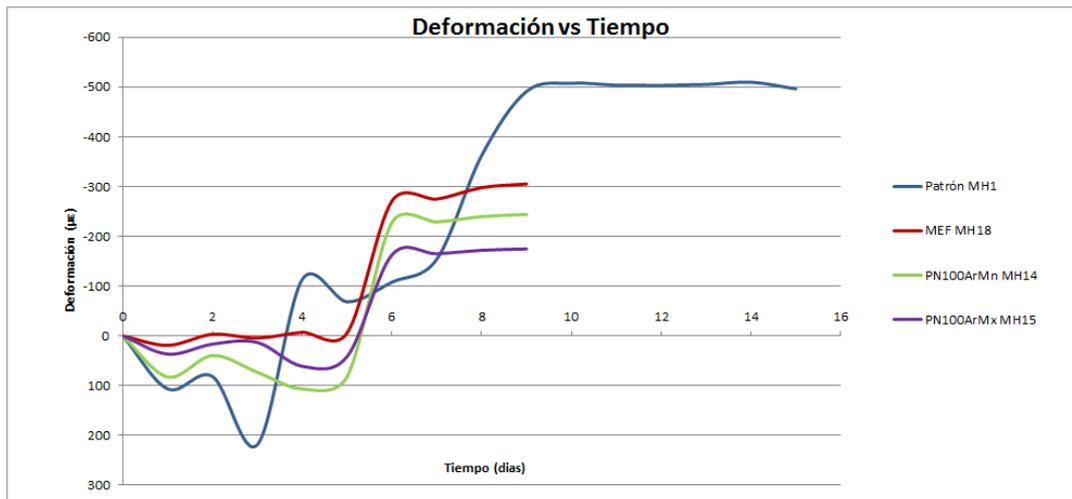


Fig. 3.36 “Retracción experimentada por las muestras”.

Tabla 3.7 “Valores de retracción para cada una de las condiciones aplicadas”

#	Muestra	Ciclo Sol	Ciclo Sombra
1	MH1	-154,11	-496,44
2	MH18	-5,67	-305,33
3	MH14	82,00	-244,00
4	MH15	41,67	-174,66

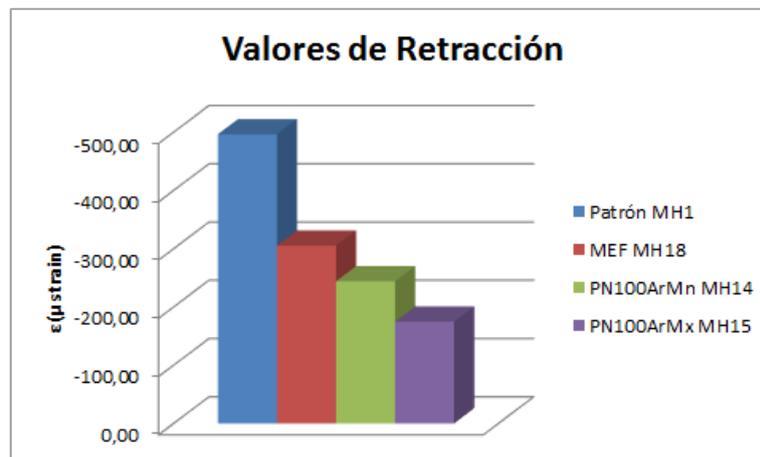


Fig. 3.37 “Retracción máxima experimentada por cada muestra”.

El gráfico anterior demuestra el efecto positivo de las medidas de mitigación de la retracción, notándose una disminución considerable de la deformación del hormigón con el uso de los aditivos, que generaron mejores respuestas que la adición de zeolita al compararse con sus respectivas muestras patrón de referencias.

3.5.2 Análisis de la influencia del uso de la zeolita en la retracción del hormigón.

El análisis del efecto de la zeolita se realiza comparando la muestra de mortero con sustitución del 10% de cemento por zeolita con su patrón de referencia.

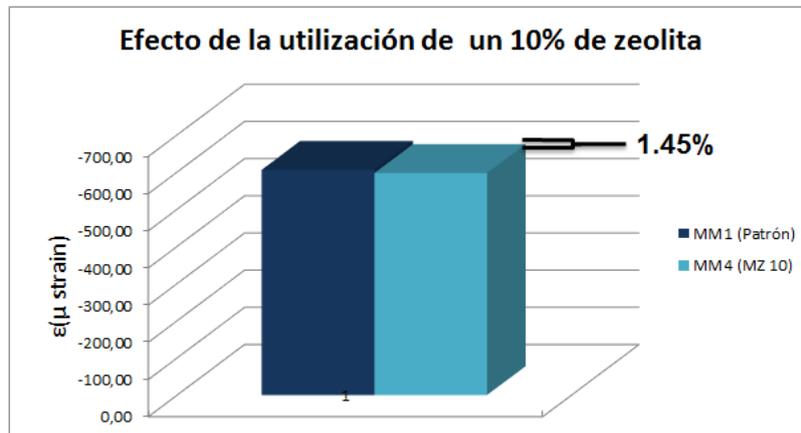


Fig. 3.38 “Efecto del uso de la zeolita en la retracción del hormigón”.

Con el gráfico anterior puede comprenderse la poca influencia de la zeolita en la retracción del hormigón. La adición de zeolita en este caso redujo discretamente la retracción del material en un 1.45%.

3.5.3 Análisis de la influencia del MEF-32 en la retracción del hormigón

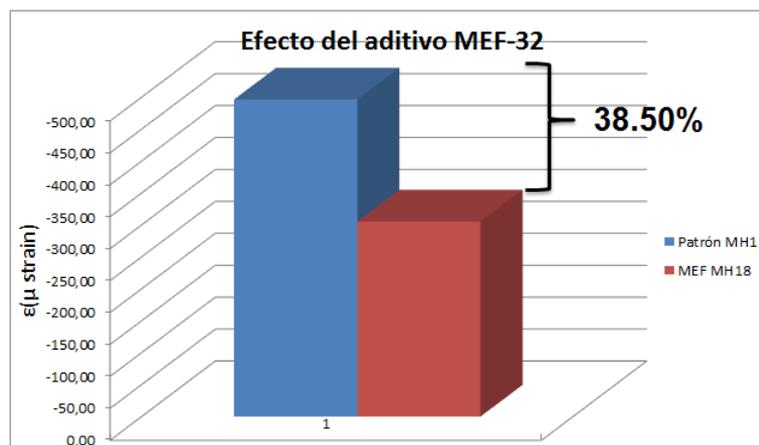


Fig. 3.39 “Efecto del aditivo MEF-32 en la retracción del hormigón”.

Al ser sometidas las muestras a condiciones de Sol y Sombra, y haciendo una comparación de la retracción que experimentan producto del secado, puede concluirse según el gráfico

anterior, que el aditivo MEF-32 tiene propiedades reductoras del encogimiento del hormigón. El efecto producido por este aditivo en la retracción del material es del orden del 38,50%.

3.5.4 Análisis de la influencia del aditivo Shrinko-tec nano 4 en la retracción del hormigón

Para la evaluación del efecto del aditivo Shrinko-tec nano 4, se compara la mezcla patrón (MH1) con dos muestras (MH14 y MH15) que contienen 0,5 y 1,5% de este aditivo respectivamente.

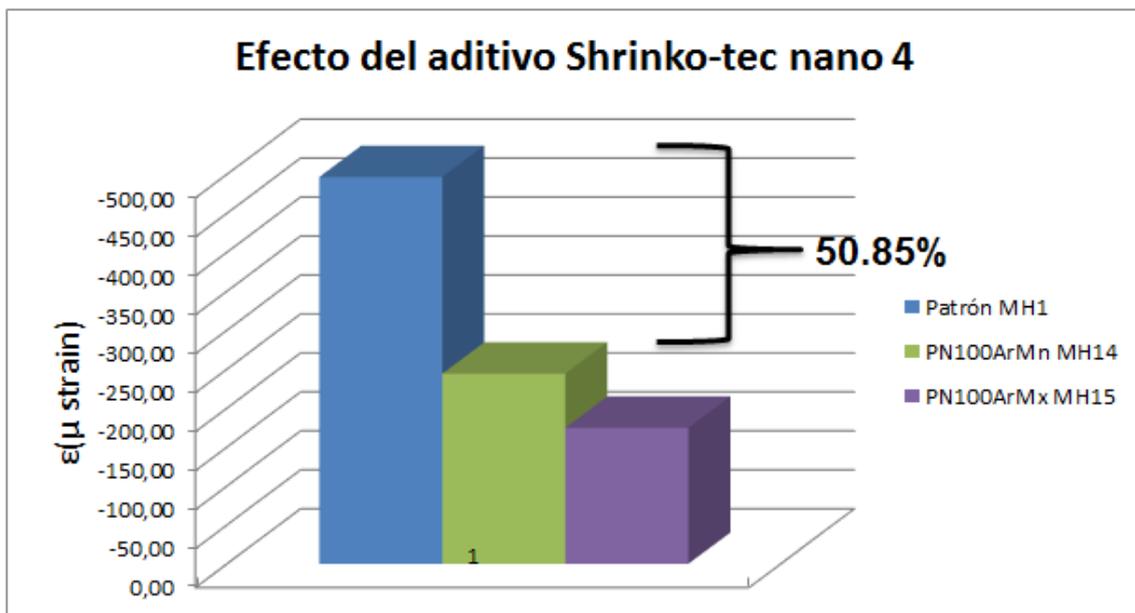


Fig. 3.40 “Efecto del aditivo Shrinko-tec nano 4 en la retracción del hormigón”.

El análisis realizado demuestra el efecto positivo del aditivo Shrinko-tec nano 4 en la reducción de la retracción del hormigón, evidenciándose un mejor comportamiento al usar la máxima proporción (1,5% del peso del cemento); mientras el uso de un mínimo de 0,5% experimenta la máxima deformación, reduciendo la retracción del material en un 50,85%.

Puede concluirse entonces, que el uso del aditivo Shrinko-tec nano 4, es favorable para reducir la retracción que experimentan los hormigones producidos en la ECOT “Cayo Santa María”.

Conclusiones parciales

- El análisis estadístico de las variables estudiadas en los hormigones que produce la ECOT “Cayo Santa María”, demuestra que el tipo de árido grueso y la Humedad Relativa son los únicos factores que experimentan una influencia significativa en el desarrollo de la retracción del material.
- El análisis estadístico de las variables estudiadas en los hormigones que produce la ECOT “Cayo Santa María”, demuestra que tanto el tipo de árido fino, la cantidad de cemento y la relación agua/cemento son factores que no ofrecen una influencia significativa en el desarrollo de la retracción del material.
- A partir de los resultados del análisis estadístico y de la confección de los contornos de respuesta puede afirmarse que con la utilización del árido grueso de las canteras Armando Mestre y El Yigre, puede lograrse el mejor efecto atenuador de la retracción del hormigón, mientras que el peor efecto se produce al utilizar los áridos gruesos de la cantera Algaba.
- Con el análisis de los morteros evaluados puede concluirse que un aumento del 15% en la concentración de cemento en la mezcla genera un mayor desarrollo de la retracción, provocando un aumento en los valores de la retracción en el orden del 17%. Mientras que el decremento genera una menor manifestación de la retracción, provocando una disminución en los valores de la retracción en el orden del 15%.
- El análisis de la influencia de la relación agua/cemento en los morteros estudiados, demuestra que al aumentar el contenido de agua en las mezclas se produce un aumento en la retracción durante el secado del material.
- Al evaluar diferentes muestras de morteros con sustitución del contenido de cemento por zeolita (10, 15 y 20%), se puede concluir que las diferencias entre los valores de retracción de estos, no son estadísticamente significativos. La sustitución que alcanza reducir discretamente la retracción fue la del 10% de cemento por zeolita.
- Al someter las muestras a regímenes de Sol y Sombra que implican una disminución en la humedad relativa, los resultados analizados demuestran que al variar la humedad de un 70% a un 45%, se experimentan las mayores deformaciones en el

hormigón; por lo que se verifica la influencia del aire acondicionado de las habitaciones de los bungalows en la retracción y posterior fisuración de los muros.

- Al efectuar una comparación entre las deformaciones de hormigones y morteros, se aprecian valores inferiores en las muestras de los primeros, por lo que se demuestra el efecto positivo del árido grueso como reductor de la retracción del hormigón.
- La validación del uso de aditivos químicos como reductores de la retracción del hormigón, queda demostrado con el análisis del efecto del MEF-32 y el Shrinko-tec nano 4, que reducen la deformación del material en un 38.50% y 50.85% respectivamente.
- Se concluye que el mejor efecto reductor de la retracción se le atribuye al aditivo Shrinko-tec nano 4, siguiéndole el aditivo MEF-32 y por último la adición de zeolita, que demostró no influir significativamente en la retracción del hormigón.

Conclusiones

- Se demuestra la influencia de la variación de la humedad relativa en el desarrollo de la retracción del hormigón, por lo que puede verificarse el cambio de volumen de los muros de los bungalows en cayo Santa María al disminuir la humedad relativa en las habitaciones cuando se encienden los aires acondicionados.
- Los áridos gruesos tienen un efecto moderador de la retracción del hormigón, y de los utilizados en la ECOT “Cayo Santa María”, el de peor comportamiento proviene de la cantera Algaba y los mejores se extraen de las canteras El Yigre y Armando Mestre.
- La mejor combinación de áridos para disminuir los valores de retracción del hormigón es utilizando árido fino de Arimao y áridos gruesos de El Yigre y Armando Mestre.
- Con el análisis de los morteros evaluados se pudo verificar la influencia negativa en la retracción del hormigón al aumentar en un 15 % la cantidad de cemento en la mezcla, y una reducción de la deformación al disminuir en un 15% el contenido de cemento en el hormigón.
- Los análisis realizados a muestras de morteros con diferentes sustituciones de cemento por zeolita, arribaron a que no se producen disminuciones significativas de la retracción del hormigón con esta práctica, y que solo se alcanzaron disminuciones discretas al sustituir el 10% de cemento por zeolita.
- La validación del uso de aditivos químicos como reductores de la retracción del hormigón, queda demostrado con el análisis del efecto del MEF-32 y el Shrinko-tec nano 4, que reducen la deformación del material en un 38.50% y 50.85% respectivamente.
- Se concluye que el mejor efecto reductor de la retracción se le atribuye al aditivo Shrinko-tec nano 4, siguiéndole el aditivo MEF-32 y por último la adición de zeolita, que demostró no influir significativamente en la retracción del hormigón.

Recomendaciones

- Se recomienda el uso de los áridos gruesos de la cantera El Yigre y Armando Mestre y no utilizar en las dosificaciones de hormigones para los muros de los bungalows, los áridos de la cantera Algaba.
- Realizar pruebas industriales con el aditivo Shrinko-tec nano 4, y monitorear los muros fabricados con el objetivo de localizar posibles fisuraciones.
- Continuar el estudio del efecto reductor de la retracción del MEF-32, para lograr una buena caracterización del producto, y justificar su uso extendido como medida de mitigación de la deformación del hormigón.
- Lograr una buena coordinación del proceso de colocación, compactación y curado del hormigón en obra, para obtener los resultados esperados de un buen diseño del material.
- Realizar ensayos más sofisticados de cambio de volumen como la “Determinación de la deformación en el canal de retracción”, que registra de forma automatizada y precisa las deformaciones del hormigón.

Referencias bibliográficas

- ACEVEDO, J. E. A. 1985. *Materiales de Construcción*, La Habana, Ediciones MES.
- ARQUITECTUBA. 2009. *Propiedades del Hormigón Endurecido* [Online]. Available: www.arquitectuba.com.ar/monografias-de-rquitectura/propiedades-del-hormigon-endurecido/.
- ASTM 2006. Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. *c157*.
- AUSTRALIA, C. C. A. 2004. HOT-WEATHER Concreting
- AUSTRALIA, C. C. A. Julio 2002. Drying Shrinkage of Cement and Concrete.
- BASF. 2009. Hormigón de retracción compensada. *Construction Chemicals España* [Online].
- BAZANT, Z. P. & RAFTSHOL, W. J. 2002. *Effect of Cracking in Drying and shrinkage Specimens p. 209-226*.
- BETANCOURT, S. 2013. Departamento de Ingeniería Civil. UCLV. *Tecnología del Hormogón*.
- CASANOVA., I. S. El lenguaje de las fisuras *BIA*.
- COPELAND, L. E. & BRAGG, R. H. *Self Desiccation in Portland Cement Pastes*, Portland Cement Association.
- DÍAZ GÓMEZ, M. 2012. *Evaluación de la fisuración de hormigones en zonas marinas, producto de cambios autógenos de volumen, específicamente debidos a la retracción por secado*. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- EHE 1999. *Instrucción de Hormigón Estructural*. Centro de publicaciones del Ministerio de Fomento.
- GRANT, T., POSTON, W. & RANDALL, H. 2003. Causas, Evaluación y Reparación de Fisuras en Estructuras de Hormigón p. 2-18.
- HOLT, E. E. 2001. *Early Age Autogenous Shrinkage of Concrete*, Espoo.
- IDEKER, J. H. 2008. *Early-Age Behavior of Calcium Aluminate Cement Systems*. Doctor, University of Texas.
- IDIART, A. *Análisis numérico de la retracción por secado en muestras de hormigón p. 21-30*. Doctor of Philosophy.
- IMCYC. 2011. *Arte de la tecnología* [Online]. Available: <http://www.imcyc.com/revistacyt/dic11/arttecnologia.html>
- JIMÉNEZ MONTOYA, P., GARCÍA MESEGUER, A. & MORÁN CABRÉ, F. 1987. *Hormigón Armado Tomo I p. 11-20*, Barcelona, Editorial Gustavo Gili S.A.
- LÓPEZ, C. M., SEGURA, J. M., IDIART, A. E. & CAROL, I. 2005. *Mesomechanical Modeling of Drying Shrinkage Using Interface Elements p. 107-112*, France.
- NC-120 2007. Hormigón hidráulico. Especificaciones.
- NC-168 2002. HORMIGÓN FRESCO. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE FRAGUADO POR RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN.
- NORLING, K. 2004. *Self-desiccation in concrete*. Chalmers Univ. of Tech.

- SANT, G. N. 2009. *Fundamental Investigations Related to the Mitigation of Volume Changes in Cement-Based Materials at Early Ages*. Doctor of Philosophy, Purdue University.
- THOMA, M. D. A., FOLLIARD, K. J. & SCRIVENER, K. 2001. Doctoral Course "Concrete Durabilit". EPFL.Lausanne, Switzerland.

Bibliografía

- ACEVEDO, J. E. A. 1985. *Materiales de Construcción*, La Habana, Ediciones MES.
- ARQUITECTUBA. 2009. *Propiedades del Hormigón Endurecido* [Online]. Available: www.arquitectuba.com.ar/monografias-de-rquitectura/propiedades-del-hormigon-endurecido/.
- ASTM 2006. Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. *c157*.
- ASTM 2007. Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete. *c490*.
- AUSTRALIA, C. C. A. 2004. HOT-WEATHER Concreting
- AUSTRALIA, C. C. A. Julio 2002. Drying Shrinkage of Cement and Concrete.
- BASF. 2009. Hormigón de retracción compensada. *Construction Chemicals España* [Online].
- BAZANT, Z. P. & RAFTSHOL, W. J. 2002. *Effect of Cracking in Drying and shrinkage Specimens p. 209-226*.
- BETANCOURT, S. 2013. Departamento de Ingeniería Civil. UCLV. *Tecnología del Hormogón*.
- CASANOVA, I. S. El lenguaje de las fisuras *BIA*.
- COPELAND, L. E. & BRAGG, R. H. *Self Desiccation in Portland Cement Pastes*, Portland Cement Association.
- DÍAZ GÓMEZ, M. 2012. *Evaluación de la fisuración de hormigones en zonas marinas, producto de cambios autógenos de volumen, específicamente debidos a la retracción por secado*. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- EHE 1999. *Instrucción de Hormigón Estructural*. Centro de publicaciones del Ministerio de Fomento.
- GHOLAMREZA, F., GHANI, A., BURKAN, O., ABDELGADIR, A. & FOURNIER, B. 2010. Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate. *Cement & Concrete Composites* [Online].
- GRANT, T., POSTON, W. & RANDALL, H. 2003. Causas, Evaluación y Reparación de Fisuras en Estructuras de Hormigón p. 2-18.
- HOLT, E. E. 2001. *Early Age Autogenous Shrinkage of Concrete*, Espoo.
- IDEKER, J. H. 2008. *Early-Age Behavior of Calcium Aluminate Cement Systems*. Doctor, University of Texas.

- IDIART, A. *Análisis numérico de la retracción por secado en muestras de hormigón p. 21-30*. Doctor of Philosophy.
- IMCYC. 2011. *Arte de la tecnología* [Online]. Available: <http://www.imcyc.com/revistacyt/dic11/arttecnologia.html>
- JIMÉNEZ MONTOYA, P., GARCÍA MESEGUER, A. & MORÁN CABRÉ, F. 1987. *Hormigón Armado Tomo I p. 11-20*, Barcelona, Editorial Gustavo Gili S.A.
- LÓPEZ, C. M., SEGURA, J. M., IDIART, A. E. & CAROL, I. 2005. *Mesomechanical Modeling of Drying Shrinkage Using Interface Elements p. 107-112*, France.
- LOUKILI, A., ROZIÈRE, E., DARQUENNES, A., KHOKHAR, A., GRONDIN, F. & STAQUET, S. 2010. Early age deformations of concrete with high content of mineral additions. *Construction and Building Materials* [Online].
- NC-120 2007. Hormigón hidráulico. Especificaciones.
- NC-168 2002. HORMIGÓN FRESCO. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE FRAGUADO POR RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN.
- NORLING, K. 2004. *Self-desiccation in concrete*. Chalmers Univ. of Tech.
- SAMDARIYA, A., GAURAV, S., DEHADRAI, M. & WEISS, J. 2008. THE INFLUENCE OF A LIME-BASED EXPANSIVE ADDITIVE ON VOLUME CHANGES, RESIDUAL STRESS DEVELOPMENT, AND STRENGTH EVOLUTION IN CEMENTITIOUS MATERIALS.
- SANT, G. N. 2009. *Fundamental Investigations Related to the Mitigation of Volume Changes in Cement-Based Materials at Early Ages*. Doctor of Philosophy, Purdue University.
- SIMCO, T. I. 2010. Unified Facilities Guide Specifications. STADIUM
- TEJERA, P. & ÁLVAREZ, O. 2012. *Patología de la construcción*, Editorial Félix Varela.
- THOMA, M. D. A., FOLLIARD, K. J. & SCRIVENER, K. 2001. Doctoral Course "Concrete Durabilit". EPFL. Lausanne, Switzerland.

Anexos

Anexo 1: Resultados de los análisis estadísticos a las muestras.

Hormigones

Análisis de la variable Tipo de Árido Grueso.

Tabla de resultados del análisis comparativo general.

	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
Yigre	8	-424,375	95,7731	-22,568%	-617,333	-321,0	296,33
Arm Mestre	8	-404,625	52,1717	-12,8938%	-486,333	-323,0	163,33
Purio	9	-480,852	62,363	-12,9693%	-583,667	-416,0	167,66
Algaba	3	-648,667	50,5206	-7,78838%	-705,333	-608,333	97,0
Total	28	-460,917	99,0394	-21,4875%	-705,333	-321,0	384,33

Tabla de resultados del Análisis de Anova.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	145359,	3	48453,1	9,73	0,0002
Intra grupos	119478,	24	4978,27		
Total (Corr.)	264838,	27			

Tabla de comparación múltiple de la Prueba de Múltiples Rangos.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Yigre - Arm Mestre		-19,75	72,8112
Yigre - Purio		56,4769	70,7598
Yigre - Algaba	*	224,292	98,5869
Arm Mestre - Purio	*	76,2269	70,7598
Arm Mestre - Algaba	*	244,042	98,5869
Purio - Algaba	*	167,815	97,0816

* indica una diferencia significativa.

Análisis de la variable Tipo de Árido Fino.

Tabla de resultados del análisis comparativo general.

	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
Arima o	6	-468.63	115.027	-24.5454%	- 648.667	-334.0	314.667
Purio	9	-480.852	62.363	-12.9693%	- 583.667	-416.0	167.667
Algaba	3	-410.889	82.3747	-20.0479%	- 486.333	-323.0	163.333
Total	18	-465.117	84.7018	-18.2109%	- 648.667	-323.0	325.667

Tabla de resultados del Análisis de Anova.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	11124.4	2	5562.18	0.75	0.4881
Intra grupos	110840.	15	7389.36		
Total (Corr.)	121965.	17			

Tabla de comparación múltiple de la Prueba de Múltiples Rangos.

Contraste	Sig	Diferencia	+/- Límites
Arimao - Purio	.	12.2222	96.5669
Arimao - Algaba		-57.7407	129.558
Purio - Algaba		-69.963	122.149

* indica una diferencia significativa.

Análisis de la variable Cantidad de Cemento.

Tabla de resultados del análisis comparativo general.

	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
C 410	5	-455.6	123.555	-27.1191%	-648.667	-334.0	314.667
c 390	6	-501.222	65.8765	-13.1432%	-583.667	-434.0	149.667
C 369 Z	5	-433.133	36.5807	-8.44559%	-475.333	-383.667	91.6667
C 400	3	-410.889	82.3747	-20.0479%	-486.333	-323.0	163.333
Total	19	-457.035	82.5481	-18.0617%	-648.667	-323.0	325.667

Tabla de resultados del Análisis de Anova.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	20970.2	3	6990.07	1.03	0.4069
Intra grupos	101685.	15	6779.02		
Total (Corr.)	122656.	18			

Tabla de comparación múltiple de la Prueba de Múltiples Rangos.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
C 410 - c 390		45.6222	106.266
C 410 - C 369 Z		- 22.4667	110.991
C 410 - C 400		- 44.7111	128.162
c 390 - C 369 Z		- 68.0889	106.266
c 390 - C 400		- 90.3333	124.092
C 369 Z - C 400		- 22.2444	128.162

* indica una diferencia significativa.

Análisis de la variable Relación a/c.

Tabla de resultados del análisis comparativo general.

	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
a	6	-427.648	64.8206	-15.1575%	-500.333	-334.0	166.333
b	5	-472.667	72.1388	-15.2621%	-579.667	-383.667	196.0
c	6	-529.778	143.863	-27.1554%	-705.333	-323.0	382.333
Total	17	-476.935	105.098	-22.0361%	-705.333	-323.0	382.333

Tabla de resultados del Análisis de Anova.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	31420.4	2	15710.2	1.51	0.2540
Intra grupos	145308.	14	10379.1		
Total (Corr.)	176728.	16			

Tabla de comparación múltiple de la Prueba de Múltiples Rangos.

Contra- ste	Sig.	Diferenc ia	+/- Límites
a - b		45.0185	132.313
a - c		102.13	126.155
b - c		57.1111	132.313

* indica una diferencia significativa.

Análisis de la variable Humedad Relativa.

Resumen Estadístico

	HR 70 %	HR 45 %
Recuento	10	10
Promedio	-67,2944	-466,522
Desviación Estándar	93,0519	89,7089
Coefficiente de Variación	-138,276%	-19,2293%
Mínimo	-206,111	-648,667
Máximo	35,1667	-334,0
Rango	241,278	314,667
Sesgo Estandarizado	-0,502939	-0,806392
Curtosis Estandarizada	-1,01473	0,454805

MorterosAnálisis general de las muestras.

Tabla de resultados del análisis comparativo general.

	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
MM1	3	-605.89	50.7123	-8.36988%	-651.0	-551.0	100.0
MM2	3	-709.0	98.0989	-13.8362%	-822.0	-645.67	176.33
MM3	3	-511.11	17.9707	-3.51601%	-530.67	-495.33	35.34
MM4	3	-597.113	28.5951	-4.78889%	-627.67	-571.0	56.67
MM5	3	-648.89	39.76	-6.12738%	-694.67	-623.0	71.67
MM6	3	-613.0	79.5886	-12.9835%	-696.0	-537.33	158.67
MM7	3	-573.333	30.2379	-5.27406%	-596.0	-539.0	57.0
MM8	3	-727.223	28.1492	-3.87078%	-759.67	-709.33	50.34
MM9	3	-816.0	30.7719	-3.77106%	-849.33	-788.67	60.66
Total	27	-644.618	98.4245	-15.2687%	-849.33	-495.33	354.0

Análisis de la variable Cantidad de Cemento.

Tabla de resultados del análisis comparativo general.

	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
MM1	3	-605.89	50.7123	-8.36988%	-651.0	-551.0	100.0
MM2	3	-709.0	98.0989	-13.8362%	-822.0	-645.67	176.33
MM3	3	-511.11	17.9707	-3.51601%	-530.67	-495.33	35.34
Total	9	-608.667	102.354	-16.8162%	-822.0	-495.33	326.67

Tabla de resultados del Análisis de Anova.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	58775.4	2	29387.7	7.04	0.0267
Intra grupos	25036.2	6	4172.69		
Total (Corr.)	83811.5	8			

Tabla de comparación múltiple de la Prueba de Múltiples Rangos.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
MM1 - MM2		103.11	129.057
MM1 - MM3		-94.78	129.057
MM2 - MM3	*	-197.89	129.057

* indica una diferencia significativa.

Análisis de la variable Relación a/c.

Tabla de resultados del análisis comparativo general.

	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
MM1	3	-605.89	50.7123	-8.36988%	-651.0	-551.0	100.0
MM7	3	-573.333	30.2379	-5.27406%	-596.0	-539.0	57.0
MM8	3	-727.223	28.1492	-3.87078%	-759.67	-709.33	50.34
MM9	3	-816.0	30.7719	-3.77106%	-849.33	-788.67	60.66
Total	12	-680.612	105.845	-15.5514%	-849.33	-539.0	310.33

Tabla de resultados del Análisis de Anova.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	112784.	3	37594.6	28.78	0.0001
Intra grupos	10450.7	8	1306.34		
Total (Corr.)	123235.	11			

Tabla de comparación múltiple de la Prueba de Múltiples Rangos.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
MM1 - MM7		- 32.5567	68.0524
MM1 - MM8	*	121.333	68.0524
MM1 - MM9	*	210.11	68.0524
MM7 - MM8	*	153.89	68.0524
MM7 - MM9	*	242.667	68.0524
MM8 - MM9	*	88.7767	68.0524

* indica una diferencia significativa.

Análisis de la variable Adición de Zeolita.

Tabla de resultados del análisis comparativo general.

	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
MM1	3	-605.89	50.7123	-8.36988%	-651.0	-551.0	100.0
MM4	3	-597.113	28.5951	-4.78889%	-627.67	-571.0	56.67
MM5	3	-648.89	39.76	-6.12738%	-694.67	-623.0	71.67
MM6	3	-613.0	79.5886	-12.9835%	-696.0	-537.33	158.67
Total	12	-616.223	49.7792	-8.07811%	-696.0	-537.33	158.67

Tabla de resultados del Análisis de Anova.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	4648.41	3	1549.47	0.55	0.6632
Intra grupos	22609.2	8	2826.15		
Total (Corr.)	27257.6	11			

Tabla de comparación múltiple de la Prueba de Múltiples Rangos.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
MM1 - MM4		-8.77667	100.095
MM1 - MM5		43.0	100.095
MM1 - MM6		7.11	100.095
MM4 - MM5		51.7767	100.095
MM4 - MM6		15.8867	100.095
MM5 - MM6		-35.89	100.095

* indica una diferencia significativa.

Análisis de la variable Variación de la Humedad Relativa.

Tabla de resultados del análisis comparativo general.

	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
HR 100	9	23.6049	29.499	124.969%	-22.5556	59.5556	82.1111
HR 70	9	-581.84	92.7032	-15.9328%	-742.667	-444.667	298.0
HR 45	9	-688.691	87.8537	-12.7566%	-850.0	-566.111	283.889
Total	27	-415.642	327.784	-78.8621%	-850.0	59.5556	909.556

Tabla de resultados del Análisis de Anova.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2.65604E6	2	1.32802E6	231.87	0.0000
Intra grupos	137459.	24	5727.45		
Total (Corr.)	2.7935E6	26			

Tabla de comparación múltiple de la Prueba de Múltiples Rangos.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
HR 100 - HR 70	*	605.444	73.6315
HR 100 - HR 45	*	712.296	73.6315
HR 70 - HR 45	*	106.852	73.6315

* Indica una diferencia significativa.

Análisis de la variable Variación de la Humedad Relativa.

Tabla de resultados del análisis comparativo general.

	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
Morteros	5	-665.111	87.0464	-13.0875%	-816.0	-605.889	210.111
Hormigones	5	-447.587	60.9551	-13.6186%	-521.07	-375.62	145.45
Total	10	-556.349	134.768	-24.2237%	-816.0	-375.62	440.38

Tabla de resultados del Análisis de Anova.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	118292.	1	118292.	20.95	0.0018
Intra grupos	45170.4	8	5646.3		
Total (Corr.)	163462.	9			

Tabla de comparación múltiple de la Prueba de Múltiples Rangos.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Morteros - Hormigones	*	-217.524	109.591

* Indica una diferencia significativa.

Anexo 2: Resumen de las deformaciones de las muestras evaluadas

Tabla de deformación acumulada de las muestras de hormigón tomadas de planta

Muestras		Código	ΔL (mm/mm) x10-6 Acumulativo															
			Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Día 11	Día 12	Día 13	Día 14	Día 15
MH1	Patron	648	0	106,56	81,67	218,56	-113,22	-68,44	-107,89	-154,11	-362,50	-491,44	-507,67	-503,89	-503,33	-505,22	-509,89	-496,44
MH2	CPP+Z	650	0	142,44	115,67	186,33	-16,89	-14,00	-40,11	-77,33	-332,22	-436,11	-455,78	-447,89	-451,89	-457,33	-455,33	-440,11
MH3	CAY	493	0	187,67	182,17	260,17	77,67	85,50	59,50	35,17	-274,00	-327,00	-398,50	-340,67	-343,33	-348,00	-349,83	-334,00
MH4	CAY	519	0	178,22	196,56	184,89	72,78	93,56	67,89	25,56	-327,44	-380,89	-392,33	-396,44	-402,11	-405,56	-410,67	-408,67
MH5	NAY	526	0	166,78	150,56	43,44	2,44	28,44	-23,44	-20,11	-359,89	-461,67	-433,22	-485,89	-486,67	-501,67	-504,22	-500,33
MH6	MAAm	531	0	152,33	106,78	179,11	105,78	120,78	31,56	26,22	-297,11	-349,78	-445,78	-366,11	-370,00	-377,44	-383,56	-386,33
MH7	CAAm	539	0	106,67	90,44	43,22	-17,33	-29,00	-59,78	-106,33	-393,44	-475,22	-485,00	-499,89	-505,67	-516,00	-523,22	-533,78
MH8	CAAg	558	0	0,22	26,67	-28,56	-108,11	-123,67	-145,33	-191,56	-543,33	-577,22	-622,11	-621,89	-633,11	-644,33	-653,44	-648,67
MH9	CAgsAm	562	0	174,67	139,78	245,81	57,33	69,89	63,67	-4,33	-295,78	-351,11	-374,22	-379,33	-389,67	-402,11	-406,51	-410,89
MH10	CPHP	634	0	47,67	12,67	-60,78	-106,00	-113,67	-137,67	-206,11	-392,78	-444,78	-483,33	-482,56	-483,89	-496,43	-507,78	-506,00

Tabla de deformación acumulada de las muestras de morteros

Muestras		ΔL (mm/mm) x10-6 Acumulativo															
		Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Día 11	Día 12	Día 13	Día 14	Día 15
MM1	Patron	0	41,22	48,33	51,56	93,00	52,89	88,00	77,78	79,89	46,56	68,63	56,22	64,67	69,22	49,00	64,89
MM2	MC+15	0	36,11	45,44	43,33	88,67	52,22	76,00	59,44	62,67	33,11	50,44	39,22	42,67	53,11	39,00	69,00
MM3	MC-15	0	25,89	34,44	11,33	55,56	40,33	66,78	57,11	66,89	40,56	49,56	34,33	36,89	24,33	25,11	48,33
MM4	MZ-10	0	36,00	39,67	45,67	72,00	72,22	97,22	90,56	92,67	60,78	75,11	68,44	74,44	81,89	49,56	86,56
MM5	MZ-15	0	21,22	19,78	22,11	36,33	36,22	40,89	39,22	39,33	7,56	18,33	12,89	16,33	26,11	-7,44	23,44
MM6	MZ-20	0	10,56	11,11	1,22	45,56	35,89	54,78	55,44	57,89	23,33	38,56	32,44	19,89	41,22	17,56	40,00
MM7	MP-0.40	0	21,00	13,89	10,78	33,22	48,11	58,00	82,11	68,44	31,11	44,67	28,44	35,56	40,67	21,78	42,67
MM8	MP-0.45	0	24,22	24,67	21,89	34,11	47,00	63,89	75,78	62,89	30,33	33,89	24,44	15,89	19,67	2,33	18,11
MM9	MP0.55	0	10,11	9,11	-5,67	18,44	34,33	48,11	58,96	48,22	25,22	15,33	5,56	2,78	6,56	-7,89	4,00

Tabla de deformación acumulada de las muestras de morteros

Muestras		ΔL (mm/mm) $\times 10^{-6}$ Acumulativo															
		Día 16	Día 17	Día 18	Día 19	Día 20	Día 21	Día 22	Día 23	Día 24	Día 25	Día 26	Día 27	Día 28	Día 29	Día 30	Día 31
MM1	Patron	49,78	47,78	79,33	87,78	40,78	75,44	59,44	58,11	54,44	27,78	58,44	28,44	45,78	-67,89	-119,22	-321,56
MM2	MC+15	57,33	53,67	57,11	77,33	48,00	72,67	56,00	69,67	44,67	20,67	61,33	31,33	47,67	-121,33	-190,67	-265,00
MM3	MC-15	46,22	39,89	45,81	69,56	42,56	64,22	51,56	58,56	29,89	28,56	51,56	31,89	43,22	-116,44	-164,78	-324,44
MM4	MZ-10	69,56	69,89	70,89	97,22	81,56	85,56	74,89	85,89	56,89	43,22	80,22	55,89	59,56	-31,44	-116,78	-342,78
MM5	MZ-15	17,44	20,78	-4,89	39,78	29,78	31,78	18,11	26,44	-12,56	-4,22	26,11	3,11	9,44	-149,56	-230,22	-451,22
MM6	MZ-20	31,33	36,33	14,22	55,67	32,33	53,33	40,00	44,00	18,67	14,00	39,00	21,33	28,67	-46,67	-137,33	-361,33
MM7	MP-0.40	35,67	39,67	24,43	58,00	33,00	57,33	40,67	51,33	35,00	14,33	30,00	21,67	20,00	23,00	-84,00	-332,67
MM8	MP-0.45	11,11	5,11	-21,89	8,78	-0,56	6,11	-8,56	-22,89	-19,89	-37,22	-13,56	-27,22	-22,56	-79,56	-165,56	-401,22
MM9	MP0.55	5,33	1,67	-19,33	4,67	-5,00	-1,00	-16,67	-26,33	-20,00	-34,00	-8,33	-23,00	-19,33	-104,67	-202,33	-441,33

Tabla de deformación acumulada de las muestras de morteros

Muestras		ΔL (mm/mm) x10 ⁻⁶ Acumulativo								
		Día 32	Día 33	Día 34	Día 35	Día 36	Día 38	Día 39	Día 40	Día 41
MM1	Patron	-353,22	-430,22	-462,56	-579,56	-656,56	-604,89	-600,89	-602,22	-605,89
MM2	MC+15	-438,67	-544,33	-580,67	-693,67	-767,67	-699,00	-700,33	-705,33	-709,00
MM3	MC-15	-367,78	-405,78	-453,44	-541,11	-566,11	-519,78	-504,11	-505,78	-511,11
MM4	MZ-10	-351,44	-399,78	-468,11	-494,44	-638,11	-586,44	-578,11	-592,11	-597,11
MM5	MZ-15	-492,22	-511,56	-556,22	-585,22	-702,89	-641,89	-631,22	-645,56	-648,89
MM6	MZ-20	-466,00	-476,00	-521,67	-544,33	-655,00	-604,67	-593,33	-614,67	-613,00
MM7	MP-0.40	-319,00	-357,33	-372,67	-444,67	-612,33	-561,33	-548,00	-575,00	-573,33
MM8	MP-0.45	-418,56	-471,22	-503,22	-610,89	-749,56	-705,89	-705,22	-719,22	-727,22
MM9	MP0.55	-516,33	-592,33	-640,67	-742,67	-850,00	-786,00	-775,00	-799,67	-816,00

Tabla de deformación acumulada de las muestras de hormigón evaluadas como medidas de mitigación.

Muestras		ΔL (mm/mm) $\times 10^{-6}$ Acumulativo															
		Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Día 11	Día 14	Día 17	Día 21	Día 23
Ps	MH11	0	1,67	0,67	-55,33	-75,33	-33,67	-110,67	-74,67	-98,33	-88,00	-83,67	-81,00	-139,33	-124,67	-156,00	-134,33
P ArMn	MH12	0	-38,00	8,00	-64,33	-61,67	8,67	-74,67	-10,67	-45,33	-13,00	-0,33	13,00	-40,67	-15,33	-74,00	-46,33
P ArMx	MH13	0	-39,00	-5,00	-57,00	-75,33	-28,00	-113,00	-60,67	-101,67	-68,00	-73,67	-72,33	-142,00	-108,67	-160,00	-122,00
P N100 ArMn	MH14	0	-35,00	30,00	-1,00	4,00	70,00	-26,00	21,00	-20,00	24,00	16,67	25,00	-53,33	-11,00	-66,33	-20,67
P N100 ArMx	MH15	0	-43,00	-2,33	-61,67	-59,67	-13,67	-94,00	-49,67	-147,00	-125,00	-130,67	-141,00	-193,67	-165,33	-240,00	-213,33
P Sx ArMn	MH16	0	-24,33	-3,00	-30,00	-37,33	-24,67	-71,67	-47,67	-67,00	-49,00	-50,00	-72,33	-112,67	-77,00	-128,67	-100,00
P Sx ArMx	MH17	0	-76,33	-65,33	-108,33	-120,33	-90,67	-154,67	-120,67	-131,33	-153,33	-134,33	-161,00	-188,00	-147,67	-189,33	-169,67
MEF	MH18	0	-97,50	-78,17	-112,33	-135,33	-123,50	-180,00	-138,50	-167,67	-176,67	-160,00	-202,00	-230,33	-177,50	-261,33	-233,17

Tabla de deformación acumulada de las muestras de hormigón evaluadas como medidas de mitigación.

Muestras		ΔL (mm/mm) $\times 10^{-6}$ Acumulativo										
		Día 25	Día 28	Día 29	Día 30	Día 31	Día 32	Día 33	Día 34	Día 35	Día 36	Día 37
Ps	MH11	-148,67	-148,47	-124,33	-135,33	-178,00	-124,33	-177,00	-389,00	-403,67	-407,67	-422,67
P ArMn	MH12	-33,00	-18,67	23,33	23,33	17,00	79,67	44,33	-178,33	-178,00	-183,33	-189,00
P ArMx	MH13	-162,33	-134,00	-65,67	-94,00	-82,67	-21,67	-29,33	-293,00	-296,67	-302,67	-309,67
P N100 ArMn	MH14	-50,00	-22,00	60,67	17,67	51,33	84,67	60,00	-249,67	-251,00	-261,67	-266,00
P N100 ArMx	MH15	-242,67	-220,67	-184,00	-204,00	-207,33	-159,67	-179,00	-383,33	-385,67	-392,67	-395,33
P Sx ArMn	MH16	-140,00	-104,00	-65,67	-86,33	-81,33	-30,67	-42,00	-244,33	-250,33	-269,33	-276,33
P Sx ArMx	MH17	-224,00	-162,67	-154,67	-161,00	-160,33	-139,00	-150,33	-342,33	-353,67	-362,33	-374,33
MEF	MH18	-286,50	-250,50	-231,33	-253,67	-246,00	-257,50	-256,17	-521,50	-525,50	-548,33	-555,83

Tabla de deformación acumulada de las muestras de morteros con aditivos reductores de la retracción

Días	Muestras	
	MM10	MM11
	MP ArMn	MP ArMx
0	0	0
1	-34,00	14,00
2	-22,00	24,33
3	-36,00	0,33
4	-40,67	-1,67
5	-15,33	9,00
6	-59,67	-18,67
7	-18,67	6,33
8	-23,67	0,33
9	-49,00	-17,00
10	-41,00	-6,33
11	-2,33	18,67
14	-71,33	-44,67
17	-55,00	-34,00
21	-75,00	-46,00
23	-104,67	-67,00
25	-115,33	-76,00
28	-97,67	-47,67
29	-59,33	-9,67
30	-55,67	-22,33
31	-91,00	-60,33
32	-89,00	-52,67
33	-170,33	-146,00
34	-377,00	-328,00
35	-404,00	-354,33
36	-420,33	-371,33
37	-437,00	-388,33